

BADANIA DOŚWIADCZALNE ELEMENTÓW I KONSTRUKCJI BETONOWYCH

PUBLIKACJA POD PATRONATEM SEKCJI KONSTRUKCJI
BETONOWYCH KOMITETU INŻYNIERII LĄDOWEJ I WODNEJ PAN

ZESZYT NR 18

BIBLIOTEKA PŁ

BIBLIOTEKA BUDOWNICTWA
I ARCHITEKTURY

P.

M-23

**Investigation
of slab-column
connections
externally
strengthened
on punching**

**Badania połączeń płyta-słup
wzmacnianych zewnętrznie
na przebicie**

Tadeusz Urban
Marek Sitnicki
Jerzy Tarka

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr N506 010 31/0693
finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Department of Concrete
Structures Technical
University of Lodz, Poland

Katedra Budownictwa Betonowego
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Politechniki Łódzkiej
Łódź 2010

BADANIA DOŚWIADCZALNE ELEMENTÓW I KONSTRUKCJI BETONOWYCH

PUBLIKACJA POD PATRONATEM SEKCJI KONSTRUKCJI
BETONOWYCH KOMITETU INŻYNIERII LĄDOWEJ I WODNEJ PAN

ZESZYT NR 18

**Investigation
of slab-column
connections
externally
strengthened
on punching**

**Badania połączeń płyta-słup
wzmacnianych zewnętrznie
na przebicie**

Tadeusz Urban
Marek Sitnicki
Jerzy Tarka

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr N506 010 31/0693
finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Department of Concrete
Structures Technical
University of Lodz, Poland

Katedra Budownictwa Betonowego
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Politechniki Łódzkiej
Łódź 2010

Recenzent / Reviewer
prof. dr hab. inż. Tadeusz Godycki – Ćwirko

Tłumaczenie / Translation
dr inż. Anna Kosińska

Skład tekstu / Preparing of text
mgr inż. Jacek Filipczak

©2008 Katedra Budownictwa Betonowego, Łódź, Polska
©2008 Department of Concrete Structures Technical University of Lodz, Poland

ISSN 1230-6010

<https://doi.org/10.34658/kbb.2003.18>
DOI 10.34658/kbb.2003.18

Katedra Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej
Al. Politechniki 6, 93-590 Łódź, Polska
tel. (48) (42) 6313575, fax (48) (42) 6313584, e-mail: maciolek@p.lodz.pl

STRESZCZENIE

W ramach projektu badawczego wykonano i zbadano 12 modeli w skali naturalnej stanowiących fragment płyty żelbetowej wraz z odcinkiem słupa. Grubość płyty wynosiła 18cm, wymiary w rzucie 2,3×2,3m, a bok słupa o przekroju kwadratowym wynosił 25cm. Głównym celem badań było sprawdzenie doświadczalne możliwości wzmacniania płyt żelbetowych na przebicie za pomocą zbrojenia zewnętrznego mocowanego do górnej (rozciąganej) powierzchni płyty. Koncepcja ta wykorzystywała zależność nośności na przebicie od stopnia zbrojenia głównego płyty lub inaczej jego mocy ($\rho \cdot f_y / f_c$). Jako zbrojenia zewnętrznego użyto płaskowniki stalowe i taśmy typu CFRP.

Badania przeprowadzono w 3 seriach po 4 modele w każdej serii. Wszystkie modele w każdej serii były wykonane z tej samej mieszanki betonowej klasy C35/45. W każdej serii wykonywano modele odniesienia bez wzmocnienia.

Pierwsza seria dotyczyła zbrojenia w postaci płaskowników stalowych. Parametrami zmiennymi była liczba płaskowników i sposób ich mocowania do płyty. Najskuteczniejszym sposobem mocowania okazało się klejenie płaskowników wraz z ich jednoczesnym mocowaniem za pomocą śrub wklejanych. W modelu tym osiągnięto nośność 825kN, co w odniesieniu do modelu świadka (500kN) stanowiło wzrost nośności o 65%.

W drugiej serii wykorzystano taśmy CFRP jako zewnętrzne zbrojenie wzmacniające. Jeden z modeli miał przyklejone 8 taśm o przekroju 1,4×90mm ($A_s = 126 \text{ mm}^2$) zgodnie z technologią zalecaną przez firmę Sika. Okazało się, że wzrost nośności tego modelu w stosunku do świadka wyniósł tylko 11%. Zaobserwowano jednocześnie charakterystyczny sposób niszczenia tak wzmocnionego modelu, który polegał na odpajaniu się taśm od betonu w miejscu wylotu rysy ukośnej na górnej powierzchni płyty. Aby ograniczyć ten niekorzystny efekt odrywania się taśm od betonu, w następnym modelu taśmy zostały dodatkowo przytwierdzone wklejanymi śrubami w przewidywanym miejscu wylotu rysy ukośnej. Zabieg ten zaowocował wzrostem nośności o 26% w stosunku do świadka. W trzecim modelu podwojono liczbę taśm do 16 sztuk. Klejono je jedna na drugiej. Jednocześnie zastosowano dodatkowe mocowanie taśm za pomocą śrub. W tym trzecim modelu uzyskano wzrost nośności o 36%.

Trzecia seria została poświęcona często spotykanemu problemowi w praktyce zaniżania nośności na przebicie w wyniku przemieszczania się zbrojenia górnego płyty do dołu. W serii tej wykonano oprócz modelu świadka z nominalną otuliną zbrojenia 2cm, modele z otuliną 5cm. Jeden z nich również nie wzmocniono, pozostawiając jako drugiego świadka. Dwa pozostałe wzmocniono 8 płaskownikami stalowymi stosując jednocześnie ich klejenie i mocowanie śrubami. Wzmocnienie aplikowano w jednym z tych modeli do płyty nie obciążonej, a w drugim wypadku operację wzmacniania przeprowadzono na modelu pod obciążeniem. Najpierw badany element został obciążony do poziomu obciążenia odpowiadającemu eksploatacyjnemu, przy założeniu prawidłowego położenia zbrojenia. Ze względu na przemieszczenie zbrojenia, obciążenie to znacznie przekraczało obciążenie eksploatacyjne i odpowiadało sile równej 70% siły niszczącej. Następnie odciążono model do poziomu około 50% siły niszczącej. Po ustabilizowaniu się ugięć przystąpiono do montażu zewnętrznego zbrojenia. Oczekano kilka godzin potrzebnych do związania kleju i kontynuowano obciążanie modelu aż do zniszczenia. Uzyskano następujące wyniki siły niszczącej:

- | | |
|---|-----------------------|
| - model świadek z nominalną otuliną (2cm) | 475kN, |
| - model świadek ze zwiększoną otuliną (5cm) | 367kN, |
| - model wzmocniony przy zerowym obciążeniu | 700kN (wzrost o 91%), |
| - model wzmocniony pod obciążeniem | 675kN (wzrost o 84%). |

Uzyskane wyniki badań potwierdziły w pełni skuteczność proponowanej koncepcji wzmacniania żelbetowych płyt na przebicie poprzez zwiększenie mocy zbrojenia na zginanie.

SUMMARY

The research project included execution and experimental testing of 12 natural scale specimens, being a part of reinforced concrete flat slab with a fragment of column. The slab's thickness was 18cm, the overall dimensions of 2,3×2,3m and the fragment of column was square in cross section with a side length of 25cm. The main aim of the research was experimental verification of the strengthening concept against punching shear by fixing additional external reinforcement to the upper (tension) surface of the slab. This method uses the relationship between punching capacity and longitudinal reinforcement ratio, called also mechanical reinforcement ratio ($\rho \cdot f_y / f_c$). As external reinforcement flat irons and CFRP strips were used.

The research was carried out in 3 series, each consisting of 4 specimens. All slabs in every series were cast from the same concrete mixture C35/45 class. In every series a specimen without strengthening was made for comparison.

The first series concerned the possibility of strengthening with flat irons. The variables were the number of flat irons used and the type of fixing to the slab. The most efficient turned out to be fixing flat irons to the slab by glue and simultaneously by anchoring bolts. This specimen reached the ultimate punching capacity of 825kN, what in relation to the unstrengthened specimen (500kN) gave the increase of load carrying capacity of 65%.

The second series used CFRP strips as external reinforcement for strengthening. One of the specimens had 8 strips (cross-sectional dimensions of a single strip 1,4×90mm, $A_s = 126 \text{ mm}^2$) fixed to the slab's surface by glue according to technology advised by Sika. The increase of load carrying capacity of this specimen in relation to reference slab turned out to be only 11%. At the same time a specific type of failure was observed for the specimen strengthened this way, leading to the debonding of CFRP strips on the edge of a shear crack at the upper surface of the slab. To limit the negative effect of strips' debonding from concrete, the next specimen had the strips additionally fixed by anchoring bolts in the predicted place of shear crack outlet. This technique resulted in the increase of punching capacity up to 26% over reference slab. The third specimen had a doubled number of strips (16 units) for strengthening. They were fixed in two layers, one on the other and simultaneously additionally anchored by bolts. This specimen reached the increase of load carrying capacity of 36%.

The third series was dedicated to a problem frequently occurring in practice, which is the decrease of punching capacity due to the displacement of slab's upper reinforcement downwards. This series, except the reference specimen with a reinforcement cover of 2cm, had slabs with cover 5cm thick. One of these specimens also remained unstrengthened and served as a second element for comparison. The remaining two slabs were strengthened with 8 flat irons fixed by glue and anchoring bolts. In one case the strengthening was installed to the slab before placing any load and in the other, the operation was performed under the load applied to the specimen. Firstly, the load was applied to the test slab, reaching the level of operating technological load, assuming the correct cover of steel reinforcement. Due to the reinforcement displacement this amount of load significantly exceeded the operating level and corresponded to the 70% of the ultimate punching load. The next step was to reduce the load approximately to 50% of the ultimate punching load. After stabilisation of deflections, the external strengthening was mounted to the slab. Few hours later, which were needed for the binding of glue, the testing proceeded up to slab's failure. The following results of punching capacity were obtained:

- the reference specimen with a nominal cover (2cm) 475kN,
- the reference specimen with an increased cover (5cm) 367kN,
- the specimen strengthened under zero load 700kN (an increase of 91%),
- the specimen strengthened under the load 675kN (an increase of 84%).

The research studies and obtained results confirmed the effectiveness of the presented in the paper concept of strengthening flat concrete slabs against punching shear failure by increasing mechanical reinforcement ratio against bending.

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	7
2. Program badań	8
3. Badania serii pierwszej	11
3.1. Opis modeli serii pierwszej	11
3.2. Wyniki badań modeli serii pierwszej	13
3.3. Wnioski z badań serii pierwszej	18
4. Badania serii drugiej	19
4.1. Opis modeli serii drugiej	19
4.2. Wyniki badań serii drugiej	20
4.3. Wnioski z badań serii drugiej	24
5. Badania serii trzeciej	26
5.1. Opis modeli serii trzeciej	26
5.2. Wyniki badań serii trzeciej	27
6. Próba analizy nośności płyt na przebicie ze zbrojeniem zewnętrznym	33
6.1. Zbrojenie zewnętrzne w postaci płaskowników	33
6.2. Zbrojenie zewnętrzne w postaci taśm CFRP	36
7. Posumowanie	41
 Bibliografia	 42
Załącznik	43

CONTENTS

1. Introduction	7
2. Program of the test	8
3. Test of first series	11
3.1. Description of first series models	11
3.2. Test results of the first series models	13
3.3. Conclusions from the first series tests	18
4. Test of second series	19
4.1. Description of second series models	19
4.2. Test results of the second series models	20
4.3. Conclusions from the second series tests	24
5. Test of third series	26
5.1. Description of third series models	26
5.2. Test results of the third series models	27
6. Attempt of analysis of the slabs load-carrying capacity in punching with the external reinforcement.	33
6.1. External reinforcement in form of flat irons	33
6.2. External reinforcement in form of CFRP strips	36
7. Conclusions	41
 References	 42
Appendix	43

OZNACZENIA

d	- wysokość użyteczna przekroju
h	- wysokość przekroju
b	- rozpatrywana szerokość płyty
f_{ck}	- charakterystyczna wytrzymałość walcowa na ściskanie betonu po 28 dniach
$f_{c,cube}$	- średnia wytrzymałość betonu na ściskanie określona na próbkach kostkowych
f_{cm}	- średnia wartość wytrzymałości walcowej betonu na ściskanie
f_{sp}	- wytrzymałość betonu na rozłupywanie
E_{cm}	- sieczny moduł sprężystości betonu
f_{yk}	- charakterystyczna granica plastyczności zbrojenia
$f_{y,h}$	- górna granica plastyczności zbrojenia
$f_{y,l}$	- dolna granica plastyczności zbrojenia
f_{ym}	- średnia granica plastyczności zbrojenia
A_{sm}	- średnie pole przekroju pręta stalowego
E_s	- moduł odkształcalności prętów zbrojenio- wych
d_{er}	- wysokość użyteczna dla płaskowników sta- lowych
$A'_{s,er}$	- sprowadzone pole przekroju zbrojenia ze- wnętrznego
$A_{s,tot}$	- całkowite pole przekroju zbrojenia rozciąga- nego (płytowego i zewnętrznego)
$f_{y,fi}$	- granica plastyczności płaskownika
$A_{s,fi}$	- średnie pole przekroju jednego płaskownika
$E_{s,fi}$	- moduł odkształcalności płaskowników stało- wych
$A_{eff,CFRP}$	- efektywne pole przekroju taśmy CFRP
A_{CFRP}	- pole przekroju poprzecznego taśmy CFRP
f_{CFRP}	- wytrzymałość na rozciąganie taśmy CFRP
E_{CFRP}	- moduł odkształcalności taśmy CFRP
$f_{u,CFRP}$	- naprężenia graniczne w taśmach CFRP w stanie krytycznym nośności
V_{exp}	- nośność eksperymentalna płyty na przebicie
V_{corr}	- skorygowana nośność płyty na przebicie
V_{calc}	- obliczeniowa nośność płyty na przebicie
d_{eff}	- efektywna wysokość użyteczna
ρ_l	- stopień zbrojenia podłużnego
ϵ_{ym}	- średnie odkształcenia plastyczne w stali
$\epsilon_{u,CFRP}$	- średnie wydłużenie taśm w stanie granicznym nośności
ρ_{eff}	- efektywny stopień zbrojenia podłużnego

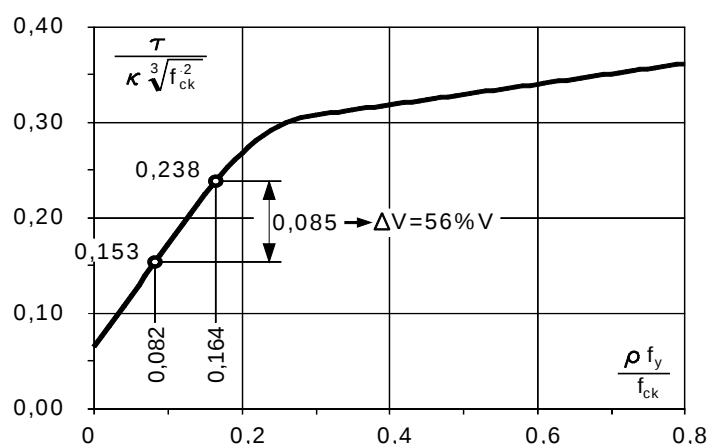
NOTATION

d	- effective depth of a cross-section
h	- height of a cross-section
b	- analyzed width of slab
f_{ck}	- characteristic compressive cylinder strength of concrete at 28 days
$f_{c,cube}$	- mean compressive cubic strength of concrete
f_{cm}	- mean value of concrete cylinder compressive strength
f_{sp}	- tensile strength of concrete in splitting
E_{cm}	- secant modulus of elasticity of concrete
f_{yk}	- characteristic yield strength of reinforcement
$f_{y,h}$	- higher yield strength of reinforcement
$f_{y,l}$	- lower yield strength of reinforcement
f_{ym}	- mean yield strength of reinforcement
A_{sm}	- mean cross sectional area of reinforcement
E_s	- value of modulus of elasticity of reinforcing steel
d_{er}	- effective depth of a cross-section for flat iron
$A'_{s,er}$	- converted cross sectional area of external reinforcement
$A_{s,tot}$	- total cross sectional area of tension rein- forcement (slab and external)
$f_{y,fi}$	- yield strength of flat irons
$A_{s,fi}$	- average cross sectional area of single flat iron
$E_{s,fi}$	- modulus of elasticity of flat iron
$A_{eff,CFRP}$	- effective cross sectional area of CFRP strip
A_{CFRP}	- cross sectional area of single CFRP strip
f_{CFRP}	- tensile strength of CFRP strips
E_{CFRP}	- modulus of elasticity of CFRP strips
$f_{u,CFRP}$	- limit stress in CFRP strips in ultimate limit state
V_{exp}	- experimental punching shear capacity
V_{corr}	- corrected punching shear capacity
V_{calc}	- calculated punching shear capacity
d_{eff}	- effective depth of a cross-section including external reinforcement
ρ_l	- reinforcement ratio for longitudinal rein- forcement
ϵ_{ym}	- mean value of yield strain in the reinforce- ment
$\epsilon_{u,CFRP}$	- mean value of strain of CFRP strip in ultimate limit state
ρ_{eff}	- effective reinforcement ratio for longitudinal reinforcement

1. WPROWADZENIE

Istniejące konstrukcje szkieletowe typu płyta-słup stosowane powszechnie w budownictwie ogólnym w Polsce od ponad 20, a w budownictwie światowym od ponad 30 lat, z różnych względów mogą wymagać wzmocnień. Najczęstszymi przyczynami wykonywania wzmocnień są błędy projektowe i wykonawcze. Zmiana sposobu użytkowania obiektu oraz związana z tym faktem konieczność doprowadzenia obiektu do zgodności z aktualnymi przepisami normowymi (bardziej rygorystycznymi), może być również w przyszłości częstym powodem zainteresowania projektantów i ekspertów budownictwa sposobami wzmacniania płyt żelbetowych na przebiecie. W ostatnich latach w światowej literaturze dotyczącej konstrukcji żelbetowych można zaobserwować zainteresowanie wielu ośrodków badawczych tą problematyką [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]. Przegląd badań światowych dotyczących wzmacniania na przebiecie w polskiej literaturze został przedstawiony w pracach [8] [9] [10] i [11]. Opis wzmocnienia stropu zrealizowanego w praktyce przedstawiono w pracy [12].

Zaproponowana przez autorów metoda wzmacniania płyt na przebiecie opiera się na zależności pomiędzy mechanicznym stopniem zbrojenia głównego, a nośnością przebiecia. Zwiększając moc zbrojenia ($\rho_l f_{yk} / f_{ck}$) uzyskujemy wzrost naprężeń krytycznych na przebiecie, a zarazem i nośności. Efektywność tej metody będzie duża zwłaszcza w przypadkach wzmacniania płyt o małej mocy zbrojenia - $\rho_l f_{yk} / f_{ck} < 0,15$. Zasadę tę wyjaśnia rys. 1.1, na którym pokazano wykres zależności standaryzowanych naprężeń krytycznych przebiecia na obwodzie usytuowanym w odległości $d/2$ od lica słupa w funkcji mocy zbrojenia płytowego. Przykładowo jeśli będziemy mieli do czynienia z płytą o stopniu zbrojenia $\rho_l = 0,5\%$, co stanowi minimalną wartość dopuszczaną przez normę PN-B-03264:2002, ze stali klasy A-III ($f_y = 410\text{MPa}$) i wykonaną z betonu klasy C25/30 ($f_{ck} = 25\text{MPa}$), to moc zbrojenia będzie wynosiła $\rho_l f_{yk} / f_{ck} = 0,082$. Wzmacniając płytę dodatkowym zbrojeniem do stopnia $\rho_{l+w} = 1,0\%$, co spowoduje dwukrotny wzrost mocy zbrojenia do wartości 0,164, powinniśmy uzyskać wzrost nośności na przebiecie o około 56%.



Rys. 1.1. Zasada wzmacniania na przebiecie poprzez wzrost mocy zbrojenia głównego płyty według [2]

Fig. 1.1. The rule of strengthening for punching by the increase of the main reinforcement power of the slab by [2]

Badania wykonano w ramach projektu badawczego nr N506 010 31/0693, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

1. INTRODUCTION

Existing skeleton slab – column structures used commonly in overall building engineering in Poland from over 20 years and in world civil engineering from over 30 years can require to be strengthened because of various reasons. The most often reasons of making strengthening are the design and realization mistakes. Change in the way of building exploitation and connected with this fact the necessity of leading the object to the agreement with actual code rules (more rigorous), could be also in the future the more often reason of the interest of designers and civil engineering experts in the way of strengthening the concrete slabs for punching. In the world literature regarding the concrete structures can be observed in last years the interest of many investigation centres in this problem [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]. The review of world tests relating to the strengthening for punching in the polish literature was presented in works [8] [9] [10] and [11]. The description of the strengthening which was realized in practice is presented in work [12].

The strengthening the slabs for punching suggested by the authors is based on the relation between mechanical reinforcement ratio of main reinforcement and load-carrying capacity in punching. Increasing the power of the reinforcement ($\rho_l f_{yk} / f_{ck}$) we obtain the increase of the critical stresses in punching and at the same time the load carrying capacity. The effectiveness of this will be great especially in case of strengthening slabs with small reinforcement power - $\rho_l f_{yk} / f_{ck} < 0,15$. This rule is explained by fig. 1.1, in which is shown the diagram of the relationship of the standardized critical punching stresses on the circumference situated in the distance of $d/2$ from the column face in the function of slab reinforcement power. For instance if we will deal with the slab of the reinforcement ratio $\rho_l = 0,5\%$, that is the minimum permitted by the code PN-B-03264:2002, from steel A-III ($f_y = 410\text{MPa}$) and made from concrete of the class C25/30 ($f_{ck} = 25\text{MPa}$), then the reinforcement power will be $\rho_l f_{yk} / f_{ck} = 0,082$. Strengthening the slab with additional reinforcement to the ratio of $\rho_{l+w} = 1,0\%$, what will cause double increase of the reinforcement power till the value of 0,164, we should obtain the increase of the punching carrying capacity of about 56%.

Test were carried out within the limits of the investigation project No. N506 010 31/0693, granted by the Minister of Science and Higher Education.

2. PROGRAM BADAŃ

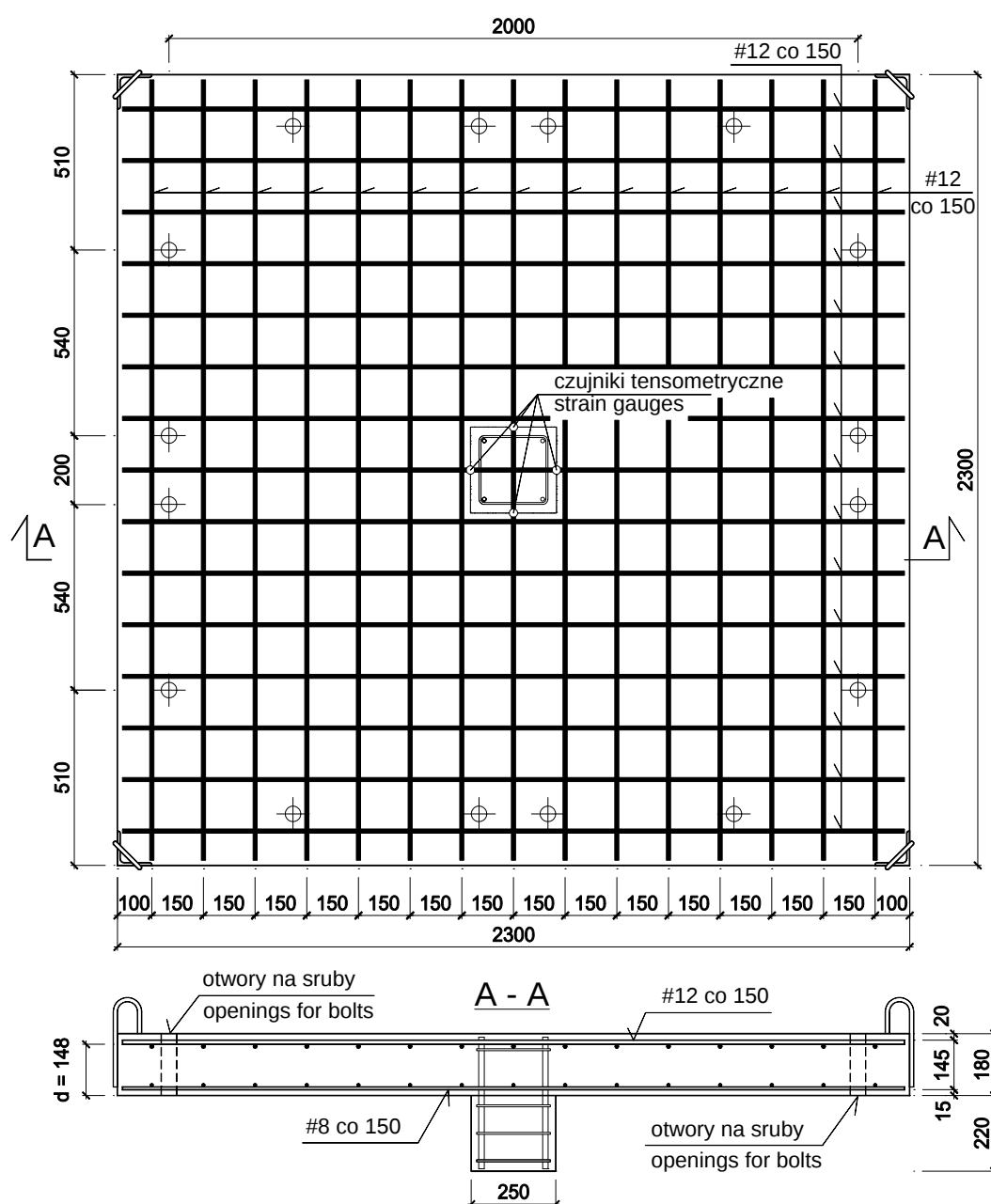
Program badań obejmował 12 modeli jednakowo zbrojonych i wykonanych z betonu towarowego klasy B45. Płyta modeli miała wymiary 2,3×2,3m i grubość 180mm. Była ona zakotwiona do ramy stanowiska szesnastoma śrubami, po 4 na każdym boku. Odległość śrub znajdujących się na przeciwległych bokach wynosiła 2,0m. Pod płytą znajdował się fragment słupa o przekroju kwadratowym, którego bok miał wymiar 0,25m.

Zbrojenie modeli wykonano ze stali klasy A-IIIIN. Siatka zbrojenia dolnego była wykonana z prętów Ø8, a siatka zbrojenia głównego z prętów o średnicy Ø12. Obie siatki miały jednakowy rozstaw prętów wynoszący w obu kierunkach po 150mm. Stopień zbrojenia głównego płyt wynosił około 0,5%. Zbrojenie modelu świadka S-1 oraz pozostałych modeli przed wzmocnieniem pokazano na rys. 2.1.

2. PROGRAM OF THE TEST

The program included 12 identical reinforced models which were made from commodity concrete of the class B45. The slab of models had dimensions 2,3×2,3m and thickness of 180mm. It was anchored to the frame of test stand by means of 16 screws in fours on each face. The distance of screws which were on the opposite sides was 2,0m. Under the slab was the column sector with the square cross-section, that side had dimension of 0,25m.

The models reinforcement was made from steel class A-IIIIN. The bottom reinforcement net was made from the bars Ø8, and main reinforcement net from the bars of the diameter equal Ø12. Both nets had the same distance of the bars figured out 150mm in both directions. The main reinforcement ratio of the slabs was about 0,5%. The reinforcement of the witness model S-1 and the remaining models before strengthening is shown in fig. 2.1.



Rys. 2.1. Model S-1 i pozostałe modele przed wzmocnieniem
Fig. 2.1. Model S-1 and remaining models before strengthening

Głównym celem badań było sprawdzenie doświadczalne celowości wzmacniania płyt żelbetowych na przebiecie za pomocą zbrojenia zewnętrznego mocowanego do górnej (rozciąganej) powierzchni płyty. Jako zbrojenia zewnętrznego użyto płaskowniki stalowe i taśmy typu CFRP.

Badania przeprowadzono w 3 seriach, po 4 modele w każdej serii. Wszystkie modele w poszczególnych seriach były wykonane z tej samej towarowej mieszanki betonowej. Dla każdej z serii przewidziano modele odniesienia - zbadane bez wzmocnienia - i służące jako element odniesienia. Na rysunkach 2.2 i 2.3 pokazano zbrojenie usytuowane w formie i betonowanie jednej z serii płyt badanych modeli.



Rys. 2.2. Zbrojenie płyty

Fig. 2.2. Reinforcement of the slab

The main aim of the tests was experimental verification of the possibility of strengthening of the reinforced concrete slabs for punching by means of external reinforcement fastened to the top (tensioned) slab surface.

Tests were carried out in 3 series, with 4 models in every series. All models in particular series were made from the same commodity concrete mix. For every series were foreseen the control models – tested without strengthening – and been of use as reference element. There is shown in figures 2.2 and 2.3 the reinforcement situated in the form and casting of one from the series of tested specimens plate.



Rys. 2.3. Betonowanie modeli z wykorzystaniem betonu towarowego

Fig. 2.3. Casting of specimens with use of the commodity concrete



Rys. 2.4. Składowanie elementów jednej z serii

Fig. 2.4. Storage of the one series elements

Badania przeprowadzono na specjalnym stanowisku badawczym pokazanym na rys. 2.5. Siła przykładana była poprzez słup, według ściśłego harmonogramu. Na każdym etapie obciążenia wykonywano dwukrotnie pomiary (na początku i końcu):

- przemieszczeń płyty za pomocą 8 czujników indukcyjnych,
- odkształceń na powierzchni ściskanej betonu za pomocą tensometrów elektrooporowych o bazie 50mm,



Rys. 2.5. Stanowisko badawcze

Fig. 2.5. Test stand

Tests were carried out in a special investigation stand shown in fig. 2.5. Force was applied through the column, by strict timetable. On every stage of loading there were made measurements twice (at the beginning and at the end):

- displacements of the plate by means of 8 induction meters,
- strains on the compression surface by means of electric resistance strain gauges of 50mm length basis,

- odkształceń na zbrojeniu głównym płyty za pomocą tensometrów elektrooporowych o bazie 10mm,
- odkształceń płaskowników za pomocą tensometrów elektrooporowych o bazie 10mm.

Na każdym etapie obciążenia rejestrowano również rozwój rys, dokonując w kilku miejscach pomiaru ich szerokości za pomocą mikroskopu o 25 krotnym powiększeniu.

- strains on the main reinforcement of the slab by means of electric resistance gauges of 10mm length basis,
- strains of the flat irons by means of electric resistance gauges of 10mm length basis.

There was recorded on every loading stage also the crack propagation, doing in several places measurements of their width by means of the 25:1 magnifying microscope.

3. BADANIA SERII PIERWSZEJ

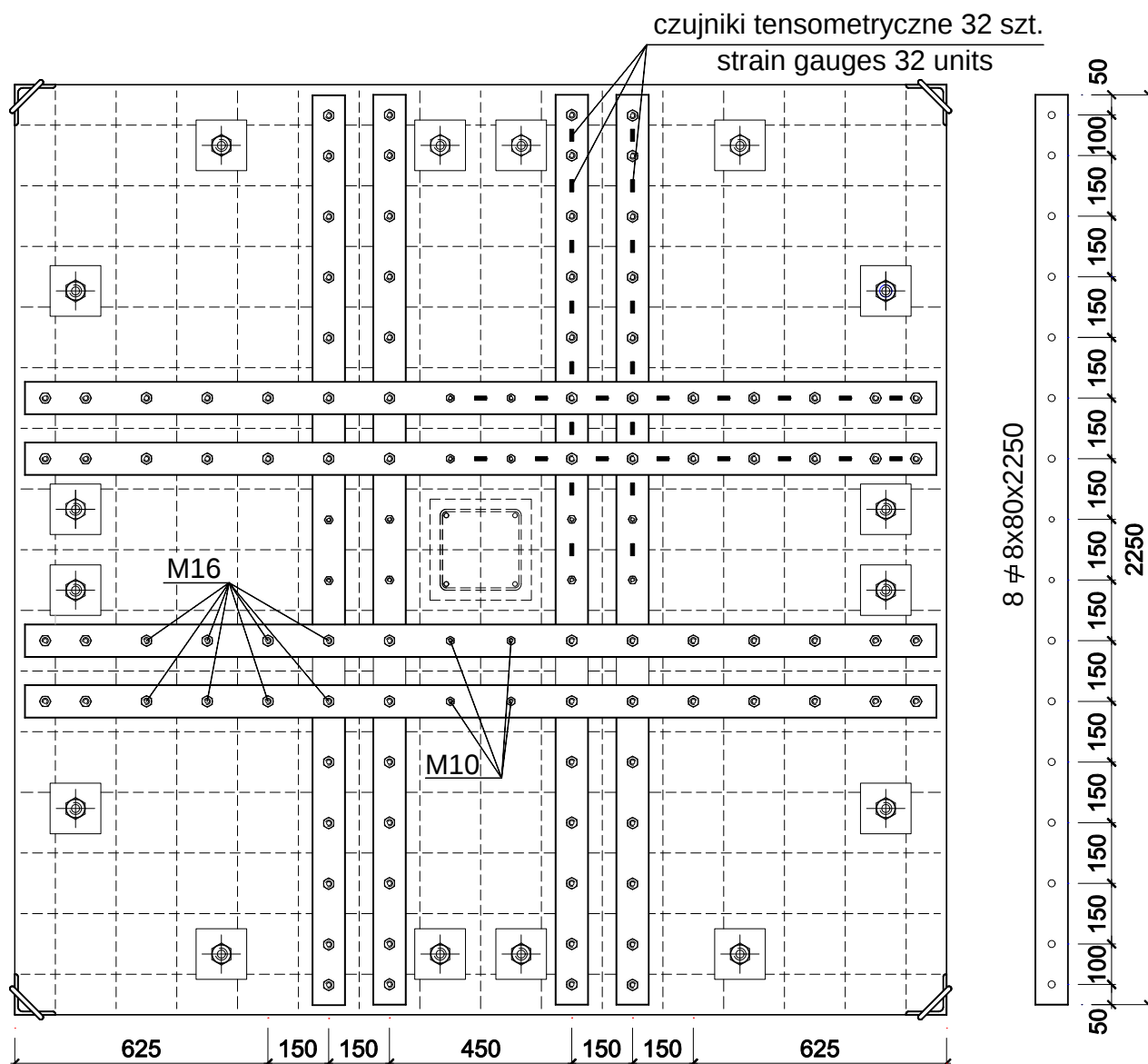
3.1. Opis modeli serii pierwszej

W serii pierwszej trzy modele zostały wzmocnione płaskownikami ze stali gatunku S235JR o przekroju poprzecznym 80×8mm. Model WPS-8 był wzmocniony 8 płaskownikami, a model WPS-12 dwunastoma. Płaskowniki były mocowane za pomocą śrub wklejanych na klej żywiczny firmy HILTI HY-150. Usytuowanie płaskowników modelu WPS-8 pokazano na rys. 3.1. Konstrukcja pozostałych modeli została zamieszczona w załączniku.

3. TESTS OF FIRST SERIES

3.1. Description of first series models

Three models in first series were strengthened by flat irons from steel of the grade S235JR and cross-section 80×8mm. Specimen WPS-8 was strengthened using 8 flat irons and specimen WPS-12 – by 12 flat irons. Flat steel was anchored by means of screws inserted with the epoxy paste made by firm HILTI HY-150. The location of the flat irons of WPS-8 model is shown in fig. 3.1. Construction of other specimens was placed in the Appendix.



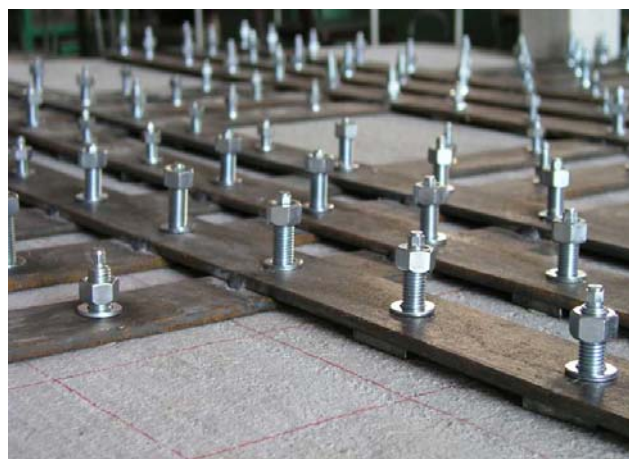
Rys. 3.1. Model WPS-8 z elementami wzmocnienia
Fig. 3.1. Specimen WPS-8 with the elements of strengthening

Na rysunku 3.2 pokazano operację wklejania śrub mocujących płaskowniki do płyty, a na rys. 3.3 fragment płyty ze zbrojeniem zewnętrznym. Kolejny rys. 3.4 ilustruje model WPS-12 po wzmocnieniu.

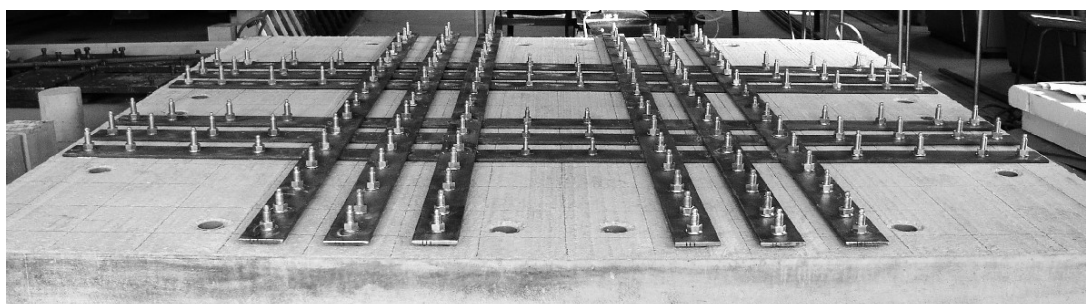
There is the procedure of insert of the screws fastening the flat irons to the slab shown in fig. 3.2 and in fig. 3.3 – part of the slab with external reinforcement. The next figure 3.4 illustrates the model WPS-12 after strengthening.



Rys. 3.2. Wklejanie śrub mocujących płaskowniki
Fig. 3.2. Insertion the bolts fixing the flat irons



Rys. 3.3. Detal zbrojenia zewnętrznego – model WPS-12
Fig. 3.3. Detail of the external reinforcement – model WPS-12



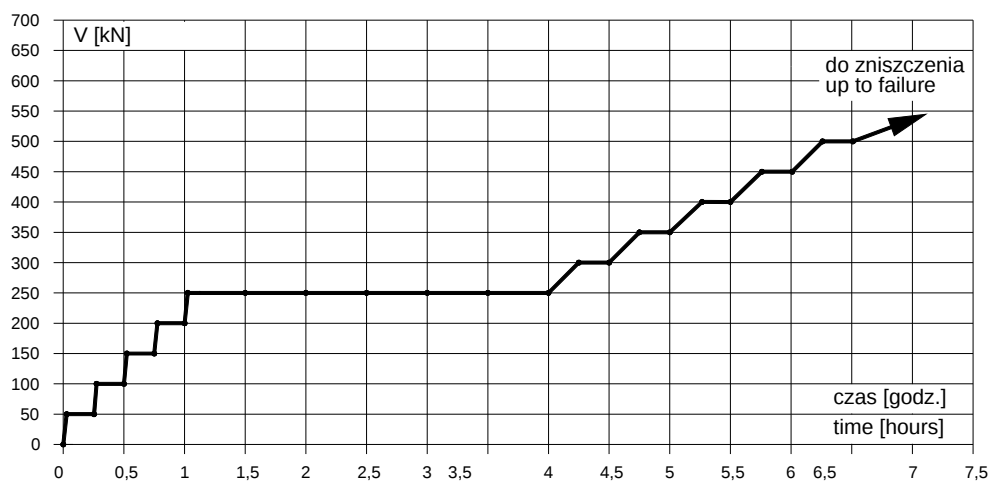
Rys. 3.4. Model WPS-12 po wzmocnieniu
Fig. 3.4. Specimen WPS-12 after strengthening

W czwartym modelu WPSK-8 płaskowniki na całej powierzchni kontaktu z betonem były dodatkowo przyklejone klejem żywicznym. W modelu tym zastosowano mniejsze śruby M12, których rozstaw był taki sam, jak w modelu WPS-8. Aby można było przykleić płaskowniki, oba krzyżujące się pasma musiały być usytuowane w tej samej płaszczyźnie. Z tego względu prostopadłe biegnące płaskowniki łączono poprzez spawanie. Otwory w płaskownikach stanowiły szablon, który służył do wywiercenia otworów w betonie. Po wklejeniu śrub i odczekaniu 24 godzin na utwardzenie się kleju przystąpiono do klejenia płaskowników do betonu. W tym celu płaskowniki zostały uniesione do góry i powierzchnie styku z betonem odtłuszczone. Klej został nałożony na powierzchnię betonu i następnie przystąpiono do ponownego montażu zespawanego szkieletu płaskowników. Czynność ta była dość trudna do wykonania, gdyż trzeba było jednocześnie wcisnąć 108 otworami na wystające z betonu śruby. Po pomyślnym jej zakończeniu płaskowniki zostały dociśnięte do powierzchni betonu za pomocą nakrętek. Pozwoliło to na staranne wyciśnięcie nadmiaru kleju z pod płaskowników.

Obciążanie modeli serii pierwszej realizowano według harmonogramu pokazanego na rys. 3.5. Po osiągnięciu siły 250kN, co odpowiadało mniej więcej poziomowi eksploatacyjnemu obciążenia płyty bez wzmocnienia, pozostawiano ciała próbne pod stałym obciążeniem przez około 3 godziny. W tym czasie co pół godziny dokonywano pomiarów, jak dla każdego poziomu obciążenia. Następnie kontynuowano badania aż do zniszczenia.

The flat irons in fourth model WPSK-8 were on the whole contact surface with concrete stuck additionally by means of epoxy glue. There were used in this model smaller screws M12, that spacing was the same as in model WPS-8. To make it possible to stick the flat irons, both crossing strips had to be situated in the same plain. For this reason vertically running flat irons were connected by welding. The openings in flat steel made the pattern, which was used to drill the openings in concrete. After inserting the screws and waiting 24 hours for the glue become hardened, there was initiated sticking the flat irons to the concrete. With that purpose the flat irons were lifted up and from the contact surfaces with concrete was removed the fat. Glue was put on the concrete surface and next there was initiated once again the fitting of the welded flat irons skeleton. This operation was rather difficult to do, because it was necessary to aim at the same time with 108 openings on the bolts protruding from concrete. After bring this action to a happy end, the flat irons were pressed home to the concrete surface by means of the screw-caps. It allowed to press out the redundancy of glue from the bottom of flat irons.

The loading of first series models was realized by the schedule shown in fig. 3.5. After achievement the force of 250kN, what corresponds more-less with the exploitation level of the loading of slab without strengthening, the specimens were left under constant loading during about 3 hours. At that time, every half an hour, the measurements were made, as for every load level. Next, tests were continued to the failure.



Rys. 3.5. Harmonogram obciążania

Fig. 3.5. Schedule of loading

3.2. Wyniki badań modeli serii pierwszej

Wyniki badań materiałów

Wszystkie 4 modele były wykonane z tych samych materiałów. Betonowanie przeprowadzono 20 grudnia 2006r. Badania poszczególnych modeli odbywały się w różnych terminach. Najwcześniej badany był model świadek S-1 po 124 dniach od momentu betonowania. Ostatni model z tej serii został zbadany w dniu 30 maja 2007r., a więc po upływie 161 dni od zabetonowania. Badaniu każdego modelu towarzyszyły badania betonu na ściskanie na próbkach walcowych i kostkowych oraz na rozłupywanie na próbkach kostkowych. Jak widać w tab. 3.1, parametry betonu dla poszczególnych modeli różniły się nieznacznie.

Tablica 3.1. Właściwości betonu

Table 3.1. Concrete characteristics

model specimen	wiek betonu [dni] concrete age [days]	wytrzymałość betonu [MPa] / concrete strength [MPa]						E_{cm} [MPa]
		liczba próbek number of samples	$f_{c,cube}$	liczba próbek number of samples	f_{cm}	liczba próbek number of samples	f_{sp}	
S-1	124	4	51,8	4	45,3	3	3,43	27800
WPS-8	138	5	52,3	3	45,7	3	3,95	28300
WPS-12	175	3	52,0	8	45,3	4	3,98	26600
WPSK-8	161	3	52,0	3	43,0	3	4,28	-

$f_{c,cube}$ – wytrzymałość badana na kostkach 15×15×15cm / strength tested on cubes 15×15×15cm
 f_{cm} – wytrzymałość badana na walcach 15×30cm / strength tested on cylinders 15×30cm
 f_{sp} – wytrzymałość na rozłupywanie / tensile strength in splitting
 E_{cm} – moduł odcztałcalności / modulus of elasticity

Ostatecznie średnie parametry betonu dla całej serii zakwalifikowano w następujący sposób:

- $f_{c,cube} = 52\text{MPa}$,
- $f_{cm} = 45\text{MPa}$,
- $f_{sp} = 3,92\text{MPa}$,
- $E_{cm} = 27,6\text{GPa}$.

Badania wytrzymałościowe prętów zbrojeniowych o nominalnej średnicy $\varnothing 12\text{mm}$ wykazały następujące cechy:

- $A_{sm} = 1,113\text{cm}^2$ - średnie pole przekroju pręta,
- $f_{y,h} = 581\text{MPa}$ - górna granica plastyczności,
- $f_{y,l} = 566\text{MPa}$ - dolna granica plastyczności,
- $f_{ym} = 573\text{MPa}$ - średnia granica plastyczności.

3.2. Test results of the first series models

Test results of the materials

All 4 specimens were made from the same materials. Casting was carried out on 20-th of December 2006. The investigations of the particular models were at various terms. The earliest was tested the reference model S-1 after 124 days from the moment of casting. The last model of this series was tested on the day 30-th of May 2007, so after 161 days from casting. The investigation of every model was accompanied by compression tests of concrete on the cylinder and cube samples. As it is shown in table 3.1, the concrete parameters for particular models are different insignificant.

At last the average concrete parameters for whole series were qualified in such a way:

- $f_{c,cube} = 52\text{MPa}$,
- $f_{cm} = 45\text{MPa}$,
- $f_{sp} = 3,92\text{MPa}$,
- $E_{cm} = 27,6\text{GPa}$.

Strength tests of the reinforcing bars with the nominal diameter of $\varnothing 12\text{mm}$ showed the following qualities:

- $A_{sm} = 1,113\text{cm}^2$ - average area of the bar's cross-section,
- $f_{y,h} = 581\text{MPa}$ - upper yield strength,
- $f_{y,l} = 566\text{MPa}$ - lower yield strength,
- $f_{ym} = 573\text{MPa}$ - average yield strength.

Użyte w badaniach płaskowniki, jako zbrojenie zewnętrzne charakteryzowały się następującymi cechami:

- $A_{s,fi} = 6,55\text{cm}^2$ - średnie pole przekroju,
- $f_{y,h} = 327\text{MPa}$ - górna granica plastyczności,
- $f_{y,l} = 323\text{MPa}$ - dolna granica plastyczności,
- $f_{y,fi} = 325\text{MPa}$ - średnia granica plastyczności,
- $E_{s,fi} = 203\text{GPa}$ - moduł Younga.

Wyniki badań nośności

Uzyskane nośności eksperymentalne (V_{exp}) poszczególnych modeli zestawiono w tab. 3.2. Wysokość użyteczna płyt w zamiarze miała być we wszystkich modelach jednakowa, równa $d = 148\text{mm}$, w rzeczywistości odnotowano pewne odchyłki od tej wartości. W tabeli 3.2 podano średnie wartości pomierzone po przecięciu płyty w sąsiedztwie słupa. Pomierzone wysokości użyteczne płyt posłużyły do skorygowania nośności eksperymentalnych. Jako przelicznik korygujący przyjęto stosunek pola przekroju krytycznego modelu z nominalnym ($d=148\text{mm}$) do pola przekroju krytycznego z (d) pomierzonym. Pole przekroju krytycznego w tej analizie przyjęto, jako iloczyn obwodu krytycznego usytuowanego w odległości $d/2$ od lica słupa (u_p) i wysokości użytecznej (d).

The flat irons, used in the investigations as external reinforcement characterized with the following features:

- $A_{s,fi} = 6,55\text{cm}^2$ - average cross-section area,
- $f_{y,h} = 327\text{MPa}$ - upper yield strength,
- $f_{y,l} = 323\text{MPa}$ - lower yield strength,
- $f_{y,fi} = 325\text{MPa}$ - average yield strength,
- $E_{s,fi} = 203\text{GPa}$ - Young's modulus.

Test results of the load-carrying capacity

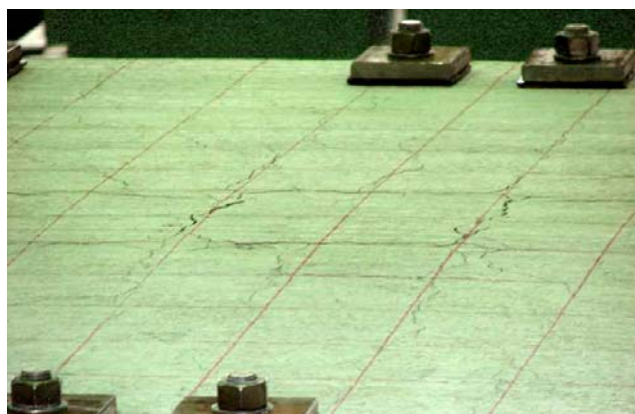
The experimental load-carrying capacities (V_{exp}) obtained for particular models are given in Table 3.2. The effective depth of the slabs had to be by the assumption the same in all models, equal $d=148\text{mm}$, in reality there were noticed certain deviations from this value. There are given in Table 3.2. mean values measured after cutting the slab in vicinity of the column. Measured effective depth of slabs were used for the correction of experimental load-carrying capacities. As the correction re-counter was assumed the proportion of the critical cross-section area of the model with a nominal ($d=148\text{mm}$) to the critical cross-section area with measured (d). The critical cross-section area was assumed in this analysis in the distance of $d/2$ from column face (u_p) and the effective depth (d).

Tablica 3.2. Nośność modeli pierwszej serii

Table 3.2. Load-carrying capacity of the first series models

model specimen	d [mm]	V_{exp} [kN]	przelicznik korygujący correction re-counter	$V_{corr.}$ [kN]	wzrost nośności [%] increase of the load-carrying capacity [%]
S-1	147	500	1,009	504,5	-
WPS-8	151	730	0,973	710,3	40,8
WPS-12	148	750	1,000	750,0	48,7
WPSK-8	152	825	0,964	795,3	57,6

Jak widać z tab. 3.2, uzyskano dość znaczne wzrosty nośności w stosunku do modelu świadka S-1, świadczące o skuteczności zaproponowanego rozwiązania. Wszystkie modele zniszczyły się na przebiecie. Na rys. 3.6 i 3.7 pokazano model S-1 w stanie granicznym nośności. Model S-1 zniszczył się gwałtownie po kilku minutach utrzymywania się obciążenia na poziomie 500kN, w sposób który można określić jako eksplozywny. Modele wzmocnione niszczyły się w sposób bardziej „łagodny”. Wpływ na taki przebieg zjawiska miały prawdopodobnie śruby, które w stanie krytycznym były wyciągane z betonu znajdującego się pod rysą ukośną.



Rys. 3.6. Model S-1 na chwilę przed zniszczeniem
Fig. 3.6. Model S-1 at the moment just before failure



Rys. 3.7. Model S-1 po zniszczeniu
Fig. 3.7. Model S-1 after failure

Na rys. 3.8 pokazano modele po przecięciu płyty w li-
cu słupa w celu pokazania ukośnych rys niszczących.

There are presented in fig. 3.8 the specimens after cut-
ting in the column face in order to show the critical diago-
nal cracks.



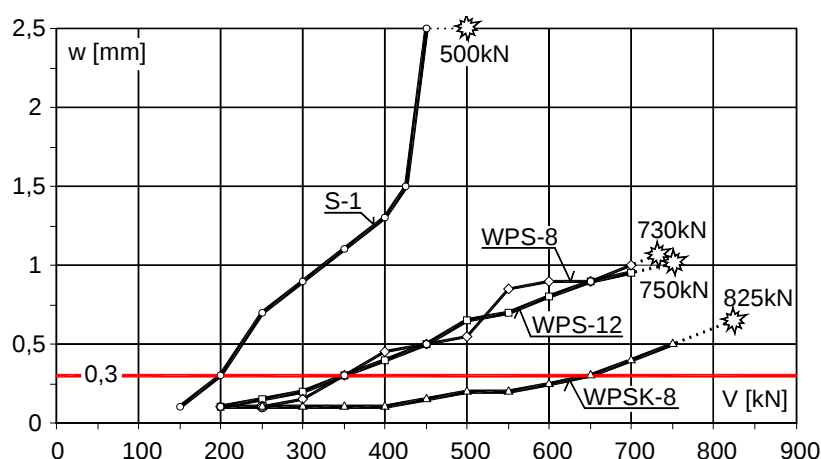
Rys. 3.8. Modele pierwszej serii w przekroju poprzecznym po zniszczeniu
Fig. 3.8. First series models in the cross-section after failure

Wyniki obserwacji rys

Na każdym poziomie obciążenia inwentaryzowano rozwój zarysowania i dla kilku rys o największej szerokości dokonywano pomiarów ich rozwarcia. Zwykle rysy o największym rozwarciu znajdowały się w pobliżu obrysu słupa. Na rys. 3.9 porównano wykresy rozwoju szerokości rys o maksymalnym rozwarcium w funkcji siły obciążającej model. Model S-1 osiąga dopuszczaną przez normy szerokość już przy obciążeniu 200kN. Modele WPS-8 i WPS-12 osiągają tę szerokość dopiero pod obciążeniem 350kN. Natomiast model WPSK-8 zbliża się do tej granicy dopiero przy sile 650kN.

Results of cracks observation

There were recorded on each loading level the cracks development and was measured for the few biggest cracks their width. Usually cracks with the biggest width were close to the column contour. There is compared in fig. 3.9 the diagram of crack width development for cracks maximum width in the function of force loaded the model. Specimen S-1 achieves the width admissible by codes already at the loading of 200kN. Models WPS-8 and WPS-12 achieve that width only under the loading of 350kN. But specimen WPSK-8 approaches this limit only at the force of 650kN.



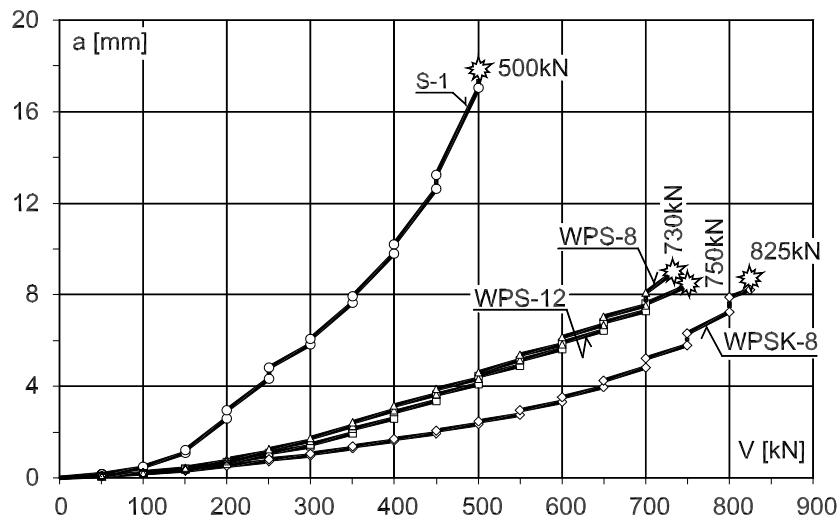
Rys. 3.9. Porównanie rys o maksymalnej szerokości rozwarcia
Fig. 3.9. Comparison of cracks of maximum width

Wyniki pomiarów przemieszczeń

Na rysunku 3.10 porównano strzałki ugięcia poszczególnych elementów. Podobnie, jak przy rysach, daje się zauważyć znaczący wpływ zbrojenia zewnętrznego na sztywność płyty. Liczba płaskowników wzmacniających w modelach WPS-8 i WPS-12 nie miała większego znaczenia na sztywność płyt. Model z przyklejonymi płaskownikami WPSK-8 wykazał największy wzrost sztywności.

Results of the displacement measurements

There are compared in fig. 3.10 the deflections of particular elements. Similar as at cracks, it can be noticed the significant influence of the external reinforcement on the slab stiffness. The number of strengthening flat irons in models WPS-8 and WPS-12 was of any greater significance on the slab stiffness. Specimen with stuck flat irons WPSK-8 showed the greatest increase of the stiffness.



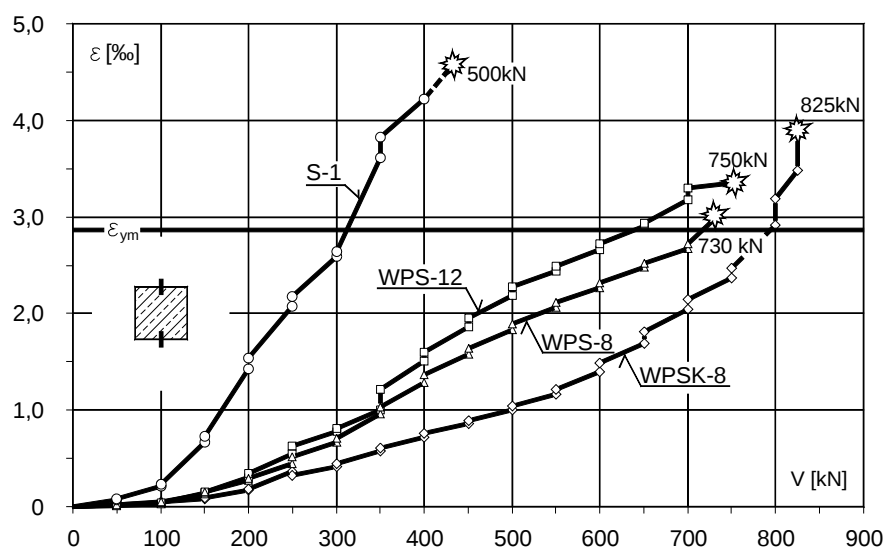
Rys. 3.10. Porównanie strzałek ugięcia płyt
Fig. 3.10. Comparison of the slab deflections

Wyniki pomiarów odkształceń zbrojenia

Na rys. 3.11 porównano odkształcenia zbrojenia głównego na krawędzi słupa. Widać wyraźnie zmniejszenie odkształceń wskutek działania zbrojenia zewnętrznego - płaskowników. Model z przyklejonymi płaskownikami WPSK-8 wykazał największą skuteczność w odciążeniu zbrojenia prętowego.

Results of the strains measurements of the reinforcement

There were compared in fig. 3.11 strains of the main reinforcement on the column edge. The decrease of strains is clearly visible due to action of external reinforcement. Specimen with stuck flat irons WPSK-8 showed the greatest efficiency in the unloading of the bar reinforcement.



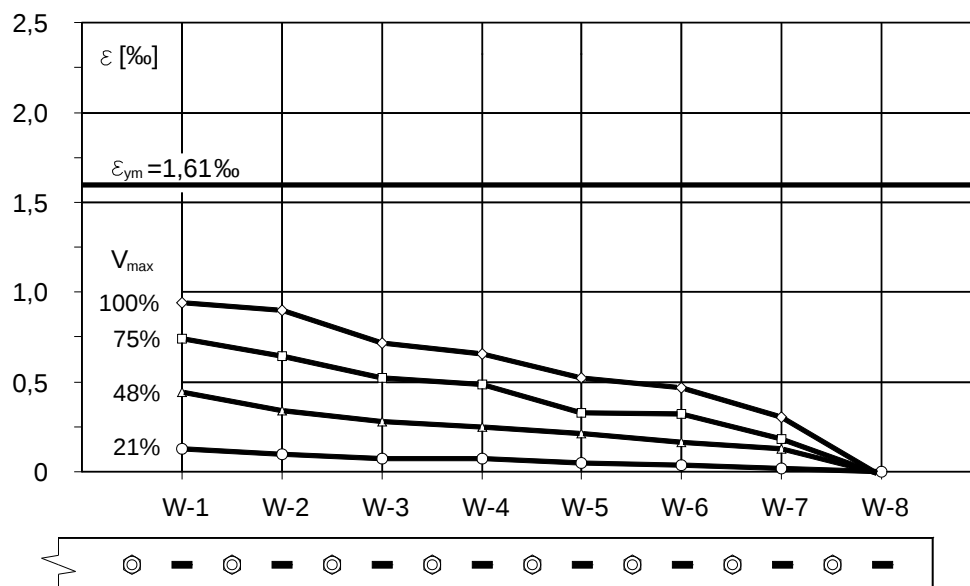
Rys. 3.11. Porównanie odkształceń zbrojenia górnej płyty
Fig. 3.11. Comparison of the strains of upper slab reinforcement

Wyniki pomiarów odkształceń płaskowników

Na rysunkach 3.12 i 3.13 pokazano odkształcenia płaskowników w modelach WPS-8 i WPS-12 z płaskownikami mocowanymi do powierzchni płyty wyłącznie za pomocą śrub. Jak widać z przedstawionych wykresów - nie osiągnięto granicy plastyczności na żadnym czujniku tensometrycznym.

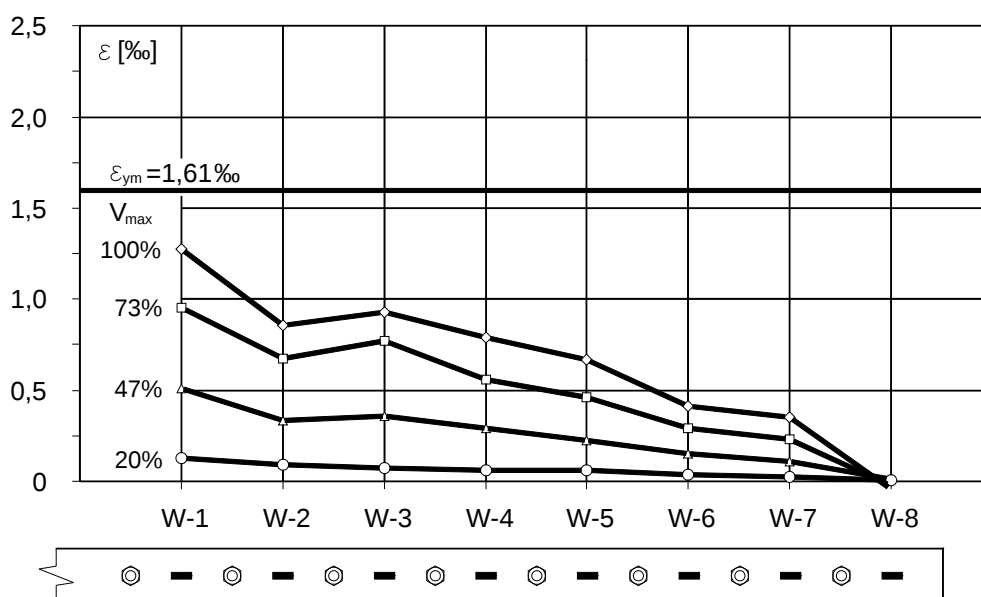
Results of the strains measurement of flat irons

There are presented in fig. 3.12 and 3.13 the strains of flat irons in models WPS-8 and WPS-12 with flat irons fixed to the slab surface only by means of screws. As it can be seen from presented diagrams – the yield strength was not achieved on any electric resistance strain gauge.



Rys. 3.12. Odkształcenia płaskownika w modelu WPS-8 (położenie płaskownika – patrz rysunek modelu w załączniku)

Fig. 3.12. Strains of the flat irons in the model WPS-8 (position of the flat iron – see figure of the model in Appendix)

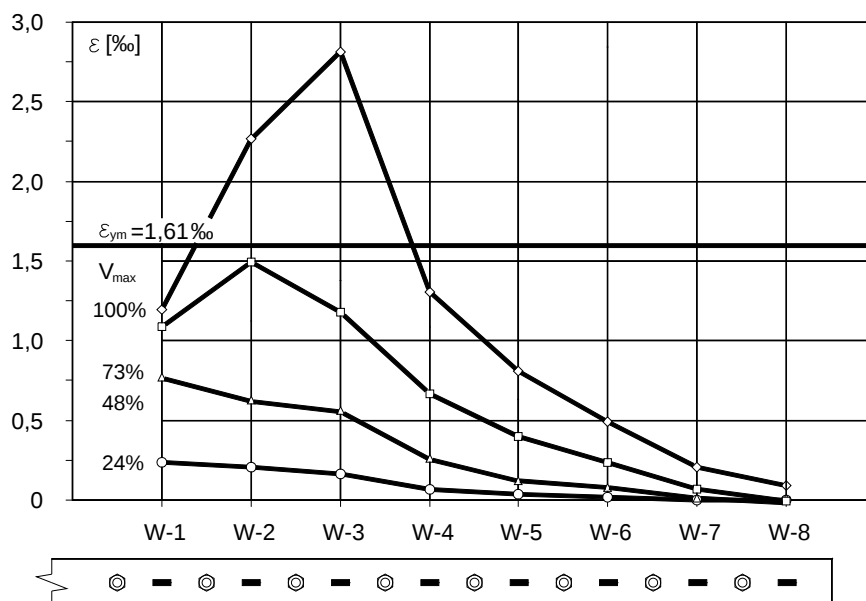


Rys. 3.13. Odkształcenia płaskownika w modelu WPS-12 (położenie płaskownika – patrz rysunek modelu w załączniku)

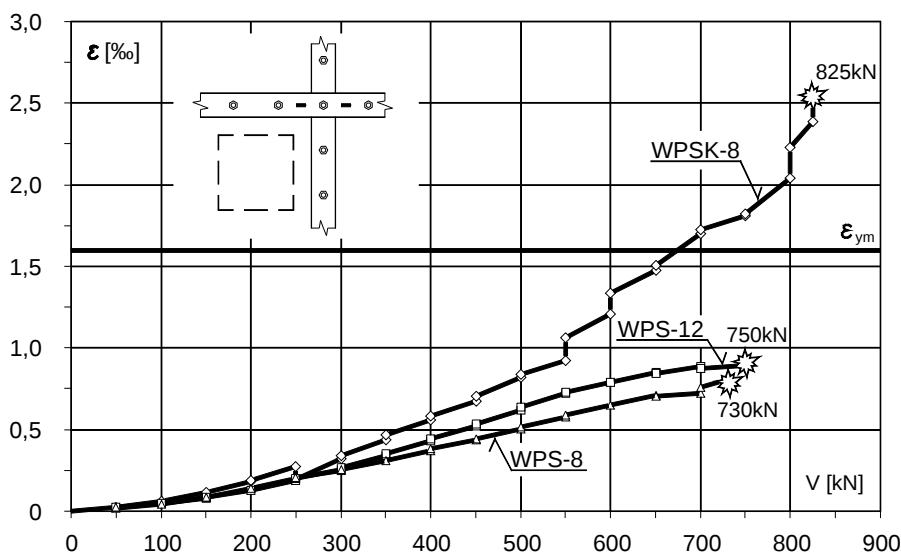
Fig. 3.13. Strains of the flat irons in the model WPS-12 (position of the flat iron – see figure of the model in Appendix)

Uplastycznienie zbrojenia zewnętrznego można było zaobserwować pod obciążeniem niszczącym w modelu WPSK-8 z płaskownikami klejonymi do betonu (patrz rys. 3.14). Ekstremalne odkształcenia zarejestrowano na czujniku W-3, który położony był w pobliżu przekątnej płyty. Na rys. 3.15 zestawiono odkształcenia średnie z dwóch czujników W-2 i W-3 znajdujących się w pobliżu przekątnej płyty dla trzech modeli wzmacnianych płaskownikami.

Yielding of the external reinforcement could be observed under ultimate loading in the model WPSK-8 with the flat irons stuck to the concrete (see fig. 3.14). Extreme strains were recorded on the meter W-3, that was situated near diagonal of slab. The strains average from two meters situated near slab diagonal are put together in fig. 3.15, for three models strengthened by flat irons.



Rys. 3.14. Odształcenia płaskownika w modelu WPSK-8 (położenie płaskownika – patrz rysunek modelu w załączniku)
Fig. 3.14. Strains of flat iron in the model WPSK-8 (position of the flat iron – see figure of the model in the Appendix)



Rys. 3.15. Porównanie odkształceń średnich z dwóch czujników W-2 i W-3 dla modeli wzmacnianych płaskownikami w pierwszej serii

Fig. 3.15. Comparison of mean strains from two meters W-2 and W-3 for the models strengthened with flat irons in first series

3.3. Wnioski z badań serii pierwszej

Zaprezentowane wyniki badań pierwszej serii wykazały bardzo dużą skuteczność wzmacniania na przebitecie za pomocą stalowych płaskowników, jako zbrojenia zewnętrznego. Zwłaszcza skuteczność ta jest widoczna w modelu WSPK-8 z płaskownikami mocowanymi za pomocą kleju i śrub jednocześnie.

3.3. Conclusions from the first series tests

Presented test results of first series showed the very great efficiency of strengthening for punching by means of flat irons, as the external reinforcement. Especially this efficiency is visible in the model WPSK-8 with flat irons fasted by means of glue and bolts at the same time.

4. BADANIA SERII DRUGIEJ

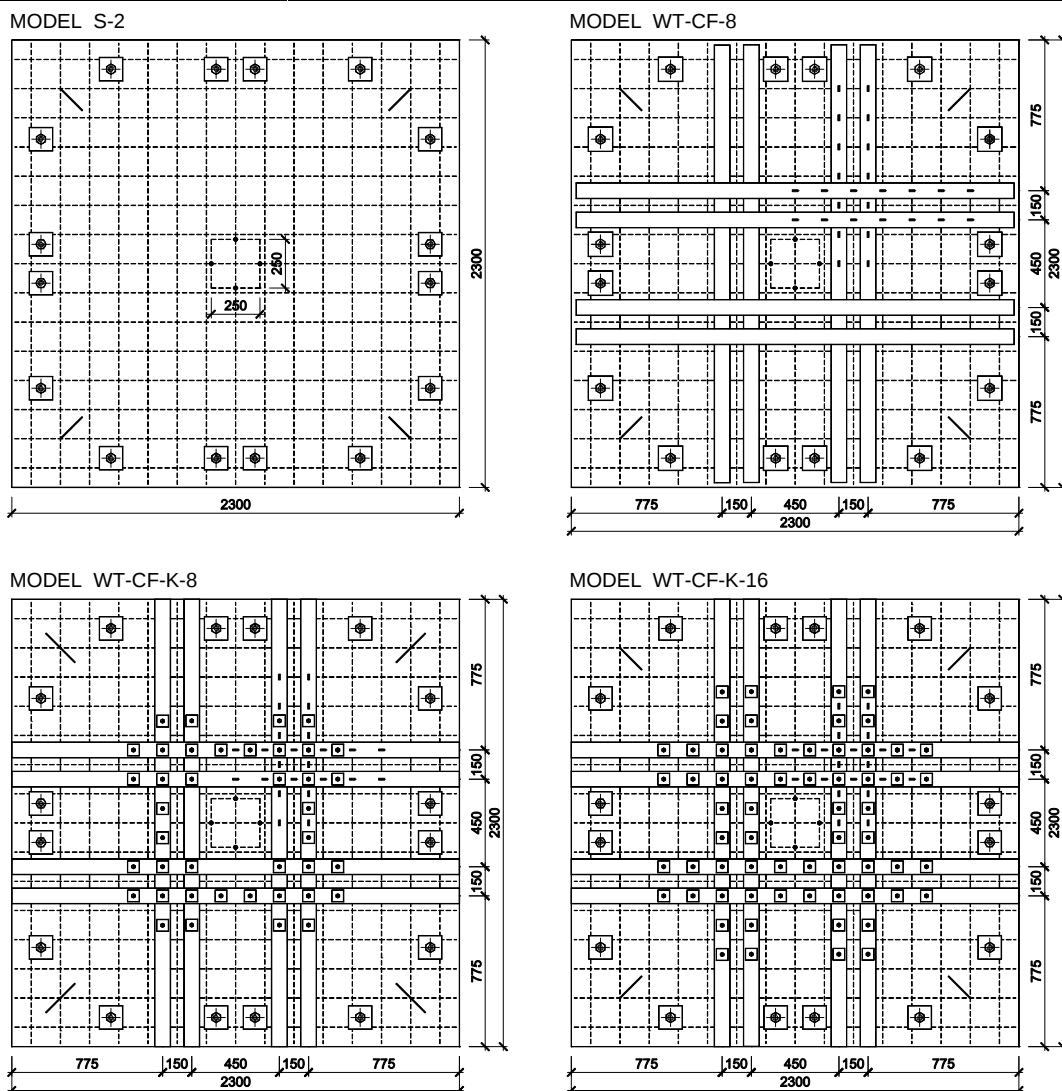
4.1. Opis modeli serii drugiej

Program badań, podobnie jak w pierwszej serii, obejmował cztery modele wykonane z tej samej mieszanki betonowej. Zbrojenie modeli było takie same, jak w pierwszej serii. Jako zbrojenia wzmacniającego użyto taśm typu CFRP o przekroju $1,4 \times 90 \text{ mm}$. W tabeli 4.1 zestawiono badane modele wraz z liczbami taśm wzmacniających. Realizacja badań przebiegała tak samo, jak w pierwszej serii. Na rys. 4.1 pokazano usytuowanie taśm CFRP na badanych elementach.

Tablica 4.1. Zestawienie modeli serii drugiej

Table 4.1. Comparison of the second series models

Model Specimen	Liczba taśm CFRP Number of CFRP strips	Sposób wzmocnienia Way of strengthening
S-2	-	model świadek bez wzmocnienia / control model without strengthening
WT-CF-8	8	taśmy klejone do płyty / strips stuck to the plate
WT-CF-K-8	8	taśmy klejone do płyty oraz zakotwione wkładanymi śrubami M10 strips stuck to the plate and anchored by the inserted bolts M10
WT-CF-K-16	16	dwie warstwy taśm klejone do płyty oraz zakotwione wkładanymi śrubami M10 two layers of strips stuck to the plate and anchored by the inserted bolts M10



Rys. 4.1. Badane modele drugiej serii – widok od góry

Fig. 4.1. Tested models of second series – upper view

4. TEST OF SECOND SERIES

4.1. Description of second series models

Tests programs, like in the first series, included four models made from the same concrete mix. Reinforcement of specimens was identical like in first series. As strengthening reinforcement there were used strips, type of CFRP of cross-section equal $1,4 \times 90 \text{ mm}$. There are presented in Table 4.1 all tested models together with numbers of strengthening strips. The realization of tests was carried out in the same way as in first series. Fig. 4.1. shows the position of CFRP strips in the tested elements.

Trzy modele zostały wzmocnione taśmami CFRP. Model WT-CF-8 wzmocniono 8 taśmami mocowanymi do powierzchni płyty wyłącznie za pomocą kleju na bazie żywicy epoksydowych. Element WT-CF-K-8 także wzmocniono 8 taśmami, ale oprócz kleju taśmy były mocowane dodatkowo śrubami wklejanymi M10. Ostatni z serii model WT-CF-K-16 wzmocniono 16 taśmami - taśmy klejono w dwóch warstwach. W tym wypadku również zastosowano dodatkowe mocowanie za pomocą wklejanych śrub, przy czym zwiększono ich liczbę do 80 szt. Długość wklejanego odcinka śruby w płycie wynosiła w obu modelach 100mm. Lokalizację śrub pokazano na rys. 4.1.

4.2. Wyniki badań modeli serii drugiej

Wyniki badań materiałów

Betonowanie wszystkich modeli odbyło się z jednej partii betonu. Najwcześniej zbadany został model WT-CF-8 – po 257 dniach od daty betonowania, natomiast jako ostatni, element WT-CF-K-16 – po 357 dniach od zabetonowania. Pomimo różnic wieku betonu w trakcie badania poszczególnych modeli, nie zanotowano istotnych różnic jego wytrzymałości. Ostatecznie średnie parametry betonu dla całej serii zakwalifikowano następująco:

- $f_{c,cube} = 48,3\text{MPa}$,
- $f_{cm} = 38,8\text{MPa}$,
- $f_{sp} = 3,42\text{MPa}$,
- $E_c = 25,7\text{GPa}$.

Użyte w badaniach taśmy karbodurowe o przekroju $1,4 \times 90\text{mm}$ charakteryzowały się cechami (wg danych producenta):

- $A_{CFRP} = 126\text{mm}^2$,
- $f_{CFRP} = 3100\text{MPa}$,
- $E_{CFRP} = 174\text{GPa}$ (własny pomiar).

Wyniki badań nośności

Uzyskane nośności eksperymentalne (V_{exp}) poszczególnych modeli zestawiono w tabeli 4.2.

Tablica 4.2. Nośność modeli drugiej serii

Table 4.2. Load-carrying capacity of second series models

Model Specimen	d [mm]	V_{exp} [kN]	Przelicznik korygujący Correction re-counter	V_{corr} [kN]	Wzrost nośności [%] Increase of load-carrying capacity
S-2	145	495	1,028	508,9	-
WT-CF-8	150	550	0,982	540,1	6,1
WT-CF-K-8	148	625	1,000	625,0	22,8
WT-CF-K-16	149	675	0,991	668,9	31,4

Jak widać z powyższej tabeli, wzmocnienie płyt taśmami CFRP pozwoliło uzyskać umiarkowany wzrost nośności w stosunku do modelu świadka S-2. Mocowanie taśm wyłącznie za pomocą kleju dało najmniejszy przyrost nośności, podobnie, jak to miało miejsce w badaniach [2]. Dodatkowe mocowanie śrubami zwiększa znacznie efektywność wzmacniania.

Model S-2 zniszczył się gwałtownie pod obciążeniem 495kN, w sposób, który można nazwać eksplozyjnym.

Three models were strengthened by strips CFRP. Specimen WT-CF-8 was strengthened by 8 strips anchored to the slab surface only by means of epoxy adhesive. Element WT-CF-K-8 was also strengthened by 8 strips, but except of glue, strips were fixed additionally by inserted bolts M10. The last model from this series WT-CF-K-16 was strengthened by 16 strips – strips were stuck in two layers. Also in that case there was used additional fastening by means of inserted screws, but their number was increased to 80 units. The length of inserted section of bolts inside of the slab was 100mm in both models. The location of bolts is shown in fig. 4.1.

4.2. Test results of the second series models

Results of the materials tests

Casting of all specimens was carried out from one lot of concrete. At the earliest the model WT-CF-8 was tested – after 257 days from the casting date while as the last one, element WT-CF-K-16 after 357 days from casting. In spite of the differences in concrete age during tests of particular models, there were any significant differences noticed in its strength. Finally the average concrete parameters for whole series were qualified as follow:

- $f_{c,cube} = 48,3\text{MPa}$,
- $f_{cm} = 38,8\text{MPa}$,
- $f_{sp} = 3,42\text{MPa}$,
- $E_c = 25,7\text{GPa}$.

Used in tests carborundum strips of the cross-section equal $1,4 \times 90\text{mm}$ were characterized by the parameters (by the producer data):

- $A_{CFRP} = 126\text{mm}^2$,
- $f_{CFRP} = 3100\text{MPa}$,
- $E_{CFRP} = 174\text{GPa}$ (own measurement).

Test results of the load-carrying capacity

Experimental load-carrying capacities (V_{exp}) of particular models are compared in Table 4.2.

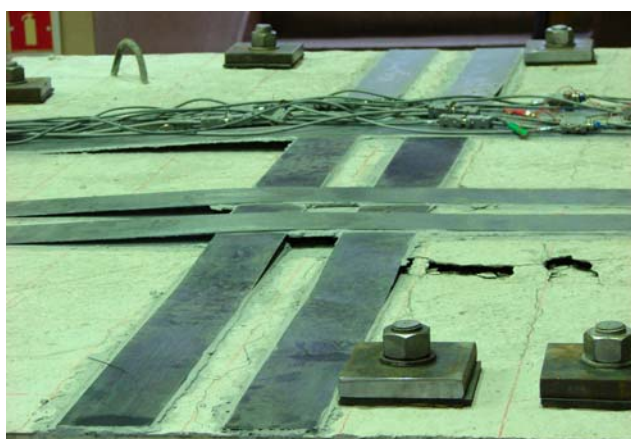
As it can be seen from the table above, strengthening of slabs by CFRP strips allowed to obtain the moderate increase of load-carrying capacity in comparison to the control model S-2. fastening the strips only by means of glue resulted in the lowest increase in load-carrying capacity, which is similar to the results obtained in the investigations by [2]. Additional anchorage by bolts increases the strengthening efficiency significantly.

Specimen S-2 failed rapidly under the loading of 495kN, in the way that may be described as explosive.

Podobnie wyglądała utrata nośności dla modelu WT-CF-8. Kolejne dwa elementy WT-CF-K-8 i WT-CF-K-16, w których zastosowano dodatkowo kotwienie taśm w postaci wklejanych śrub. Uległy one zniszczeniu w sposób znacznie bardziej „łagodny” - szczególnie było to widoczne dla modelu z podwojoną liczbą taśm.

Jak widać efektywność taśm CFRP jest znacznie mniejsza od płaskowników stalowych. Fakt ten można tłumaczyć kilkoma przyczynami, a mianowicie:

- mniejszy od stali moduł odkształcalności (zastosowane taśmy miały moduł 174GPa),
- mały przekrój poprzeczny taśm ($90 \times 1,4 = 126 \text{ mm}^2$) w stosunku do płaskowników ($80 \times 8 = 640 \text{ mm}^2$),
- charakterystyczny sposób niszczenia poprzez odpajanie się taśmy na krawędzi rysy ukośnej, który można przyrównać do efektu „prucia” (patrz rys. 4.2 i 4.3).



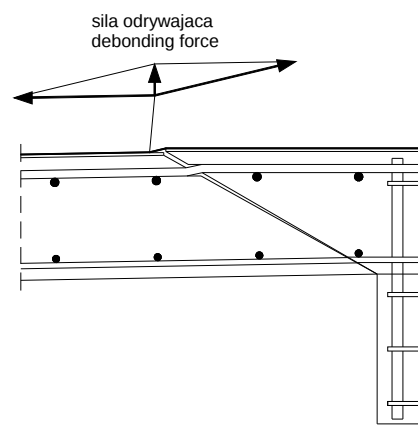
Rys. 4.2. Widok modelu WT-CF-8 po zniszczeniu

Fig. 4.2. View of the model WT-CF-8 after failure

Punching shear failure of model WT-CF-8 had the similar course. Two consecutive specimens WT-CF-K-8 and WT-CF-K-16, where additional anchorage of strips in form of inserted bolts were applied, failed in the way much more “soft” – which was especially exhibited by the specimen with double number of strips.

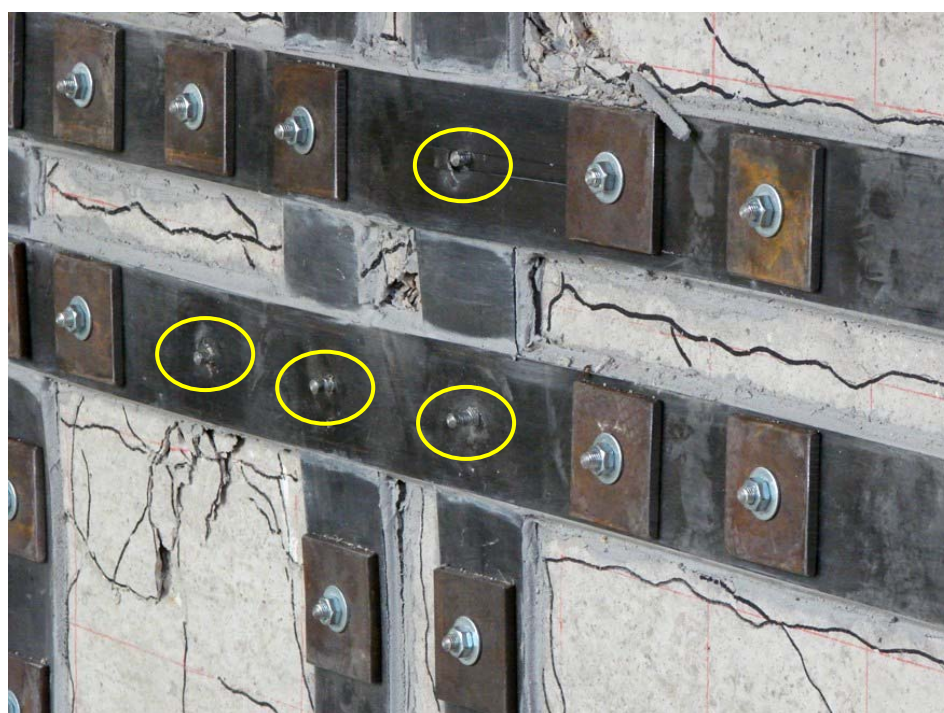
As could be seen, the efficiency of CFRP strips is significant lower than flat irons. That fact can be explained by few reasons, as follow:

- lower than for steel the modulus of elasticity (the strips used had the modulus of 174GPa).
- small cross-section of strips ($90 \times 1,4 = 126 \text{ mm}^2$) in relation to the flat irons ($80 \times 8 = 640 \text{ mm}^2$),
- characteristic mode of failure by the debonding of CFRP strips on the edge of diagonal crack, which might be compared to the “unstitching” effect (see. fig. 4.2 and 4.3).



Rys. 4.3. Mechanizm odpajania się taśm na wylocie rysy ukośnej

Fig. 4.3. Mechanism of strip's debonding on the outside of diagonal crack



Rys. 4.4. Fragment płyty modelu WT-CF-K-16 po zniszczeniu z zaznaczonymi śrubami z zerwanym gwintem

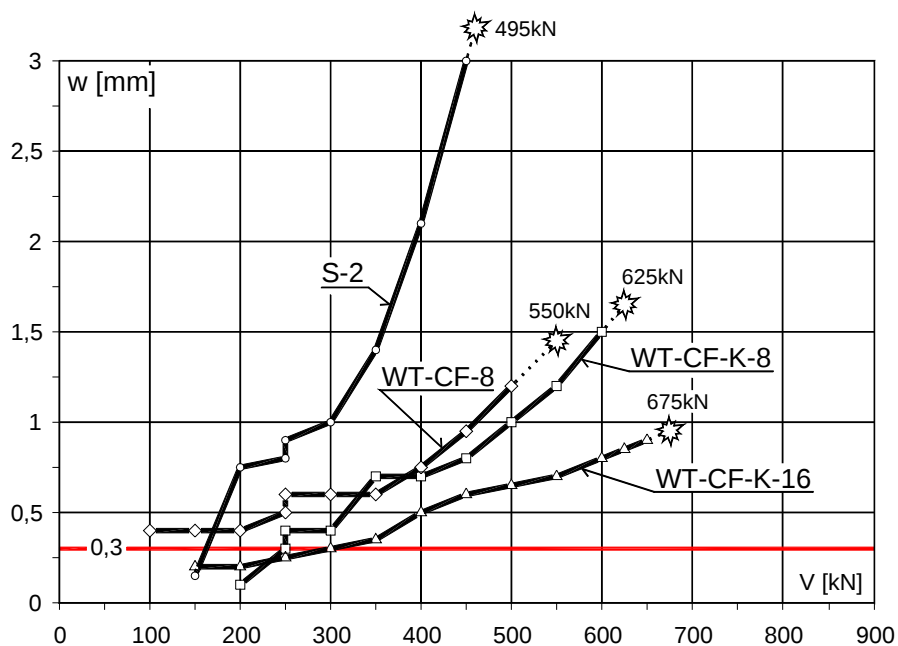
Fig. 4.4. Fragment of WT-CF-K-16 specimen after failure with marked broken screw-thread

Niekorzystnemu zjawisku odklejania się taśm miały zapobiec wklejane śruby, które zastosowano w modelach WT-CF-K-8 i WT-CF-K-16. Wyniki badań tych elementów potwierdziły zasadność takiego rozumowania. Model WT-CF-K-8 zwiększył swą nośność o 75kN w stosunku do modelu WT-CF-8 z taką samą liczbą taśm, ale bez śrub. Modele ze śrubami niszczyły się w charakterystyczny sposób polegający na zrywaniu gwintu kotwiących śrub. Na rys. 4.4 pokazano fragment płyty WT-CF-K-16 po zniszczeniu z zaznaczonymi śrubami z zerwanym gwintem.

The inserted screws used in the models WT-CF-K-8 and WT-CF-K-16 should prevent the disadvantageous phenomenon of unsticking the strips. Test results of these elements confirmed the rightness of such a solution. Model WT-CF-K-8 increased its load-carrying capacity of about 75kN in relation to the model WT-CF-8 with the same number of strips, but without bolts. Specimens with bolts failed in characteristic way consisting in debonding of anchoring screw-threads. There is shown in fig. 4.4 a fragment of WT-CF-K-16 slab after failure with marked screws of broken thread.



Rys. 4.5. Modele serii drugiej po przecięciu płyty w licu słupa
Fig. 4.5. Second series models after cutting the plate in column face



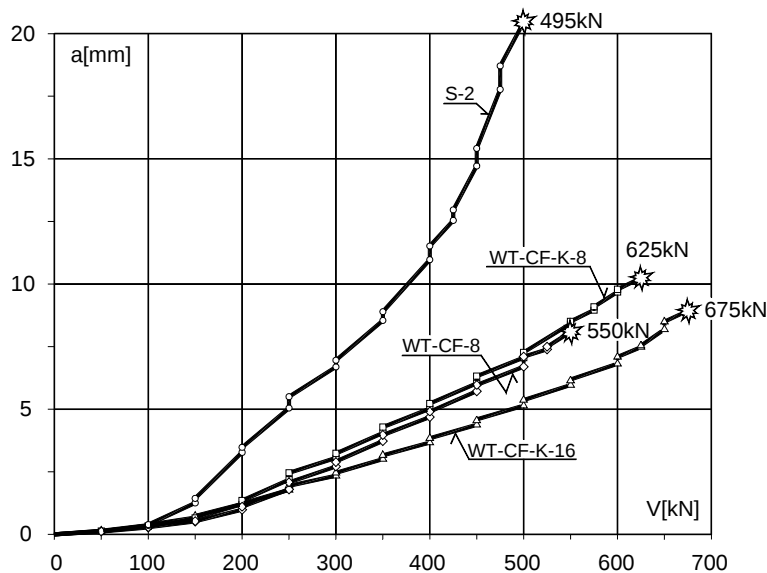
Rys. 4.6. Porównanie rys o maksymalnej szerokości rozwarcia modeli serii drugiej
Fig. 4.6. Comparison of cracks with maximum width for the second series models

Wyniki pomiarów przemieszczeń

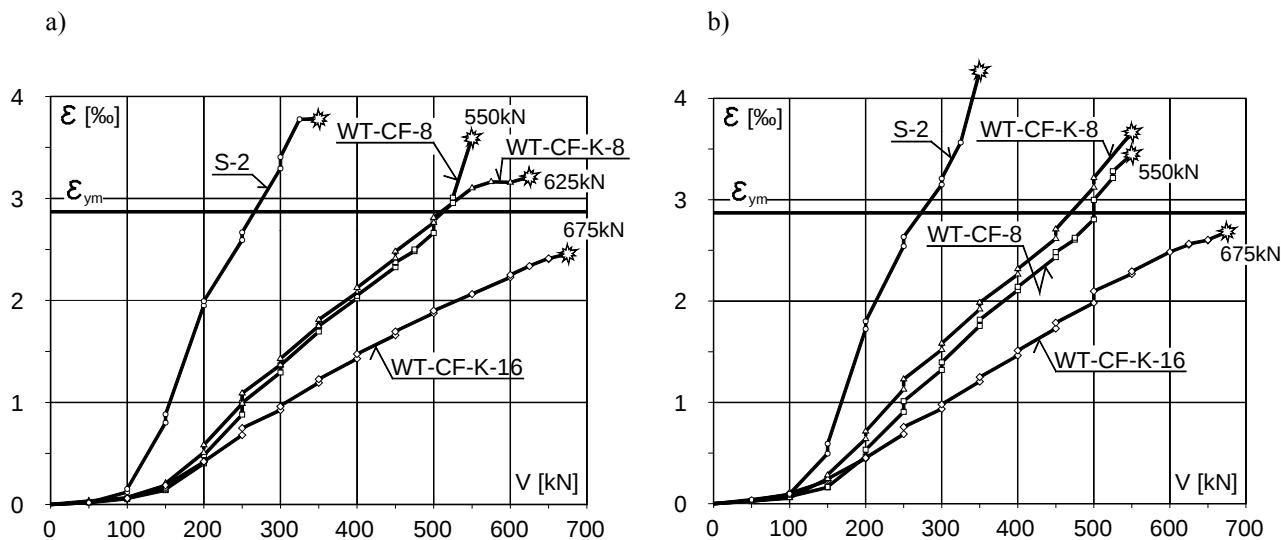
Na rys. 4.7 porównano strzałki ugięcia poszczególnych elementów. Daje się zauważyć wyraźny wpływ zbrojenia zewnętrznego na sztywność płyty. Zastosowanie dodatkowego kotwienia w postaci wklejanych śrub na sztywność płyty nie miało większego wpływu (modele WT-CF-8 i WT-CF-K-8). Dopiero użycie dwóch warstw taśm i wklejanych śrub w modelu WT-CF-K-16 zaowocowało zwiększeniem sztywności płyty.

Measurements results of the displacements

There were compared in fig. 4.7. the deflections of particular elements. It can be observed the distinct influence of the external reinforcement on slab's stiffness. Application of additional anchorage in form of inserted bolts had no greater influence (models WT-CF-8 and WT-CF-K-8). Only while applying two layers of strips and inserted screws in the specimen WT-CF-K-16 resulted in an increase if the slab's stiffness.



Rys. 4.7. Porównanie przemieszczeń płyt serii drugiej
Fig. 4.7. Comparison of the displacements of second series slab



Rys. 4.8. Porównanie odkształceń zbrojenia głównego: a) górne pręty siatki, b) dolne pręty siatki
Fig. 4.8. Comparison of the strains of main reinforcement: a) upper bars of the mesh, b) bottom bars of the mesh

Wyniki pomiarów odkształceń zbrojenia głównego

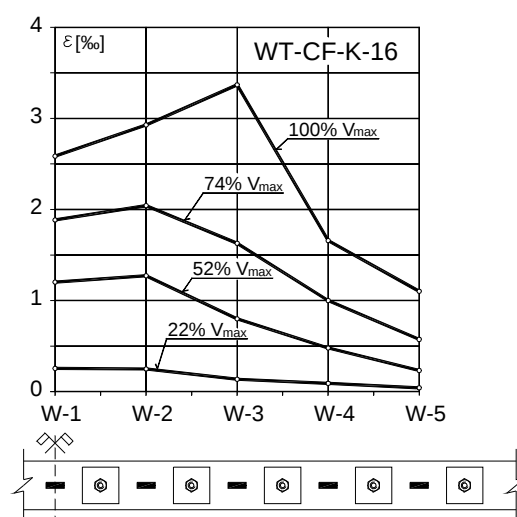
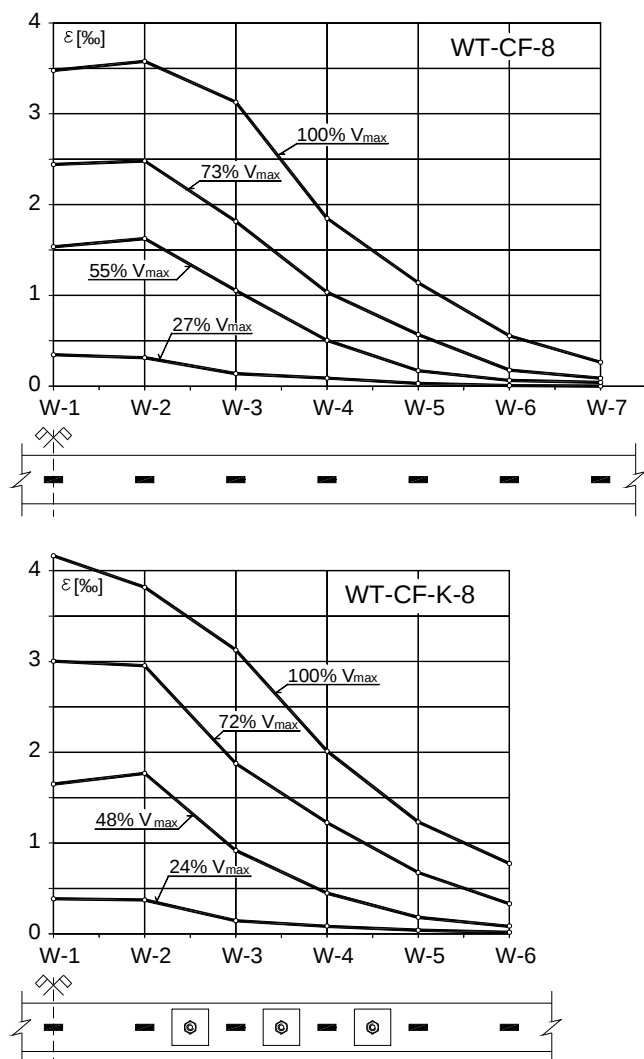
Na rys. 4.8 pokazano wykresy odkształceń prętów zbrojenia głównego w miejscu przecięcia ich z krawędzią słupa. Pozioma linia obrazuje granicę plastyczności zbrojenia. Model świadek S-2 osiągnął tę wartość przy obciążeniu około 270kN. Elementy wzmocnione taśmami WT-CF-8 i WT-CF-K-8 przekroczyły granicę plastyczności zbrojenia płytowego dopiero powyżej obciążenia 475kN, zaś w modelu WT-CF-K-16 stal zbrojeniowa w badanym miejscu nie uległa uplastycznieniu.

Measurements results of the main reinforcement strains

There are shown in fig. 4.8 the diagrams of the strains of main reinforcement bars in place of their intersection with the column edge. The horizontal line illustrates the yield strength of the reinforcement. The control model S-2 achieved this value under the loading of about 270kN. Elements strengthened by strips (WT-CF-8 and WT-CF-K-16) exceeded the yield strength of slab reinforcement only above the load of 475kN, but in the model WT-CK-K-16 the reinforcing steel did not yield in tested place.

Przedstawione wyniki odkształceń zbrojenia głównego są bezpośrednim dowodem skuteczności działania zbrojenia zewnętrznego. Zewnętrzne zbrojenie spowodowało znaczącą redukcję odkształceń (naprężeń) zbrojenia głównego. Wielkość tej redukcji zależała od liczby taśm wzmocnienia. Natomiast kotwienie taśm za pomocą śrub na odkształcenia zbrojenia płytowego nie miało większego wpływu (patrz wykresy modeli WT-CF-8 i WT-CF-K-8 na rys. 4.8).

The presented results of main reinforcement strains are the direct proof of the efficiency of external reinforcement effect. The external reinforcement caused the significant reduction of strains (stresses) of the main reinforcement. The magnitude of this reduction depended from the number of strengthening strips. But the anchorage of strips by means of bolts did not significant influence the strains of slab reinforcement (see the diagrams of models WT-CF-8 and WT-CF-K-8 in fig. 4.8).



Rys. 4.9. Odkształcenia taśm wzmocnienia
Fig. 4.9. Strains of strips of the strengthening

Wyniki pomierzonych odkształceń zbrojenia zewnętrznego

Na rys. 4.9 pokazano wyniki pomiarów odkształceń taśm CFRP usytuowanych bliżej słupa. Jak widać z powyższych wykresów maksymalne odkształcenia wynosiły około 4‰, co potwierdza wyniki uzyskane w pracy [2].

4.3. Wnioski z badań serii drugiej

Przedstawione wyniki badań serii drugiej potwierdziły możliwość wzmocniania płyt żelbetowych na przebiecie za pomocą zbrojenia zewnętrznego typu CFRP.

Results of the measured strains of the external reinforcement

There are shown in fig. 4.9 the results of measurements of the strains of CFRP strips located near column. As we can see from the diagrams above, the maximum strains figured out about 4‰, that confirms the results obtained in work [2].

4.3. Conclusions from the second series tests

Presented results of the second series tests confirmed the possibility of the strengthening of reinforced concrete slab in punching by means of the external reinforcement type of CFRP.

Zastosowanie taśm mocowanych do płyty wyłącznie za pomocą kleju, daje dość umiarkowane efekty wzmacniania rzędu kilkunastu procent. Wynik ten jest zbliżony z rezultatami uzyskanymi przez autorów pracy [2]. Można się spodziewać lepszego wykorzystania taśm CFRP, jeśli oprócz kleju zostaną równocześnie zastosowane wklejane śruby. Przyczyną stosunkowo małej efektywności taśm karbodurowych jest ich mały przekrój poprzeczny i niski moduł odkształcalności. Wykorzystane w badaniach taśmy miały przekrój około $1,26\text{cm}^2$, a więc były porównywalne z prętem zbrojeniowym o średnicy $\varnothing 12$. Biorąc pod uwagę niższy moduł odkształcalności taśm CFRP ($E_{\text{CFRP}}/E_s = 0,87$), efektywny przekrój taśmy w przeliczeniu na stalowe zbrojenie wynosi $0,87 \times 1,26 = 1,10\text{cm}^2$. W modelach z 4 taśmami w jednym kierunku przekrój zbrojenia zewnętrznego wzrastał o $4,40\text{cm}^2$, a z 8 taśmami o $8,80\text{cm}^2$, co stanowiło odpowiednio około 25% i 50% zbrojenia prętowego znajdującego się w płycie. Uzyskane efekty wzrostu nośności na przebicie są więc adekwatne do wzrostu stopnia zbrojenia płytowego.

Application of the strips fastened to the plate only with glue gives rather moderate effects of the strengthening, range of anywhere from ten to twenty. This result is convergent with the results obtained by the authors of work [2]. It could be expected the better use at the same time the inserted screws. The reason of relatively small efficiency of carborundum strips is their small cross-section and low modulus of elasticity. The strips used in tests had the cross-section of about $1,26\text{cm}^2$, so they were comparable with the reinforcing bar of diameter $\varnothing 12$. Regarding the lower modulus of elasticity of CFRP strips ($E_{\text{CFRP}}/E_s = 0,87$), the effective cross-section of the strip in re-count on the steel reinforcement is equal $0,87 \times 1,26 = 1,10\text{cm}^2$. In specimen with 4 strips in one direction, the cross-section of the external reinforcement increased of $4,40\text{cm}^2$, and with 8 strips of $8,80\text{cm}^2$, that is about 25% and 50% of the slab bars reinforcement, respectively. The obtained effects of the increase of load-carrying capacity in punching are therefore adequate to the increase of slab reinforcement ratio.

5. BADANIA SERII TRZECIEJ

5.1. Opis modeli serii trzeciej

Trzecia seria elementów została poświęcona wyjaśnieniu zagadnienia wpływu wielkości otuliny zbrojenia głównego płyty na nośność przebiecia. Przeszczepianie się zbrojenia górnego w płytach żelbetowych jest dość powszechnie spotykanym błędem wykonawczym. Zmniejszenie się przy tej okazji wysokości użytecznej płyty (d) może być poważnym powodem zaniżenia bezpieczeństwa konstrukcji. Jednocześnie autorzy badań podjęli próbę sprawdzenia możliwości naprawy takiej sytuacji.

Seria trzecia składała się również z 4 elementów wykonanych jednocześnie, z tej samej mieszanki betonowej. Model S-3 miał nominalną otulinę 2cm. W pozostałych modelach otulina została zwiększona do 5cm. Dwa modele zostały wzmocnione za pomocą stalowych płaskowników (po 8 szt.). Płaskowniki były klejone i jednocześnie mocowane śrubami. Jeden z modeli WPSK-8' miał wykonane wzmocnienie przed jego obciążeniem, tak jak to miało miejsce w poprzednich seriach. Natomiast model WPSK-8'' był wzmocniany pod obciążeniem odpowiadającym mniej więcej obciążeniu eksploatacyjnemu. Harmonogram badania tego modelu przedstawiono na rys. 5.1.

Na rys. 5.2, 5.3 i 5.4 pokazano kolejne fazy wzmocniania modelu na stanowisku badawczym pod obciążeniem. Najpierw model stopniowo obciążano do poziomu 200kN, co stanowiło 54% obciążenia krytycznego z uwzględnieniem błędu usytuowania zbrojenia. W stosunku do modelu nominalną otuliną (S-3), przyłożone obciążenie stanowiło tylko około 42% nośności, czyli odpowiadało mniej więcej obciążeniu eksploatacyjnemu. Należy tutaj zaznaczyć, że pod obciążeniem 200kN płyta miała już rysy o szerokości rozwarcia 1,20mm. Jeden z czujników tensometrycznych usytuowanych na zbrojeniu głównym nad krawędzią słupa wykazał przekroczenie odkształcenia plastycznego, osiągając wydłużenie 2,98‰.

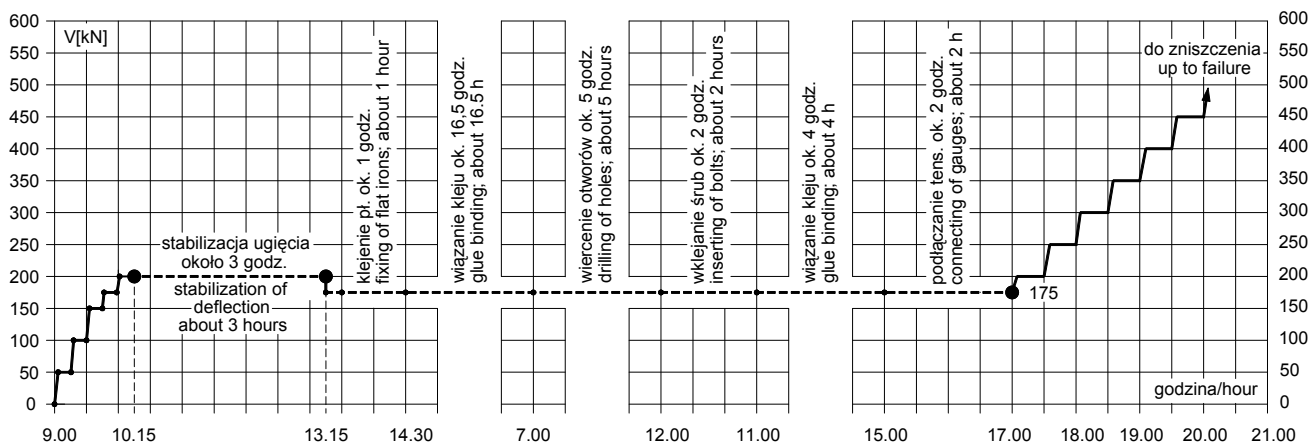
5. TEST OF THIRD SERIES

5.1. Description of third series models

Third series of elements was devoted to the explanation of the problem what is the influence of the magnitude of cover of the slab's main reinforcement of the load-carrying capacity in punching. The displacement of the upper reinforcement in reinforced concrete plates is rather commonly met mistake in realization. The diminution of the effective depth by this occasion could be the serious reason of the decrease of the construction safety. At the same time the authors of the investigations took up the attempt to check possibility of the repair in such a situation.

Third series consisted of also 4 elements made at the same time, from the same concrete mix. Specimen S-3 had nominal cover of 2cm. In the models left, the cover was increased to 5cm. Two models were strengthened by means of flat irons (in groups of 8 units). Flat irons were stuck and at the same time they were fixed by screws. One of the specimens WPSK-8' was strengthened before its loading, like in previous series. On the contrary the model WPSK-8'' was strengthened under loading corresponding more-less with the exploitation loading. The test's timetable of this specimen is presented in fig. 5.1.

There are shown in fig. 5.2., 5.3 and 5.4 the successive phases of the specimen's strengthening at the test stand under loading. First the specimen was loaded step by step to the level of 200kN, that is 54% of the critical loading with regarding the mistake of the reinforcement position. In relation to the model with the nominal cover (S-3), the applied load was only about 42% of the load-carrying capacity, so it responded more-less to the exploitation loading. It should be here remark, that under the load of 200kN, slab had already cracks of the width 1,20mm. One of the electric resistance strains gauges situated on the main reinforcement over the column edge exceeded the plastic strains, reaching the elongation of 2,98‰.



Rys. 5.1. Harmonogram badania modelu WPSK-8''

Fig. 5.1. Timetable of the test of WSPK-8'' specimen



Rys. 5.2. Rozkładanie kleju na płycie modelu WPSK-8''

Fig. 5.2. Arrangement the glue on the plate of WPSK-8'' model



Rys. 5.3. Dociskanie płaskowników po ich ułożeniu na warstwie kleju

Fig. 5.3. Pressing home the flat irons after their arrangement on the layer of glue



Rys. 5.4. Czyszczenie otworów pod śruby sprężonym powietrzem
Fig. 5.4. Cleaning the opening under the bolts with the compression air

5.2. Wyniki badań modeli serii trzeciej

Wyniki badań materiałów i położenia zbrojenia

W tabeli 5.1 zestawiono wyniki badań materiałów oraz rzeczywistego położenia zbrojenia siatki górnej.

Tablica 5.1. Parametry modeli serii trzeciej
Table 5.1. Parameters of the third series specimens

Model Specimen	Otulina nominalna Nominal cover [mm]	Wysokość użyteczna pomierzona Effective depth measured d [mm]	Wytrzymałość betonu [MPa] Concrete strength [MPa]		
			$f_{c,cube}$	f_{cm}	f_{sp}
S-3	20	147	47,0	38,9	3,70
S-4	50	118	45,5	40,2	3,70
WPSK-8'		118	46,0	40,5	4,20
WPSK-8''		119	46,0	39,1	3,65

Ostatecznie średnie parametry betonu dla całej serii zakwalifikowano w następujący sposób:

- $f_{c,cube} = 46,1\text{MPa}$,
- $f_{cm} = 39,6\text{MPa}$,
- $f_{sp} = 3,81\text{MPa}$,

5.2. Test results of third series models

Test results of the materials and location of reinforcement

There are compared in Table 5.1. tests results of the materials and real location of the upper net reinforcement.

Finally the average concrete parameters for whole series were classified in following way:

- $f_{c,cube} = 46,1\text{MPa}$,
- $f_{cm} = 39,6\text{MPa}$,
- $f_{sp} = 3,81\text{MPa}$,

Parametry wytrzymałościowe płaskowników trzeciej serii na podstawie badań własnych ustalono jako następujące:

- $A_{s,fi} = 6,48\text{cm}^2$ - średnie pole przekroju,
- $f_{y,h} = 338\text{MPa}$ - górna granica plastyczności,
- $f_{y,l} = 308\text{MPa}$ - dolna granica plastyczności,
- $f_{y,fi} = 316\text{MPa}$ - średnia granica plastyczności,
- $E_{s,fi} = 206\text{GPa}$ - moduł Younga.

Parametry zbrojenia głównego – jak w poprzednich seriach.

Wyniki badań nośności

Nośność modeli serii trzeciej zestawiono w tabeli 5.2.

Tablica 5.2. Nośność modeli serii trzeciej

Table 5.2. Load-carrying capacity of third series models

Model Specimen	Wysokość użyteczna pomierzona Measured effective depth d [mm]	V_{exp} [kN]	Wskaźnik $V_{exp}/V_{exp\ S-3}$ Index $V_{exp}/V_{exp\ S-3}$	Wskaźnik $V_{exp}/V_{exp\ S-4}$ Index $V_{exp}/V_{exp\ S-4}$
S-3	147	475	1,000	1,293
S-4	118	367	0,773	1,000
WPSK-8'	118	700	1,474	1,907
WPSK-8''	119	675	1,421	1,839

Jak widać z tabeli 5.2, przemieszczenie się zbrojenia górnego płyty o około 30mm do dołu od poziomu nominalnego zmniejszyło jej nośność na przebiecie o około 23%. Zastosowanie zbrojenia zewnętrznego w postaci płaskowników stalowych pozwoliło na zrekompensowanie błędu zmniejszenia wysokości użytecznej płyty ze znacznym zapasem. Wzrost nośności w stosunku do modelu nominalnego S-3 wyniósł w modelu WPSK-8' – 47%, a w modelu WPSK-8'' – 42%. Wzrost nośności w stosunku do modelu S-4 ze zmniejszoną wysokością użyteczną płyty wyniósł odpowiednio więcej – 91 i 84%. Zaobserwowano nieznaczny 6% spadek nośności modelu wzmacnianego pod obciążeniem w stosunku do modelu nie obciążonego w trakcie wzmacniania.

Strength parameters of the flat irons of third series was estimated based on the own tests as follow:

- $A_{s,fi} = 6,48\text{cm}^2$ - mean area of cross-section,
- $f_{y,h} = 338\text{MPa}$ - upper yield strength,
- $f_{y,l} = 308\text{MPa}$ - lower yield strength,
- $f_{y,fi} = 316\text{MPa}$ - mean yield strength,
- $E_{s,fi} = 206\text{GPa}$ - Young's modulus.

Main reinforcement parameters – as in previous series.

Results of the load-carrying capacity tests

There is the load-carrying capacity of third series models compared in Table. 5.2.

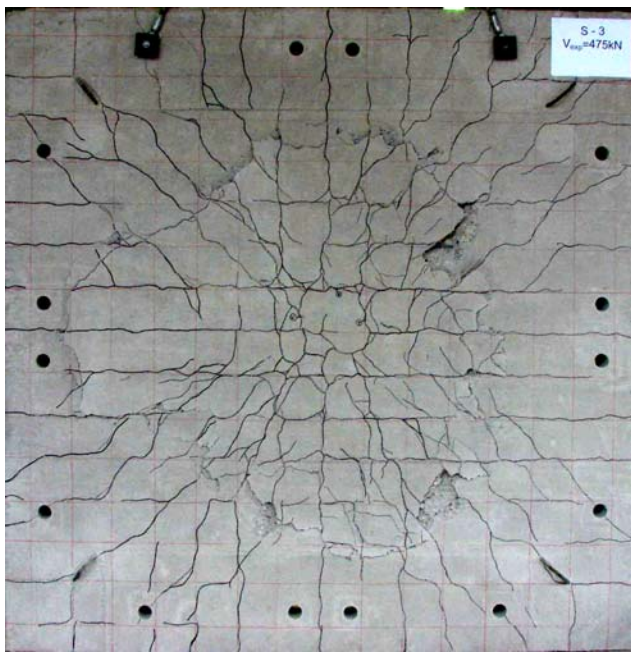
As it can be seen from Table 5.2, displacement of the upper slab reinforcement of about 30mm towards bottom from the nominal level caused the reduction of its load-carrying capacity in punching of about 23%. Applying of external reinforcement in form of flat irons allowed to make up for the mistake of diminution of the slab's effective depth with significant reserve. The increase of load-carrying capacity in relation to model S-4 with diminished effective depth of the slab was respectively greater – 91 and 84%. There was observed small (6%) decrease of load-carrying capacity of the specimen strengthened before loading in comparison with the model which was not loaded during the strengthening.



Rys. 5.4. Modele serii trzeciej po przecięciu płyt w licu słupa
Fig. 5.4. Third series models after cutting the slabs in column face

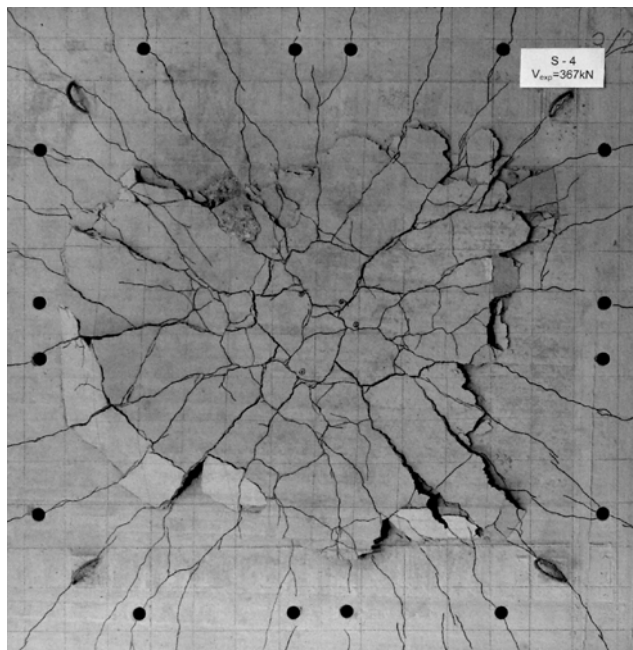
Wyniki pomiarów szerokości rozwarcia rys

Na rysunku 5.6 pokazano morfologię rys w stanie granicznym nośności dwóch modeli różniących się grubością otuliny. W modelu S-3 o otulinie grubości 2cm daje się wyraźnie zauważyć wpływ siatki zbrojenia górnego na morfologię rys. Natomiast w przypadku modelu S-4 o otulinie 5cm zbrojenie praktycznie nie wpływa na kierunek rozwoju rys. Rozwój rys jest determinowany kierunkiem momentów głównych.

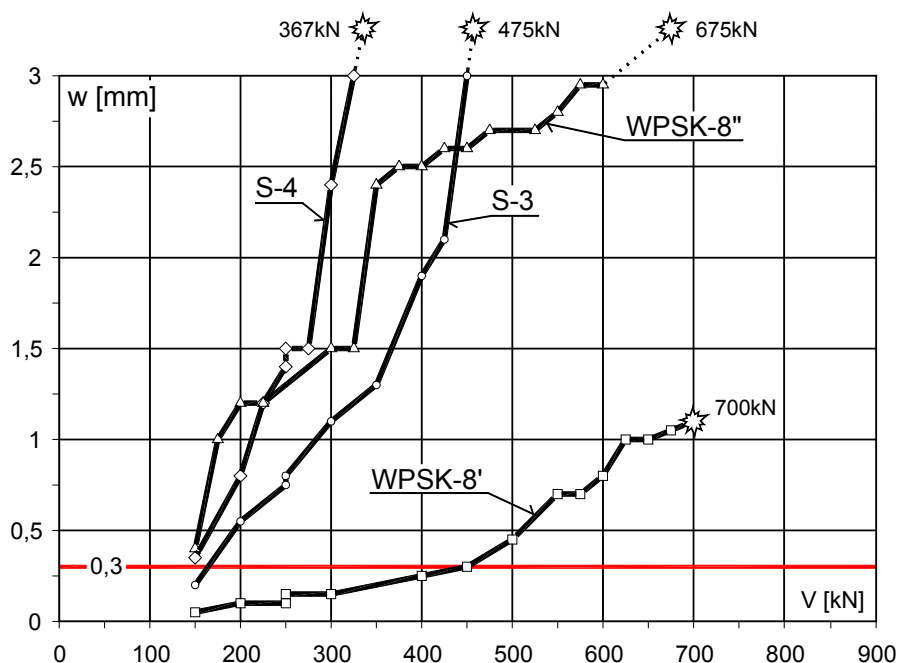


Results of the cracks width measurements

There is presented in fig. 5.6 the cracks morphology in the ultimate limit state of two models differing in the cover's depth. It can be clear observed in model S-3 with cover of 2cm depth the influence of the upper reinforcement net on the cracks morphology. But in the case of specimen S-4 with the 5cm cover, the reinforcement does not practically influenced the direction of cracks development. The crack propagation is determined by the main moments direction.



Rys. 5.6. Porównanie morfologii rys modeli różniących się grubością otuliny: S-3 – otulina 20mm, S-4 – otulina 50mm
Fig. 5.6. Comparison of the cracks morphology of the specimens differing in the cover depth: S-3 – cover 20mm, S-4 – cover 50mm



Rys. 5.7. Porównanie rys o maksymalnej szerokości rozwarcia modeli serii trzeciej
Fig. 5.7. Comparison of cracks with maximum width for the third series models

Analiza rys. 5.7 wykazuje, że położenie zbrojenia głównego ma istotne znaczenie na szerokość rozwarcia rys. Model S-4 z mniejszym d (większą otuliną) wykazywał znacznie większe rozwarcia rys przy tych samych obciążeniach niż model S-3 ze zbrojeniem z nominalną otuliną 20mm.

Analiza rozwoju rys w modelu WPSK-8'' wykazała, że wzmocnienie płaskownikami zadziałało efektywnie dopiero przy sile 350kN. Od tego poziomu obciążenia wykresy rozwoju rys dla obu wzmocnionych modeli przebiegają prawie równolegle.

Wyniki pomiarów przemieszczeń

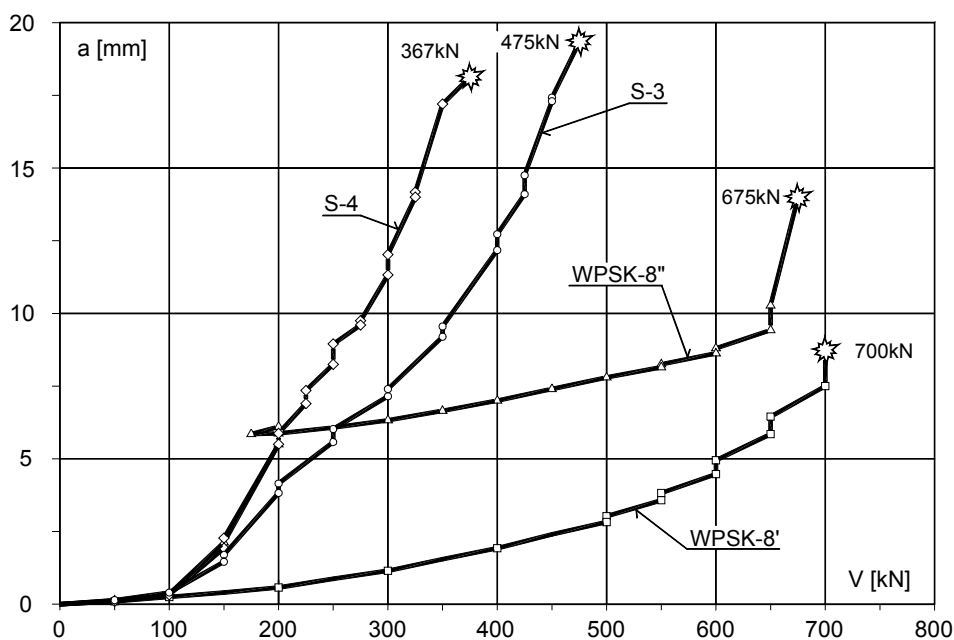
Na rys. 5.8 zestawiono wykresy przemieszczeń płyt serii trzeciej. Widoczny jest efekt usztywnienia płyt w modelach wzmocnionych płaskownikami. Zainstalowanie wzmocnienia pod obciążeniem 175kN (model WPSK-8'') spowodowało znaczny wzrost sztywności płyty, co uwiidocznio się odchyleniem wykresu w stosunku do analogicznego wykresu modelu nie wzmocnionego S-4. Do momentu wzmocnienia oba wykresy praktycznie się pokrywały.

Analysis of fig. 5.7 shows, that location of main reinforcement has significant meaning on the cracks width. Model S-4 with smaller d (greater cover) showed considerably greater cracks width at the same loadings than model S-3 with reinforcement of nominal cover 20mm.

Analysis of cracks propagation in WPSK-8'' specimen showed, that strengthening by flat irons worked effectively only at the force of 350kN. From this load level the diagrams of cracks propagation for both strengthened models run almost parallel.

Measurements results of the displacements

There are compared in fig. 5.8 the diagrams of the displacements of third series slabs. There is visible the effect of stiffening the slabs in the models strengthened by flat irons. Installation the strengthening under the loading of 175kN (specimen WPSK-8'') caused the significant increase of slab stiffness, what was visible by the deviation of the diagram versus to the analogous diagram for the unstrengthened model S-4. Till the moment of strengthening both diagrams were practically in line.



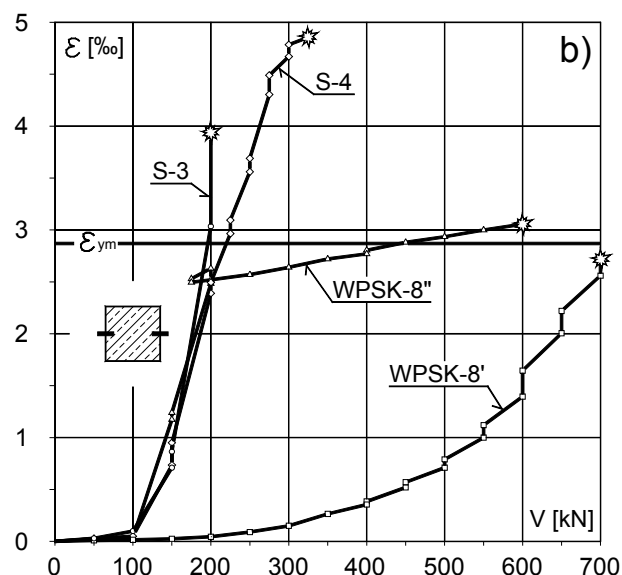
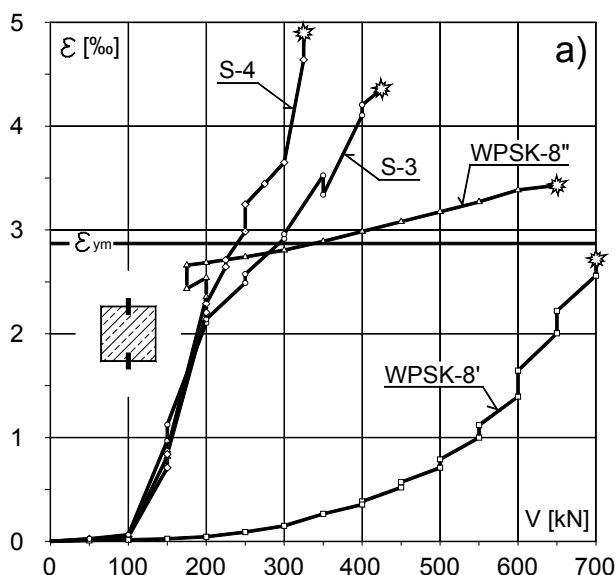
Rys. 5.8. Porównanie przemieszczeń płyt serii trzeciej
Fig. 5.8. Comparison of the displacements of third series slabs

Wyniki odkształceń zbrojenia głównego

Wykresy na rys. 5.9 pokazują odkształcenia zbrojenia głównego płyty w funkcji obciążenia. W modelu WPSK-8' zbrojenie prętowe płyty nie uplastyczyło się w stanie granicznym nośności. Z kolei w modelu WPSK-8'' wzmocnionym pod obciążeniem zbrojenie to osiągnęło granicę plastyczności, ale jego przyrosty odkształceń drastycznie zmalały w momencie zainstalowania zbrojenia zewnętrznego.

Results of the strains of main reinforcement

The diagrams in fig. 5.9 shows the main reinforcement strains of slabs versus the loading. In WPSK-8' model the bar reinforcement of slab did not yield in the ultimate limit state. What next, in the WPSK-8'' model strengthened under the load, this reinforcement reached the yield strength, but its strains increments drastic diminished at the moment of installation the external reinforcement.



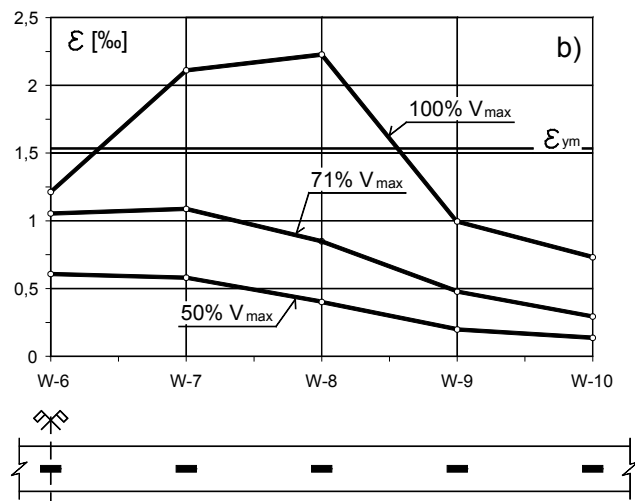
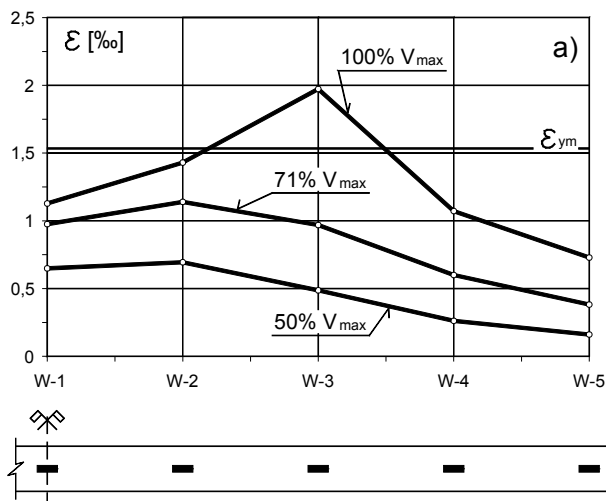
Rys. 5.9. Porównanie odkształceń zbrojenia głównego: a) dolne pręty siatki, b) górne pręty siatki
Fig. 5.9. Comparison of the main reinforcement strains: a) the bottom bars of the mesh, b) the upper bars of the mesh

Wyniki pomiarów odkształceń zbrojenia zewnętrznego

Na rys. 5.10 pokazano odkształcenia płaskowników modelu WPSK-8'. Wartości na wykresach są średnimi z dwóch czujników umieszczonych na płaskownikach wzajemnie prostopadłych do siebie i znajdujących się w tej samej odległości od krawędzi słupa. Analogiczne wykresy zamieszczono na rys. 5.11 dotyczące modelu WPSK-8''.

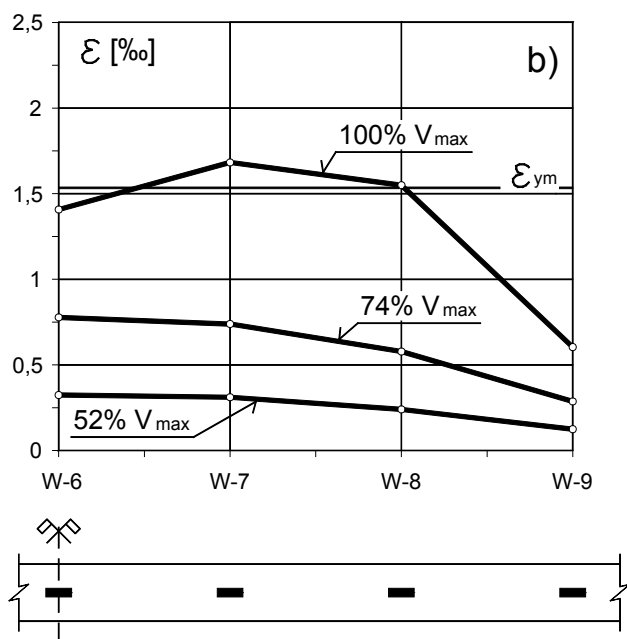
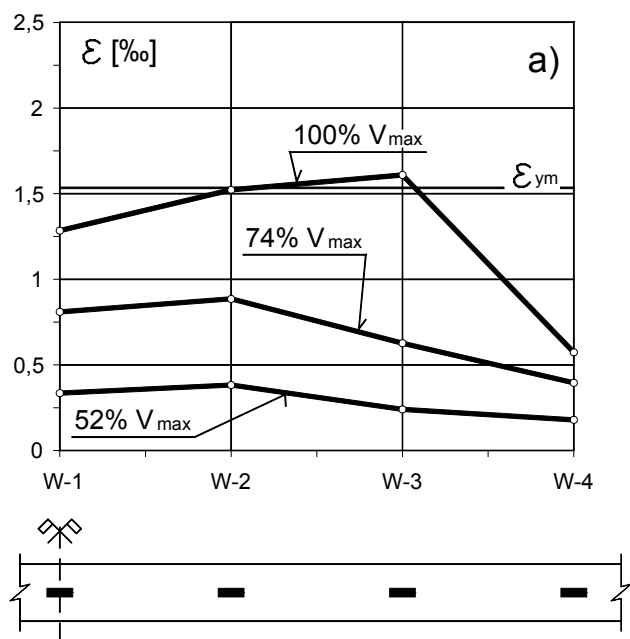
Results of the strains measurements of external reinforcement

There is shown in fig. 5.10 the strains of flat irons of the WPSK-8' model. The values on diagrams are the mean values from two gauges placed on the mutual perpendicular flat irons situated in the same distance from the column edge. Analogous diagrams are put in fig. 5.11 referring the specimen WPSK-8''.



Rys. 5.10. Odkształcenia płaskowników w modelu WPSK-8':
a) płaskowniki położone bliżej słupa, b) płaskowniki zewnętrzne

Fig. 5.10. Strain of flat irons in specimen WPSK-8':
a) flat irons located beside column face, b) external flat irons



Rys. 5.11. Odształcenia płaskowników w modelu WPSK-8'':
a) płaskowniki położone bliżej słupa, b) płaskowniki zewnętrzne
Fig. 5.11. The strains of flat irons in the WPSK-8'' model:
a) flat irons situated near column, b) external flat irons

Jak widać z powyższych wykresów, najbardziej wytężone miejsca płaskowników znajdowały się w pobliżu przekątnych płyt. W obu modelach w stanie granicznym nośności doszło do lokalnego uplastycznienia zbrojenia zewnętrznego.

At it can be seen from the diagrams above, the most strenuous places of flat irons were near the slab diagonals. In both models at the ultimate limit state it came to the local yielding of external reinforcement.

6. PRÓBA ANALIZY NOŚNOŚCI PŁYT NA PRZEBICIE ZE ZBROJENIEM ZEWNĘTRZNYM

6.1. Zbrojenie zewnętrzne w postaci płaskowników

Analizę przeprowadzono dla modeli z płaskownikami klejonymi i jednocześnie mocowanymi śrubami. Modele te w pełni wykorzystywały parametry wytrzymałościowe materiału – osiągnęły granicę plastyczności w stanie granicznym nośności.

Zaproponowana propozycja obliczania nośności opiera się na metodzie Urbana [10], w której przyjęto trzy obszary mechanizmów niszczenia na przebicie, w zależności od mocy zbrojenia $\rho_1 \cdot f_y / f_c$. Są to:

- zginanie ($\rho_1 \cdot f_y / f_c \leq 0,15$),
- zginanie-ściananie ($0,15 < \rho_1 \cdot f_y / f_c \leq 0,30$),
- ściananie ($\rho_1 \cdot f_y / f_c > 0,30$).

Modyfikacja metody autorskiej dla połączeń ze zbrojeniem zewnętrznym polega na ustaleniu efektywnego stopnia zbrojenia ρ_{eff} i wysokości użytecznej d_{eff} . Różnice pomiędzy parametrami wytrzymałościowymi zbrojenia głównego i zewnętrznego uwzględnia się poprzez określenie przekroju zbrojenia zewnętrznego sprowadzonego, mnożąc rzeczywisty przekrój tego zbrojenia przez iloraz granicy plastyczności zbrojenia głównego do granicy plastyczności płaskowników.

W metodzie [10] dla każdego z trzech mechanizmów zniszczenia ustalono doświadczalne zależności określające naprężenia krytyczne v_u w przekroju kontrolnym, usytuowanym w odległości $d/2$ od krawędzi podpory. Naprężenia krytyczne określają następujące wzory empiryczne:

$$\text{dla } \frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}} \leq 0,15 :$$

$$v_u = (0,065 + 1,064 \frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}}) \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$$

$$\text{dla } 0,15 < \frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}} \leq 0,30 :$$

$$v_u = \left[1,97 \cdot \frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}} - 3,15 \cdot \left(\frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}} \right)^2 \right] \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$$

$$\text{dla } \frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}} > 0,3$$

$$v_u = (0,275 + 0,108 \cdot \frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}}) \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$$

gdzie:

ρ_1 - stopień zbrojenia płyty żelbetowej, średni dla dwóch kierunków,

f_{yk} - granica plastyczności zbrojenia rozciąganego,

f_{ck} - wytrzymałość walcowa betonu na ściskanie.

Stopień zbrojenia płytowego określa się jako średnią geometryczną z dwóch kierunków:

$$\rho_1 = \sqrt{\rho_{1,x} \cdot \rho_{1,y}}$$

6. ATTEMPT OF ANALYSIS OF THE SLABS LOAD-CARRYING CAPACITY IN PUNCHING WITH THE EXTERNAL REINFORCEMENT

6.1. External reinforcement in form of flat irons

Analysis was carried out for the specimens with flat irons stucked and fixed by bolts at the same time. These specimens utilized fully the strength parameter of the material – reached the yield strength in the ultimate limit state.

Suggested method of calculation of the load-carrying capacity is based on the Urban's method [10], in which three areas of punching failure mechanisms were assumed, defined by reinforcement mechanical ratio parameter $\rho_1 \cdot f_y / f_c$. These are:

- flexure ($\rho_1 \cdot f_y / f_c \leq 0,15$),
- flexure-shear ($0,15 < \rho_1 \cdot f_y / f_c \leq 0,30$),
- shear ($\rho_1 \cdot f_y / f_c > 0,30$).

Modification of author's method for connections with external reinforcement consists in settlement of the effective depth d_{eff} . Differences between strength parameters of main and external reinforcement are taken into account by definition of a converted cross-section area of external reinforcement, by multiplying the actual area of this reinforcement by the quotient of the yield strength of main reinforcement to the flat irons yield strength.

For each of the three failure mechanisms in method [10], experimental critical stresses v_u in analysed section, placed at a distance $d/2$ from a support edge, were established. The critical stresses are defined by the following empirical formulas:

$$\text{for } \frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}} \leq 0,15 :$$

$$v_u = (0,065 + 1,064 \frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}}) \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$$

$$\text{for } 0,15 < \frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}} \leq 0,30 :$$

$$v_u = \left[1,97 \cdot \frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}} - 3,15 \cdot \left(\frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}} \right)^2 \right] \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$$

$$\text{for } \frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}} > 0,3$$

$$v_u = (0,275 + 0,108 \cdot \frac{\rho_1 \cdot f_{yk}}{f_{ck}}) \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$$

where:

ρ_1 - reinforcement ratio for longitudinal reinforcement, mean for two directions,

f_{yk} - yield stress of slab reinforcement,

f_{ck} - concrete compressive cylindrical strength.

Slab reinforcement ratio is defined as geometrical average from two directions:

$$\rho_1 = \sqrt{\rho_{1,x} \cdot \rho_{1,y}}$$

Ostatecznie w metodzie [2] nośność przebiecia płyty bez zbrojenia poprzecznego określa wzór:

$$V_u(c) = k_{d/c} \cdot k_s \cdot v_u \cdot u_p \cdot d$$

gdzie:

$k_{d/c}$ - współczynnik zależny od stosunku wysokości użytecznej płyty d do wymiaru efektywnego podpory c (dla słupa kwadratowego równy długości boku, a w pozostałych przypadkach równy wartości $\sqrt{A_c}$ gdzie A_c jest polem przekroju poprzecznego podpory);

k_s - współczynnik skali, dany wzorem:

$$k_s = 0,5 + \sqrt{\frac{50}{d}} \leq 1,0$$

v_u - naprężenie graniczne w przekroju kontrolnym płyty,

u_p - obwód kontrolny usytuowany w odległości $d/2$ od lica podpory,

d - średnia wysokość użyteczna płyty [mm], przy zróżnicowanej mocy zbrojenia można przyjmować zgodnie z poniższym wzorem:

$$d = \frac{A_{sx} \cdot d_x + A_{sy} \cdot d_y}{A_{sx} + A_{sy}}$$

w którym A_{sx} i A_{sy} oznaczają pola przekroju zbrojenia rozciąganego odpowiednio w kierunkach x i y w m^2/m , a d_x i d_y wysokości użyteczne płyty określone dla tych kierunków.

MODEL S-1

Stopień zbrojenia płyty:

Ø12 co 150mm, wysokość użyteczna $d=147mm$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 14,7} = 0,00505 \approx 0,5\%$$

Moc zbrojenia

wytrzymałość betonu $f_{cm} = 45MPa$,

granica plastyczności $f_{ym} = 573MPa$,

$$\frac{\rho_L \cdot f_{ym}}{f_{cm}} = \frac{0,005 \cdot 573}{45} = 0,0637$$

Nośność płyty na przebiecie:

$V_{cal} = 442,3kN$ (mechanizm zniszczenia typu zginanie)

Nośność eksperymentalna modelu S-1:

$V_{exp} = 500kN$ **$V_{exp}/V_{cal} = 1,13$**

MODEL WPSK-8

Stopień zbrojenia płyty wzmacnianej:

Ø12 co 150mm, wysokość użyteczna $d=152mm$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 15,2} = 0,00496 \approx 0,5\%$$

Moc zbrojenia:

wytrzymałość betonu $f_{cm}=45MPa$,

granica plastyczności $f_{ym}=573MPa$,

$$\frac{\rho_L \cdot f_{ym}}{f_{cm}} = \frac{0,005 \cdot 573}{45} = 0,0637$$

Płyta wzmocniona 8 płaskownikami klejonymi o przekroju $A_{s,fi}=6,55cm^2$, $f_{y,fi}=325MPa$ (S235), wysokość użyteczna $d_{er}=180+4=184mm$,

Finally, in the method [2], punching capacity of slab without shear reinforcement is given by formula:

$$V_u(c) = k_{d/c} \cdot k_s \cdot v_u \cdot u_p \cdot d$$

where:

$k_{d/c}$ - coefficient run on slab depth d to effective size of support c ratio (for rectangular column equal to side length and in the other cases equal to $\sqrt{A_c}$ value, where A_c is an area of support transverse section);

k_s - scale coefficient:

$$k_s = 0,5 + \sqrt{\frac{50}{d}} \leq 1,0$$

v_u - critical stress in analysed section of slab,

u_p - calculation perimeter located at the distance of $d/2$ from support face,

d - slab depth in [mm], according to:

$$d = \frac{A_{sx} \cdot d_x + A_{sy} \cdot d_y}{A_{sx} + A_{sy}}$$

where A_{sx} i A_{sy} represents cross-section area of reinforcement respectively in x and y directions [m^2/m], and d_x i d_y slab depth defined for the same directions.

SPECIMEN S-1

Slab's reinforcement ratio:

Ø12 every 150mm, effective depth $d=147mm$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 14,7} = 0,00505 \approx 0,5\%$$

Reinforcement power

concrete strength $f_{cm} = 45MPa$,

yield strength $f_{ym} = 573MPa$,

$$\frac{\rho_L \cdot f_{ym}}{f_{cm}} = \frac{0,005 \cdot 573}{45} = 0,0637$$

Design value of the punching shear resistance

$V_{cal} = 442,3kN$ (mechanism of failure type of bending)

Experimental load-carrying capacity of specimen S-1:

$V_{exp} = 500kN$ **$V_{exp}/V_{cal} = 1,13$**

SPECIMEN WPSK-8

Reinforcement ratio of strengthened slab:

Ø12 every 150mm, effective depth $d=152mm$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 15,2} = 0,00496 \approx 0,5\%$$

Reinforcement power:

concrete strength $f_{cm}=45MPa$,

yield strength $f_{ym}=573MPa$,

$$\frac{\rho_L \cdot f_{ym}}{f_{cm}} = \frac{0,005 \cdot 573}{45} = 0,0637$$

Slab strengthened by 8 stucked flat irons with the cross-section of $A_{s,fi}=6,55cm^2$, $f_{y,fi}=325MPa$ (S235), effective depth $d_{er}=180+4=184mm$,

$$\rho_{fi} = \frac{A_{s,fi}}{b \cdot d_{er}} = \frac{4 \cdot 6,55}{200 \cdot 18,4} = 0,00712 \approx 0,71\%$$

pole przekroju sprowadzone:

$$A'_{s,er} = \frac{f_{y,fi}}{f_{ym}} \cdot A_{s,fi} = \frac{325}{573} \cdot 6,55 = 3,72 \text{ cm}^2$$

efektywna wysokość użyteczna:

$$d_{eff} = \frac{14,47 \cdot 15,2 + 4 \cdot 3,72 \cdot 18,4}{14,47 + 14,88} = \frac{493,74}{29,35} = 16,82 \text{ cm}$$

efektywny stopień zbrojenia:

$$\rho_{eff} = \frac{A_{s,tot}}{b \cdot d_{eff}} = \frac{14,47 + 4 \cdot 3,72}{200 \cdot 16,82} = 0,00872 \approx 0,87\%$$

Nośność płyty na przebicie:

V_{cal} = 781,1kN (mechanizm zniszczenia typu zginanie)

Nośność eksperymentalna modelu WPSK-8:

V_{exp} = 825kN **V_{exp}/V_{cal} = 1,06**

W tabeli 6.1 zestawiono wyniki analizy nośności, wraz z wielkościami pośrednimi, według autorskiej propozycji.

Tablica 6.1. Porównanie wyników analizy teoretycznej z wynikami eksperymentalnymi modeli wzmacnianych płaskownikami stalowymi

Table 6.1. Comparison of the theoretical analysis with the experimental results for the specimens strengthened by flat irons

Model Specimen	d [mm]	ρ_l [%]	$\rho_l \cdot f_{ym}/f_{cm}$	$A'_{s,gr}$ [cm ²]	d_{eff} [mm]	ρ_{eff} [%]	V_{exp} [kN]	V_{calc} [kN]	V_{exp}/V_{calc}
S-1	147	0,51	0,064	-	-	-	500	442,3	1,13
S-3	147	0,51	0,072	-	-	-	475	434,5	1,09
S-4	118	0,63	0,087	-	-	-	367	332,9	1,10
WPSK-8	152	0,50	0,064	3,72	168	0,87	825	781,1	1,06
WPSK-8'	118	0,63	0,087	3,57	151	0,97	700	685,4	1,02
WPSK-8''	119	0,62	0,087	3,57	151	0,95	675	688,4	0,99

Jak widać z powyższego zestawienia modele bez wzmocnień wykazują ponad 10% zapas nośności eksperymentalnej nad obliczeniową. W przypadku modeli wzmacnianych przy zerowym obciążeniu ten zapas jest znacznie mniejszy. W modelu WPSK-8'' wzmacnianym pod daleko zaawansowanym obciążeniem występuje nawet 1% deficyt nośności teoretycznej do eksperymentalnej. Wydaje się, że przyjęcie d_{eff} według średniej ważonej ze zbrojenia głównego i zewnętrznego jest zbyt optymistyczne. Dlatego w następnym podejściu przyjęto zasadę określania tego parametru w inny sposób, wprowadzając ograniczenie dla zbrojenia zewnętrznego $d_{fi}=h$ (wysokość użyteczna równa się grubości płyty). Dalej sposób liczenia d_{eff} pozostawiono bez zmian.

Model WPSK-8

Stopień zbrojenia płyty wzmacnianej:

Ø12 co 150mm, wysokość użyteczna $d=152\text{mm}$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 15,2} = 0,00496 \approx 0,5\%$$

Moc zbrojenia:

wytrzymałość betonu $f_{cm}=45\text{MPa}$,

granica plastyczności $f_{ym}=573\text{MPa}$,

$$\frac{\rho_L \cdot f_{ym}}{f_{cm}} = \frac{0,005 \cdot 573}{45} = 0,0637$$

$$\rho_{fi} = \frac{A_{s,fi}}{b \cdot d_{er}} = \frac{4 \cdot 6,55}{200 \cdot 18,4} = 0,00712 \approx 0,71\%$$

converted cross-section area:

$$A'_{s,er} = \frac{f_{y,fi}}{f_{ym}} \cdot A_{s,fi} = \frac{325}{573} \cdot 6,55 = 3,72 \text{ cm}^2$$

effective design depth:

$$d_{eff} = \frac{14,47 \cdot 15,2 + 4 \cdot 3,72 \cdot 18,4}{14,47 + 14,88} = \frac{493,74}{29,35} = 16,82 \text{ cm}$$

effective reinforcement ratio:

$$\rho_{eff} = \frac{A_{s,tot}}{b \cdot d_{eff}} = \frac{14,47 + 4 \cdot 3,72}{200 \cdot 16,82} = 0,00872 \approx 0,87\%$$

Design value of the punching shear resistance

V_{cal} = 781,1kN (mechanism of failure type of bending)

Experimental load-carrying capacity of specimen **WPSK-8:**

V_{exp} = 825kN **V_{exp}/V_{cal} = 1,06**

In Table 6.1 the results of the analysis of ultimate punching load-carrying capacity are compared, according to the author's suggestion.

As it can be seen from the comparison above, specimens without strengthening show over 10% reserve of the experimental load-carrying capacity in relation to the calculated values. In case of the specimens strengthened at the load equal zero, that reserve is significant smaller. In case of WPSK-8'' model strengthened under the far advanced loading it take place even 1% of the deficit of theoretical punching resistance in relation to experiment. It seems, that assumption of d_{eff} by the weighing mean from the main and external reinforcement appear to be too optimistic. That is why in the next attempt such a rule was assumed to define this parameter in another way, introducing the limit for the external reinforcement $d_w = h$ (effective depth equals the whole slab's depth). Next the way of calculation d_{eff} was not changed.

SPECIMEN WPSK-8

Reinforcement ratio of the strengthened slab:

Ø12 every 150mm, effective depth $d=152\text{mm}$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 15,2} = 0,00496 \approx 0,5\%$$

Reinforcement power:

concrete strength $f_{cm}=45\text{MPa}$,

yield strength $f_y=573\text{MPa}$,

$$\frac{\rho_L \cdot f_{ym}}{f_{cm}} = \frac{0,005 \cdot 573}{45} = 0,0637$$

Płyta wzmocniona 8 płaskownikami klejonymi o przekroju $A_{s,fi}=6,55\text{cm}^2$, $f_{ym}=325\text{MPa}$ (S235), wysokość użyteczna $d_{er}=180\text{mm}$,

$$\rho_{fi} = \frac{A_{s,fi}}{b \cdot d_{er}} = \frac{4 \cdot 6,55}{200 \cdot 18} = 0,00728 \approx 0,73\%$$

pole przekroju sprowadzone:

$$A'_{s,er} = \frac{f_{y,fi}}{f_{ym}} \cdot A_{s,fi} = \frac{325}{573} 6,55 = 3,72\text{cm}^2$$

efektywna wysokość użyteczna:

$$d_{eff} = \frac{14,47 \cdot 15,2 + 4 \cdot 3,72 \cdot 18}{14,47 + 14,88} = \frac{495,02}{29,35} = 16,87\text{cm}$$

efektywny stopień zbrojenia:

$$\rho_{eff} = \frac{A_{s,tot}}{b \cdot d_{eff}} = \frac{14,47 + 4 \cdot 3,72}{200 \cdot 16,87} = 0,008699 \approx 0,87\%$$

Nośność płyty na przebicie:

$V_{cal} = 784,7\text{kN}$ (mechanizm zniszczenia typu zginanie)

Nośność eksperymentalna modelu WPSK-8:

$V_{exp} = 825\text{kN}$ $V_{exp}/V_{cal} = 1,05$

Pokazane zestawienie w tabeli 6.2 z uwzględnieniem ograniczenia wysokości użytecznej dla zbrojenia zewnętrznego ($d_{er} = h$) zaowocowało poprawą wyników. Teraz stosunek nośności eksperymentalnej do obliczeniowej dla wszystkich wzmacnianych modeli jest większy od jedności. Wszystkie wyniki są po stronie bezpiecznej.

Tablica 6.2. Porównanie wyników analizy teoretycznej z wynikami eksperymentalnymi z uwzględnieniem ograniczonej wysokości użytecznej dla zbrojenia zewnętrznego

Table 6.2. Comparison of the theoretical analysis with the experimental results with regard to the limited effective depth for the external reinforcement

Model Specimen	d [mm]	ρ_l [%]	$\rho_l \cdot f_{ym}/f_{cm}$	$A'_{s,er}$ [cm ²]	d_{eff} [mm]	ρ_{eff} [%]	V_{exp} [kN]	V_{calc} [kN]	V_{exp}/V_{calc}
WPSK-8	152	0,50	0,064	3,72	169	0,87	825	784,7	1,05
WPSK-8'	118	0,63	0,087	3,57	149	0,97	700	665,5	1,05
WPSK-8''	119	0,62	0,087	3,57	149	0,97	675	666,5	1,01

6.2. Zbrojenie zewnętrzne w postaci taśm CFRP

Analiza nośności modeli wzmacnianych taśmami karbodurowymi wymaga uwzględnienia dwóch faktów:

- różnicy modułów odkształcalności pomiędzy zbrojeniem ze stalowych prętów i materiału kompozytowego,
- granicznego odkształcenia taśm kompozytowych w stanie granicznym niszczenia płyty na przebicie.

Dla stosowanych w badaniach taśm ustalono moduł odkształcalności równy $E_{CFRP} = 174\text{GPa}$. Zakładając, że moduł dla prętów stalowych wynosi $E_s = 200\text{GPa}$ (nie wykonano własnych badań), to stosunek $E_{CFRP}/E_s = 0,87$.

Dla modelu WT-CF-8 zarejestrowano w stanie granicznym nośności na poszczególnych taśmach następujące odkształcenia 3,392, 3,344, 3,835 i 3,249‰. Przyjmując graniczne wydłużenie taśm równe średniej z tych wielkości $\epsilon_{u,CFRP} = 3,455\%$ możemy ustalić graniczne naprężenia, jakie mogą wystąpić w stanie krytycznym nośności – $f_{u,CFRP} = 0,00346 \times 174000 = 602\text{MPa}$.

Slab strengthened by 8 sticked flat irons with cross-section of $A_{s,fi}=6,55\text{cm}^2$, $f_{ym}=325\text{MPa}$ (S235), effective depth $d_{er}=180\text{mm}$,

$$\rho_{fi} = \frac{A_{s,fi}}{b \cdot d_{er}} = \frac{4 \cdot 6,55}{200 \cdot 18} = 0,00728 \approx 0,73\%$$

converted cross-section area:

$$A'_{s,er} = \frac{f_{y,fi}}{f_{ym}} \cdot A_{s,fi} = \frac{325}{573} 6,55 = 3,72\text{cm}^2$$

design effective depth:

$$d_{eff} = \frac{14,47 \cdot 15,2 + 4 \cdot 3,72 \cdot 18}{14,47 + 14,88} = \frac{495,02}{29,35} = 16,87\text{cm}$$

effective reinforcement ratio:

$$\rho_{eff} = \frac{A_{s,tot}}{b \cdot d_{eff}} = \frac{14,47 + 4 \cdot 3,72}{200 \cdot 16,87} = 0,008699 \approx 0,87\%$$

Design value of the punching shear resistance of the slab

$V_{cal} = 784,7\text{kN}$ (mechanism of failure type of ending)

Experimental load-carrying capacity of specimen WPSK-8:

$V_{exp} = 825\text{kN}$ $V_{exp}/V_{cal} = 1,05$

Comparison shown in Table 6.2 with regard to the limitations of the effective depth for external reinforcement ($d_{er} = h$) bore a fruits in the improvement of results. Now the relation of the experimental load-carrying capacity to the calculated one is greater than 1,0 for all strengthened specimens.

6.2. External reinforcement in form of CFRP strips

The load-carrying capacity of the models strengthened by the carborundum strips requires taking into account two facts:

- the differences in modulus of elasticity between steel bars and the composite material,
- ultimate strain of composite strips in the ultimate limit state of failure in punching for slab.

For the strips used in tests there was defined the modulus of elasticity as equal $E_{CFRP} = 174\text{GPa}$. Assuming, that the modulus for steel bars is $E_s = 200\text{GPa}$ (the own test was not made), then the propagation $E_{CFRP}/E_s = 0,87$.

For the WT-CF-8 specimen there were recorded in the ultimate limit state on the particular strips the following strains: 3,392, 3,344, 2,835 and 3,249‰. Assuming the ultimate elongation of the strips equal the average one from these values, $\epsilon_{u,CFRP} = 3,455\%$, we can to settle the ultimate strains, which could appear in the critical limit state - $f_{u,CFRP} = 0,00346 \times 174000 = 602\text{MPa}$.

Model WT-CF-K-8 miał maksymalne odkształcenia poszczególnych taśm: 3,948, 3,748, 4,380 i 3,223%, co daje średnią wartość $\epsilon_{u,CFRP} = 3,825\%$. Odpowiadać będą tej wartości naprężenia graniczne $f_{u,CFRP} = 0,003825 \times 174000 = 665,6\text{MPa}$.

Model WT-CF-K-16 osiągnął następujące maksymalne odkształcenia taśm: 3,232, 3,683, 3,505 i 2,806%; wartość średnia $\epsilon_{u,CFRP} = 3,307\%$. Odpowiadać będą tej wartości naprężenia graniczne $f_{u,CFRP} = 0,003307 \times 174000 = 575,4\text{MPa}$.

Model WT-CF-8

Stopień zbrojenia płyty wzmacnianej:

Ø12 co 150mm, wysokość użyteczna $d=150\text{mm}$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 15,0} = 0,00495 \approx 0,5\%$$

Moc zbrojenia:

wytrzymałość betonu $f_{cm}=38,8\text{MPa}$,

granica plastyczności $f_{ym}=573\text{MPa}$,

$$\frac{\rho_L \cdot f_{ym}}{f_{cm}} = \frac{0,005 \cdot 573}{38,8} = 0,0738$$

Płyta wzmocniona 8 taśmami o przekroju $A_{CFRP}=1,26\text{cm}^2$,

$f_{u,CFRP}=602\text{MPa}$,

wysokość użyteczna $d_{ef}=180\text{mm}$,

$$\rho_w = \frac{A_{CFRP}}{b \cdot d_w} = \frac{4 \cdot 1,26}{200 \cdot 18} = 0,0014 \approx 0,14\%$$

pole przekroju sprowadzone:

$$A'_{s,er} = \frac{f_{u,CFRP}}{f_{ym}} \cdot A_{CFRP} = \frac{602}{573} \cdot 4 \cdot 1,26 = 5,295\text{cm}^2$$

efektywna wysokość użyteczna:

$$d_{eff} = \frac{14,47 \cdot 15 + 5,295 \cdot 18}{14,47 + 5,295} = \frac{312,36}{19,765} = 15,80\text{cm}$$

Efektywny stopień zbrojenia:

$$\rho_{eff} = \frac{A_{s,tot}}{b \cdot d_{eff}} = \frac{14,47 + 5,295}{200 \cdot 15,80} = 0,00625 \approx 0,625\%$$

Nośność płyty na przebiecie:

$V_{cal} = 560,4\text{kN}$ (mechanizm zniszczenia typu zginanie)

Nośność eksperymentalna modelu WT-CF-8:

$V_{exp} = 550\text{kN}$ $V_{exp}/V_{cal} = 0,98$

Model WT-CF-8

z uwzględnieniem współczynnika efektywności taśm 0,87

Stopień zbrojenia płyty wzmacnianej:

Ø12 co 150mm, wysokość użyteczna $d=150\text{mm}$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 15,0} = 0,00495 \approx 0,5\%$$

Moc zbrojenia:

wytrzymałość betonu $f_{cm}=38,8\text{MPa}$,

granica plastyczności $f_{ym}=573\text{MPa}$,

$$\frac{\rho_L \cdot f_{ym}}{f_{cm}} = \frac{0,005 \cdot 573}{38,8} = 0,0738$$

Płyta wzmocniona 8 taśmami o przekroju

$A_{eff,CFRP}=0,87 \cdot 1,26=1,10\text{cm}^2$, $f_{u,CFRP}=602\text{MPa}$,

wysokość użyteczna $d_{ef}=180\text{mm}$,

$$\rho_{CFRP} = \frac{A_{eff,CFRP}}{b \cdot d} = \frac{4 \cdot 1,10}{200 \cdot 18} = 0,00122 \approx 0,12\%$$

WF-CF-K-8 model had the maximum strains for particular strips: 3,948, 3,748, 4,380 and 3,223%, which give the average value $\epsilon_{u,CFRP} = 3,825\%$. There will be corresponding with that value the ultimate stresses $f_{u,CFRP} = 0,003825 \times 174000 = 665,6\text{MPa}$.

WT-CF-K-16 model reached the following maximum strains of strips: 3,232, 3,683, 3,505 and 2,806%; the mean value $\epsilon_{u,CFRP} = 3,307\%$. There will be corresponding with this value the ultimate stress $f_{u,CFRP} = 0,003307 \times 174000 = 575,4\text{MPa}$.

Specimen WT-CF-8

Reinforcement ratio of the strengthened slab

Ø12 every 150mm, effective depth $d=150\text{mm}$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 15,0} = 0,00495 \approx 0,5\%$$

Reinforcement ratio:

concrete strength $f_{cm}=38,8\text{MPa}$,

yield strength $f_{ym}=573\text{MPa}$,

$$\frac{\rho_L \cdot f_{ym}}{f_{cm}} = \frac{0,005 \cdot 573}{38,8} = 0,0738$$

Slab strengthened by 8 strips of the cross-section A_{CFRP}

$=1,26\text{cm}^2$, $f_{u,CFRP}=602\text{MPa}$,

effective depth $d_{ef}=180\text{mm}$,

$$\rho_w = \frac{A_{CFRP}}{b \cdot d_w} = \frac{4 \cdot 1,26}{200 \cdot 18} = 0,0014 \approx 0,14\%$$

converted cross-section area:

$$A'_{s,er} = \frac{f_{u,CFRP}}{f_{ym}} \cdot A_{CFRP} = \frac{602}{573} \cdot 4 \cdot 1,26 = 5,295\text{cm}^2$$

effective design depth:

$$d_{eff} = \frac{14,47 \cdot 15 + 5,295 \cdot 18}{14,47 + 5,295} = \frac{312,36}{19,765} = 15,80\text{cm}$$

Effective reinforcement ratio:

$$\rho_{eff} = \frac{A_{s,tot}}{b \cdot d_{eff}} = \frac{14,47 + 5,295}{200 \cdot 15,80} = 0,00625 \approx 0,625\%$$

Design punching shear resistance of slab:

$V_{cal} = 560,4\text{kN}$ (mechanism of failure, type of bending)

Experimental load-carrying capacity of specimen WT-CF-8:

$V_{exp} = 550\text{kN}$ $V_{exp}/V_{cal} = 0,98$

Specimen WT-CF-8

with regard of the strips effective coefficient 0,87

Reinforcement ratio of the strengthened slab:

Ø12 every 150mm, effective depth $d=150\text{mm}$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 15,0} = 0,00495 \approx 0,5\%$$

Reinforcement power:

concrete strength $f_{cm}=38,8\text{MPa}$,

yield strength $f_{ym}=573\text{MPa}$,

$$\frac{\rho_L \cdot f_{ym}}{f_{cm}} = \frac{0,005 \cdot 573}{38,8} = 0,0738$$

Slab strengthened by 8 strips of the cross-section

$A_{eff,CFRP}=0,87 \cdot 1,26=1,10\text{cm}^2$, $f_{u,CFRP}=602\text{MPa}$,

effective depth $d_{ef}=180\text{mm}$,

$$\rho_{CFRP} = \frac{A_{eff,CFRP}}{b \cdot d} = \frac{4 \cdot 1,10}{200 \cdot 18} = 0,00122 \approx 0,12\%$$

pole przekroju sprowadzone:

$$A'_{s,er} = \frac{f_{u,CFRP}}{f_{ym}} \cdot A_{eff,CFRP} = \frac{602}{573} \cdot 4 \cdot 1,10 = 4,62 \text{ cm}^2$$

efektywna wysokość użyteczna:

$$d_{eff} = \frac{14,47 \cdot 15 + 4,62 \cdot 18}{14,47 + 4,62} = \frac{300,21}{19,09} = 15,726 \text{ cm}$$

Efektywny stopień zbrojenia:

$$\rho_{eff} = \frac{A_{s,tot}}{b \cdot d_{eff}} = \frac{14,47 + 4,62}{200 \cdot 15,73} = 0,00607 \approx 0,607\%$$

Nośność płyty na przebicie:

V_{cal} = 546,2 kN (mechanizm zniszczenia typu zginanie)

Nośność eksperymentalna modelu WT-CF-8:

V_{exp} = 550 kN **V_{exp}/V_{cal} = 1,01**

Wyniki przedstawione w tabeli 6.3 świadczą o możliwości uwzględnienia zbrojenia zewnętrznego typu CFRP w obliczeniach nośności na przebicie. Konieczne jest jednak ograniczenie wytrzymałości tego zbrojenia do wielkości odpowiadającej jego granicznemu wydłużeniu w stanie krytycznym nośności płyty. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz wyników z badań [2], można tę wielkość przyjąć $\epsilon_{u,CFRP} = 3,3\%$. Znajac moduł odkształcalności taśm kompozytowych podawanych zwykle przez producenta, efektywną ich wytrzymałość można ustalić ze wzoru:

$$f_{eff,CFRP} = \epsilon_{u,CFRP} \cdot E_{CFRP}$$

Dla taśm wykorzystywanych w relacjonowanych badaniach wartość ta wynosiłaby: $f_{u,CFRP} = 0,0033 \times 165000 = 544,5 \text{ MPa}$, co odpowiada mniej więcej granicy plastyczności zbrojenia klasy AIIIIN.

Badania wykazały jednocześnie pozytywną rolę śrub kotwiących, które przeciwdziałają gwałtownemu odpajaniu się taśm od podłoża betonowego w sąsiedztwie rys, a zwłaszcza u wylotu ukośnych rys stref przysłupowych. Ze względu na gwałtowny charakter niszczenia wzmocnienia wyłącznie klejonego, należałoby unikać stosowania tego rozwiązania w strefach przebiecia.

converted cross-section area:

$$A'_{s,er} = \frac{f_{u,CFRP}}{f_{ym}} \cdot A_{eff,CFRP} = \frac{602}{573} \cdot 4 \cdot 1,10 = 4,62 \text{ cm}^2$$

effective design depth:

$$d_{eff} = \frac{14,47 \cdot 15 + 4,62 \cdot 18}{14,47 + 4,62} = \frac{300,21}{19,09} = 15,726 \text{ cm}$$

Effective reinforcement ratio:

$$\rho_{eff} = \frac{A_{s,tot}}{b \cdot d_{eff}} = \frac{14,47 + 4,62}{200 \cdot 15,73} = 0,00607 \approx 0,607\%$$

Design punching shear resistance of slab:

V_{cal} = 546,2 kN (mechanism of failure, type of bending)

Experimental load-carrying capacity of specimen WT-CF-8:

V_{exp} = 550 kN **V_{exp}/V_{cal} = 1,01**

Results presented in Table 6.3. confirm the possibility taking into account the external reinforcement, type of CFRP in calculation of punching shear resistance. But it is necessary to limit the strength of such a reinforcement to the amount answering its ultimate elongation in the critical limit state of slab. Based on the carried out tests and results from the tests [2], that value can be assumed as $\epsilon_{u,CFRP} = 3,3\%$. Knowing the modulus of elasticity of composite strips given usually by the producer their effective strength can be estimated by the formula:

$$f_{eff,CFRP} = \epsilon_{u,CFRP} \cdot E_{CFRP}$$

For strips used in the presented investigations this value would be: $f_{u,CFRP} = 0,0033 \times 165000 = 544,5 \text{ MPa}$, what corresponds more less with the yield strength of the reinforcement of AIIIIN class.

Test have shown at the same time the positive role of the anchoring bolts, which prevent from the rapid separate the strips from the concrete background in vicinity of cracks, and especially at the outlet of the diagonal cracks of column areas. Regarding the rapid character of breaking of the strengthening which is only made by glue the strips, it should be avoided the application of such a solution in the punching areas.

Tablica 63. Porównanie wyników analizy teoretycznej z wynikami eksperymentalnymi serii drugiej

Table 6.3. Comaprison of the results of theoretical analysis with experimental results of the second series

Model Specimen	d [mm]	ρ_l [%]	$\epsilon_{u,CFRP}$ [%]	$f_{u,CFRP}$ [MPa]	$A_{eff,CFRP}$ [cm ²]	d_{eff} [mm]	ρ_{eff} [%]	V_{exp} [kN]	V_{calc} [kN]	V_{exp}/V_{calc}
S-2	145	0,51	-	-	-	-	-	495	425,9	1,16
WT-CF-8	150	0,50	3,455	602	4·1,10	157	0,61	550	546,2	1,01
WT-CF-K-8	148	0,50	3,825	666	4·1,26	163	0,61	625	584,5	1,07
WT-CF-K-16	149	0,50	3,307	575	8·1,26	162	0,76	675	661,9	1,02

Sprawdzenie procedury dla celów aplikacyjnych w praktyce

Mając na uwadze aplikacyjne potrzeby proponowanego rozwiązania, dla modeli WT-CF-K-8 i WT-CF-K-16 przeprowadzono obliczenia przyjmując zaproponowane wyżej ograniczenie ($\epsilon_{u,CFRP} = 3,3\%$), moduł odkształcalności taśm podany przez wytwórcę $E_{CFRP} = 165 \text{ GPa}$ oraz parametry wytrzymałościowe zbrojenia i betonu charakterystyczne.

Checking the procedure for the application purposes in practice

Regarding the application needs of the suggested solution, there were made the calculation for the specimens WT-CF-K-8 and WT-CF-K-16, assuming the limitation suggested above ($\epsilon_{u,CFRP} = 3,3\%$), strips modulus of elasticity given by producer $E_{CFRP} = 165 \text{ GPa}$ and the characteristic strength parameters of the reinforcement and concrete.

Model WT-CF-K-8

Stopień zbrojenia płyty wzmacnianej:

Ø12 co 150mm, wysokość użyteczna $d=148\text{mm}$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 14,8} = 0,00501 \approx 0,5\%$$

Moc zbrojenia:

- wytrzymałość charakterystyczna betonu $f_{ck}=35\text{MPa}$, klasa C35/45
- charakterystyczna granica plastyczności $f_{yk}=500\text{MPa}$, klasa AIIIIN

$$\frac{\rho_i \cdot f_{yk}}{f_{ck}} = \frac{0,005 \cdot 500}{35} = 0,0714$$

Płyta wzmocniona 8 taśmami o przekroju $A_{CFRP}=1,26\text{cm}^2$, $f_{u,CFRP} = 544,5\text{MPa}$, do celów obliczeniowych przyjęto wartość charakterystyczną równą zbrojeniu głównemu $f_{k,CFRP} = 500\text{MPa}$, wysokość użyteczna zbrojenia zewnętrznego $d_{er}=180\text{mm}$,

$$\rho_{CFRP} = \frac{A_{CFRP}}{b \cdot d_{er}} = \frac{4 \cdot 1,26}{200 \cdot 18} = 0,0014 \approx 0,14\%$$

pole przekroju sprowadzone:

$$A'_{s,er} = \frac{f_{k,CFRP}}{f_{yk}} \cdot A_{CFRP} = \frac{500}{500} 4 \cdot 1,26 = 5,04\text{cm}^2$$

efektywna wysokość użyteczna:

$$d_{eff} = \frac{14,47 \cdot 15 + 5,04 \cdot 18}{14,47 + 5,04} = \frac{307,77}{19,51} = 15,77\text{cm}$$

Efektywny stopień zbrojenia:

$$\rho_{eff} = \frac{A_{s,tot}}{b \cdot d_{eff}} = \frac{14,47 + 5,04}{200 \cdot 15,77} = 0,006185 \approx 0,62\%$$

Nośność charakterystyczna płyty na przebiecie:

$V_{cal} = 508,6\text{kN}$ (mechanizm zniszczenia typu zginanie)

Nośność eksperymentalna modelu WT-CF-K-8:

$V_{exp} = 625\text{kN}$ **$V_{exp}/V_{cal} = 1,03$**

Model WT-CF-K-16

Stopień zbrojenia płyty wzmacnianej:

Ø12 co 150mm, wysokość użyteczna $d=148\text{mm}$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 14,8} \approx 0,5\%$$

Moc zbrojenia:

przewidywana wytrzymałość betonu $f_{ck}=35\text{MPa}$, granica plastyczności $f_{yk}=500\text{MPa}$,

$$\frac{\rho_i \cdot f_{yk}}{f_{ck}} = \frac{0,005 \cdot 500}{35} = 0,0714$$

Płyta wzmocniona 16 taśmami o przekroju

$A_{CFRP}=1,26\text{cm}^2$, $f_{k,CFRP}=500\text{MPa}$,

wysokość użyteczna $d_{er}=180\text{mm}$,

$$\rho_{CFRP} = \frac{A_{CFRP}}{b \cdot d_{er}} = \frac{8 \cdot 1,26}{200 \cdot 18} = 0,0028 \approx 0,28\%$$

pole przekroju sprowadzone:

$$A'_{s,er} = \frac{f_{k,CFRP}}{f_{yk}} \cdot A_{CFRP} = \frac{500}{500} 8 \cdot 1,26 = 10,08\text{cm}^2$$

efektywna wysokość użyteczna:

$$d_{eff} = \frac{14,47 \cdot 14,8 + 10,08 \cdot 18}{14,47 + 10,08} = \frac{395,60}{24,55} = 16,11\text{cm}$$

SPECIMEN WT-CF-K-8

Reinforcement ratio of the strengthened slab:

Ø12 every 150mm, effective depth $d=148\text{mm}$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 14,8} = 0,00501 \approx 0,5\%$$

Reinforcement power:

- characteristic concrete strength $f_{ck}=35\text{MPa}$, class C35/45

- characteristic yield strength $f_{yk}=500\text{MPa}$, class AIIIIN

$$\frac{\rho_i \cdot f_{yk}}{f_{ck}} = \frac{0,005 \cdot 500}{35} = 0,0714$$

Slab strengthened by 8 strips with the cross-section of $A_{CFRP}=1,26\text{cm}^2$, $f_{u,CFRP} = 544,5\text{MPa}$, for the calculation purposes it was assumed the characteristic value equal as for the main reinforcement $f_{k,CFRP} = 500\text{MPa}$, the effective depth of the external reinforcement $d_{er}=180\text{mm}$,

$$\rho_{CFRP} = \frac{A_{CFRP}}{b \cdot d_{er}} = \frac{4 \cdot 1,26}{200 \cdot 18} = 0,0014 \approx 0,14\%$$

converted cross-section area:

$$A'_{s,er} = \frac{f_{k,CFRP}}{f_{yk}} \cdot A_{CFRP} = \frac{500}{500} 4 \cdot 1,26 = 5,04\text{cm}^2$$

effective design depth:

$$d_{eff} = \frac{14,47 \cdot 15 + 5,04 \cdot 18}{14,47 + 5,04} = \frac{307,77}{19,51} = 15,77\text{cm}$$

Effective reinforcement ratio:

$$\rho_{eff} = \frac{A_{s,tot}}{b \cdot d_{eff}} = \frac{14,47 + 5,04}{200 \cdot 15,77} = 0,006185 \approx 0,62\%$$

Characteristic punching shear resistance of slab:

$V_{cal} = 508,6\text{kN}$ (mechanism of failure, type of bending)

Experimental load-carrying capacity of model WT-CF-K-8:

$V_{exp} = 625\text{kN}$ **$V_{exp}/V_{cal} = 1,03$**

Specimen WT-CF-K-16

Reinforcement ratio of the strengthened slab:

Ø12 every 150mm, effective depth $d_k=148\text{mm}$,

$$\rho_L = \frac{A_{sm}}{b \cdot d} = \frac{1,113}{15 \cdot 14,8} \approx 0,5\%$$

Reinforcement power:

foreseen concrete strength $f_{ck}=35\text{MPa}$,

yield strength $f_{yk}=500\text{MPa}$,

$$\frac{\rho_i \cdot f_{yk}}{f_{ck}} = \frac{0,005 \cdot 500}{35} = 0,0714$$

Slab reinforcement by 16 strips with the cross-section of

$A_{CFRP}=1,26\text{cm}^2$, $f_{k,CFRP}=500\text{MPa}$,

effective depth $d_{er}=180\text{mm}$,

$$\rho_{CFRP} = \frac{A_{CFRP}}{b \cdot d_{er}} = \frac{8 \cdot 1,26}{200 \cdot 18} = 0,0028 \approx 0,28\%$$

converted cross-section area:

$$A'_{s,er} = \frac{f_{k,CFRP}}{f_{yk}} \cdot A_{CFRP} = \frac{500}{500} 8 \cdot 1,26 = 10,08\text{cm}^2$$

effective design depth:

$$d_{eff} = \frac{14,47 \cdot 14,8 + 10,08 \cdot 18}{14,47 + 10,08} = \frac{395,60}{24,55} = 16,11\text{cm}$$

Efektywny stopień zbrojenia:

$$\rho_{\text{eff}} = \frac{A_{s,\text{tot}}}{b \cdot d_{\text{eff}}} = \frac{14,47 + 10,08}{200 \cdot 16,11} = 0,00762 \approx 0,76\%$$

Nośność charakterystyczna płyty na przebicie:

V_{cal} = 600,0kN (mechanizm zniszczenia typu zginanie)

Nośność eksperymentalna modelu WT-CF-K-16:

V_{exp} = 675kN V_{exp}/V_{cal} = 1,13

Uzyskane wyniki teoretyczne nośności charakterystycznej zapewniają co najmniej kilkunastoprocentowy zapas bezpieczeństwa w stosunku do wyników eksperymentalnych. Można więc uznać procedurę obliczeniową za bezpieczną.

Effective reinforcement ratio:

$$\rho_{\text{eff}} = \frac{A_{s,\text{tot}}}{b \cdot d_{\text{eff}}} = \frac{14,47 + 10,08}{200 \cdot 16,11} = 0,00762 \approx 0,76\%$$

Characteristic punching shear resistance of slab:

V_{cal} = 600,0kN (mechanism of failure, type of bending)

Experimental load-carrying capacity of model WT-CF-K-16:

V_{exp} = 675kN V_{exp}/V_{cal} = 1,13

The theoretical results of characteristic punching resistance obtained here ensured at least of more than ten percentage the safety reserve in relation to experimental results. So, this calculation procedure could be recognized as safe.

7. PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki badań potwierdziły w pełni skuteczność proponowanej koncepcji wzmacniania żelbetowych płyt na przebicie poprzez zwiększenie mocy zbrojenia na zginanie. Szczególnie wzmacnianie za pomocą płaskowników stalowych klejonych do płyty z jednoczesnym kotwieniem śrubami okazało się bardzo skuteczne. Metoda ta powinna być zalecana dla płyt żelbetowych o małej mocy zbrojenia poniżej $\rho_l \cdot f_{yk} / f_{ck} < 0,15$. Stosowanie w praktyce coraz wyższych wytrzymałości betonu powoduje, że w większości wypadków mamy do czynienia z taką mocą zbrojenia w stropach.

Wyniki zaproponowanej prostej metody obliczeniowej do przewidywania nośności na przebicie płyt wzmocnionych zbrojeniem zewnętrznym, upoważniają do stwierdzenia, że może ona mieć zastosowanie w praktyce inżynierskiej przy sporządzaniu ekspertyz. Do celów aplikacyjnych metoda ta musi być dostosowana do wytrzymałości obliczeniowych. Oznacza to, że uzyskane nośności w wyżej przedstawionych obliczeniach należy podzielić przez częściowy współczynnik obciążenia adekwatny dla betonu γ_c .

7. CONCLUSIONS

The obtained tests results confirmed fully the efficiency of suggested idea of the strengthening of reinforced concrete slabs in punching by increase of the flexural reinforcement power. Especially strengthening by means of flat steel stuck to the slabs with anchorage by bolts at the same time appeared to be very effective. This method should be recommended for reinforced concrete slabs of small reinforcement power below $\rho_l \cdot f_{yk} / f_{ck} < 0,15$. Usage in practice more and more higher concrete strengths causes, that in the majority cases we deal with such a reinforcement power in floors.

The results of suggested simple calculation method of the prediction of punching shear resistance of slabs strengthened by external reinforcement authorize to the statement, that it can be applied in engineering practice at expert's reports. For application purposes this method has to be adjusted to the design strengths. That means that obtained punching shear resistances in calculations presented above should be divided by partial factor for concrete γ_c .

Bibliografia / References

- [1] Hassanzadeh G., Sundqvist H.: Strengthening of Bridge Slabs on Columns. Nordic Concrete Research [online], 1998, s.12, [dostęp: 27.10.2003], www.itn.is/ncr/publications/pub-21.htm 1998;
- [2] Soudki K., Van Zwol T., Sherping R.: Strengthening of Interior Slab-Column Connections with CFRP Strips. FRPCS-6, Singapore, 8-10 July 2003, Edited by Kiang Hwee Tan, s. 1137÷1146;
- [3] El-Salakawy E.F., Polak M.A., Soudki K.A.: New Shear Strengthening Technique for Concrete Slab-Column Connections. ACI Structural Journal, V.100, No. 3, May-June 2003, s. 297-304;
- [4] Adetifa B., Polak M.A.: Retrofit of Slab Column Interior Connections Using Shear Bolts. ACI Structural Journal, V.102, No.2, March-April 2005, s. 268-274;
- [5] Binici B., Bayrak O.: Punching Shear Strengthening of Reinforced Concrete Flat Plates Using CFRPs. Journal of Structural Engineering, ASCE, V.129, No. 9, September 2003, s. 1173-1182;
- [6] Binici B., Bayrak O.: Use of Fiber-Reinforced Polymers in Slab-Column Connection Upgrades. ACI Structural Journal, V.102, No.1, January-February 2005, s. 93-102;
- [7] Muttoni A., Fernandez Ruiz M., Kunz J.: Nachtragliche Durchstanzbewehrung zur Verstärkung von Stahlbetonflachdecken". Bauingenieur, Dezember 2008, s. 503÷511;
- [8] Urban T.: Wzmacnianie stropów żelbetowych typu płyta-słup w strefach podporowych. Inżynieria i Budownictwo, Nr 10/2005, s. 547÷550;
- [9] Urban T.: Wzmacnianie monolitycznych węzłów płyta-słup materiałami „CFRP”. LI Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2005, Tom 3, s. 121÷128;
- [10] Urban T. S.: Przebiecie w żelbecie. Wybrane zagadnienia. Politechnika Łódzka, Zeszyty Naukowe Nr 959, Łódź 2005, ss. 348;
- [11] Urban T.: Diagnostyka i wzmacnianie płyt żelbetowych na przebiecie. Przegląd Budowlany 11/2008, s. 33÷40;
- [12] Noakowski P.: Wzmocnienie stropów biurowca. Duże ugięcia i niedostateczna nośność na przebiecie. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych. DWE, Wrocław 2006, s. 576÷588,

Załącznik

Wyniki pomiarów

Badania zostały wykonane w Laboratorium Badawczym Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej (akredytacja w PCA nr AB536) w ramach projektu N506 010 31/0693 finansowanego przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Appendix

Results of measurements

Tests were made in Testing Laboratory for Materials and Concrete Structures (Accreditation Certificate in PCA no. AB536) Technical University of Lodz Chair of Concrete Structures within the limits of the investigation project No. N506 010 31/0693, granted by the Minister of Science and Higher Education.

Dane / Data

$f_{c,cube} = 51,8\text{MPa}$, $f_{cm} = 45,3\text{MPa}$, $f_{sp} = 3,43\text{MPa}$, $E_{cm} = 27800\text{MPa}$

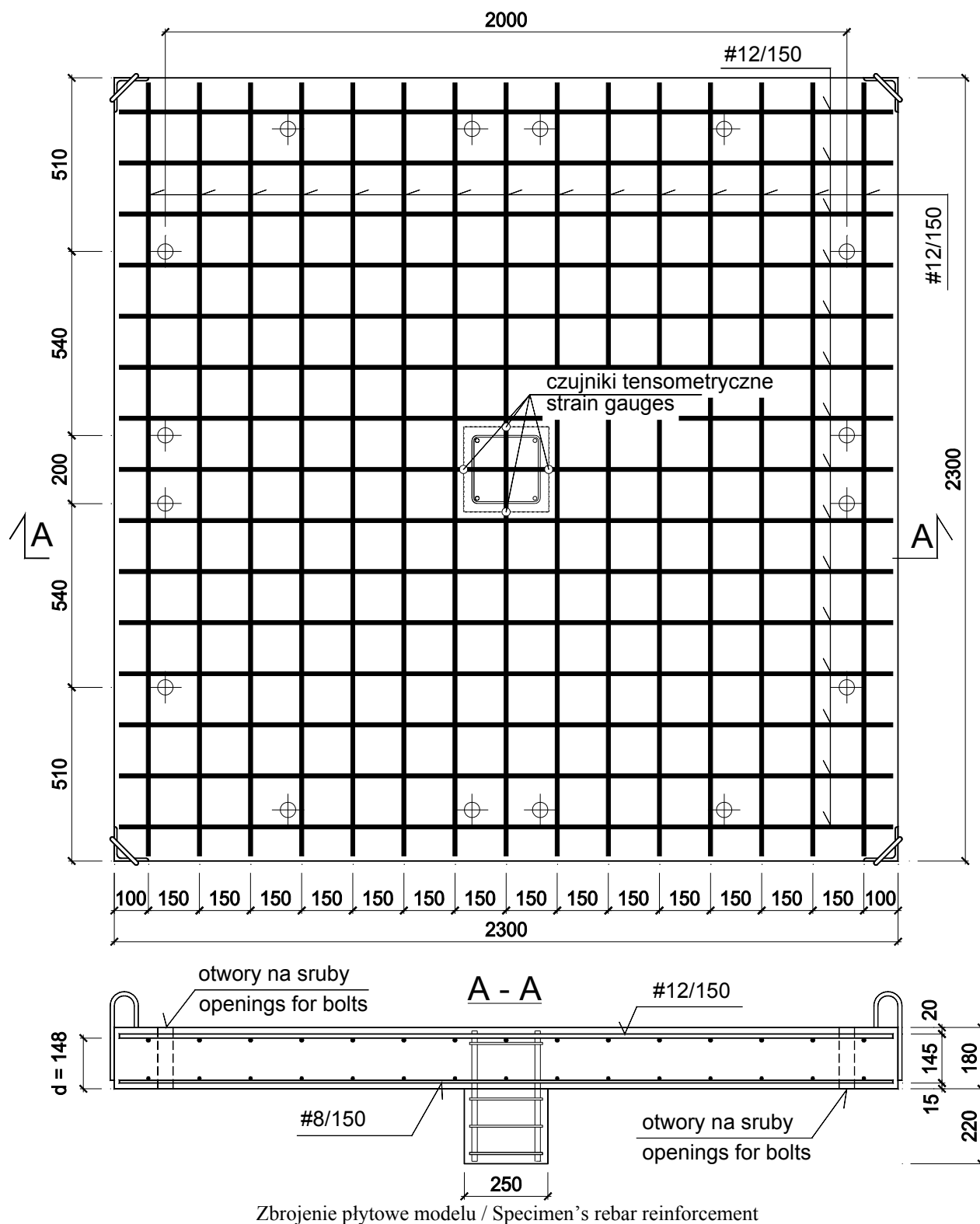
$f_{y,h} = 580,8\text{MPa}$, $f_{y,l} = 565,5\text{MPa}$, $f_{ym} = 573,2\text{MPa}$, $A_{sm} = 1,113\text{cm}^2$ (#12)

wysokość nominalna / nominal effective depth of a cross-section $d = 14,8\text{cm}$ (pomierzona / measured $14,74\text{cm}$)

nośność teoretyczna / theoretical load capacity $V_{calc} = 446,8\text{kN}$

nośność eksperymentalna / experimental load capacity $V_{exp} = 500\text{kN}$

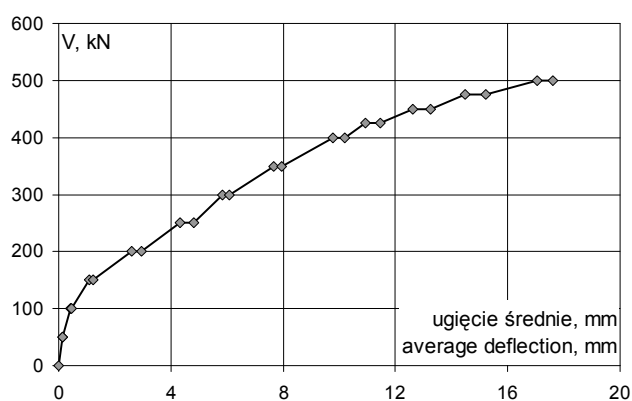
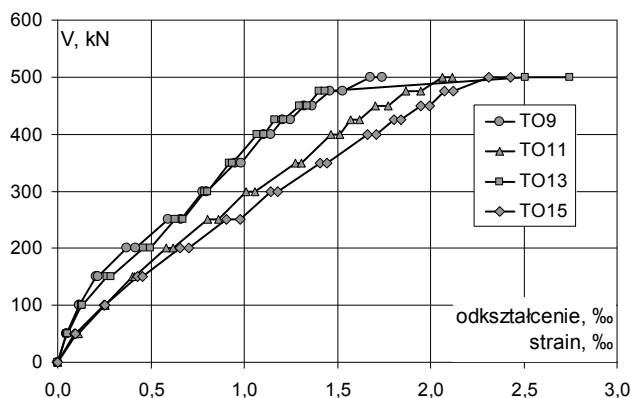
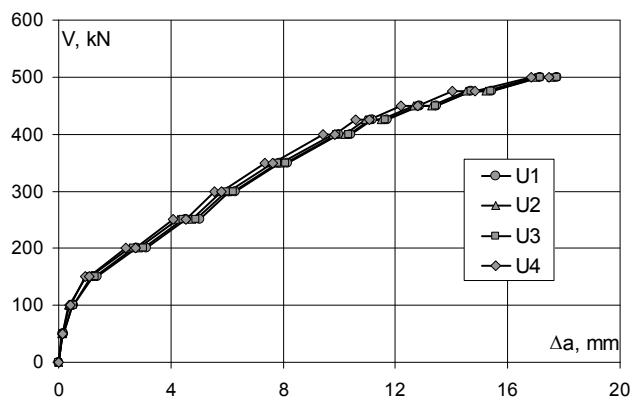
$V_{exp} / V_{calc} = 1,12$



S-1

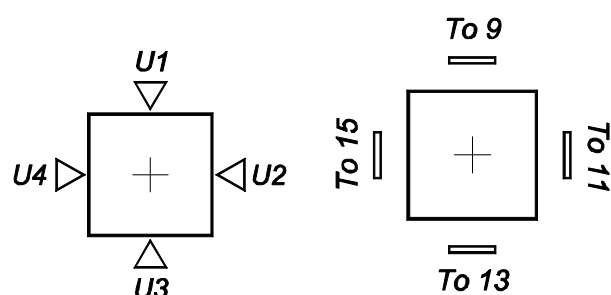
Ugięcia Deflections						
V	V/V _{exp}	U1	U2	U3	U4	średnie average
kN	-	Δa				mm
0	p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	p	0,15	0,12	0,16	0,14	0,14
	k	0,17	0,13	0,17	0,15	0,15
100	p	0,50	0,37	0,49	0,39	0,44
	k	0,53	0,40	0,52	0,42	0,47
150	p	1,22	0,98	1,16	0,95	1,08
	k	1,38	1,11	1,31	1,08	1,22
200	p	2,78	2,52	2,69	2,39	2,60
	k	3,14	2,86	3,03	2,73	2,94
250	p	4,53	4,25	4,41	4,06	4,31
	k	5,01	4,74	4,90	4,54	4,80
300	p	6,07	5,79	5,97	5,57	5,85
	k	6,31	6,04	6,21	5,81	6,09
350	p	7,87	7,63	7,80	7,36	7,66
	k	8,15	7,91	8,07	7,64	7,94
400	p	9,99	9,77	9,93	9,43	9,78
	k	10,40	10,18	10,33	9,83	10,18
425	p	11,17	10,95	11,11	10,56	10,95
	k	11,69	11,48	11,64	11,06	11,46
450	p	12,86	12,66	12,82	12,21	12,64
	k	13,47	13,27	13,43	12,80	13,24
475	p	14,71	14,52	14,68	14,04	14,49
	k	15,42	15,23	15,40	14,85	15,22
500	p	17,16	16,97	17,17	16,84	17,04
	k	17,75	17,55	17,75	17,45	17,63

Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete						
V	V/V _{exp}	TO9	TO11	TO13	TO15	
kN	-	ε				‰
0	p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,046	0,103	0,047	0,090	
	k	0,050	0,113	0,052	0,096	
100	p	0,115	0,252	0,126	0,247	
	k	0,116	0,254	0,130	0,256	
150	p	0,206	0,401	0,265	0,430	
	k	0,219	0,414	0,288	0,454	
200	p	0,371	0,580	0,458	0,655	
	k	0,416	0,621	0,495	0,703	
250	p	0,595	0,804	0,632	0,907	
	k	0,659	0,864	0,673	0,977	
300	p	0,777	1,012	0,790	1,141	
	k	0,801	1,056	0,805	1,180	
350	p	0,951	1,276	0,921	1,408	
	k	0,982	1,308	0,939	1,443	
400	p	1,104	1,464	1,067	1,663	
	k	1,144	1,515	1,104	1,709	
425	p	1,208	1,569	1,166	1,805	
	k	1,251	1,619	1,209	1,843	
450	p	1,324	1,705	1,296	1,945	
	k	1,366	1,770	1,341	1,993	
475	p	1,458	1,868	1,404	2,076	
	k	1,531	1,945	1,435	2,123	
500	p	1,679	2,061	2,506	2,312	
	k	1,741	2,116	2,745	2,426	



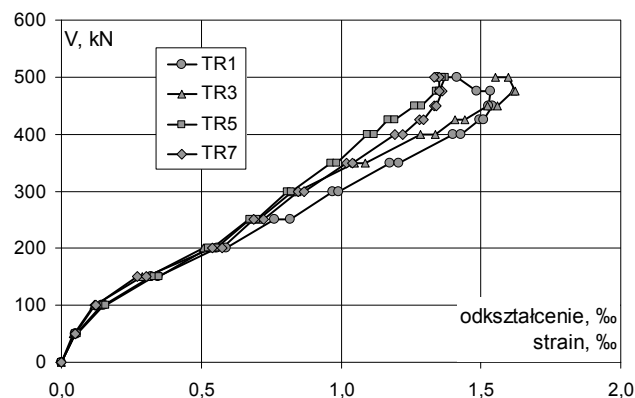
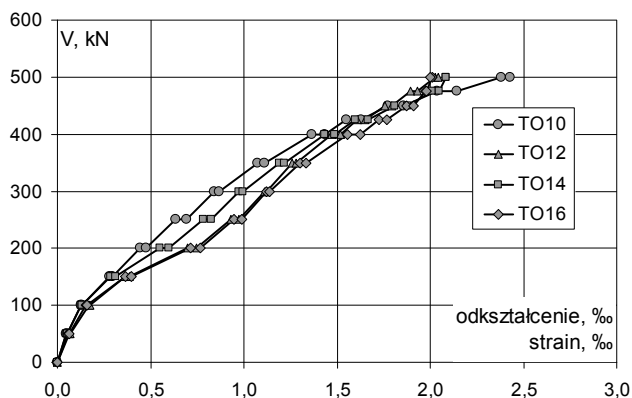
Lokalizacja czujników „U”
Location of „U” gauges

Lokalizacja czujników „T”
Location of “T” gauges

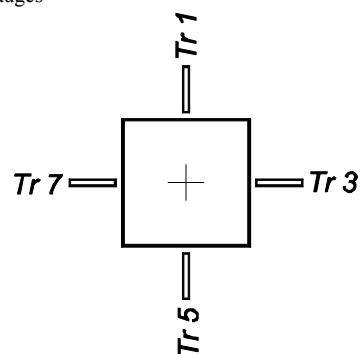
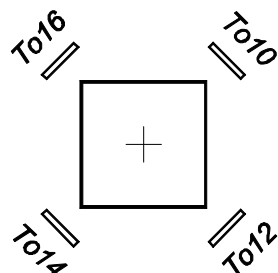


Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TO10	TO12	TO14	TO16
ε					
‰					
kN	-				
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,10	0,047	0,063	0,047
	k		0,053	0,070	0,053
100	p	0,20	0,129	0,169	0,127
	k		0,131	0,173	0,132
150	p	0,30	0,283	0,364	0,286
	k		0,297	0,387	0,314
200	p	0,40	0,447	0,696	0,551
	k		0,475	0,747	0,596
250	p	0,50	0,634	0,929	0,781
	k		0,692	0,976	0,827
300	p	0,60	0,841	1,109	0,975
	k		0,870	1,120	0,995
350	p	0,70	1,072	1,261	1,191
	k		1,111	1,281	1,217
400	p	0,80	1,363	1,472	1,436
	k		1,434	1,516	1,488
425	p	0,85	1,549	1,610	1,598
	k		1,627	1,650	1,666
450	p	0,90	1,772	1,756	1,807
	k		1,856	1,796	1,878
475	p	0,95	2,035	1,893	2,010
	k		2,141	1,932	2,050
500	p	1,00	2,381	2,025	2,087
	k		2,431	2,041	2,083

Odształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR1	TR3	TR5	TR7
ε					
‰					
kN	-				
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,10	0,050	0,041	0,048
	k		0,054	0,047	0,055
100	p	0,20	0,146	0,118	0,152
	k		0,152	0,120	0,158
150	p	0,30	0,322	0,290	0,331
	k		0,345	0,310	0,350
200	p	0,40	0,557	0,507	0,525
	k		0,590	0,539	0,553
250	p	0,50	0,762	0,670	0,674
	k		0,819	0,707	0,699
300	p	0,60	0,969	0,825	0,808
	k		0,992	0,842	0,821
350	p	0,70	1,176	1,047	0,962
	k		1,205	1,085	0,983
400	p	0,80	1,399	1,284	1,092
	k		1,429	1,337	1,118
425	p	0,85	1,496	1,409	1,167
	k		1,510	1,443	1,194
450	p	0,90	1,541	1,524	1,263
	k		1,526	1,560	1,289
475	p	0,95	1,534	1,614	1,339
	k		1,485	1,621	1,351
500	p	1,00	1,415	1,597	1,372
	k		1,344	1,552	1,362



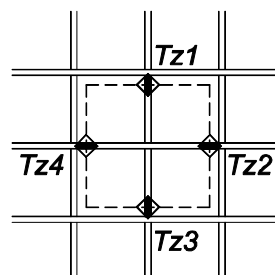
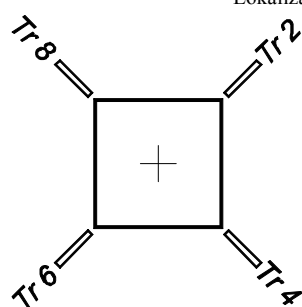
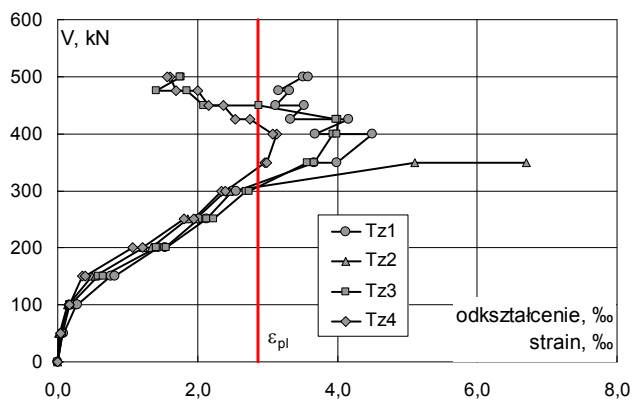
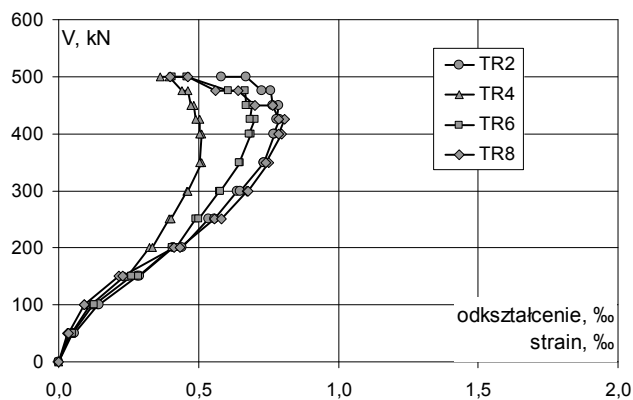
Lokalizacja czujników / Location of gauges



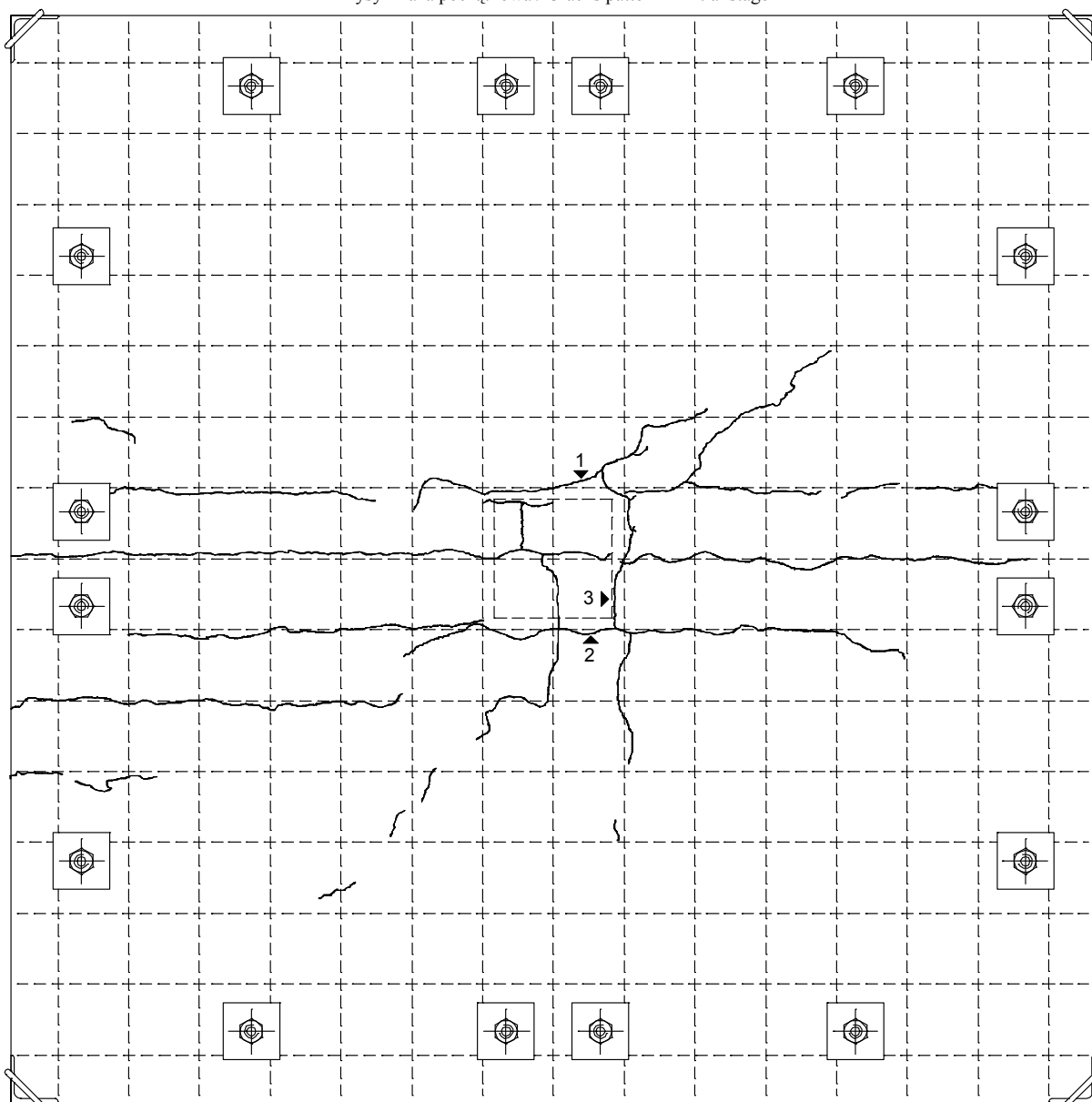
S-1

Odkształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR2	TR4	TR6	TR8
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,10	0,050	0,039	0,043
	k		0,057	0,045	0,048
100	p	0,20	0,142	0,114	0,122
	k		0,145	0,116	0,127
150	p	0,30	0,281	0,235	0,261
	k		0,290	0,246	0,284
200	p	0,40	0,409	0,324	0,404
	k		0,440	0,336	0,418
250	p	0,50	0,537	0,396	0,491
	k		0,559	0,403	0,502
300	p	0,60	0,639	0,460	0,575
	k		0,649	0,461	0,577
350	p	0,70	0,733	0,512	0,648
	k		0,733	0,504	0,645
400	p	0,80	0,772	0,512	0,687
	k		0,769	0,504	0,680
425	p	0,85	0,791	0,506	0,701
	k		0,780	0,492	0,686
450	p	0,90	0,786	0,485	0,690
	k		0,766	0,471	0,671
475	p	0,95	0,758	0,462	0,666
	k		0,727	0,440	0,606
500	p	1,00	0,670	0,394	0,458
	k		0,583	0,362	0,404

Odkształcenia stali zbrojeniowej Strain of reinforcement bars					
V	V/V _{exp}	Tz1	Tz2	Tz3	Tz4
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,10	0,075	0,020	0,066
	k		0,083	0,022	0,074
100	p	0,20	0,269	0,143	0,165
	k		0,288	0,161	0,180
150	p	0,30	0,758	0,488	0,576
	k		0,817	0,541	0,649
200	p	0,40	1,443	1,227	1,412
	k		1,539	1,340	1,546
250	p	0,50	2,014	1,858	2,128
	k		2,126	1,981	2,236
300	p	0,60	2,503	2,400	2,688
	k		2,556	2,462	2,737
350	p	0,70	3,664	5,107	3,570
	k		3,990	6,706	3,669
400	p	0,80	4,507	awaria czujnika damaged gauge	3,941
	k		3,685		3,132
425	p	0,85	4,168		3,996
	k		3,334		3,075
450	p	0,90	3,529		4,002
	k		3,121		2,751
475	p	0,95	3,321		3,985
	k		3,154		2,536
500	p	1,00	3,508		2,875
	k		3,584		2,369



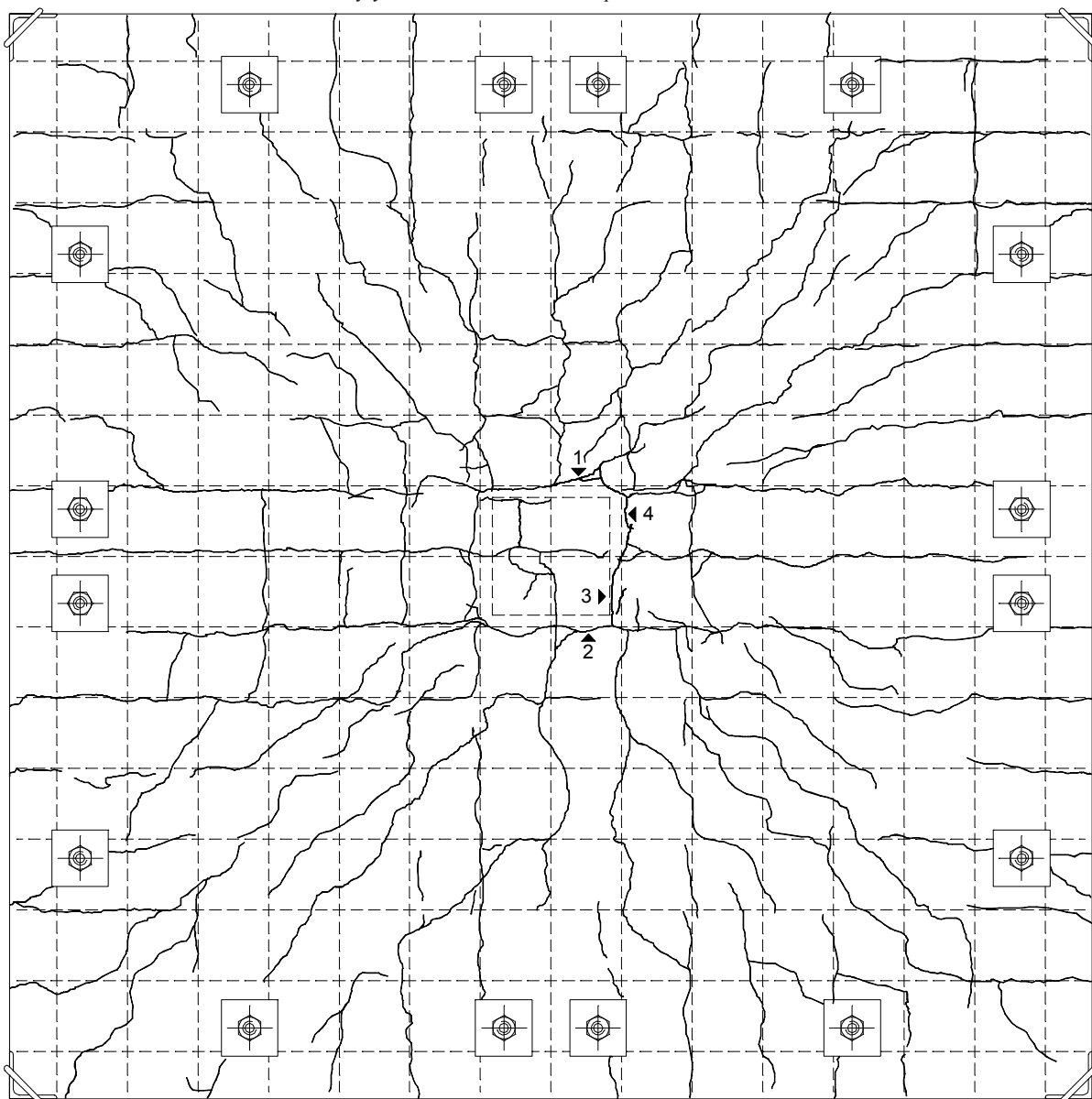
Rysy – faza początkowa / Cracks pattern – initial stage



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
150	0,1	0,1	0,12

S-1

Rysy – faza zniszczenia / Cracks pattern after failure



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]			
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3	rysa 4 / crack No. 4
150	0,1	0,1	0,12	
200	0,1	0,2	0,3	
250	0,6	0,7	0,6	
300	0,7	0,9	0,75	
350	1,0	1,1	0,8	
400	1,3	1,2	0,9	
425	1,5	1,4	1,2	1,8
450	2,0	1,5	1,3	2,5

Dane / Data

beton / concrete

$$f_{c,cube} = 52,3\text{MPa}, f_{cm} = 45,7\text{MPa}, f_{sp} = 3,95\text{MPa}, E_{cm} = 28300\text{MPa}$$

(#12)

$$f_{y,h} = 580,8\text{MPa}, f_{y,l} = 565,5\text{MPa}, f_{ym} = 573,2\text{MPa}, A_{sm} = 1,113\text{cm}^2$$

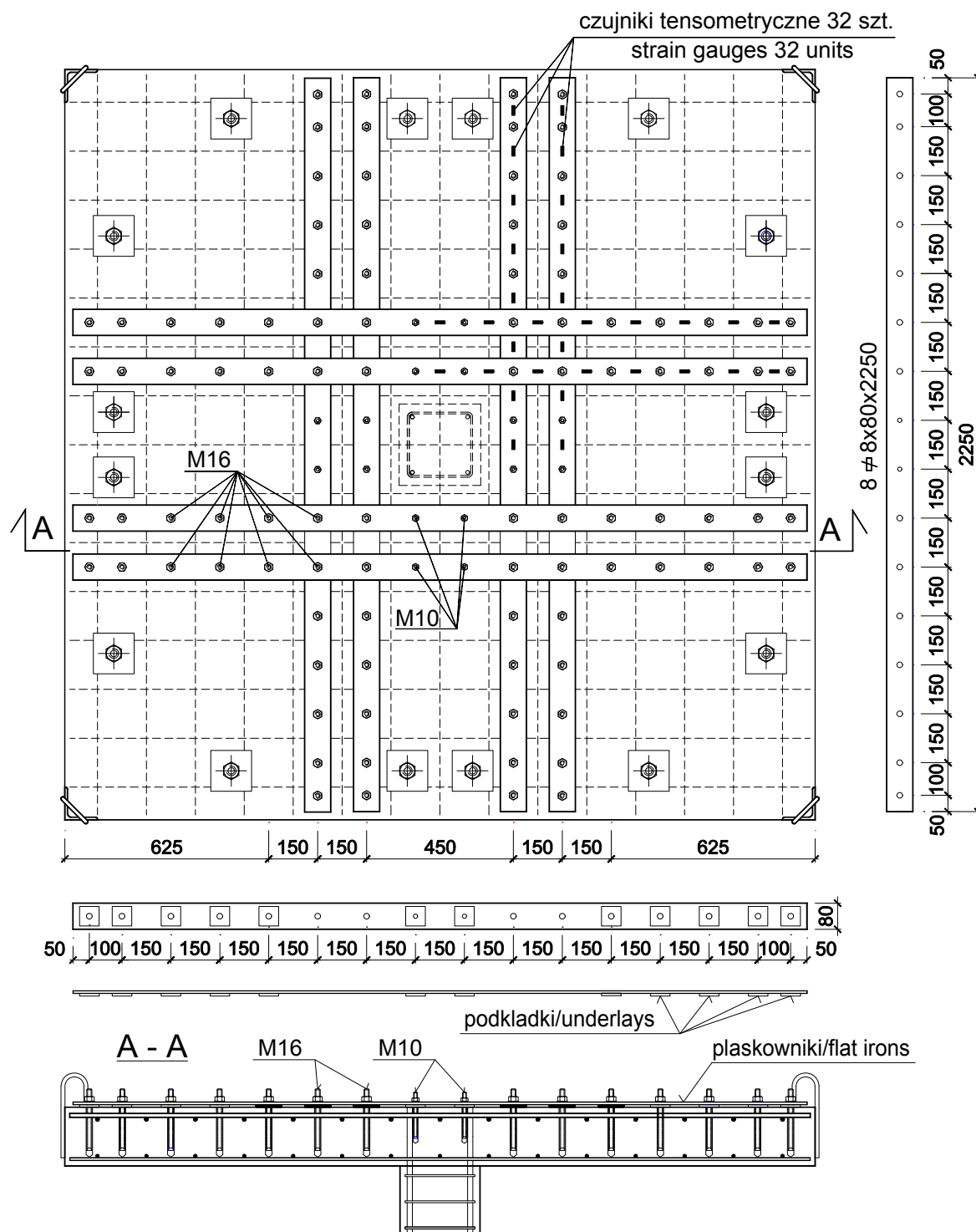
(płaskownik / flat iron)

$$f_{y,h} = 326,5\text{MPa}, f_{y,l} = 322,7\text{MPa}, f_{ym} = 324,6\text{MPa}, E_s = 203000\text{MPa}, \varepsilon_y = 1,599\%$$

$$A_{sm} = 6,400\text{cm}^2 \text{ (pomiar / measure } 6,500\text{cm}^2)$$

wysokość nominalna / nominal effective depth of cross-section $d = 14,8\text{cm}$ (pomierzona / measured $15,07\text{cm}$)nośność świadka / witness load capacity $V_s = 500,0\text{kN}$ nośność eksperymentalna / experimental load capacity $V_{exp} = 730\text{kN}$

$$V_{exp} / V_s = 1,46$$

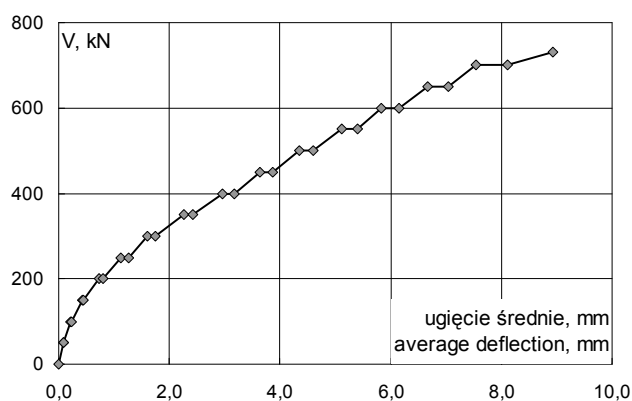
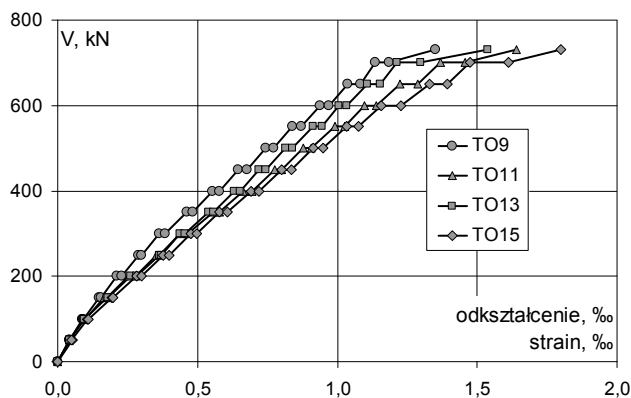
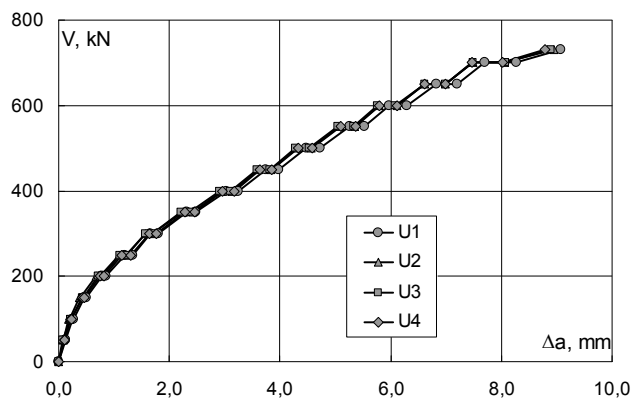


Rysunek konstrukcyjny modelu / Technical drawing of the specimen

WPS-8

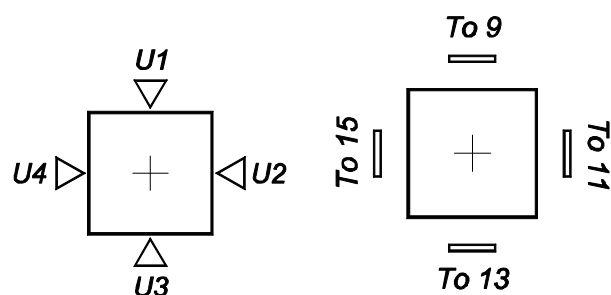
Ugięcia Deflections						
V	V/V _{exp}	U1	U2	U3	U4	średnie average
kN	-	Δa				mm
0	p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	p	0,07	0,12	0,08	0,10	0,09
	k		0,12	0,08	0,11	0,10
100	p	0,14	0,25	0,19	0,21	0,22
	k		0,26	0,19	0,22	0,22
150	p	0,21	0,47	0,38	0,42	0,42
	k		0,50	0,39	0,44	0,45
200	p	0,27	0,78	0,68	0,72	0,73
	k		0,85	0,74	0,78	0,80
250	p	0,34	1,19	1,08	1,10	1,13
	k		1,33	1,22	1,24	1,27
300	p	0,41	1,67	1,57	1,64	1,61
	k		1,79	1,70	1,77	1,74
350	p	0,48	2,31	2,24	2,20	2,26
	k		2,49	2,42	2,37	2,43
400	p	0,55	3,03	2,95	2,90	2,96
	k		3,25	3,14	3,11	3,17
450	p	0,62	3,74	3,61	3,58	3,63
	k		3,98	3,84	3,81	3,85
500	p	0,68	4,47	4,32	4,28	4,35
	k		4,72	4,56	4,53	4,60
550	p	0,75	5,25	5,09	5,05	5,10
	k		5,53	5,35	5,33	5,40
600	p	0,82	5,97	5,79	5,76	5,83
	k		6,30	6,11	6,09	6,15
650	p	0,89	6,83	6,62	6,61	6,67
	k		7,20	6,99	6,99	7,04
700	p	0,96	7,70	7,48	7,50	7,47
	k		8,27	8,05	8,07	8,10
730	p	1,00	9,07	8,95	8,89	8,92

Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TO9	TO11	TO13	TO15
kN	-	ε			
0	p	0,00	0,00	0,00	0,00
50	p	0,041	0,042	0,043	0,052
	k	0,042	0,042	0,042	0,051
100	p	0,087	0,095	0,092	0,107
	k	0,091	0,099	0,095	0,110
150	p	0,149	0,167	0,176	0,194
	k	0,154	0,175	0,180	0,198
200	p	0,212	0,253	0,261	0,282
	k	0,230	0,277	0,281	0,301
250	p	0,289	0,351	0,363	0,379
	k	0,301	0,365	0,372	0,397
300	p	0,365	0,438	0,438	0,477
	k	0,385	0,464	0,456	0,496
350	p	0,462	0,556	0,538	0,577
	k	0,484	0,578	0,558	0,605
400	p	0,554	0,664	0,630	0,692
	k	0,580	0,696	0,652	0,721
450	p	0,644	0,776	0,720	0,800
	k	0,676	0,802	0,746	0,835
500	p	0,743	0,879	0,815	0,912
	k	0,771	0,907	0,841	0,948
550	p	0,841	0,991	0,915	1,034
	k	0,872	1,025	0,944	1,076
600	p	0,937	1,098	1,005	1,158
	k	0,971	1,140	1,035	1,229
650	p	1,038	1,225	1,109	1,331
	k	1,082	1,287	1,155	1,394
700	p	1,136	1,367	1,215	1,476
	k	1,185	1,457	1,299	1,613
730	p	1,350	1,641	1,540	1,798



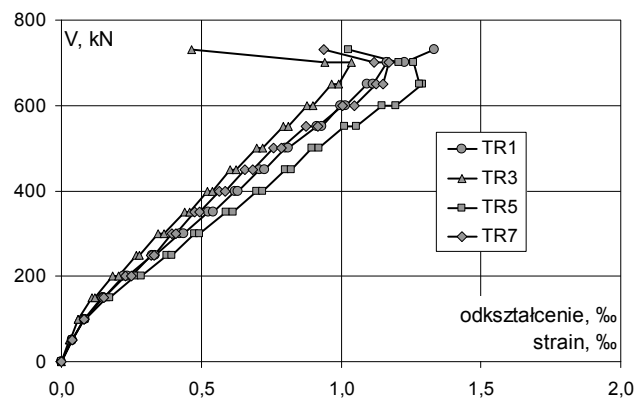
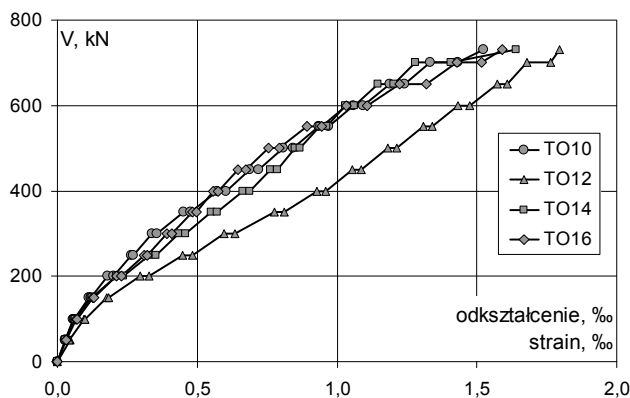
Lokalizacja czujników „U”
Location of „U” gauges

Lokalizacja czujników „T”
Location of „T” gauges

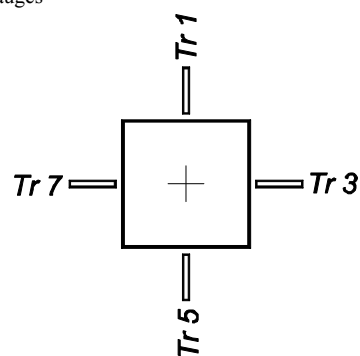
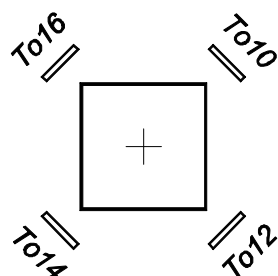


Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TO10	TO12	TO14	TO16
ε					
‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,027	0,045	0,029
	k		0,028	0,044	0,027
100	p	0,14	0,058	0,095	0,060
	k		0,061	0,099	0,063
150	p	0,21	0,114	0,177	0,119
	k		0,121	0,184	0,122
200	p	0,27	0,180	0,297	0,211
	k		0,200	0,328	0,236
250	p	0,34	0,263	0,447	0,328
	k		0,270	0,483	0,351
300	p	0,41	0,339	0,595	0,434
	k		0,358	0,635	0,458
350	p	0,48	0,452	0,777	0,549
	k		0,476	0,812	0,573
400	p	0,55	0,572	0,927	0,664
	k		0,602	0,960	0,688
450	p	0,62	0,688	1,056	0,763
	k		0,720	1,087	0,785
500	p	0,68	0,808	1,183	0,849
	k		0,842	1,214	0,868
550	p	0,75	0,936	1,309	0,938
	k		0,971	1,342	0,962
600	p	0,82	1,057	1,432	1,029
	k		1,094	1,476	1,063
650	p	0,89	1,188	1,573	1,145
	k		1,242	1,610	1,203
700	p	0,96	1,335	1,678	1,282
	k		1,432	1,764	1,408
730	p	1,00	1,526	1,796	1,639

Odształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR1	TR3	TR5	TR7
ε					
‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,039	0,029	0,039
	k		0,039	0,030	0,040
100	p	0,14	0,082	0,059	0,082
	k		0,084	0,061	0,084
150	p	0,21	0,149	0,110	0,163
	k		0,153	0,119	0,174
200	p	0,27	0,223	0,185	0,264
	k		0,236	0,203	0,287
250	p	0,34	0,323	0,269	0,377
	k		0,334	0,277	0,395
300	p	0,41	0,423	0,347	0,475
	k		0,438	0,366	0,495
350	p	0,48	0,525	0,441	0,590
	k		0,543	0,458	0,612
400	p	0,55	0,622	0,523	0,700
	k		0,632	0,538	0,720
450	p	0,62	0,709	0,603	0,800
	k		0,725	0,624	0,822
500	p	0,68	0,801	0,699	0,897
	k		0,811	0,719	0,920
550	p	0,75	0,912	0,794	1,013
	k		0,931	0,813	1,054
600	p	0,82	0,999	0,877	1,147
	k		1,016	0,899	1,197
650	p	0,89	1,093	0,966	1,292
	k		1,116	0,992	1,280
700	p	0,96	1,163	1,036	1,258
	k		1,229	0,943	1,208
730	p	1,00	1,333	0,465	1,027



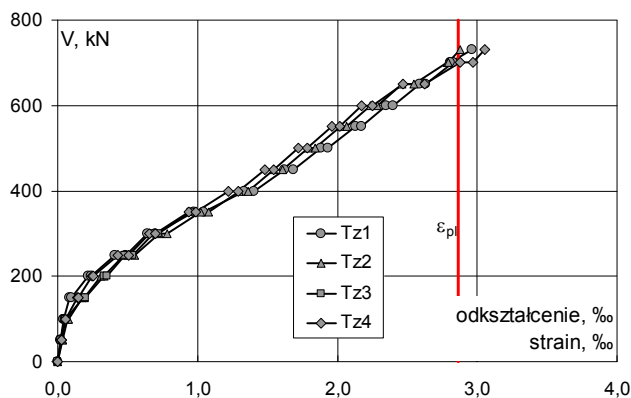
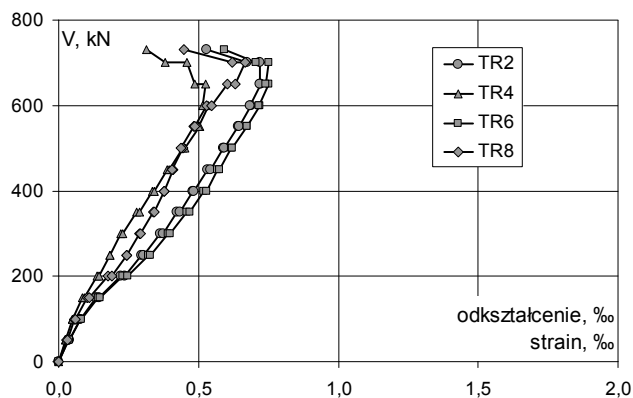
Lokalizacja czujników / Location of gauges



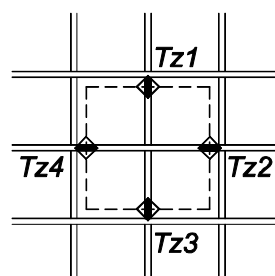
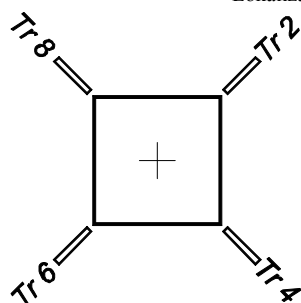
WPS-8

Odkształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR2	TR4	TR6	TR8
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,037	0,023	0,036
	k		0,040	0,026	0,039
100	p	0,14	0,078	0,049	0,079
	k		0,079	0,049	0,082
150	p	0,21	0,135	0,086	0,142
	k		0,143	0,091	0,149
200	p	0,27	0,221	0,136	0,228
	k		0,237	0,146	0,248
250	p	0,34	0,297	0,184	0,322
	k		0,302	0,185	0,328
300	p	0,41	0,363	0,223	0,390
	k		0,373	0,230	0,400
350	p	0,48	0,424	0,279	0,459
	k		0,434	0,288	0,470
400	p	0,55	0,478	0,336	0,519
	k		0,484	0,342	0,528
450	p	0,62	0,533	0,387	0,568
	k		0,543	0,396	0,575
500	p	0,68	0,588	0,444	0,619
	k		0,594	0,450	0,620
550	p	0,75	0,641	0,504	0,674
	k		0,647	0,500	0,675
600	p	0,82	0,687	0,536	0,719
	k		0,685	0,516	0,716
650	p	0,89	0,724	0,526	0,753
	k		0,721	0,486	0,742
700	p	0,96	0,718	0,457	0,750
	k		0,674	0,381	0,704
730	p	1,00	0,528	0,314	0,591
					0,448

Odkształcenia stali zbrojeniowej Strain of reinforcement bars					
V	V/V _{exp}	Tz1	Tz2	Tz3	Tz4
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,020	0,033	0,022
	k		0,019	0,032	0,022
100	p	0,14	0,039	0,072	0,051
	k		0,039	0,075	0,053
150	p	0,21	0,088	0,174	0,181
	k		0,100	0,189	0,197
200	p	0,27	0,218	0,312	0,331
	k		0,243	0,335	0,350
250	p	0,34	0,408	0,473	0,482
	k		0,488	0,550	0,538
300	p	0,41	0,645	0,724	0,681
	k		0,701	0,782	0,719
350	p	0,48	0,976	1,022	0,949
	k		1,047	1,079	1,010
400	p	0,55	1,330	1,301	1,249
	k		1,402	1,360	1,326
450	p	0,62	1,625	1,548	1,527
	k		1,687	1,606	1,599
500	p	0,68	1,884	1,792	1,779
	k		1,936	1,841	1,841
550	p	0,75	2,128	2,022	2,002
	k		2,176	2,069	2,046
600	p	0,82	2,346	2,236	2,186
	k		2,402	2,289	2,243
650	p	0,89	2,588	2,462	2,367
	k		2,632	2,548	2,410
700	p	0,96	2,826	2,784	2,520
	k		2,808	2,795	2,638
730	p	1,00	2,963	2,877	2,996
					3,051



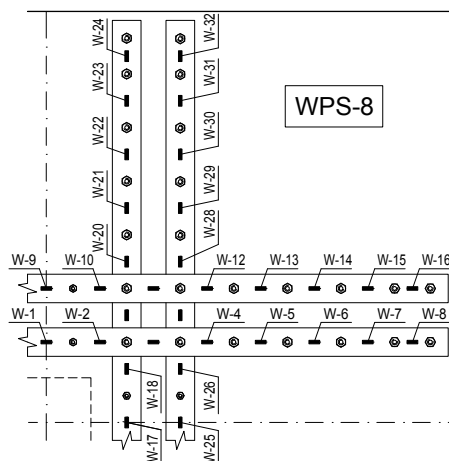
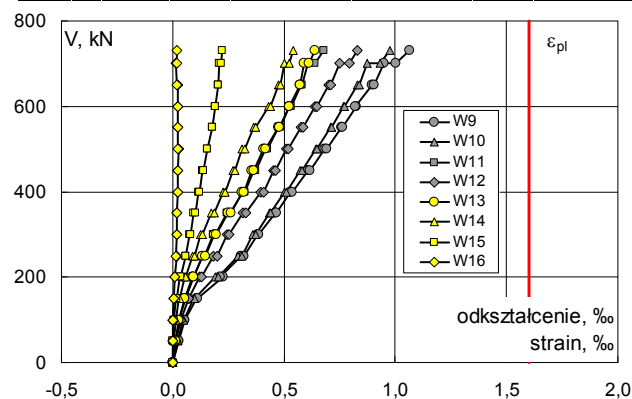
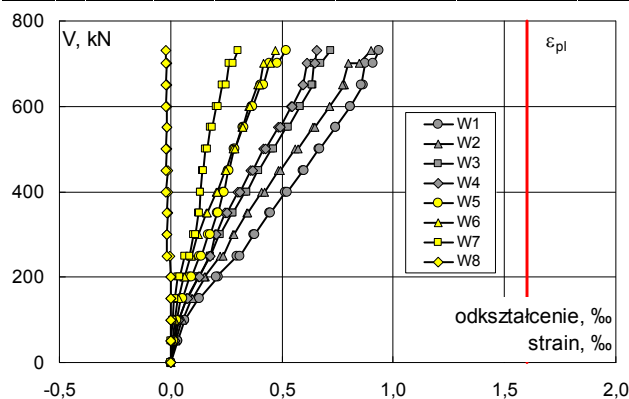
Lokalizacja czujników / Location of gauges



WPS-8

Odsztalcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
kN	-	ε ‰							
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,030	0,025	0,019	0,017	0,011	0,009	0,004
100	p	0,14	0,063	0,051	0,036	0,037	0,027	0,018	0,009
150	p	0,21	0,124	0,095	0,071	0,072	0,047	0,034	0,016
200	p	0,27	0,213	0,155	0,124	0,125	0,085	0,060	0,034
250	p	0,34	0,299	0,221	0,176	0,175	0,128	0,091	0,062
300	p	0,41	0,374	0,278	0,218	0,202	0,168	0,120	0,104
350	p	0,48	0,444	0,340	0,274	0,244	0,210	0,161	0,126
400	p	0,55	0,516	0,408	0,334	0,304	0,238	0,204	0,136
450	p	0,62	0,595	0,486	0,392	0,361	0,259	0,244	0,144
500	p	0,68	0,667	0,560	0,453	0,419	0,285	0,280	0,158
550	p	0,75	0,740	0,639	0,518	0,484	0,324	0,318	0,180
600	p	0,82	0,809	0,716	0,580	0,541	0,363	0,351	0,207
650	p	0,89	0,866	0,780	0,639	0,594	0,405	0,390	0,232
700	p	0,96	0,875	0,797	0,645	0,613	0,443	0,419	0,263
730	p	1,00	0,938	0,901	0,718	0,657	0,520	0,470	0,301

Odsztalcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W9	W10	W11	W12	W13	W14	W15	W16
kN	-	ε ‰							
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,027	0,022	0,014	0,016	0,013	0,006	0,003
100	p	0,14	0,053	0,047	0,029	0,036	0,026	0,013	0,007
150	p	0,21	0,107	0,094	0,057	0,070	0,052	0,028	0,016
200	p	0,27	0,226	0,193	0,092	0,122	0,089	0,053	0,032
250	p	0,34	0,305	0,293	0,134	0,184	0,136	0,088	0,057
300	p	0,41	0,380	0,362	0,183	0,244	0,187	0,125	0,076
350	p	0,48	0,461	0,434	0,246	0,317	0,250	0,173	0,096
400	p	0,55	0,530	0,500	0,316	0,396	0,312	0,227	0,118
450	p	0,62	0,606	0,571	0,364	0,455	0,357	0,272	0,136
500	p	0,68	0,685	0,642	0,418	0,512	0,408	0,313	0,155
550	p	0,75	0,760	0,710	0,476	0,579	0,476	0,363	0,176
600	p	0,82	0,825	0,766	0,525	0,638	0,522	0,429	0,193
650	p	0,89	0,896	0,831	0,579	0,703	0,572	0,476	0,207
700	p	0,96	0,948	0,875	0,610	0,749	0,590	0,501	0,209
730	p	1,00	1,065	0,977	0,678	0,828	0,641	0,543	0,223

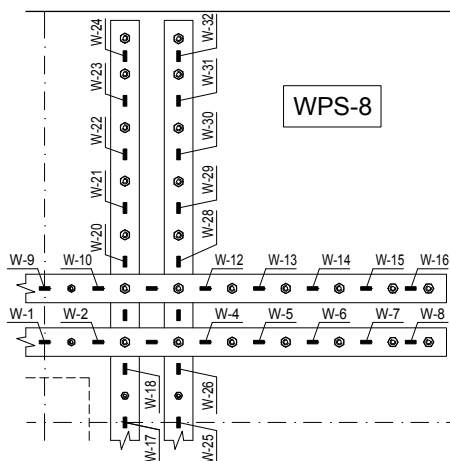
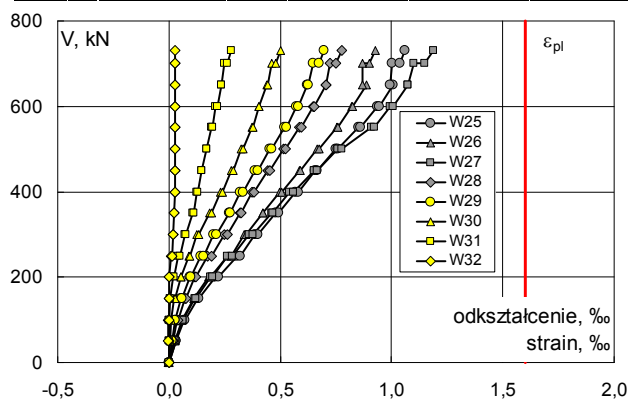
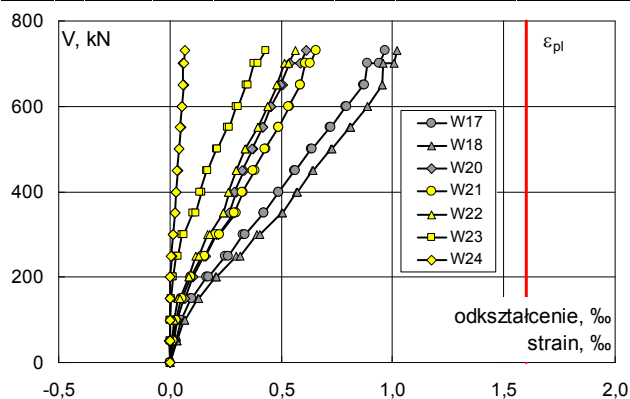


WPS-8

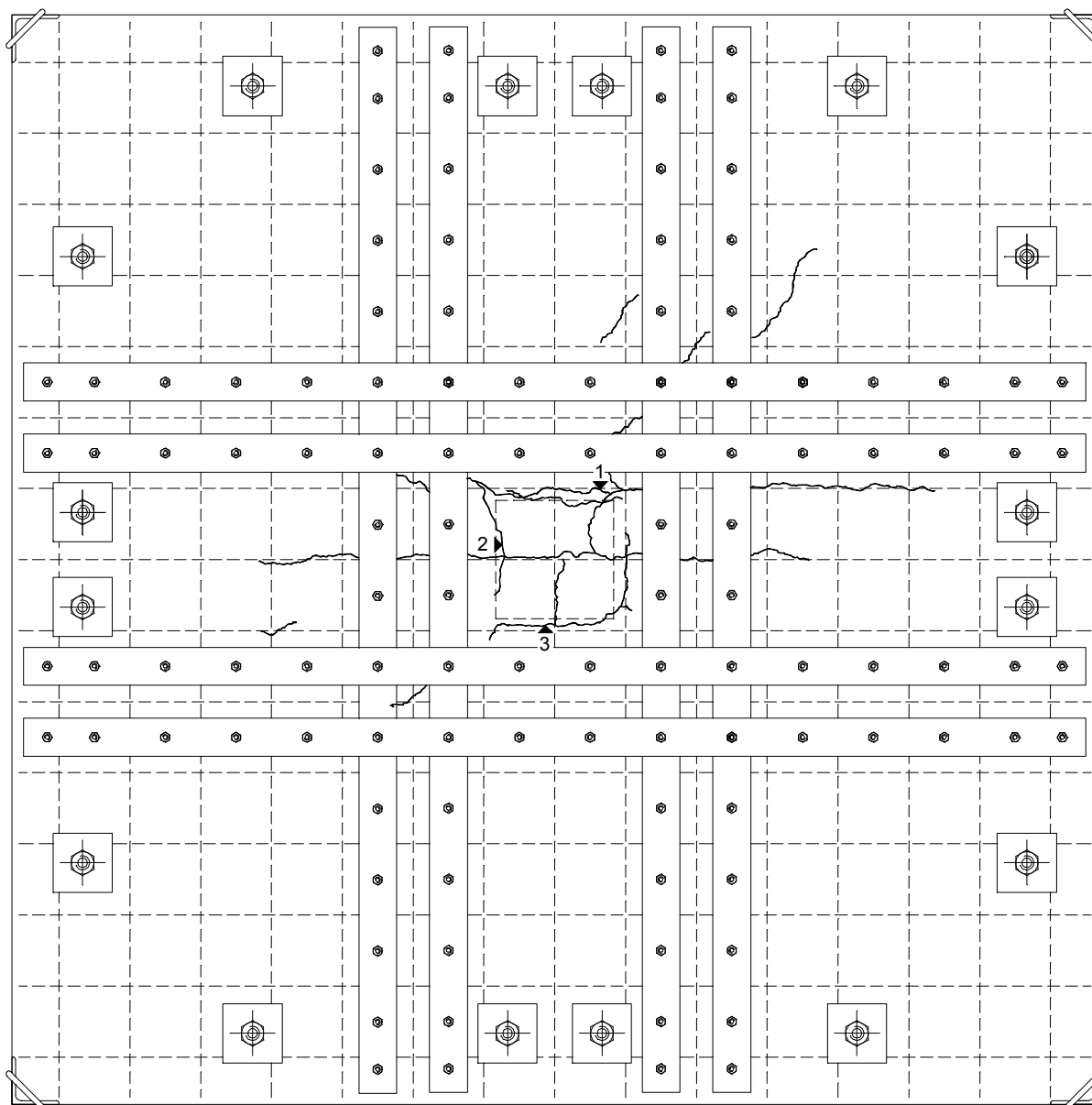
Odkształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W17	W18	W19	W20	W21	W22	W23	W24
ε									
‰									
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,027	0,032	0,016	0,013	0,008	0,001	-0,002
100	p	0,14	0,051	0,065	0,017	0,014	0,009	0,001	0,000
150	p	0,21	0,094	0,123	0,034	0,027	0,018	0,002	0,000
200	p	0,27	0,166	0,205	0,064	0,049	0,037	0,004	0,000
250	p	0,34	0,250	0,297	0,105	0,093	0,084	0,014	0,001
300	p	0,41	0,330	0,393	0,104	0,093	0,087	0,015	0,003
350	p	0,48	0,424	0,502	0,151	0,144	0,118	0,027	0,008
400	p	0,55	0,487	0,567	0,160	0,157	0,130	0,035	0,007
450	p	0,62	0,558	0,638	0,211	0,205	0,168	0,052	0,014
500	p	0,68	0,635	0,722	0,217	0,221	0,179	0,062	0,015
550	p	0,75	0,720	0,809	0,287	0,300	0,241	0,102	0,025
600	p	0,82	0,792	0,887	0,267	0,290	0,240	0,118	0,024
650	p	0,89	0,869	0,954	0,296	0,331	0,267	0,142	0,027
700	p	0,96	0,887	0,957	0,289	0,325	0,264	0,136	0,028
730	p	1,00	0,941	1,007	0,334	0,380	0,296	0,167	0,036
			0,965	1,019	0,326	0,375	0,296	0,171	0,033
					0,375	0,433	0,337	0,208	0,042
					0,367	0,427	0,336	0,214	0,039
					0,418	0,489	0,397	0,257	0,048
					0,416	0,489	0,397	0,267	0,047
					0,455	0,537	0,438	0,298	0,055
					0,453	0,535	0,439	0,307	0,055
					0,504	0,588	0,482	0,344	0,061
					0,498	0,586	0,481	0,350	0,059
					0,537	0,609	0,514	0,376	0,060
					0,584	0,630	0,535	0,396	0,062
					0,611	0,656	0,565	0,429	0,068

uszkodzony czujnik / damaged gauge

Odkształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W25	W26	W27	W28	W29	W30	W31	W32
ε									
‰									
0	p	0,00	0,001	-0,002	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000
50	p	0,07	0,033	0,027	0,030	0,017	0,014	0,006	0,000
100	p	0,14	0,034	0,027	0,029	0,017	0,014	0,005	0,000
150	p	0,21	0,068	0,057	0,061	0,038	0,028	0,011	0,001
200	p	0,27	0,070	0,058	0,062	0,039	0,028	0,011	0,002
250	p	0,34	0,129	0,110	0,114	0,072	0,054	0,024	0,006
300	p	0,41	0,135	0,113	0,120	0,076	0,058	0,026	0,007
350	p	0,48	0,211	0,180	0,186	0,117	0,092	0,052	0,017
400	p	0,55	0,222	0,189	0,195	0,122	0,099	0,055	0,022
450	p	0,62	0,306	0,263	0,264	0,174	0,142	0,089	0,039
500	p	0,68	0,319	0,278	0,286	0,190	0,156	0,092	0,050
550	p	0,75	0,387	0,337	0,359	0,248	0,202	0,123	0,070
600	p	0,82	0,400	0,346	0,378	0,262	0,214	0,133	0,078
650	p	0,89	0,481	0,421	0,462	0,322	0,273	0,183	0,107
700	p	0,96	0,491	0,422	0,466	0,323	0,274	0,193	0,111
730	p	1,00	0,570	0,496	0,543	0,372	0,320	0,231	0,127
			0,580	0,505	0,561	0,383	0,332	0,239	0,130
			0,658	0,584	0,652	0,444	0,386	0,278	0,148
			0,667	0,590	0,667	0,452	0,398	0,288	0,148
			0,749	0,666	0,758	0,515	0,452	0,326	0,168
			0,760	0,675	0,777	0,523	0,463	0,333	0,169
			0,853	0,753	0,908	0,586	0,519	0,372	0,191
			0,862	0,758	0,921	0,594	0,528	0,378	0,194
			0,936	0,823	0,995	0,646	0,572	0,404	0,211
			0,943	0,826	1,006	0,651	0,581	0,405	0,216
			1,005	0,888	1,075	0,704	0,623	0,441	0,236
			0,993	0,869	1,074	0,705	0,627	0,443	0,238
			1,002	0,871	1,099	0,723	0,650	0,462	0,251
			1,039	0,900	1,151	0,752	0,674	0,481	0,263
			1,062	0,926	1,189	0,775	0,696	0,502	0,279

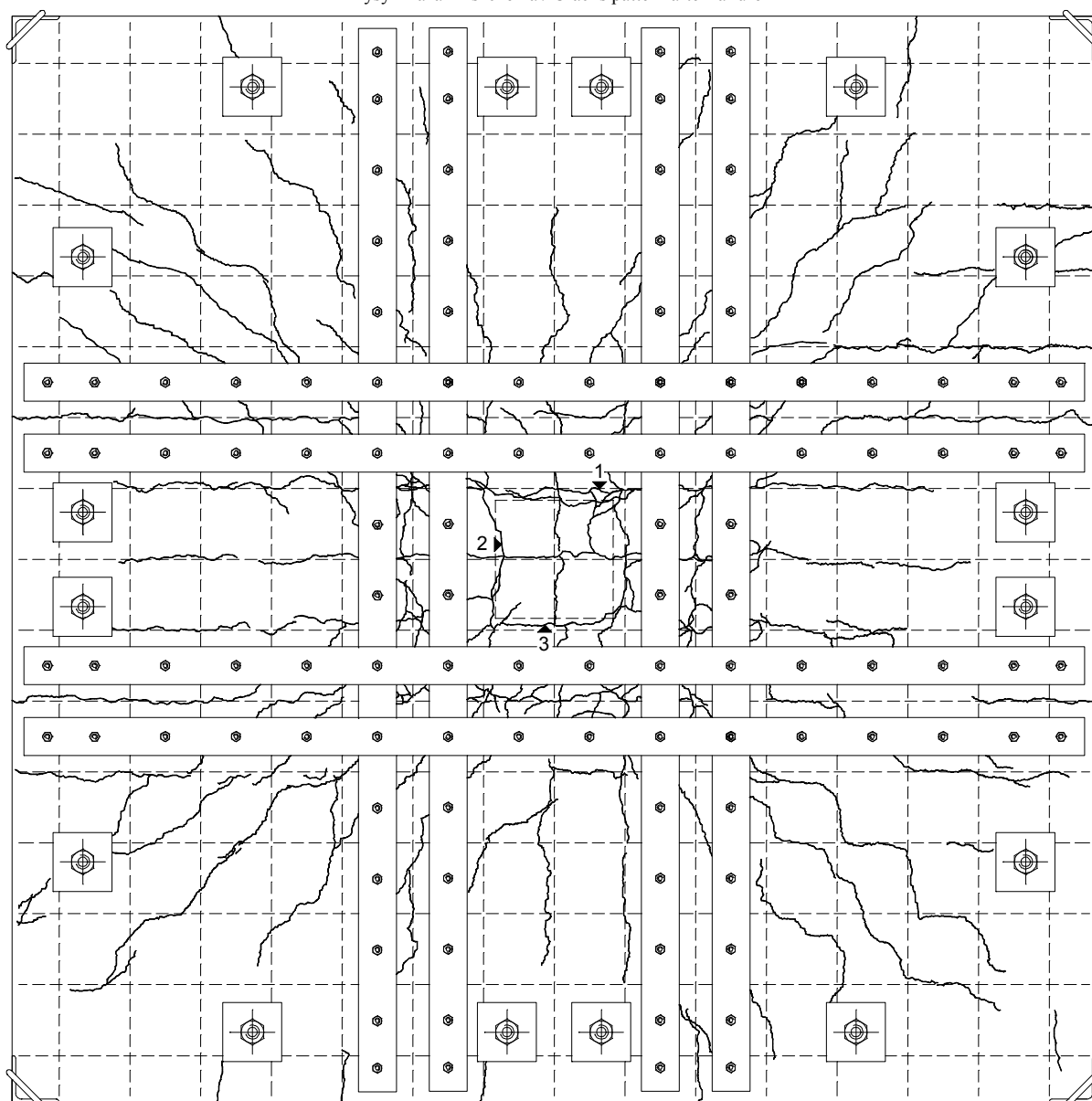


Rysy – faza początkowa / Cracks pattern – initial stage



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
200	0,05	0,05	0,10
250	0,10	0,05	0,10

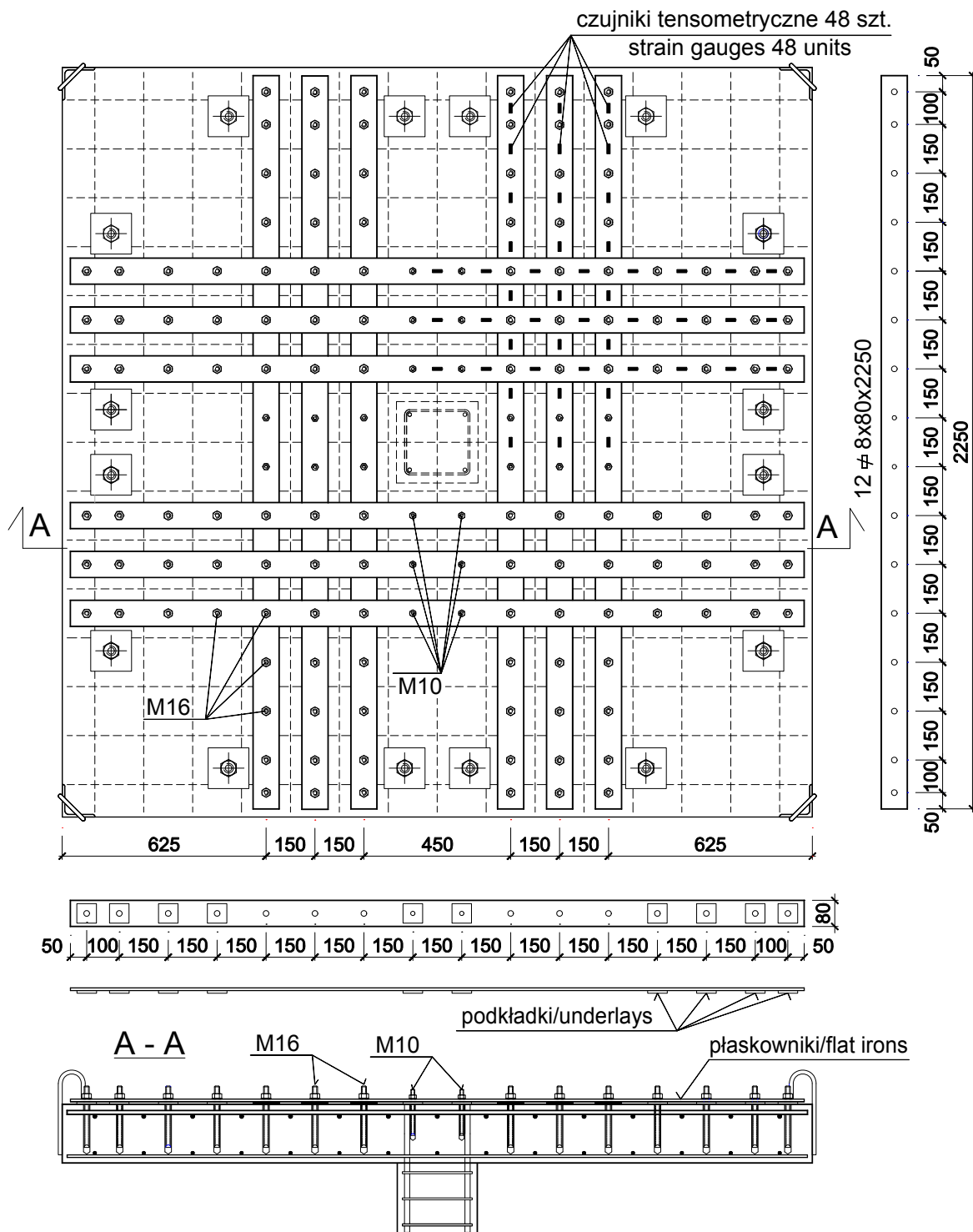
Rysy – faza zniszczenia / Cracks pattern after failure



Siła / Load	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
200	0,05	0,05	0,10
250	0,10	0,05	0,10
250	0,10	0,10	0,10
300	0,15	0,15	0,10
350	0,20	0,20	0,30
400	0,20	0,35	0,45
450	0,25	0,50	0,50
500	0,40	0,55	0,50
550	0,45	0,60	0,85
600	0,50	0,70	0,90
650	0,80	0,90	0,90
700	1,00	0,90	1,00

beton / concrete

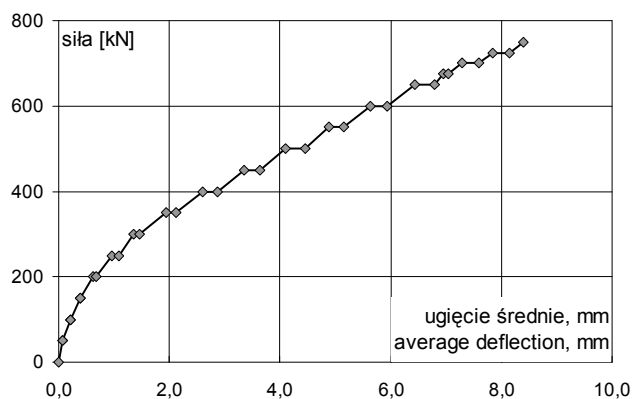
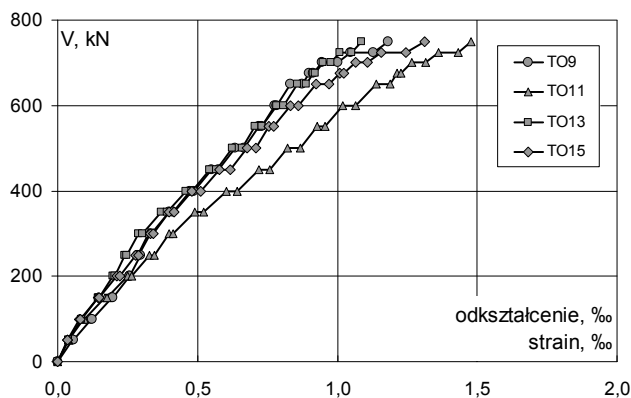
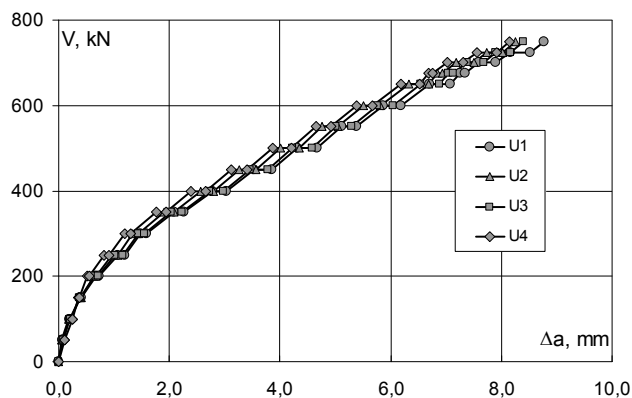
(płaskownik / flat iron)

$$f_{v,h} = 580,8 \text{ MPa}, f_{v,l} = 565,5 \text{ MPa}, f_{vm} = 573,2 \text{ MPa}, A_{sm} = 1,113 \text{ cm}^2$$
$$A_{sm} = 6,400\text{cm}^2 \text{ (pomiar / measure 6,550cm}^2\text{)}$$
nośność świadka / witness load capacity $V_s = 500,0 \text{ kN}$
$$V_{\text{exp}} / V_s = 1,50$$


Rysunek konstrukcyjny modelu / Technical drawing of the specimen

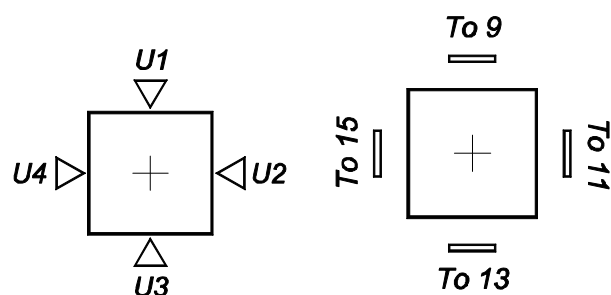
Ugięcia Deflections						
V	V/V _{exp}	U1	U2	U3	U4	średnie average
kN	-	Δa				mm
0	p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	p	0,08	0,06	0,08	0,10	0,08
	k	0,08	0,06	0,08	0,10	0,08
100	p	0,20	0,19	0,20	0,24	0,21
	k	0,21	0,19	0,21	0,25	0,21
150	p	0,40	0,40	0,38	0,36	0,38
	k	0,42	0,42	0,39	0,38	0,40
200	p	0,68	0,64	0,64	0,53	0,62
	k	0,73	0,68	0,71	0,55	0,67
250	p	1,06	0,96	1,02	0,82	0,97
	k	1,20	1,07	1,16	0,91	1,08
300	p	1,48	1,33	1,44	1,19	1,36
	k	1,59	1,44	1,56	1,29	1,47
350	p	2,09	1,90	2,04	1,77	1,95
	k	2,27	2,08	2,24	1,94	2,13
400	p	2,78	2,56	2,72	2,38	2,61
	k	3,04	2,80	2,99	2,66	2,87
450	p	3,54	3,27	3,47	3,11	3,35
	k	3,84	3,56	3,78	3,40	3,64
500	p	4,32	4,01	4,23	3,87	4,10
	k	4,68	4,35	4,58	4,20	4,45
550	p	5,11	4,77	5,00	4,65	4,88
	k	5,39	5,04	5,29	4,92	5,16
600	p	5,87	5,51	5,75	5,39	5,63
	k	6,19	5,81	6,04	5,67	5,93
650	p	6,71	6,33	6,54	6,18	6,44
	k	7,08	6,68	6,88	6,52	6,79
675	p	7,25	6,85	7,05	6,68	6,96
	k	7,34	6,94	7,13	6,76	7,04
700	p	7,59	7,19	7,39	7,02	7,29
	k	7,90	7,50	7,68	7,32	7,60
725	p	8,16	7,73	7,90	7,56	7,84
	k	8,51	8,02	8,16	7,92	8,15
750	p	8,77	8,25	8,39	8,15	8,39

Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete						
V	V/V _{exp}	TO9	TO11	TO13	TO15	
kN	-	ε				‰
0	p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,053	0,038	0,039	0,036	0,036
	k	0,055	0,040	0,040	0,036	0,036
100	p	0,119	0,091	0,084	0,079	0,079
	k	0,123	0,094	0,086	0,082	0,082
150	p	0,193	0,168	0,145	0,145	0,145
	k	0,199	0,175	0,149	0,149	0,149
200	p	0,258	0,252	0,197	0,211	0,211
	k	0,256	0,266	0,203	0,221	0,221
250	p	0,297	0,328	0,240	0,277	0,277
	k	0,284	0,347	0,246	0,288	0,288
300	p	0,326	0,398	0,288	0,332	0,332
	k	0,336	0,411	0,302	0,341	0,341
350	p	0,399	0,489	0,370	0,399	0,399
	k	0,411	0,521	0,393	0,416	0,416
400	p	0,471	0,602	0,457	0,481	0,481
	k	0,488	0,642	0,481	0,511	0,511
450	p	0,549	0,719	0,542	0,579	0,579
	k	0,575	0,759	0,569	0,616	0,616
500	p	0,635	0,823	0,623	0,676	0,676
	k	0,666	0,868	0,658	0,708	0,708
550	p	0,718	0,926	0,705	0,755	0,755
	k	0,730	0,955	0,730	0,773	0,773
600	p	0,776	1,021	0,783	0,834	0,834
	k	0,782	1,066	0,807	0,861	0,861
650	p	0,832	1,140	0,858	0,924	0,924
	k	0,876	1,187	0,889	0,969	0,969
675	p	0,901	1,215	0,912	1,008	1,008
	k	0,914	1,228	0,920	1,024	1,024
700	p	0,947	1,266	0,948	1,065	1,065
	k	1,000	1,317	0,978	1,108	1,108
725	p	1,047	1,360	1,009	1,156	1,156
	k	1,130	1,431	1,052	1,245	1,245
750	p	1,183	1,479	1,086	1,311	1,311



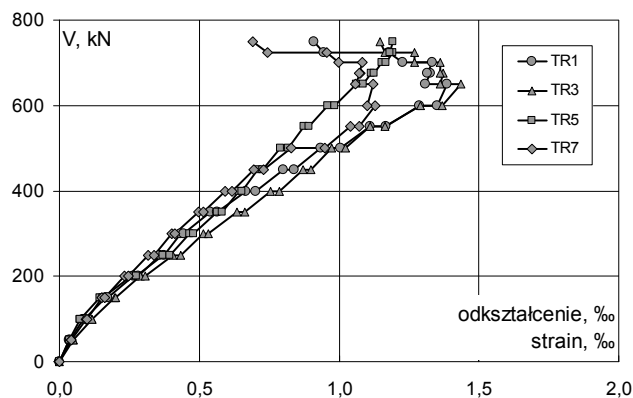
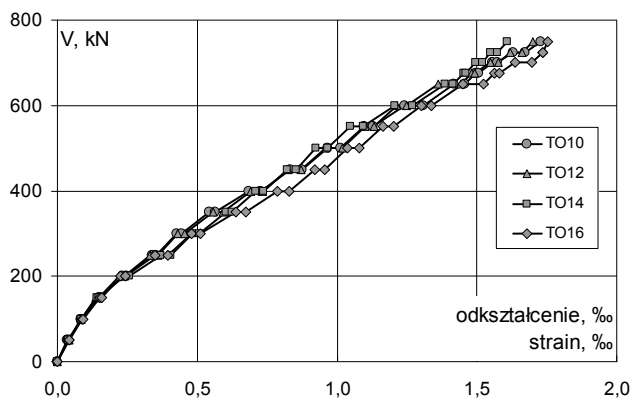
Lokalizacja czujników „U”
Location of „U” gauges

Lokalizacja czujników „T”
Location of „T” gauges

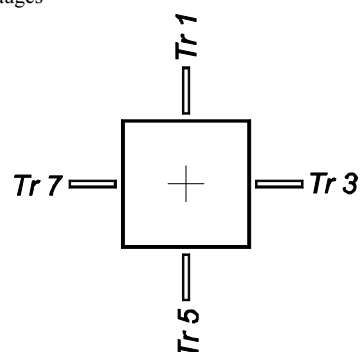
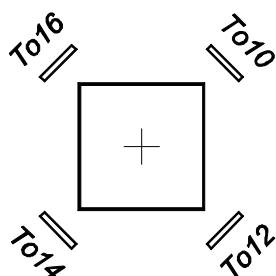


Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TO10	TO12	TO14	TO16
ε					
‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,037	0,040	0,039
	k		0,039	0,043	0,040
100	p	0,13	0,085	0,084	0,084
	k		0,086	0,085	0,084
150	p	0,20	0,149	0,137	0,142
	k		0,155	0,147	0,148
200	p	0,27	0,234	0,223	0,240
	k		0,246	0,239	0,258
250	p	0,33	0,339	0,332	0,371
	k		0,354	0,361	0,404
300	p	0,40	0,428	0,432	0,485
	k		0,443	0,454	0,508
350	p	0,47	0,542	0,559	0,604
	k		0,564	0,593	0,626
400	p	0,53	0,685	0,690	0,708
	k		0,725	0,732	0,738
450	p	0,60	0,834	0,825	0,823
	k		0,875	0,873	0,852
500	p	0,67	0,968	0,959	0,924
	k		1,013	1,019	0,968
550	p	0,73	1,096	1,099	1,049
	k		1,129	1,133	1,095
600	p	0,80	1,243	1,213	1,206
	k		1,308	1,247	1,269
650	p	0,87	1,418	1,362	1,386
	k		1,456	1,441	1,416
675	p	0,90	1,494	1,480	1,453
	k		1,507	1,491	1,460
700	p	0,93	1,556	1,548	1,496
	k		1,574	1,576	1,522
725	p	0,97	1,629	1,620	1,549
	k		1,673	1,661	1,572
750	p	1,00	1,727	1,699	1,609
					1,754

Odształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR1	TR3	TR5	TR7
ε					
‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,035	0,048	0,034
	k		0,038	0,050	0,037
100	p	0,13	0,086	0,115	0,073
	k		0,087	0,118	0,073
150	p	0,20	0,166	0,199	0,144
	k		0,173	0,202	0,156
200	p	0,27	0,263	0,291	0,258
	k		0,281	0,306	0,276
250	p	0,33	0,359	0,405	0,370
	k		0,374	0,433	0,396
300	p	0,40	0,433	0,514	0,465
	k		0,443	0,534	0,480
350	p	0,47	0,539	0,636	0,565
	k		0,563	0,663	0,582
400	p	0,53	0,667	0,755	0,641
	k		0,703	0,788	0,651
450	p	0,60	0,799	0,870	0,708
	k		0,841	0,900	0,725
500	p	0,67	0,936	0,972	0,789
	k		1,004	1,022	0,820
550	p	0,73	1,110	1,112	0,875
	k		1,166	1,164	0,893
600	p	0,80	1,286	1,292	0,960
	k		1,351	1,370	0,984
650	p	0,87	1,385	1,436	1,061
	k		1,307	1,360	1,087
675	p	0,90	1,325	1,373	1,114
	k		1,317	1,360	1,124
700	p	0,93	1,333	1,360	1,154
	k		1,226	1,270	1,168
725	p	0,97	1,177	1,270	1,191
	k		0,947	1,165	1,180
750	p	1,00	0,911	1,146	1,194
					0,690



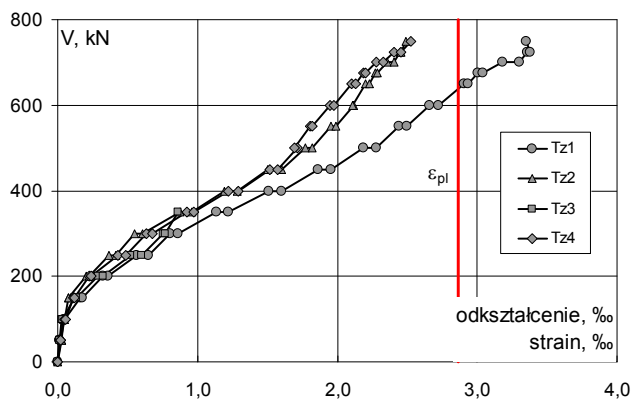
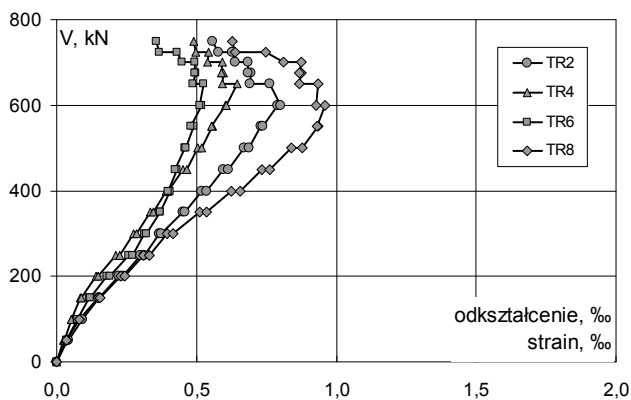
Lokalizacja czujników / Location of gauges



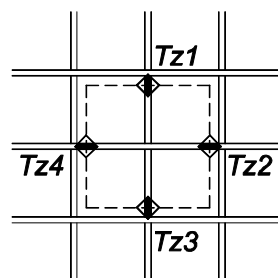
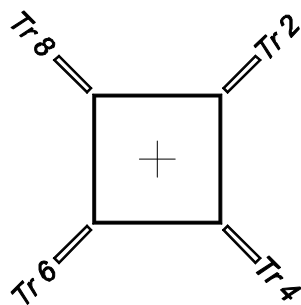
WPS-12

Odkształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR2	TR4	TR6	TR8
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,039	0,025	0,034
	k		0,042	0,027	0,036
100	p	0,13	0,092	0,053	0,073
	k		0,093	0,052	0,074
150	p	0,20	0,150	0,086	0,116
	k		0,153	0,089	0,121
200	p	0,27	0,222	0,142	0,180
	k		0,235	0,149	0,192
250	p	0,33	0,300	0,211	0,256
	k		0,314	0,226	0,273
300	p	0,40	0,367	0,276	0,314
	k		0,375	0,284	0,320
350	p	0,47	0,450	0,334	0,369
	k		0,460	0,345	0,372
400	p	0,53	0,520	0,390	0,404
	k		0,537	0,399	0,400
450	p	0,60	0,597	0,450	0,431
	k		0,613	0,464	0,425
500	p	0,67	0,670	0,503	0,460
	k		0,689	0,518	0,462
550	p	0,73	0,730	0,556	0,490
	k		0,738	0,553	0,480
600	p	0,80	0,789	0,602	0,517
	k		0,800	0,607	0,510
650	p	0,87	0,762	0,646	0,526
	k		0,690	0,591	0,488
675	p	0,90	0,694	0,597	0,497
	k		0,683	0,590	0,493
700	p	0,93	0,683	0,591	0,495
	k		0,637	0,538	0,447
725	p	0,97	0,629	0,542	0,431
	k		0,577	0,496	0,367
750	p	1,00	0,559	0,492	0,356

Odkształcenia stali zbrojeniowej Strain of reinforcement bars					
V	V/V _{exp}	Tz1	Tz2	Tz3	Tz4
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,012	0,025	0,016
	k		0,011	0,025	0,015
100	p	0,13	0,040	0,045	0,028
	k		0,047	0,046	0,033
150	p	0,20	0,159	0,076	0,122
	k		0,175	0,079	0,135
200	p	0,27	0,323	0,207	0,291
	k		0,357	0,227	0,327
250	p	0,33	0,567	0,366	0,522
	k		0,648	0,418	0,602
300	p	0,40	0,806	0,552	0,756
	k		0,861	0,608	0,767
350	p	0,47	1,137	0,876	0,863
	k		1,217	0,958	0,976
400	p	0,53	1,507	1,192	1,223
	k		1,603	1,284	1,290
450	p	0,60	1,862	1,504	1,519
	k		1,956	1,600	1,573
500	p	0,67	2,190	1,768	1,715
	k		2,280	1,820	1,693
550	p	0,73	2,443	1,952	1,803
	k		2,494	1,990	1,820
600	p	0,80	2,659	2,113	1,949
	k		2,723	2,106	1,973
650	p	0,87	2,908	2,204	2,101
	k		2,937	2,226	2,129
675	p	0,90	3,007	2,271	2,186
	k		3,044	2,285	2,203
700	p	0,93	3,181	2,353	2,279
	k		3,303	2,407	2,328
725	p	0,97	3,358	2,446	2,406
	k		3,377	2,453	2,454
750	p	1,00	3,353	2,491	2,527

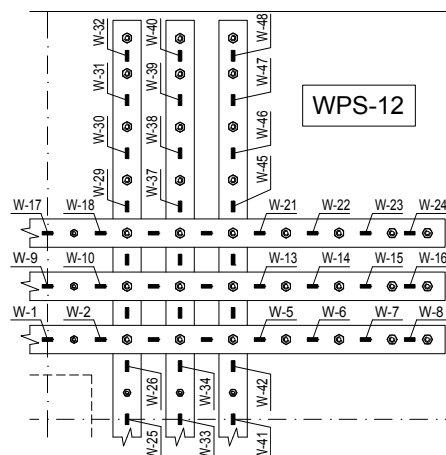
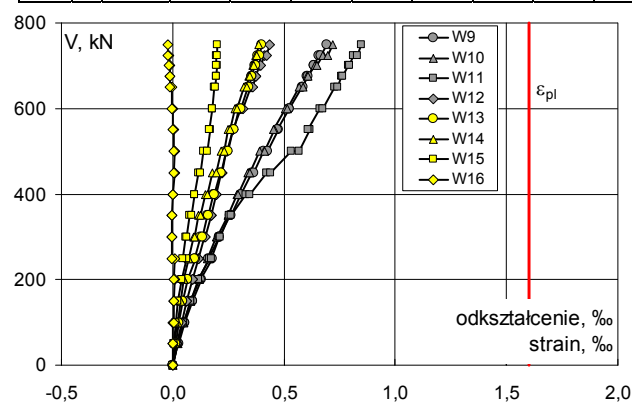
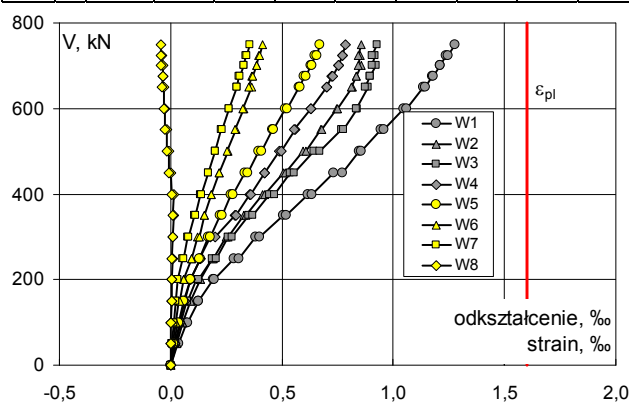


Lokalizacja czujników / Location of gauges



Odształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
kN	-	ε ‰							
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,034	0,026	0,023	0,019	0,016	0,010	0,006
100	p	0,13	0,074	0,055	0,047	0,039	0,034	0,022	0,012
150	p	0,20	0,124	0,090	0,073	0,061	0,060	0,037	0,022
200	p	0,27	0,190	0,135	0,116	0,091	0,090	0,058	0,033
250	p	0,33	0,286	0,189	0,187	0,134	0,133	0,092	0,056
300	p	0,40	0,383	0,249	0,259	0,178	0,169	0,121	0,077
350	p	0,47	0,504	0,329	0,352	0,287	0,221	0,152	0,106
400	p	0,53	0,615	0,414	0,445	0,354	0,273	0,182	0,136
450	p	0,60	0,733	0,506	0,538	0,422	0,332	0,218	0,169
500	p	0,67	0,847	0,597	0,645	0,489	0,395	0,257	0,202
550	p	0,73	0,944	0,675	0,769	0,558	0,457	0,294	0,229
600	p	0,80	1,049	0,747	0,838	0,630	0,516	0,329	0,263
650	p	0,87	1,134	0,815	0,887	0,700	0,577	0,363	0,299
675	p	0,90	1,176	0,834	0,897	0,723	0,601	0,366	0,308
700	p	0,93	1,212	0,858	0,921	0,756	0,630	0,387	0,328
725	p	0,97	1,238	0,854	0,907	0,771	0,650	0,397	0,339
750	p	1,00	1,247	0,842	0,907	0,772	0,656	0,401	0,344
			1,276	0,856	0,928	0,787	0,671	0,413	0,354

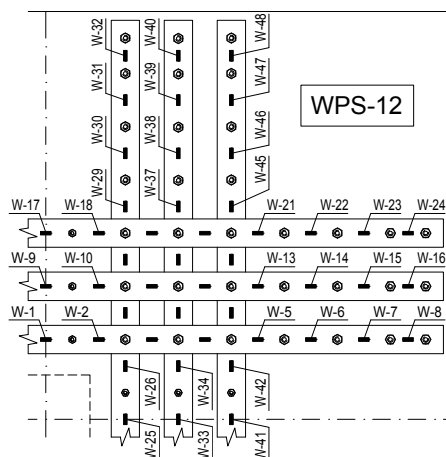
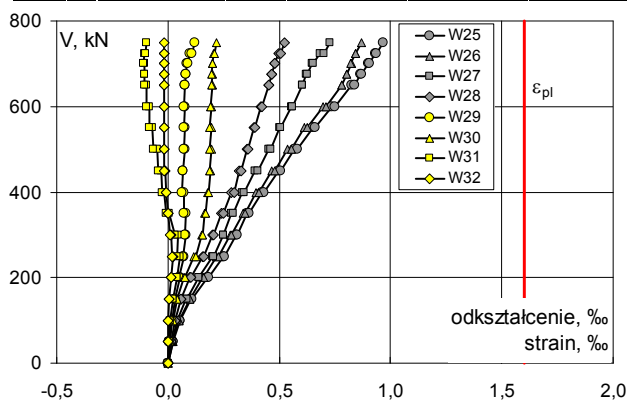
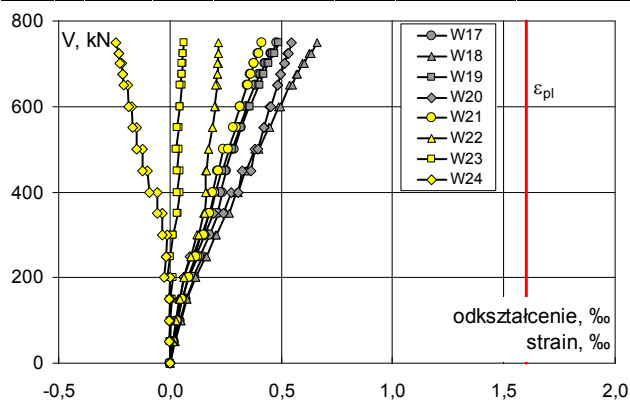
Odształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W9	W10	W11	W12	W13	W14	W15	W16
kN	-	ε ‰							
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,025	0,023	0,021	0,019	0,013	0,010	0,004
100	p	0,13	0,055	0,050	0,046	0,040	0,028	0,020	0,013
150	p	0,20	0,089	0,080	0,080	0,063	0,045	0,035	0,023
200	p	0,27	0,131	0,121	0,118	0,090	0,069	0,051	0,041
250	p	0,33	0,178	0,163	0,167	0,118	0,101	0,074	0,061
300	p	0,40	0,209	0,197	0,209	0,141	0,127	0,092	0,059
350	p	0,47	0,260	0,249	0,254	0,174	0,155	0,117	0,077
400	p	0,53	0,308	0,289	0,330	0,194	0,183	0,147	0,097
450	p	0,60	0,355	0,337	0,420	0,219	0,212	0,180	0,117
500	p	0,67	0,410	0,391	0,535	0,242	0,240	0,218	0,138
550	p	0,73	0,475	0,459	0,618	0,270	0,271	0,249	0,169
600	p	0,80	0,522	0,505	0,661	0,305	0,300	0,279	0,179
650	p	0,87	0,581	0,570	0,728	0,353	0,337	0,321	0,189
675	p	0,90	0,605	0,604	0,761	0,373	0,354	0,343	0,194
700	p	0,93	0,635	0,638	0,789	0,390	0,371	0,358	0,199
725	p	0,97	0,659	0,676	0,814	0,413	0,384	0,374	0,196
750	p	1,00	0,666	0,695	0,828	0,420	0,390	0,377	0,200
			0,691	0,720	0,849	0,437	0,401	0,387	0,201



WPS-12

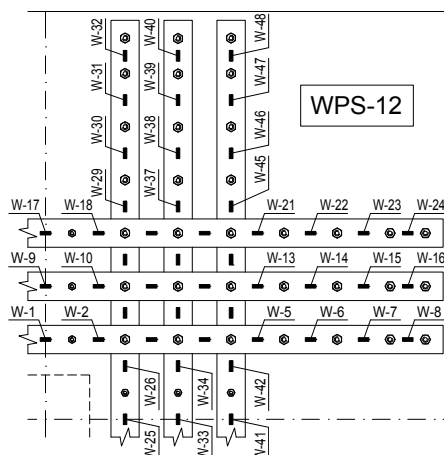
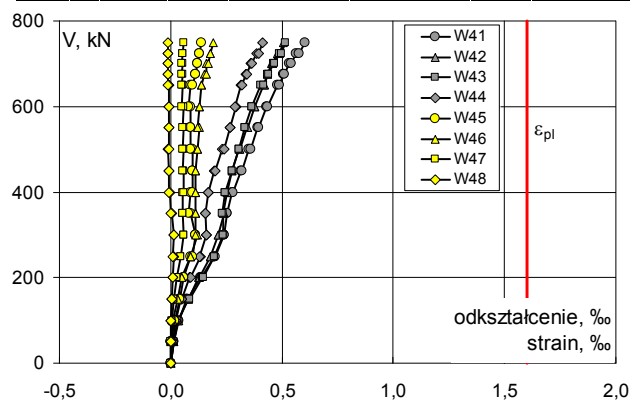
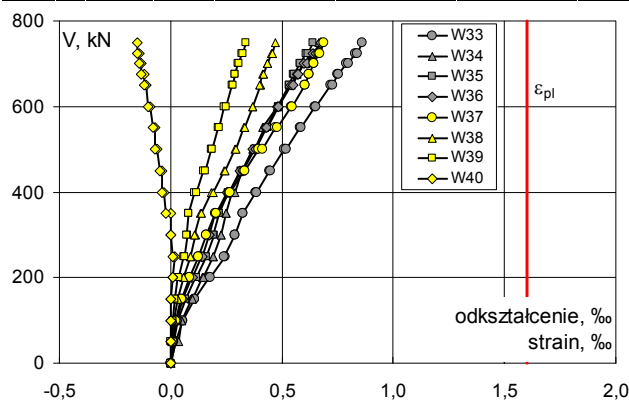
Odkształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W17	W18	W19	W20	W21	W22	W23	W24
kN	-	ε ‰							
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,020	0,024	0,017	0,014	0,013	0,014	0,000
100	p	0,13	0,045	0,048	0,035	0,028	0,032	0,026	0,007
150	p	0,20	0,072	0,076	0,056	0,044	0,055	0,042	0,011
200	p	0,27	0,110	0,116	0,082	0,065	0,083	0,064	0,012
250	p	0,33	0,147	0,161	0,115	0,091	0,125	0,093	0,000
300	p	0,40	0,176	0,205	0,140	0,100	0,155	0,120	0,016
350	p	0,47	0,217	0,255	0,176	0,125	0,174	0,153	0,036
400	p	0,53	0,235	0,298	0,205	0,140	0,199	0,164	0,045
450	p	0,60	0,253	0,337	0,230	0,160	0,214	0,162	0,043
500	p	0,67	0,278	0,381	0,268	0,180	0,241	0,173	0,041
550	p	0,73	0,322	0,446	0,315	0,200	0,285	0,215	0,055
600	p	0,80	0,345	0,490	0,356	0,220	0,315	0,240	0,046
650	p	0,87	0,384	0,537	0,398	0,240	0,346	0,261	0,055
675	p	0,90	0,402	0,567	0,418	0,250	0,362	0,271	0,052
700	p	0,93	0,428	0,594	0,441	0,260	0,379	0,281	0,057
725	p	0,97	0,451	0,626	0,463	0,270	0,394	0,291	0,060
750	p	1,00	0,479	0,660	0,487	0,280	0,413	0,301	0,063

Odkształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W25	W26	W27	W28	W29	W30	W31	W32
kN	-	ε ‰							
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,023	0,021	0,017	0,015	0,007	0,009	0,005
100	p	0,13	0,054	0,050	0,041	0,032	0,016	0,020	0,011
150	p	0,20	0,105	0,097	0,081	0,060	0,031	0,039	0,021
200	p	0,27	0,180	0,155	0,137	0,099	0,052	0,073	0,039
250	p	0,33	0,251	0,220	0,201	0,155	0,072	0,117	0,055
300	p	0,40	0,308	0,278	0,249	0,200	0,079	0,152	0,045
350	p	0,47	0,357	0,338	0,286	0,240	0,079	0,166	0,004
400	p	0,53	0,420	0,397	0,335	0,285	0,070	0,180	-0,018
450	p	0,60	0,496	0,465	0,393	0,322	0,069	0,191	-0,031
500	p	0,67	0,570	0,539	0,453	0,354	0,075	0,194	-0,048
550	p	0,73	0,651	0,614	0,503	0,388	0,075	0,194	-0,070
600	p	0,80	0,737	0,696	0,556	0,419	0,075	0,194	-0,085
650	p	0,87	0,824	0,780	0,603	0,453	0,078	0,199	-0,096
675	p	0,90	0,867	0,804	0,622	0,467	0,081	0,200	-0,104
700	p	0,93	0,901	0,827	0,648	0,480	0,086	0,202	-0,104
725	p	0,97	0,933	0,843	0,682	0,497	0,097	0,206	-0,105
750	p	1,00	0,965	0,868	0,727	0,522	0,120	0,219	-0,095

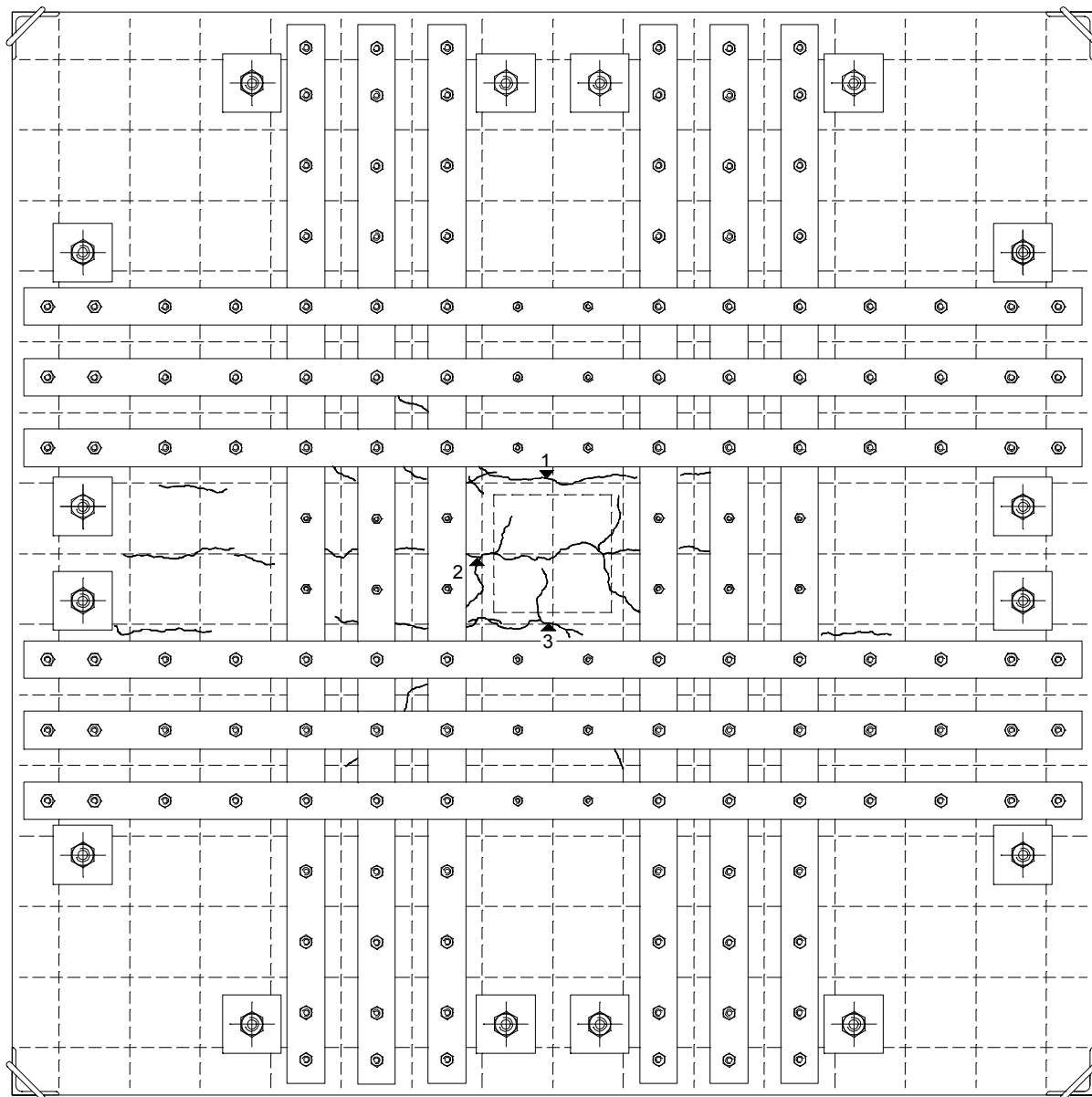


Odształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W33	W34	W35	W36	W37	W38	W39	W40
kN	-	ϵ ‰							
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,022	0,021	0,013	0,010	0,010	0,006	0,003
	k		0,021	0,035	0,013	0,010	0,009	0,006	0,003
100	p	0,13	0,054	0,049	0,033	0,027	0,023	0,015	0,008
	k		0,055	0,051	0,033	0,027	0,024	0,016	0,009
150	p	0,20	0,108	0,094	0,066	0,052	0,047	0,031	0,017
	k		0,109	0,097	0,067	0,056	0,049	0,033	0,019
200	p	0,27	0,173	0,144	0,112	0,092	0,084	0,057	0,033
	k		0,178	0,147	0,114	0,097	0,086	0,059	0,037
250	p	0,33	0,244	0,192	0,162	0,139	0,126	0,089	0,057
	k		0,242	0,191	0,159	0,144	0,126	0,088	0,063
300	p	0,40	0,290	0,229	0,196	0,174	0,159	0,110	0,078
	k		0,287	0,228	0,192	0,175	0,161	0,108	0,074
350	p	0,47	0,323	0,251	0,218	0,200	0,202	0,136	0,079
	k		0,326	0,250	0,216	0,206	0,203	0,140	0,081
400	p	0,53	0,381	0,277	0,258	0,252	0,264	0,184	0,107
	k		0,388	0,288	0,262	0,262	0,267	0,190	0,115
450	p	0,60	0,444	0,320	0,317	0,313	0,330	0,239	0,146
	k		0,450	0,321	0,323	0,323	0,335	0,244	0,154
500	p	0,67	0,512	0,369	0,376	0,371	0,396	0,288	0,181
	k		0,519	0,376	0,383	0,380	0,411	0,293	0,189
550	p	0,73	0,581	0,421	0,431	0,425	0,470	0,331	0,212
	k		0,584	0,413	0,436	0,431	0,479	0,333	0,217
600	p	0,80	0,648	0,478	0,485	0,481	0,541	0,371	0,242
	k		0,652	0,479	0,485	0,486	0,546	0,370	0,247
650	p	0,87	0,720	0,535	0,535	0,542	0,602	0,405	0,275
	k		0,726	0,542	0,534	0,549	0,602	0,401	0,280
675	p	0,90	0,750	0,563	0,552	0,569	0,620	0,414	0,287
	k		0,756	0,569	0,556	0,574	0,623	0,418	0,291
700	p	0,93	0,789	0,598	0,580	0,601	0,643	0,435	0,302
	k		0,797	0,609	0,583	0,611	0,644	0,435	0,308
725	p	0,97	0,829	0,631	0,608	0,639	0,664	0,451	0,319
	k		0,840	0,647	0,618	0,653	0,671	0,456	0,326
750	p	1,00	0,863	0,666	0,638	0,676	0,686	0,469	0,336

Odształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W41	W42	W43	W44	W45	W46	W47	W48
kN	-	ϵ ‰							
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,015	0,015	0,013	0,009	0,000	0,000	0,003
	k		0,015	0,014	0,013	0,009	0,000	0,000	0,003
100	p	0,13	0,035	0,034	0,032	0,022	0,020	0,010	0,007
	k		0,035	0,035	0,033	0,022	0,020	0,010	0,007
150	p	0,20	0,073	0,077	0,079	0,047	0,040	0,030	0,015
	k		0,077	0,080	0,084	0,049	0,040	0,030	0,016
200	p	0,27	0,132	0,126	0,144	0,085	0,060	0,050	0,027
	k		0,139	0,129	0,147	0,088	0,060	0,050	0,028
250	p	0,33	0,194	0,176	0,196	0,133	0,090	0,090	0,045
	k		0,199	0,176	0,198	0,130	0,100	0,090	0,045
300	p	0,40	0,240	0,215	0,237	0,162	0,110	0,120	0,060
	k		0,240	0,215	0,236	0,159	0,110	0,110	0,059
350	p	0,47	0,255	0,239	0,237	0,158	0,090	0,110	0,054
	k		0,254	0,236	0,233	0,157	0,080	0,110	0,052
400	p	0,53	0,275	0,252	0,246	0,171	0,090	0,110	0,054
	k		0,281	0,252	0,246	0,171	0,100	0,110	0,058
450	p	0,60	0,314	0,277	0,275	0,196	0,100	0,110	0,058
	k		0,318	0,277	0,276	0,199	0,100	0,110	0,054
500	p	0,67	0,352	0,306	0,307	0,232	0,100	0,120	0,057
	k		0,358	0,311	0,307	0,239	0,090	0,120	0,054
550	p	0,73	0,393	0,340	0,335	0,266	0,090	0,130	0,060
	k		0,396	0,346	0,333	0,267	0,090	0,120	0,055
600	p	0,80	0,433	0,377	0,364	0,292	0,090	0,130	0,058
	k		0,435	0,378	0,365	0,288	0,080	0,130	0,051
650	p	0,87	0,480	0,416	0,406	0,317	0,090	0,140	0,053
	k		0,490	0,421	0,416	0,322	0,100	0,140	0,048
675	p	0,90	0,508	0,434	0,434	0,339	0,110	0,150	0,053
	k		0,512	0,437	0,438	0,342	0,110	0,160	0,051
700	p	0,93	0,535	0,454	0,460	0,362	0,120	0,160	0,054
	k		0,542	0,459	0,465	0,365	0,120	0,170	0,050
725	p	0,97	0,566	0,481	0,488	0,386	0,130	0,180	0,054
	k		0,578	0,489	0,496	0,394	0,130	0,180	0,052
750	p	1,00	0,603	0,506	0,514	0,411	0,140	0,190	0,058

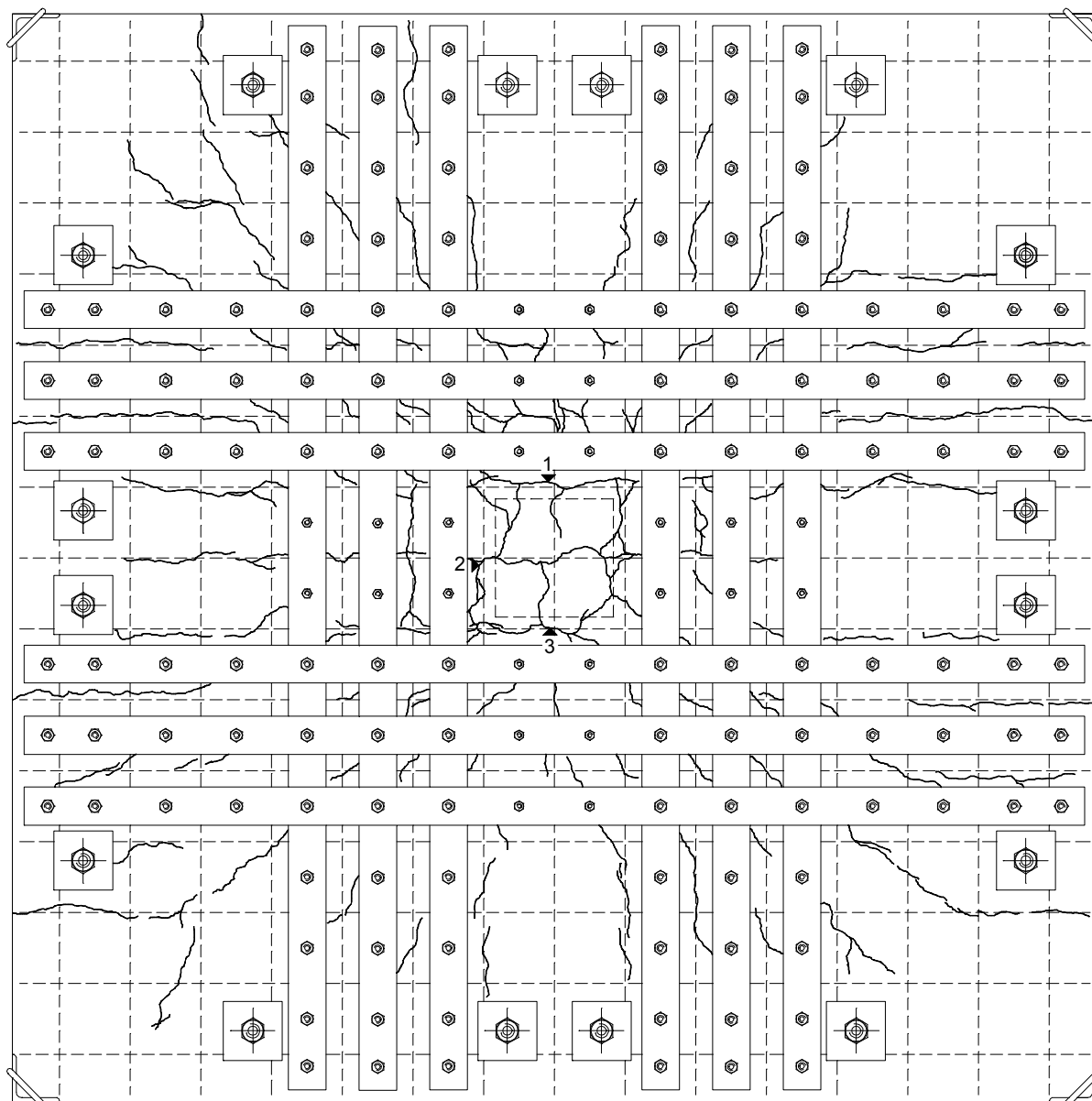


Rysy – faza początkowa / Cracks pattern – initial stage



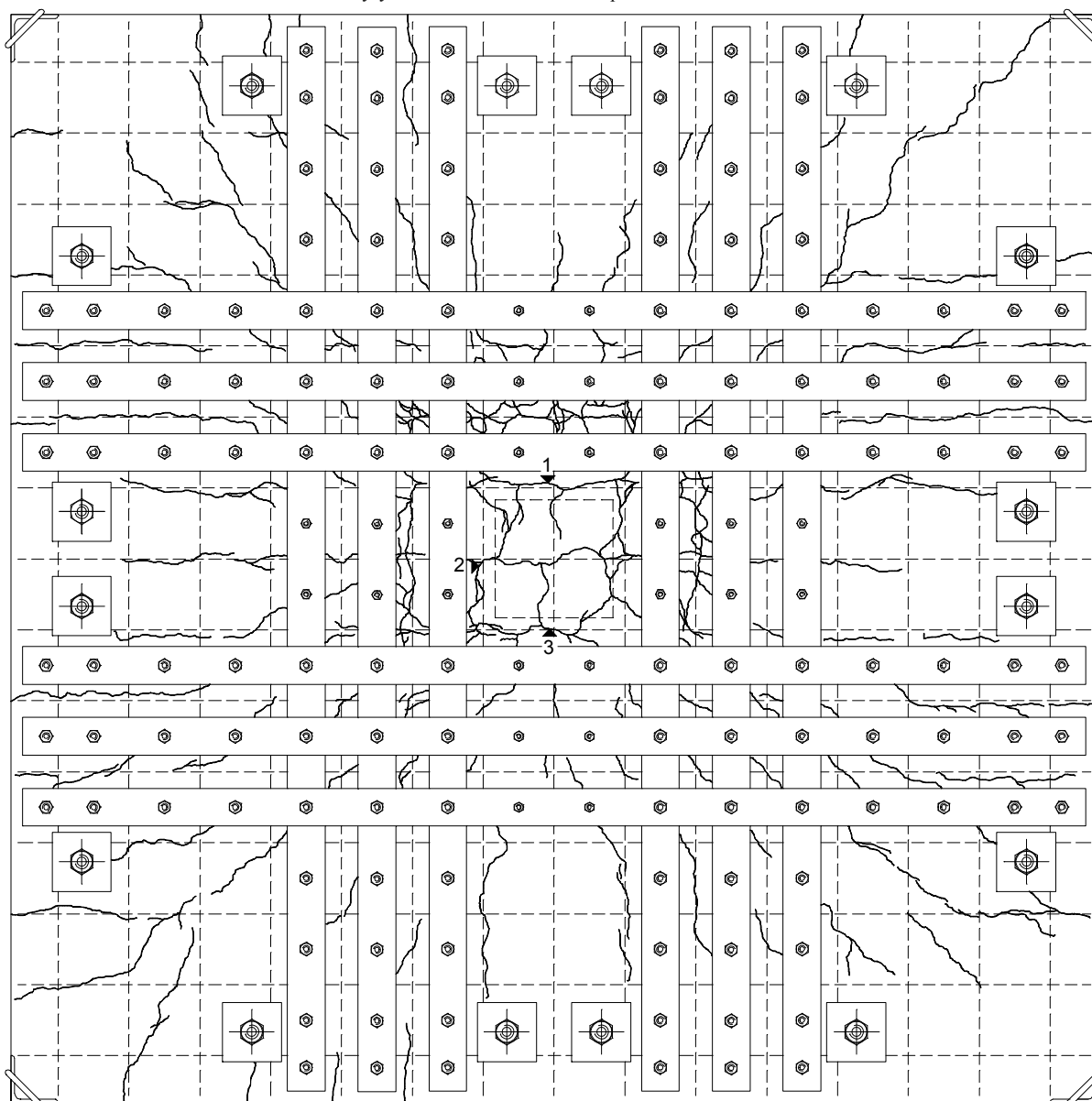
Siła / Load	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
200	0,10	0,05	0,10
250	0,15	0,10	0,10

Rysy – faza pośrednia / Cracks pattern – intermediate stage



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
200	0,10	0,05	0,10
250	0,15	0,10	0,10
300	0,20	0,20	0,15
350	0,30	0,25	0,20
400	0,40	0,30	0,20
450	0,50	0,40	0,30
500	0,65	0,45	0,35
550	0,70	0,50	0,45

Rysy – faza zniszczenia / Cracks pattern after failure



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
200	0,10	0,05	0,10
250	0,15	0,10	0,10
300	0,20	0,20	0,15
350	0,30	0,25	0,20
400	0,40	0,30	0,20
450	0,50	0,40	0,30
500	0,65	0,45	0,35
550	0,70	0,50	0,45
600	0,80	0,50	0,50
650	0,90	0,60	0,60
700	0,95	0,60	0,65

Dane / Data

beton / concrete

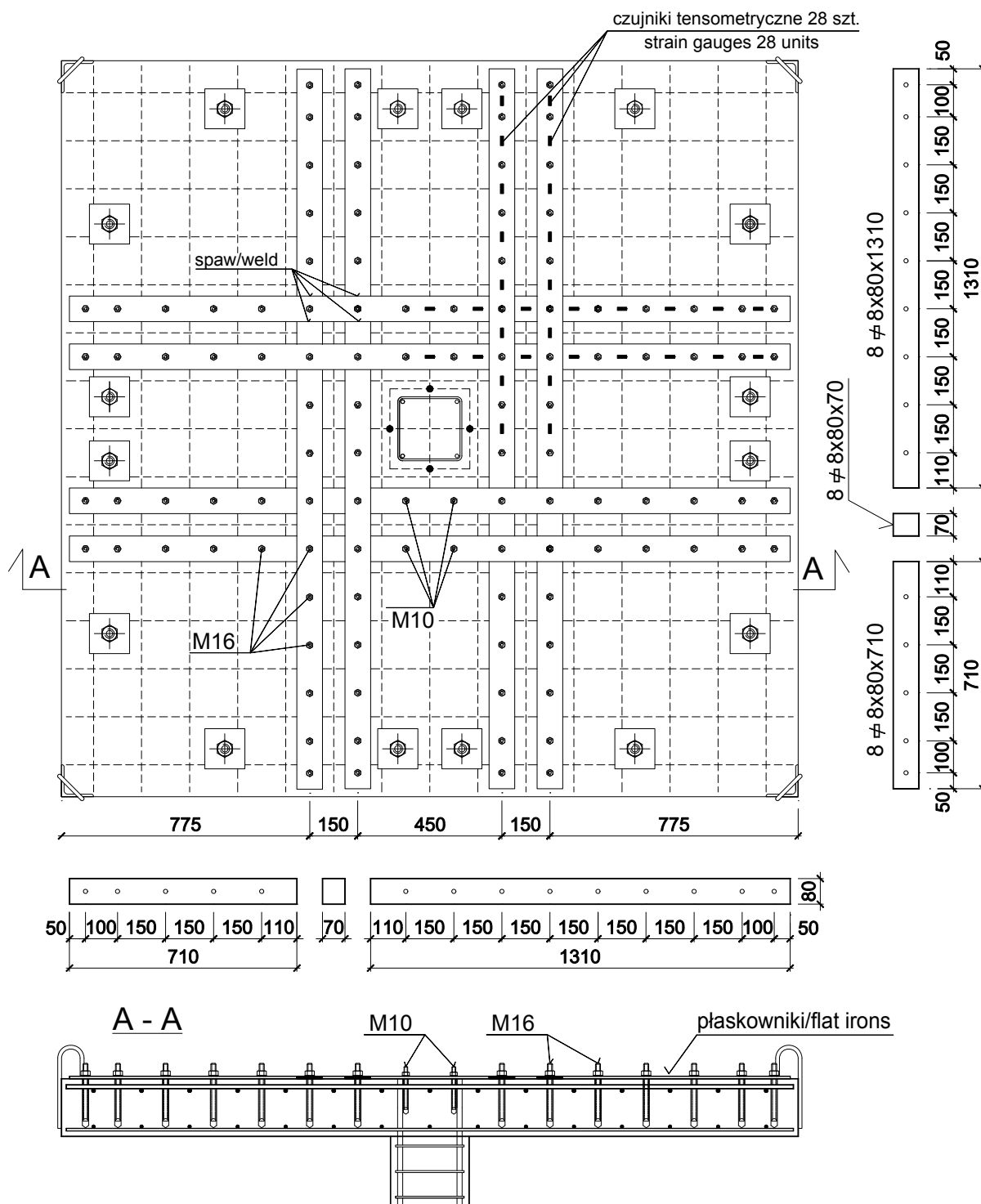
(#12)

(płaskownik / flat iron)

 $f_{c,cube} = 52,0\text{MPa}$, $f_{cm} = 43,0\text{MPa}$, $f_{sp} = 4,28\text{MPa}$, $E_{cm} = \text{nie badano} / \text{not measured}$
 $f_{y,h} = 580,8\text{MPa}$, $f_{y,l} = 565,5\text{MPa}$, $f_{ym} = 573,2\text{MPa}$, $A_{sm} = 1,113\text{cm}^2$
 $f_{y,h} = 326,5\text{MPa}$, $f_{y,l} = 322,7\text{MPa}$, $f_{ym} = 324,6\text{MPa}$, $E_s = 203000\text{MPa}$, $\varepsilon_y = 1,599\%$
 $A_{sm} = 6,400\text{cm}^2$ (pomiar / measure $6,550\text{cm}^2$)

 wysokość nominalna / nominal effective depth of cross-section $d = 14,8\text{cm}$ (pomierzona / measured $15,23\text{cm}$)

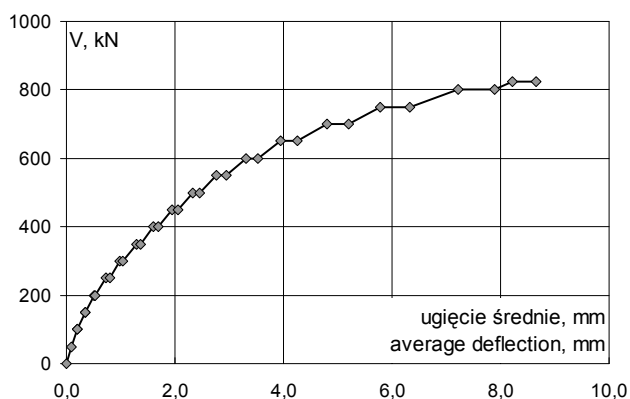
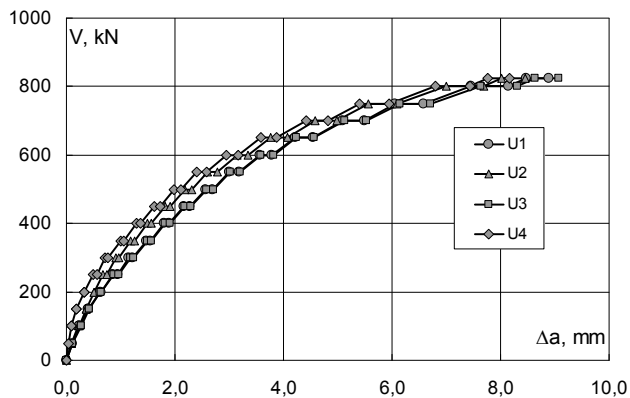
 nośność świadka / witness load capacity $V_s = 500,0\text{kN}$

 nośność eksperymentalna / experimental load capacity $V_{exp} = 825\text{kN}$
 $V_{exp} / V_s = 1,65$


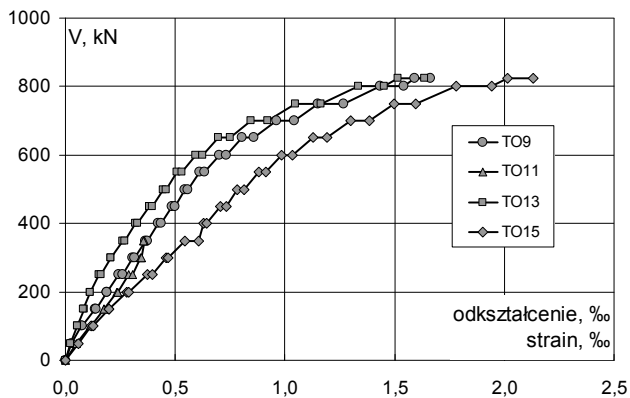
Rysunek konstrukcyjny modelu / Technical drawing of the specimen

WPSK-8

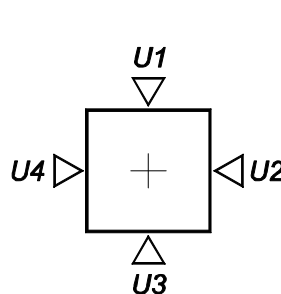
Ugięcia Deflections						
V	V/V _{exp}	U1	U2	U3	U4	średnie average
kN	-	Δa				mm
0	p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	p k	0,06	0,10	0,10	0,12	0,09
100	p k	0,12	0,24	0,22	0,27	0,20
150	p k	0,18	0,40	0,36	0,42	0,34
200	p k	0,24	0,62	0,50	0,62	0,52
250	p k	0,30	0,86	0,67	0,88	0,73
300	p k	0,36	1,15	0,90	1,18	0,98
350	p k	0,42	1,47	1,18	1,50	1,29
400	p k	0,58	1,80	1,49	1,82	1,60
450	p k	0,55	2,16	1,82	2,19	1,95
500	p k	0,61	2,57	2,19	2,59	2,33
550	p k	0,67	3,00	2,60	3,02	2,76
600	p k	0,73	3,56	3,14	3,59	3,31
650	p k	0,79	4,22	3,76	4,25	3,95
700	p k	0,85	5,09	4,59	5,12	4,81
750	p k	0,91	6,06	5,56	6,14	5,79
800	p k	0,97	7,46	7,00	7,64	7,23
825	p k	1,00	8,47	8,02	8,64	8,23



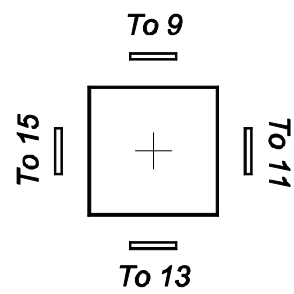
Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete						
V	V/V _{exp}	TO9	TO11	TO13	TO15	
kN	-	ε				‰
0	p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p k	0,029	0,050	0,023	0,057	0,057
100	p k	0,072	0,113	0,054	0,116	0,116
150	p k	0,137	0,176	0,084	0,197	0,197
200	p k	0,189	0,233	0,114	0,280	0,280
250	p k	0,243	0,288	0,152	0,371	0,371
300	p k	0,306	0,343	0,206	0,458	0,458
350	p k	0,364	0,359	0,260	0,544	0,544
400	p k	0,424	0,434	0,318	0,628	0,628
450	p k	0,485	0,498	0,381	0,708	0,708
500	p k	0,546	0,559	0,443	0,784	0,784
550	p k	0,610	0,636	0,510	0,883	0,883
600	p k	0,700	0,735	0,592	0,985	0,985
650	p k	0,804	0,858	0,697	1,129	1,129
700	p k	0,963	1,041	0,847	1,301	1,301
750	p k	1,152	1,268	0,924	1,383	1,383
800	p k	1,436	1,541	1,336	1,782	1,782
825	p k	1,590	1,664	1,516	2,013	2,013



Lokalizacja czujników „U”
Location of „U” gauges

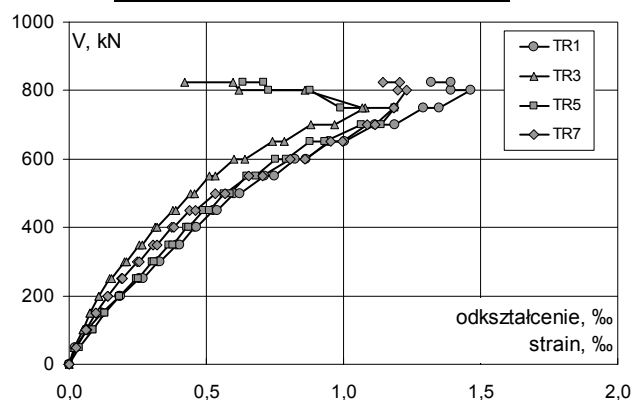
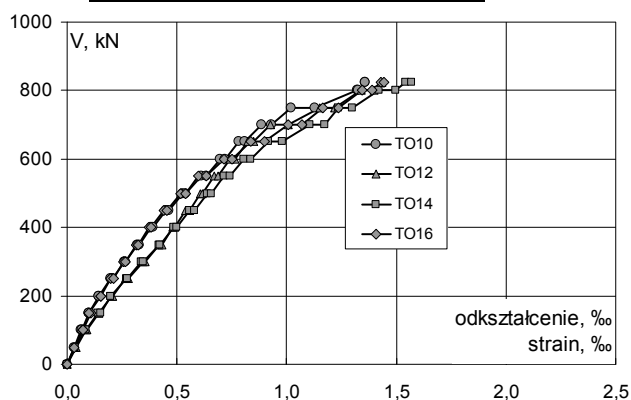


Lokalizacja czujników „T”
Location of „T” gauges

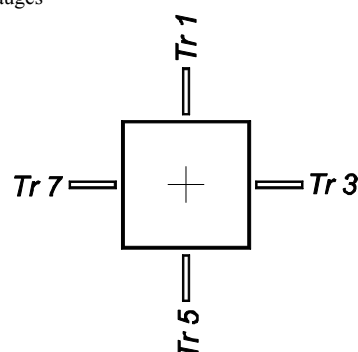
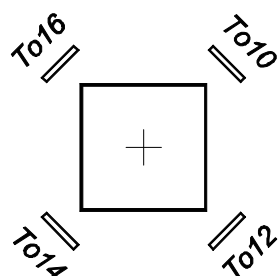


Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TO10	TO12	TO14	TO16
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,06	0,030	0,039	0,034
	k				0,032
100	p	0,12	0,064	0,087	0,083
	k		0,066	0,090	0,086
					0,073
150	p	0,18	0,101	0,144	0,141
	k		0,100	0,145	0,153
					0,097
200	p	0,24	0,145	0,202	0,199
	k		0,146	0,205	0,199
					0,152
250	p	0,30	0,197	0,265	0,269
	k		0,209	0,277	0,275
					0,210
300	p	0,36	0,260	0,346	0,335
	k		0,264	0,356	0,344
					0,265
350	p	0,42	0,319	0,416	0,420
	k		0,330	0,432	0,423
					0,314
					0,324
400	p	0,58	0,381	0,482	0,485
	k		0,390	0,490	0,501
					0,382
450	p	0,55	0,448	0,541	0,558
	k		0,465	0,557	0,578
					0,455
500	p	0,61	0,524	0,605	0,640
	k		0,541	0,616	0,656
					0,538
550	p	0,67	0,612	0,672	0,717
	k		0,633	0,690	0,742
					0,636
600	p	0,73	0,696	0,743	0,806
	k		0,719	0,764	0,838
					0,752
650	p	0,79	0,782	0,821	0,918
	k		0,810	0,851	0,978
					0,898
700	p	0,85	0,888	0,928	1,104
	k		0,933	1,006	1,175
					1,068
750	p	0,91	1,020	1,150	1,237
	k		1,130	1,218	1,299
					1,236
800	p	0,97	1,322	1,339	1,423
	k		1,325	1,397	1,497
					1,388
825	p	1,00	1,357	1,436	1,543
	k		1,359	1,429	1,570
					1,444

Odształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR1	TR3	TR5	TR7
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,06	0,022	0,018	0,037
	k				0,025
100	p	0,12	0,063	0,049	0,086
	k		0,066	0,049	0,087
					0,062
150	p	0,18	0,120	0,077	0,130
	k		0,120	0,075	0,130
					0,098
200	p	0,24	0,185	0,108	0,183
	k		0,186	0,107	0,183
					0,141
250	p	0,30	0,255	0,147	0,243
	k		0,269	0,154	0,251
					0,196
300	p	0,36	0,325	0,203	0,303
	k		0,332	0,207	0,310
					0,255
350	p	0,42	0,391	0,256	0,363
	k		0,402	0,266	0,376
					0,307
					0,320
400	p	0,58	0,456	0,313	0,427
	k		0,465	0,319	0,436
					0,373
					0,383
450	p	0,55	0,524	0,376	0,491
	k		0,539	0,388	0,511
					0,460
500	p	0,61	0,601	0,443	0,566
	k		0,623	0,456	0,587
					0,568
550	p	0,67	0,712	0,511	0,647
	k		0,747	0,532	0,679
					0,704
600	p	0,73	0,822	0,600	0,752
	k		0,863	0,639	0,792
					0,858
650	p	0,79	0,945	0,740	0,876
	k		1,004	0,785	0,932
					0,998
700	p	0,85	1,115	0,883	1,066
	k		1,186	0,967	1,136
					1,114
750	p	0,91	1,290	1,080	1,187
	k		1,349	1,068	0,990
					1,184
800	p	0,97	1,464	0,860	0,877
	k		1,392	0,618	0,726
					1,231
					1,197
825	p	1,00	1,392	0,597	0,710
	k		1,320	0,421	0,632
					1,205
					1,144

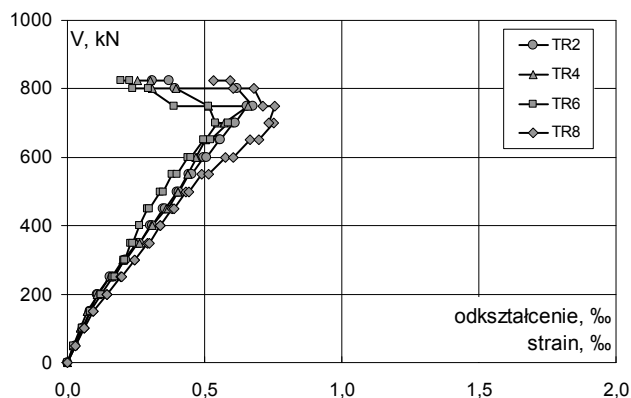


Lokalizacja czujników / Location of gauges

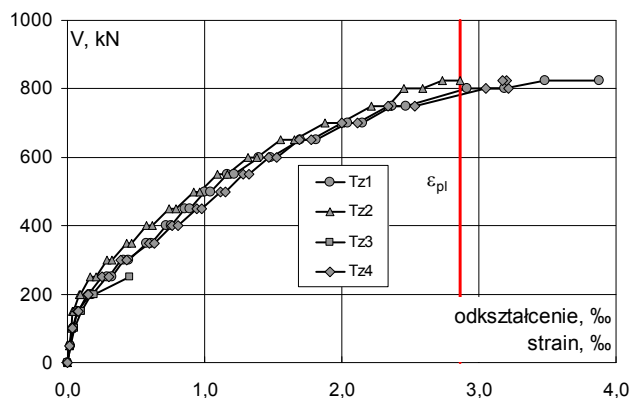


WPSK-8

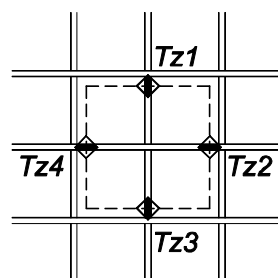
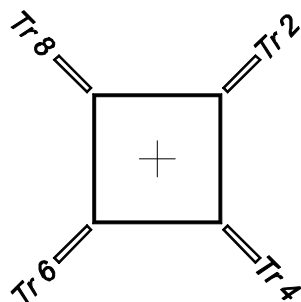
Odkształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR2	TR4	TR6	TR8
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p k	0,06	0,028	0,022	0,023
100	p k	0,12	0,059	0,047	0,053
150	p k	0,18	0,059	0,048	0,053
200	p k	0,24	0,081	0,072	0,084
250	p k	0,30	0,081	0,071	0,083
300	p k	0,36	0,109	0,110	0,121
350	p k	0,42	0,111	0,109	0,122
400	p k	0,58	0,153	0,156	0,166
450	p k	0,55	0,164	0,162	0,172
500	p k	0,61	0,208	0,203	0,206
550	p k	0,67	0,213	0,206	0,208
600	p k	0,73	0,256	0,253	0,230
650	p k	0,79	0,263	0,262	0,236
700	p k	0,85	0,303	0,305	0,261
750	p k	0,91	0,308	0,309	0,263
800	p k	0,97	0,348	0,360	0,290
825	p k	1,00	0,357	0,367	0,298
			0,399	0,404	0,339
			0,406	0,403	0,348
			0,443	0,439	0,382
			0,455	0,440	0,388
			0,497	0,470	0,430
			0,506	0,467	0,441
			0,553	0,505	0,491
			0,557	0,505	0,513
			0,603	0,545	0,491
			0,612	0,571	0,513
			0,655	0,657	0,515
			0,677	0,677	0,511
			0,618	0,396	0,294
			0,392	0,308	0,239
			0,372	0,301	0,228
			0,308	0,255	0,194
					0,533



Odkształcenia stali zbrojeniowej Strain of reinforcement bars					
V	V/V _{exp}	Tz1	Tz2	Tz3	Tz4
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p k	0,06	0,023	0,016	0,023
100	p k	0,12	0,045	0,031	0,049
150	p k	0,18	0,045	0,032	0,038
200	p k	0,24	0,069	0,038	0,098
250	p k	0,30	0,073	0,042	0,075
300	p k	0,36	0,166	0,085	0,173
350	p k	0,42	0,180	0,092	0,144
400	p k	0,58	0,286	0,166	0,152
450	p k	0,55	0,326	0,209	0,252
500	p k	0,61	0,410	0,285	0,300
550	p k	0,67	0,449	0,323	0,392
600	p k	0,73	0,574	0,434	0,433
650	p k	0,79	0,609	0,471	0,594
700	p k	0,85	0,720	0,577	0,636
750	p k	0,91	0,755	0,616	0,765
800	p k	0,97	0,859	0,744	0,804
825	p k	1,00	0,891	0,790	0,944
			1,001	0,919	0,977
			1,040	0,962	1,113
			1,163	1,096	1,150
			1,219	1,162	1,280
			1,395	1,313	1,324
			1,484	1,378	1,470
			1,695	1,552	1,524
			1,812	1,652	1,689
			2,043	1,876	1,779
			2,150	1,995	1,998
			2,365	2,214	2,112
			2,466	2,338	2,341
			2,914	2,453	2,535
			3,187	2,593	3,047
			3,485	2,735	3,216
			3,877	2,864	3,204
					3,172

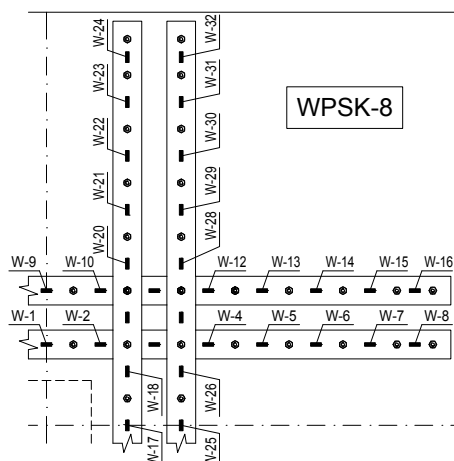
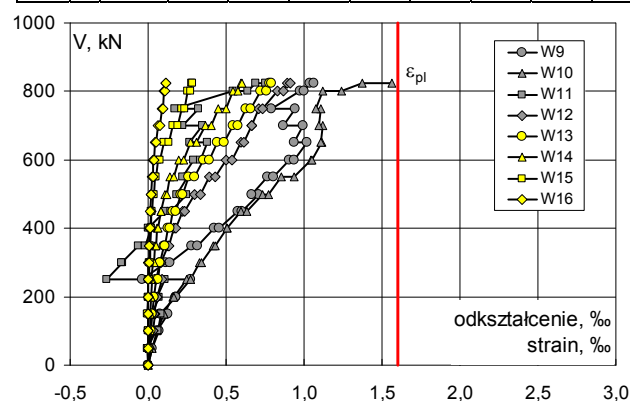
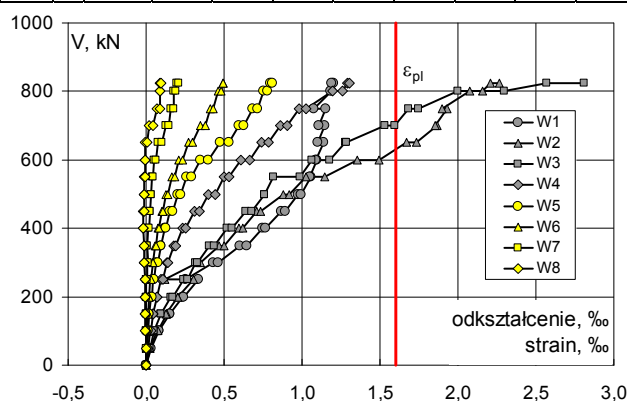


Lokalizacja czujników / Location of gauges



Odsztalcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
kN	-	ε ‰							
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,06	0,030	0,027	0,023	0,012	0,008	0,003	-0,002
100	p	0,12	0,081	0,071	0,052	0,028	0,014	0,008	-0,003
150	p	0,18	0,153	0,131	0,096	0,045	0,022	0,011	-0,006
200	p	0,24	0,232	0,203	0,158	0,067	0,033	0,020	-0,007
250	p	0,30	0,337	0,303	0,240	0,093	0,047	0,027	-0,009
300	p	0,36	0,431	0,330	0,317	0,131	0,066	0,042	-0,011
350	p	0,42	0,601	0,467	0,407	0,177	0,092	0,058	-0,015
400	p	0,58	0,744	0,597	0,521	0,234	0,118	0,076	-0,016
450	p	0,55	0,868	0,706	0,640	0,307	0,153	0,099	-0,020
500	p	0,61	0,973	0,880	0,760	0,401	0,203	0,128	-0,015
550	p	0,67	1,057	1,028	0,815	0,497	0,257	0,163	-0,010
600	p	0,73	1,097	1,353	1,062	0,609	0,345	0,210	-0,009
650	p	0,79	1,087	1,491	1,177	0,665	0,398	0,235	-0,006
700	p	0,85	1,138	1,668	1,281	0,743	0,477	0,271	-0,005
750	p	0,91	1,106	1,857	1,594	0,907	0,628	0,377	-0,045
800	p	0,97	1,189	2,076	2,003	1,196	0,756	0,465	-0,086
825	p	1,00	1,193	2,263	2,807	1,303	0,808	0,491	-0,094

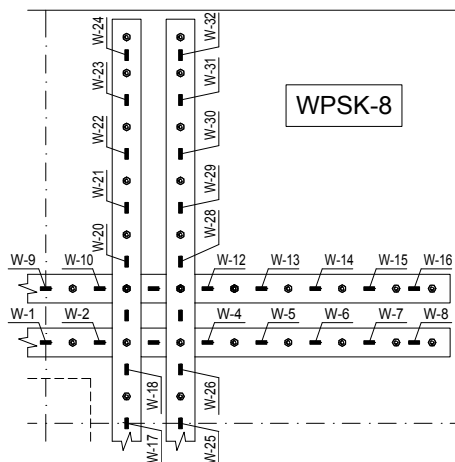
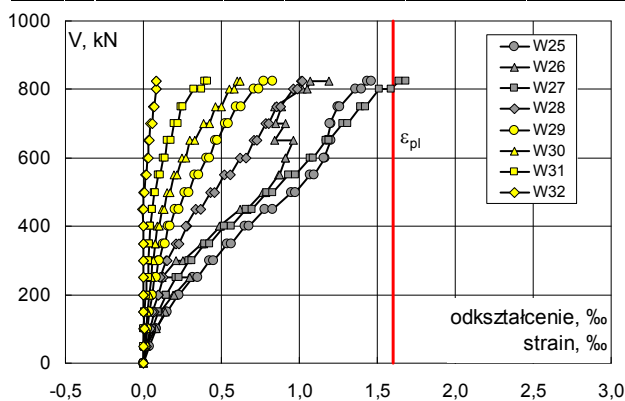
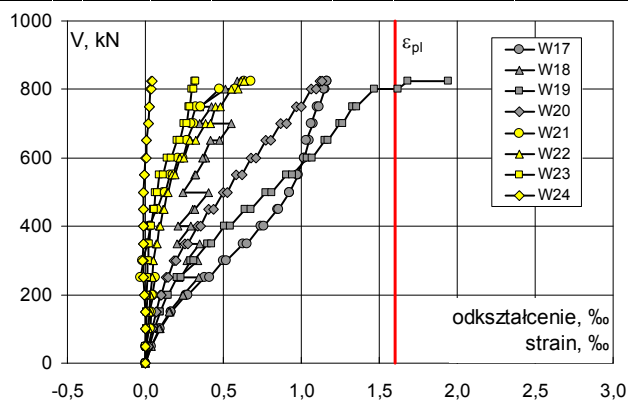
Odsztalcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W9	W10	W11	W12	W13	W14	W15	W16
kN	-	ε ‰							
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,06	0,025	0,024	-0,008	0,007	0,006	0,005	-0,001
100	p	0,12	0,071	0,057	0,048	0,030	0,013	0,012	0,000
150	p	0,18	0,124	0,099	0,080	0,045	0,024	0,015	0,000
200	p	0,24	0,175	0,161	0,071	0,058	0,036	0,020	-0,003
250	p	0,30	0,275	0,247	0,110	0,091	0,053	0,027	-0,003
300	p	0,36	0,421	0,332	-0,167	0,076	0,077	0,029	0,002
350	p	0,42	0,421	0,506	0,021	0,167	0,128	0,058	0,019
400	p	0,58	0,458	0,505	-0,002	0,177	0,137	0,065	0,018
450	p	0,55	0,575	0,594	0,110	0,224	0,160	0,081	0,020
500	p	0,61	0,712	0,735	0,246	0,296	0,206	0,105	0,030
550	p	0,67	0,768	0,856	0,252	0,394	0,261	0,142	0,045
600	p	0,73	0,907	1,047	0,294	0,499	0,356	0,196	0,063
650	p	0,79	0,935	1,116	0,382	0,596	0,444	0,270	0,100
700	p	0,85	0,994	1,122	0,345	0,664	0,542	0,365	0,161
750	p	0,91	0,942	1,109	0,320	0,709	0,628	0,452	0,213
800	p	0,97	0,972	1,121	0,545	0,828	0,720	0,545	0,255
825	p	1,00	1,003	1,243	0,638	0,867	0,757	0,575	0,271



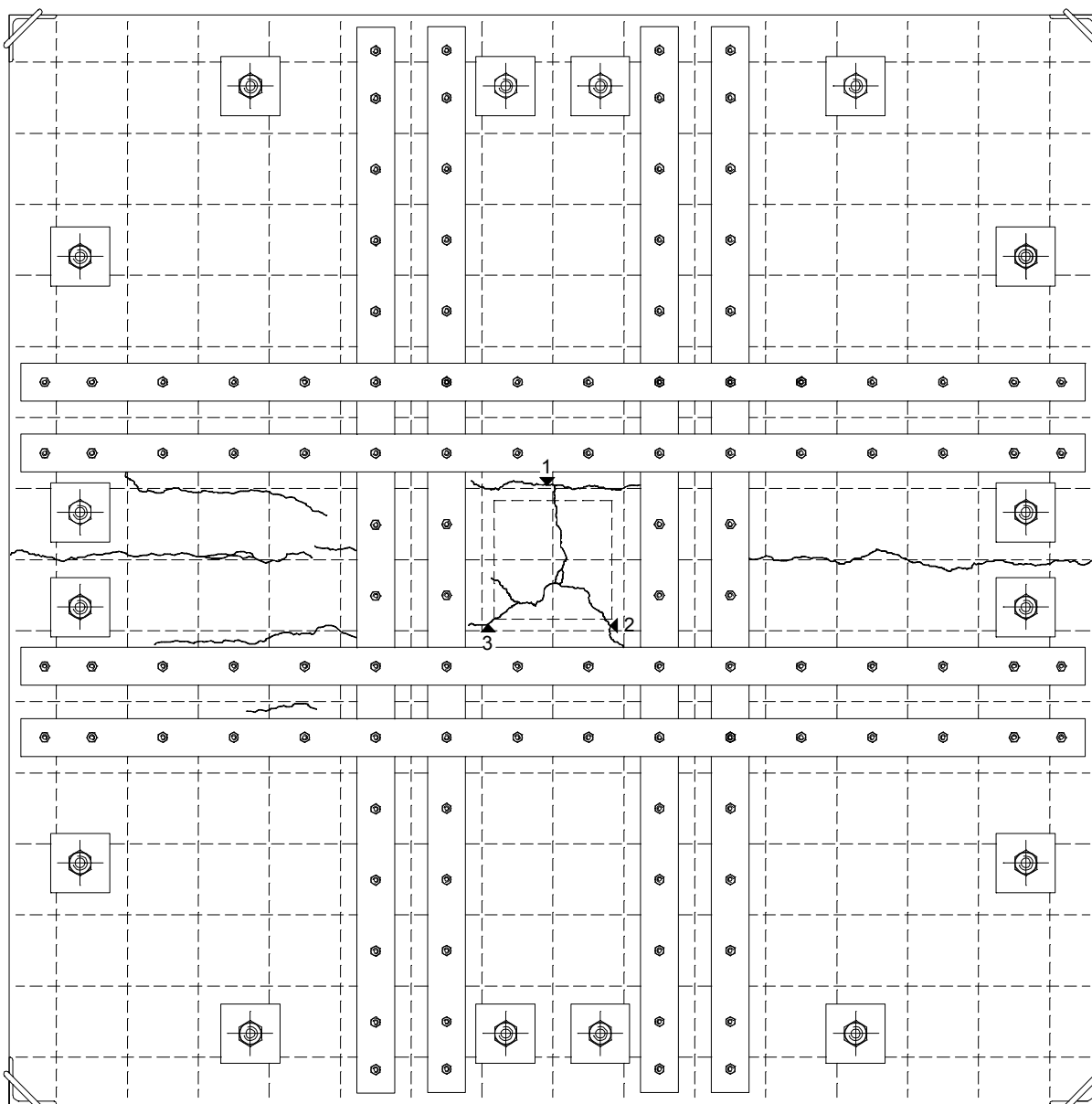
WPSK-8

Odształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W17	W18	W19	W20	W21	W22	W23	W24
ε									
‰									
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,06	0,038	0,036	0,024	0,020	0,001	0,008	-0,001
100	p	0,12	0,091	0,092	0,058	0,045	0,025	0,016	0,004
150	p	0,18	0,165	0,158	0,096	0,068	0,040	0,023	0,007
200	p	0,24	0,260	0,239	0,141	0,098	0,049	0,030	0,010
250	p	0,30	0,377	0,342	0,201	0,136	0,064	0,042	0,011
300	p	0,36	0,499	0,336	0,290	0,183	-0,013	0,051	0,014
350	p	0,42	0,628	0,348	0,396	0,250	0,012	0,068	0,021
400	p	0,58	0,743	0,289	0,508	0,335	0,032	0,088	0,032
450	p	0,55	0,845	0,306	0,641	0,407	0,069	0,112	0,050
500	p	0,61	0,922	0,404	0,775	0,497	0,113	0,139	0,064
550	p	0,67	0,980	0,319	0,903	0,584	0,157	0,172	0,088
600	p	0,73	1,021	0,388	1,040	0,680	0,212	0,219	0,141
650	p	0,79	1,050	0,417	1,152	0,769	0,269	0,286	0,200
700	p	0,85	1,074	0,551	1,248	0,870	0,307	0,385	0,245
750	p	0,91	1,101	0,421	1,330	0,967	0,322	0,452	0,278
800	p	0,97	1,151	0,510	1,468	1,065	0,476	0,552	0,297
825	p	1,00	1,163	0,638	1,942	1,135	0,675	0,631	0,322

Odształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons									
V	V/V _{exp}	W25	W26	W27	W28	W29	W30	W31	W32
ε									
‰									
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,06	0,037	0,020	0,022	0,016	0,011	0,008	0,002
100	p	0,12	0,083	0,076	0,055	0,046	0,026	0,019	0,006
150	p	0,18	0,147	0,137	0,094	0,068	0,039	0,028	0,006
200	p	0,24	0,222	0,192	0,143	0,092	0,055	0,037	0,015
250	p	0,30	0,318	0,297	0,207	0,129	0,072	0,049	0,021
300	p	0,36	0,427	0,209	0,288	0,143	0,098	0,060	0,033
350	p	0,42	0,538	0,376	0,394	0,207	0,126	0,075	0,040
400	p	0,58	0,650	0,494	0,522	0,276	0,161	0,090	0,045
450	p	0,55	0,780	0,619	0,657	0,334	0,205	0,118	0,058
500	p	0,61	0,830	0,662	0,696	0,364	0,227	0,131	0,060
550	p	0,67	0,948	0,766	0,794	0,429	0,266	0,153	0,069
600	p	0,73	1,069	0,870	0,928	0,517	0,331	0,194	0,094
650	p	0,79	1,166	0,913	1,072	0,618	0,402	0,246	0,124
700	p	0,85	1,203	0,959	1,174	0,707	0,462	0,300	0,153
750	p	0,91	1,258	0,840	1,427	0,878	0,626	0,497	0,256
800	p	0,97	1,362	1,017	1,515	0,959	0,707	0,550	0,320
825	p	1,00	1,437	1,072	1,642	1,010	0,773	0,599	0,390



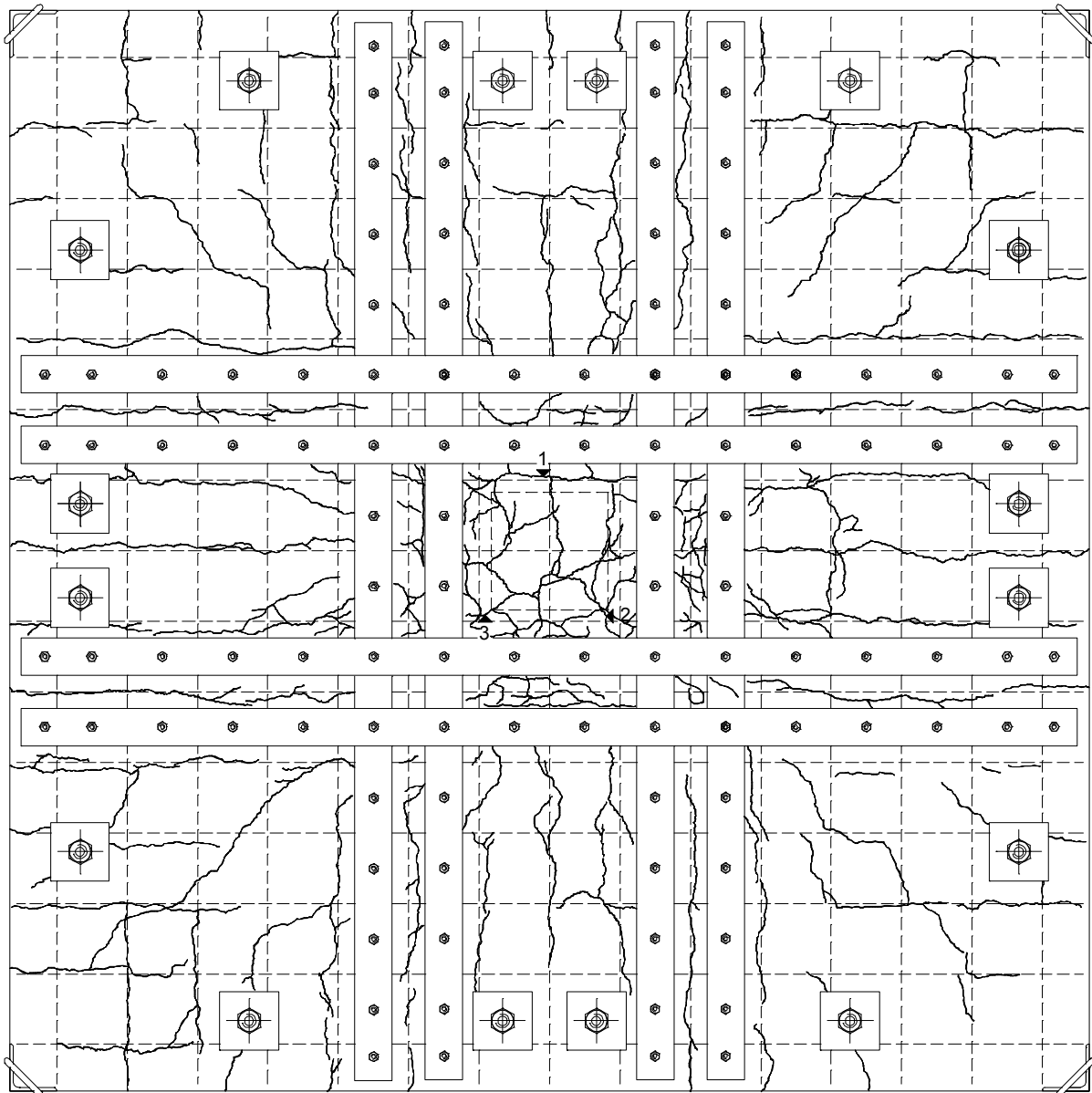
Rysy – faza początkowa / Cracks pattern – initial stage



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
250	0,10	0,05	0,10
250	0,10	0,10	0,10

po 3 godzinach utrzymywania obciążenia / after 3 hours of maintaining the load

Rysy – faza zniszczenia / Cracks pattern after failure

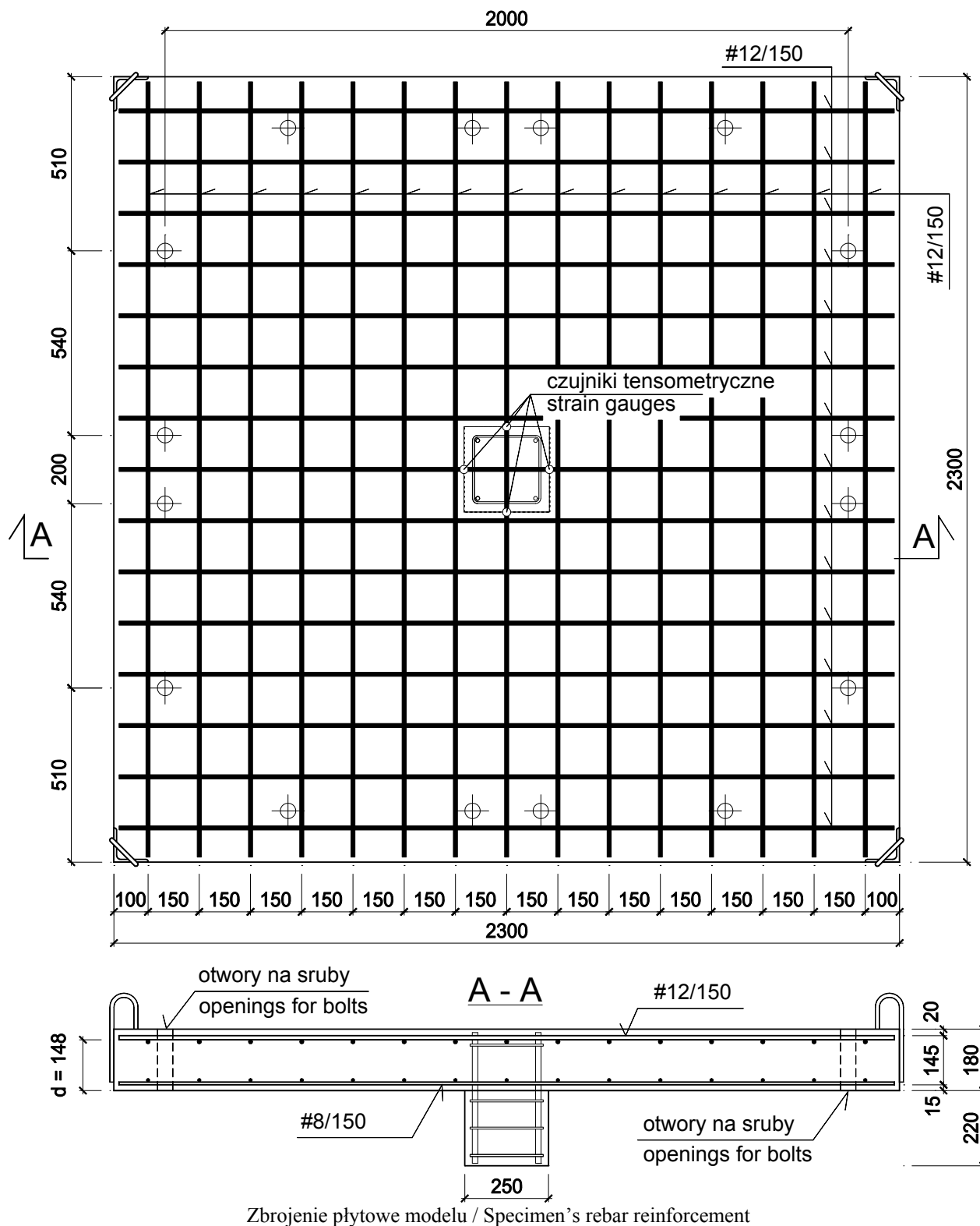


Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
250	0,10	0,05	0,10
250	0,10	0,10	0,10
300	0,10	0,10	0,10
350	0,10	0,10	0,10
400	0,15	0,15	0,10
450	0,20	0,15	0,15
500	0,20	0,15	0,20
550	0,20	0,15	0,20
600	0,20	0,20	0,20
650	0,25	0,25	0,30
700	0,30	0,35	0,40
750	0,40	0,40	0,50

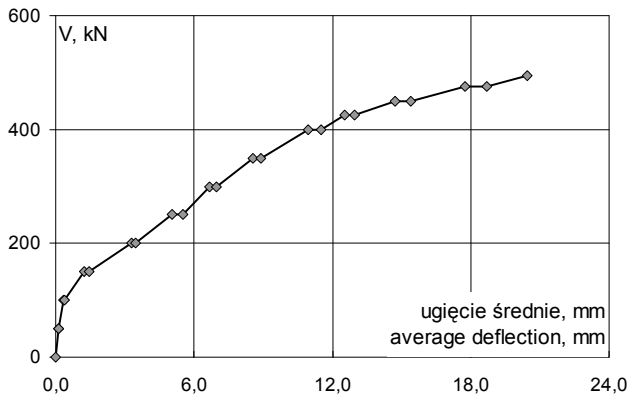
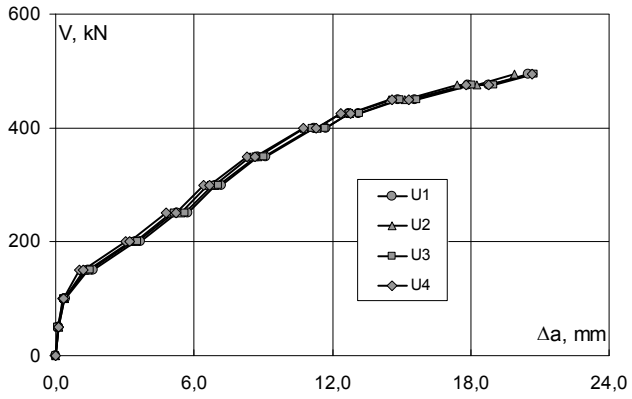
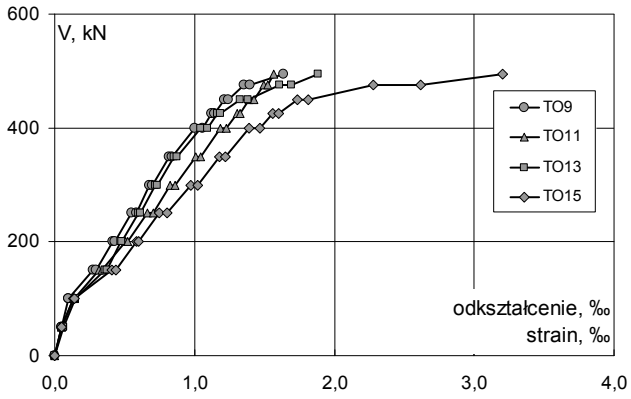
Dane / Data

 $f_{c,cube} = 48,3\text{MPa}$, $f_{cm} = 38,8\text{MPa}$, $f_{sp} = 3,42\text{MPa}$, $E_{cm} = 25680\text{MPa}$
 $f_{y,h} = 580,8\text{MPa}$, $f_{y,l} = 565,5\text{MPa}$, $f_{ym} = 573,2\text{MPa}$, $A_{sm} = 1,113\text{cm}^2$ (#12)

 wysokość nominalna / nominal effective depth of a cross-section $d = 14,8\text{cm}$ (pomierzona / measured $14,50\text{cm}$)

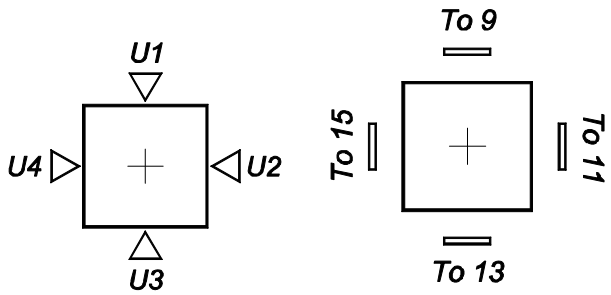
 nośność eksperymentalna / experimental load capacity $V_{exp} = 495\text{kN}$


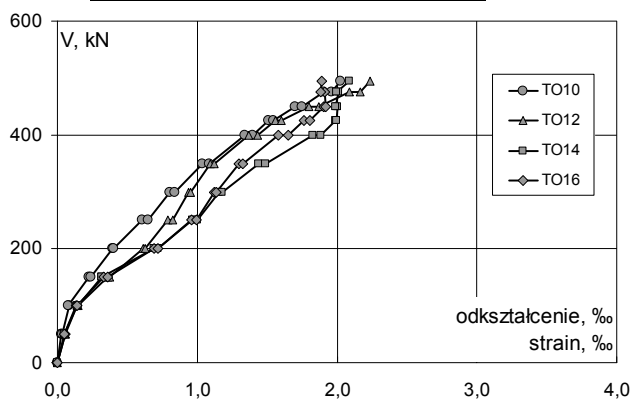
S-2

[illegible][illegible]

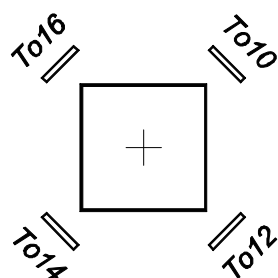
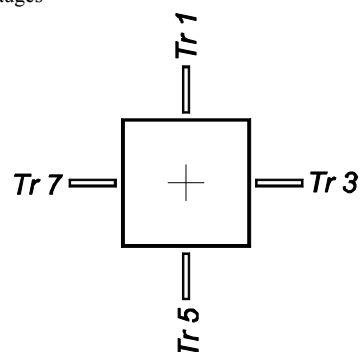
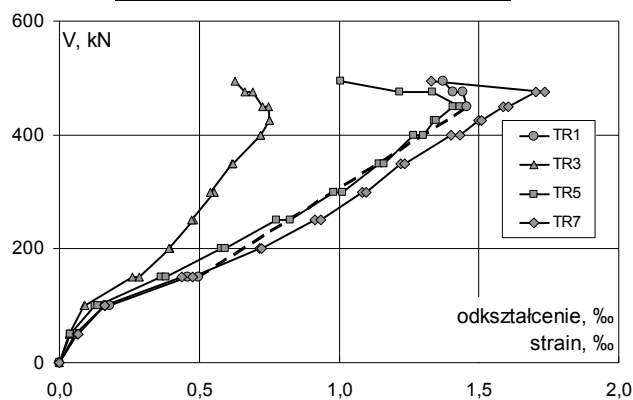
Lokalizacja czujników „U”
Location of „U” gauges

Lokalizacja czujników „T”
Location of “T” gauges



[illegible]

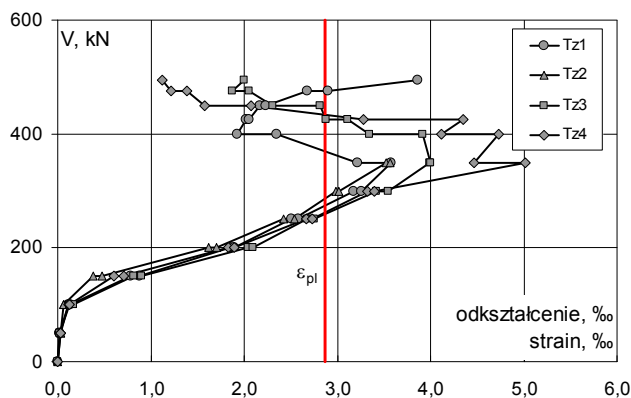
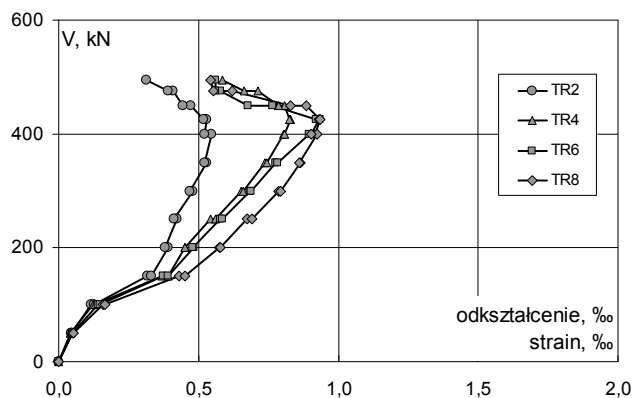
Lokalizacja czujników / Location of gauges

[illegible]

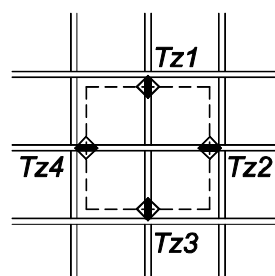
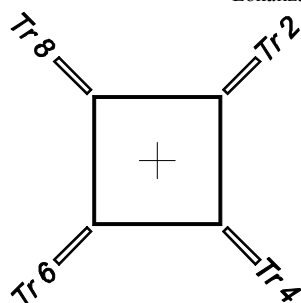
S-2

Odkształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR2	TR4	TR6	TR8
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,10	0,046	0,041	0,048
	k		0,046	0,041	0,049
100	p	0,20	0,116	0,122	0,140
	k		0,126	0,132	0,147
150	p	0,30	0,316	0,369	0,374
	k		0,333	0,390	0,391
200	p	0,40	0,393	0,452	0,483
	k		0,380	0,452	0,480
250	p	0,51	0,422	0,542	0,577
	k		0,413	0,561	0,585
300	p	0,61	0,479	0,653	0,683
	k		0,468	0,658	0,689
350	p	0,71	0,530	0,736	0,775
	k		0,521	0,744	0,782
400	p	0,81	0,547	0,803	0,897
	k		0,523	0,806	0,917
425	p	0,86	0,529	0,829	0,935
	k		0,517	0,827	0,919
450	p	0,91	0,473	0,808	0,766
	k		0,444	0,786	0,679
475	p	0,96	0,409	0,712	0,577
	k		0,393	0,664	0,562
495	p	1,00	0,314	0,585	0,559
	k				0,542

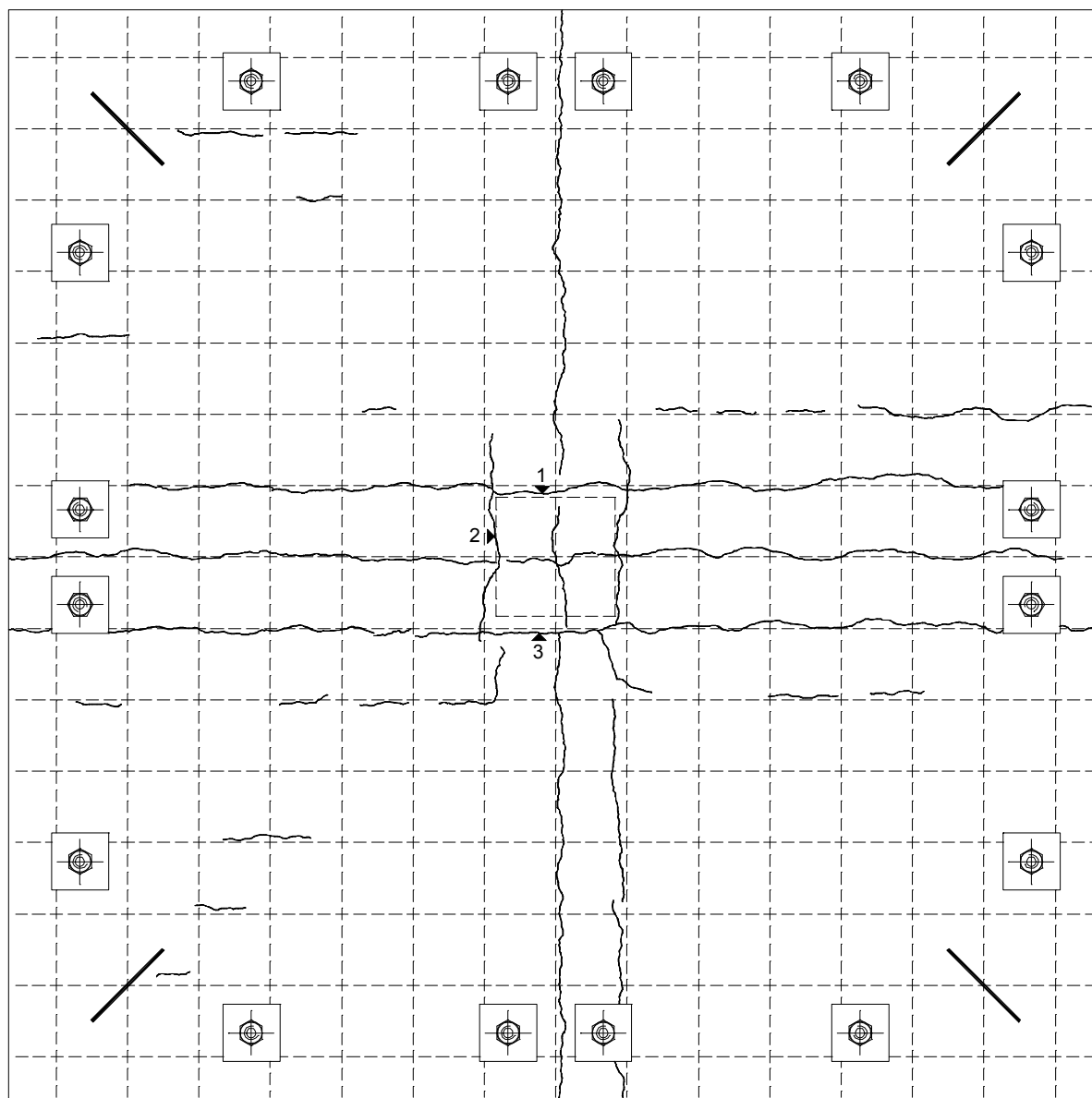
Odkształcenia stali zbrojeniowej Strain of reinforcement bars					
V	V/V _{exp}	Tz1	Tz2	Tz3	Tz4
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,10	0,018	0,035	0,018
	k		0,019	0,037	0,019
100	p	0,20	0,114	0,059	0,129
	k		0,138	0,064	0,167
150	p	0,30	0,785	0,385	0,820
	k		0,874	0,473	0,895
200	p	0,40	1,855	1,620	2,047
	k		1,897	1,705	2,090
250	p	0,51	2,507	2,419	2,677
	k		2,582	2,540	2,753
300	p	0,61	3,171	2,979	3,418
	k		3,262	3,017	3,550
350	p	0,71	3,573	3,523	3,985
	k		3,212	3,564	4,003
400	p	0,81	2,345	3,767	3,915
	k		1,931	3,774	3,346
425	p	0,86	2,023	3,821	3,113
	k		2,053	3,824	2,878
450	p	0,91	2,170	3,869	2,819
	k		2,229	3,881	2,303
475	p	0,96	2,678	4,045	2,054
	k		2,895	4,101	1,873
495	p	1,00	3,858	4,096	1,997
	k				1,125



Lokalizacja czujników / Location of gauges

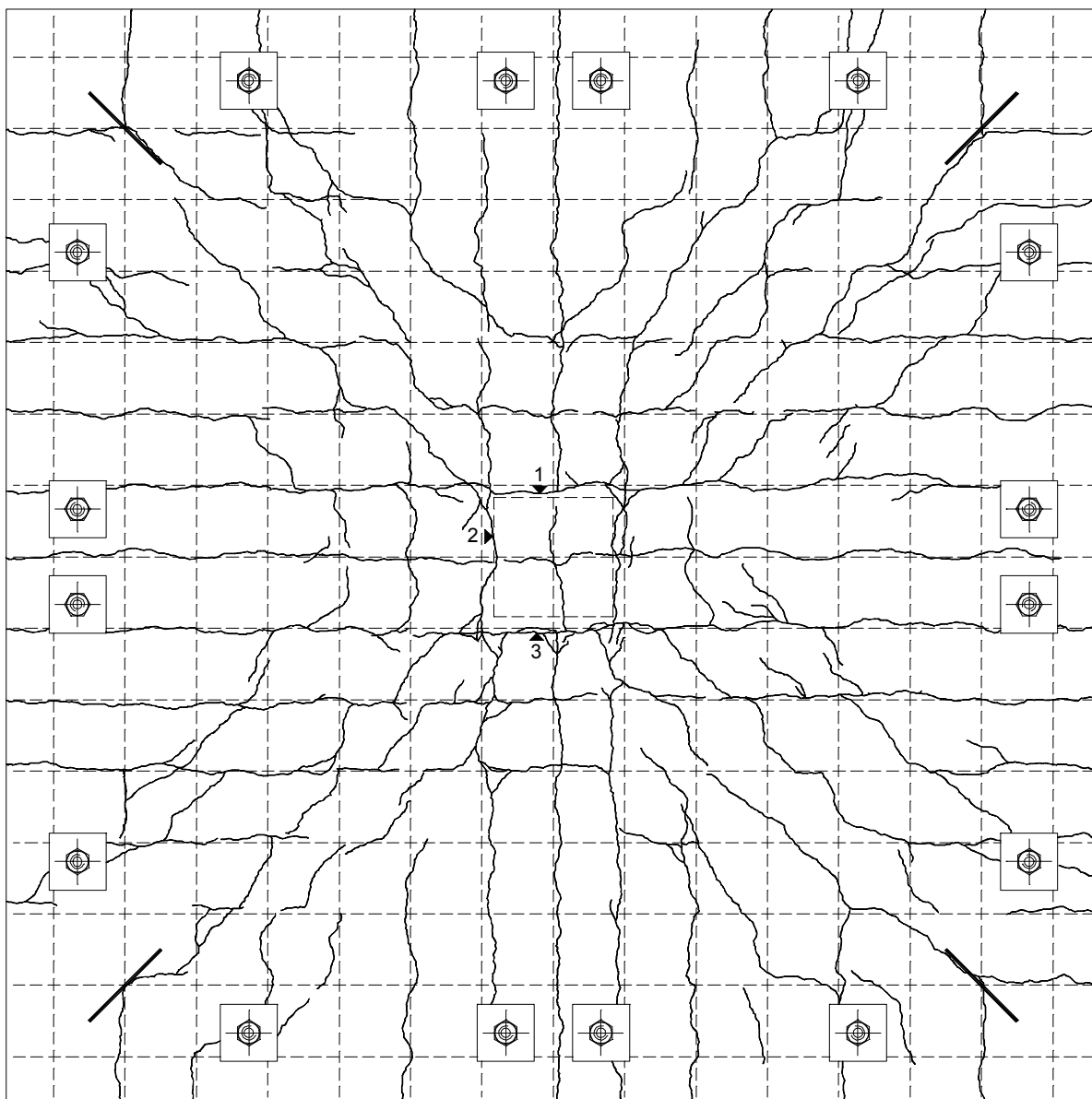


Rysy – faza początkowa / Cracks pattern – initial stage



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
0	rysy skurczowe / shrinkage cracks		
150	0,15	0,15	0,15

Rysy – faza zniszczenia / Cracks pattern after failure



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
0	rysy skurczowe / shrinkage cracks		
150	0,15	0,15	0,15
200	0,35	0,50	0,40
250	0,70	0,80	0,60
250	0,80	0,90	0,70
300	1,00	1,00	0,90
350	1,20	1,40	1,20
400	1,90	2,10	1,80
450	2,80	3,00	2,70

Dane / Data

beton / concrete

(#12)

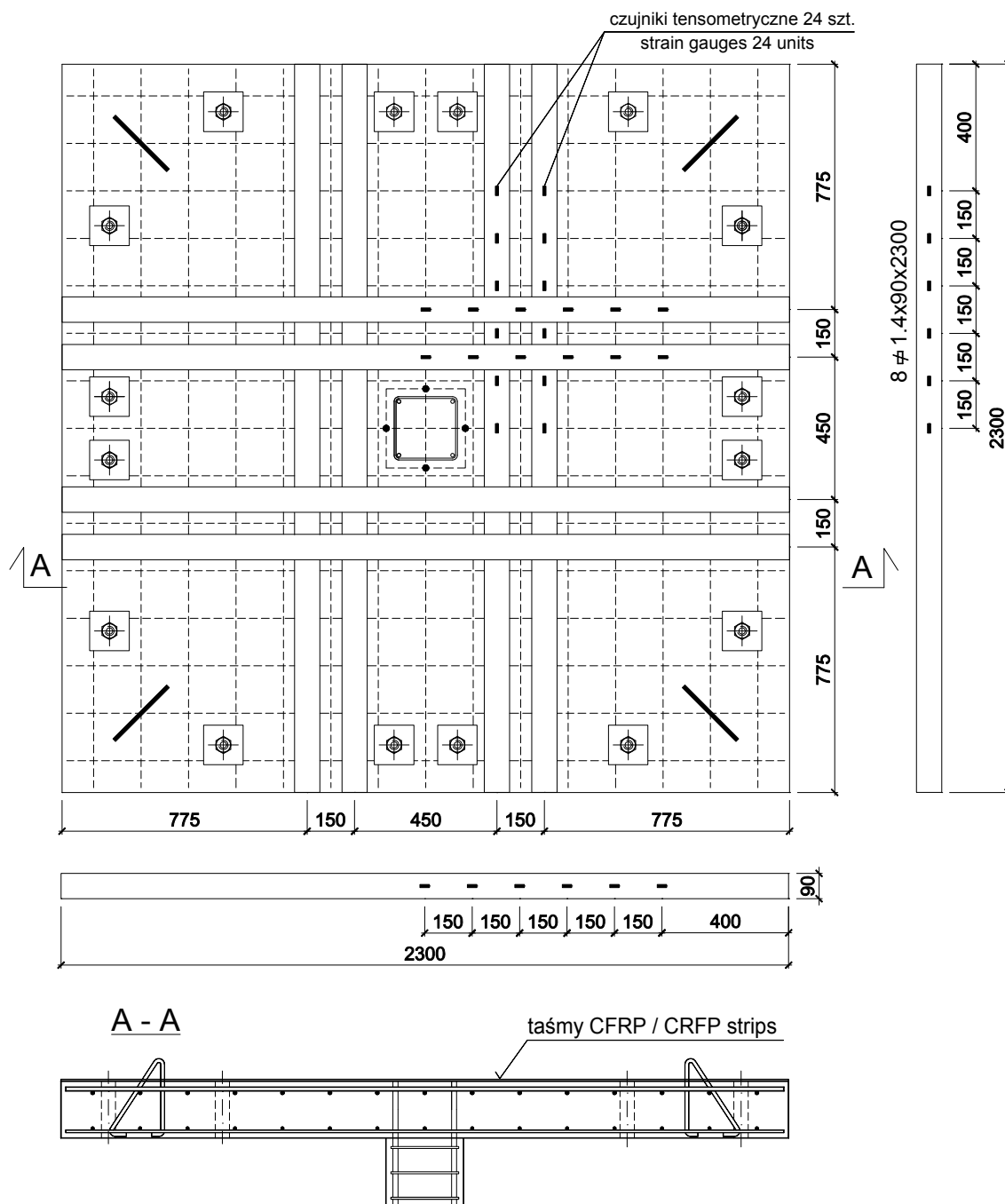
(taśma CFRP / CFRP strip)

 $f_{c,cube} = 48,3\text{MPa}$, $f_{cm} = 38,8\text{MPa}$, $f_{sp} = 3,42\text{MPa}$, $E_{cm} = 25680\text{MPa}$
 $f_{y,h} = 580,8\text{MPa}$, $f_{y,l} = 565,5\text{MPa}$, $f_{ym} = 573,2\text{MPa}$, $A_{sm} = 1,113\text{cm}^2$
 $f_{ym} = 3100\text{MPa}$ (producent / producer), $f_{ym} = 3023\text{MPa}$ (pomierzona / measured)

 $A_{sm} = 1,260\text{cm}^2$ (producent / producer), $E_{CFRP} = 174000\text{MPa}$ (pomierzona / measured)

 wysokość nominalna / nominal effective depth of cross-section $d = 14,8\text{cm}$ (pomierzona / measured 15,00cm)

 nośność świadka / witness load capacity $V_s = 495,0\text{kN}$

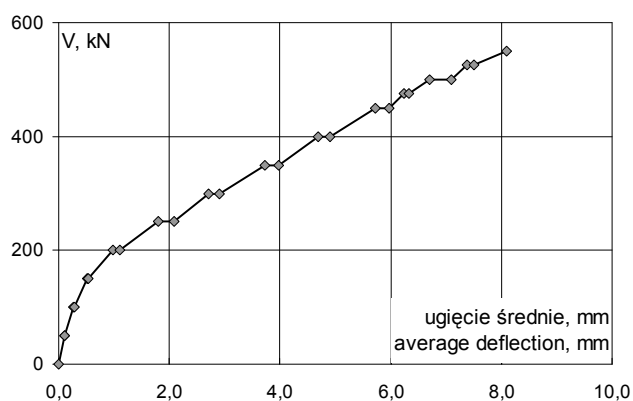
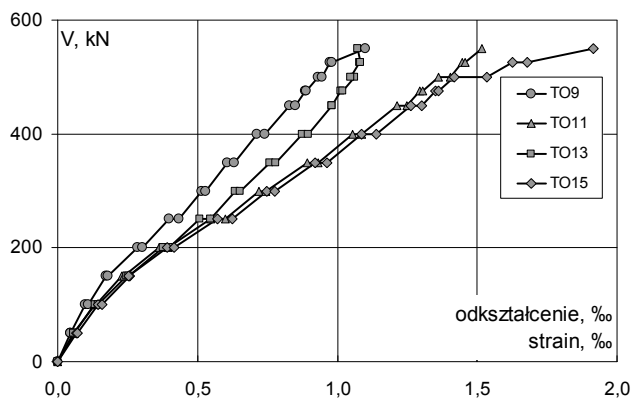
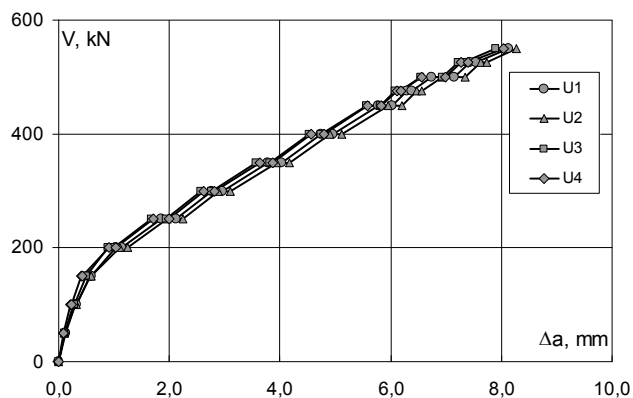
 nośność eksperymentalna / experimental load capacity $V_{exp} = 550\text{kN}$
 $V_{exp} / V_s = 1,11$


Rysunek konstrukcyjny modelu / Technical drawing of the specimen

WT-CF-8

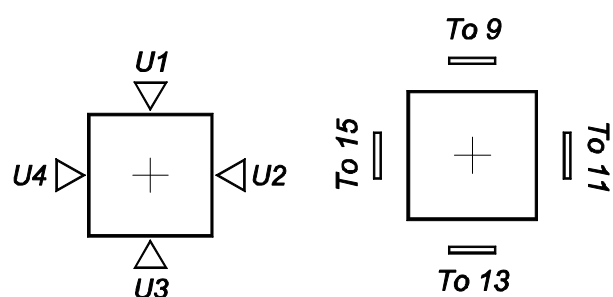
Ugięcia Deflections						
V	V/V _{exp}	U1	U2	U3	U4	średnie average
kN	-	Δa				mm
0	p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	p	0,13	0,11	0,11	0,10	0,11
	k	0,13	0,11	0,11	0,10	0,11
100	p	0,31	0,30	0,27	0,21	0,27
	k	0,33	0,31	0,29	0,23	0,29
150	p	0,57	0,58	0,49	0,42	0,51
	k	0,59	0,59	0,50	0,43	0,53
200	p	1,03	1,11	0,89	0,90	0,98
	k	1,15	1,24	0,99	1,03	1,10
250	p	1,85	1,96	1,67	1,72	1,80
	k	2,13	2,25	1,95	1,99	2,08
300	p	2,76	2,90	2,57	2,62	2,71
	k	2,96	3,10	2,77	2,82	2,91
350	p	3,78	3,93	3,57	3,63	3,73
	k	4,02	4,18	3,81	3,87	3,97
400	p	4,75	4,90	4,52	4,57	4,68
	k	4,96	5,12	4,75	4,79	4,91
450	p	5,77	5,95	5,56	5,59	5,71
	k	6,02	6,20	5,81	5,84	5,97
475	p	6,30	6,48	6,08	6,11	6,24
	k	6,37	6,56	6,16	6,19	6,32
500	p	6,74	6,94	6,54	6,56	6,70
	k	7,15	7,34	6,93	6,99	7,10
525	p	7,44	7,63	7,21	7,27	7,39
	k	7,55	7,73	7,32	7,39	7,50
550	p	8,13	8,27	7,90	8,04	8,09
	k					

Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete						
V	V/V _{exp}	TO9	TO11	TO13	TO15	
kN	-	ε				‰
0	p	0,000	0,000	0,000	0,000	
50	p	0,047	0,059	0,057	0,068	
	k	0,046	0,059	0,058	0,070	
100	p	0,100	0,131	0,135	0,144	
	k	0,108	0,139	0,144	0,159	
150	p	0,174	0,229	0,246	0,258	
	k	0,180	0,238	0,255	0,255	
200	p	0,287	0,363	0,379	0,393	
	k	0,305	0,394	0,398	0,417	
250	p	0,400	0,547	0,508	0,571	
	k	0,434	0,599	0,545	0,626	
300	p	0,514	0,718	0,635	0,749	
	k	0,529	0,745	0,653	0,775	
350	p	0,607	0,892	0,757	0,919	
	k	0,633	0,930	0,781	0,962	
400	p	0,714	1,053	0,875	1,085	
	k	0,742	1,088	0,895	1,140	
450	p	0,829	1,213	0,981	1,263	
	k	0,849	1,247	0,979	1,301	
475	p	0,884	1,293	1,014	1,350	
	k	0,890	1,305	1,020	1,360	
500	p	0,930	1,361	1,060	1,418	
	k	0,946	1,405	1,047	1,535	
525	p	0,972	1,446	1,078	1,627	
	k	0,980	1,458	1,084	1,680	
550	p	1,099	1,515	1,074	1,916	
	k					



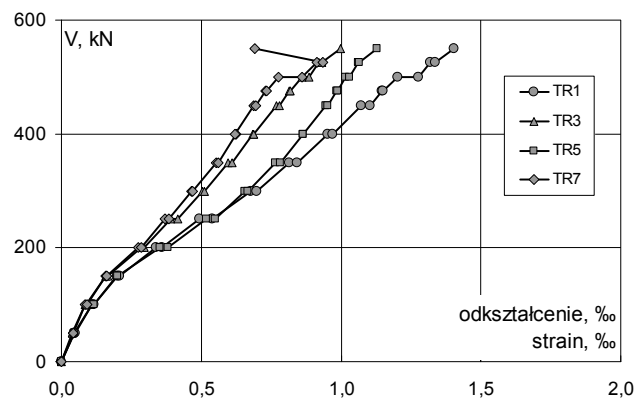
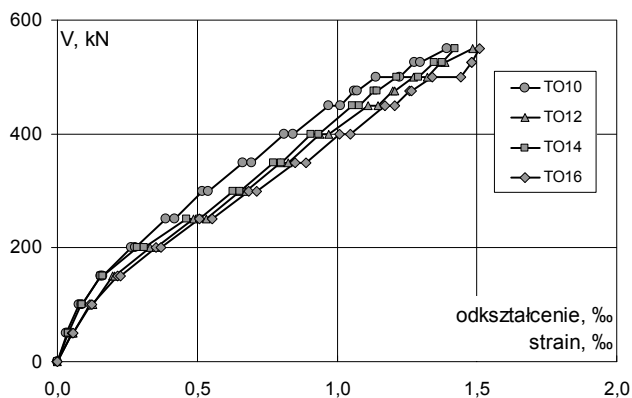
Lokalizacja czujników „U”
Location of „U” gauges

Lokalizacja czujników „T”
Location of „T” gauges

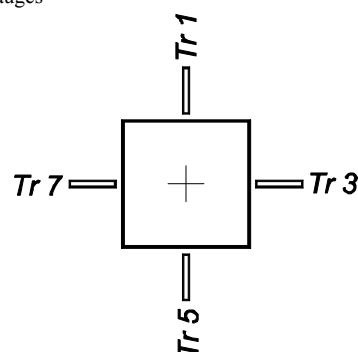
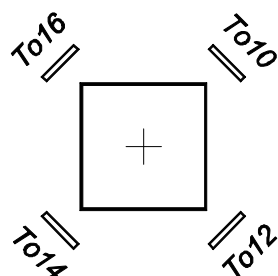


Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TO10	TO12	TO14	TO16
ε					
‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,034	0,054	0,038
	k		0,033	0,055	0,040
100	p	0,18	0,079	0,120	0,084
	k		0,088	0,128	0,089
150	p	0,27	0,155	0,198	0,154
	k		0,162	0,205	0,162
200	p	0,36	0,263	0,330	0,284
	k		0,278	0,351	0,312
250	p	0,45	0,387	0,486	0,462
	k		0,419	0,531	0,508
300	p	0,55	0,518	0,653	0,628
	k		0,541	0,674	0,651
350	p	0,64	0,663	0,797	0,774
	k		0,696	0,825	0,802
400	p	0,73	0,810	0,938	0,907
	k		0,844	0,971	0,935
450	p	0,82	0,971	1,112	1,053
	k		1,011	1,145	1,081
475	p	0,86	1,060	1,198	1,131
	k		1,074	1,208	1,144
500	p	0,91	1,140	1,274	1,214
	k		1,224	1,323	1,291
525	p	0,95	1,276	1,373	1,348
	k		1,298	1,386	1,374
550	p	1,00	1,395	1,486	1,422
	k				1,511

Odształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR1	TR3	TR5	TR7
ε					
‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,047	0,039	0,045
	k		0,050	0,040	0,047
100	p	0,18	0,110	0,083	0,108
	k		0,117	0,089	0,115
150	p	0,27	0,201	0,159	0,196
	k		0,209	0,166	0,202
200	p	0,36	0,338	0,284	0,352
	k		0,359	0,296	0,380
250	p	0,45	0,495	0,392	0,517
	k		0,538	0,415	0,551
300	p	0,55	0,676	0,503	0,657
	k		0,698	0,512	0,668
350	p	0,64	0,815	0,596	0,766
	k		0,844	0,609	0,782
400	p	0,73	0,951	0,686	0,865
	k		0,969	0,687	0,863
450	p	0,82	1,073	0,770	0,944
	k		1,103	0,781	0,951
475	p	0,86	1,145	0,815	0,984
	k		1,151	0,818	0,986
500	p	0,91	1,202	0,859	1,017
	k		1,278	0,887	1,030
525	p	0,95	1,319	0,922	1,060
	k		1,337	0,932	1,067
550	p	1,00	1,404	0,998	1,128
	k				0,691



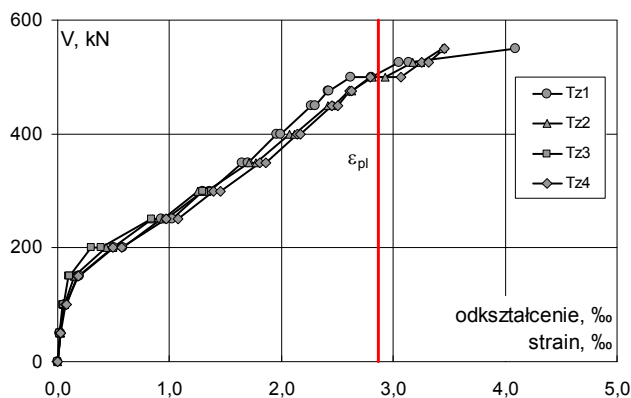
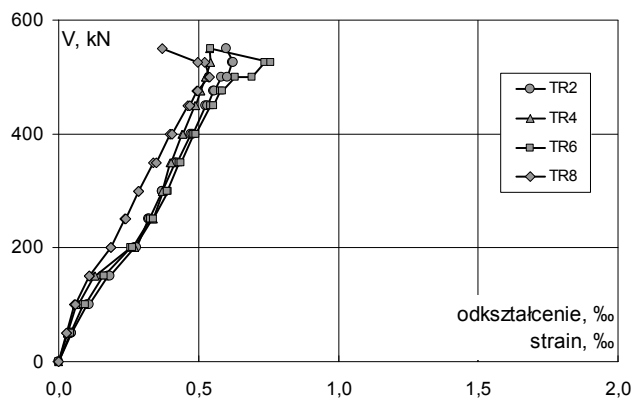
Lokalizacja czujników / Location of gauges



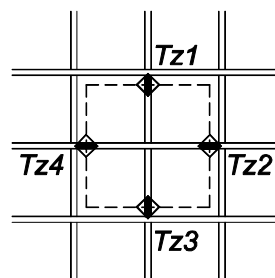
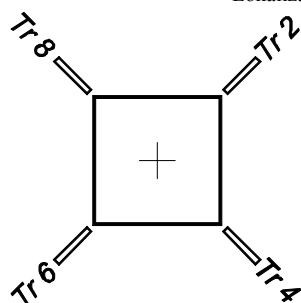
WT-CF-8

Odkształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR2	TR4	TR6	TR8
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,045	0,030	0,041
	k		0,047	0,033	0,043
100	p	0,18	0,101	0,065	0,088
	k		0,109	0,070	0,094
150	p	0,27	0,177	0,126	0,158
	k		0,183	0,131	0,162
200	p	0,36	0,272	0,257	0,258
	k		0,280	0,273	0,266
250	p	0,45	0,321	0,334	0,327
	k		0,326	0,338	0,338
300	p	0,55	0,371	0,375	0,391
	k		0,371	0,372	0,388
350	p	0,64	0,415	0,400	0,431
	k		0,424	0,403	0,439
400	p	0,73	0,473	0,441	0,484
	k		0,478	0,443	0,490
450	p	0,82	0,524	0,487	0,542
	k		0,534	0,491	0,553
475	p	0,86	0,555	0,507	0,579
	k		0,557	0,508	0,587
500	p	0,91	0,582	0,525	0,631
	k		0,602	0,527	0,690
525	p	0,95	0,621	0,542	0,736
	k		0,623	0,542	0,759
550	p	1,00	0,600	0,540	0,543
	k				0,372

Odkształcenia stali zbrojeniowej Strain of reinforcement bars					
V	V/V _{exp}	Tz1	Tz2	Tz3	Tz4
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,023	0,023	0,019
	k		0,022	0,022	0,019
100	p	0,18	0,060	0,055	0,046
	k		0,068	0,061	0,051
150	p	0,27	0,182	0,146	0,099
	k		0,193	0,151	0,104
200	p	0,36	0,506	0,432	0,300
	k		0,580	0,495	0,386
250	p	0,45	0,927	0,844	0,836
	k		1,026	0,947	0,967
300	p	0,55	1,297	1,250	1,292
	k		1,357	1,331	1,372
350	p	0,64	1,649	1,707	1,742
	k		1,698	1,770	1,802
400	p	0,73	1,962	2,073	2,081
	k		1,993	2,113	2,105
450	p	0,82	2,264	2,417	2,390
	k		2,304	2,469	2,442
475	p	0,86	2,413	2,603	2,555
	k		2,425	2,624	2,573
500	p	0,91	2,616	2,814	2,708
	k		2,801	2,924	2,763
525	p	0,95	3,053	3,172	2,860
	k		3,135	3,246	2,882
550	p	1,00	4,094	3,439	3,091
	k				3,461



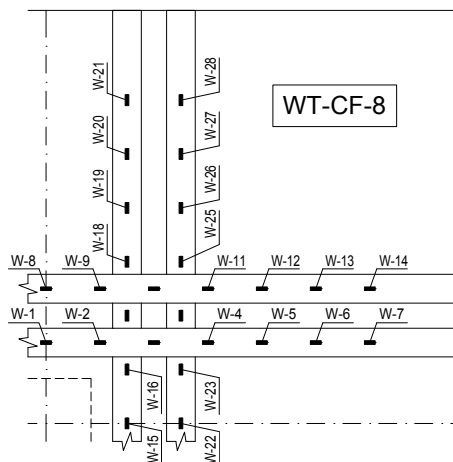
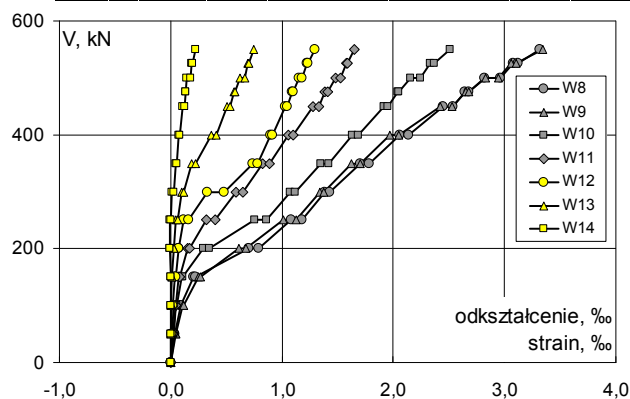
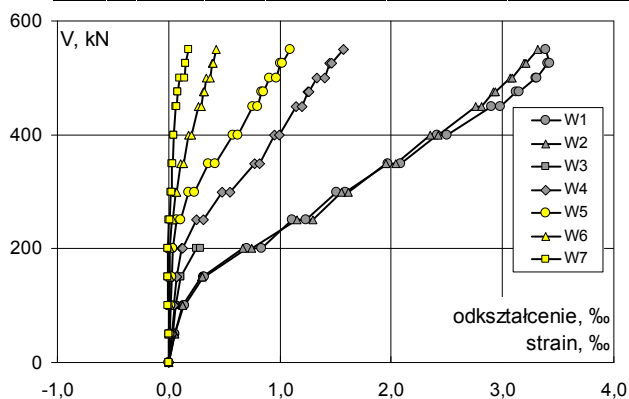
Lokalizacja czujników / Location of gauges



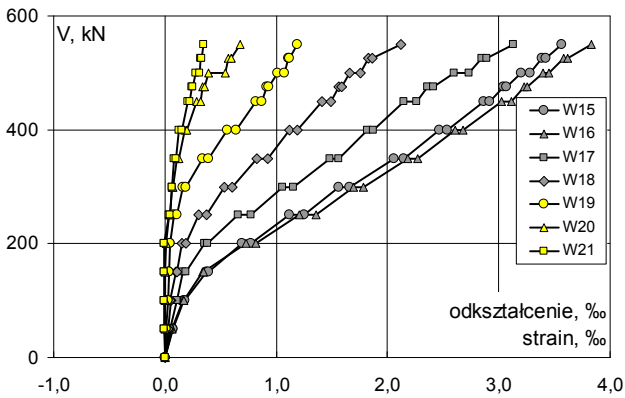
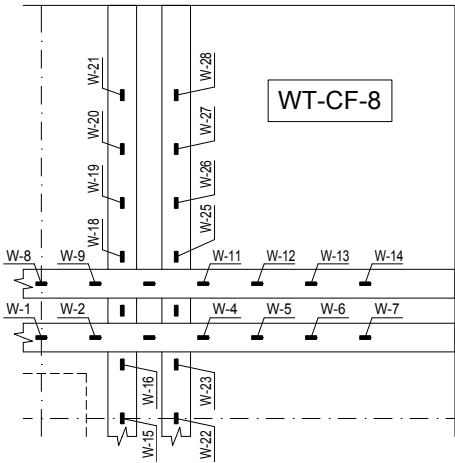
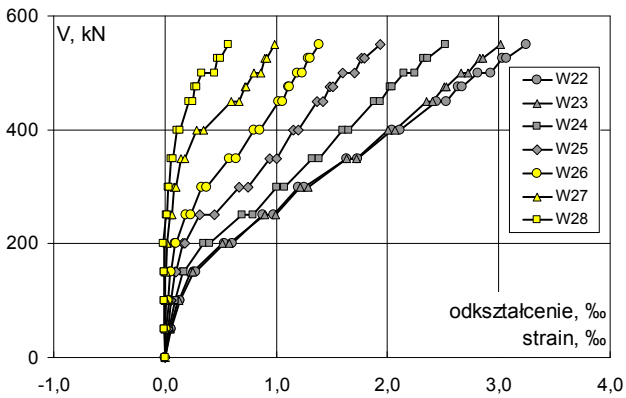
WT-CF-8

Odształcenia taśm CFRP Strain of CFRP strips								
V	V/V _{exp}	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
kN	-	ε ‰						
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,054	0,053	0,032	0,026	0,010	0,004
	k		0,055	0,054	0,033	0,028	0,009	0,004
100	p	0,18	0,136	0,123	0,067	0,052	0,019	0,008
	k		0,141	0,127	0,065	0,050	0,016	0,007
150	p	0,27	0,314	0,290	0,110	0,075	0,025	0,010
	k		0,325	0,304	0,112	0,077	0,026	0,012
200	p	0,36	0,703	0,669	0,252	0,116	0,034	0,013
	k		0,835	0,743	0,286	0,125	0,034	0,009
250	p	0,45	1,108	1,155	awaria czujnika / damaged gauge	0,247	0,073	0,025
	k		1,232	1,292		0,316	0,104	0,037
300	p	0,55	1,512	1,553		0,477	0,178	0,061
	k		1,586	1,616		0,553	0,232	0,076
350	p	0,64	1,969	1,955		0,769	0,357	0,111
	k		2,083	2,038		0,820	0,418	0,133
400	p	0,73	2,415	2,355		0,952	0,574	0,179
	k		2,503	2,421		0,993	0,621	0,208
450	p	0,82	2,898	2,755		1,147	0,757	0,267
	k		2,984	2,809		1,198	0,799	0,296
475	p	0,86	3,119	2,922		1,249	0,838	0,308
	k		3,149	2,936		1,264	0,855	0,319
500	p	0,91	3,303	3,071		1,335	0,910	0,339
	k		3,308	3,090		1,403	0,969	0,378
525	p	0,95	3,406	3,194		1,448	1,006	0,391
	k		3,422	3,214		1,466	1,022	0,401
550	p	1,00	3,392	3,320		1,575	1,091	0,431
	k							0,178

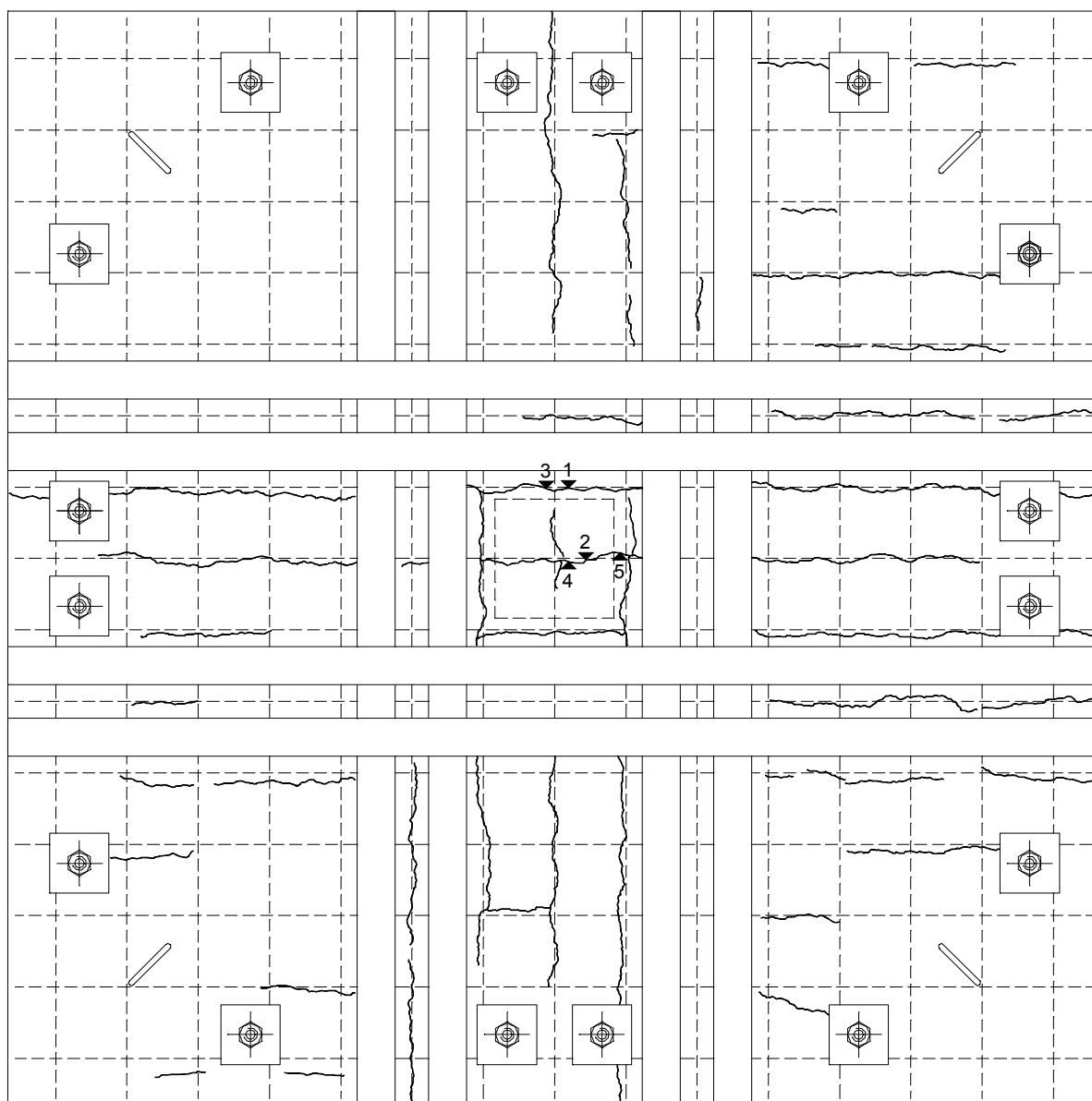
Odształcenia taśm CFRP Strain of CFRP strips								
V	V/V _{exp}	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14
kN	-	ε ‰						
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,041	0,045	0,024	0,021	0,012	0,006
	k		0,040	0,045	0,025	0,021	0,012	0,004
100	p	0,18	0,090	0,111	0,050	0,046	0,025	0,010
	k		0,092	0,114	0,051	0,043	0,023	0,006
150	p	0,27	0,203	0,247	0,102	0,076	0,040	0,014
	k		0,222	0,266	0,108	0,081	0,043	0,015
200	p	0,36	0,705	0,614	0,294	0,151	0,069	0,024
	k		0,789	0,672	0,346	0,172	0,073	0,025
250	p	0,45	1,086	1,012	0,753	0,321	0,120	0,046
	k		1,183	1,127	0,865	0,402	0,164	0,061
300	p	0,55	1,388	1,336	1,076	0,590	0,330	0,095
	k		1,428	1,375	1,123	0,649	0,478	0,119
350	p	0,64	1,706	1,626	1,351	0,822	0,741	0,187
	k		1,785	1,706	1,418	0,885	0,782	0,222
400	p	0,73	2,062	1,967	1,636	1,054	0,894	0,363
	k		2,136	2,054	1,690	1,104	0,915	0,409
450	p	0,82	2,451	2,420	1,918	1,281	1,028	0,505
	k		2,534	2,531	1,956	1,331	1,050	0,538
475	p	0,86	2,647	2,649	2,038	1,389	1,093	0,566
	k		2,676	2,676	2,054	1,407	1,100	0,578
500	p	0,91	2,825	2,826	2,157	1,481	1,152	0,619
	k		2,962	2,947	2,248	1,528	1,182	0,664
525	p	0,95	3,075	3,064	2,331	1,577	1,223	0,690
	k		3,118	3,109	2,365	1,593	1,237	0,702
550	p	1,00	3,318	3,344	2,509	1,653	1,294	0,749
	k							0,222



WT-CF-8

[illegible][illegible]

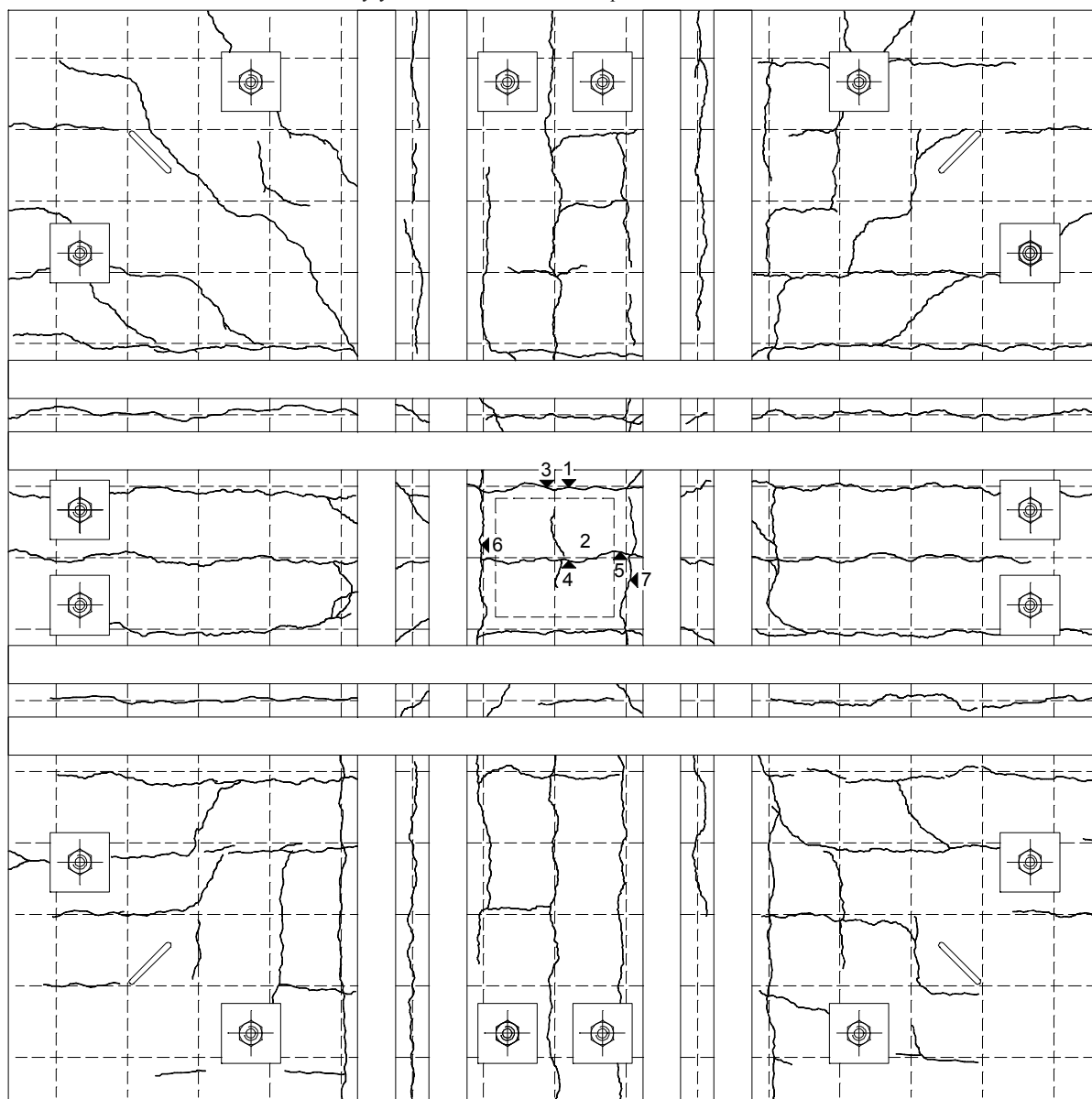
Rysy – faza początkowa / Cracks pattern – initial stage



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]				
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3	rysa 4 / crack No. 4	rysa 5 / crack No. 5
0	0,40	0,30	-	-	-
150	0,40	0,30	0,10	0,10	0,10
200	0,40	0,40	0,15	0,15	0,15
250	0,50	0,50	0,20	0,20	0,20

WT-CF-8

Rysy – faza zniszczenia / Cracks pattern after failure



Siła / Load	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]						
[kN]	rysa 1 crack No. 1	rysa 2 crack No. 2	rysa 3 crack No. 3	rysa 4 crack No. 4	rysa 5 crack No. 5	rysa 6 crack No. 6	rysa 7 crack No. 7
0	0,40	0,30	-	-	-	-	-
150	0,40	0,30	0,10	0,10	0,05	-	-
200	0,40	0,40	0,15	0,10	0,10	-	-
250	0,50	0,50	0,20	0,15	0,10	-	-
250	0,60	-	0,30	-	-	0,10	0,10
300	0,60	-	0,30	-	-	0,25	0,15
350	0,60	-	0,40	-	-	0,35	0,25
400	0,75	-	0,70	-	-	0,70	0,40
450	0,90	-	0,80	-	-	0,95	0,80
500	1,00	-	1,00	-	-	1,20	1,00

Dane / Data

beton / concrete

(#12)

(taśma CFRP / CFRP strip)

$$f_{c,cube} = 48,3\text{MPa}, f_{cm} = 38,8\text{MPa}, f_{sp} = 3,42\text{MPa}, E_{cm} = 25680\text{MPa}$$

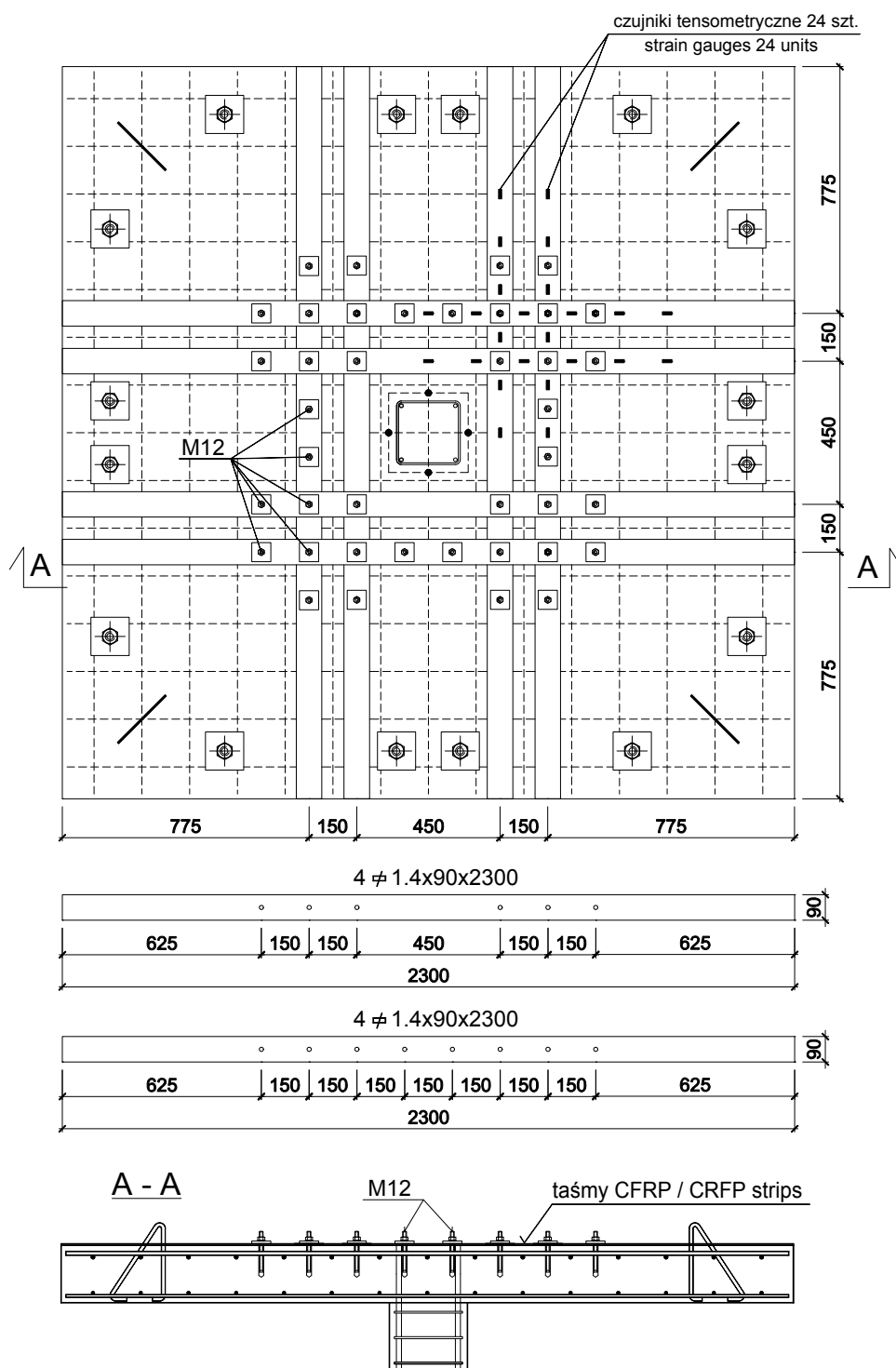
$$f_{y,h} = 580,8\text{MPa}, f_{y,l} = 565,5\text{MPa}, f_{ym} = 573,2\text{MPa}, A_{sm} = 1,113\text{cm}^2$$

$$f_{ym} = 3100\text{MPa} \text{ (producent / producer), } f_{ym} = 3023\text{MPa} \text{ (pomierzona / measured)}$$

$$A_{sm} = 1,260\text{cm}^2 \text{ (producent / producer), } E_{CFRP} = 174000\text{MPa} \text{ (pomierzona / measured)}$$

wysokość nominalna / nominal effective depth of cross-section $d = 14,8\text{cm}$ (pomierzona / measured 14,80cm)nośność świadka / witness load capacity $V_s = 495,0\text{kN}$ nośność eksperymentalna / experimental load capacity $V_{exp} = 625\text{kN}$

$$V_{exp} / V_s = 1,26$$

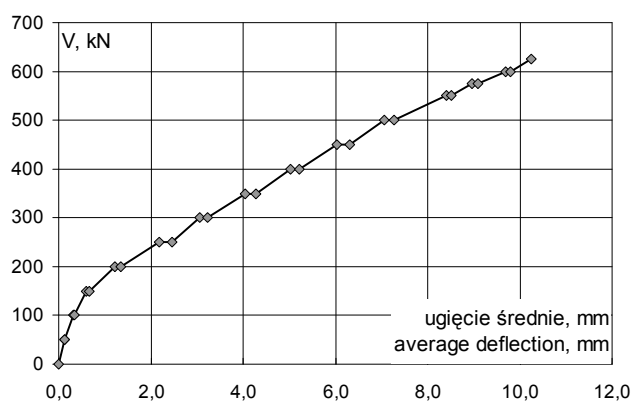
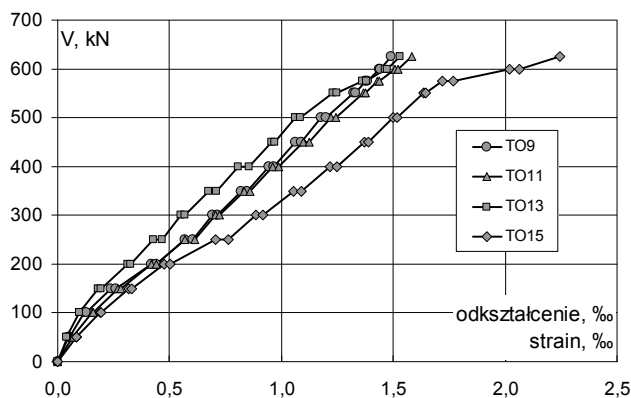
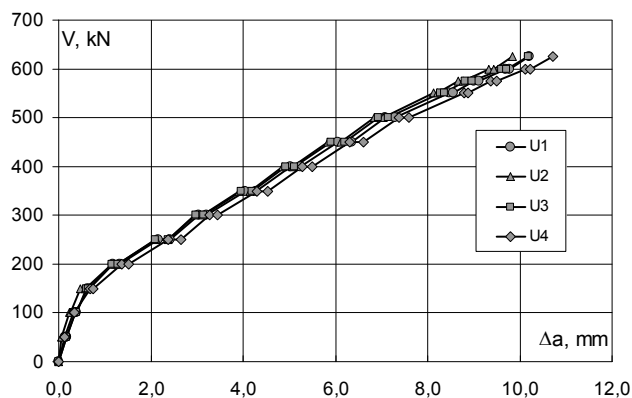


Rysunek konstrukcyjny modelu / Technical drawing of the specimen

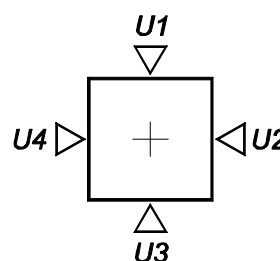
WT-CF-K-8

Ugięcia Deflections						
V	V/V _{exp}	U1	U2	U3	U4	średnie average
kN	-	Δa				mm
0	p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	p	0,09	0,17	0,06	0,17	0,13
	k		0,17	0,06	0,18	0,14
100	p	0,16	0,36	0,24	0,36	0,32
	k		0,38	0,25	0,38	0,34
150	p	0,24	0,62	0,48	0,60	0,60
	k		0,66	0,57	0,64	0,65
200	p	0,32	1,18	1,15	1,15	1,37
	k		1,32	1,29	1,29	1,52
250	p	0,40	2,15	2,11	2,10	2,38
	k		2,43	2,37	2,38	2,66
300	p	0,48	3,03	2,94	2,97	3,27
	k		3,22	3,12	3,15	3,45
350	p	0,56	4,05	3,91	3,96	4,29
	k		4,28	4,15	4,18	4,53
400	p	0,64	5,03	4,85	4,92	5,28
	k		5,24	5,06	5,12	5,49
450	p	0,72	6,05	5,85	5,91	6,32
	k		6,35	6,12	6,20	6,62
500	p	0,80	7,09	6,84	6,94	7,38
	k		7,30	7,03	7,14	7,60
550	p	0,88	8,47	8,13	8,28	8,79
	k		8,55	8,22	8,36	8,88
575	p	0,92	9,01	8,66	8,82	9,36
	k		9,12	8,78	8,97	9,49
600	p	0,96	9,68	9,33	9,60	10,11
	k		9,78	9,43	9,71	10,23
625	p	1,00	10,21	9,83	10,19	10,72
	k					10,24

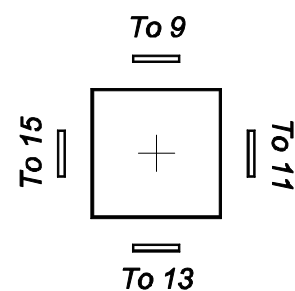
Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete						
V	V/V _{exp}	TO9	TO11	TO13	TO15	
kN	-	ε				‰
0	p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	p	0,09	0,050	0,067	0,043	0,085
	k		0,052	0,067	0,040	0,085
100	p	0,16	0,121	0,155	0,095	0,189
	k		0,128	0,160	0,098	0,196
150	p	0,24	0,237	0,270	0,182	0,318
	k		0,261	0,282	0,195	0,331
200	p	0,32	0,419	0,418	0,315	0,478
	k		0,440	0,439	0,327	0,504
250	p	0,40	0,570	0,570	0,428	0,704
	k		0,604	0,612	0,468	0,764
300	p	0,48	0,694	0,704	0,549	0,888
	k		0,715	0,722	0,567	0,916
350	p	0,56	0,820	0,833	0,676	1,052
	k		0,845	0,859	0,710	1,091
400	p	0,64	0,944	0,960	0,809	1,217
	k		0,967	0,989	0,854	1,248
450	p	0,72	1,064	1,098	0,958	1,371
	k		1,089	1,126	0,972	1,388
500	p	0,80	1,179	1,223	1,061	1,498
	k		1,198	1,245	1,085	1,515
550	p	0,88	1,321	1,367	1,229	1,638
	k		1,330	1,377	1,249	1,644
575	p	0,92	1,376	1,428	1,361	1,720
	k		1,383	1,436	1,380	1,768
600	p	0,96	1,436	1,508	1,465	2,020
	k		1,443	1,520	1,473	2,063
625	p	1,00	1,490	1,581	1,530	2,245



Lokalizacja czujników „U”
Location of „U” gauges

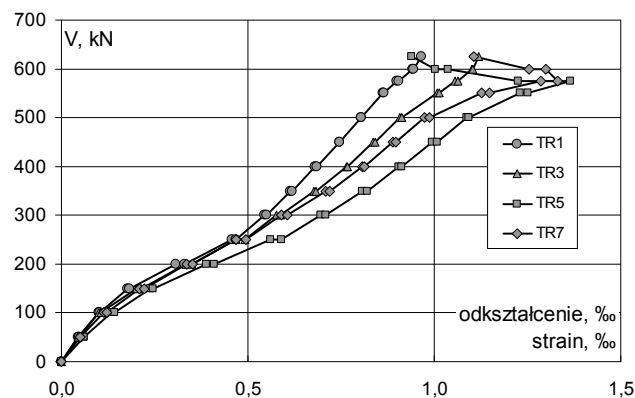
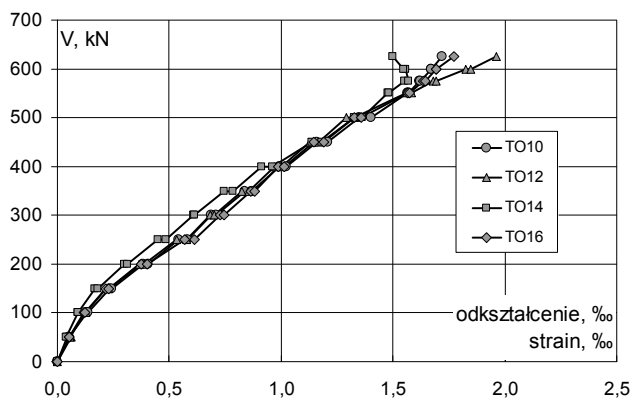


Lokalizacja czujników „T”
Location of „T” gauges

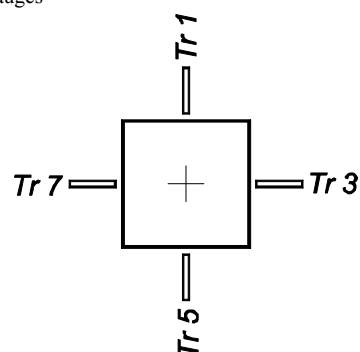
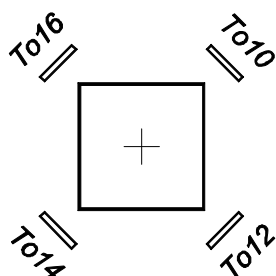


Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TO10	TO12	TO14	TO16
ε					
‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,055	0,060	0,042
	k		0,054	0,056	0,039
100	p	0,16	0,132	0,125	0,091
	k		0,137	0,127	0,091
150	p	0,24	0,233	0,215	0,167
	k		0,244	0,228	0,179
200	p	0,32	0,385	0,367	0,299
	k		0,406	0,388	0,313
250	p	0,40	0,543	0,534	0,448
	k		0,582	0,576	0,485
300	p	0,48	0,687	0,683	0,607
	k		0,710	0,701	0,611
350	p	0,56	0,839	0,826	0,747
	k		0,870	0,855	0,784
400	p	0,64	0,991	0,970	0,914
	k		1,023	1,002	0,959
450	p	0,72	1,159	1,127	1,139
	k		1,208	1,167	1,182
500	p	0,80	1,351	1,290	1,328
	k		1,401	1,329	1,364
550	p	0,88	1,566	1,559	1,476
	k		1,571	1,581	1,483
575	p	0,92	1,617	1,680	1,554
	k		1,622	1,691	1,570
600	p	0,96	1,670	1,825	1,558
	k		1,673	1,846	1,546
625	p	1,00	1,717	1,961	1,498

Odształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR1	TR3	TR5	TR7
ε					
‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,044	0,044	0,061
	k		0,047	0,046	0,061
100	p	0,16	0,100	0,101	0,135
	k		0,103	0,107	0,143
150	p	0,24	0,177	0,202	0,237
	k		0,182	0,214	0,245
200	p	0,32	0,307	0,333	0,390
	k		0,330	0,348	0,410
250	p	0,40	0,458	0,467	0,560
	k		0,468	0,491	0,590
300	p	0,48	0,546	0,576	0,695
	k		0,549	0,588	0,708
350	p	0,56	0,614	0,676	0,806
	k		0,619	0,683	0,819
400	p	0,64	0,679	0,764	0,904
	k		0,685	0,768	0,913
450	p	0,72	0,746	0,837	0,994
	k		0,746	0,842	1,008
500	p	0,80	0,804	0,908	1,086
	k		0,803	0,914	1,093
550	p	0,88	0,862	1,008	1,231
	k		0,866	1,013	1,250
575	p	0,92	0,899	1,055	1,366
	k		0,906	1,063	1,226
600	p	0,96	0,943	1,101	1,038
	k		0,944	1,103	1,002
625	p	1,00	0,967	1,118	0,940



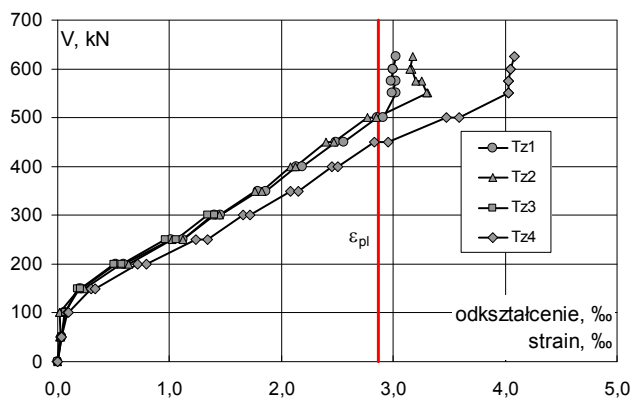
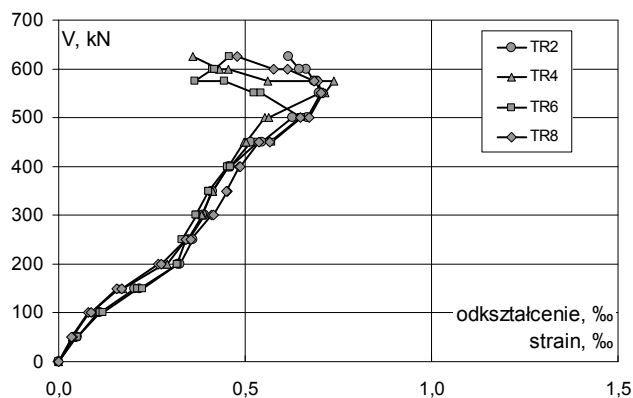
Lokalizacja czujników / Location of gauges



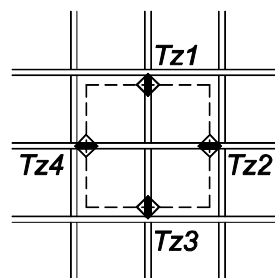
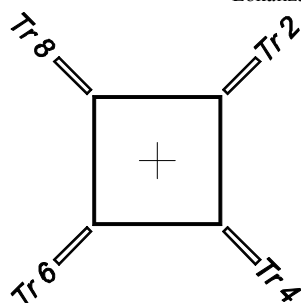
WT-CF-K-8

Odkształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR2	TR4	TR6	TR8
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,046	0,036	0,036
	k		0,051	0,037	0,050
100	p	0,16	0,107	0,081	0,112
	k		0,112	0,086	0,120
150	p	0,24	0,205	0,162	0,212
	k		0,217	0,172	0,224
200	p	0,32	0,319	0,282	0,319
	k		0,326	0,290	0,317
250	p	0,40	0,361	0,342	0,342
	k		0,361	0,342	0,341
300	p	0,48	0,391	0,385	0,370
	k		0,386	0,383	0,368
350	p	0,56	0,409	0,414	0,402
	k		0,412	0,412	0,403
400	p	0,64	0,455	0,454	0,453
	k		0,460	0,456	0,460
450	p	0,72	0,516	0,497	0,534
	k		0,544	0,502	0,572
500	p	0,80	0,628	0,554	0,651
	k		0,666	0,563	0,650
550	p	0,88	0,703	0,700	0,543
	k		0,698	0,713	0,525
575	p	0,92	0,692	0,737	0,445
	k		0,684	0,561	0,365
600	p	0,96	0,663	0,456	0,414
	k		0,646	0,430	0,419
625	p	1,00	0,617	0,360	0,458

Odkształcenia stali zbrojeniowej Strain of reinforcement bars					
V	V/V _{exp}	Tz1	Tz2	Tz3	Tz4
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,031	0,022	0,033
	k		0,032	0,024	0,035
100	p	0,16	0,062	0,021	0,069
	k		0,066	0,021	0,073
150	p	0,24	0,193	0,196	0,180
	k		0,216	0,235	0,199
200	p	0,32	0,516	0,566	0,502
	k		0,589	0,638	0,577
250	p	0,40	1,014	1,025	0,963
	k		1,118	1,121	1,062
300	p	0,48	1,398	1,383	1,340
	k		1,458	1,443	1,402
350	p	0,56	1,790	1,760	1,711
	k		1,857	1,822	1,768
400	p	0,64	2,134	2,078	2,019
	k		2,184	2,129	2,067
450	p	0,72	2,483	2,399	2,344
	k		2,555	2,468	2,406
500	p	0,80	2,854	2,767	2,673
	k		2,914	2,844	2,711
550	p	0,88	3,023	3,304	3,181
	k		2,992	3,298	3,201
575	p	0,92	3,025	3,250	3,301
	k		2,982	3,203	3,227
600	p	0,96	3,001	3,168	3,311
	k		2,999	3,148	3,317
625	p	1,00	3,024	3,171	3,397

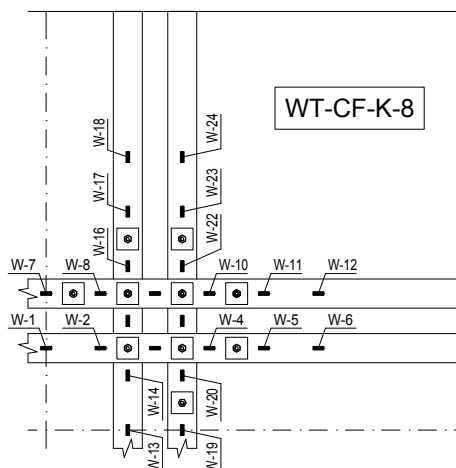
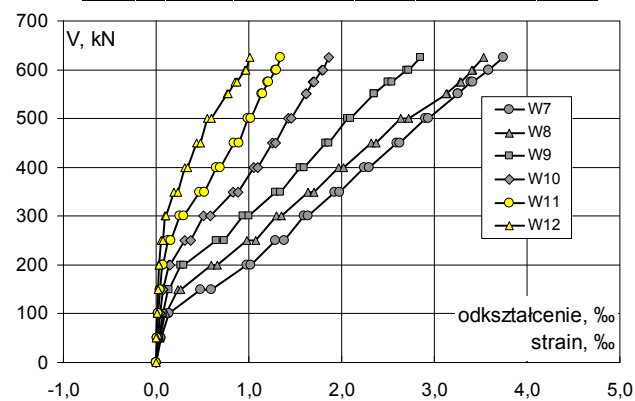
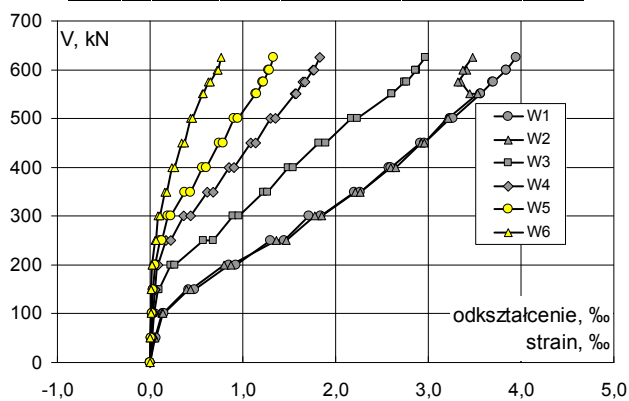


Lokalizacja czujników / Location of gauges



Odsztalcenia taśm CFRP Strain of CFRP strips							
V	V/V _{exp}	W1	W2	W3	W4	W5	W6
kN	-	ε ‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,058	0,047	0,023	0,018	0,010
	k		0,059	0,048	0,023	0,019	0,010
100	p	0,16	0,136	0,129	0,047	0,034	0,019
	k		0,147	0,142	0,047	0,035	0,020
150	p	0,24	0,416	0,397	0,088	0,053	0,033
	k		0,481	0,435	0,094	0,053	0,034
200	p	0,32	0,853	0,803	0,221	0,078	0,051
	k		0,922	0,877	0,261	0,084	0,056
250	p	0,40	1,299	1,358	0,574	0,173	0,106
	k		1,443	1,473	0,678	0,224	0,130
300	p	0,48	1,714	1,775	0,892	0,361	0,188
	k		1,836	1,846	0,956	0,435	0,222
350	p	0,56	2,206	2,211	1,223	0,621	0,374
	k		2,265	2,261	1,271	0,681	0,436
400	p	0,64	2,575	2,596	1,492	0,852	0,563
	k		2,599	2,644	1,546	0,900	0,610
450	p	0,72	2,910	2,926	1,823	1,085	0,741
	k		2,959	2,958	1,890	1,141	0,790
500	p	0,80	3,234	3,197	2,168	1,297	0,903
	k		3,266	3,216	2,235	1,349	0,943
550	p	0,88	3,563	3,534	2,609	1,565	1,133
	k		3,564	3,452	2,610	1,576	1,144
575	p	0,92	3,687	3,348	2,747	1,654	1,208
	k		3,703	3,322	2,766	1,669	1,220
600	p	0,96	3,836	3,415	2,875	1,756	1,280
	k		3,840	3,375	2,857	1,765	1,283
625	p	1,00	3,948	3,478	2,969	1,828	1,331

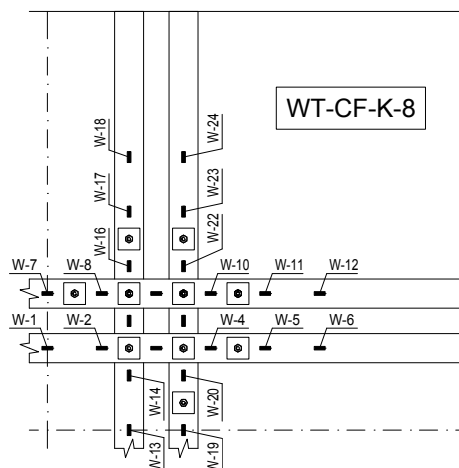
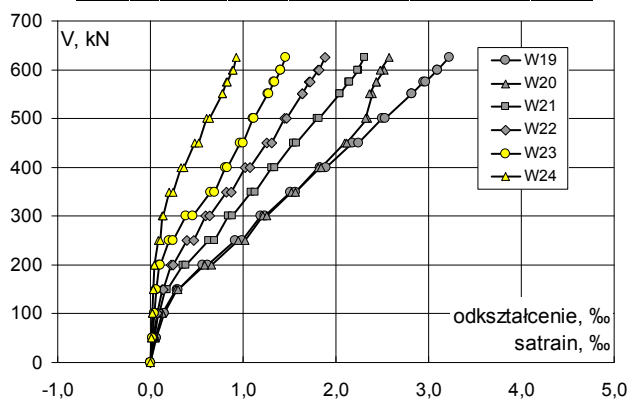
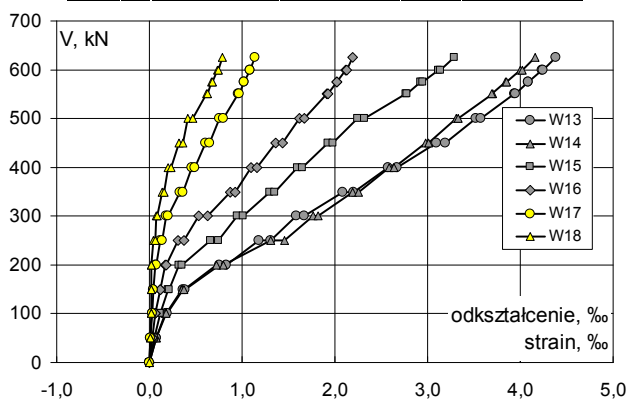
Odsztalcenia taśm CFRP Strain of CFRP strips							
V	V/V _{exp}	W7	W8	W9	W10	W11	W12
kN	-	ε ‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,049	0,044	0,033	0,019	0,012
	k		0,050	0,044	0,033	0,019	0,013
100	p	0,16	0,133	0,101	0,071	0,041	0,024
	k		0,140	0,105	0,074	0,043	0,025
150	p	0,24	0,484	0,236	0,131	0,073	0,041
	k		0,600	0,263	0,137	0,075	0,043
200	p	0,32	0,974	0,596	0,264	0,135	0,066
	k		1,016	0,662	0,295	0,153	0,073
250	p	0,40	1,284	0,984	0,648	0,305	0,128
	k		1,379	1,075	0,733	0,374	0,159
300	p	0,48	1,601	1,294	0,935	0,512	0,250
	k		1,642	1,349	1,004	0,586	0,299
350	p	0,56	1,927	1,635	1,284	0,826	0,465
	k		1,978	1,706	1,336	0,880	0,521
400	p	0,64	2,247	1,964	1,552	1,052	0,648
	k		2,294	2,025	1,593	1,096	0,694
450	p	0,72	2,596	2,317	1,830	1,250	0,841
	k		2,630	2,369	1,860	1,291	0,893
500	p	0,80	2,900	2,640	2,064	1,427	0,993
	k		2,932	2,722	2,095	1,457	1,018
550	p	0,88	3,251	3,134	2,348	1,614	1,141
	k		3,254	3,128	2,352	1,619	1,148
575	p	0,92	3,398	3,273	2,503	1,688	1,203
	k		3,416	3,283	2,541	1,700	1,217
600	p	0,96	3,583	3,412	2,706	1,786	1,282
	k		3,588	3,400	2,725	1,794	1,293
625	p	1,00	3,748	3,531	2,848	1,859	1,346



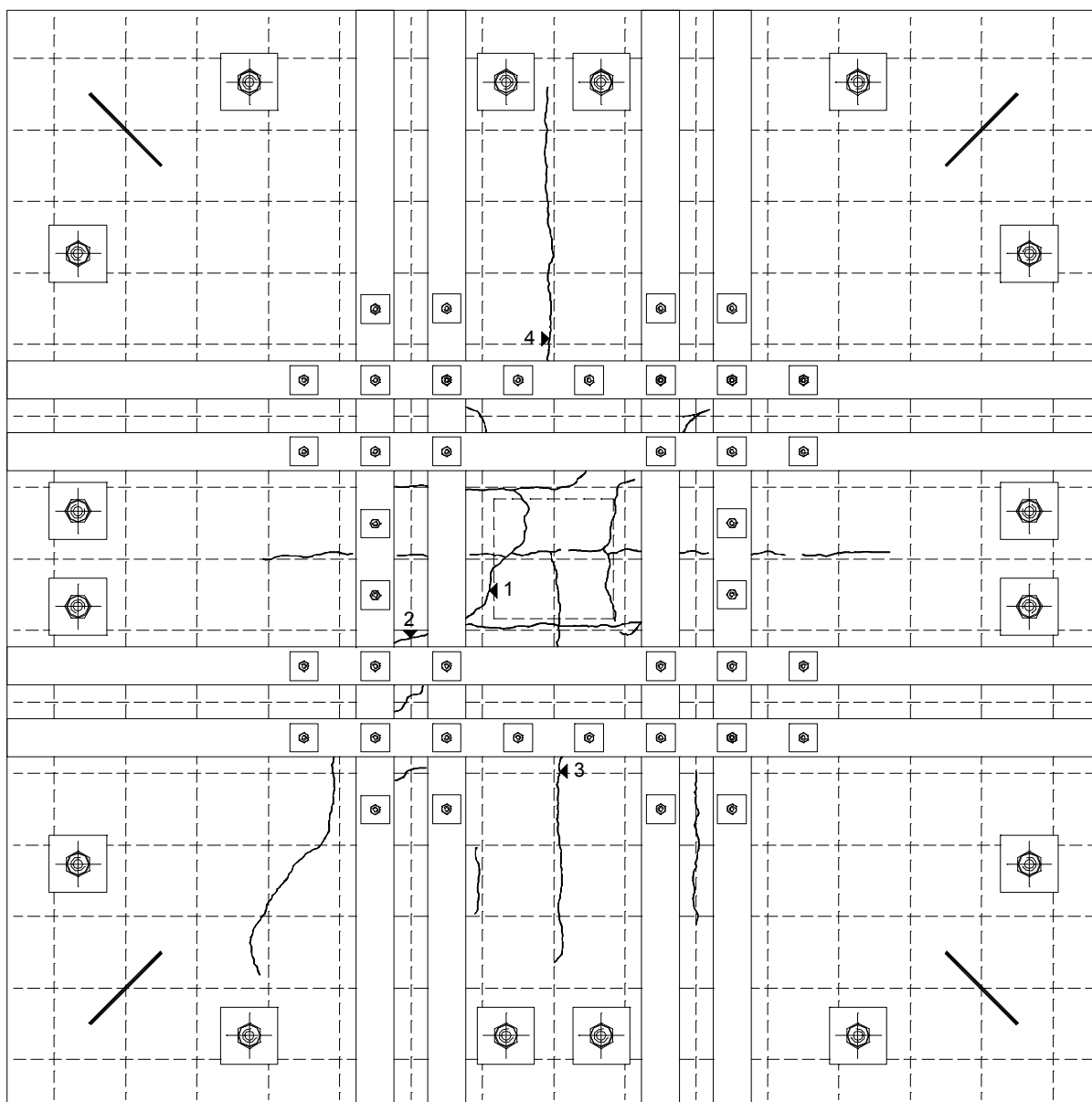
WT-CF-K-8

Odształcenia taśm CFRP							
Strain of CFRP strips							
V	V/V _{exp}	W13	W14	W15	W16	W17	W18
kN	-	ε					
		‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,078	0,074	0,054	0,029	0,013
	k		0,079	0,074	0,053	0,030	0,014
100	p	0,16	0,178	0,170	0,113	0,064	0,032
	k		0,187	0,177	0,117	0,066	0,033
150	p	0,24	0,357	0,349	0,200	0,112	0,047
	k		0,382	0,372	0,210	0,119	0,046
200	p	0,32	0,759	0,721	0,323	0,170	0,069
	k		0,831	0,801	0,356	0,180	0,073
250	p	0,40	1,178	1,312	0,657	0,307	0,114
	k		1,308	1,454	0,746	0,371	0,134
300	p	0,48	1,586	1,761	0,945	0,536	0,176
	k		1,674	1,818	1,011	0,623	0,207
350	p	0,56	2,087	2,191	1,299	0,871	0,334
	k		2,198	2,251	1,354	0,926	0,362
400	p	0,64	2,573	2,586	1,595	1,100	0,462
	k		2,670	2,638	1,647	1,159	0,491
450	p	0,72	3,097	2,981	1,930	1,366	0,609
	k		3,193	3,006	1,983	1,439	0,654
500	p	0,80	3,523	3,305	2,249	1,617	0,760
	k		3,573	3,330	2,320	1,672	0,798
550	p	0,88	3,937	3,702	2,761	1,918	0,955
	k		3,945	3,694	2,777	1,927	0,963
575	p	0,92	4,082	3,841	2,927	2,016	1,018
	k		4,082	3,849	2,945	2,017	1,026
600	p	0,96	4,233	4,002	3,122	2,114	1,080
	k		4,246	4,020	3,143	2,126	1,089
625	p	1,00	4,380	4,158	3,284	2,196	1,135

Odształcenia taśm CFRP							
Strain of CFRP strips							
V	V/V _{exp}	W19	W20	W21	W22	W23	W24
kN	-	ε					
		‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,09	0,061	0,048	0,039	0,033	0,019
	k		0,064	0,050	0,041	0,034	0,018
100	p	0,16	0,145	0,125	0,089	0,073	0,039
	k		0,152	0,132	0,092	0,077	0,040
150	p	0,24	0,283	0,275	0,164	0,127	0,061
	k		0,303	0,302	0,176	0,136	0,066
200	p	0,32	0,564	0,585	0,346	0,225	0,097
	k		0,618	0,661	0,386	0,246	0,102
250	p	0,40	0,911	0,952	0,623	0,397	0,203
	k		0,987	1,021	0,690	0,464	0,249
300	p	0,48	1,194	1,217	0,841	0,592	0,381
	k		1,236	1,256	0,881	0,635	0,455
350	p	0,56	1,512	1,516	1,083	0,820	0,654
	k		1,568	1,561	1,123	0,874	0,690
400	p	0,64	1,829	1,807	1,304	1,026	0,807
	k		1,889	1,837	1,337	1,075	0,834
450	p	0,72	2,180	2,099	1,540	1,259	0,966
	k		2,244	2,122	1,576	1,306	0,996
500	p	0,80	2,495	2,343	1,793	1,442	1,102
	k		2,530	2,322	1,823	1,469	1,117
550	p	0,88	2,819	2,396	2,045	1,633	1,268
	k		2,822	2,360	2,047	1,639	1,273
575	p	0,92	2,945	2,441	2,143	1,712	1,331
	k		2,965	2,440	2,150	1,723	1,340
600	p	0,96	3,095	2,522	2,244	1,805	1,399
	k		3,097	2,481	2,232	1,815	1,403
625	p	1,00	3,223	2,577	2,313	1,882	1,460

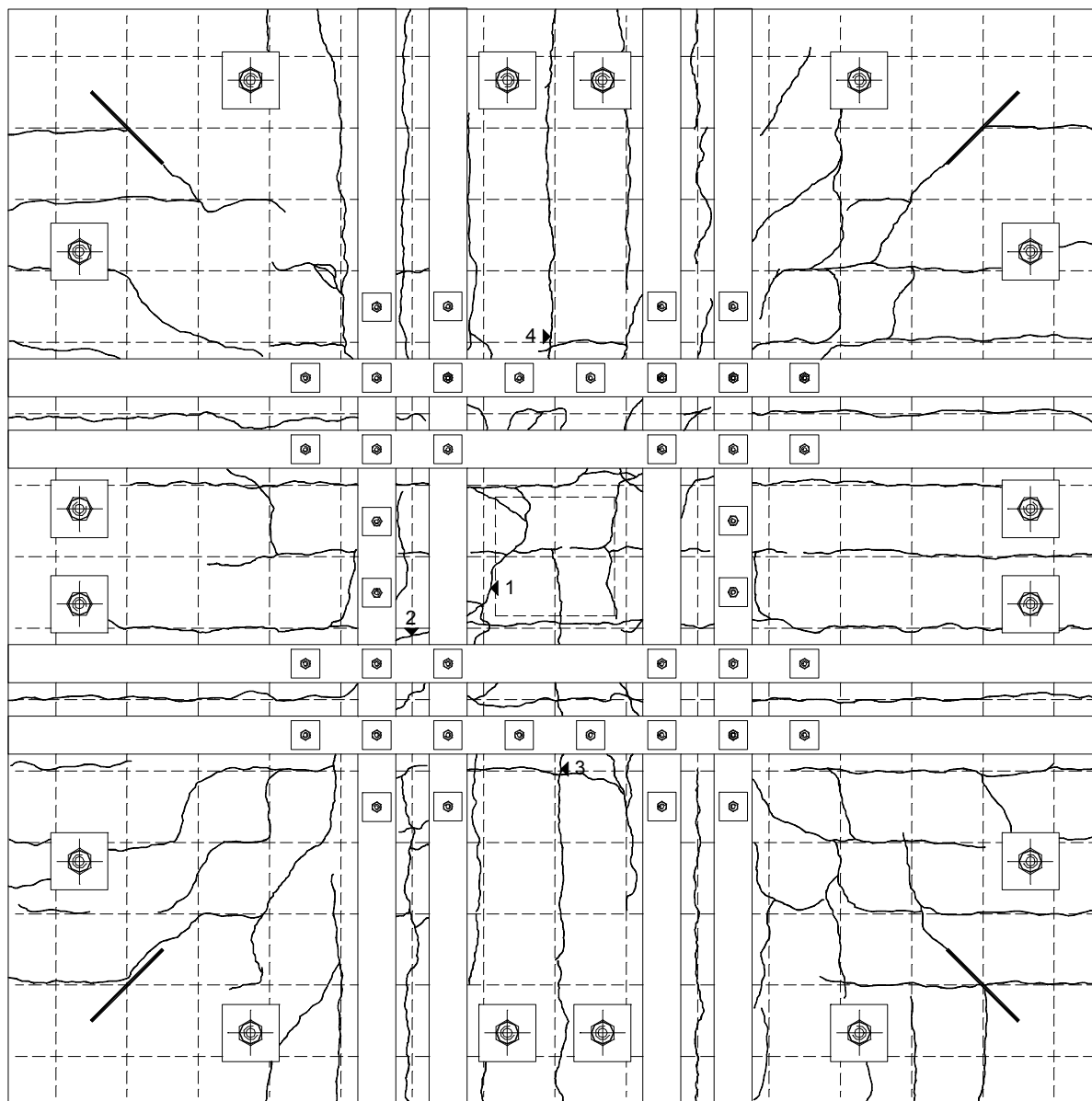


Rysy – faza początkowa / Cracks pattern – initial stage



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]			
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3	rysa 4 / crack No. 4
150	pojawiły się rysy / appearance of cracks			
200	200	0,10	0,05	
250	250	0,30	0,10	0,05

Rysy – faza zniszczenia / Cracks pattern after failure



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]			
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3	rysa 4 / crack No. 4
150	pojawiły się rysy / appearance of cracks			
200	0,10	0,05		
250	0,30	0,10	0,05	0,05
250	0,40	0,10	0,05	0,20
300	0,40	0,15	0,05	0,20
350	0,70	0,25	0,05	0,20
400	0,70	0,25	0,10	0,25
450	0,80	0,30	0,10	0,25
500	1,00	0,30	0,10	0,25
550	1,20	0,50	0,10	0,25
600	1,50	0,50	0,10	0,30

Dane / Data

beton / concrete

(#12)

(taśma CFRP / CFRP strip)

$$f_{c,cube} = 48,3\text{MPa}, f_{cm} = 38,8\text{MPa}, f_{sp} = 3,42\text{MPa}, E_{cm} = 25680\text{MPa}$$

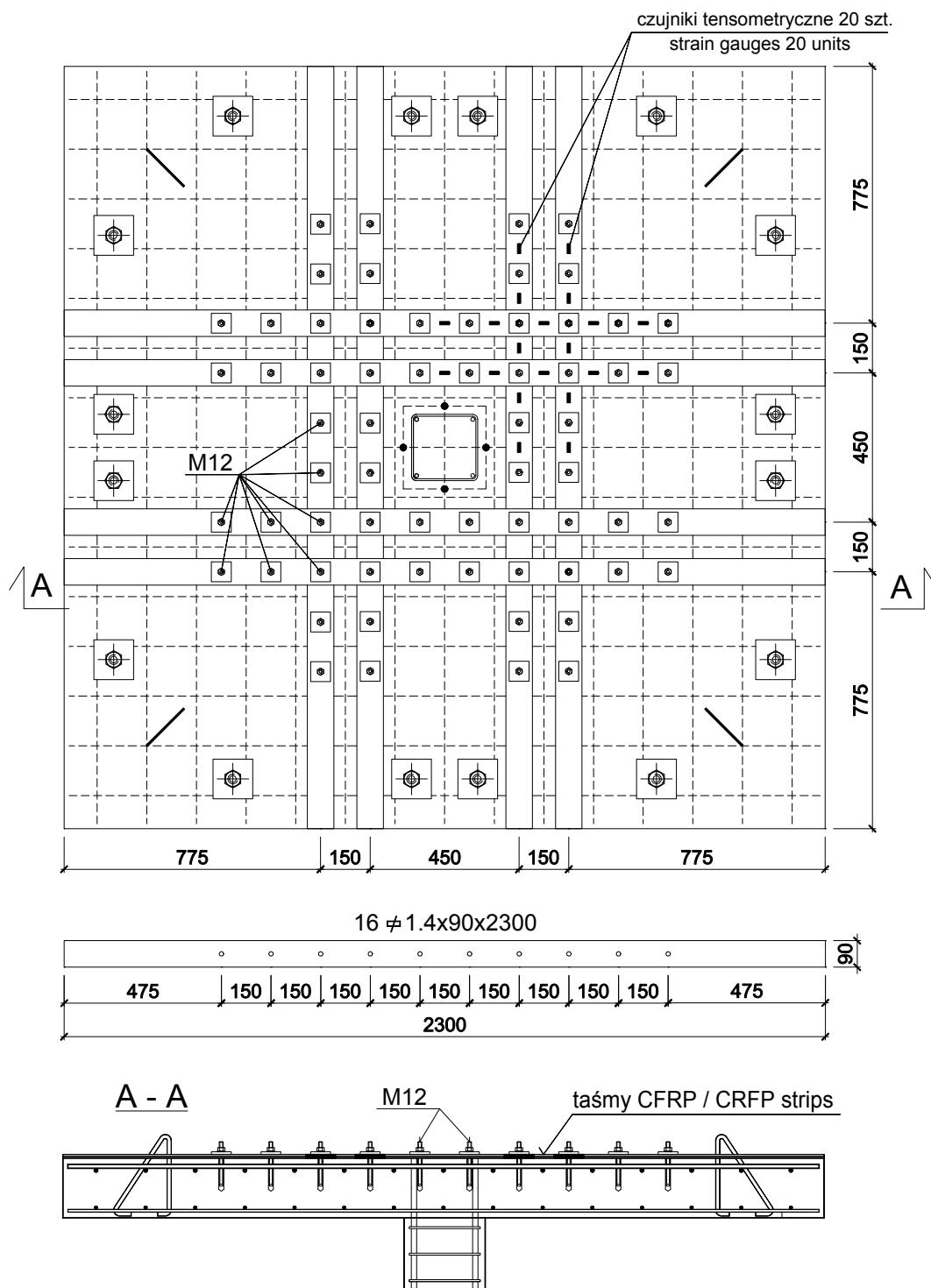
$$f_{y,h} = 580,8\text{MPa}, f_{y,l} = 565,5\text{MPa}, f_{ym} = 573,2\text{MPa}, A_{sm} = 1,113\text{cm}^2$$

$$f_{ym} = 3100\text{MPa} \text{ (producent / producer), } f_{ym} = 3023\text{MPa} \text{ (pomierzona / measured)}$$

$$A_{sm} = 1,260\text{cm}^2 \text{ (producent / producer), } E_{CFRP} = 174000\text{MPa} \text{ (pomierzona / measured)}$$

wysokość nominalna / nominal effective depth of cross-section $d = 14,8\text{cm}$ (pomierzona / measured 14,90cm)nośność świadka / witness load capacity $V_s = 495,0\text{kN}$ nośność eksperymentalna / experimental load capacity $V_{exp} = 675\text{kN}$

$$V_{exp} / V_s = 1,37$$

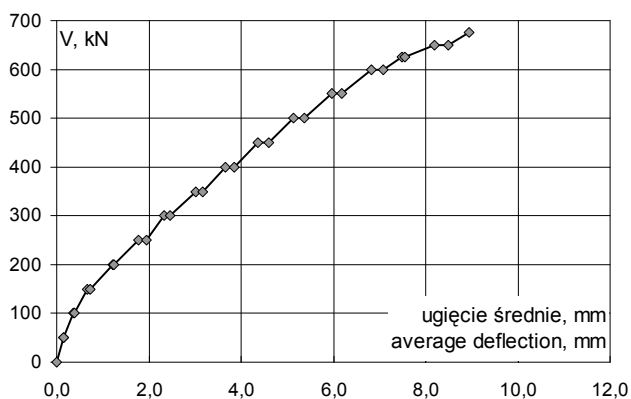
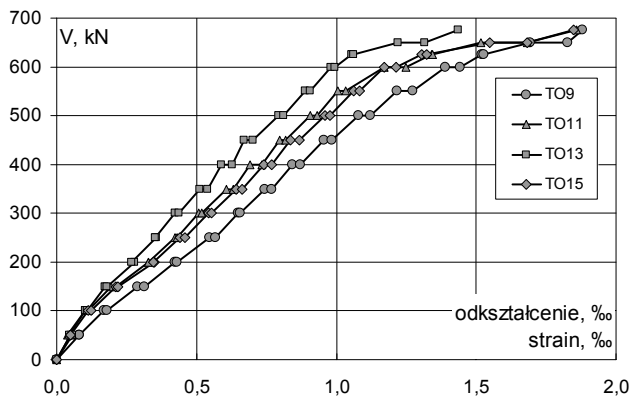
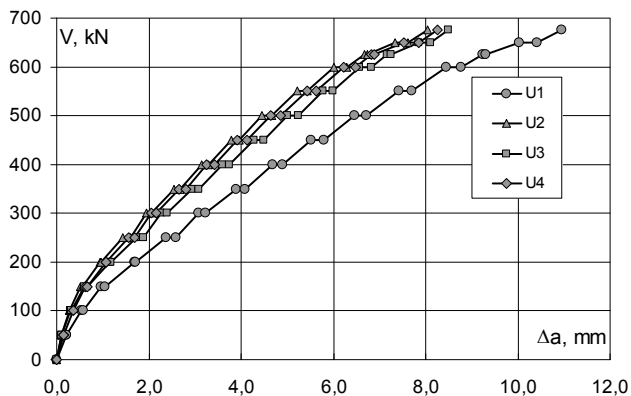


Rysunek konstrukcyjny modelu / Technical drawing of the specimen

WT-CF-K-16

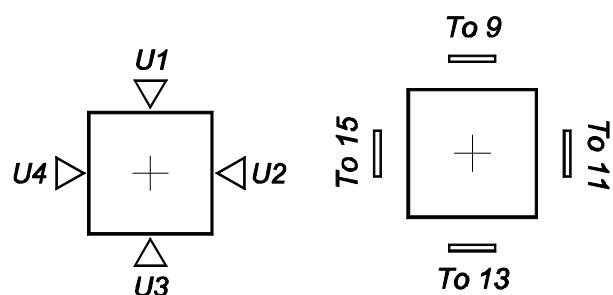
Ugięcia Deflections						
V	V/V _{exp}	U1	U2	U3	U4	średnie average
kN	-	Δa				mm
0	p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	p	0,07	0,21	0,11	0,15	0,15
	k		0,21	0,11	0,14	0,14
100	p	0,15	0,53	0,29	0,30	0,37
	k		0,58	0,28	0,32	0,37
150	p	0,22	0,97	0,51	0,59	0,67
	k		1,04	0,56	0,66	0,73
200	p	0,30	1,69	0,95	1,17	1,22
	k		1,70	0,97	1,17	1,23
250	p	0,37	2,38	1,44	1,73	1,78
	k		2,58	1,60	1,89	1,94
300	p	0,44	3,09	1,94	2,28	2,34
	k		3,24	2,05	2,40	2,46
350	p	0,52	3,90	2,54	2,93	3,01
	k		4,08	2,68	3,08	3,16
400	p	0,59	4,68	3,14	3,59	3,67
	k		4,90	3,29	3,75	3,84
450	p	0,67	5,52	3,78	4,27	4,37
	k		5,79	3,97	4,49	4,59
500	p	0,74	6,45	4,45	5,01	5,14
	k		6,71	4,67	5,23	5,37
550	p	0,81	7,43	5,22	5,78	5,96
	k		7,69	5,43	5,99	6,19
600	p	0,89	8,45	6,02	6,58	6,82
	k		8,77	6,29	6,82	7,09
625	p	0,93	9,24	6,67	7,18	7,48
	k		9,30	6,74	7,24	7,54
650	p	0,96	10,03	7,33	7,85	8,18
	k		10,41	7,61	8,11	8,50
675	p	1,00	10,95	8,04	8,49	8,93
	k					

Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete						
V	V/V _{exp}	TO9	TO11	TO13	TO15	
kN	-	ε				‰
0	p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	p	0,07	0,082	0,049	0,056	0,051
	k		0,080	0,040	0,047	0,049
100	p	0,15	0,171	0,102	0,101	0,112
	k		0,181	0,112	0,111	0,123
150	p	0,22	0,289	0,194	0,172	0,211
	k		0,314	0,211	0,179	0,218
200	p	0,30	0,423	0,328	0,277	0,350
	k		0,430	0,327	0,269	0,345
250	p	0,37	0,545	0,425	0,357	0,442
	k		0,569	0,432	0,352	0,457
300	p	0,44	0,648	0,508	0,425	0,542
	k		0,657	0,519	0,439	0,554
350	p	0,52	0,746	0,606	0,513	0,642
	k		0,769	0,632	0,538	0,664
400	p	0,59	0,844	0,693	0,589	0,739
	k		0,871	0,732	0,629	0,769
450	p	0,67	0,957	0,797	0,671	0,835
	k		0,983	0,820	0,702	0,868
500	p	0,74	1,080	0,907	0,793	0,959
	k		1,122	0,930	0,811	0,977
550	p	0,81	1,216	1,007	0,888	1,060
	k		1,273	1,034	0,906	1,082
600	p	0,89	1,390	1,170	0,982	1,172
	k		1,442	1,247	0,996	1,212
625	p	0,93	1,519	1,341	1,053	1,305
	k		1,527	1,343	1,061	1,322
650	p	0,96	1,693	1,516	1,222	1,547
	k		1,826	1,681	1,316	1,683
675	p	1,00	1,880	1,858	1,435	1,848
	k					



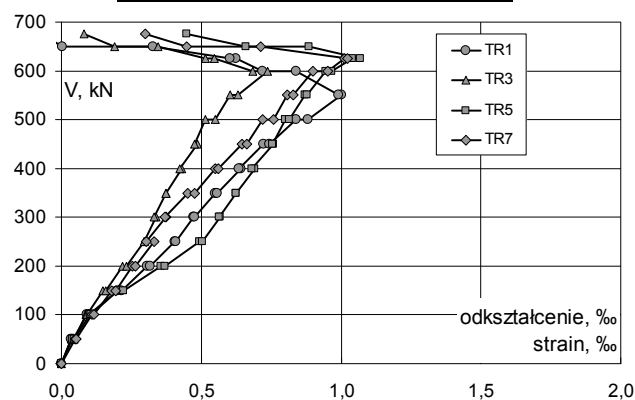
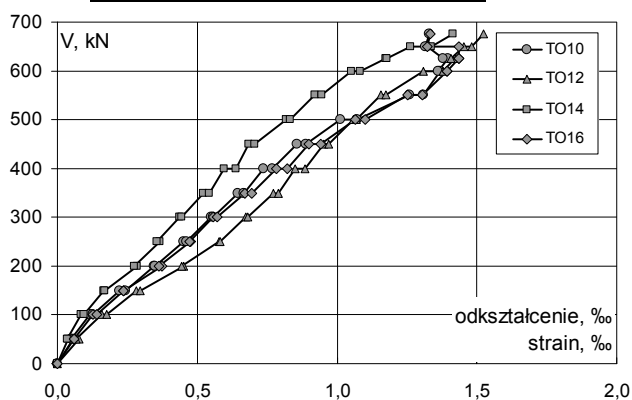
Lokalizacja czujników „U”
Location of „U” gauges

Lokalizacja czujników „T”
Location of „T” gauges

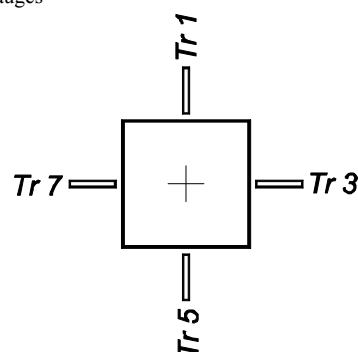
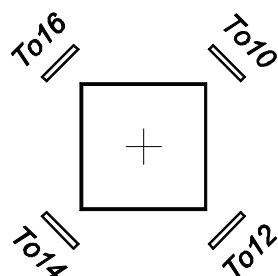


Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TO10	TO12	TO14	TO16
ε					
‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,057	0,076	0,039
	k		0,049	0,068	0,034
100	p	0,15	0,118	0,160	0,084
	k		0,127	0,175	0,096
150	p	0,22	0,221	0,282	0,165
	k		0,243	0,298	0,169
200	p	0,30	0,345	0,451	0,285
	k		0,349	0,446	0,274
250	p	0,37	0,451	0,579	0,368
	k		0,462	0,581	0,356
300	p	0,44	0,549	0,673	0,437
	k		0,559	0,682	0,445
350	p	0,52	0,647	0,773	0,522
	k		0,667	0,789	0,544
400	p	0,59	0,736	0,851	0,597
	k		0,769	0,886	0,639
450	p	0,67	0,857	0,951	0,685
	k		0,889	0,969	0,707
500	p	0,74	1,012	1,059	0,819
	k		1,073	1,068	0,831
550	p	0,81	1,261	1,156	0,920
	k		1,309	1,175	0,945
600	p	0,89	1,369	1,307	1,051
	k		1,363	1,380	1,084
625	p	0,93	1,398	1,423	1,174
	k		1,380	1,406	1,177
650	p	0,96	1,323	1,452	1,262
	k		1,315	1,481	1,338
675	p	1,00	1,331	1,523	1,414

Odształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR1	TR3	TR5	TR7
ε					
‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,034	0,036	0,040
	k		0,042	0,045	0,045
100	p	0,15	0,091	0,089	0,103
	k		0,098	0,091	0,107
150	p	0,22	0,201	0,148	0,200
	k		0,214	0,157	0,221
200	p	0,30	0,308	0,220	0,357
	k		0,316	0,233	0,371
250	p	0,37	0,404	0,297	0,494
	k		0,408	0,298	0,504
300	p	0,44	0,474	0,337	0,569
	k		0,477	0,333	0,564
350	p	0,52	0,551	0,373	0,625
	k		0,556	0,375	0,623
400	p	0,59	0,641	0,430	0,692
	k		0,634	0,423	0,681
450	p	0,67	0,723	0,487	0,759
	k		0,744	0,477	0,756
500	p	0,74	0,840	0,515	0,801
	k		0,881	0,551	0,814
550	p	0,81	1,003	0,604	0,870
	k		0,990	0,632	0,877
600	p	0,89	0,840	0,737	0,944
	k		0,719	0,686	0,966
625	p	0,93	0,625	0,547	1,042
	k		0,602	0,514	1,069
650	p	0,96	0,329	0,346	0,885
	k		0,002	0,192	0,661
675	p	1,00	-0,071	0,080	0,450



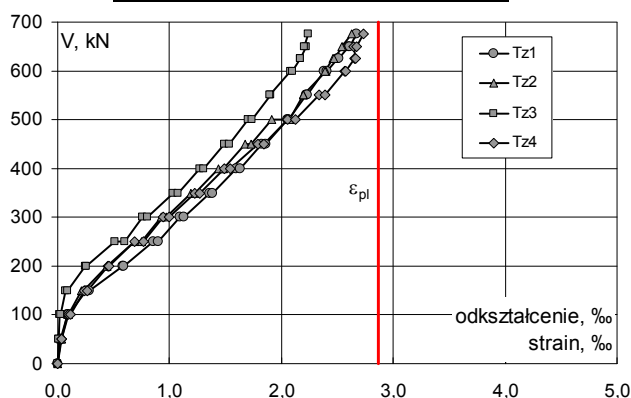
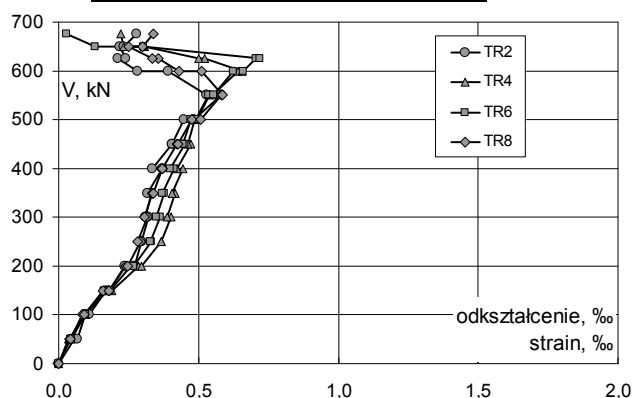
Lokalizacja czujników / Location of gauges



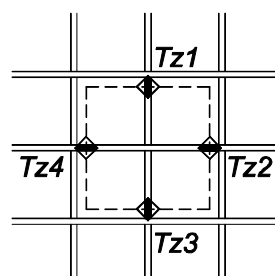
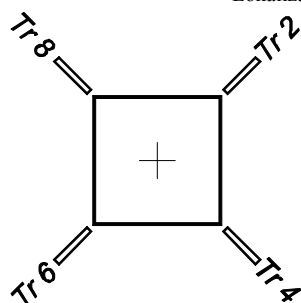
WT-CF-K-16

Odkształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR2	TR4	TR6	TR8
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,056	0,034	0,042
	k		0,068	0,040	0,046
100	p	0,15	0,095	0,092	0,094
	k		0,109	0,096	0,097
150	p	0,22	0,169	0,173	0,164
	k		0,180	0,189	0,183
200	p	0,30	0,237	0,284	0,256
	k		0,272	0,295	0,267
250	p	0,37	0,297	0,366	0,330
	k		0,298	0,366	0,329
300	p	0,44	0,320	0,402	0,364
	k		0,309	0,389	0,350
350	p	0,52	0,333	0,415	0,379
	k		0,318	0,405	0,371
400	p	0,59	0,370	0,445	0,414
	k		0,336	0,423	0,399
450	p	0,67	0,406	0,474	0,453
	k		0,404	0,463	0,445
500	p	0,74	0,448	0,486	0,472
	k		0,484	0,494	0,491
550	p	0,81	0,582	0,540	0,537
	k		0,529	0,550	0,555
600	p	0,89	0,391	0,641	0,624
	k		0,282	0,657	0,661
625	p	0,93	0,212	0,523	0,706
	k		0,239	0,502	0,719
650	p	0,96	0,218	0,308	0,303
	k		0,232	0,233	0,129
675	p	1,00	0,278	0,221	0,028
					0,337

Odkształcenia stali zbrojeniowej Strain of reinforcement bars					
V	V/V _{exp}	Tz1	Tz2	Tz3	Tz4
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,025	0,030	0,012
	k		0,026	0,031	0,011
100	p	0,15	0,090	0,088	0,022
	k		0,098	0,095	0,023
150	p	0,22	0,256	0,209	0,074
	k		0,285	0,229	0,090
200	p	0,30	0,586	0,440	0,247
	k		0,590	0,443	0,252
250	p	0,37	0,852	0,685	0,509
	k		0,901	0,752	0,596
300	p	0,44	1,097	0,926	0,754
	k		1,132	0,968	0,803
350	p	0,52	1,357	1,187	1,029
	k		1,386	1,229	1,072
400	p	0,59	1,593	1,434	1,266
	k		1,632	1,482	1,309
450	p	0,67	1,827	1,672	1,493
	k		1,862	1,730	1,534
500	p	0,74	2,051	1,913	1,700
	k		2,067	2,075	1,733
550	p	0,81	2,223	2,195	1,903
	k		2,233	2,198	1,893
600	p	0,89	2,378	2,402	2,077
	k		2,406	2,389	2,095
625	p	0,93	2,504	2,461	2,171
	k		2,509	2,469	2,170
650	p	0,96	2,603	2,552	2,222
	k		2,606	2,540	2,206
675	p	1,00	2,669	2,628	2,242
					2,737

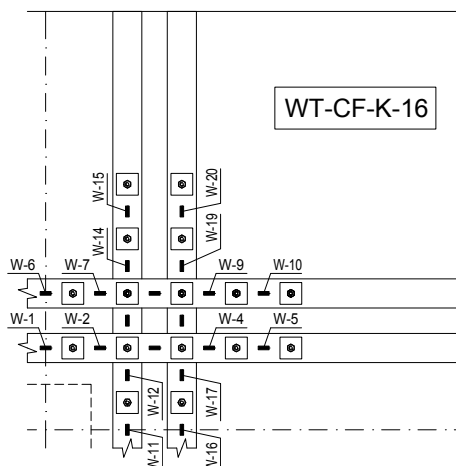
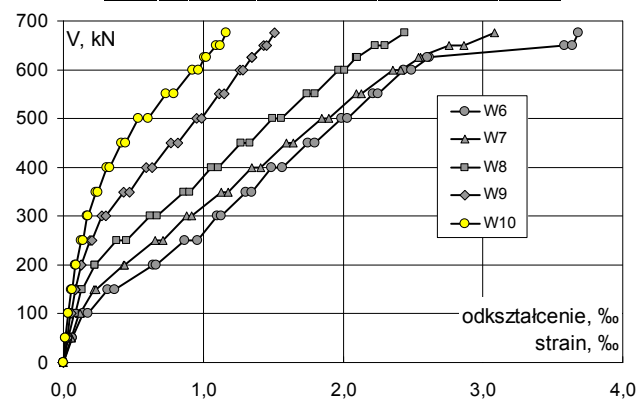
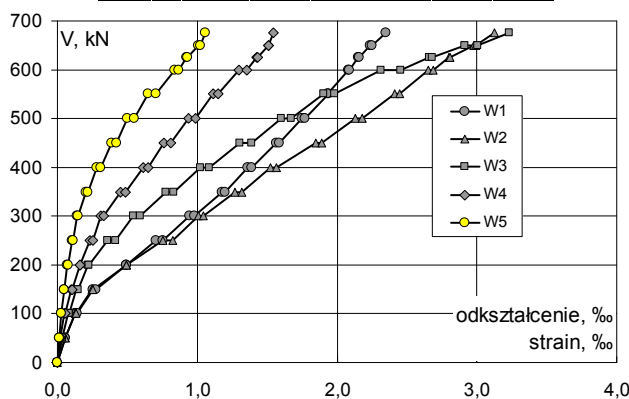


Lokalizacja czujników / Location of gauges



Odkształcenia taśm CFRP Strain of CFRP strips						
V	V/V _{exp}	W1	W2	W3	W4	W5
ε						
kN	-	‰				
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,055	0,055	0,035	0,021
	k		0,055	0,055	0,036	0,012
100	p	0,15	0,130	0,126	0,080	0,050
	k		0,140	0,134	0,083	0,030
150	p	0,22	0,255	0,244	0,135	0,101
	k		0,274	0,257	0,145	0,046
200	p	0,30	0,495	0,497	0,222	0,162
	k		0,496	0,497	0,229	0,074
250	p	0,37	0,702	0,757	0,363	0,231
	k		0,757	0,825	0,417	0,104
300	p	0,44	0,946	1,008	0,546	0,312
	k		0,982	1,041	0,592	0,138
350	p	0,52	1,178	1,270	0,774	0,449
	k		1,199	1,317	0,835	0,203
400	p	0,59	1,364	1,521	1,023	0,615
	k		1,392	1,563	1,086	0,285
450	p	0,67	1,564	1,845	1,304	0,764
	k		1,584	1,890	1,387	0,386
500	p	0,74	1,753	2,128	1,598	0,811
	k		1,773	2,183	1,674	0,422
550	p	0,81	1,939	2,412	1,905	0,935
	k		1,936	2,451	1,979	0,504
600	p	0,89	2,083	2,656	2,314	1,112
	k		2,088	2,688	2,456	0,646
625	p	0,93	2,149	2,800	2,661	1,153
	k		2,159	2,810	2,679	0,703
650	p	0,96	2,238	2,975	2,914	1,300
	k		2,249	2,990	3,005	0,839
675	p	1,00	2,349	3,123	3,232	1,351
	k				1,547	0,869
						0,921
						0,932
						1,008
						1,021
						1,058

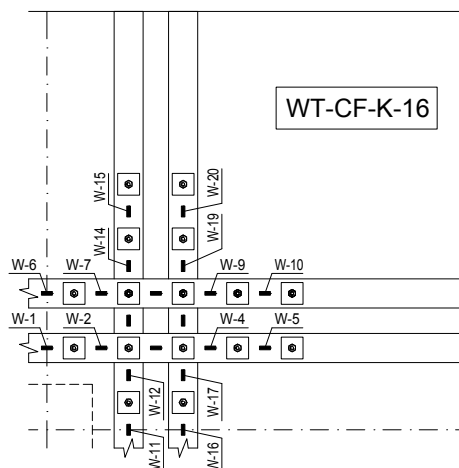
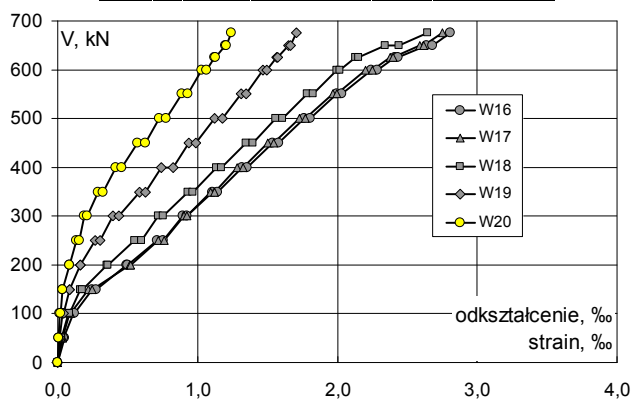
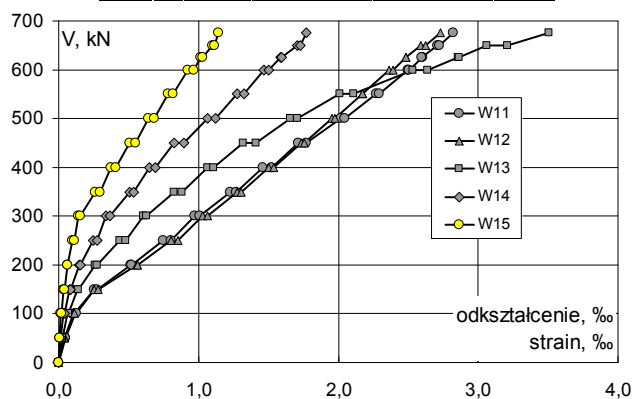
Odkształcenia taśm CFRP Strain of CFRP strips						
V	V/V _{exp}	W6	W7	W8	W9	W10
ε						
kN	-	‰				
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,062	0,054	0,034	0,026
	k		0,067	0,053	0,037	0,014
100	p	0,15	0,144	0,115	0,079	0,052
	k		0,177	0,122	0,082	0,035
150	p	0,22	0,315	0,216	0,128	0,082
	k		0,366	0,232	0,136	0,057
200	p	0,30	0,645	0,430	0,225	0,125
	k		0,661	0,436	0,228	0,082
250	p	0,37	0,869	0,656	0,382	0,187
	k		0,957	0,715	0,452	0,125
300	p	0,44	1,104	0,881	0,621	0,273
	k		1,132	0,918	0,672	0,169
350	p	0,52	1,302	1,128	0,860	0,429
	k		1,345	1,177	0,906	0,232
400	p	0,59	1,492	1,348	1,060	0,470
	k		1,568	1,412	1,111	0,592
450	p	0,67	1,747	1,593	1,269	0,636
	k		1,799	1,645	1,332	0,416
500	p	0,74	1,987	1,851	1,497	0,817
	k		2,032	1,896	1,557	0,447
550	p	0,81	2,215	2,094	1,745	0,949
	k		2,249	2,128	1,796	0,537
600	p	0,89	2,435	2,357	1,965	1,118
	k		2,487	2,412	2,008	0,737
625	p	0,93	2,618	2,552	2,094	1,153
	k		2,602	2,543	2,099	0,921
650	p	0,96	3,585	2,761	2,228	1,285
	k		3,641	2,865	2,299	1,348
675	p	1,00	3,683	3,083	2,441	1,430
	k					1,507
						1,123
						1,164



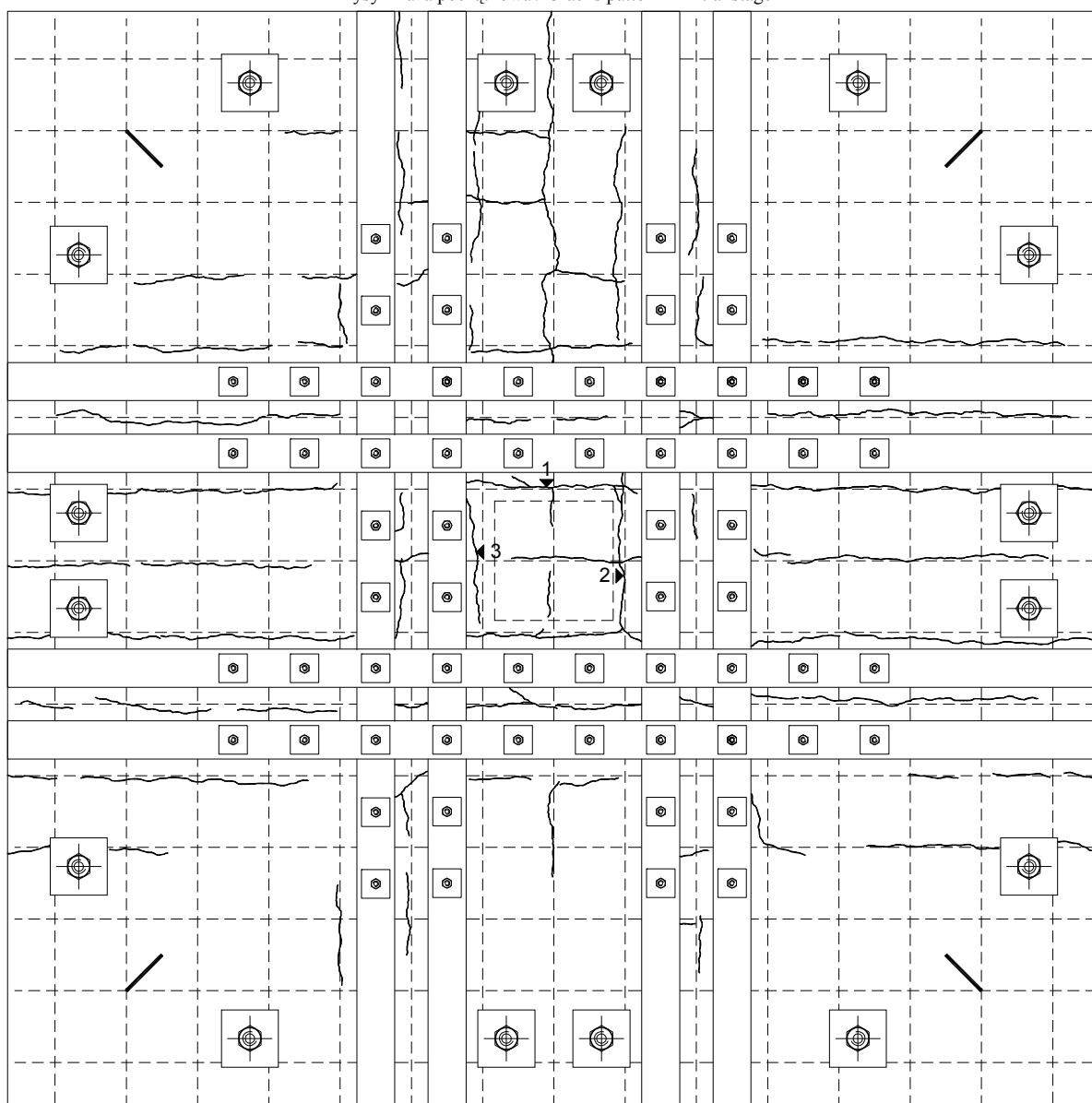
WT-CF-K-16

Odształcenia taśm CFRP Strain of CFRP strips						
V	V/V _{exp}	W11	W12	W13	W14	W15
ε		ε				
kN		‰				
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,051	0,042	0,028	0,016
	k		0,050	0,042	0,026	0,014
100	p	0,15	0,122	0,105	0,064	0,038
	k		0,130	0,113	0,069	0,040
150	p	0,22	0,254	0,253	0,137	0,080
	k		0,277	0,282	0,140	0,087
200	p	0,30	0,515	0,555	0,264	0,146
	k		0,520	0,565	0,275	0,155
250	p	0,37	0,748	0,805	0,436	0,244
	k		0,804	0,857	0,477	0,277
300	p	0,44	0,971	1,028	0,605	0,339
	k		1,009	1,062	0,627	0,365
350	p	0,52	1,227	1,274	0,824	0,509
	k		1,271	1,308	0,881	0,538
400	p	0,59	1,460	1,505	1,067	0,649
	k		1,521	1,539	1,111	0,690
450	p	0,67	1,717	1,737	1,319	0,825
	k		1,773	1,758	1,412	0,898
500	p	0,74	2,017	1,956	1,660	1,066
	k		2,046	1,973	1,709	1,124
550	p	0,81	2,273	2,175	2,012	1,279
	k		2,294	2,176	2,110	1,323
600	p	0,89	2,496	2,362	2,535	1,467
	k		2,506	2,391	2,641	1,504
625	p	0,93	2,602	2,484	2,860	1,589
	k		2,594	2,483	2,861	1,596
650	p	0,96	2,711	2,589	3,065	1,705
	k		2,720	2,625	3,213	1,728
675	p	1,00	2,822	2,733	3,505	1,770
	k					1,146

Odształcenia taśm CFRP Strain of CFRP strips						
V	V/V _{exp}	W16	W17	W18	W19	W20
ε		ε				
kN		‰				
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,047	0,034	0,028	0,017
	k		0,040	0,033	0,027	0,013
100	p	0,15	0,110	0,083	0,076	0,037
	k		0,120	0,092	0,082	0,041
150	p	0,22	0,248	0,220	0,164	0,083
	k		0,273	0,248	0,179	0,088
200	p	0,30	0,491	0,516	0,353	0,164
	k		0,499	0,523	0,359	0,164
250	p	0,37	0,712	0,722	0,551	0,265
	k		0,753	0,761	0,599	0,305
300	p	0,44	0,897	0,900	0,721	0,392
	k		0,925	0,924	0,757	0,436
350	p	0,52	1,107	1,090	0,931	0,584
	k		1,142	1,124	0,968	0,627
400	p	0,59	1,316	1,286	1,133	0,742
	k		1,351	1,323	1,172	0,827
450	p	0,67	1,538	1,502	1,347	0,939
	k		1,582	1,548	1,394	0,988
500	p	0,74	1,766	1,729	1,557	1,121
	k		1,804	1,768	1,605	1,175
550	p	0,81	1,997	1,965	1,787	1,315
	k		2,030	1,996	1,826	1,350
600	p	0,89	2,243	2,203	1,999	1,464
	k		2,286	2,249	2,021	1,498
625	p	0,93	2,412	2,378	2,127	1,563
	k		2,435	2,396	2,149	1,570
650	p	0,96	2,636	2,586	2,341	1,650
	k		2,678	2,617	2,438	1,665
675	p	1,00	2,806	2,752	2,644	1,708
	k					1,240

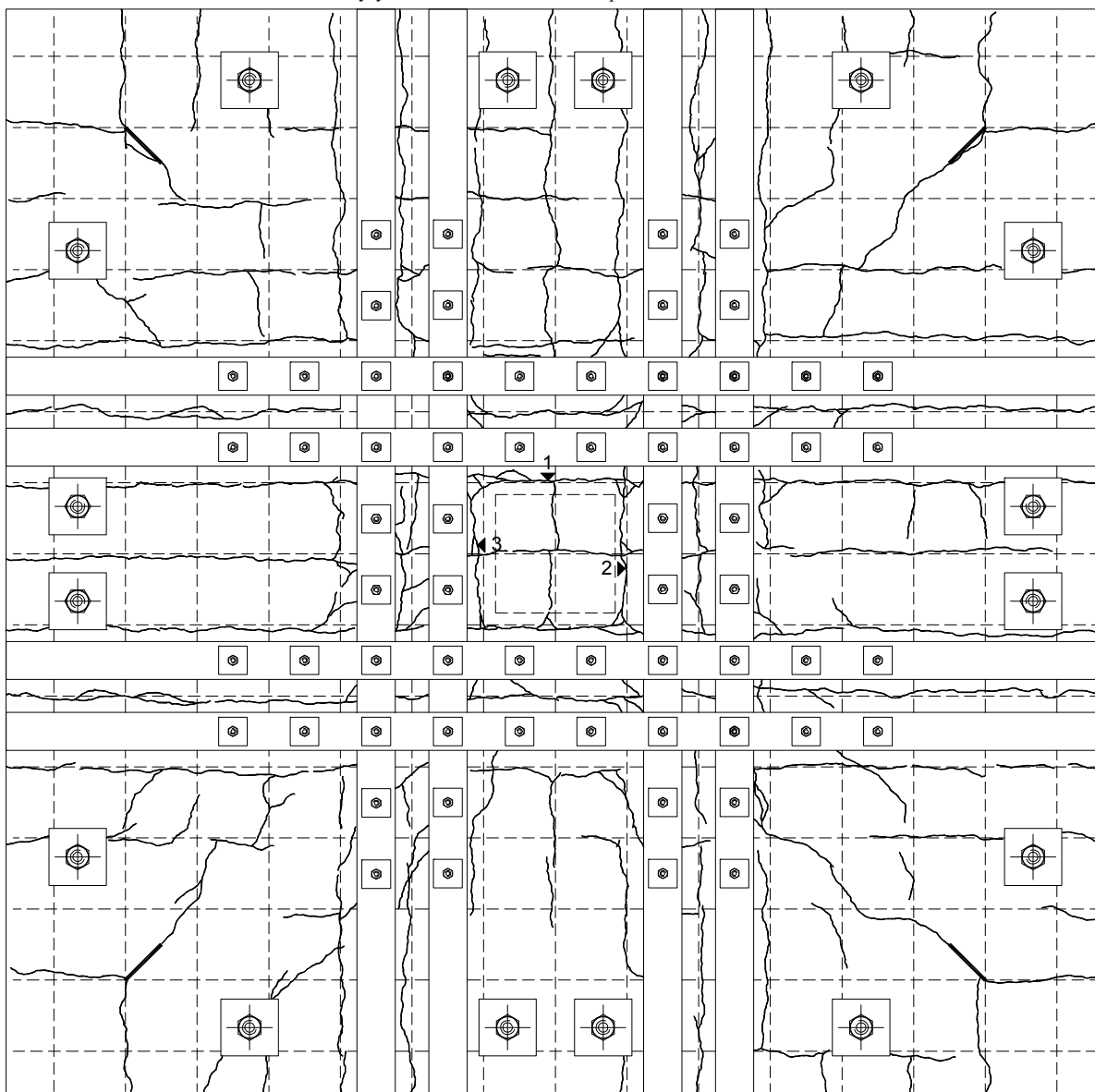


Rysy – faza początkowa / Cracks pattern – initial stage



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
150	0,20	0,05	-
200	0,20	0,10	0,05
250	0,25	0,20	0,10

Rysy – faza zniszczenia / Cracks pattern after failure



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
150	0,20	0,05	-
200	0,20	0,10	0,05
250	0,25	0,20	0,10
250	0,25	0,20	0,10
300	0,30	0,25	0,15
350	0,35	0,35	0,15
400	0,50	0,40	0,20
450	0,60	0,50	0,20
500	0,65	0,60	0,25
550	0,70	0,70	0,25
600	0,70	0,80	0,30
650	0,75	0,90	0,30

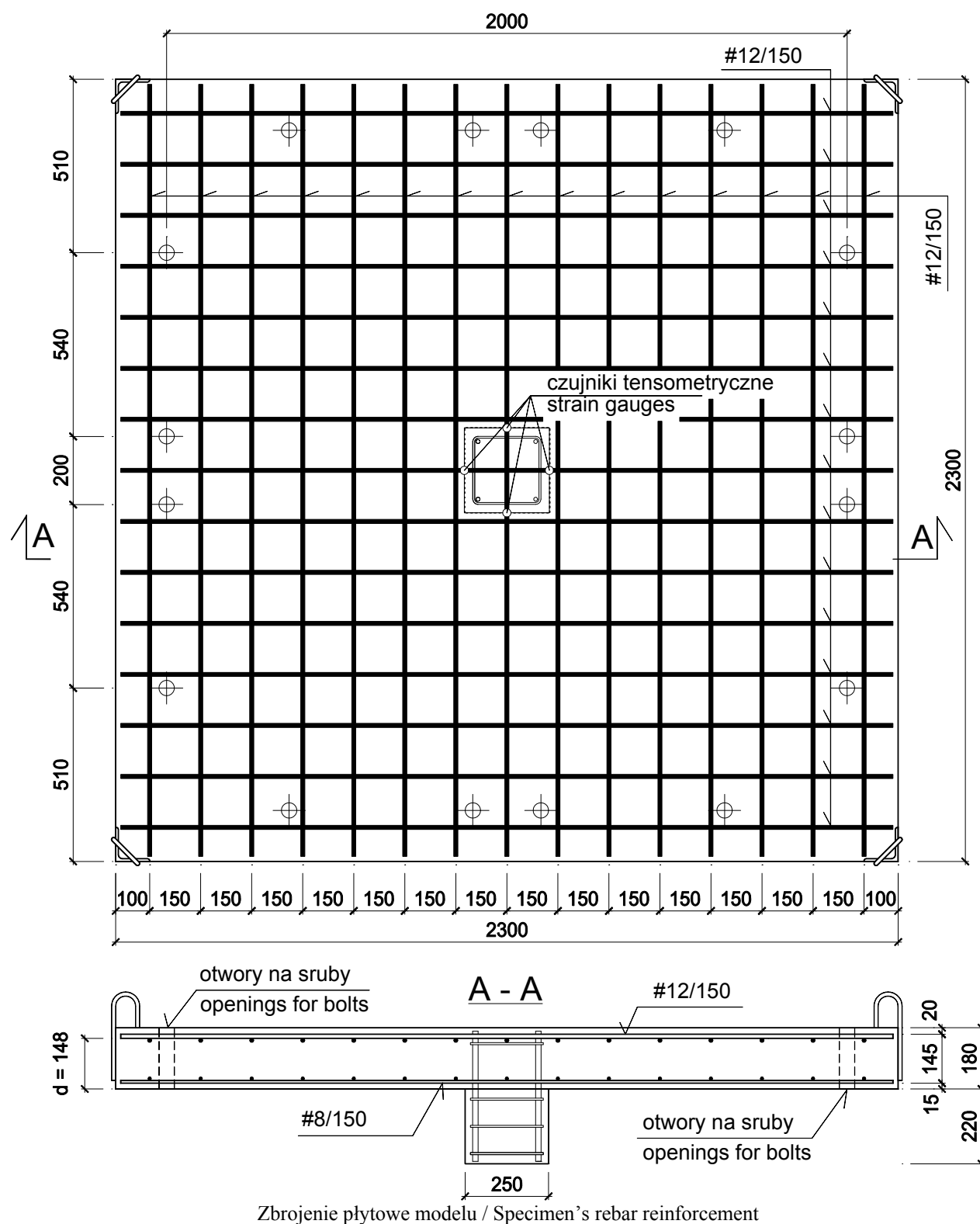
Dane / Data

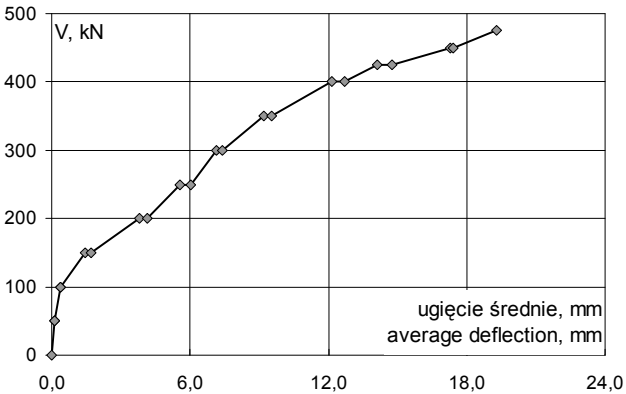
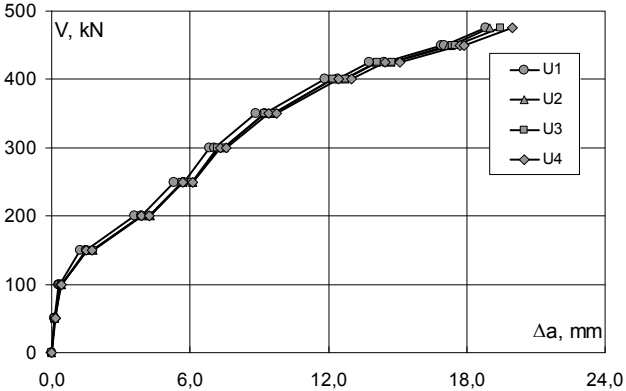
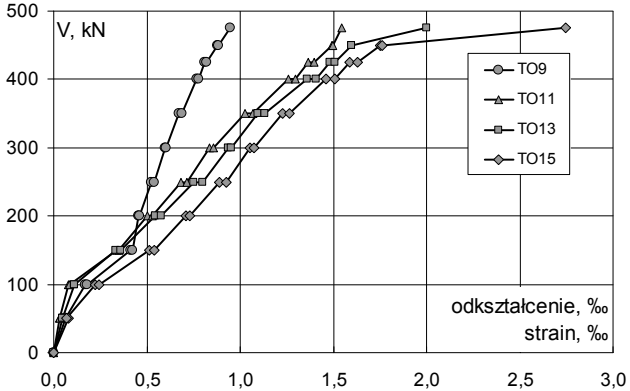
$f_{c,cube} = 47,0\text{MPa}$, $f_{cm} = 38,9\text{MPa}$, $f_{sp} = 3,70\text{MPa}$, E_{cm} nie badano

$f_{y,h} = 580,8\text{MPa}$, $f_{y,l} = 565,5\text{MPa}$, $f_{ym} = 573,2\text{MPa}$, $A_{sm} = 1,113\text{cm}^2$ (#12)

wysokość nominalna / nominal effective depth of a cross-section $d = 14,8\text{cm}$ (pomierzona / measured $14,69\text{cm}$)

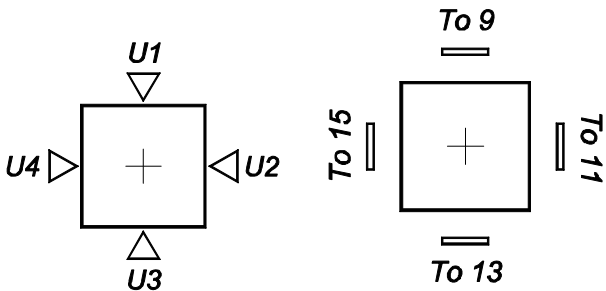
nośność eksperymentalna / experimental load capacity $V_{exp} = 475\text{kN}$

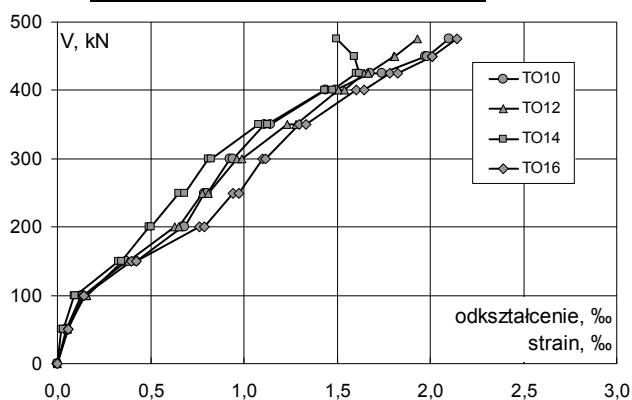
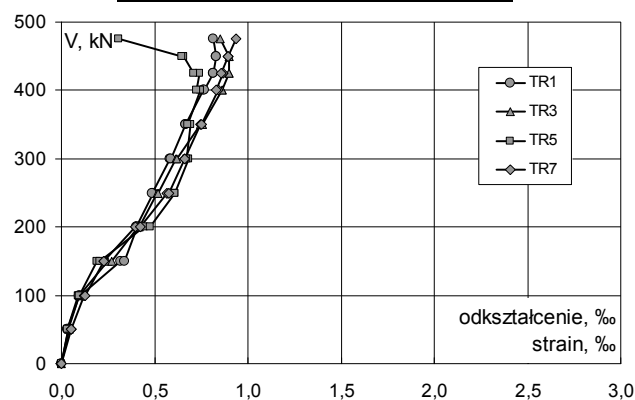


[illegible][illegible]

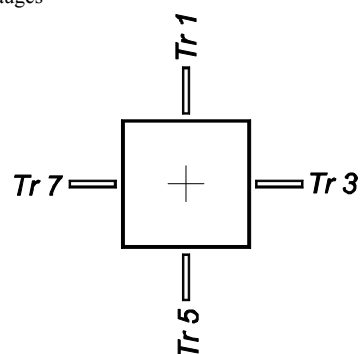
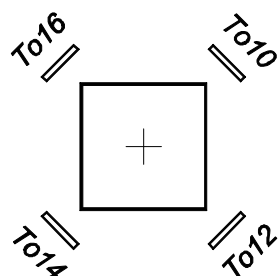
Lokalizacja czujników „U”
Location of „U” gauges

Lokalizacja czujników „T”
Location of “T” gauges



[illegible][illegible]

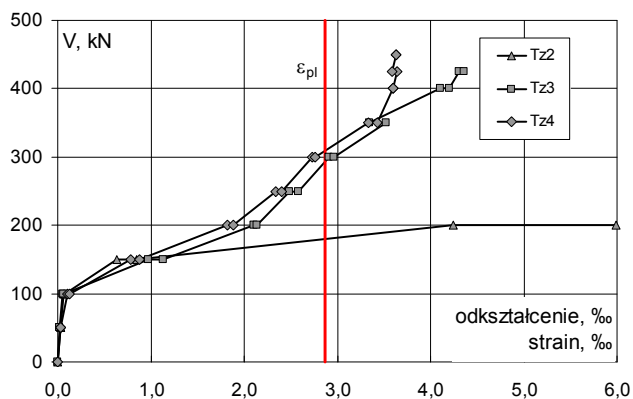
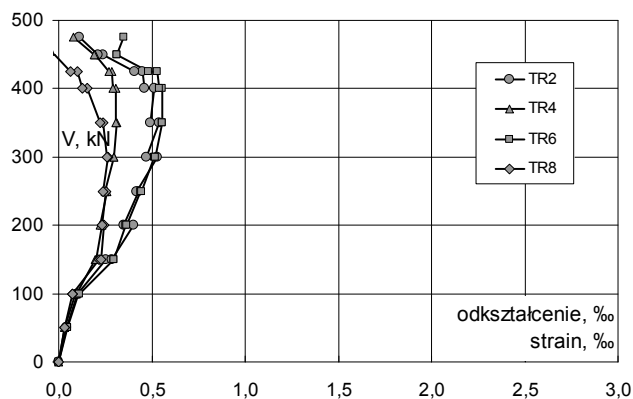
Lokalizacja czujników / Location of gauges



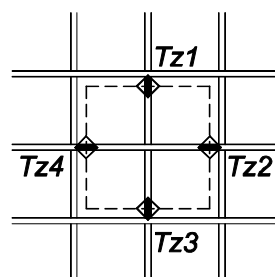
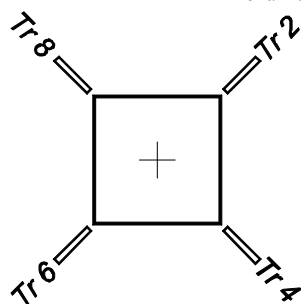
S-3

Odkształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR2	TR4	TR6	TR8
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,11	0,044	0,033	0,047
	k		0,043	0,031	0,046
100	p	0,21	0,098	0,090	0,108
	k		0,101	0,094	0,113
150	p	0,32	0,256	0,194	0,294
	k		0,286	0,201	0,298
200	p	0,42	0,400	0,231	0,358
	k		0,349	0,223	0,364
250	p	0,53	0,427	0,257	0,440
	k		0,416	0,248	0,445
300	p	0,63	0,531	0,298	0,514
	k		0,473	0,294	0,518
350	p	0,74	0,540	0,314	0,557
	k		0,490	0,309	0,556
400	p	0,84	0,512	0,307	0,557
	k		0,462	0,289	0,538
425	p	0,89	0,449	0,288	0,527
	k		0,405	0,268	0,481
450	p	0,95	0,236	0,195	0,311
	k		0,212	0,189	0,311
475	p	1,00	0,110	0,080	0,348
	k				-0,062

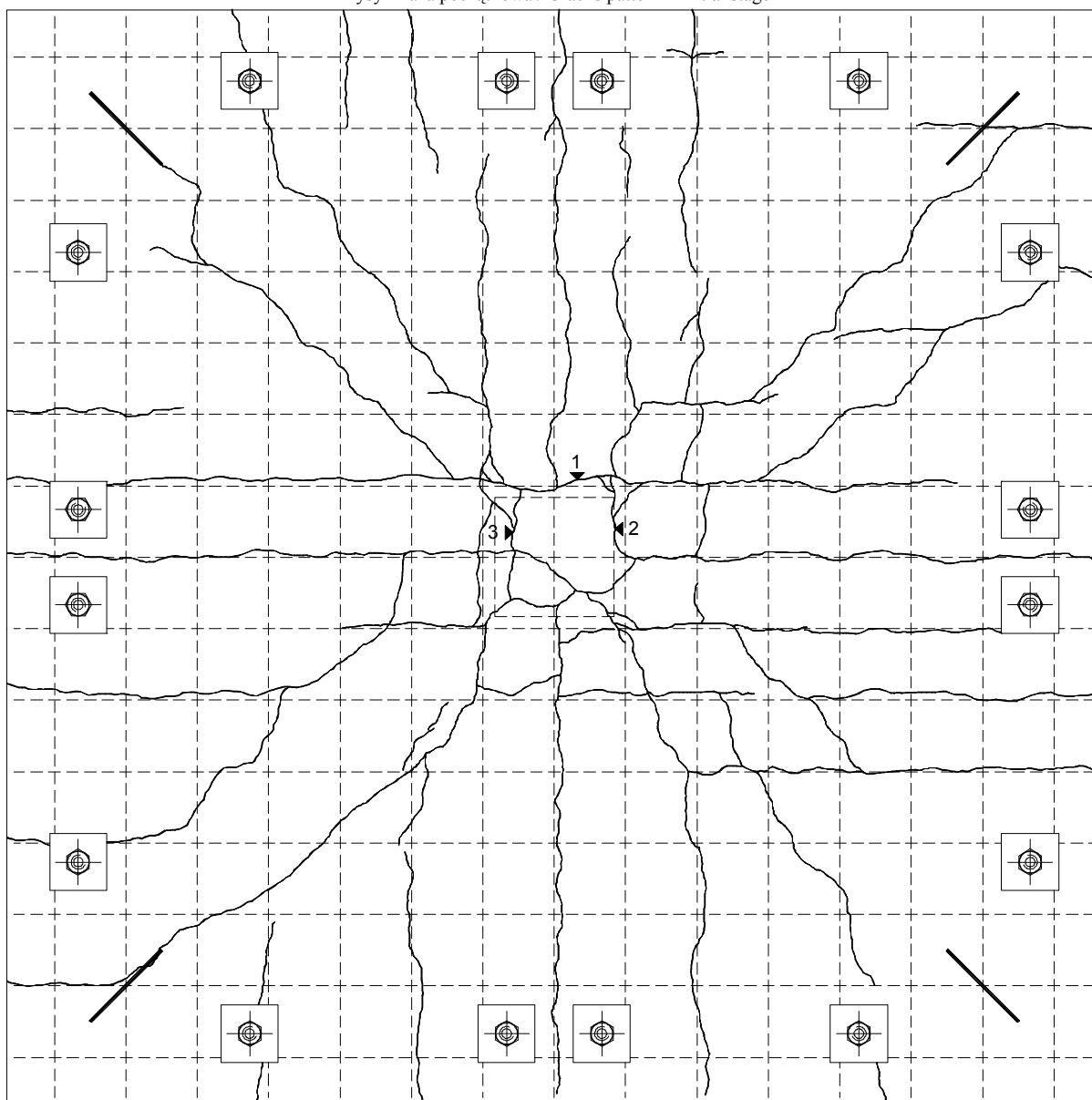
Odkształcenia stali zbrojeniowej Strain of reinforcement bars					
V	V/V _{exp}	Tz1	Tz2	Tz3	Tz4
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,11	0,027	0,026	0,029
	k		0,027	0,023	0,030
100	p	0,21	0,065	0,057	0,109
	k		0,073	0,067	0,125
150	p	0,32	0,637	0,970	0,786
	k		0,848	1,127	0,879
200	p	0,42	4,248	2,105	1,824
	k		5,992	2,142	1,881
250	p	0,53	2,492	2,337	2,337
	k		2,577	2,400	2,400
300	p	0,63	2,915	2,733	2,733
	k		2,961	2,760	2,760
350	p	0,74	3,525	3,329	3,329
	k		3,340	3,432	3,432
400	p	0,84	4,104	3,596	3,596
	k		4,206	3,597	3,597
425	p	0,89	4,310	3,640	3,640
	k		4,356	3,590	3,590
450	p	0,95		3,626	3,626
	k			3,625	3,625



Lokalizacja czujników / Location of gauges

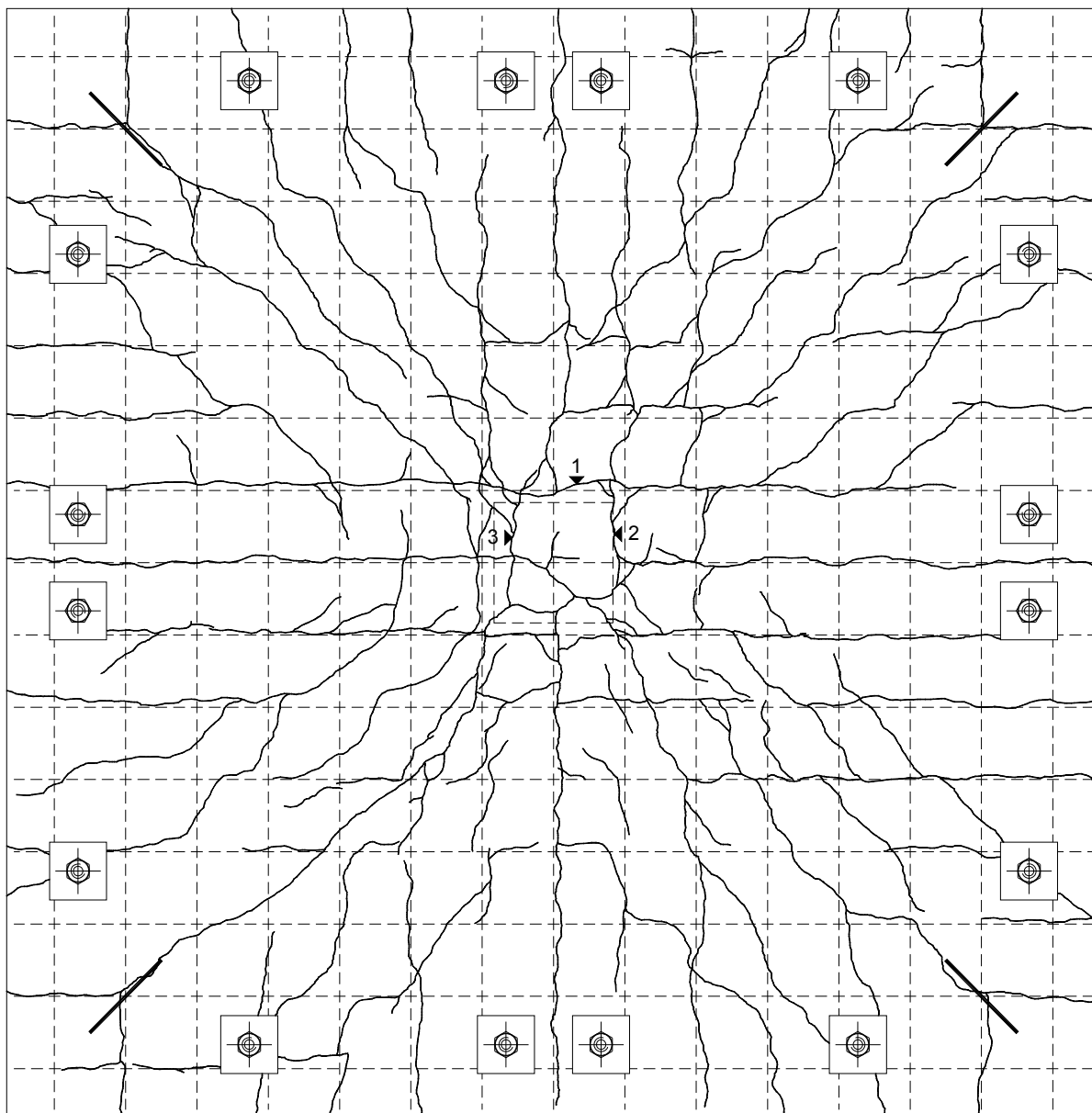


Rysy – faza początkowa / Cracks pattern – initial stage



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
150	0,15	0,15	0,20
200	0,50	0,40	0,55

Rysy – faza zniszczenia / Cracks pattern after failure



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
150	0,15	0,15	0,20
200	0,50	0,40	0,55
250	0,75	0,60	0,70
250	0,80	0,70	0,75
300	1,10	1,00	0,90
350	1,30	1,10	1,00
400	1,90	1,50	1,20
425	2,10	2,00	1,40
450	3,00	2,60	1,80

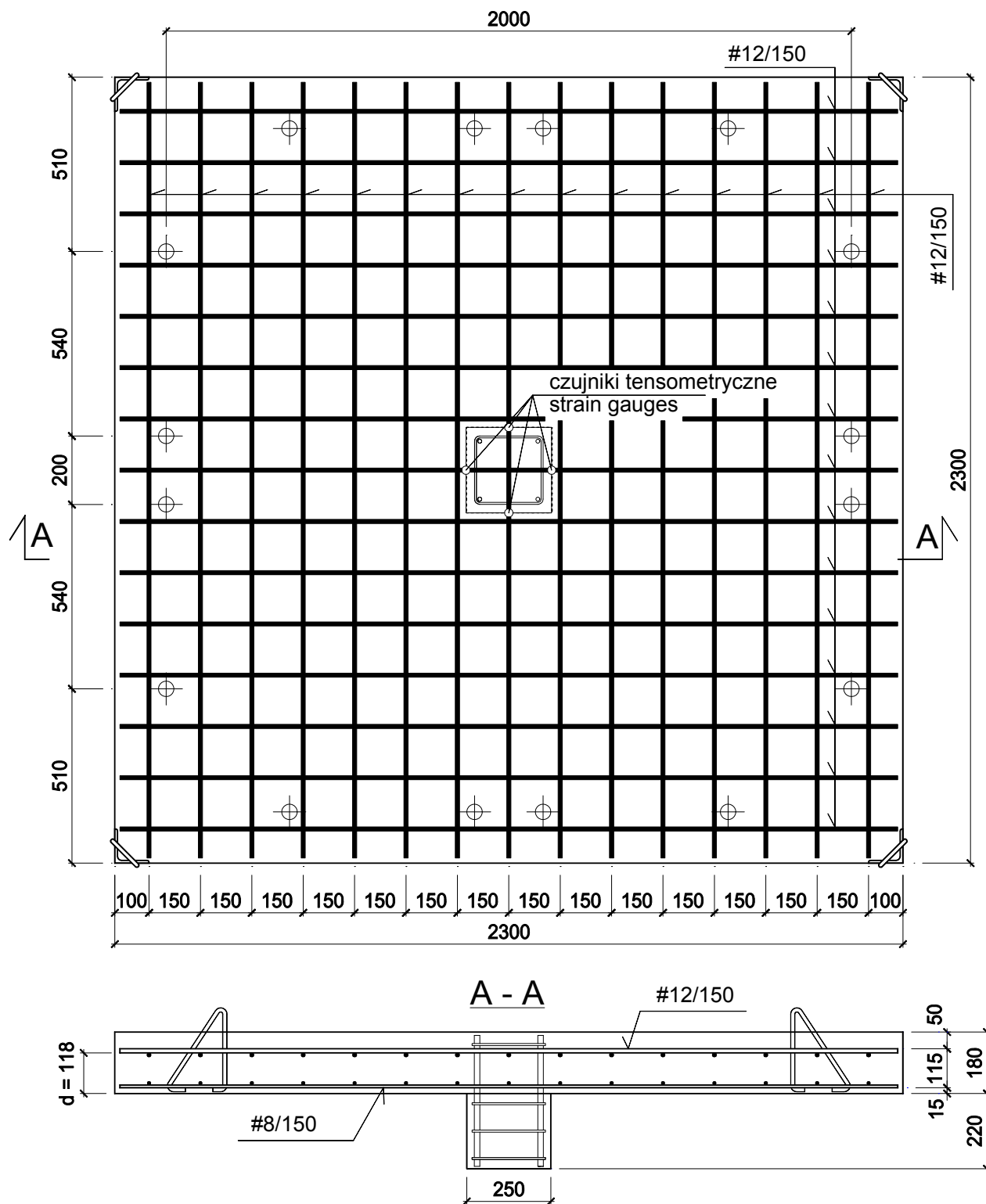
Dane / Data

$f_{c,cube} = 45,5\text{MPa}$, $f_{cm} = 40,2\text{MPa}$, $f_{sp} = 3,70\text{MPa}$, E_{cm} nie badano

$f_{y,h} = 580,8\text{MPa}$, $f_{y,l} = 565,5\text{MPa}$, $f_{ym} = 573,2\text{MPa}$, $A_{sm} = 1,113\text{cm}^2$ (#12)

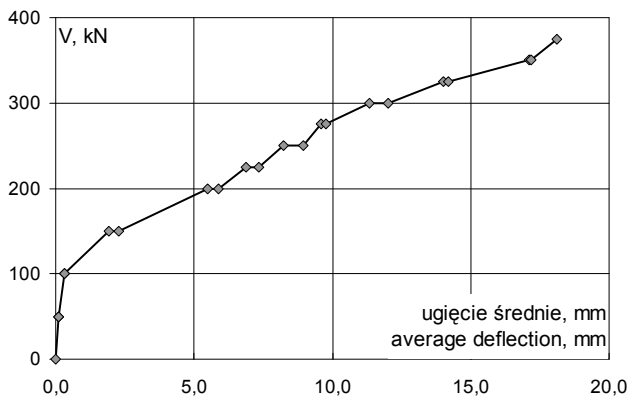
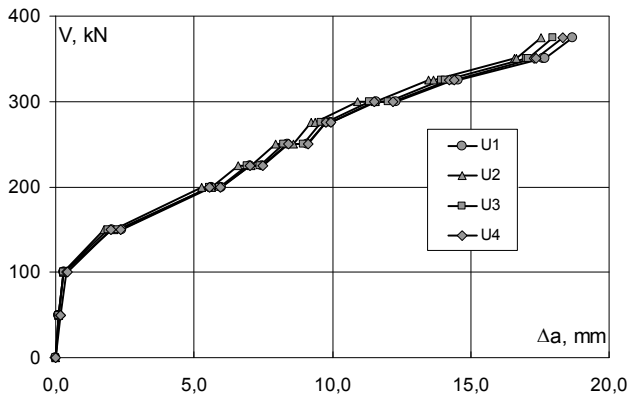
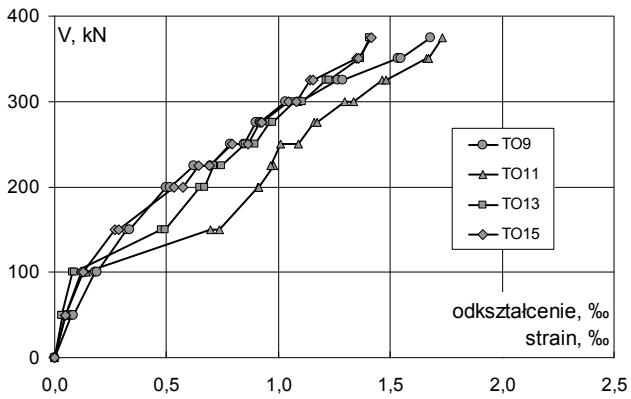
wysokość nominalna / nominal effective depth of a cross-section $d = 11,8\text{cm}$ (pomierzona / measured 11,84cm)

nośność eksperymentalna / experimental load capacity $V_{exp} = 367\text{kN}$



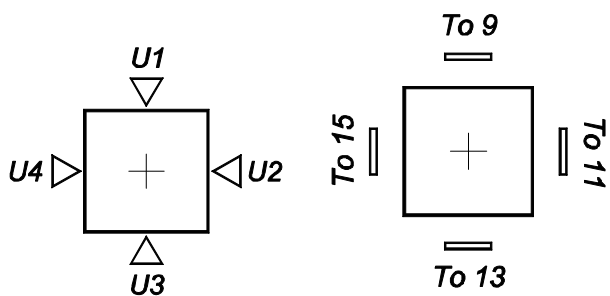
Zbrojenie płytowe modelu / Specimen's rebar reinforcement

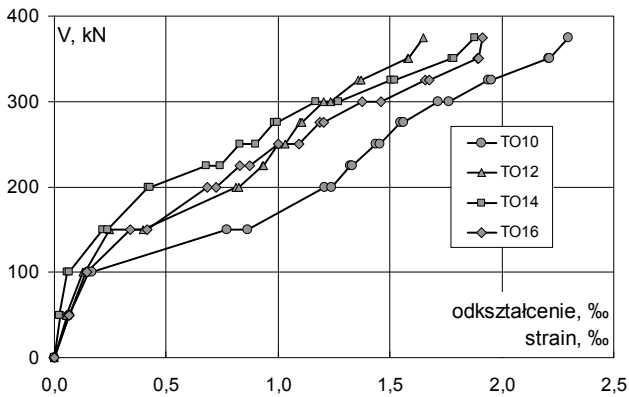
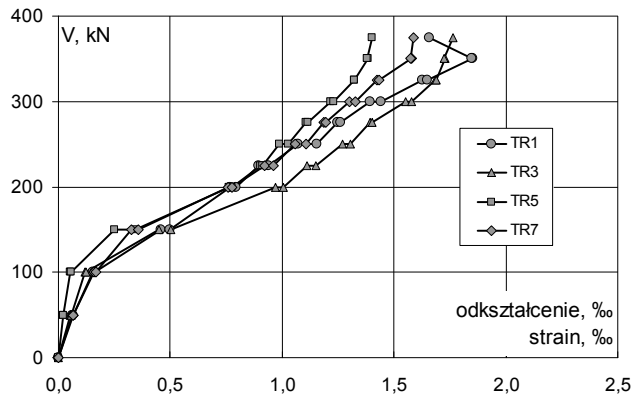
S-4

[illegible][illegible]

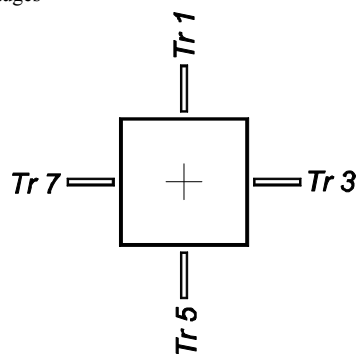
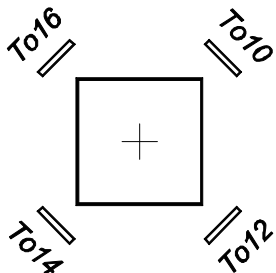
Lokalizacja czujników „U”
Location of „U” gauges

Lokalizacja czujników „T”
Location of “T” gauges



[illegible][illegible]

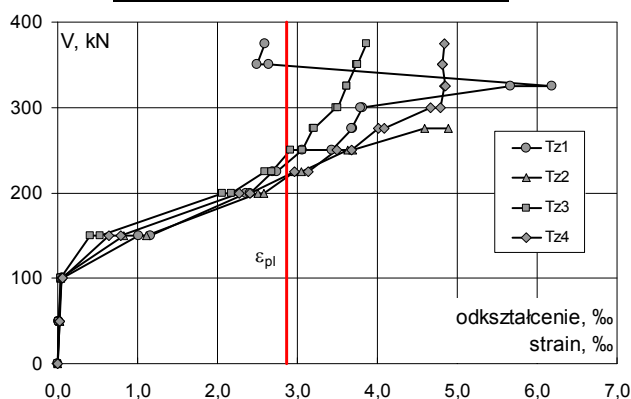
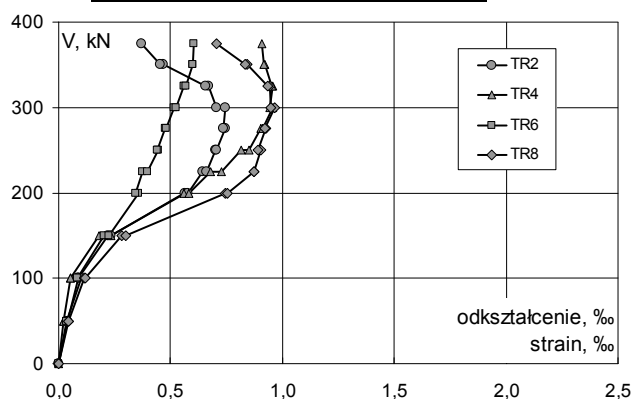
Lokalizacja czujników / Location of gauges



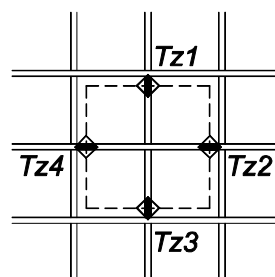
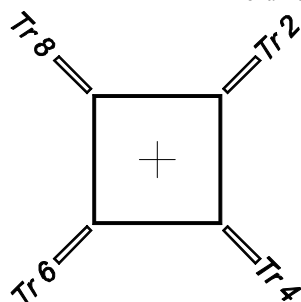
S-4

Odkształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR2	TR4	TR6	TR8
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,13	0,039	0,021	0,035
	k		0,040	0,022	0,036
100	p	0,27	0,088	0,053	0,100
	k		0,088	0,055	0,084
150	p	0,40	0,222	0,180	0,203
	k		0,234	0,232	0,223
200	p	0,53	0,564	0,559	0,357
	k		0,578	0,584	0,346
225	p	0,60	0,644	0,680	0,375
	k		0,662	0,727	0,396
250	p	0,67	0,703	0,815	0,447
	k		0,707	0,853	0,441
275	p	0,73	0,743	0,902	0,475
	k		0,736	0,913	0,479
300	p	0,80	0,745	0,956	0,515
	k		0,706	0,943	0,524
325	p	0,87	0,671	0,956	0,559
	k		0,659	0,952	0,569
350	p	0,93	0,466	0,920	0,600
	k		0,454	0,916	0,598
375	p	1,00	0,369	0,907	0,603
	k				0,707

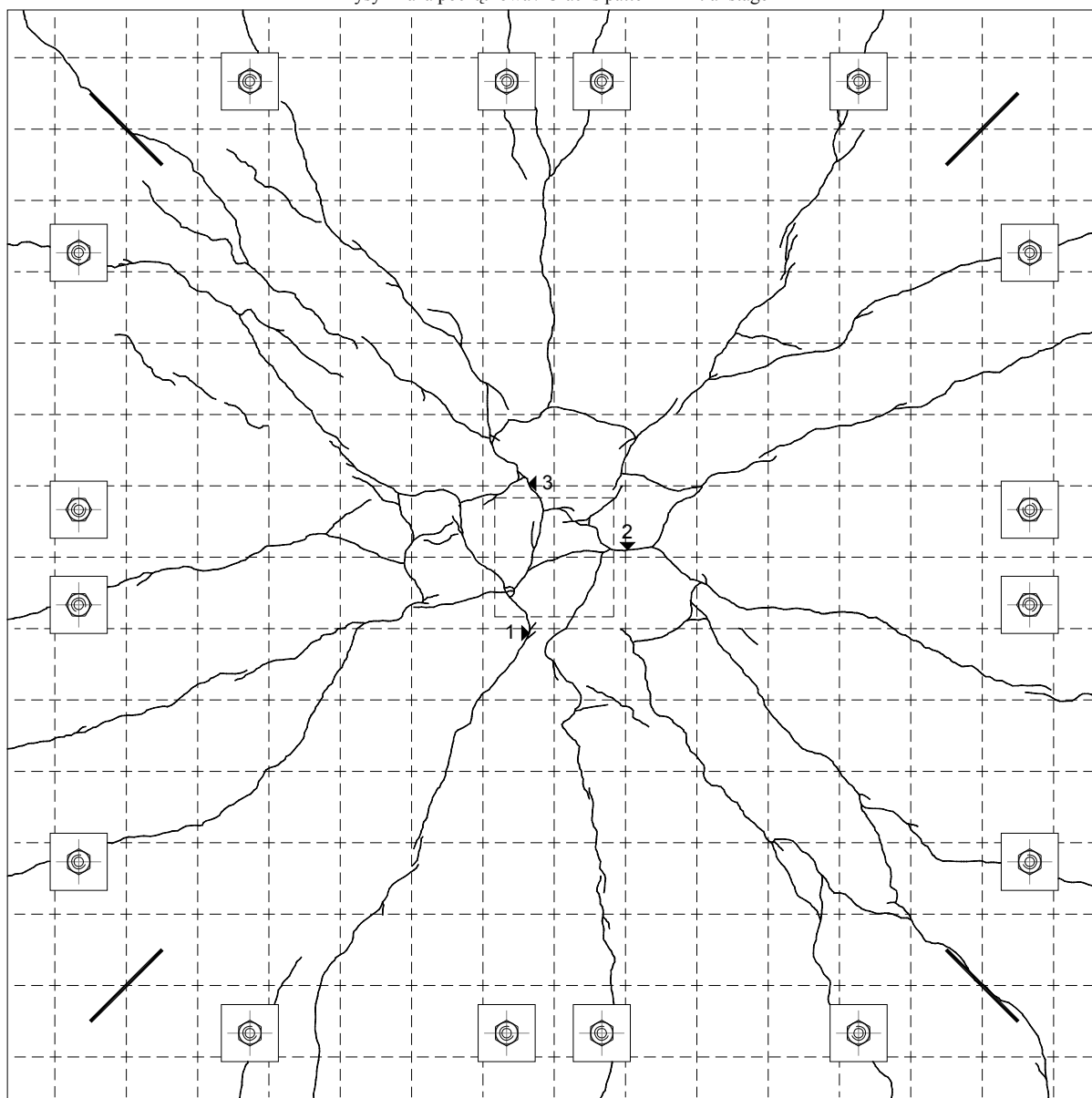
Odkształcenia stali zbrojeniowej Strain of reinforcement bars					
V	V/V _{exp}	Tz1	Tz2	Tz3	Tz4
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,13	0,012	0,021	0,015
	k		0,014	0,023	0,016
100	p	0,27	0,045	0,041	0,036
	k		0,056	0,042	0,035
150	p	0,40	1,016	0,831	0,407
	k		1,155	1,105	0,529
200	p	0,53	2,354	2,502	2,060
	k		2,413	2,584	2,169
225	p	0,60	2,689	2,965	2,597
	k		2,743	3,051	2,681
250	p	0,67	3,058	3,633	2,909
	k		3,428	3,695	3,064
275	p	0,73	3,690	4,598	3,195
	k		3,682	4,893	3,205
300	p	0,80	3,815	awaria czujnika damaged gauge	3,486
	k		3,793		4,670
325	p	0,87	5,662		3,621
	k		6,189		4,844
350	p	0,93	2,648		3,745
	k		2,488		4,817
375	p	1,00	2,593		3,753
	k				4,815



Lokalizacja czujników / Location of gauges

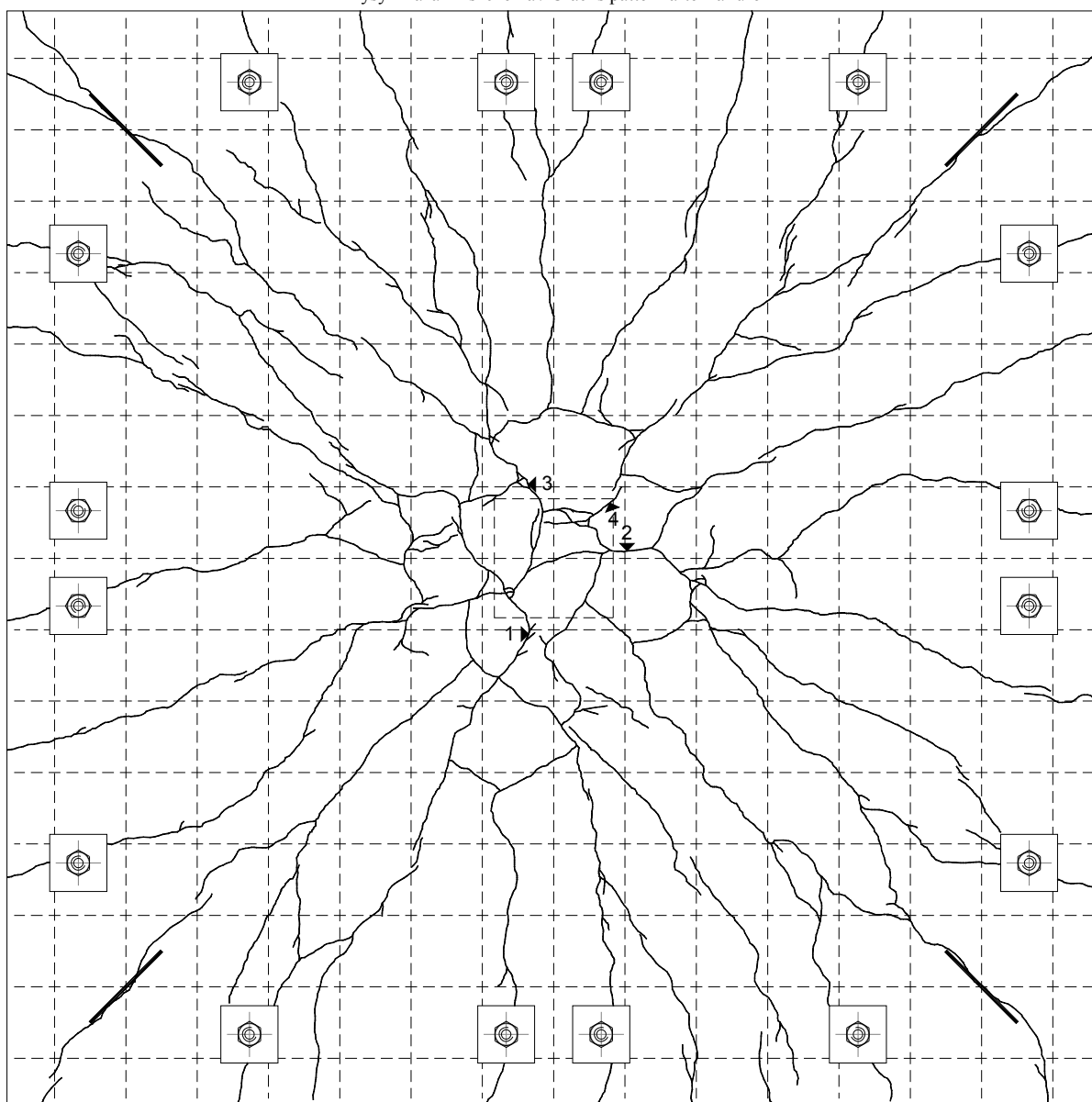


Rysy – faza początkowa / Cracks pattern – initial stage



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
150	0,20	0,30	0,35
200	0,80	0,50	0,70

Rysy – faza zniszczenia / Cracks pattern after failure



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]			
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3	rysa 4 / crack No. 4
150	0,20	0,30	0,35	-
200	0,80	0,50	0,70	-
225	1,20	0,70	1,00	-
250	1,40	0,80	1,10	-
250	1,50	0,90	1,20	-
275	1,50	0,90	1,30	-
300	1,90	1,10	1,40	2,40
350	2,40	1,40	1,50	3,00

Dane / Data

beton / concrete

(#12)

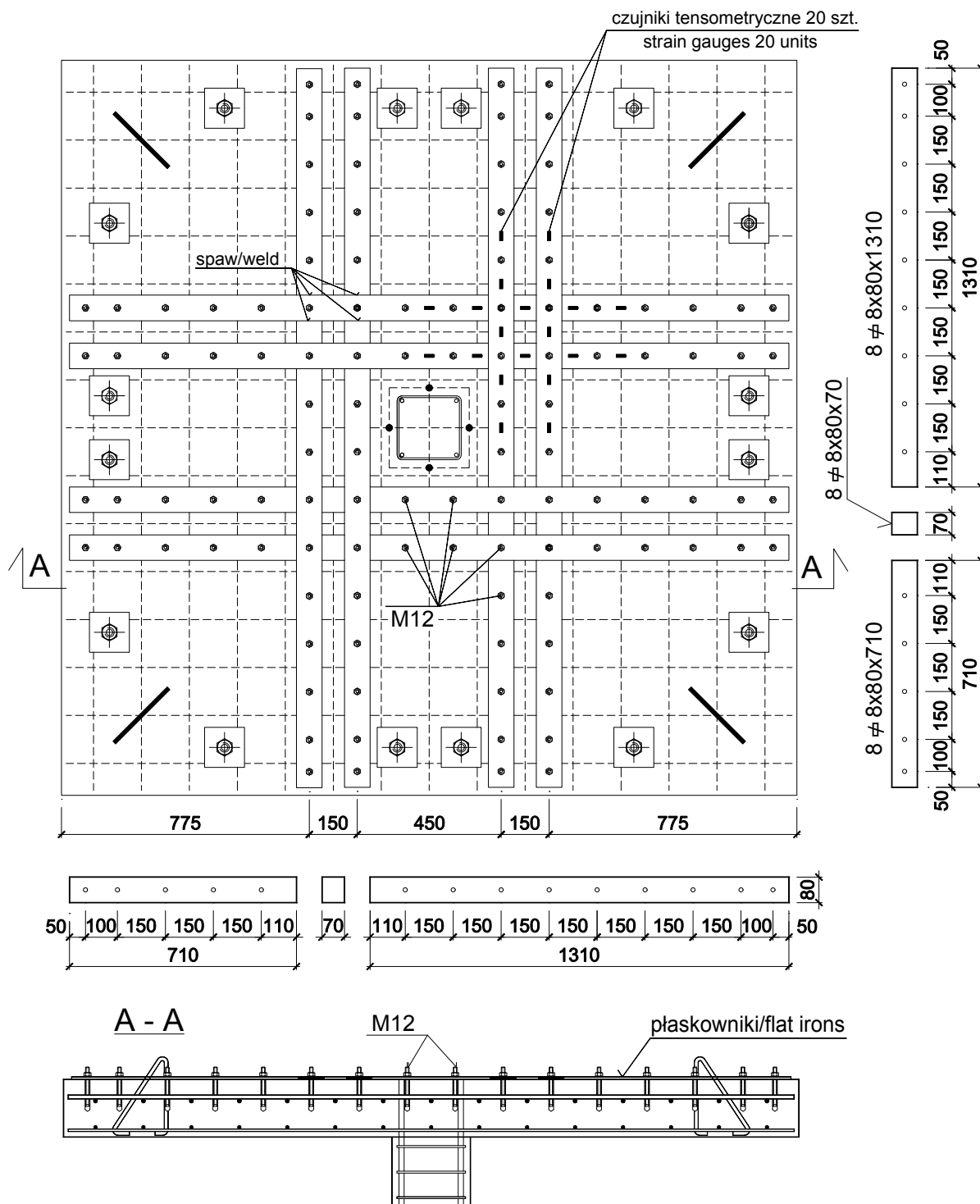
(płaskownik / flat iron)

 $f_{c,cube} = 46,0\text{MPa}$, $f_{cm} = 40,5\text{MPa}$, $f_{sp} = 4,20\text{MPa}$, E_{cm} nie badano

 $f_{y,h} = 580,8\text{MPa}$, $f_{y,l} = 565,5\text{MPa}$, $f_{ym} = 573,2\text{MPa}$, $A_{sm} = 1,113\text{cm}^2$
 $f_{y,h} = 338,0\text{MPa}$, $f_{y,l} = 308,0\text{MPa}$, $f_{ym} = 316,0\text{MPa}$, $E_s = 206000\text{MPa}$, $\varepsilon_y = 1,534\%$
 $A_{sm} = 6,400\text{cm}^2$ (pomiar / measure $6,480\text{cm}^2$)

 wysokość nominalna / nominal effective depth of cross-section $d = 11,8\text{cm}$ (pomierzona / measured $11,80\text{cm}$)

 nośność świadka / witness load capacity $V_s = 375,0\text{kN}$

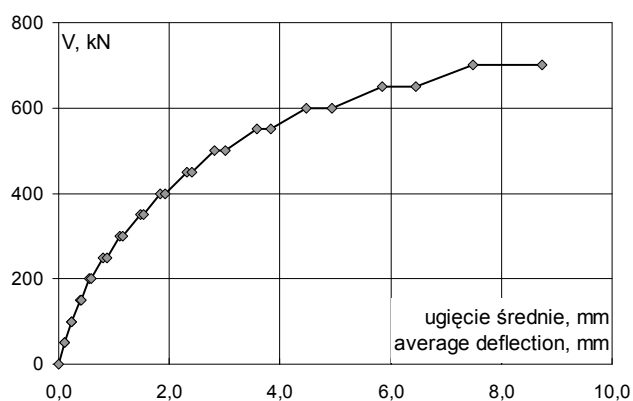
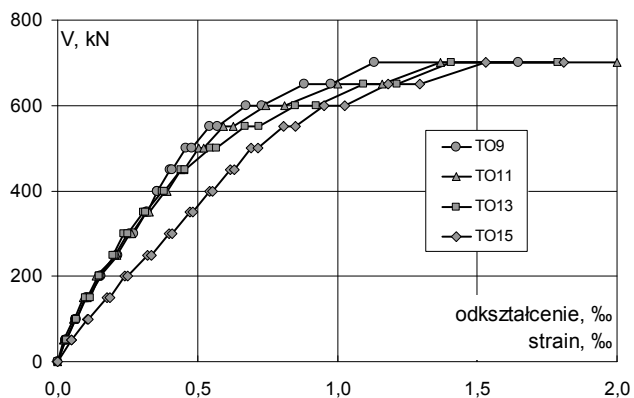
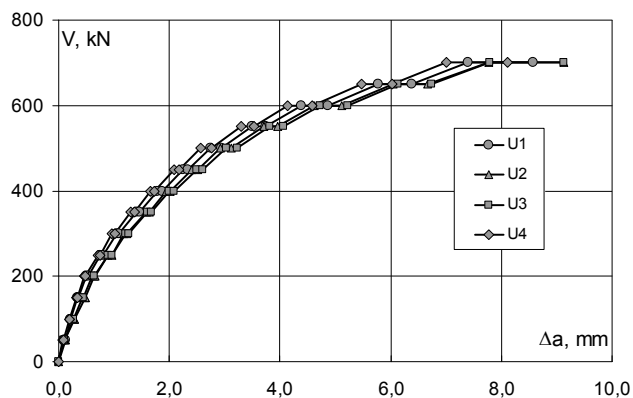
 nośność eksperymentalna / experimental load capacity $V_{exp} = 700\text{kN}$
 $V_{exp} / V_s = 1,87$


Rysunek konstrukcyjny modelu / Technical drawing of the specimen

WPSK-8'

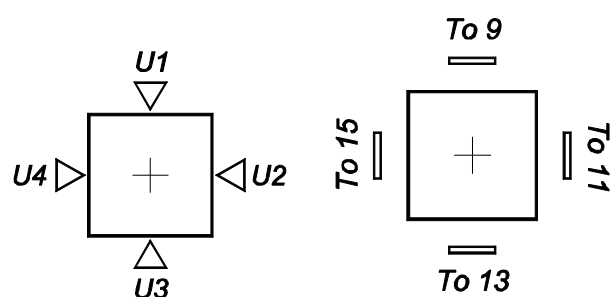
Ugięcia Deflections						
V	V/V _{exp}	U1	U2	U3	U4	średnie average
kN	-	Δa				mm
0	p	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
50	p	0,07	0,11	0,12	0,10	0,10
	k		0,12	0,11	0,08	0,11
100	p	0,14	0,21	0,28	0,26	0,24
	k		0,21	0,29	0,26	0,24
150	p	0,21	0,34	0,48	0,43	0,39
	k		0,35	0,49	0,44	0,41
200	p	0,29	0,50	0,65	0,61	0,56
	k		0,53	0,66	0,65	0,58
250	p	0,36	0,75	0,90	0,89	0,81
	k		0,81	0,96	0,95	0,87
300	p	0,43	1,04	1,18	1,22	1,10
	k		1,09	1,24	1,26	1,15
350	p	0,50	1,41	1,58	1,60	1,31
	k		1,47	1,65	1,68	1,37
400	p	0,57	1,78	1,94	2,00	1,65
	k		1,87	2,01	2,09	1,74
450	p	0,64	2,25	2,41	2,50	2,09
	k		2,34	2,51	2,60	2,18
500	p	0,71	2,74	2,93	3,02	2,57
	k		2,94	3,13	3,23	2,77
550	p	0,79	3,50	3,70	3,81	3,29
	k		3,75	3,95	4,07	3,53
600	p	0,86	4,39	4,62	4,73	4,14
	k		4,87	5,11	5,23	4,59
650	p	0,93	5,77	6,05	6,13	5,47
	k		6,38	6,67	6,73	6,03
700	p	1,00	7,40	7,77	7,79	7,01
	k		8,57	9,13	9,12	8,12

Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete						
V	V/V _{exp}	TO9	TO11	TO13	TO15	
kN	-	ε				‰
0	p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	p	0,029	0,022	0,027	0,048	
	k	0,027	0,021	0,030	0,051	
100	p	0,064	0,055	0,064	0,107	
	k	0,067	0,060	0,067	0,109	
150	p	0,103	0,093	0,100	0,175	
	k	0,109	0,105	0,115	0,186	
200	p	0,155	0,143	0,148	0,241	
	k	0,152	0,138	0,147	0,249	
250	p	0,214	0,211	0,203	0,322	
	k	0,212	0,205	0,199	0,335	
300	p	0,258	0,251	0,237	0,398	
	k	0,270	0,264	0,252	0,410	
350	p	0,319	0,319	0,308	0,472	
	k	0,322	0,327	0,313	0,482	
400	p	0,358	0,386	0,375	0,542	
	k	0,358	0,390	0,382	0,554	
450	p	0,402	0,440	0,441	0,617	
	k	0,408	0,451	0,456	0,631	
500	p	0,457	0,504	0,546	0,691	
	k	0,479	0,523	0,567	0,716	
550	p	0,542	0,593	0,671	0,806	
	k	0,573	0,628	0,721	0,851	
600	p	0,674	0,743	0,851	0,954	
	k	0,730	0,813	0,925	1,025	
650	p	0,883	1,001	1,092	1,181	
	k	0,976	1,162	1,213	1,295	
700	p	1,134	1,370	1,408	1,530	
	k	1,649	2,000	1,787	1,811	



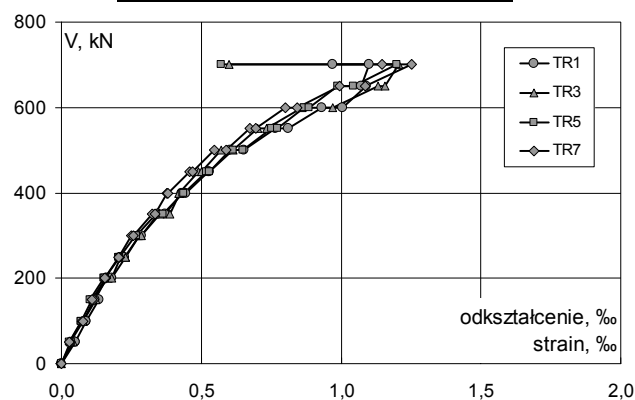
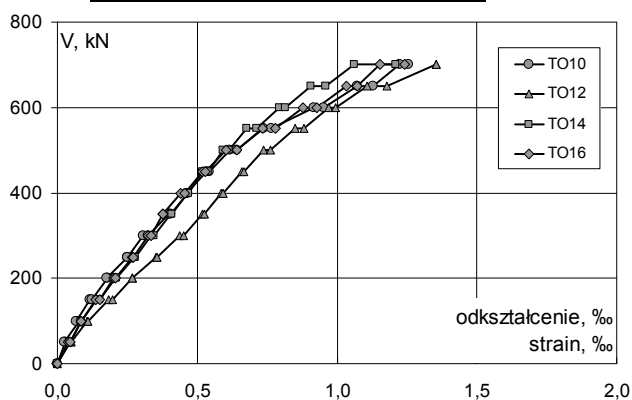
Lokalizacja czujników „U”
Location of „U” gauges

Lokalizacja czujników „T”
Location of „T” gauges

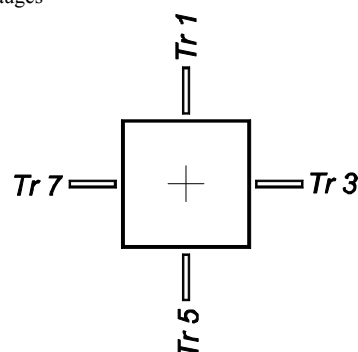
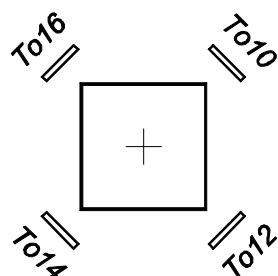


Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TO10	TO12	TO14	TO16
ε					
‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,027	0,047	0,043
	k		0,025	0,049	0,045
100	p	0,14	0,077	0,106	0,083
	k		0,067	0,111	0,085
150	p	0,21	0,117	0,184	0,140
	k		0,125	0,199	0,153
200	p	0,29	0,180	0,268	0,207
	k		0,177	0,267	0,211
250	p	0,36	0,250	0,353	0,276
	k		0,250	0,358	0,280
300	p	0,43	0,307	0,436	0,334
	k		0,323	0,453	0,347
350	p	0,50	0,400	0,520	0,404
	k		0,407	0,524	0,408
400	p	0,57	0,465	0,587	0,466
	k		0,463	0,593	0,469
450	p	0,64	0,533	0,659	0,519
	k		0,543	0,667	0,540
500	p	0,71	0,619	0,737	0,593
	k		0,643	0,761	0,613
550	p	0,79	0,736	0,850	0,677
	k		0,767	0,881	0,712
600	p	0,86	0,916	0,970	0,794
	k		0,951	0,993	0,814
650	p	0,93	1,073	1,106	0,906
	k		1,129	1,179	0,958
700	p	1,00	1,224	1,353	1,061
	k		1,255	1,355	1,211

Odształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR1	TR3	TR5	TR7
ε					
‰					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,051	0,041	0,034
	k		0,048	0,033	0,027
100	p	0,14	0,089	0,078	0,069
	k		0,087	0,079	0,070
150	p	0,21	0,134	0,122	0,111
	k		0,120	0,113	0,102
200	p	0,29	0,164	0,165	0,152
	k		0,180	0,181	0,155
250	p	0,36	0,213	0,229	0,203
	k		0,226	0,231	0,207
300	p	0,43	0,280	0,279	0,263
	k		0,285	0,285	0,269
350	p	0,50	0,346	0,352	0,340
	k		0,369	0,387	0,364
400	p	0,57	0,430	0,423	0,434
	k		0,443	0,419	0,439
450	p	0,64	0,524	0,490	0,519
	k		0,530	0,500	0,530
500	p	0,71	0,604	0,573	0,612
	k		0,652	0,615	0,650
550	p	0,79	0,764	0,702	0,752
	k		0,811	0,735	0,772
600	p	0,86	0,932	0,861	0,867
	k		1,005	0,969	0,886
650	p	0,93	1,089	1,131	0,989
	k		1,072	1,158	1,044
700	p	1,00	1,100	1,208	1,201
	k		0,971	0,600	0,571



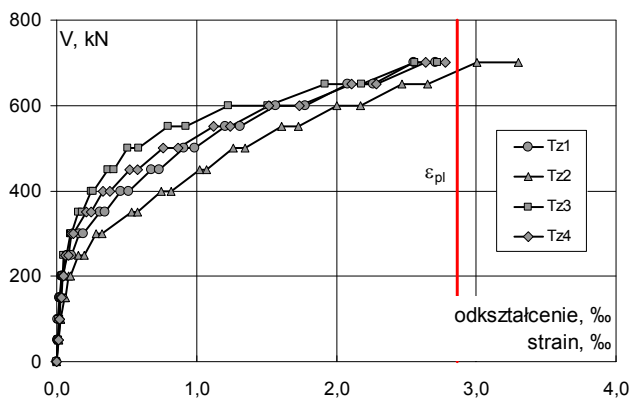
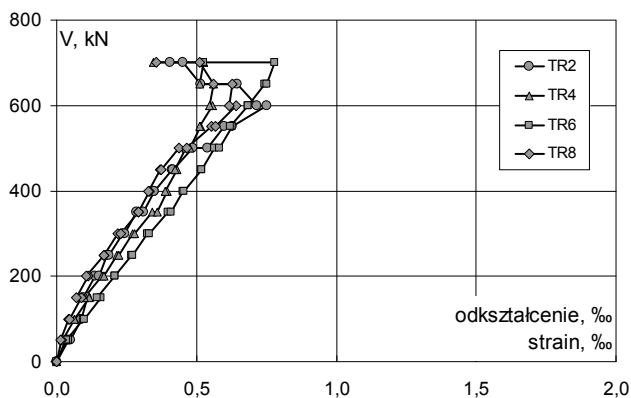
Lokalizacja czujników / Location of gauges



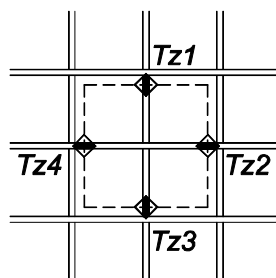
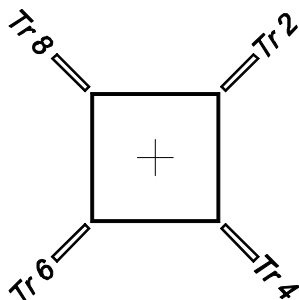
WPSK-8'

Odkształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR2	TR4	TR6	TR8
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,039	0,030	0,044
	k		0,051	0,020	0,036
100	p	0,14	0,088	0,064	0,094
	k		0,087	0,063	0,099
150	p	0,21	0,110	0,116	0,157
	k		0,096	0,099	0,146
200	p	0,29	0,137	0,161	0,207
	k		0,152	0,169	0,209
250	p	0,36	0,179	0,216	0,268
	k		0,188	0,221	0,272
300	p	0,43	0,236	0,272	0,324
	k		0,242	0,277	0,332
350	p	0,50	0,285	0,341	0,397
	k		0,312	0,361	0,410
400	p	0,57	0,348	0,394	0,451
	k		0,349	0,388	0,455
450	p	0,64	0,412	0,429	0,517
	k		0,417	0,425	0,520
500	p	0,71	0,486	0,461	0,564
	k		0,539	0,476	0,583
550	p	0,79	0,599	0,515	0,627
	k		0,627	0,510	0,622
600	p	0,86	0,751	0,556	0,684
	k		0,717	0,547	0,684
650	p	0,93	0,646	0,560	0,743
	k		0,514	0,512	0,752
700	p	1,00	0,450	0,526	0,780
	k		0,405	0,346	0,527

Odkształcenia stali zbrojeniowej Strain of reinforcement bars					
V	V/V _{exp}	Tz1	Tz2	Tz3	Tz4
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,005	0,011	0,008
	k		0,008	0,015	0,011
100	p	0,14	0,011	0,029	0,018
	k		0,010	0,028	0,016
150	p	0,21	0,018	0,058	0,021
	k		0,024	0,062	0,025
200	p	0,29	0,035	0,088	0,034
	k		0,044	0,101	0,042
250	p	0,36	0,076	0,153	0,050
	k		0,105	0,196	0,072
300	p	0,43	0,161	0,285	0,099
	k		0,190	0,325	0,107
350	p	0,50	0,310	0,533	0,157
	k		0,349	0,581	0,180
400	p	0,57	0,461	0,751	0,249
	k		0,513	0,816	0,260
450	p	0,64	0,678	1,022	0,366
	k		0,734	1,074	0,407
500	p	0,71	0,907	1,263	0,508
	k		0,990	1,344	0,589
550	p	0,79	1,206	1,610	0,798
	k		1,312	1,727	0,926
600	p	0,86	1,564	2,002	1,226
	k		1,778	2,176	1,513
650	p	0,93	2,083	2,470	1,922
	k		2,265	2,652	2,178
700	p	1,00	2,555	3,006	2,561
	k		2,707	3,302	2,725

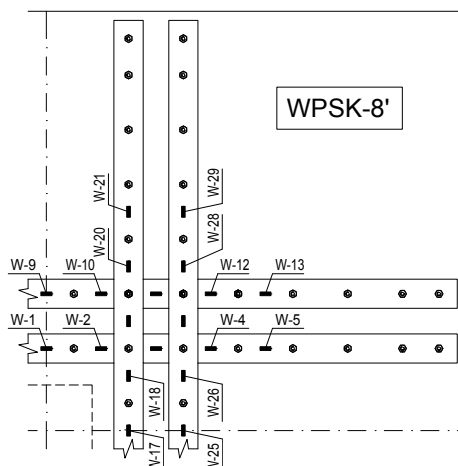
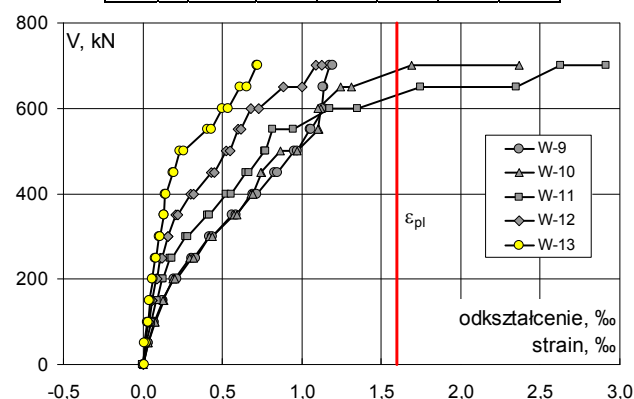
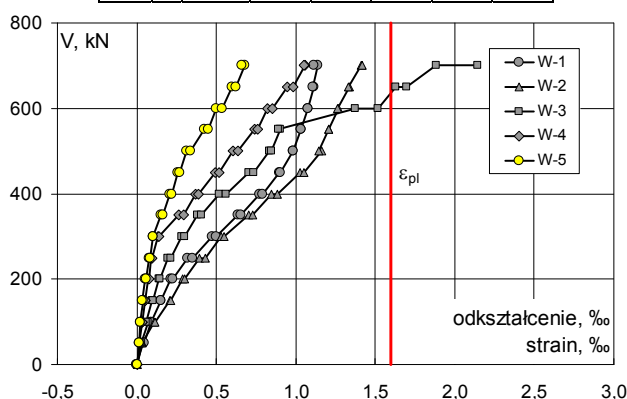


Lokalizacja czujników / Location of gauges



Odkształcenia taśm CFRP Strain of lat iron						
V	V/V _{exp}	W1	W2	W3	W4	W5
ε						
‰						
kN	-					
0	p	0,00	-0,005	0,000	0,000	0,002
50	p	0,07	0,040	0,034	0,027	0,015
	k		0,043	0,036	0,028	0,012
100	p	0,14	0,089	0,109	0,068	0,031
	k		0,089	0,112	0,058	0,031
150	p	0,21	0,149	0,210	0,096	0,052
	k		0,153	0,213	0,100	0,034
200	p	0,29	0,211	0,290	0,139	0,072
	k		0,224	0,303	0,146	0,078
250	p	0,36	0,317	0,396	0,194	0,091
	k		0,349	0,432	0,212	0,098
300	p	0,43	0,475	0,528	0,283	0,133
	k		0,501	0,551	0,302	0,142
350	p	0,50	0,638	0,703	0,384	0,263
	k		0,657	0,728	0,405	0,293
400	p	0,57	0,771	0,849	0,520	0,368
	k		0,791	0,886	0,564	0,388
450	p	0,64	0,895	1,027	0,705	0,492
	k		0,905	1,050	0,737	0,516
500	p	0,71	0,981	1,162	0,835	0,604
	k		0,985	1,144	0,846	0,637
550	p	0,79	1,033	1,205	0,901	0,743
	k		1,032	1,206	0,893	0,760
600	p	0,86	1,079	1,266	1,374	0,823
	k		1,075	1,262	1,519	0,854
650	p	0,93	1,115	1,338	1,630	0,945
	k		1,107	1,328	1,699	0,983
700	p	1,00	1,139	1,413	1,883	1,055
	k		1,114	1,417	2,143	1,052

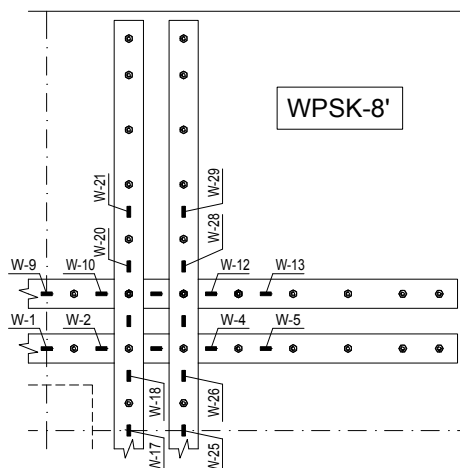
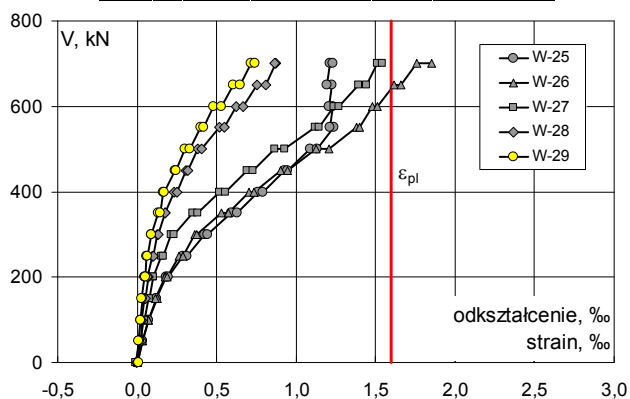
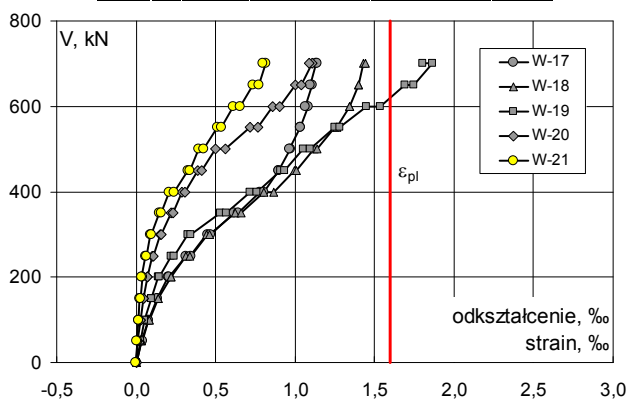
Odkształcenia taśm CFRP Strain of flat iron						
V	V/V _{exp}	W9	W10	W11	W12	W13
ε						
‰						
kN	-					
0	p	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
50	p	0,07	0,062	0,054	0,034	0,026
	k		0,067	0,053	0,037	0,026
100	p	0,14	0,144	0,115	0,079	0,052
	k		0,177	0,122	0,082	0,055
150	p	0,21	0,315	0,216	0,128	0,082
	k		0,366	0,232	0,136	0,084
200	p	0,29	0,645	0,430	0,225	0,125
	k		0,661	0,436	0,228	0,128
250	p	0,36	0,869	0,656	0,382	0,187
	k		0,957	0,715	0,452	0,207
300	p	0,43	1,104	0,881	0,621	0,273
	k		1,132	0,918	0,672	0,301
350	p	0,50	1,302	1,128	0,860	0,429
	k		1,345	1,177	0,906	0,470
400	p	0,57	1,492	1,348	1,060	0,592
	k		1,568	1,412	1,111	0,636
450	p	0,64	1,747	1,593	1,269	0,766
	k		1,799	1,645	1,332	0,817
500	p	0,71	1,987	1,851	1,497	0,949
	k		2,032	1,896	1,557	0,990
550	p	0,79	2,215	2,094	1,745	1,118
	k		2,249	2,128	1,796	1,153
600	p	0,86	2,435	2,357	1,965	1,265
	k		2,487	2,412	2,008	1,285
650	p	0,93	2,618	2,552	2,094	1,348
	k		2,602	2,543	2,099	1,346
700	p	1,00	3,585	2,761	2,228	1,430
	k		3,641	2,865	2,299	1,455



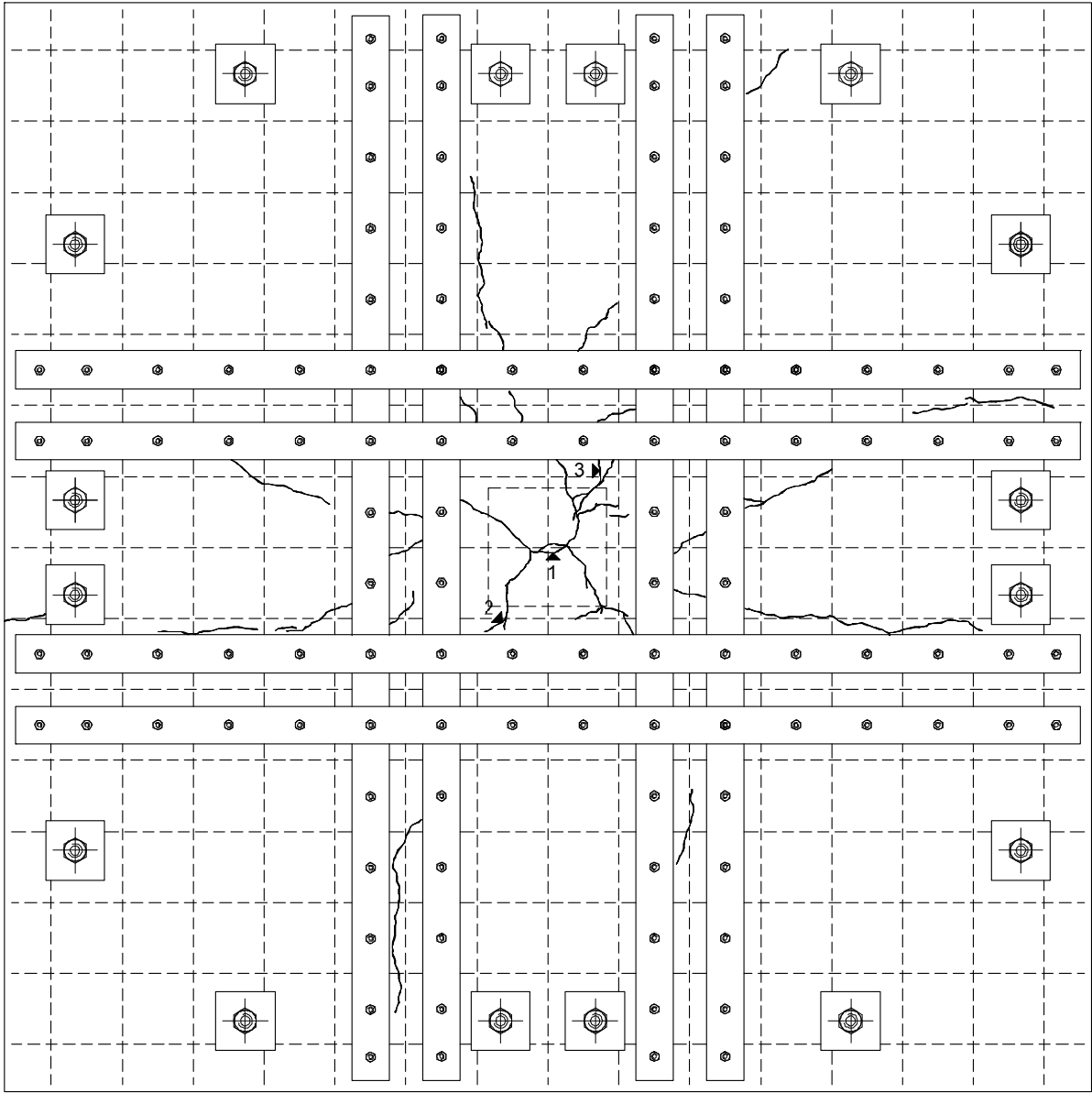
WPSK-8'

Odształcenia taśm CFRP Strain of flat iron						
V	V/V _{exp}	W17	W18	W19	W20	W21
kN	-	ε				
		‰				
0	p	0,00	0,000	0,003	0,001	0,000
50	p	0,07	0,036	0,035	0,025	0,011
	k		0,037	0,033	0,025	0,011
100	p	0,14	0,078	0,078	0,055	0,027
	k		0,080	0,081	0,055	0,027
150	p	0,21	0,133	0,142	0,093	0,045
	k		0,136	0,142	0,093	0,046
200	p	0,29	0,200	0,217	0,142	0,069
	k		0,208	0,222	0,145	0,071
250	p	0,36	0,314	0,312	0,217	0,101
	k		0,341	0,339	0,237	0,111
300	p	0,43	0,447	0,444	0,323	0,150
	k		0,466	0,461	0,345	0,156
350	p	0,50	0,615	0,623	0,531	0,218
	k		0,641	0,660	0,568	0,230
400	p	0,57	0,780	0,802	0,719	0,286
	k		0,804	0,864	0,757	0,304
450	p	0,64	0,899	0,996	0,910	0,386
	k		0,899	1,010	0,935	0,410
500	p	0,71	0,969	1,118	1,050	0,501
	k		0,967	1,141	1,092	0,562
550	p	0,79	1,031	1,251	1,249	0,714
	k		1,030	1,261	1,284	0,764
600	p	0,86	1,080	1,342	1,447	0,857
	k		1,065	1,341	1,534	0,904
650	p	0,93	1,106	1,400	1,693	1,002
	k		1,094	1,396	1,744	1,041
700	p	1,00	1,134	1,432	1,864	1,106
	k		1,141	1,443	1,802	1,091

Odształcenia taśm CFRP Strain of flat iron						
V	V/V _{exp}	W25	W26	W27	W28	W29
kN	-	ε				
		‰				
0	p	0,00	0,000	0,001	-0,008	-0,005
50	p	0,07	0,033	0,032	0,016	0,011
	k		0,032	0,032	0,019	0,029
100	p	0,14	0,070	0,068	0,042	0,028
	k		0,070	0,068	0,044	0,028
150	p	0,21	0,120	0,125	0,069	0,045
	k		0,121	0,117	0,077	0,051
200	p	0,29	0,180	0,175	0,103	0,068
	k		0,193	0,186	0,100	0,067
250	p	0,36	0,289	0,266	0,153	0,098
	k		0,316	0,289	0,161	0,102
300	p	0,43	0,424	0,363	0,215	0,127
	k		0,443	0,378	0,230	0,135
350	p	0,50	0,591	0,531	0,348	0,174
	k		0,629	0,571	0,383	0,179
400	p	0,57	0,762	0,701	0,517	0,232
	k		0,788	0,733	0,552	0,248
450	p	0,64	0,925	0,903	0,690	0,307
	k		0,947	0,945	0,727	0,321
500	p	0,71	1,090	1,123	0,863	0,379
	k		1,135	1,207	0,926	0,409
550	p	0,79	1,236	1,382	1,121	0,516
	k		1,212	1,399	1,147	0,547
600	p	0,86	1,231	1,479	1,240	0,621
	k		1,207	1,512	1,271	0,666
650	p	0,93	1,226	1,619	1,390	0,756
	k		1,196	1,659	1,440	0,812
700	p	1,00	1,213	1,759	1,513	0,870
	k		1,233	1,852	1,542	0,868



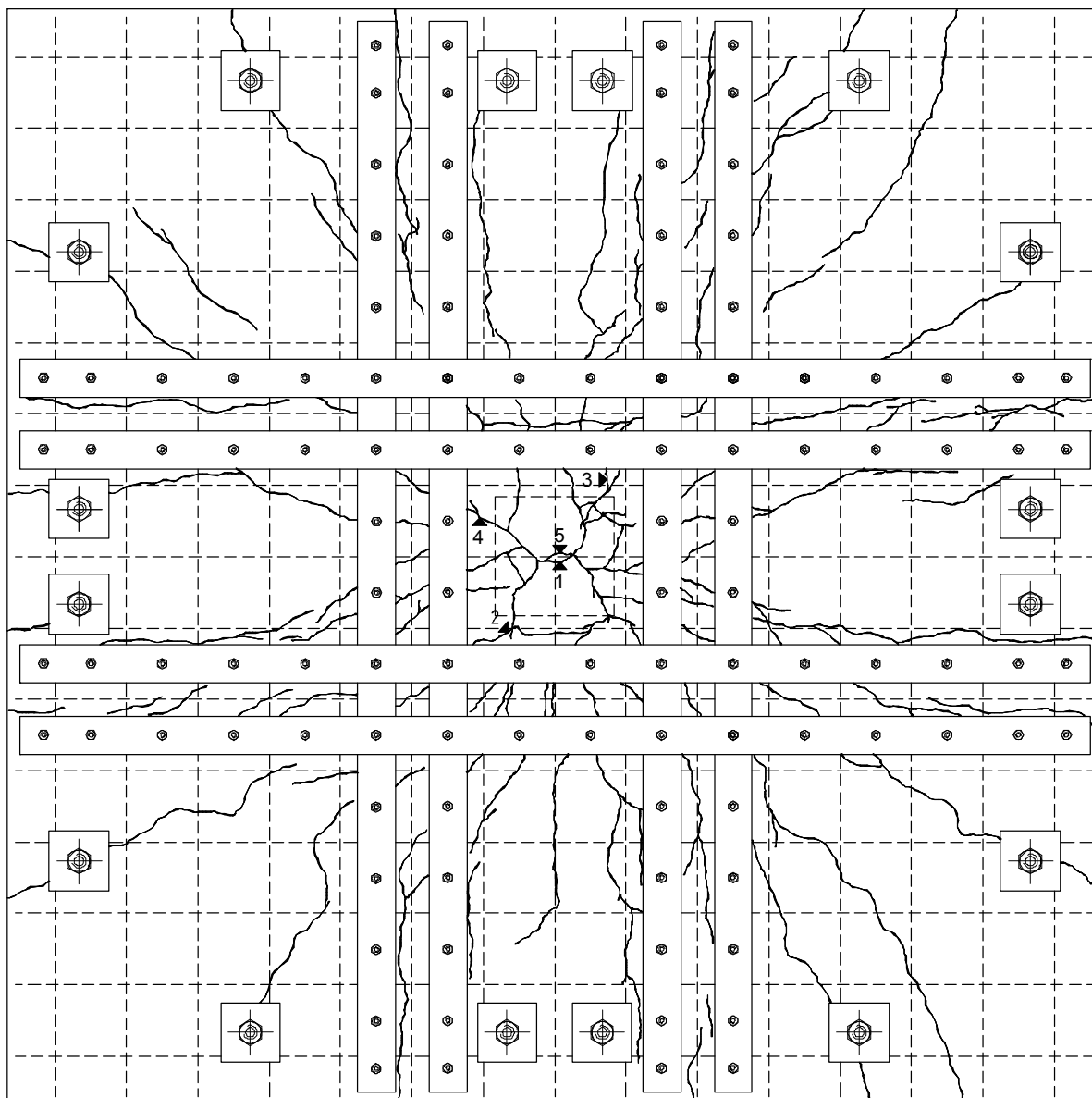
Rysy – faza początkowa / Cracks pattern – initial stage



Siła / Load	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
[kN]	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
150	0,05	-	-
200	0,10	-	-
250	0,10	0,10	-
250	0,10	0,15	-
300	0,10	0,15	0,10
350	0,10	0,20	0,15

WPSK-8'

Rysy – faza zniszczenia / Cracks pattern after failure



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]				
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3	rysa 4 / crack No. 4	rysa 5 / crack No. 5
150	0,05	-	-	-	-
200	0,10	-	-	-	-
250	0,10	0,10	-	-	-
250	0,10	0,15	-	-	-
300	0,10	0,15	0,10	-	-
350	0,10	0,20	0,15	-	-
400	0,10	0,25	0,20	0,20	-
450	0,10	0,30	0,25	0,25	0,30
500	0,10	0,30	0,40	0,30	0,45
550	0,05	0,50	0,50	0,45	0,70
600	0,05	0,60	0,60	0,65	0,80
650	0,05	0,70	0,70	0,80	1,00
700	0,05	0,70	0,90	0,80	1,10

Dane / Data

beton / concrete

(#12)

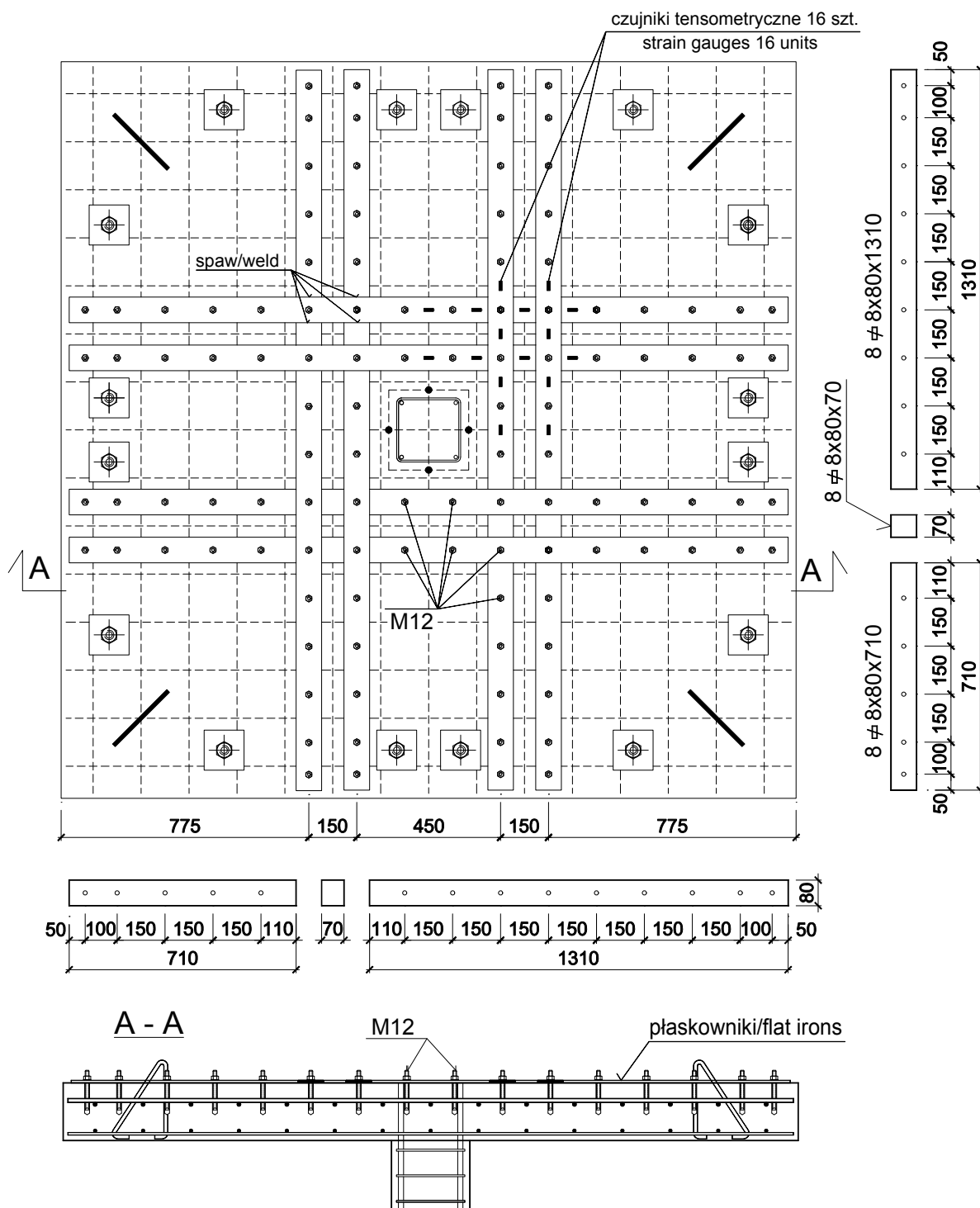
(płaskownik / flat iron)

 $f_{c,cube} = 46,0\text{MPa}$, $f_{cm} = 39,1\text{MPa}$, $f_{sp} = 3,65\text{MPa}$, E_{cm} nie badano

 $f_{y,h} = 580,8\text{MPa}$, $f_{y,l} = 565,5\text{MPa}$, $f_{ym} = 573,2\text{MPa}$, $A_{sm} = 1,113\text{cm}^2$
 $f_{y,h} = 338,0\text{MPa}$, $f_{y,l} = 308,0\text{MPa}$, $f_{ym} = 316,0\text{MPa}$, $E_s = 206000\text{MPa}$, $\varepsilon_y = 1,534\%$
 $A_{sm} = 6,400\text{cm}^2$ (pomiar / measure $6,480\text{cm}^2$)

 wysokość nominalna / nominal effective depth of cross-section $d = 11,8\text{cm}$ (pomierzona / measured $11,94\text{cm}$)

 nośność świadka / witness load capacity $V_s = 367,0\text{kN}$

 nośność eksperymentalna / experimental load capacity $V_{exp} = 675\text{kN}$
 $V_{exp} / V_s = 1,84$


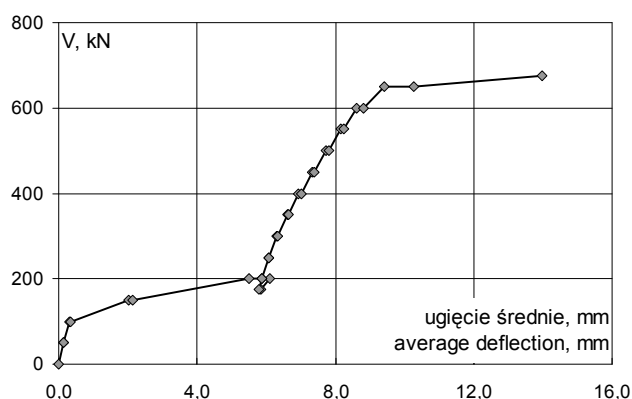
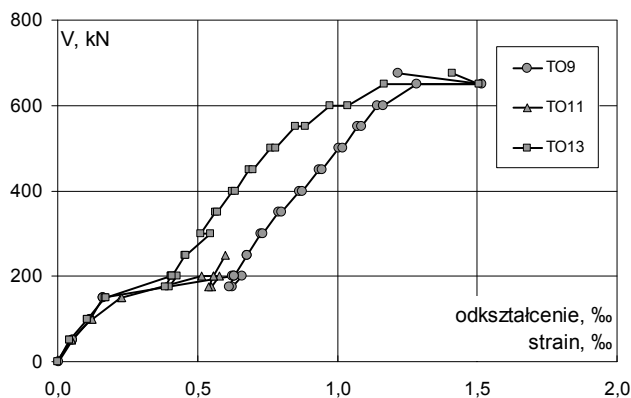
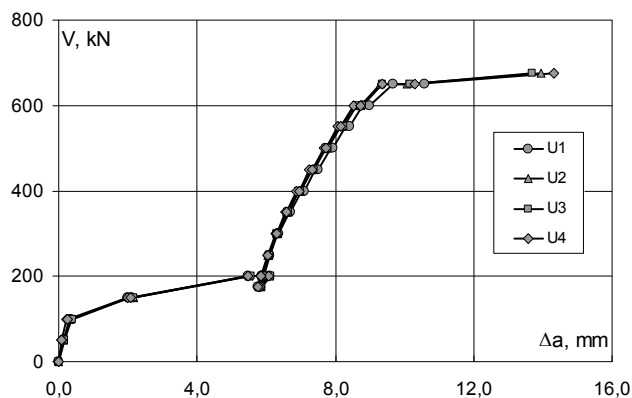
Rysunek konstrukcyjny modelu / Technical drawing of the specimen

WPSK-8''

Ugięcia Deflections						
V	V/V _{exp}	U1	U2	U3	U4	średnie average
kN	-	Δa				mm
0	p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	p	0,07	0,14	0,13	0,16	0,13
	k		0,14	0,14	0,16	0,13
100	p	0,15	0,34	0,32	0,38	0,32
	k		0,36	0,35	0,40	0,34
150	p	0,22	2,01	2,06	1,98	2,03
	k		2,11	2,16	2,09	2,13
200	p	0,30	5,49	5,51	5,49	5,51
	k		6,09	6,09	6,13	6,09
175	p	0,26	5,83	5,84	5,88	5,84
	k		5,76	5,78	5,85	5,79
200	p	0,30	5,86	5,87	5,94	5,88
	k		5,87	5,87	5,94	5,88
250	p	0,37	6,08	6,06	6,11	6,04
	k		6,09	6,07	6,11	6,05
300	p	0,44	6,34	6,30	6,31	6,30
	k		6,37	6,32	6,34	6,29
350	p	0,52	6,66	6,59	6,61	6,55
	k		6,71	6,64	6,65	6,60
400	p	0,59	7,03	6,93	6,94	6,94
	k		7,09	6,99	7,00	6,95
450	p	0,67	7,43	7,30	7,32	7,26
	k		7,50	7,37	7,39	7,33
500	p	0,74	7,86	7,69	7,72	7,66
	k		7,93	7,76	7,79	7,73
550	p	0,81	8,31	8,10	8,15	8,08
	k		8,41	8,19	8,24	8,17
600	p	0,89	8,79	8,55	8,61	8,53
	k		8,98	8,73	8,78	8,72
650	p	0,96	9,66	9,30	9,36	9,35
	k		10,60	10,06	10,15	10,29
675	p	1,00		13,93	13,68	14,33
	k					13,98

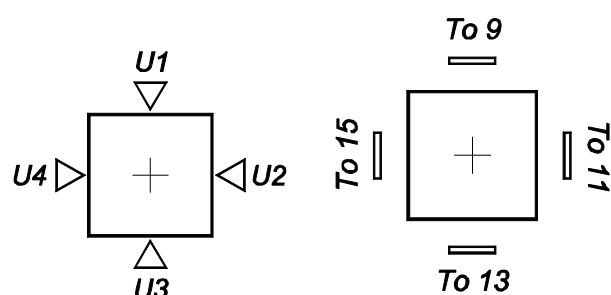
Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete						
V	V/V _{exp}	TO9	TO11	TO13	TO15	
kN	-	ε				‰
0	p	0,00	0,004	-0,002	0,000	
50	p	0,07	0,053	0,049	0,044	
	k		0,054	0,049	0,044	
100	p	0,15	0,115	0,119	0,106	
	k		0,117	0,123	0,107	
150	p	0,22	0,161	0,227	0,168	
	k		0,163	0,229	0,173	
200	p	0,30	0,624	0,516	0,406	
	k		0,661	0,579	0,428	
175	p	0,26	0,626	0,549	0,400	
	k		0,612	0,539	0,385	
200	p	0,30	0,632	0,559	0,407	
	k		0,633	0,559	0,410	
250	p	0,37	0,676	0,599	0,455	
	k		0,679	0,600	0,457	
300	p	0,44	0,726	0,642	0,545	
	k		0,732	0,646	0,512	
350	p	0,52	0,790	0,697	0,564	
	k		0,800	0,708	0,573	
400	p	0,59	0,863	0,759	0,625	
	k		0,876	0,771	0,634	
450	p	0,67	0,935	0,829	0,686	
	k		0,947	0,842	0,699	
500	p	0,74	1,006	0,900	0,761	
	k		1,018	0,911	0,781	
550	p	0,81	1,074	0,965	0,850	
	k		1,088	0,977	0,886	
600	p	0,89	1,144	1,033	0,972	
	k		1,163	1,057	1,036	
650	p	0,96	1,284	1,128	1,169	
	k		1,518	1,488	1,505	
675	p	1,00	1,216	1,424	1,411	

awaria czujnika / damaged gauge



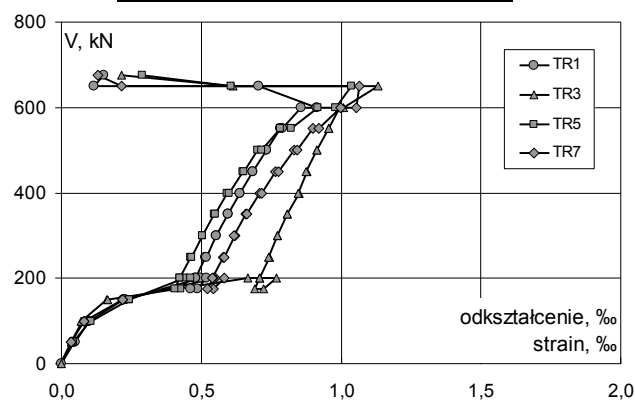
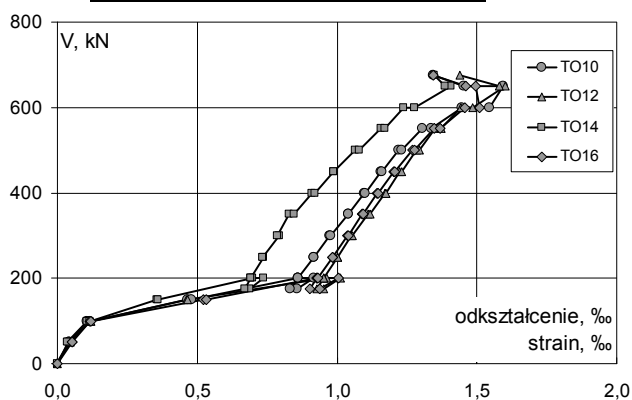
Lokalizacja czujników „U”
Location of „U” gauges

Lokalizacja czujników „T”
Location of “T” gauges

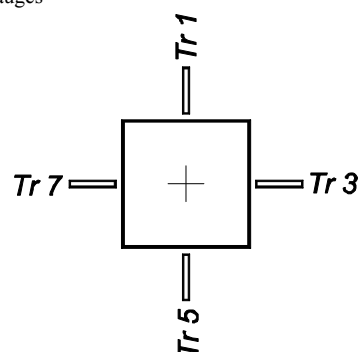
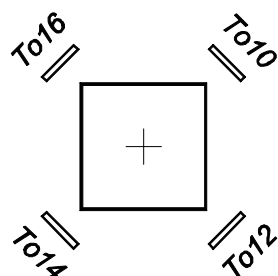


Odształcenia obwodowe powierzchni ściskanej betonu Tangential strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TO10	TO12	TO14	TO16
ε					
‰					
0	p	0,00	-0,002	-0,001	0,000
50	p	0,07	0,041	0,045	0,039
100	p	0,15	0,107	0,116	0,106
150	p	0,22	0,117	0,120	0,118
200	p	0,30	0,466	0,461	0,356
175	p	0,26	0,478	0,464	0,361
200	p	0,30	0,860	0,962	0,700
175	p	0,26	0,917	1,013	0,738
200	p	0,30	0,856	0,954	0,689
200	p	0,30	0,833	0,928	0,669
250	p	0,37	0,860	0,951	0,691
300	p	0,44	0,860	0,952	0,691
350	p	0,52	0,916	1,000	0,738
400	p	0,59	0,917	1,002	0,734
450	p	0,67	0,974	1,052	0,795
500	p	0,74	0,977	1,055	0,785
550	p	0,81	1,039	1,112	0,828
600	p	0,89	1,040	1,117	0,846
650	p	0,96	1,097	1,171	0,910
675	p	1,00	1,101	1,176	0,922
			1,156	1,224	0,988
			1,159	1,231	0,987
			1,222	1,285	1,067
			1,231	1,294	1,079
			1,304	1,352	1,156
			1,336	1,371	1,171
			1,446	1,441	1,239
			1,544	1,484	1,276
			1,596	1,602	1,407
			1,452	1,581	1,388
			1,343	1,439	1,347
					1,345

Odształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR1	TR3	TR5	TR7
ε					
‰					
0	p	0,00	0,001	-0,001	-0,003
50	p	0,07	0,046	0,034	0,041
100	p	0,15	0,049	0,036	0,043
150	p	0,22	0,099	0,074	0,104
200	p	0,30	0,098	0,072	0,106
175	p	0,26	0,223	0,162	0,242
200	p	0,30	0,228	0,166	0,243
175	p	0,26	0,499	0,667	0,441
200	p	0,30	0,520	0,770	0,461
175	p	0,26	0,487	0,724	0,426
200	p	0,30	0,463	0,693	0,404
250	p	0,37	0,480	0,710	0,423
300	p	0,44	0,480	0,710	0,423
350	p	0,52	0,515	0,743	0,463
400	p	0,59	0,517	0,742	0,465
450	p	0,67	0,553	0,774	0,504
500	p	0,74	0,553	0,774	0,504
550	p	0,81	0,597	0,808	0,547
600	p	0,89	0,597	0,807	0,551
650	p	0,96	0,638	0,849	0,593
675	p	1,00	0,638	0,845	0,598
			0,684	0,879	0,649
			0,684	0,876	0,652
			0,732	0,915	0,703
			0,734	0,913	0,717
			0,782	0,956	0,783
			0,791	0,956	0,823
			0,856	0,996	0,918
			0,914	1,010	0,979
			0,704	1,133	1,037
			0,118	0,613	0,606
			0,153	0,215	0,288



Lokalizacja czujników / Location of gauges

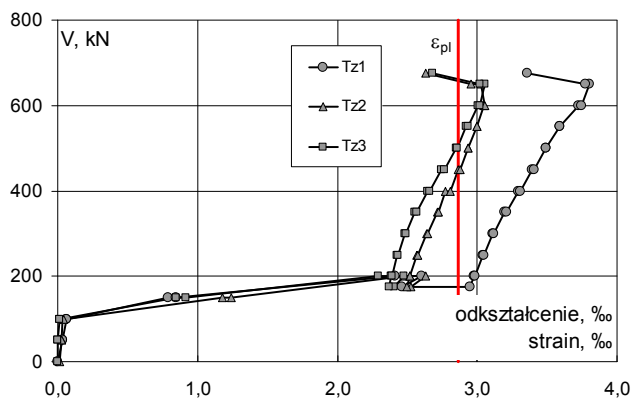
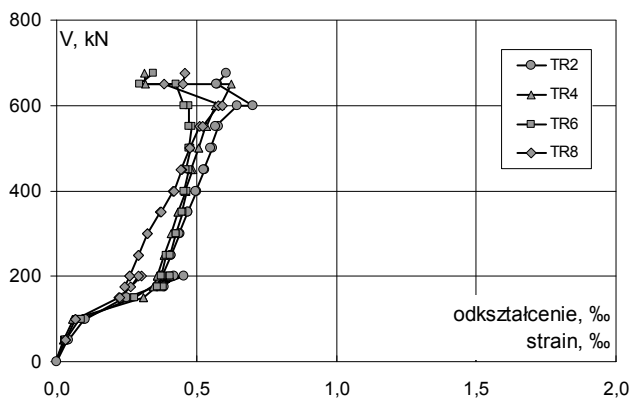


WPSK-8''

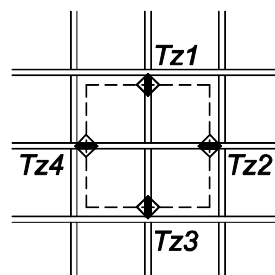
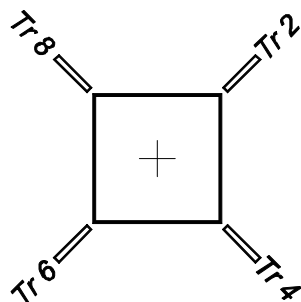
Odkształcenia promieniowe powierzchni ściskanej betonu Radial strain on the compression surface of concrete					
V	V/V _{exp}	TR2	TR4	TR6	TR8
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,000	-0,003	-0,004
50	p	0,07	0,039	0,024	0,028
	k		0,043	0,026	0,030
100	p	0,15	0,099	0,060	0,081
	k		0,102	0,056	0,088
150	p	0,22	0,242	0,310	0,274
	k		0,249	0,311	0,277
200	p	0,30	0,455	0,402	0,398
	k		0,420	0,406	0,406
175	p	0,26	0,385	0,373	0,380
	k		0,361	0,344	0,361
200	p	0,30	0,376	0,359	0,376
	k		0,376	0,360	0,375
250	p	0,37	0,409	0,386	0,393
	k		0,410	0,385	0,404
300	p	0,44	0,440	0,411	0,428
	k		0,438	0,409	0,426
350	p	0,52	0,469	0,434	0,450
	k		0,468	0,433	0,447
400	p	0,59	0,501	0,462	0,465
	k		0,497	0,460	0,456
450	p	0,67	0,530	0,486	0,473
	k		0,527	0,480	0,463
500	p	0,74	0,556	0,509	0,481
	k		0,550	0,507	0,474
550	p	0,81	0,577	0,533	0,484
	k		0,569	0,536	0,471
600	p	0,89	0,645	0,569	0,472
	k		0,701	0,585	0,455
650	p	0,96	0,575	0,626	0,428
	k		0,573	0,316	0,298
675	p	1,00	0,606	0,313	0,347

Odkształcenia stali zbrojeniowej Strain of reinforcement bars					
V	V/V _{exp}	Tz1	Tz2	Tz3	Tz4
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00	0,002	0,016	-0,003
50	p	0,07	0,036	0,025	-0,002
	k		0,034	0,025	-0,002
100	p	0,15	0,060	0,038	0,013
	k		0,064	0,039	0,015
150	p	0,22	0,793	1,177	0,850
	k		0,849	1,241	0,915
200	p	0,30	2,415	2,486	2,290
	k		2,606	2,631	2,474
175	p	0,26	2,465	2,529	2,403
	k		2,951	2,495	2,372
200	p	0,30	2,980	2,517	2,388
	k		2,983	2,518	2,389
250	p	0,37	3,043	2,569	2,428
	k		3,047	2,572	2,432
300	p	0,44	3,113	2,637	2,484
	k		3,120	2,642	2,492
350	p	0,52	3,197	2,715	2,557
	k		3,207	2,722	2,568
400	p	0,59	3,295	2,771	2,642
	k		3,306	2,805	2,660
450	p	0,67	3,394	2,865	2,745
	k		3,404	2,880	2,762
500	p	0,74	3,490	2,937	2,849
	k		3,493	2,937	2,859
550	p	0,81	3,591	2,998	2,923
	k		3,594	3,001	2,938
600	p	0,89	3,725	3,051	3,008
	k		3,747	3,057	3,021
650	p	0,96	3,805	3,026	3,057
	k		3,775	2,958	3,022
675	p	1,00	3,357	2,633	2,683

awaria czujnika / damaged gauge

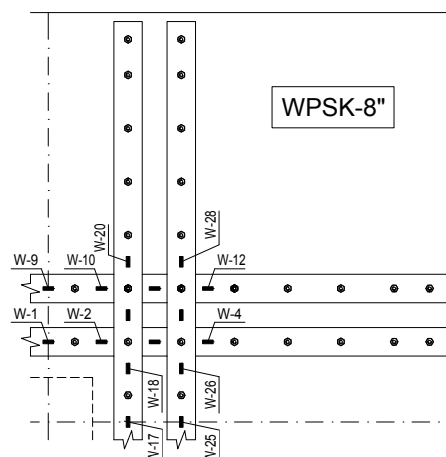
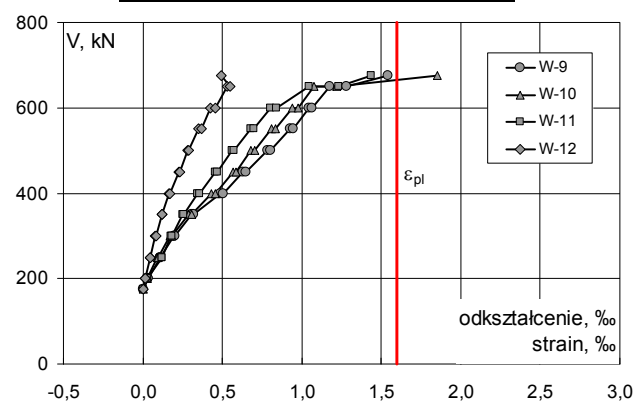
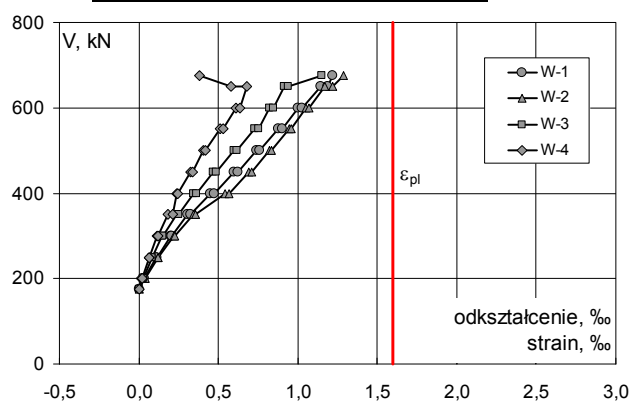


Lokalizacja czujników / Location of gauges



Odształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons					
V	V/V _{exp}	W-1	W-2	W-3	W-4
kN	-	ϵ			
		‰			
0	p	0,00			
50	p _k	0,07			
100	p _k	0,15			
150	p _k	0,22			
200	p _k	0,30			
175	p _k	0,26	0,000	0,000	0,000
200	p _k	0,30	0,036 0,034	0,036 0,038	0,028 0,027
250	p _k	0,37	0,108 0,113	0,119 0,122	0,081 0,082
300	p _k	0,44	0,199 0,210	0,217 0,226	0,147 0,151
350	p _k	0,52	0,307 0,324	0,342 0,354	0,241 0,249
400	p _k	0,59	0,450 0,474	0,542 0,570	0,347 0,363
450	p _k	0,67	0,597 0,621	0,691 0,708	0,469 0,488
500	p _k	0,74	0,741 0,759	0,819 0,835	0,599 0,617
550	p _k	0,81	0,879 0,900	0,944 0,956	0,730 0,751
600	p _k	0,89	1,003 1,025	1,054 1,068	0,823 0,848
650	p _k	0,96	1,145 1,187	1,167 1,219	0,915 0,937
675	p	1,00	1,221	1,284	1,151
					0,381

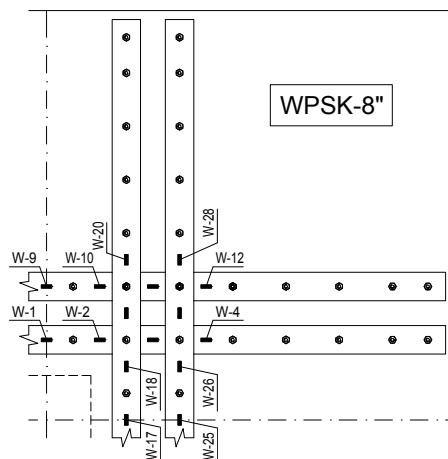
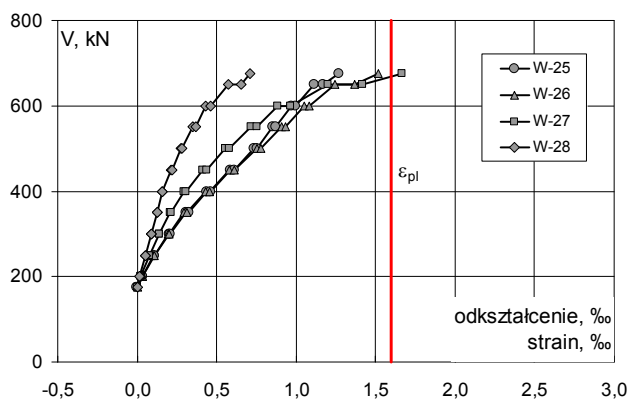
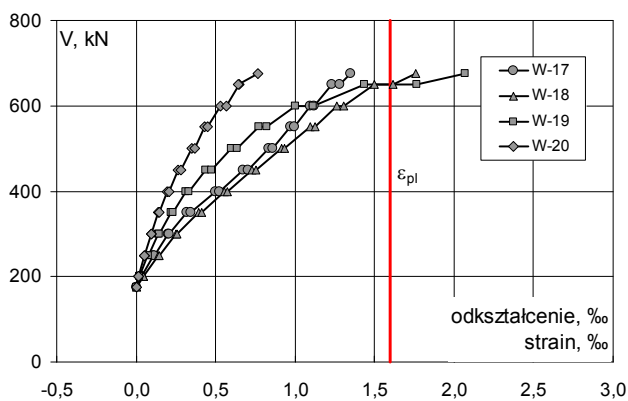
Odształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons					
V	V/V _{exp}	W-9	W-10	W-11	W-12
kN	-	ϵ			
		‰			
0	p	0,00			
50	p _k	0,07			
100	p _k	0,15			
150	p _k	0,22			
200	p _k	0,30			
175	p _k	0,26	0,000	0,000	0,000
200	p _k	0,30	0,036 0,033	0,028 0,027	0,027 0,029
250	p _k	0,37	0,108 0,111	0,091 0,094	0,119 0,121
300	p _k	0,44	0,197 0,203	0,169 0,181	0,179 0,182
350	p _k	0,52	0,307 0,320	0,286 0,306	0,251 0,257
400	p _k	0,59	0,486 0,507	0,429 0,455	0,341 0,355
450	p _k	0,67	0,627 0,650	0,566 0,589	0,458 0,470
500	p _k	0,74	0,785 0,804	0,681 0,701	0,559 0,575
550	p _k	0,81	0,927 0,947	0,808 0,832	0,678 0,700
600	p _k	0,89	1,043 1,066	0,938 0,975	0,801 0,839
650	p _k	0,96	1,178 1,283	1,074 1,221	1,048 1,230
675	p	1,00	1,544	1,851	1,435
					0,495



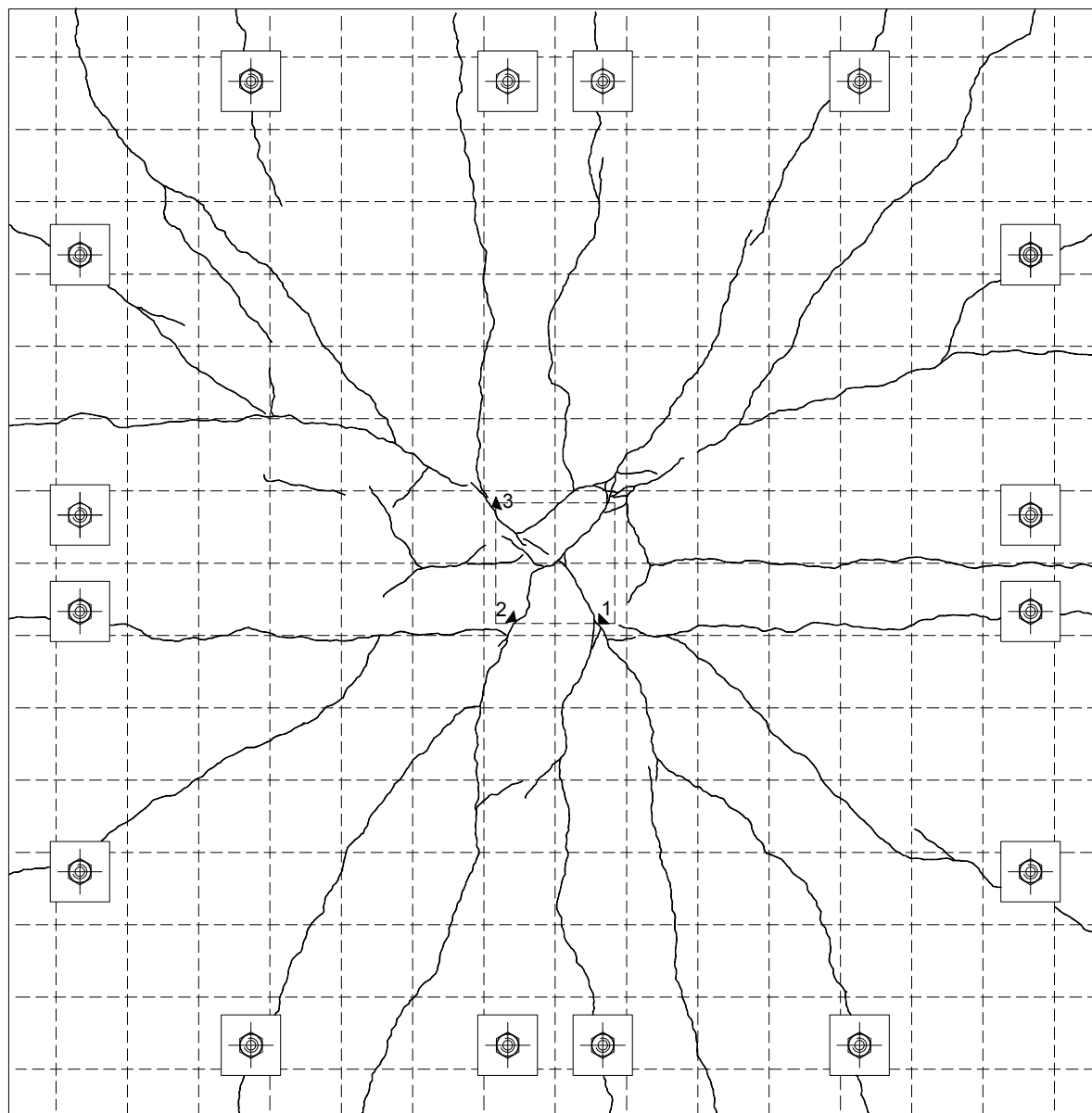
WPSK-8''

Odształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons					
V	V/V _{exp}	W-17	W-18	W-19	W-20
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00			
50	p _k	0,07			
100	p _k	0,15			
150	p _k	0,22			
200	p _k	0,30			
175	p _k	0,26	0,000	0,000	0,000
200	p _k	0,30	0,031 0,033	0,047 0,046	0,023 0,022
250	p _k	0,37	0,108 0,112	0,139 0,143	0,074 0,076
300	p _k	0,44	0,202 0,210	0,253 0,259	0,138 0,143
350	p _k	0,52	0,320 0,346	0,394 0,411	0,219 0,231
400	p _k	0,59	0,498 0,526	0,553 0,576	0,310 0,333
450	p _k	0,67	0,672 0,701	0,728 0,756	0,440 0,477
500	p _k	0,74	0,834 0,860	0,912 0,935	0,601 0,636
550	p _k	0,81	0,973 0,994	1,094 1,123	0,773 0,822
600	p _k	0,89	1,097 1,119	1,263 1,305	1,000 1,116
650	p _k	0,96	1,231 1,282	1,497 1,617	1,435 1,766
675	p	1,00	1,347	1,761	2,067
					0,766

Odształcenia stali wzmacniającej – płaskowniki Strain of flat irons					
V	V/V _{exp}	W-25	W-26	W-27	W-28
kN	-	ε			
		‰			
0	p	0,00			
50	p _k	0,07			
100	p _k	0,15			
150	p _k	0,22			
200	p _k	0,30			
175	p _k	0,26	-0,001	0,000	0,001
200	p _k	0,30	0,032 0,032	0,033 0,032	0,025 0,024
250	p _k	0,37	0,108 0,111	0,104 0,108	0,076 0,079
300	p _k	0,44	0,199 0,207	0,194 0,200	0,137 0,140
350	p _k	0,52	0,308 0,328	0,293 0,316	0,210 0,215
400	p _k	0,59	0,439 0,462	0,430 0,457	0,292 0,305
450	p _k	0,67	0,588 0,613	0,581 0,612	0,413 0,440
500	p _k	0,74	0,734 0,751	0,752 0,777	0,554 0,581
550	p _k	0,81	0,854 0,873	0,906 0,933	0,717 0,754
600	p _k	0,89	0,973 0,998	1,050 1,084	0,886 0,962
650	p _k	0,96	1,116 1,170	1,245 1,368	1,202 1,418
675	p	1,00	1,271	1,515	1,663
					0,712

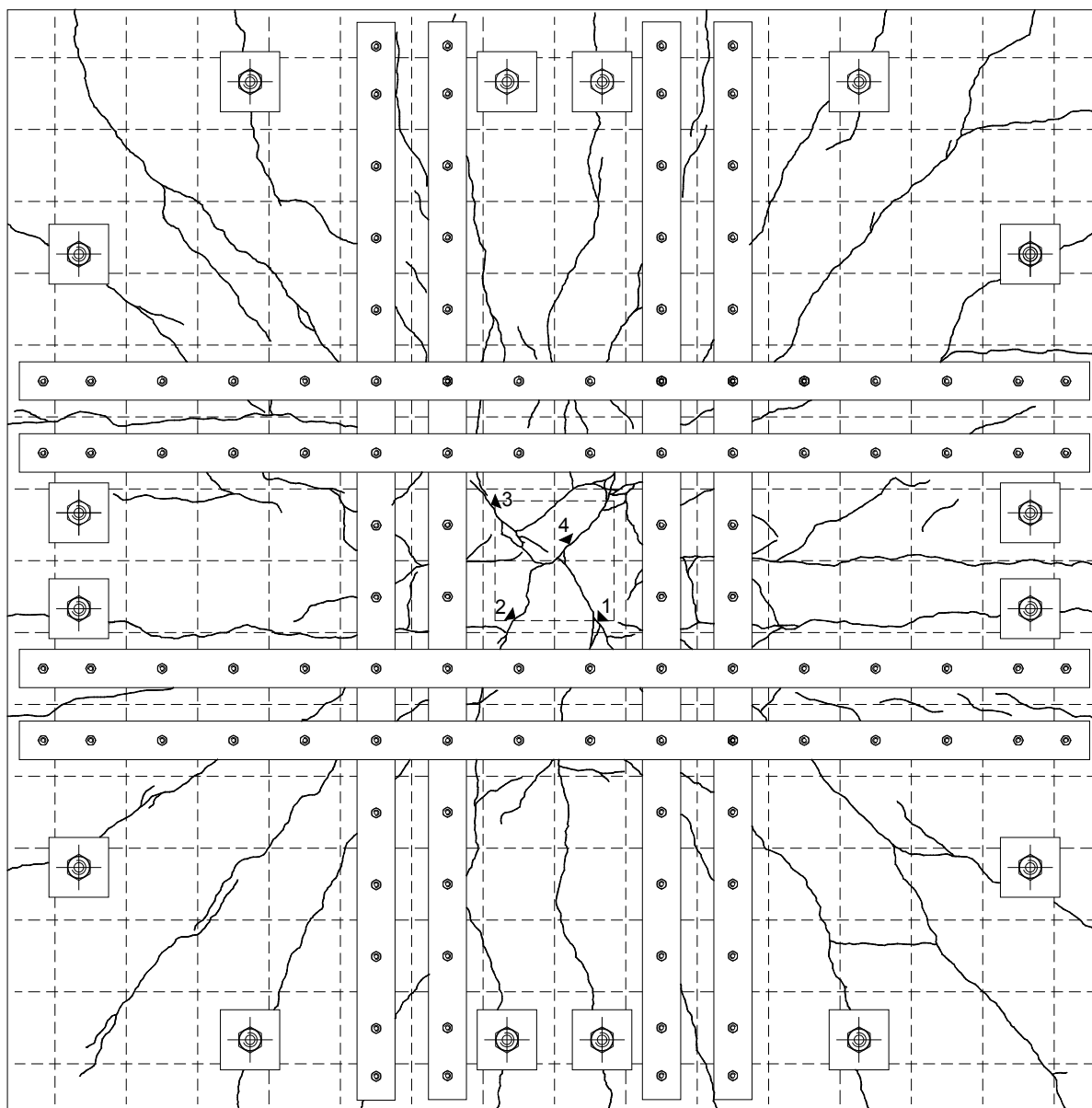


Rysy – faza początkowa / Cracks pattern – initial stage



Siła / Load [kN]	Szerokość rozwarcia / Width of cracks [mm]		
	rysa 1 / crack No. 1	rysa 2 / crack No. 2	rysa 3 / crack No. 3
150	0,40	0,30	0,40
175	0,40	0,30	0,40
200	1,20	1,00	1,20

Rysy – faza zniszczenia / Cracks pattern after failure



Siła [kN]	Szerokość rozwarcia [mm]			
	rysa 1	rysa 2	rysa 3	rysa 4
150	0,40	0,30	0,40	-
175	0,40	0,30	0,40	-
200	1,20	1,00	1,20	-
200	1,20	1,00	1,20	-
250	1,30	1,20	1,20	-
300	1,40	1,50	1,20	-
350	1,40	1,50	1,30	2,40
400	1,50	1,60	1,40	2,50
450	1,60	1,60	1,40	2,60
500	1,60	1,70	1,50	2,70
550	1,70	1,70	1,60	2,80
575	1,70	1,80	1,80	2,95
600	1,80	1,80	1,80	2,95