

BADANIA DOŚWIADCZALNE ELEMENTÓW I KONSTRUKCJI BETONOWYCH

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

ZESZYT NR 15

**Experimental
research on
CFRP confined
RC members**

**Badania doświadczalne elementów
ściskanych wzmocnionych
materiałami kompozytowymi CFRP**

Piotr Ignatowski
Maria E. Kamińska
Renata Kotynia

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr 8 T07E 006 21
finansowanego przez Komitet Badań Naukowych

Department of Concrete
Structures, Technical
University of Lodz, Poland
Lodz 2003

Katedra Budownictwa Betonowego
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Politechniki Łódzkiej
Łódź 2003

Recenzent / Reviewer
dr hab. inż. prof. PŁ Artem Czkwianianc

Opracowanie wyników pomiarów i skład tekstu / Preparing of measurement results and text edition
mgr inż. Jacek Filipeczak

©2003 Katedra Budownictwa Betonowego, Łódź, Polska
©2003 Department of Concrete Structures Technical University of Lodz, Poland

ISSN 1230-6010

<https://doi.org/10.34658/kbb.2003.15>

DOI: 10.34658/kbb.2003.15

Katedra Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej
Al. Politechniki 6, 93-590 Łódź, Polska
tel. (48) (42) 6313575, fax (48) (42) 6313584
corresponding author: dr inż. Renata Kotynia, e-mail: renata.kotynia@p.lodz.pl

STRESZCZENIE

Praca dotyczy problemów wzmacniania smukłych słupów żelbetowych za pomocą materiałów na bazie włókien węglowych (CFRP - Carbon Fibre Reinforced Polymer). Dwuetapowy program doświadczalnych badań obejmował betonowe próbki trzech typów, różniące się kształtem i rozmiarami oraz smukłe słupy żelbetowe. W pierwszym etapie zbadano próbki walcowe o średnicy 150mm i wysokości 300mm, próbki prostopadłościennie o przekroju kwadratowym 100×100mm i wysokości 200mm oraz próbki prostopadłościennie o przekroju prostokątnym 105×200mm i wysokości 200mm, które wzmacniano za pomocą mat i taśm o jednokierunkowym układzie włókien węglowych, stosowanych w różnych konfiguracjach. Badanie miało na celu określenie wpływu stopnia zbrojenia poprzecznego w odniesieniu do kształtu próbek, współdziałania kompozytowego zbrojenia podłużnego w przenoszeniu obciążenia ściskającego, wpływu wstępnego obciążenia próbek przed wzmocnieniem oraz mimośrodowość obciążenia.

W drugim etapie przeprowadzono badania dwóch smukłych słupów żelbetowych o przekroju prostokątnym (140×250mm) i wysokości 3000mm, wzmocnionych materiałami kompozytowymi. Pierwszy ze słupów został wzmocniony w kierunku podłużnym taśmami CFRP, na obu krótszych bokach przekroju, oraz w kierunku poprzecznym dwiema warstwami maty. Drugi słup wzmocniono w kierunku podłużnym trzema warstwami maty, na obu dłuższych bokach przekroju, natomiast w kierunku poprzecznym sposób wzmocnienia nie uległ zmianie. Słupy obciążano siłą działającą na mimośrodku początkowym $e = 50\text{mm}$, w płaszczyźnie o większej sztywności.

Obydwa słupy zniszczyły się poprzez zmiążdżenie betonu w pobliżu środka wysokości słupa. Maksymalna wartość podłużnych odkształceń w strefie ściskanej wynosiła blisko $-6,0\%$, a po stronie rozciąganej $3-3,5\%$. Maksymalne odkształcenia poprzeczne osiągnęły 10% .

Dokonane pomiary przemieszczeń osi słupa i odkształceń podłużnych wykazały dużą plastyczność słupów, objawiającą się wyraźnym przyrostem mierzonych wielkości w obszarze obciążenia niszczonego.

SUMMARY

The research project concerns RC slender columns strengthened with carbon fiber reinforced polymer materials (CFRP). Two-stage experimental program contained of three types of concrete specimens and two slender columns. In the first stage the concrete specimens of the following types of shapes and cross section dimensions were tested: concrete cylinders with 150mm diameter and 300mm height, specimens with 100mm square cross section and 200mm height and specimens with rectangular cross section of 105×200mm and 200mm height. The specimens were strengthened with unidirectional CFRP wraps and strips, applied in different configurations. The aim of the research was to evaluate the influence of transverse CFRP reinforcement ratio referring to the cross section shape, influence of external longitudinal composite reinforcement on compressive stress carrying, influence of preloading concrete specimens prior to CFRP application and influence of load eccentricity on strengthening effect.

In the second stage the test on two slender columns of rectangular cross section (140×250mm) and 3000mm height was performed to evaluate the influence of CFRP strengthening. Columns were strengthened in two different configurations of CFRP materials. The first column was strengthened longitudinally with 2 S-type strips, glued on both short sides of the column. The second one was strengthened longitudinally by 3 layers of CFRP sheet on both long sides of the column. Both columns were additionally confined in transverse direction with 2 layers of CFRP sheet. The columns were initially preloaded with eccentricity of $e = 50\text{mm}$ in a stiffer plane.

The same mode due to concrete crushing at mid-height in both columns occurred. The maximal longitudinal strains in compression zone at failure reached $-6,0\%$ while in the tension zone it was $3-3,5\%$. The maximal transverse strain reached $10,0\%$.

A high ductility of columns was proved by a distinct increase in the column deflections and longitudinal strain measured under the ultimate load.

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	7
1.1. Wstęp	7
1.2. Wiadomości ogólne	8
2. Program badań	9
2.1. Betonowe próbki	9
2.2. Słupy żelbetowe	12
3. Wyniki badań elementów	18
3.1. Wyniki badań materiałów	18
3.1.1. Beton	18
3.1.2. Materiały kompozytowe	18
3.1.3. Stal zbrojeniowa	19
3.2. Wyniki badań próbek	20
3.3. Badania słupów	25
4. Wnioski	32

Bibliografia 33

Załącznik 35

CONTENTS

1. Preface	7
1.1. Introduction	7
1.2. General information	8
2. Research program	9
2.1. Test of concrete specimens	9
2.2. Test of columns	12
3. Test results	18
3.1. Material tests	18
3.1.1. Concrete	18
3.1.2. Composite materials	18
3.1.3. Reinforcing steel	19
3.2. Test of concrete specimens	20
3.3. Test of RC columns	25
4. Conclusions	32

References 33

Appendix 35

OZNACZENIA

Duże litery łacińskie

- A_c - pole przekroju próbki betonowej
 A_p - pole powierzchni taśmy / maty FRP
 A_s - pole przekroju zbrojenia
 E_c - moduł sprężystości betonu nie wzmocnionego
 E_p - moduł sprężystości taśmy / maty FRP w kierunku włókien
 E_s - moduł sprężystości stali
 $F_{u,cal}$ - obliczeniowa siła niszcząca
 $F_{u,test}$ - doświadczalna siła niszcząca

Małe litery łacińskie

- a, b, c - długości odcinków pomiarowych baz a, b, c
 b_p - szerokość taśmy / maty FRP
 d_j - średnica wzmacnianej próbki
 e - mimośród siły podłużnej
 f_c - wytrzymałość na ściskanie betonu nie wzmocnionego określona na próbkach walcowych
 $f_{c,cube}$ - wytrzymałość na ściskanie betonu nie wzmocnionego określona na kostkach o boku 150mm
 f_{ct} - wytrzymałość betonu na rozciąganie określona metodą rozłupywania
 f_p - wytrzymałość na rozciąganie kompozytu FRP w kierunku włókien
 f_{sy} - granica plastyczności stali zbrojeniowej
 f_t - wytrzymałość stali zbrojeniowej na rozciąganie
 r - promień zaokrąglenia naroża przekroju
 t_p - grubość taśmy / warstwy maty FRP
 v_{xi} - przemieszczenie osi słupa w kierunku x
 v_{yi} - przemieszczenie osi słupa w kierunku y
 x_0 - początkowe położenie osi słupa w kierunku x
 y_0 - początkowe położenie osi słupa w kierunku y

Małe litery greckie

- α, β, γ - kąty obrotu przekroju słupa w płaszczyźnie XY
 δ - sieczny kąt pochylenia śladu płaszczyzny zginania względem osi Y
 ϵ_c - odkształcenie jednostkowe betonu w strefie ścisanej
 ϵ_{ct} - odkształcenie jednostkowe betonu w strefie rozciąganej
 ϵ_{cu} - graniczne odkształcenie betonu przy ścisaniu
 ϵ_h - średnie poprzeczne odkształcenie próbki betonowej
 ϵ_p - odkształcenie taśmy / maty FRP
 ϵ_{pu} - odkształcenie taśmy / maty FRP przy zerwaniu
 ϵ_R - jednostkowe odkształcenie betonu baz pomiarowych R
 ϵ_{su} - graniczne odkształcenie zbrojenia stalowego na rozciąganie
 ϵ_{sy} - odkształcenie zbrojenia stalowego odpowiadające granicy plastyczności
 ϵ_v - średnie podłużne odkształcenie próbki betonowej

NOTATION

Roman upper case letters

- A_c - cross-section area of concrete specimen
 A_p - cross-section area of FRP strip / sheet
 A_s - cross-section area of steel reinforcement
 E_c - elasticity modulus of unstrengthened concrete
 E_p - modulus of elasticity of FRP strip / sheet in fiber direction
 E_s - elasticity modulus of steel reinforcement
 $F_{u,cal}$ - calculated ultimate load
 $F_{u,test}$ - test ultimate load

Roman lower case letters

- a, b, c - length of measured bases a, b, c
 b_p - width of FRP strip / sheet
 d_j - diameter of concrete specimen
 e - eccentricity of longitudinal load
 f_c - compressive strength of unstrengthened concrete cylinder
 $f_{c,cube}$ - compressive strength of unstrengthened concrete cube 150×150×150mm
 f_{ct} - splitting tensile strength of concrete
 f_p - longitudinal tensile strength of FRP strip / sheet
 f_{sy} - yield strength of steel reinforcement
 f_t - tensile strength of steel reinforcement
 r - radius of cross-section corner rounding
 t_p - thickness of FRP strip / layer of sheet
 v_{xi} - displacement of column axis in X direction
 v_{yi} - displacement of column axis in Y direction
 x_0 - initial location of column axis in X direction
 y_0 - initial location of column axis in Y direction

Greek lower case letters

- α, β, γ - rotation angles of column cross-section in XY plane
 δ - secant rotation angle of flexural plane track in relation to Y axis
 ϵ_c - unitary compressive strain of concrete
 ϵ_{ct} - unitary tensile strain of concrete
 ϵ_{cu} - ultimate compressive concrete strain
 ϵ_h - average transversal strain of concrete specimen
 ϵ_p - strain of FRP strip / sheet
 ϵ_{pu} - ultimate FRP strain of strip / sheet
 ϵ_R - unitary concrete strain of LVDT gauges type R
 ϵ_{su} - ultimate tensile strain of steel reinforcement
 ϵ_{sy} - yield strain of steel reinforcement
 ϵ_v - average longitudinal strain of concrete specimen

1. WPROWADZENIE

1.1. Wstęp

Praca dotyczy problemów wzmocnienia smukłych słupów żelbetonowych za pomocą materiałów kompozytowych CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer).

Wzmocnianie żelbetonowych elementów jest coraz częściej stosowaną techniką naprawczą w budownictwie, zwłaszcza, gdy decydującą rolę odgrywa czas wykonania i konieczność nieprzerwanego użytkowania konstrukcji podczas jej wzmocnienia. Doświadczalne badania elementów wzmocnionych na zginanie wykazują, że wysoka wytrzymałość materiałów kompozytowych najczęściej nie może być wykorzystana, gdyż wcześniej dochodzi do ich odspojenia od powierzchni betonu. Nie dotyczy to jedynie tych przypadków, gdy kompozyt może być ułożony jako ciągła opaska - np. gdy stanowi on dodatkowe obwodowe zbrojenie zbiornika lub zamknięte strzemiona słupa lub belki.

Badania żelbetonowych słupów wzmocnionych materiałami CFRP są prowadzone w wielu ośrodkach naukowo – badawczych na całym świecie, o czym świadczy duża liczba publikacji w materiałach konferencyjnych i czasopiśmie branżowych. Wyniki badań wykazują, że opasanie krępych słupów matą z włókien węglowych, aramidowych lub szklanych tak skutecznie ogranicza odkształcenia poprzeczne betonu, że jest on w stanie przenieść obciążenia nawet kilkakrotnie większe od nośności samego betonu. Efekt wzmocnienia jest znacznie wyraźniejszy niż w słupach uzwojonych ze zbrojeniem stalowym, gdyż - w odróżnieniu od słupów uzwojonych - zbrojenie kompozytowe wpływa na ograniczenie odkształcenia poprzecznego całego przekroju betonowego. Większość opublikowanych badań opisanych w literaturze dotyczy krępych próbek o przekroju kołowym, znacznie mniej próbek o przekroju prostokątnym, a nieliczne zbrojonych słupów.

W obliczeniach na ogół uwzględnia się skutki wzmocnienia korygując zależność $\sigma_c - \varepsilon_c$ w jednoosiowym stanie naprężenia, tzn. przyjmując odpowiednio powiększoną wytrzymałość betonu na ściskanie f_c i powiększone odkształcenie graniczne ε_{cu} , podobnie jak się to czyni w odniesieniu do słupów uzwojonych. W przedmiotowej literaturze brak jednak informacji o efekcie wzmocnienia smukłych słupów żelbetonowych.

Celem doświadczalnych badań było ustalenie mechanizmów odkształcalności i zniszczenia wzmocnionych betonowych próbek i smukłych żelbetonowych słupów.

Badania potraktowano dwustopniowo. W pierwszej kolejności zbadano 32 próbki betonowe, a następnie, zbadano dwa smukłe żelbetonowe słupy o przekroju poprzecznym 140×250mm i długości 3000mm, wzmocnione taśmami i matami CFRP.

Praca obejmuje 4 rozdziały. Rozdział 1 jest wprowadzeniem, określa cel i zakres pracy oraz wiadomości ogólne dotyczące stanu wiedzy w dziedzinie wzmocnienia betonowych próbek i zbrojonych słupów. Program badań i ich opis przedstawiono w rozdziale 2. Rozdział 3 obejmuje wyniki badań materiałów (betonu, stali, materiałów kompozytowych), 32 próbek betonowych i dwóch smu-

1. PREFACE

1.1. Introduction

The work deals with problems of strengthening of slender concrete reinforced columns with CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) materials.

This technique is more often used for strengthening of RC structures with carbon, aramid or glass fibers, especially if rehabilitation time and non-stopped use of the structure are of great importance. The experimental tests of RC members most often indicate that full strength of CFRP materials can not be exhausted, because the most common failure is due to CFRP debonding from the concrete surface. It does not consider only these cases, where FRP can be applied as a continuous hoop, e.g. externally bonded circumferential reinforcement in tanks or closed horizontal stirrups in columns or beams.

The research on RC columns strengthened with CFRP materials has been carried out in a mount of scientific centres all over the world, which is proved by many journal and conference publications. The test revealed that wrapping of short columns with carbon, aramid, or glass fiber wraps, reduces concrete transversal strain so effectively, that they are able to carry loads even several times greater than the strength concrete. The strengthening effect is significantly higher than that one in steel spirally reinforced columns, since – unlike in spirally reinforced columns – composite reinforcement influences the confinement of the entire transversal concrete cross-section strain. Majority of published research refer to short circular cross-section specimens, more less, refer to rectangular cross-section specimens, and sparsely refer to RC columns.

Generally, calculations of the strengthening enhancement are assessed by correction of the concrete stress – strain relation in an uniaxial stress state, i.e. by adopting increased concrete compression strength f_c and increased ultimate concrete strain ε_{cu} , as it is commonly done in the case of spirally reinforced columns. Due to the authors knowledge in the relevant literature there are no information on the strengthening effect of the slender RC columns. The purpose of the experimental tests was to determine ductility and failure mechanisms of the strengthened slender RC columns.

The research was carried out in two stages. Firstly, 32 concrete specimens were tested, next two strengthened slender columns of 3000mm length with transversal cross-section of 140×250mm were tested.

The report consists of 4 chapters. Chapter 1 is an introduction where the aim and scope of the work, as well as state of knowledge on FRP strengthening concrete specimens and reinforced columns are given. The test program is presented in chapter 2. Chapter 3 includes the results of the material tests (concrete, steel, composites), and test results of 32 concrete specimens and two slender

kłych słupów żelbetowych, wzmocnionych materiałami CFRP, obciążanych w sposób doraźny. W rozdziale 4 przedstawiono wnioski z badań. Zestawienie wybranych wyników pomiarów zamieszczono w załączniku.

1.2. Wiadomości ogólne

Badania żelbetowych elementów ściskanych wzmocnionych materiałami kompozytowych FRP prowadzono jak dotąd w wielu ośrodkach na świecie, z wykorzystaniem różnego rodzaju materiałów kompozytowych FRP, na próbkach o zróżnicowanych kształtach i wielkości. Wstępnych informacji o zachowaniu się elementów wzmocnionych materiałami kompozytowymi FRP dostarczyły badania próbek betonowych [1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 15, 16, 20, 22, 23] oraz żelbetowych słupów [5, 6, 17, 18, 21, 23, 24, 25].

Badania betonowych próbek wykazały, że poprzeczne zewnętrzne zbrojenie bardzo wyraźnie zwiększa wytrzymałość i odkształcalność betonu. Stopień wzmocnienia zależy przede wszystkim od stopnia obwodowego zbrojenia kompozytowego (najczęściej opisywanego liczbą mat). Przykładowo, w badaniach próbek walcowych wzmocnionych 12 warstwami mat CFRP, uzyskano ponad 3-krotny przyrost nośności [1]. Maksymalne odkształcenia osiowe (32,3%), wystąpiły w wypadku próbek walcowych z betonu klasy B 30, wzmocnionych poprzez naklejenie 6 warstw mat węglowych, co stanowi 13-krotnie większe odkształcenia w porównaniu z odkształceniami próbki nie wzmocnionej.

Wyniki badań potwierdziły ponadto wyraźny wpływ kształtu przekroju próbek na stopień wzmocnienia. Najbardziej efektywne wzmocnienie uzyskano w wypadku walcowych próbek, mniejsze w próbkach o przekroju kwadratowym, natomiast najmniejszy przyrost nośności uzyskano w badaniach próbek o przekroju prostokątnym. Ponadto stwierdzono, że przy zmiennej orientacji przebiegu CFRP, ze wzrostem pochylenia włókien względem osi elementu, zmniejsza się wytrzymałość próbek na ściskanie, natomiast plastyczność nie ulega zmianie.

Na podstawie stanu wiedzy w dziedzinie badań słupów wzmocnionych kompozytami CFRP określono następujące zagadnienia, które wymagają wyjaśnienia:

- czy dodatkowe kompozytowe zbrojenie podłużne współdziała z betonem przy przenoszeniu naprężeń ściskających, czy wpływa ono na stopień wzmocnienia betonu przy jednoosiowym ściskaniu,
- jaki jest efekt wzmacniania betonu wstępnie obciążonego,
- czy i jak mimośród obciążenia zmienia efekty wzmocnienia,
- czy efekt wzmocnienia zależy od smukłości słupa i mimośrodu obciążenia.

Badania wykonano w ramach projektu badawczego nr 8T07E 00621, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

Opisane w pracy badania stanowią podstawę rozprawy doktorskiej dr inż. Piotra Ignatowskiego na temat „Odkształcalność i nośność smukłych słupów żelbetowych wzmocnionych materiałami kompozytowymi CFRP” [13].

RC columns strengthened with the CFRP, under static load. The conclusions of the test results are presented in chapter 4. The list of the selected tests measurements are showed in the appendix.

1.2. General information

Research of confined RC members strengthened with FRP materials has been carried out in numerous laboratories all over the world. Different sizes and shapes of the cross-sections of the RC elements strengthened with different kinds of FRP materials were tested. Recent knowledge on a behavior of RC members FRP strengthened in compression was provided on FRP confined concrete specimens [1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 15, 16, 20, 22, 23], and RC columns [5, 6, 17, 18, 21, 23, 24, 25].

The tests results of concrete specimens indicated that the transversal external FRP reinforcement significantly increases strength and deformability of concrete. The strengthening percentage expressed by a ratio capacity of strengthened to un-strengthened specimen, depends first of all on the degree of the circumferential FRP reinforcement (number of layers). In the tests results presented herewith, the increase in strength was more than tripled in the case of cylindrical specimens strengthened with 12 layers of CFRP sheets [1]. The maximal axial strain of 32,3% occurred in the case of cylindrical specimens made of B 30 concrete class, strengthened with 6 layers of externally bonded CFRP sheets, which was 13 times greater than the strain of non-strengthened specimen.

The test results confirmed a clear influence of a cross-section on the strengthening degree. The most effective strengthening was obtained in the case of cylindrical specimens, less in the case of square cross-section, while the least increase of the strength was obtained in the rectangular cross-section specimens. It was furthermore revealed that with variable CFRP orientation, the strength decreased along with the increase of fibers inclination towards the longitudinal axis of a member, while plasticity remained unchanged.

Based on the state of knowledge of the RC specimens confined with CFRP sheets, the following problems required further investigation have been defined:

- Does an additional longitudinal composite reinforcement interact with concrete in transmitting of the compressive stress, does it influence the concrete strengthening ratio in the uniaxial compression,
- What is a strengthening effect of initially loaded concrete,
- Does the load eccentricity modify the strengthening effect, and how,
- Does the columns slenderness and load eccentricity influence the strengthening effect?

The investigations have been carried out under the research project no 8T07E 00621 sponsored by the State Committee for Scientific Research.

The test results compose the basis of the PhD thesis by Piotr Ignatowski titled “Strain and capacity of slender RC columns strengthened with CFRP materials” [13].

2. PROGRAM BADAŃ

2.1. Betonowe próbki

Badania prowadzono na próbkach betonowych trzech typów, różniących się kształtem i rozmiarami:

- W – próbki walcowe o średnicy 150mm i wysokości 300mm,
- K – próbki prostokątne o przekroju kwadratowym 100×100mm i wysokości 200mm,
- P – próbki prostokątne o przekroju prostokątnym 105×200mm i wysokości 200mm.

Wszystkie próbki wykonano z betonu o jednakowej wytrzymałości ($f_{c,cube}=31,0\text{MPa}$), o składzie przedstawionym w tablicy 2.1, i przechowywano w tych samych warunkach termiczno - wilgotnościowych. Próbki wzmocniano matami SikaWrap Hex-230C o fabrycznej szerokości 300mm i taśmami Sika CarboDur Shear o wymiarach 40×1,4mm, o jednokierunkowym układzie włókien węglowych.

Tablica 2.1. Skład mieszanki betonowej na 1m^3

Table 2.1. Composition of concrete mixture per 1m^3

Woda / water	kg	200
Cement / cement	kg	274
Żwir / aggregate	kg	990
Piasek / sand	kg	843
w / c	-	0,73

Tablica 2.2. Program badań próbek walcowych i prostokątnych o przekroju kwadratowym

Table 2.2. Test program of cylinder and rectangular of square cross-section concrete specimens

Lp.	Próbka Specimen	Zbrojenie poprzeczne Transverse reinforcement	Zbrojenie podłużne Longitudinal reinforcement	Problemy badawcze Investigated problems			
		liczba warstw mat / number of layers of sheet					
1	W-01	-	-	Wpływ stopnia zbrojenia poprzecznego w próbkach o przekroju kołowym Influence of transversal CFRP reinforcement ratio in specimens with circular cross-section			
2	W-02	-	-				
3	W-1m1	1	-				
4	W-1m2	1	-				
5	W-2m1	2	-				
6	W-2m2	2	-				
7	W-2m3	2	-				
8	W-3m	3	-				
9	K-01	-	-	Wpływ stopnia zbrojenia poprzecznego w próbkach o przekroju kwadratowym Influence of transversal CFRP reinforcement in specimens with square cross-section			
10	K-02	-	-				
11	K-2m1	2	-				
12	K-2m2	2	-				
13	W-2mp1	-	2 warstwy maty 2 sheet layers	Współdziałanie zbrojenia podłużnego w przenoszeniu obciążenia ściskającego Cooperation of longitudinal CFRP reinforcement in transferring of compressive stress			
14	W-2mp2	-	2 warstwy maty 2 sheet layers				
15	K-t1	-	4 taśmy / 4 strips				
16	K-t2	-	4 taśmy / 4 strips				
17	K-t2m1	2	4 taśmy / 4 strips				
18	K-t2m2	2	4 taśmy / 4 strips				
19	W-F2m1	2	-			Napężenie wstępne Initial stress (preloading) 12,8MPa	Wpływ wstępnego obciążenia próbki przed wzmocnieniem Influence of preloading level before the CFRP application
20	W-F2m2	2	-				
21	K-F2m1	2	-	Napężenie wstępne Initial stress (preloading) 15,0MPa			
22	K-F2m2	2	-				
23	K-Ft2m1	2	4 taśmy / 4 strips				
24	K-Ft2m2	2	4 taśmy / 4 strips				

Podział próbek na serie różniące się przekrojem, sposobem wzmocnienia, sposobem obciążenia i analizowanym problemem badawczym zamieszczono w tablicach 2.2. i 2.3.

The arrangement of concrete specimens in series varied in cross-section, mode of strengthening, loading, and investigated problems, is presented in Tab. 2.2 and 2.3.

Tablica 2.3. Program badania próbek prostopadłościennych o przekroju prostokątnym

Table 2.3. Test program of rectangular concrete specimens with rectangular cross-section

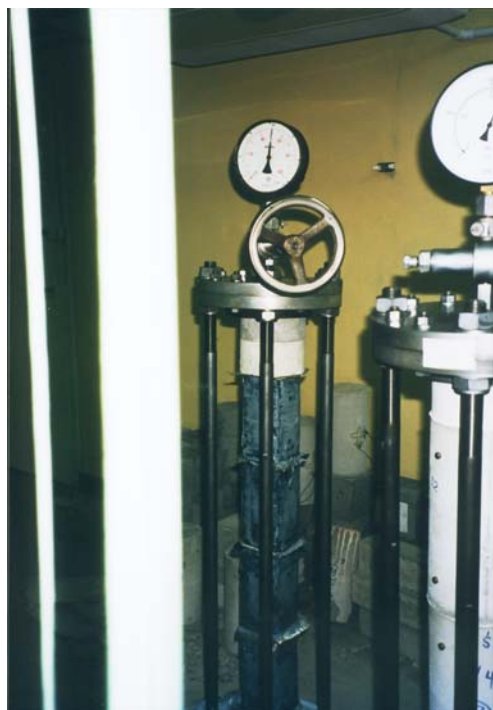
Lp.	Próbka Specimen	Zbrojenie poprzeczne – liczba warstw maty Transversal reinforcement – number of sheet layers	Mimośród obciążenia Load eccentricity [mm]	Problemy badawcze Investigated problems
1	P-01	-	30	Wpływ stopnia zbrojenia poprzecznego Wpływ kształtu przekroju Wpływ mimośrodu obciążenia Influence of transversal CFRP reinforcement ratio Influence of cross-section Influence of load eccentricity
2	P-02	-	-	
3	P-1m1	1	30	
4	P1-m2	1	-	
5	P-2m1	2	30	
6	P-2m2	2	-	
7	P-3m1	3	30	
8	P-3m2	3	-	

Przed wzmocnieniem powierzchnia próbek była starannie przygotowywana, za pomocą szlifierki usunięto powierzchnią gładką warstwę betonu, naroża próbek prostopadłościennych zaokrąglono (promień 10mm). Maty i taśmy przed klejeniem odtłuszczano, a do ich przyklejania stosowano odpowiednio zaprawy klejowe SikaDur 330 (maty) i SikaDur 30 (taśmy), zgodnie z wytykaniami producenta.

Maty stanowiące zbrojenie obwodowe (poprzeczne), dostarczone w rolkach o szerokości 300mm, były przycinane na odpowiednie odcinki o takiej długości, aby można było 1, 2 lub 3 razy opasać próbkę, z zakładem 60mm. Taśmy przyklejono centralnie, wzdłuż wszystkich czterech bocznych powierzchni próbek o przekroju kwadratowym, a następnie po 2 dniach oklejano matą (porównaj tab. 2.2).

The surface of specimens was thoroughly prepared before strengthening, the external concrete smooth face was removed with a grinder, corners of rectangular specimens were rounded (10mm in radius). Wraps and strips were degreased and bonded to the concrete with SikaDur 330 and SikaDur 30 adhesives, respectively.

The CFRP sheets being a circumferential (transversal) reinforcement of 300mm wide were cut into proper sections long enough to wrap a specimen 1, 2, or 3 times with overlapping length of 60mm. The strips were bonded centrally along the all four side faces of the square cross-section specimens, and next, after 2 days, the selected specimens were strengthened with sheets (see Tab. 2.2).



Rys. 2.1. Próbki K-F2m i K-2Ftm poddane wstępnemu obciążeniu przed przyklejeniem materiałów CFRP, po wykonaniu tej czynności

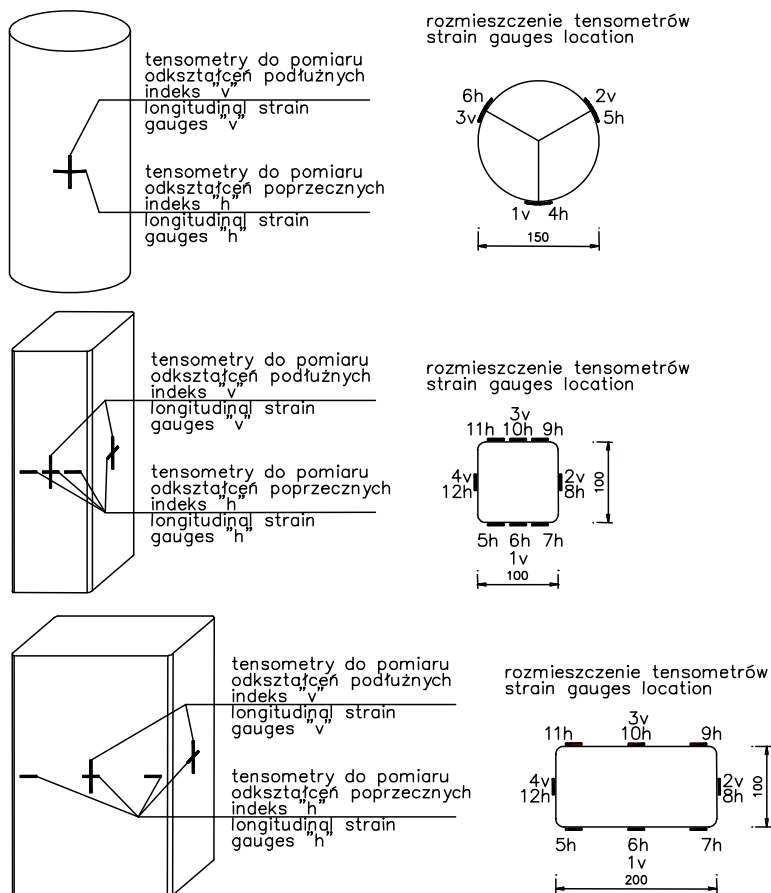
Fig. 2.1. Specimens K-F2m and K-2Ftm under initial loading before CFRP strengthening

Wstępne obciążenie próbek (tab. 2.2) prowadzono w pelżarkach (rys. 2.1), utrzymując obciążenie przez około 4 tygodnie. Podłużne odkształcenia próbek mierzono za pomocą mechanicznych mierników nasadowych o bazie 200mm (próbki walcowe) lub 102mm (próbki prostopadłościenne). Materiały kompozytowe aplikowano pod obciążeniem, które utrzymywano jeszcze przez około 7 dni, aż do pełnego stwardnienia kleju. Następnie próbki odciążano i potem poddawano zwykłej procedurze badawczej.

Próbki obciążano w maszynie wytrzymałościowej Form+Test o zakresie 3000kN, przy kontrolowanej prędkości przyrastania odkształcenia, aż do zniszczenia. Podczas obciążania dokonywano ciągłego pomiaru odkształceń podłużnych i poprzecznych, stosując w tym celu tensometry elektrooporowe o bazie 50 i 20mm, naklejane na powierzchni kompozytu (lub betonu, w próbkach nie wzmocnionych). Rozmieszczenie tensometrów elektrooporowych na próbkach wszystkich trzech typów pokazano na rysunku 2.2. Wskazania tensometrów oraz czujnika ciśnieniowego, umieszczonego w układzie hydraulicznym maszyny i umożliwiającego ocenę wielkości siły obciążającej próbkę, rejestrowano co 1 sekundę za pomocą miernika współpracującego z komputerem. Widok stanowiska badawczego pokazano na rysunku 2.3.

The initial loading of the specimens (see Tab. 2.2) was imposed in the so-called creep – testing machine (Fig. 2.1) and maintained through about 4 weeks. Longitudinal strains of the beams were measured with mechanical gauges on the bases of 200mm length (cylindrical specimens) and 102mm length (rectangular specimens). The CFRP materials were applied under loading, which was maintained through the next 7 days, until full hardening of the epoxy adhesive. Next, the specimens were unloaded and subjected to regular testing procedure.

The specimens were loaded until failure in the strength machine Form+Test of the 3000kN range with controlled speed of the strain increase. A constant reading of longitudinal and transversal strain was carried out with the strain gauges of a 50 and 20mm bases bonded to the CFRP (or concrete in non-strengthened specimens). The location of the resistance strain gauges on all three types specimens is shown on Fig. 2.2. The readings from the strain gauges, and from the pressure of the hydraulic loading system were recorded every 1 second with a measured system contributed with the computer. The test set-up is shown in Fig. 2.3.



Rys. 2.2. Usytuowanie tensometrów elektrooporowych na powierzchni próbek walcowych i prostopadłościennych
Fig. 2.2. Location of strain gauges on the concrete surface of the cylindrical and rectangular specimens



Rys. 2.3. Stanowisko do badania próbek
Fig. 2.3. Test set-up

2.2. Słupy żelbetowe

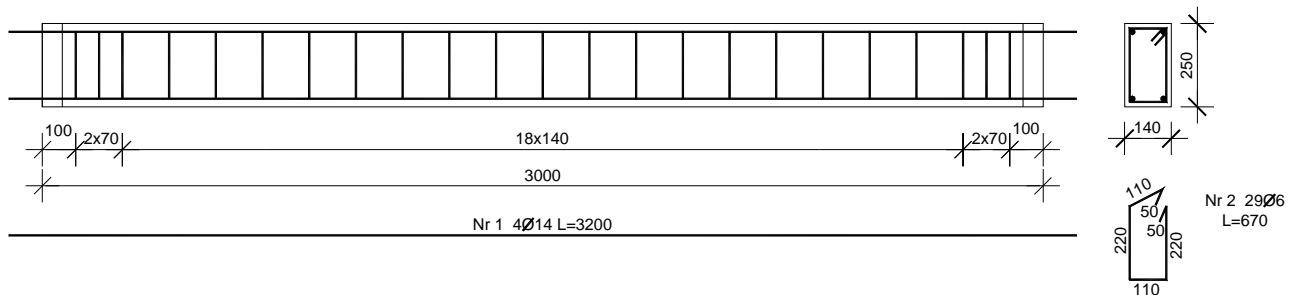
Badania przeprowadzono na dwóch smukłych słupach o przekroju prostokątnym (140×250mm) i wysokości 3000mm, wzmocnionych materiałami kompozytowymi (nie badano słupów żelbetowych bez wzmocnienia). Słupy wykonano z betonu o tym samym składzie, co betonowe próbki (por. tab. 2.1). Oba słupy zbrojone były 4 prętami o nominalnej średnicy 14mm, ze stali żebrowanej 34GS oraz strzemiomami o nominalnej średnicy 6mm, ze stali gładkiej. Rozstaw strzemiom wynosił 140mm w przęśle oraz 70mm w pobliżu podpór. Sposób zbrojenia słupów przedstawiono na rys. 2.4.

Pierwszy ze słupów o symbolu S-t/2m (t - oznacza rodzaj zbrojenia podłużnego, 2m - zbrojenia poprzecznego), został wzmocniony w kierunku podłużnym taśmą CFRP typu S, przyklejoną na obu krótszych bokach przekroju (rys. 2.5), a w kierunku poprzecznym dwiema warstwami mat CFRP.

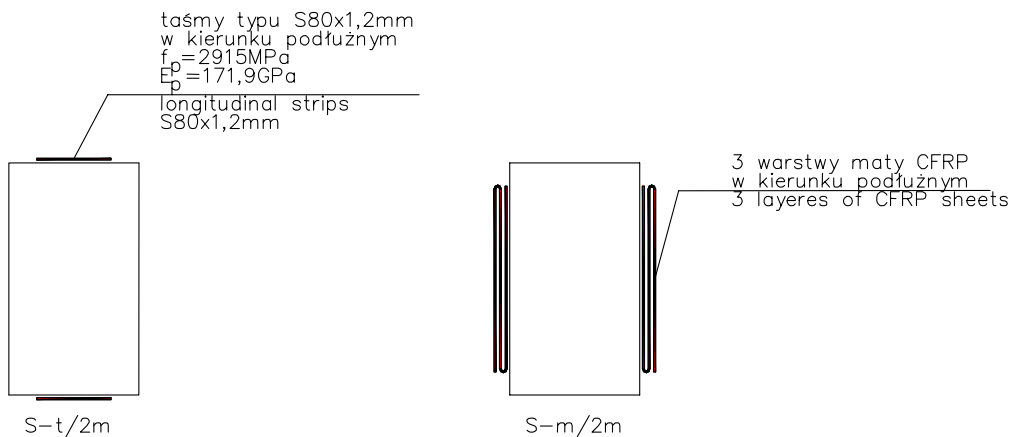
2.2. Test of columns

The tests were carried out on two rectangular cross-section (140×250mm) slender columns of 3000mm height, strengthened with CFRP materials. The columns were made of the same concrete composition as the specimens (see Tab. 2.1). Both columns were reinforced with 4 bars of 14 mm nominal diameter made of ribbed steel 34GS, and stirrups of 6 mm nominal diameter made of smooth steel. The stirrup spacing was 140mm at the span and 70mm at the support. The mode of columns reinforcement is presented in Fig. 2.4.

The first column S-t/2m (“t” stands for symbol of longitudinal CFRP reinforcement, “2m” of transversal CFRP reinforcement), was strengthened in longitudinal direction with the CFRP strip S type, bonded on both shorter sides of the cross-section (Fig. 2.5), and in transversal direction with two CRFP sheet.



Rys. 2.4. Schemat stalowego zbrojenia słupów
Fig. 2.4. Steel reinforcement in the column



Rys. 2.5. Sposób wzmocnienia słupów żelbetowych w kierunku podłużnym
Fig. 2.5. Strengthening mode of RC columns with CFRP longitudinal strips

Po zbadaniu pierwszego słupa podjęto decyzję o sposobie wzmocnienia drugiego słupa. Ponieważ zniszczeniu słupa S-t/2m towarzyszył bardzo wyraźny przyrost przemieszczeń w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny obciążenia, drugi słup postanowiono wzmocnić podłużnie właśnie w tej płaszczyźnie.

Słup o symbolu S-m/2m wzmocniono podłużnie za pomocą trzech warstw maty CFRP (rys. 2.5), a poprzecznie, tak jak poprzednio, dwiema warstwami maty.

After the test of the first column, a decision on the strengthening mode of the second one was taken. Since a failure of the S-t/2m column was accompanied with a very high increase of displacements along the loading plane, it was decided to strengthen the second column S-m/2m with longitudinal 3 sheets precisely along that plane.

Moreover this column was additionally reinforced longitudinally with transversal two layers of sheets, as it was done in the previous column (see Fig. 2.5).

W obu słupach maty obwodowe przyklejano z zakładem 60mm, przesuwając miejsce zakładu w kolejnych opaskach (szerokość opaski odpowiadała fabrycznej szerokości maty i wynosiła 300mm). Do przyklejania mat i taśm stosowano kleje odpowiednio Sikadur®330, Sikadur®30, tak samo jak w badaniach próbek. Powierzchnia betonu była przed wzmocnieniem zeszlifowana, a naroża zaokrąglone ($r = 10\text{mm}$).

Słupy obciążano siłą podłużną działającą na mimośrodkie początkowym $e = 50\text{mm}$, w płaszczyźnie o większej sztywności. Wszystkie słupy były obciążane w pozycji pionowej, w prasie hydraulicznej o nośności 6000kN. Ogólny widok stanowiska badawczego przedstawia rysunek 2.6.



Rys. 2.6. Ogólny widok stanowiska badawczego z widoczną kratownicą do badania przemieszczeń
Fig. 2.6. The test set-up of the column with a visible truss for displacement measurements

Słup wprowadzono do stanowiska za pomocą układu prowadnic wykonanych ze stalowych kształtowników, połączonych z wózkiem stanowiącym wyposażenie prasy, wtaczanym między jej kolumny. Prowadnice stanowiły też zabezpieczenie podczas badania. Słupy podparto przegubowo w dwóch punktach przez stalowe głowice z trzpieniem, umieszczonym w gnieździe blachy czołowej. W trakcie obciążania słupa siłę zwiększano skokowo, przy czym przyrost siły ustalano w zależności od przewidywanego obciążenia niszczonego, a po osiągnięciu około 0,75 tego obciążenia siłę zwiększano powoli w sposób ciągły, aby dokładniej uchwycić stan zniszczenia. Z dwóch poziomów obciążenia - około 0,55 i 0,70 przewidywanego obciążenia niszczonego, wykonywano pięciokrotny cykl odciążenia i obciążenia.

W trakcie badań mierzono przemieszczenia osi słupa oraz odkształcenia podłużne i poprzeczne na powierzchni betonu.

In both columns the circumferential sheets were bonded with 60mm overlap, shifting the overlapping length in the following layers (the width of the one sheet was 300mm). For bonding sheets and strips the Sikadur®330 and Sikadur®30 adhesives were applied respectively. The concrete surface had been grinded before the CFRP application, and corners rounded ($r = 10\text{mm}$).

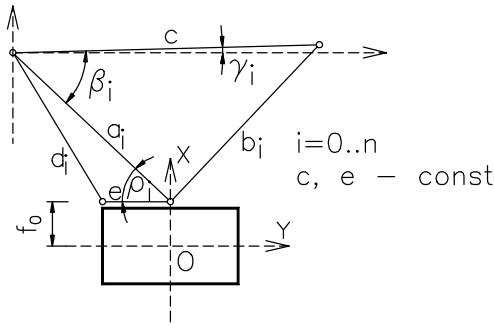
Columns were loaded non-axially with the initial eccentricity $e = 50\text{mm}$ in the plane of bigger stiffness of the cross-section. All columns were loaded in the vertical position, in hydraulic press of 6000kN range. The view of the test set-up is presented in Fig. 2.6.

The column was brought to the test stand with a system of slide bearing made of steel sections combined with a carriage the press was equipped with, rolled in between its towers. The slide bearing consisted also a safeguard during the test. The columns were supported with joints in both ends by two steel heads with a bolt located in the front sheet socket. During the loading, the force was increased stepwise, while the increasing in loading was defined depending on the predicted ultimate load, and after the load of 0,75 of this load, the load continuously and slowly increased in order to register the failure state. At two loading level, of 0,55 and 0,70 of the predicted ultimate load, a five-times unloading – preloading process was performed.

During the test a displacement of the longitudinal axis of the column and the longitudinal and transversal strains of the concrete surface were measured.

Do pomiaru przemieszczeń wykorzystano specjalny układ pomiarowy, stosowany wcześniej w badaniach [14], który składał się ze sztywnej stalowej kratownicy i listew łączących ją ze słupem. Schemat tego układu przedstawiono na rysunku 2.7, a jego widok na rysunku 2.8.

For strain measurement a special measuring system, applied earlier in tests [14], consisted of a rigid steel truss and bars connected it with the column, was used. The scheme and view of this system is presented in Fig. 2.7, and Fig. 2.8, respectively.



Rys. 2.7. Schemat układu pomiarowego przemieszczeń osi słupa

Rys. 2.8. Oprzyrządowanie pomiarowe słupa, widok z dołu

Fig. 2.7. Scheme of the displacement measuring system of the column's axis

Fig. 2.8. Equipment for displacement measurements of a column

Kratownica stanowiąca poziom odniesienia w pomiarach była połączona z jedną z głowic słupa przegubowo nieprzesuwnie, a z drugą przegubowo przesuwnie. Trzy listwy pomiarowe (a, b, d na rys. 2.7) miały możliwość swobodnego obrotu względem jednego punktu podparcia umieszczonego na słupie oraz możliwość swobodnego obrotu i przesuwu w drugim punkcie podparcia – na przecie kratownicy. Na tych listwach umieszczono przetworniki przemieszczeń liniowych, za pomocą których rejestrowano zmiany długości odcinków wyznaczonych przez listwy. Przed rozpoczęciem obciążania słupów dokonywano pomiarów początkowych długości odcinków pomiarowych a, b, d.

The truss making a measurement reference level was connected with a hinge to one of the heads of the columns, and with sliding connection to the other. Three measuring bars (a, b, d, see Fig. 2.8) were free to rotate relative to one support point placed on the column, and free to rotate and slide on the other support point, on the truss bar. On those bars LVDT gauges were installed for measuring of the length changes of the bars. After to columns loading, initial measurements of a, b, d sections length had been made.

Przy przyjętym układzie pomiarowym można opisać położenie punktu „0” przekroju (rys. 2.7) następującymi zależnościami:

For adopted measuring system, a position of the cross-section „0” point could be described with the following relations:

$$\begin{aligned} a_i &= a_0 - \Delta a_i \\ b_i &= b_0 - \Delta b_i \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} a_i &= a_0 - \Delta a_i \\ b_i &= b_0 - \Delta b_i \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} d_i &= d_0 - \Delta d_i \\ \cos(\beta_i) &= \frac{a_i^2 + c^2 - b_i^2}{2a_i c} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} d_i &= d_0 - \Delta d_i \\ \cos(\beta_i) &= \frac{a_i^2 + c^2 - b_i^2}{2a_i c} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \beta &= \arccos(\beta_i) \\ \cos(\rho_i) &= \frac{a_i^2 + e^2 - d_i^2}{2a_i e} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \beta &= \arccos(\beta_i) \\ \cos(\rho_i) &= \frac{a_i^2 + e^2 - d_i^2}{2a_i e} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\gamma_i = \beta_0 - \rho_i \quad (2.4)$$

$$\gamma_i = \beta_0 - \rho_i \quad (2.4)$$

$$x_i = a_i \sin(\beta_i - \gamma_0) + f_0 \cos(\gamma_i) \quad (2.5)$$

$$x_i = a_i \sin(\beta_i - \gamma_0) + f_0 \cos(\gamma_i) \quad (2.5)$$

$$y_i = a_i \cos(\beta_i - \gamma_0) + f_0 \sin(\gamma_i)$$

$$y_i = a_i \cos(\beta_i - \gamma_0) + f_0 \sin(\gamma_i)$$

a przemieszczenia tego punktu i obrót przekroju w płaszczyźnie XY zależnościami

$$\begin{aligned} v_{xi} &= x_i - x_0 \\ v_{yi} &= y_i - y_0 \\ \alpha_i &= \gamma_i - \gamma_0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

przy czym sieczny kąt pochylenia śladu płaszczyzny zginania względem osi Y jest równy

$$\delta = \arctg\left(\frac{v_{xi}}{v_{yi}}\right) \quad (2.7)$$

W obu słupach rejestrowano przemieszczenia w trzech przekrojach na długości słupa (rys. 2.9), stosując przetworniki przemieszczeń liniowych Psx50 o dokładności odczytu 0,05mm.

Odształcenia podłużne na powierzchni kompozytów były określane za pomocą przetworników przemieszczeń liniowych PSx20 i PSx10, na trzech bazach pomiarowych zlokalizowanych na wysokości słupa (rys. 2.9).

but the displacement of this point and the cross-section rotation in the plane XY were defined by expressions (2.6)

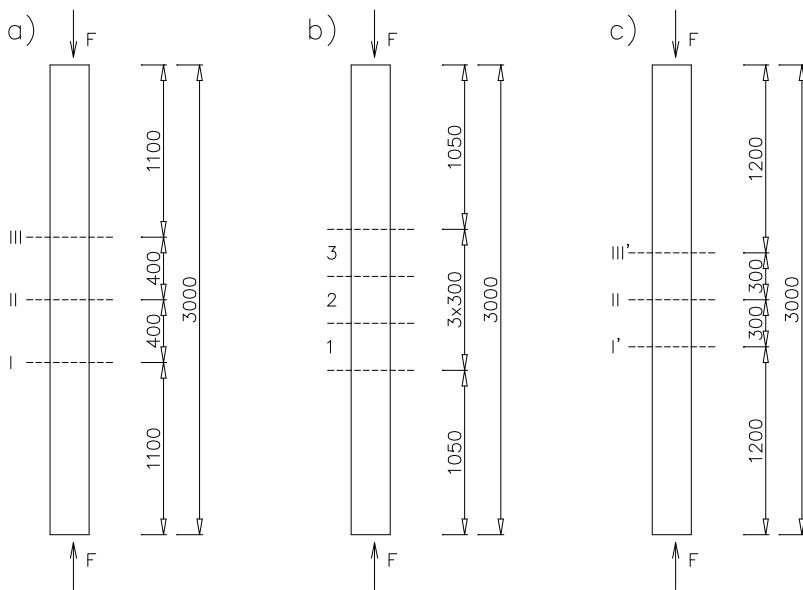
$$\begin{aligned} v_{xi} &= x_i - x_0 \\ v_{yi} &= y_i - y_0 \\ \alpha_i &= \gamma_i - \gamma_0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

while the secant inclination angle of the bending surface trace relative to Y is equal (2.7).

$$\delta = \arctg\left(\frac{v_{xi}}{v_{yi}}\right) \quad (2.7)$$

In both columns, displacements in three cross-sections on the length of a column (Fig. 2.9) were recorded using LVDT gauges Psx50 of 0,05 mm reading accuracy.

Longitudinal CFRP strains were registered with the LVDT gauges PSx20 and PSx10, applied on three measuring bases located on the height of the column (Fig. 2.9).

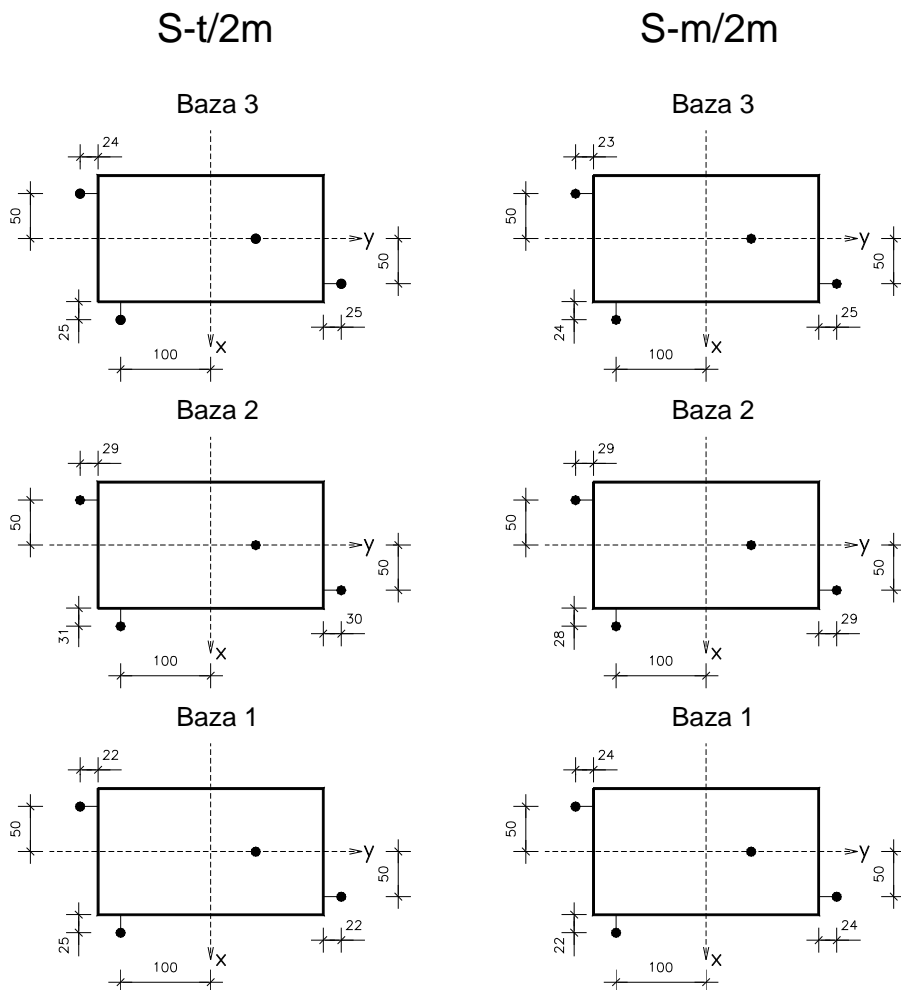


Rys. 2.9. Usytuowanie przekrojów i baz do pomiarów: a) przemieszczeń b) odkształceń podłużnych, c) odkształceń poprzecznych słupa

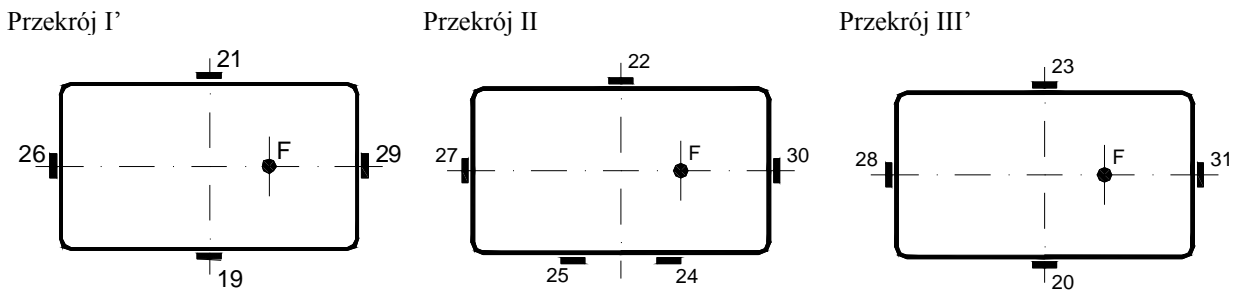
Fig. 2.9. Location of the cross-sections and bases for: a) displacement, b) longitudinal strain, c) transversal strain measurements of the column

Bazy pomiarowe były wyznaczone przez stalowe bolce, osadzone w betonie, na których umieszczono aluminiowe listwy z przetwornikami. Bolce pośrednie służyły do zawieszenia dwóch listew, odpowiadających dwóm przyległym bazom (rys. 2.10).

The measuring bases were defined by the steel bolts bedded in concrete, and aluminum bars with LVDT gauges placed on them. Intermediate bolts served for hanging of two bars corresponding with two adjacent bases (Fig. 2.10).



Rys. 2.10. Usytuowanie osi przetworników przemieszczeń liniowych w poszczególnych bazach
 Fig. 2.10. Location of the LVDT gauges



Rys. 2.11. Rozmieszczenie tensometrów do pomiaru odkształceń poprzecznych w poszczególnych przekrojach dla obu słupów
 Fig. 2.11. Location of the strain gauges for transversal strain measurements in different cross-section of the column's height

Pomiar odkształceń poprzecznych wykonywano w trzech przekrojach (rys. 2.9), przy użyciu tensometrów elektrooporowych o bazach 20 i 50mm. Rozmieszczenie tensometrów w kolejnych przekrojach (I', II, III'), pokazano na rys. 2.11.

Ogólny widok oprzyrządowania do pomiaru odkształceń i przemieszczeń słupa pokazano na rys. 2.12.

Pomiary przemieszczeń liniowych oraz odkształceń rejestrowano automatycznie 20 razy co 1,5 sekundy, za pomocą komputerowego systemu akwizycji danych.

The transversal strain measurements were carried out in three cross-sections (Fig. 2.9) with the electric strain gauges of 20 and 50mm bases. The location of the strain gauges in consecutive cross-sections (I', II', III') is presented in Fig. 2.11.

The view of strain and LVDT gauges is shown in Fig. 2.12.

All measurements were carried out automatically 20 times every 1.5 sec. with the computer data acquisition system.



Rys. 2.12. Oprzyrządowanie do pomiaru odkształceń i przemieszczeń słupa
 Fig. 2.12. The strain and displacement measurement equipment

Do przetworzenia wyników pomiarów wykorzystano program komputerowy, za pomocą którego obliczono:

- przemieszczenia osi słupa v_x i v_y , kąt określający kierunek płaszczyzny zginania δ i kąt skręcenia przekroju α , na podstawie zależności (2.6) i (2.7),
- kąt δ i odkształcenia skrajnych włókien przekroju ε_c i ε_{ct} – na podstawie odkształceń pomierzonych na długości słupa, przy założeniu, że po odkształceniu przekrój pozostaje płaski,
- odkształcenia poprzeczne na powierzchni kompozytów – na podstawie odczytów z tensometrów.

Przy każdym kolejnym kroku obciążenia wszystkie te wielkości obliczano trzykrotnie, na podstawie:

- pierwszego i ostatniego pomiaru z dwudziestu rejestrowanych,
- średniego ze wszystkich dwudziestu.

Wybrane wyniki pomiarów w postaci wykresów i tabel zamieszczono w załączniku. Wszystkie wyniki badań są dostępne w Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej.

For calculation of the test measurements, a computer software system was used, which calculated the following parameters:

- the column axis displacement v_x i v_y , the angle defining the bending plane direction δ and the cross-section torsion angle α , based on relations (2.6) and (2.7),
 - angle δ and strain of cross-section edges ε_c i ε_{ct} – based on the strain gauges measured along the length of the column, with the assumption the plain section principle,
 - transversal FRP strains – based on the strain gauges,
- At each consecutive step of loading, all values were calculated three times, based on:
- the first and the last reading out of the twenty recorded,
 - average of all twenty.

All the results of measurements in form of diagrams and tables are available in the Department of Concrete Structures of the Łódź Technical University. Some selected data are shown in the appendix of the report.

3. WYNIKI BADAŃ ELEMENTÓW

3.1. Wyniki badań materiałów

3.1.1. Beton

Na podstawie badań wytrzymałościowych betonowych próbek określono:

- wytrzymałość betonu na ściskanie, $f_{c,cube}$ (próbki sześciennie o boku 150mm),
- wytrzymałość betonu na ściskanie, f_c (próbki walcowe 150mm×300mm).
- wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu, $f_{ct,sp}$ (próbki sześciennie),
- moduł sprężystości betonu, E_c (próbki walcowe).

Charakterystykę wytrzymałościową betonu określoną na próbkach wykonanych razem ze słupami zamieszczono w tabelicy 3.1. Wyniki badań betonu potwierdzają, że wytrzymałość betonu w obu słupach była porównywalna z wytrzymałością betonu betonowych próbek.

Tablica 3.1. Charakterystyka wytrzymałościowa betonu
Table 3.1. Strength characteristic of concrete

Słup Column	$f_{c,cube}$, MPa		f_c , MPa		f_{ct} , MPa		E_c , GPa	
	wynik result	średnia average	wynik result	średnia average	wynik result	średnia average	wynik result	średnia average
S-t/2m	35,7	33,8	31,5	33,6	2,63	2,66	26,1	27,4
	32,5		29,9		2,70		24,5	
	33,0		31,6		2,66		25,9	
	36,7		36,9				30,8	
	33,7		33,5				28,2	
	31,5		38,1				28,8	
S-m2m	38,4	37,9	35,2	34,2	2,61	2,90	27,2	26,9
	36,7		36,0		2,90		28,0	
	39,0		36,4		3,19		29,5	
	36,9		33,5				26,5	
	39,7		32,5				25,0	
	36,9		31,6				25,0	

3.1.2. Materiały kompozytowe

Wytrzymałościową charakterystykę taśm i mat węglowych, określoną odpowiednio doświadczalnie i na podstawie danych producenta, zamieszczono w tabelicy 3.2 i na rysunku 3.1.

Tablica 3.2. Mechaniczne właściwości materiałów CFRP użytych do wzmacniania próbek i słupów
Table 3.2. Mechanical properties of CFRP materials used for strengthening

Cecha Parameter		Materiał CFRP / CFRP material		
		Mata / Sheet SikaWrap Hex-230C*	Taśmy / Strip Sika CarboDur Shear	Taśmy / Strip Sika CarboDur S512
Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength	MPa	3500	2295	2915
Moduł sprężystości Elasticity modulus	GPa	230	132	171,9
Odształcalność przy zerwaniu Ultimate fracture strain	%	15	17,3	17,0
Wymiary przekroju Dimension of cross-section	mm	0,13 × 300	1,4 × 40	1,2 × 14,7

*według danych producenta / by the producer

3. TEST RESULTS

3.1. Material tests

3.1.1. Concrete

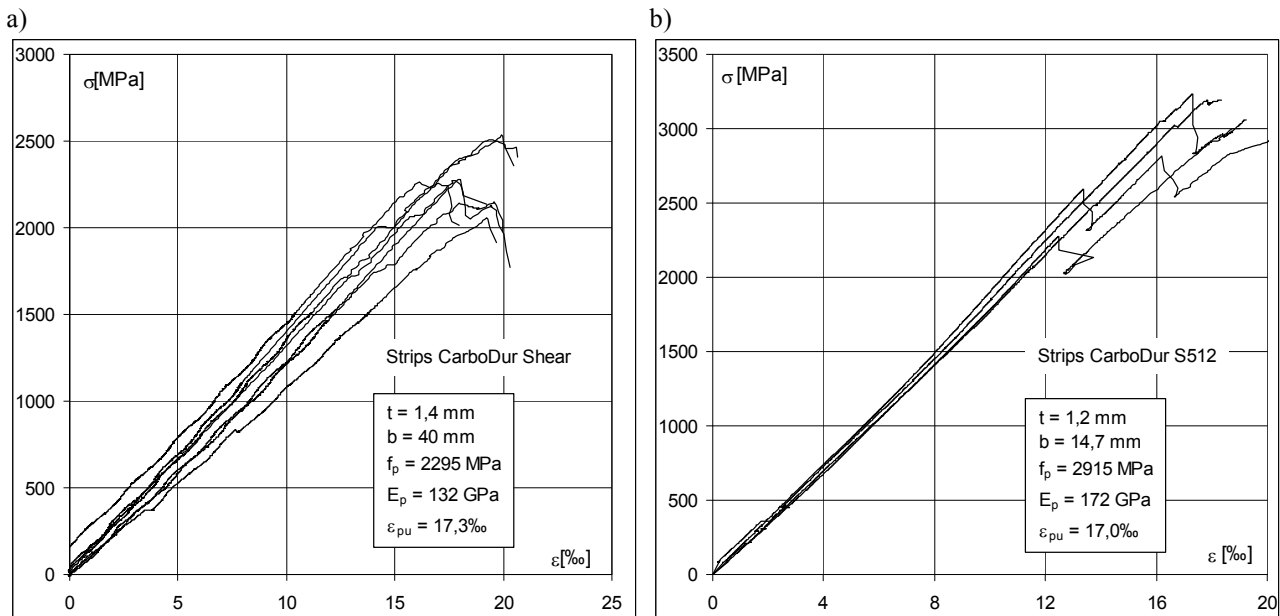
Based on the tests of concrete specimens, the following parameters were defined:

- concrete compressive strength, $f_{c,cube}$ (cubic specimens of 150mm),
- concrete compressive strength, f_c (cylindrical specimens 150×300mm),
- concrete splitting tensile strength $f_{ct,sp}$ (cubic specimens),
- concrete elasticity modulus E_c (cylindrical specimens).

Strength characteristic of concrete determined on specimens performed together with RC columns are shown in Table 3.1. Test results of concrete specimens confirm similar strength of both RC columns and concrete specimens.

3.1.2. Composite materials

Tensile strength characteristic of the CFRP strips and sheets experimentally defined and recommended by the producer are shown in Table 3.2 i in Figure 3.1.



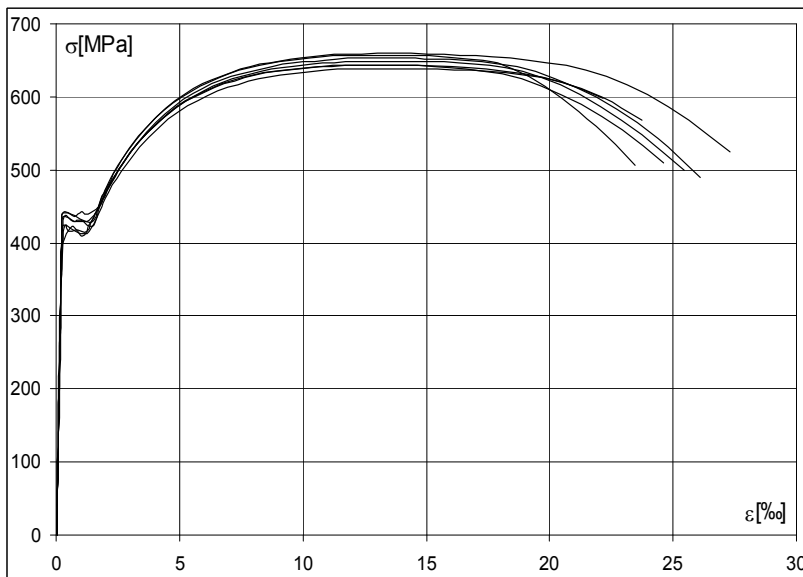
Rys. 3.1. Doświadczalne zależności σ_p - ε_p taśm węglowych: a) Sika CarboDur Shear, b) taśm Sika CarboDur typ S512
 Fig. 3.1. Experimental stress-strain characteristic of the CFRP strips a) Sika CarboDur Shear, b) taśm Sika CarboDur

3.1.3. Stal zbrojeniowa

Charakterystykę wytrzymałościową σ_s - ε_s stali zbrojeniowej użytej do zbrojenia słupów przedstawiono na rysunku 3.2 i w tabelicy 3.3.

3.1.3. Reinforcing steel

The strength – strain characteristics σ_s - ε_s of steel reinforcement is presented in Fig.3.2 and in Table 3.3.



Rys. 3.2. Charakterystyka wytrzymałościowa $\sigma - \varepsilon$
 Fig. 3.2. Strength – strain characteristics of steel

Tablica 3.3. Wytrzymałościowa charakterystyka stali zbrojeniowej
 Table 3.3. Strength characteristics of steel reinforcement

Średnica Diameter [mm]	A_s [mm ²]	f_{sy} [MPa]	f_{su} [MPa]	E_s [GPa]
14,07	155,4	433,3	648,0	198,4

3.2. Wyniki badań próbek

Wszystkie próbki wzmocnione obwodowo matą zniszczyły się w ten sam sposób, przez zerwanie włókien maty (rys. 3.3 i 3.4). Zniszczenie było bardzo gwałtowne, a beton wewnątrz opaski był zupełnie zmiądzony, w stopniu proporcjonalnym do liczby zastosowanych mat.

Maksymalne naprężenia ściskające (lub siły, w odniesieniu do próbek P obciążanych mimośrodowo) zestawiono w tablicach 3.4 i 3.5, określając też stopień wzmocnienia betonu.

3.2. Test of concrete specimens

All specimens circumferentially strengthened with sheets failed by CFRP fracture (Fig. 3.3 and 3.4). The failure was very violent, and concrete inside the CFRP hoop was completely crushed and disintegrated, the more so the more layers of CFRP wraps were applied.

The maximal compressive stresses (or ultimate loads with reference to specimens of type P, eccentrically loaded) with the strengthening ratio of concrete are listed in Tab. 3.4 and 3.5.



Rys. 3.3. Próbki W-1m2 oraz K-Ft2m2 po zniszczeniu
Fig. 3.3. Specimens W-1m2 and K-Ft2m2 after failure



Rys. 3.4. Próbki P-1m1 oraz P-1m2 po zniszczeniu
Fig. 3.4. Specimens P-1m1 and P-1m2 after failure

Tablica 3.4. Maksymalne naprężenia w próbkach W i K
Table 3.4. Maximal stress registered in specimens W and K

Lp.	Próbka Specimen	Naprężenia / stress MPa		Stopień wzmocnienia Strengthening ratio
		wynik result	średnia average	
1	W-01	29,4	29,9	
2	W-02	30,4		
3	W-1m1	42,6	41,5	1,39
4	W-1m2	40,4		
5	W-2m1	58,5	56,6	1,89
6	W-2m2	54,8		
7	W-2m3	56,5		
8	W-F2m1	65,4	64,5	2,16
9	W-F2m2	63,6		
10	W-3m	83,7		2,80
11	W-2mp1	21,7	24,0	0,80
12	W-2mp2	26,3		
13	K-01	29,8	32,3	
14	K-02	34,8		
15	K-2m1	42,8	43,6	1,35
16	K-2m2	44,4		
17	W-F2m1	47,2	46,0	1,42
18	W-F2m2	44,8		
19	K-t1	32,1	33,3	1,03
20	K-t2	34,5		
21	K-t2m1	59,7	61,3	1,90
22	K-t2m2	63,0		
23	K-Ft2m1	68,7	66,5	2,06
24	K-Ft2m2	64,3		

Na wykresach rys. 3.5 - 3.7 przedstawiono średnie odkształcenia z tensometrów w próbkach obciążonych osiowo, a dokładne (nieuśrednione) wartości odkształceń zarejestrowane w próbkach obciążanych mimośrodowo, przedstawiono na rysunkach 3.8 i 3.9.

Badania potwierdziły, że stosowanie materiałów kompozytowych CFRP jako zewnętrznego wzmocnienia obwodowego jest efektywnym sposobem zwiększania nośności betonu. Powodem przyrostu nośności ściskanego betonu jest ograniczenie jego poprzecznych odkształceń, co wywołuje korzystny trójosiowy stan ściskania betonu, znajdującego się wewnątrz kompozytowej opaski. Wyniki badań potwierdzają wyraźny wpływ stopnia poprzecznego zbrojenia kompozytowego (liczby warstw zbrojenia obwodowego na efektywność wzmocnienia). W wypadku próbek walcowych jest to nawet prawie 3-krotny przyrost nośności, przy 3 warstwach maty (rys. 3.5). Wyraźnie zwiększyły się także maksymalne odkształcenia podłużne, od 7‰ - przy 1 warstwie maty do 18‰ - przy trzech warstwach. Średnie pomierzone odkształcenia poprzeczne nie osiągnęły wartości granicznej, przy której włókna maty ulegają zerwaniu, co jest oczywiste, gdyż zerwanie nastąpiło w przypadkowym przekroju i najczęściej te odkształcenia nie zostały zarejestrowane.

Najwyższą efektywność wzmocnienia zaobserwowano w wypadku osiowo ściskanego przekroju kołowego, niższą przy przekroju kwadratowym, a najniższą przy prostokątnym, co potwierdziły wyniki wcześniejszych badań [1, 2, 18, 19, 22, 25].

Tablica 3.5. Maksymalne naprężenia / siły obciążające w próbkach P

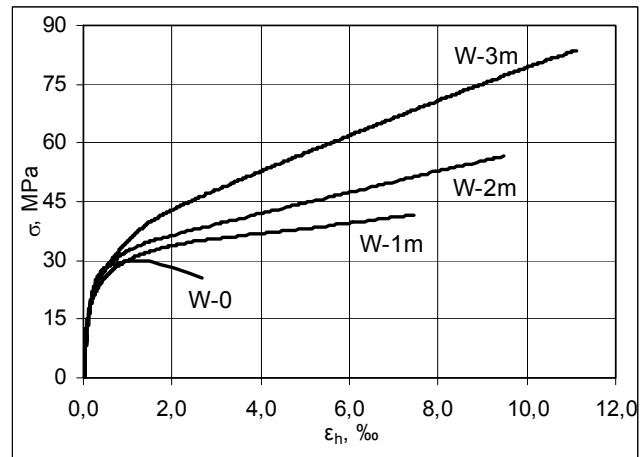
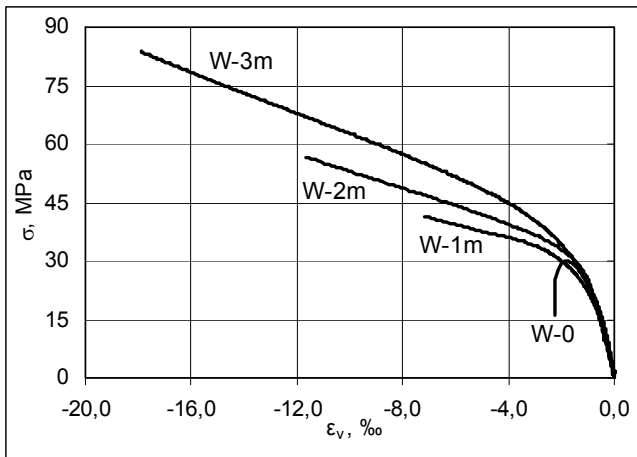
Table 3.5. Maximal stress / ultimate loads in specimens P

Lp.	Próbka Specimen	Naprężenia i siły Stress and loads	Stopień wzmocnienia Strengthening ratio
1	P-01	347,4kN	
2	P-1m1	402,0kN	1,16
3	P-2m1	433,2kN	1,25
4	P-3m1	471,3kN	1,36
5	P-02	28,1MPa	
6	P1-m2	32,6MPa	1,16
7	P-2m2	35,3MPa	1,26
8	P-3m2	29,2MPa	1,04*
*) próbka przypadkowo obciążona mimośrodowo specimen loaded with axial eccentricity			

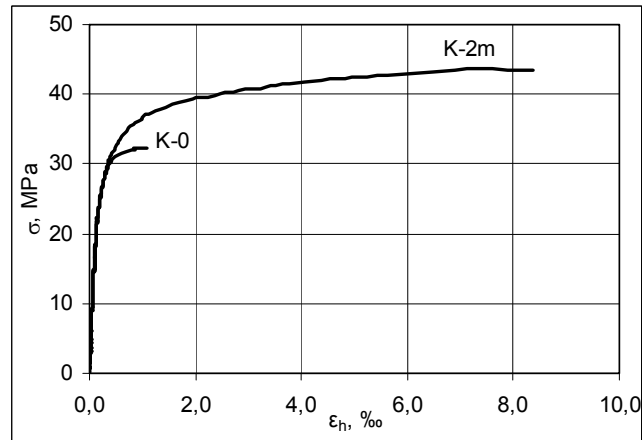
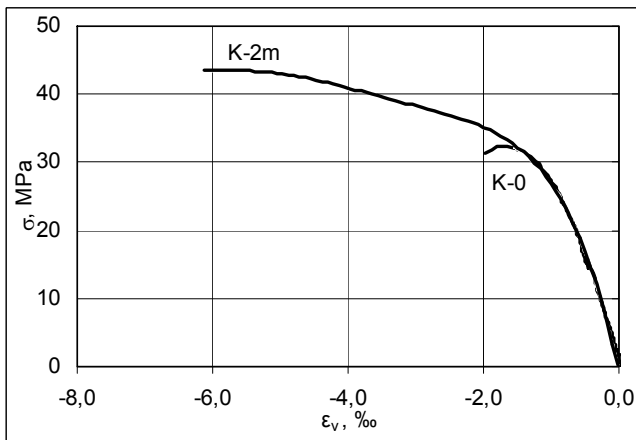
In diagrams Fig. 3.5 – 3.7 the average strains in the axially loaded specimens are presented, and the precise (not average) strains recorded in eccentrically loaded specimens are shown in Fig. 3.8 and 3.9.

The tests confirmed high effectiveness of the strengthening of concrete with CFRP materials. The strength increase in the confined concrete resulted from limitation of concrete transversal strain, which led to a beneficial three-axial state of confined. The test results confirmed a distinct influence of the transversal CFRP reinforcement ratio (number of layers of the circumferential reinforcement) on the ultimate concrete strength. The concrete strength of cylindrical specimens increased almost three times (with 3 layers of sheet, Fig. 3.5). Significant increase in longitudinal strains was observed. The ultimate CFRP strains equaled 7‰ and 18‰ for 1 layer and 3 layers of sheet, respectively. The average measured transversal CFRP strains did not reach the ultimate value, what is obvious since CFRP rupture occurred in the random cross-section, and those strains remained most often unrecorded.

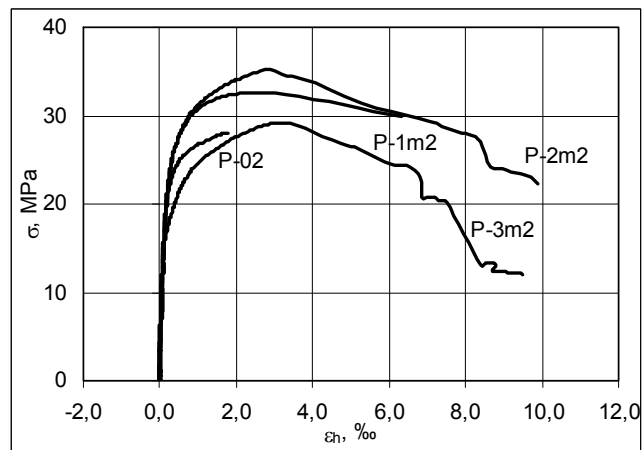
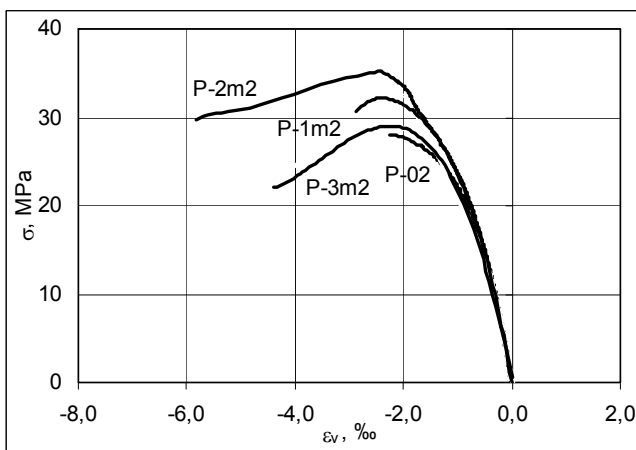
The highest effectiveness of strengthening was observed in the case of axially compressed circular cross-section, lower in case of square cross-section, and the lowest with rectangular one which had been confirmed in earlier investigations [1, 2, 18, 19, 22, 25].



Rys. 3.5. Średnie podłużne i poprzeczne odkształcenia próbek walcowych, przy różnej liczbie warstw mat
 Fig. 3.5. Average longitudinal and transversal strain in cubic specimens with different number of CFRP layers



Rys. 3.6. Podłużne i poprzeczne odkształcenia próbek typu K, bez wzmocnienia (K-0) i wzmocnionych 2 warstwami mat (K-2m)
 Fig. 3.6. Longitudinal and transversal strain in cubic specimens of K type, without strengthening (K-0) and strengthened with 2 layers of CFRP sheet (K-2m)



Rys. 3.7. Średnie odkształcenia próbek typu P przy obciążeniu osiowym
 Fig. 3.7. Average strain in rectangular specimens of P type axially loaded

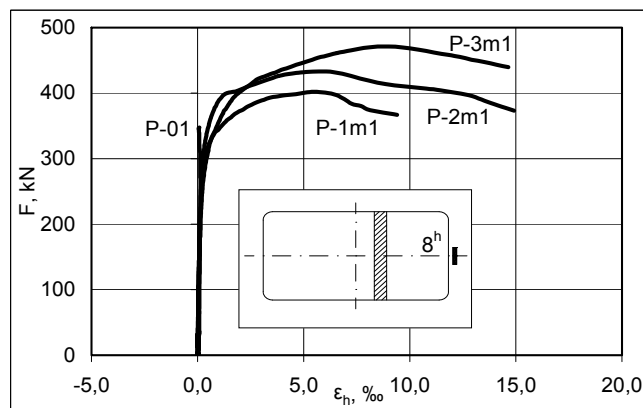
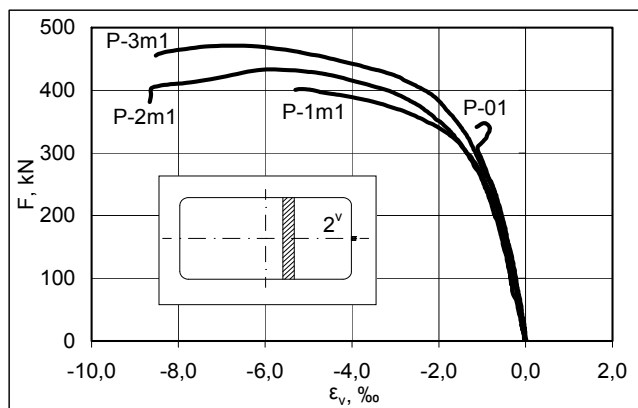
Mimo słabszego efektu wzmocnienia w wypadku próbek sześciennych (rys. 3.6), przyrost nośności wyniósł ponad 30%, a średnie odkształcenia podłużne przy maksymalnym naprężeniu były rzędu -6%.

Zupełnie inaczej kształtują się wykresy średnich odkształceń próbek prostokątnych, obciążonych osiowo (rys. 3.7).

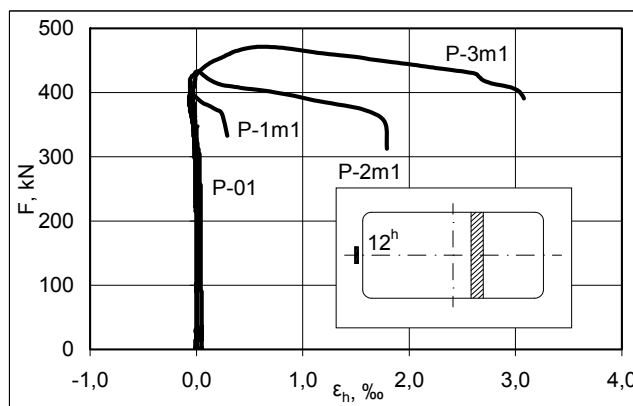
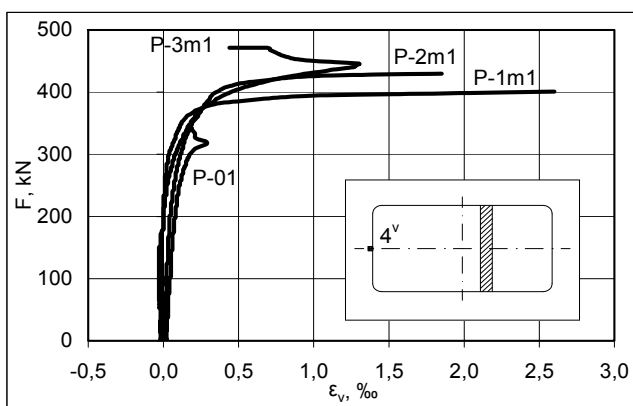
Despite a lower strengthening efficiency of the square cross-section specimens (Fig. 3.6), the increase in compressive strength came to over 30%, and the average longitudinal strain corresponding with the maximal stress ranged -6%.

The average strains of rectangular specimens axially loaded behaved in completely different way (Fig. 3.7).

Maksymalne naprężenia osiągnięto bez względu na liczbę warstw maty, przy odkształceniach podłużnych równych około $-2,5\%$, a potem naprężenia wyraźnie malały wraz ze wzrostem odkształceń. Zaskakująco niskie wartości naprężeń w próbce P-3m2 tłumaczy przypadkowy mimośród obciążenia, który został zarejestrowany przez tensometry. Przy dwóch warstwach maty osiągnięto 26% przyrost nośności w porównaniu z betonową próbką, podczas gdy graniczne odkształcenia podłużne osiągnęły wartość prawie $6,0\%$ (przy spadku naprężenia).



Rys. 3.8. Próbki typu P obciążone mimośrodkowo, odkształcenia w obrębie strefy ściskanej przekroju
Fig. 3.8. Compressive strain in rectangular P type specimens, eccentrically loaded



Rys. 3.9. Próbki typu P obciążone mimośrodkowo, odkształcenia w obrębie strefy rozciąganej przekroju
Fig. 3.9. Tensile strain in rectangular P type specimens eccentrically loaded

Nieco inne efekty wzmocnienia zarejestrowano przy mimośrodkowym obciążeniu próbek prostokątnych (rys. 3.8). Badania wykazały, że przy takim sposobie obciążenia, efekt obwodowego wzmocnienia przekroju prostokątnego jest wyraźnie korzystniejszy niż przy obciążeniu osiowym. Ten wniosek jest prawdziwy, o ile zastosuje się co najmniej 2 warstwy maty. Przyrost nośności jest wprawdzie tego samego rzędu, co przy obciążeniu osiowym, ale spadek naprężenia następuje dopiero przy podłużnych odkształceniach skrajnego włókna strefy ściskanej większych od 6% i jest mniejszy niż przy obciążeniu osiowym. Odkształcenia poprzeczne w rozciąganej strefie przekroju (rys. 3.9) są niewielkie, rzędu $2 - 3\%$, co jest oczywiste, gdyż rozciągany beton w tym miejscu przekroju nie naciskał na kompozytową opaskę.

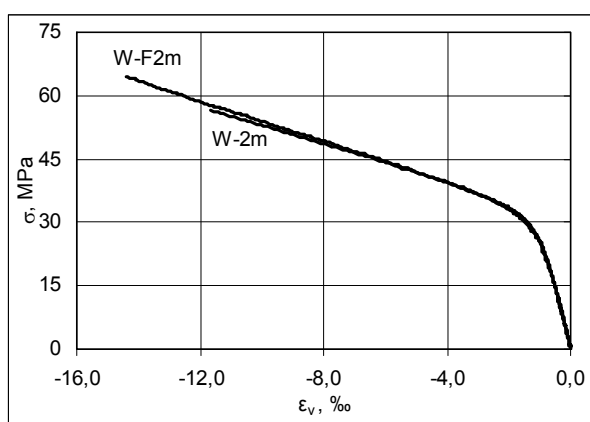
Some different effects of strengthening were observed under eccentric load of rectangular specimens of type P (Fig. 3.8). The tests proved that the effect of circumferential strengthening of rectangular cross-section was significantly more beneficial under the eccentric load than under the axial load. This conclusion is correct provided at least 2 layers of sheets are applied. Indeed, the increase in the strength is of the same range as under the axial load, but the stress decrease occurs as late as at the compression edge of the cross-section is higher than 6% , and it is lower than strain under the axial load. The transversal strain values in the tension zone of the cross-section (Fig. 3.9) are low, ranging $2 - 3\%$ which is obvious, since a tensioned concrete in that point of the cross-section did not press the composite hoop.

Wpływ wstępnego obciążenia próbek (wzmocnienia przy założonym poziomie obciążenia) okazał się w niewielkim stopniu korzystny (rys. 3.10, 3.11 i 3.12). Można to wyjaśnić tym, że kompozytowa opaska zaczyna być rozciągana dopiero wtedy, gdy naprężenia ściskające przekroczą te, przy których opaska była nakładana na próbkę. Przy projektowaniu wzmocnień CFRP wstępne obciążenie można więc pomijać, na rzecz zwiększenia bezpieczeństwa konstrukcji.

Podłużne zewnętrzne zbrojenie kompozytowe, które nie towarzyszy zbrojenie poprzeczne, nie jest skuteczne, bo przedwcześnie odspaja się od powierzchni betonu, co ilustruje rysunek. 3.13 – wykresy dla próbek K-t. Podobne wyniki uzyskano obciążając próbki walcowe wzmocnione podłużnie W-2mp. Dopiero dodanie kompozytowej opaski pozwala na współpracę podłużnych taśm z betonem aż do zerwania opaski.

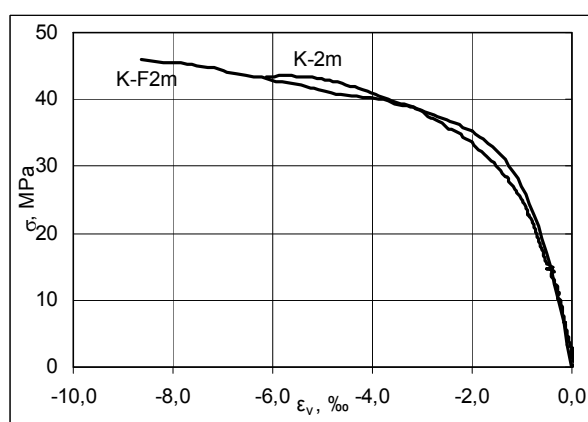
The influence of the preliminary loading of the specimens had insignificant effect on the ultimate strength (Fig. 3.10, 3.11, 3.12). The composite hoop starts to transfer tensile stress when compressive stress exceeds the preliminary concrete stress for which the CFRP was applied. Hence, for design approach preloading of the specimen before the strengthening may be omitted for safety reason.

The longitudinal external CFRP strips applied without any transversal sheet is not affected due to unexpected CFRP debonding from the concrete surface, what is shown in Fig. 3.13 (see the specimen K-t). Similar results were obtained for cylindrical specimens longitudinally strengthened with CFRP strips (specimen W-2mp). As soon as the composite hoop was added, a cooperation of longitudinal strips with concrete was enabled, up until fracture of the transversal wrapping.



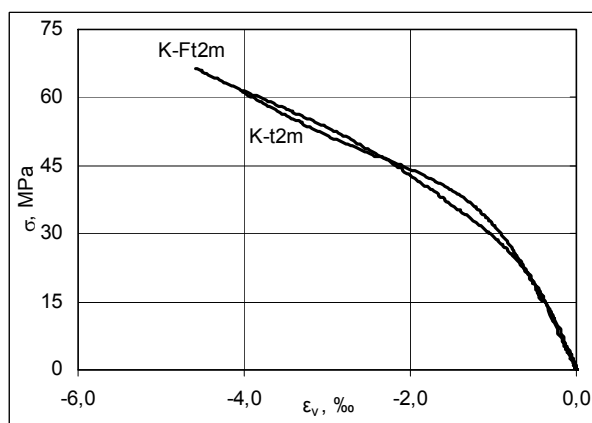
Rys. 3.10. Podłużne odkształcenia próbek walcowych, wzmocnianych pod obciążeniem

Fig. 3.10. Longitudinal strain in cylindrical specimens strengthened under loading



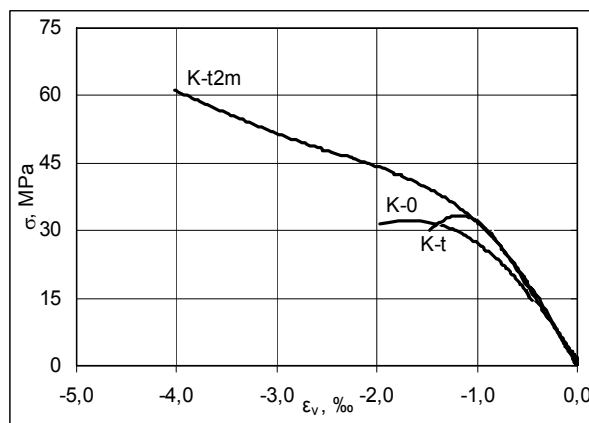
Rys. 3.11. Podłużne odkształcenia próbek typu K, wzmocnianych pod obciążeniem

Fig. 3.11. Longitudinal strain in cubic specimens K type strengthened under loading



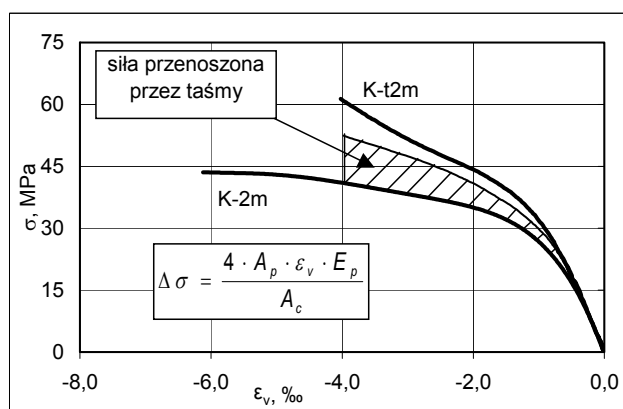
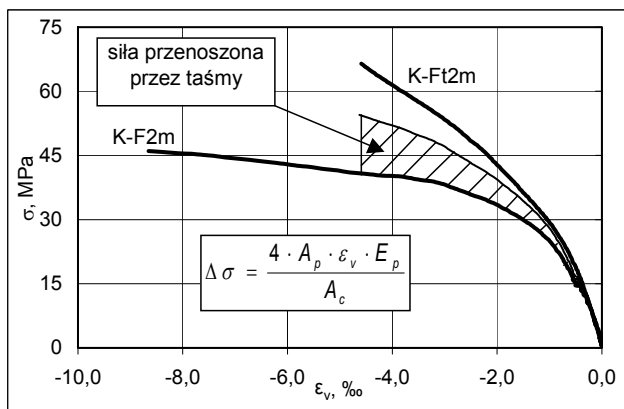
Rys. 3.12. Podłużne odkształcenia próbek typu K, wzmocnianych pod obciążeniem odcinkami kształtek i matą

Fig. 3.12. Longitudinal strain in cubic specimens K type strengthened under loading with longitudinal CFRP strips and transversal sheet



Rys. 3.13. Porównanie nośności i podłużnych odkształceń próbek typu K bez wzmocnienia, wzmocnionych tylko taśmami i wzmocnionych taśmami i matami

Fig. 3.13. Comparison of longitudinal strain – stress curves in cubic specimens K type unstrengthened and strengthened with strips and sheets



Rys. 3.14. Porównanie nośności i podłużnych odkształceń próbek typu K, wzmocnionych tylko matą oraz taśmami i matą, naklejanymi przed obciążeniem (K-2m i K-t2m) i przy obciążeniu wstępnym (K-F2m i K-Ft2m)

Fig. 3.14. Comparison of ultimate loads and longitudinal strain in cubic specimens K type strengthened with only transversal sheet and specimens strengthened with longitudinal strips and transversal sheet before loading (K-2m, K-t2m) and specimens strengthened under preloading (K-F2m, K-Ft2m)

Kolejne porównanie (rys. 3.14.) pozwala na dwa istotne spostrzeżenia. Badania wykazały, że obecność podłużnego zbrojenia kompozytowego redukuje podłużne odkształcenia, przy których dochodzi do zerwania włókien zbrojenia obwodowego. Świadczy to o negatywnym wpływie podłużnego zbrojenia kompozytowego na odkształcalność betonowych próbek. Stopień wzmocnienia betonu jest jednak wyższy niż wynikałoby to ze zsumowania naprężeń w betonie wzmocnionym tylko kompozytową opaską i naprężeń przenoszonych przez taśmy. Te drugie naprężenia zostały obliczone na podstawie odkształceń podłużnych, przy przyjęciu liniowej charakterystyki taśm kompozytowych wg zależności (2.8).

$$\Delta\sigma = \frac{4A_p \varepsilon_v E_p}{A_c} \quad (2.8)$$

gdzie:

- A_p – pole przekroju jednej taśmy węglowej,
- A_c – pole przekroju słupa,
- ε_v – maksymalne odkształcenie podłużne taśmy zarejestrowane w badaniu,
- E_p – moduł sprężystości taśm.

Nie jest to spostrzeżenie zaskakujące, gdyż już badania Mörscha [7], dotyczące słupów uzwojonych, wykazały, że samo uzwojenie bez zbrojenia podłużnego jest zupełnie nieskuteczne.

3.3. Badania słupów

Słupy S-t/2m i S-m/2m zniszczyły się w ten sam sposób, na skutek zmiążdżenia betonu w połowie wysokości słupa. W obu wypadkach zaobserwowano gwałtowny przyrost przemieszczeń tuż przed zniszczeniem. Rozwój przemieszczeń słupów S-t/2m i S-m/2m w funkcji obciążenia przedstawiono na rysunkach 3.15 i 3.16. Podano na nich wykresy przemieszczeń w przekroju III, gdyż tylko w tym przekroju zarejestrowano przemieszczenia słupa S-t/2m.

The next comparison (Fig. 3.14) allows making two crucial observations. The tests proved that the application of the longitudinal composite strengthening reduced longitudinal strain at which a rupture of the circumferential CFRP hoop occurred. The strengthening ratio (expressed by the strength ratio of the strengthened to unstrengthened specimen) was even higher as it would result from summing up of the stress in concrete strengthened with the composite hoop only, and the stress transmitted by the longitudinal strips. The latter stress was calculated based on the longitudinal strain of the CFRP, assuming the linear characteristic of the strips (2.8).

$$\Delta\sigma = \frac{4A_p \varepsilon_v E_p}{A_c} \quad (2.8)$$

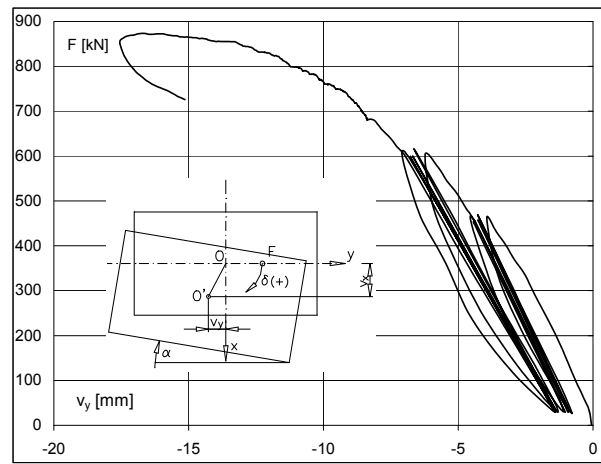
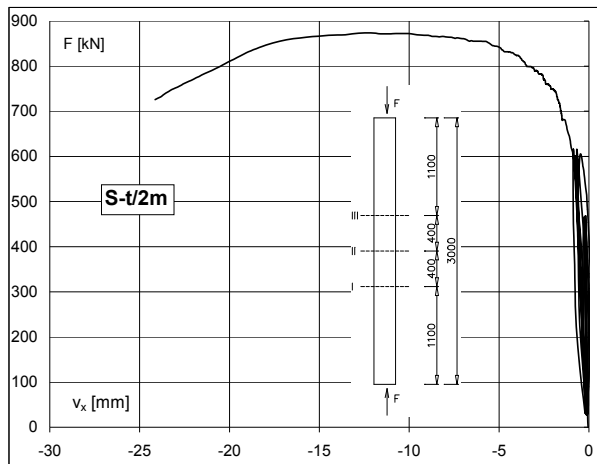
where:

- A_p – cross-section of the CFRP strip,
- A_c – cross-section of the concrete specimen,
- ε_v – the maximal longitudinal strain registered in the test,
- E_p – Elasticity modulus of the CFRP strips.

It is not a surprising observation, because already Mörsch's investigations [7], concerning winded columns, proved that only transversal sheet, without the longitudinal reinforcement was completely ineffective.

3.3. Test of RC columns

Columns S-t/2m and S-m/2m failed in the same mode, as a result of concrete crushing in the half length of the column. A sudden increase in displacements just before failure was observed in both cases. A development of displacement of columns S-t/2m and S-m/2m in load function is presented in Fig. 3.15 and 3.16, respectively. Diagrams show displacement in the III cross-section registered in the test of the column S-t/2m.



Rys. 3.15. Przemieszczenia słupa S-t/2m w funkcji obciążenia (przekrój III)

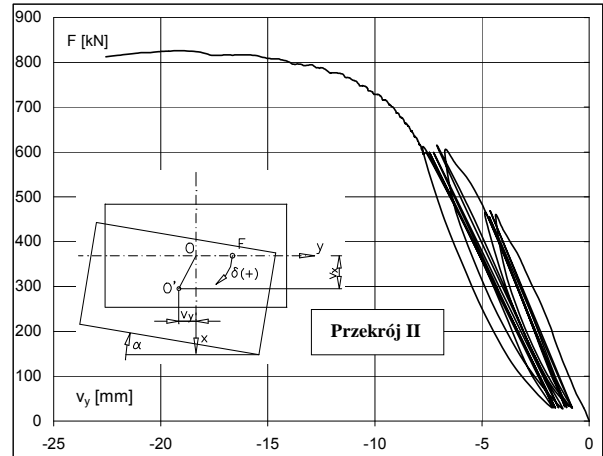
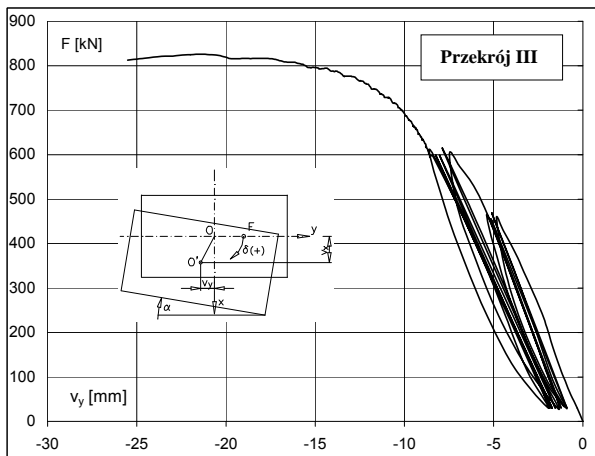
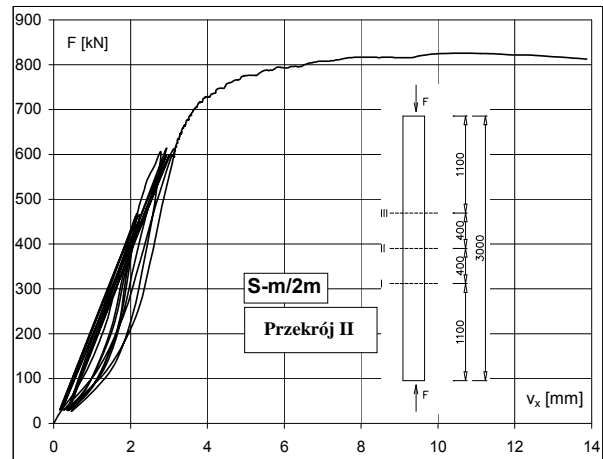
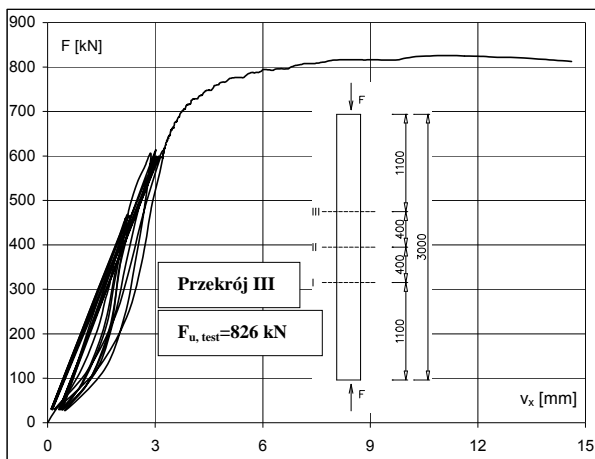
Fig. 3.15. Load – displacement curves for column S-t/2m (III cross-section)

Na rysunku 3.16, dotyczącym słupa S-m/2m, pokazano dodatkowo wykresy przemieszczeń słupa w przekroju II, a więc w połowie długości słupa. Wartości przemieszczeń w obu rozważanych przekrojach słupa są zbliżone, co wynika z faktu, że do zniszczenia doszło w obszarze słupa właśnie między tymi przekrojami. Można zauważyć, że płaszczyzna przemieszczenia w obu wypadkach nie była zgodna z założoną płaszczyzną obciążenia. Należy to przypisać przypadkowym, niezamierzonym mimośrodom, jakie wystąpiły w trakcie badania. Słupy były bowiem betonowane w pozycji poziomej, co powodowało niejednorodność cech betonu na wysokości słupa, a szkielet zbrojenia mógł się nieco przesunąć w formie, mimo stabilizacji w blachach czołowych. Budowa przegubu przekazującego obciążenie (trzpień umieszczony w wyżłobieniu blachy głowicy) również mogła być powodem błędu w usytuowaniu siły.

Do momentu osiągnięcia wartości odpowiadającej około 90% przewidywanego obciążenia niszczącego, przemieszczenia v_x obydwu słupów, w kierunku prostopadłym do założonej płaszczyzny obciążenia, były niewielkie. Powyżej tej wartości nastąpił gwałtowny przyrost przemieszczeń. Można to tłumaczyć utratą stateczności słupa, która pojawiła się przy obciążeniu zbliżonym do siły niszczącej $F_{u, \text{test}}$. Wskutek utraty stateczności słupy uległy deformacji w płaszczyźnie ukośnej, co jest widoczne na rys. 3.17, a jeszcze wyraźniej w wartości kąta δ , określającego kierunek płaszczyzny zginania słupów. Wielkość tego kąta zwiększała się wraz z siłą obciążającą słup i w końcowej fazie obciążenia wynosiła około 58° w słupie S-t/2m i około 30° w słupie S-m/2m.

Figure 3.16 shows displacements of the column S-m/2m in the cross-section II and III. Displacements in both considered cross-sections of the column were similar, because the failure occurred in the area just between the cross-sections. It can be noticed that the plane of displacement in both cases was not compatible to the theoretical plane of load. It was due to random non-intentional eccentricities that occurred during the test. The columns concreting in horizontal position caused heterogeneous properties of concrete along the height of the column, and shifting of the longitudinal reinforcement despite being stabilized in the front steel plates. Construction of the load transmitting joint (the steel bolt placed in the groove of the head plate) could cause an error in the load location.

Until the load of 0,9 of the predicted ultimate load, displacement v_x , perpendicular to the longitudinal axis of the column were minor. An abrupt increase in displacements occurred above that value. It may be explained by the loss of stability of the column which occurred at the ultimate $F_{u, \text{test}}$. The columns deformed in the inclined plane as a result of the stability loss that is shown in Fig. 3.17, and even more obviously in the value of δ angle, determining the bending plane of the column. The value of that angle increased together with the loading, and in the final phase of loading came up to 58° in the column S-t/2m and 30° in the column S-m/2m.



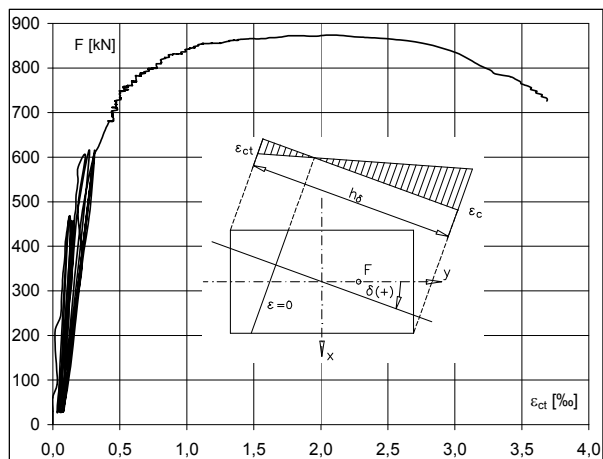
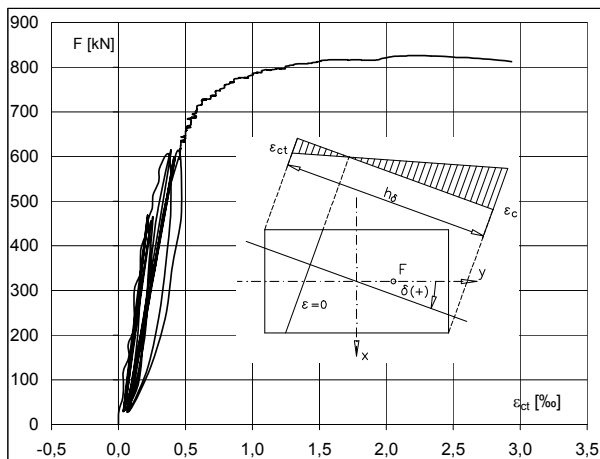
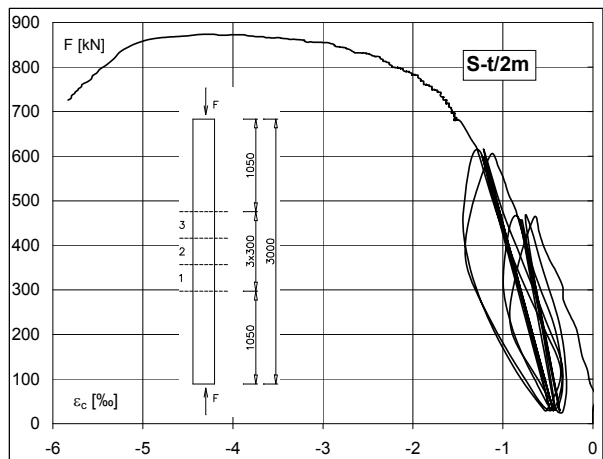
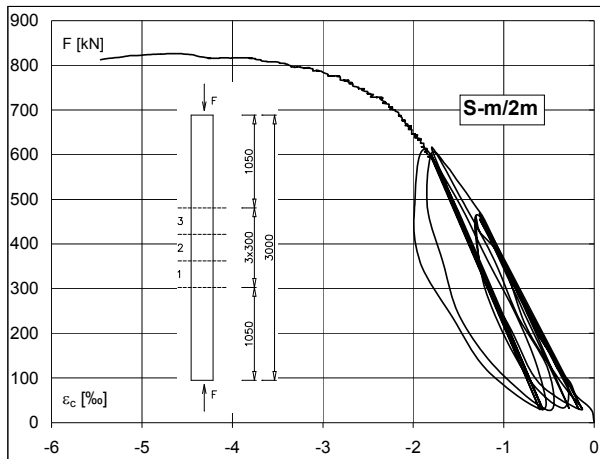
Rys. 3.16. Przemieszczenia słupa S-m/2m w funkcji obciążenia (przekrój III i II)
 Fig. 3.16. Load – displacement curves for column S-m/2m (III cross-section)



Rys. 3.17. Zniszczenie słupa S-m/2m
 Fig. 3.17. Failure of column S-m/2m

Potwierdzeniem poprzednich spostrzeżeń są wykresy podłużnych odkształceń słupa w funkcji obciążenia (porównaj rys. 3.18), uzyskane na podstawie pomiarów skrócenia bądź wydłużenia odcinków pomiarowych (porównaj rys. 2.9 b) w bazie nr 2 (słup S-t/2m) lub w bazie nr 3 (słup S-m/2m). Właśnie te bazy pomiarowe wybrano do analizy, gdyż w ich obszarze doszło do zmiążdżenia betonu w strefie ściskanej. Zmiążdżenie to było widoczne na powierzchni słupa, jako wybrzuszenie warstwy zbrojenia kompozytowego (słup S-t/2m, rys. 3.19), a nawet wybrzuszenie z zerwaniem niektórych włókien maty (słup S-m/2m, rys. 3.20)

The diagrams of longitudinal strain of the column in the load function (Fig. 3.18), obtained on measurements (see Fig. 2.9b) in the base no 2 (column S-t/2m) or in the base no 3 (column S-m/2m), confirmed previous observations. Those measurement bases were selected for the analysis since they embraced concrete crushed in the compression zone. The concrete crushing was visible on the surface of the column as a bulging of composite sheet (column S-t/2m, Fig. 3.19), and even bulging with rupture of some sheet fibers (column S-m/2m, Fig. 3.20).



Rys. 3.18. Odkształcenia słupa S-t/2m (baza 2) i S-m/2m (baza 3) w funkcji obciążenia
 Fig. 3.18. Strain load curves for columns S-t/2m (base 2) and S-m/2m (base 3)



Rys. 3.19. Zmiążdżenie betonu w słupie S-t/2m (widoczne wybrzuszenia maty)

Fig. 3.19. Concrete crushing in column S-t/2m (visible bulging of CFRP sheet)

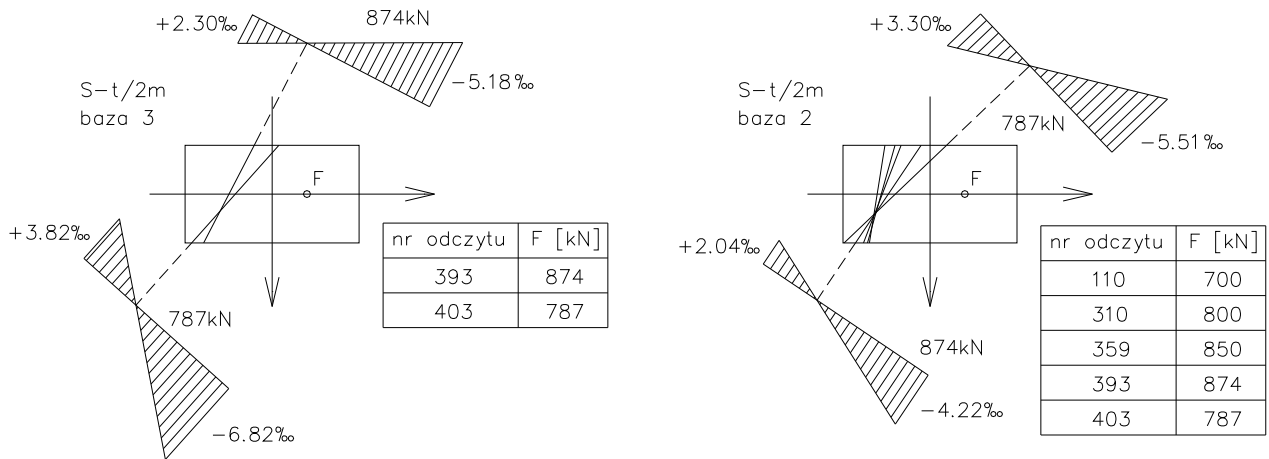


Rys. 3.20. Zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej słupa S-m/2m (widoczne wybrzuszenia i zerwanie włókien maty)

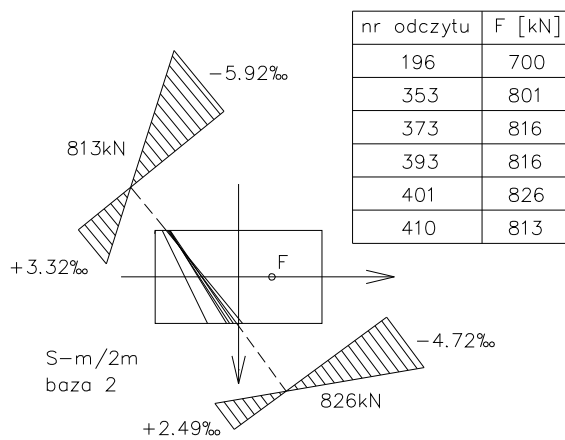
Fig. 3.20. Concrete crushing in compression zone of column S-m/2m (visible CFRP bulging and fracture of sheet)

Maksymalna wartość podłużnych odkształceń w strefie ściskanej wynosiła blisko 6,0‰, a po stronie rozciąganej 3-3,5‰. Na rysunkach 3.21 i 3.22 przedstawiono usytuowanie osi obojętnej odkształcenia przekroju słupów S-t/2m i S-m/2m, przy wybranych siłach podłużnych. Wartości tych sił, a także wartości odpowiadających im odkształceń, są podane na rysunkach. W obu wypadkach wystąpił obrót osi obojętnej odkształcenia i zmniejszenie się wysokości strefy ściskanej w miarę narastania obciążenia.

The maximal longitudinal concrete strain obtained almost 6,0‰ and 3,0-3,5‰ in the compression and tension zone, respectively. In Fig. 3.21 and 3.22, location of the neutral axis of the cross-section strain of the columns S-t/2m and S-m/2m are shown for the selected load levels. The values of these loads with corresponding strain are presented in these figures. In both cases a rotation of the neutral axis of the strain occurred with decreasing of the compressive zone depth during column loading.



Rys. 3.21. Zmiana położenia osi obojętnej i odkształcenia skrajnych włókien przekroju w słupie S-t/2m
Fig. 3.21. Change of location of column neutral axis and strain of cross-section of column S-t/2m



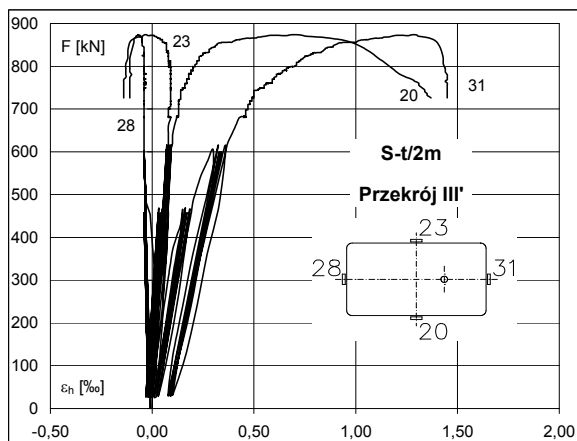
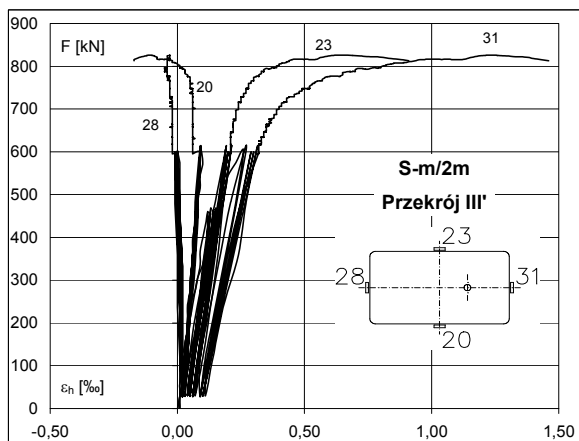
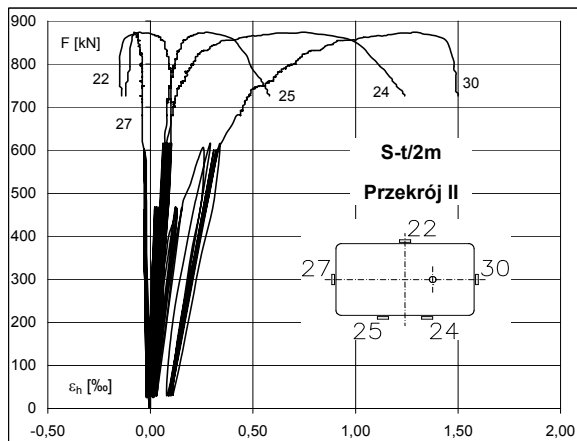
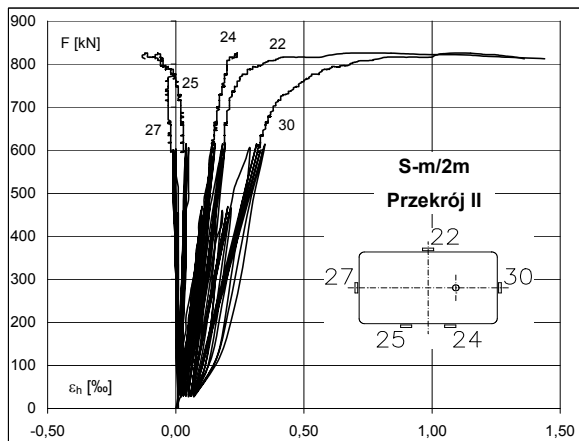
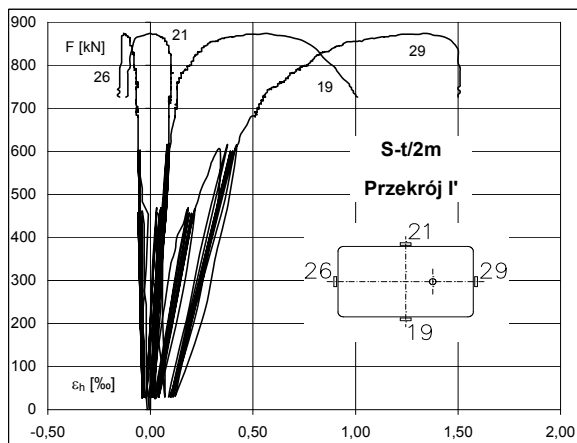
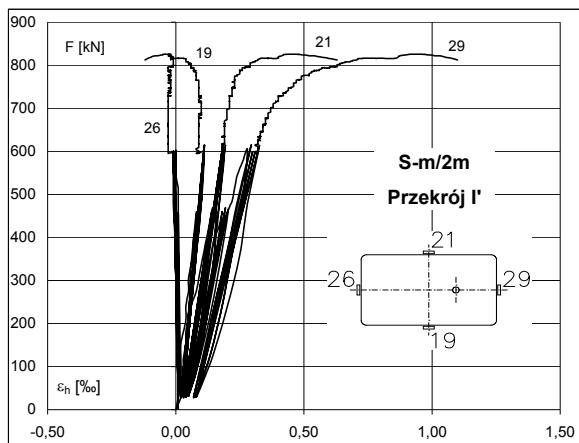
Rys. 3.22. Zmiana położenia osi obojętnej i odkształcenia skrajnych włókien przekroju w słupie S-m/2m
Fig. 3.22. Change of location of column neutral axis and strain of cross-section of column S-m/2m

Wykresy odkształceń poprzecznych, pomierzonych na powierzchni maty obejmującej słup, przedstawiono w funkcji obciążenia na rysunku 3.23.

Porównując wykresy odkształceń poprzecznych i rysunki usytuowania osi obojętnej odkształcenia w przekroju (rys. 3.21, 3.22) można zauważyć, że zmiany odkształceń poprzecznych są związane ze znakiem i wielkością odkształceń podłużnych w przekroju.

Diagrams of transversal strain of the circumferential CFRP sheet in the load function are presented in Fig. 3.23.

Comparing the diagrams of transversal strain values and figures of the location of the strain neutral axis in the cross-section (Fig. 3.21, 3.22), it may be noticed that changes of the transversal strain are related to the sign and quantity of cross-section longitudinal strain.



Rys. 3.23. Wykresy odkształceń poprzecznych w funkcji obciążenia w poszczególnych przekrojach obu słupów Fig. 3.23. Transversal strain-load curves in different cross-sections on the column heights

Odształcenia poprzeczne są dodatnie (rozciąganie) i tym większe, im większe są podłużne odkształcenia ściskające. Tensometry umieszczone w rozciąganej strefie przekroju wykazują natomiast niewielkie ściskanie kompozytowej opaski.

Maksymalne odkształcenia poprzeczne mierzone na powierzchni wystąpiły w przekroju pomiarowym nr III w punkcie 31 słupa S-m/2m i osiągnęły wartość 10,0‰. W pobliżu tego punktu pomiarowego, zaobserwowano zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej, widoczne w postaci przełamania słupa. Odczyty z pozostałych tensometrów usytuowanych w strefie ściskanej nie przekraczały 1,50‰. Odształcenia poprzeczne w strefie rozciąganej były niewielkie, nie przekraczały -0,20‰ (ściskanie).

The values of transversal strain are positive (tension), and the greater, as the greater transversal compression strain is. The strain gauges placed in the tension zone of the cross-section show a minor compression of the CFRP hoop.

The maximal transversal CFRP strain of 10,0‰ occurred in the measuring cross-section III, in point 31 of the column S-m/2m. Closed to that measuring point, concrete crushing in the compression zone was observed. Reading of the remaining strain gauges located in the compression zone did not exceed 1.50‰. The transversal strain in the tension zone, were low and did not exceed -0.20‰ (compression).

Przemieszczenia osi słupów i ich odkształcenia podłużne wykazały dużą plastyczność tych elementów, objawiającą się wyraźnym przyrostem mierzonych wielkości w obszarze obciążenia niszcącego. Jest to spostrzeżenie bardzo ważne z punktu widzenia możliwości redystrybucji sił wewnętrznych w konstrukcji przy obciążeniach wyjątkowych.

Displacement of the column's axis and its longitudinal strain, demonstrated a great plasticity of those members manifested in clear increase in measured quantities under the ultimate load. This conclusion is very important from the viewpoint of an ability of the internal forces redistribution in structures under exceptional loads.

4. WNIOSKI

Wyniki badań próbek potwierdziły opinie publikowane w literaturze o wpływie stopnia zbrojenia kompozytowego i kształtu przekroju na wytrzymałość i odkształcalność wzmocnionego betonu. Najwyższą efektywność wzmocnienia uzyskano na próbkach o przekroju kołowym, niższą na próbkach o przekroju kwadratowym, a najniższą na próbkach o przekroju prostokątnym. We wszystkich wypadkach wyniki są wprost proporcjonalne do stopnia zbrojenia obwodowego, zwykle wyrażanego liczbą warstw maty opasującej próbkę.

Wzmocnione próbki niszczyły się w sposób gwałtowny, przez zerwanie włókien opasującej je maty, przy odkształceniach podłużnych wyraźnie większych niż odkształcenia próbek nie wzmocnionych.

Podstawowe wnioski badań doświadczalnych można sformułować następująco:

- podłużne zbrojenie kompozytowe (o włóknach równoległych do kierunku ściskania) przenosi siły ściskające; warunkiem jest jednak ograniczenie odkształceń poprzecznych przez zbrojenie obwodowe, gdyż przy braku takiego zbrojenia podłużne zbrojenie kompozytowe odspaja się od próbek już przy niewielkich odkształceniach podłużnych, rzędu zaledwie 2‰,
- podłużne zbrojenie kompozytowe ma również wpływ na wytrzymałość betonu na ściskanie - w badaniach powodowało ono przyrost wytrzymałości próbek o około 20%,
- wzmacnianie próbek wstępnie obciążonych ma korzystny, choć niewielki, wpływ na ich nośność,
- zaobserwowano korzystny wpływ wzmocnienia w próbkach obciążonych mimośrodowo, przyrost nośności jest tego samego rzędu, co przy obciążeniu osiowym, ale w odróżnieniu od obciążenia osiowego nie obserwuje się szybkiego spadku siły po osiągnięciu nośności, a maksymalne naprężenie jest osiągane przy podłużnych odkształceniach rzędu -6‰, podczas gdy przy osiowym ściskaniu jest to nieco ponad - 2‰.

Badania smukłych słupów dostarczyły zupełnie nowych informacji, gdyż badania opisywane w literaturze dotyczyły zwykle elementów krępych. Najważniejsze wnioski można sprecyzować następująco:

- powodem zniszczenia słupów było wyczerpanie wytrzymałości betonu na ściskanie w pobliżu połowy wysokości słupa,
- odkształcenia podłużne przy zniszczeniu były rzędu -6‰ w strefie ściskanej przekroju, a więc odpowiadały odkształceniom próbek o przekroju prostokątnym, obciążanych mimośrodowo,
- obwodowe odkształcenia zbrojenia kompozytowego zależały od odkształceń podłużnych przekroju; w strefie rozciąganej było to niewielkie ściskanie -0.20‰, w strefie ściskanej przekroju rozciąganie, nawet do 10‰; obserwowano też pękanie pojedynczych włókien maty obwodowej i jej wybrzuszenia, świadczące o bliskim wyczerpaniu nośności kompozytu,
- obserwowano dużą plastyczność elementów, objawiającą się szybkim przyrostem przemieszczeń i odkształceń przy obciążeniach niszczących.

4. CONCLUSIONS

The test results of the specimens proved the influence of composite reinforcement ratio, and a cross-section shape on the load capacity and deformability of the strengthened concrete. The highest effectiveness of strengthening was obtained in the circular cross-section specimens, lower in the square cross-section specimens, and the lowest in the rectangular cross-section specimens. In the all cases, the results are directly proportional to the circumferential CFRP reinforcement ratio, usually expressed by a number of the sheet layers.

The strengthened specimens failed in an abrupt way due to CFRP sheet rupture with the significantly higher longitudinal strains than those in the non-strengthened specimens.

The general conclusion of the experimental tests can be formulated as follows:

- the longitudinal CFRP reinforcement (with fibers parallel to the load direction) transmits compressive forces; it is conditioned by limit of the transversal strain by the circumferential CFRP reinforcement, since a lack of such a reinforcement causes the debonding of the longitudinal composite reinforcement from the concrete surface under the low longitudinal CFRP strain ranged of only 2‰.
 - the longitudinal composite reinforcement influences the concrete compressive strength confirmed in the test by 20% increase in the concrete strength,
 - strengthening of primarily loaded specimens had a beneficial but not significant influence on the load capacity,
 - a beneficial influence of the strengthening was observed in the eccentrically loaded specimens; the load capacity increase was of the same range as under axial load, but differently to the axial load, an abrupt load decrease was not observed under the ultimate load, and the maximal concrete stress was obtained for longitudinal strain of -6‰, while under the axial load it was slightly over -2‰.
- Test of the slender columns delivered quite new observation as those published in the literature, concerned short columns. The most important conclusions are following:
- the reason of column failure was an exhaustion of the concrete compressive strength at the half-length of the column,
 - the ultimate longitudinal compressive strain corresponded to the strain of the rectangular cross-section specimens eccentrically loaded was about -6‰,
 - circumferential strain of the composite hoop depended on the longitudinal strain of the cross-section; in the tension zone a minor compression of -0.20‰ was registered and a tension even up to 10‰ was registered in compression zone of the cross-section,
 - rupture of single fibers of the circumferential CFRP sheet was observed, and its bulging proving the close exhaustion of composite strength,
 - high plasticity of members was proved by an abrupt increase in displacements and strain under the ultimate load.

Bibliografia / References

- [1] Aire C., Gettu J., Casas J.: "Study of the compressive behavior of concrete confined by fiber reinforced composites", Proc. of the Int. Conf. Composites in Construction - CCC2001 Porto/Portugal/10-12 October 2001, pp. 239-243
- [2] Calvo I., Mieres J., Bautista S., Rodrigues J., Vinolo A., Gutiérrez E., Loum W.: "Reinforcement of Prismatic Concrete Columns Using Fiber Reinforced Plastics" Proc. of the Int. Conf. Composites in Construction - CCC2001 Porto/Portugal/10-12 October 2001, pp. 263-267
- [3] Campione, G., Miraglia, N.: "Strength and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP", Cement & Concrete Composites, No. 25 (2003), pp. 31-41
- [4] Chaallal, O., Hassan, M., Shahawy, M.: "Confinement Model for Axially Loaded Short Rectangular Columns Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Wrapping", ACI Structural Journal, March-April 2003, pp. 215-221
- [5] Chaallal, O., Shahawy, M., "Performance of Fiber-Reinforced Polymer-Wrapped Reinforced Concrete Column under Combined Axial-Flexural Loading", ACI Structural Journal, V. 97, No. 4, July-August 2000, pp. 659-668
- [6] Chun, S., Park, H., "Load carrying capacity and ductility of RC columns confined by carbon fiber reinforced polymers", The Third International Conference on Composites in Infrastructure, San Francisco, California, June 10-12, 2002
- [7] Dąbrowski K., "W sprawie metody wymiarowania słupów uzwojonych przyjętej w nowelizowanej normie PN-B-03264", Inż. i Bud. 12/2002, pp. 707-708.
- [8] De Lorenzis, L., "A Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with FRP Composites", Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2001
- [9] Externally bonded FRP reinforcement for RC structures fib technical report, bulletin 14, July 2001
- [10] Harries, K., Carey, S., "Shape and "gap" effects on the behavior of variably confined concrete", Cement and Concrete Research, No. 33, 2003, pp. 881-890
- [11] Harries, K., Kharel, G., "Experimental investigation of the behavior of variably confined concrete", Cement and Concrete Research, No. 33, 2003, pp. 873-880
- [12] Ignatowski, P., "The behaviour of CFRP strengthened RC slender columns", 4th International Ph. D. Symposium in Civil Engineering, Munich, Germany, 19-21 September, 2002, pp. 272-279.
- [13] Ignatowski, P., "Odształcalność i nośność smukłych słupów żelbetowych wzmocnionych materiałami kompozytowymi CFRP", Rozprawa doktorska, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2003.
- [14] Kamińska, M. E., "Doświadczalne badania żelbetowych słupów ukośnie mimośrodowo ściskanych. Badania doświadczalne elementów i konstrukcji żelbetowych" Z. 7, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1995
- [15] Karabinis, A., Rousakis, T., "Concrete confined by FRP material: a plasticity approach", Engineering Structures, No. 24 (2002), pp. 923-932
- [16] Li, Y., Lin, C., Sung, Y., "A constitutive model for concrete confined with carbon fiber reinforced plastics", Mechanics of Materials, No. 35 2003, pp. 603-619
- [17] Maalej, M., Tanwongsva, S., Paramasivam, P., "Modelling of rectangular RC columns strengthened with FRP", Cement & Concrete Composites, No. 25 (2003), pp. 263-276
- [18] Naguib W., Mirmiran A. "Time-Dependent Behavior of Fiber Reinforced Polymer – Confined Concrete Columns under Axial Loads", ACI Structural Journal, V.99 No.2, March – April 2002, pp. 142-148.
- [19] Paretto, R., Nanni, A., "Axial testing of concrete columns confined with carbon FRP: effect of fiber orientation", The Third International Conference on Composites in Infrastructure, San Francisco, California, June 10-12, 2002
- [20] Parvin, A., Wang, W., "Tests on concrete square columns confined by composite wraps", The Third International Conference on Composites in Infrastructure, San Francisco, California, June 10-12, 2002
- [21] Paula, R., Silva, M., "Sharp edge effects on FRP confinement of RC square columns", The Third International Conference on Composites in Infrastructure, San Francisco, California, June 10-12, 2002
- [22] Picher F., Rochette P., Labossiere P., "Confinement of concrete cylinder with CFRP", First International Conference on Composites in Infrastructure - ICCI'96, Tucson, Arizona, USA 15-17 Jan., pp. 829-841
- [23] Silva, V., Santos, J., "Strengthening of axially loaded concrete cylinders by surface composites" Proceedings of the International Conference Composites in Construction - CCC2001 Porto/Portugal/10-12 October 2001, pp. 257-262.
- [24] Wang Y., Restrepo J., "Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets", ACI Structural Journal, V. 98, No. 3, May-June 2001, pp. 377-385
- [25] Wang, Y., Restrepo, J., Park, R., "Retrofit of Reinforced Concrete Members Using Advanced Composite Materials", Research Report, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, February 2000

Załącznik

Wyniki pomiarów

Badania zostały wykonane w Laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego.

Uczestniczyli w nich:

mgr inż. Jacek Filipczak
tech. Adam Frątczak
tech. Monika Potapow
tech. Stanisław Młynarski
tech. Andrzej Wierzbicki
tech. Andrzej Szcześniak

doktorant KBB PŁ:

mgr inż. Piotr Ignatowski

W druku podano tylko przykładowe wyniki badań w postaci wykresów. Pozostałe materiały, dokumentujące przebieg badań, są dostępne w Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej.

Appendix

Results of measurements

Tests were carried out at the Laboratory of the Department of Concrete Structures.

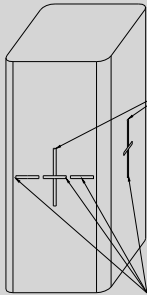
The participants were as follow:

MSc Eng. Jacek Filipczak
tech. Adam Frątczak
tech. Monika Potapow
tech. Stanisław Młynarski
tech. Andrzej Wierzbicki
tech. Andrzej Szcześniak

PhD student KBB PŁ:

MSc Eng. Piotr Ignatowski

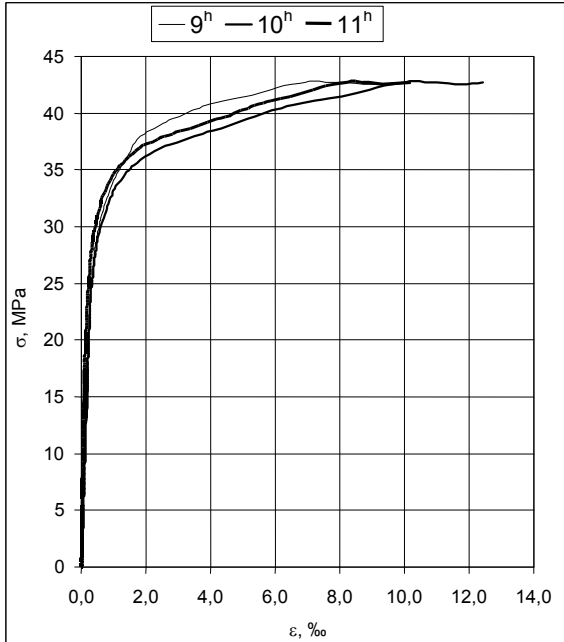
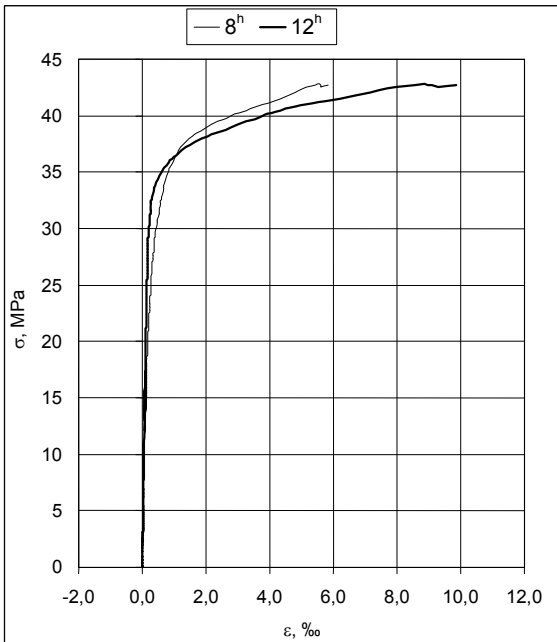
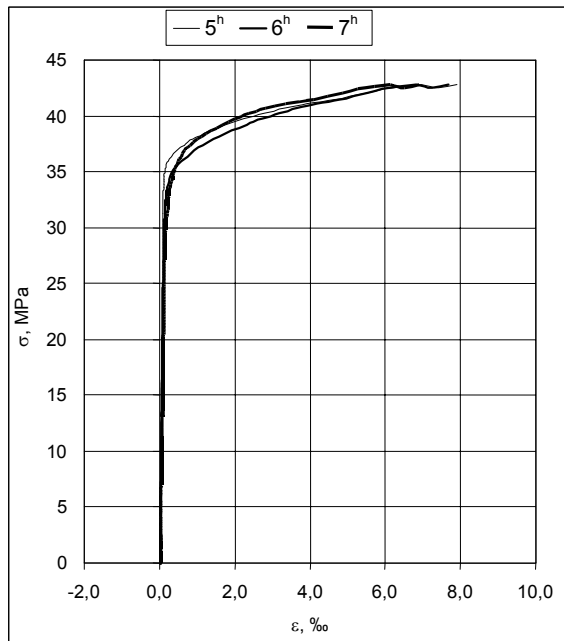
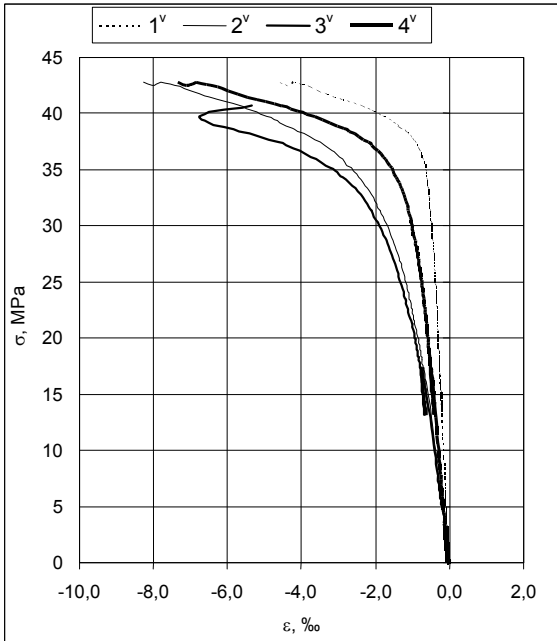
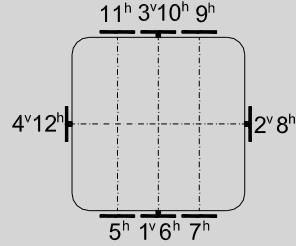
Example diagrams, containing test results, are presented in print. Remaining materials, documenting the course of tests are available at the Department of Concrete Structures of Łódź Technical University.

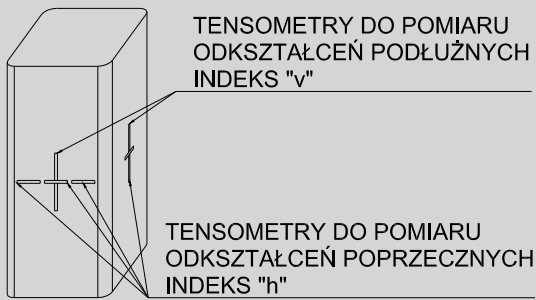


TENSOMETRY DO POMIARU
ODKSZTAŁCEN PODŁUŻNYCH
INDEKS "v"

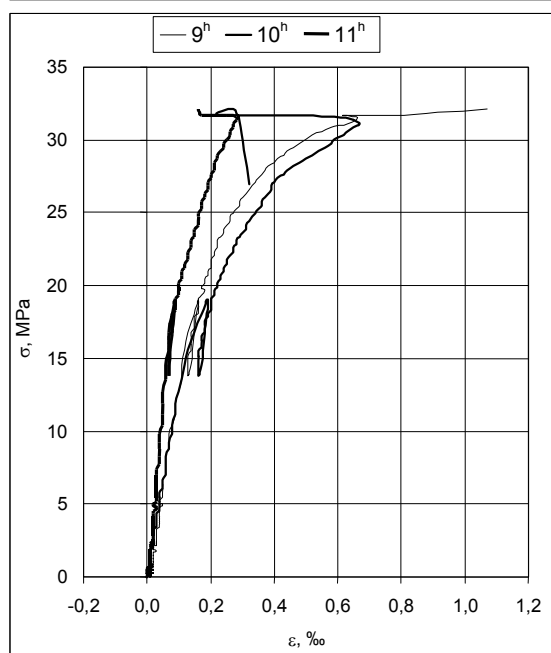
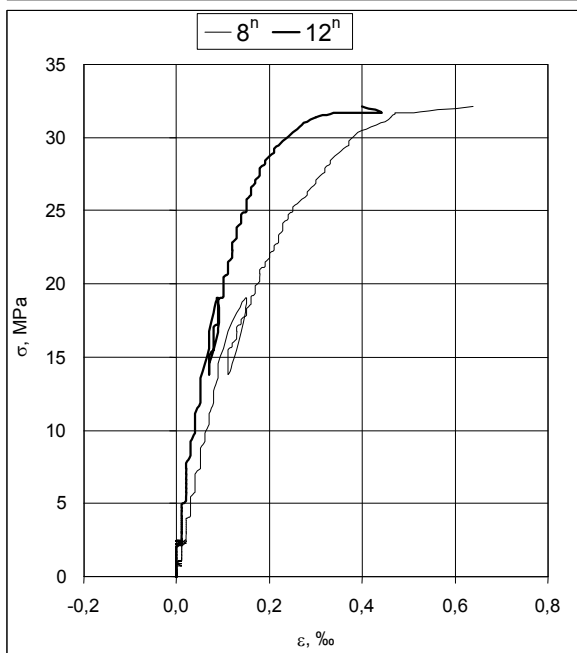
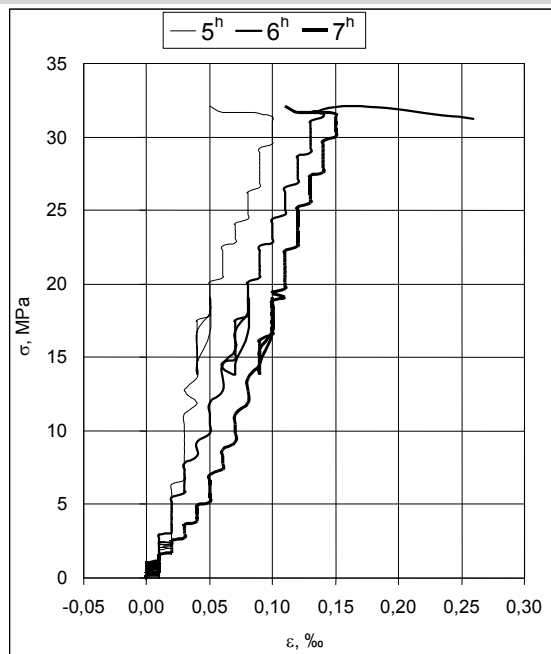
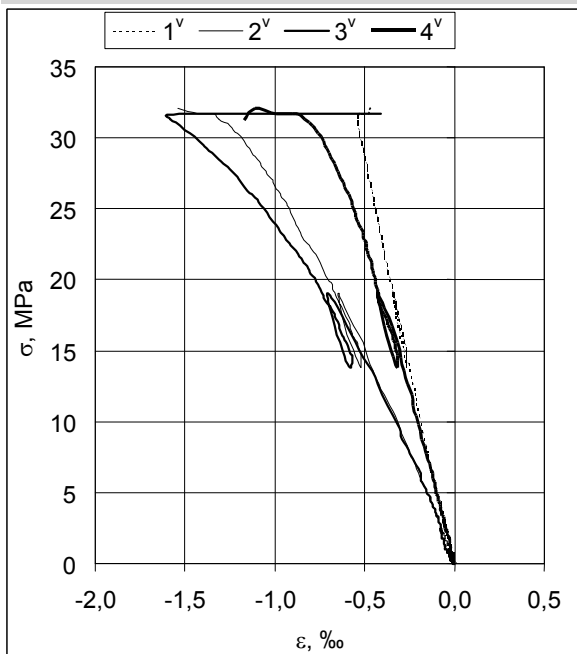
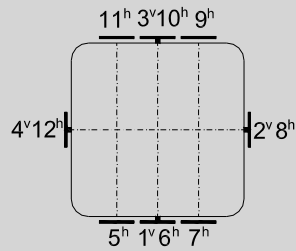
TENSOMETRY DO POMIARU
ODKSZTAŁCEN POPRZECZNYCH
INDEKS "h"

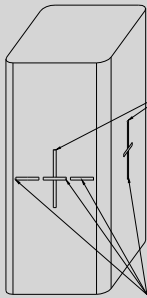
ROZMIESZCZENIE TENSOMETRYÓW





ROZMIESZCZENIE TENSOMETRÓW

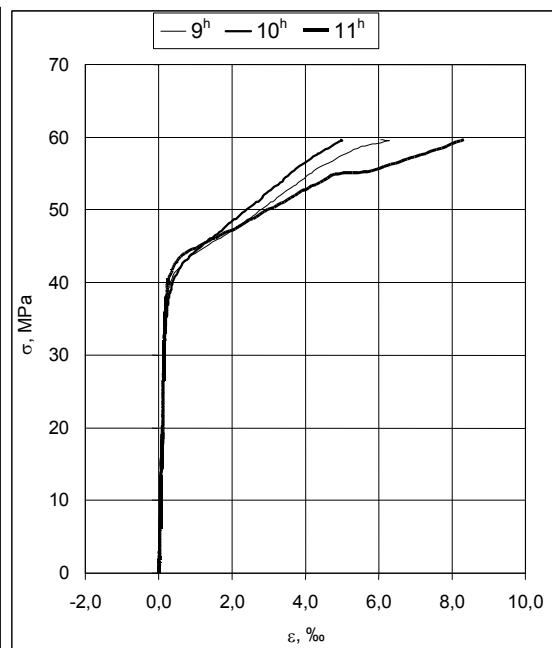
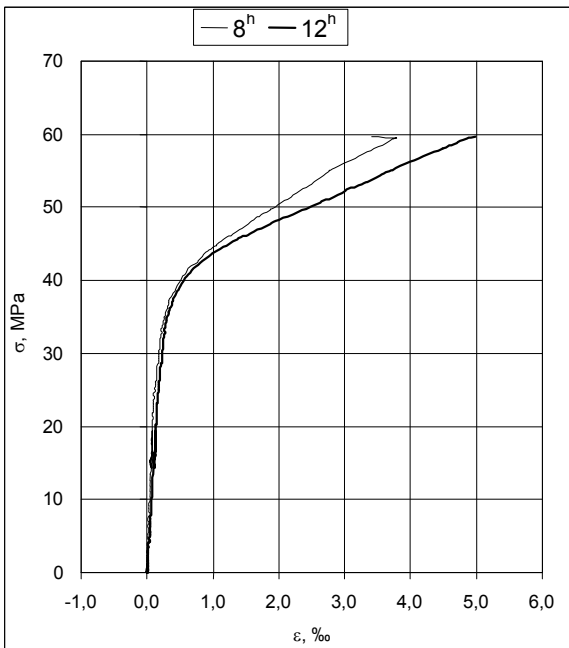
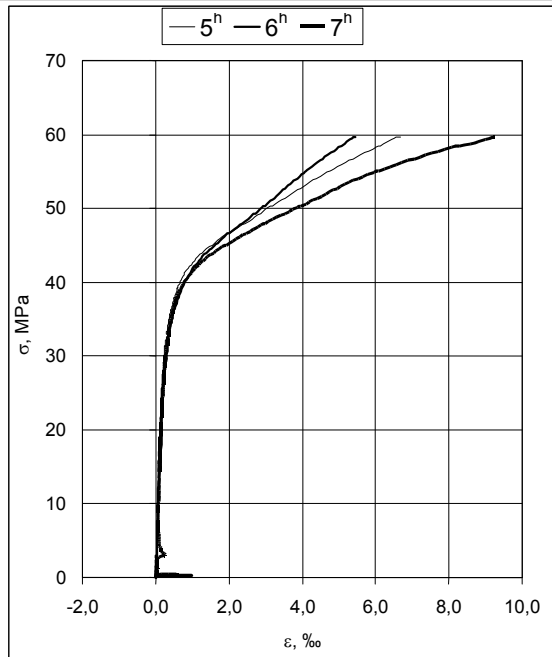
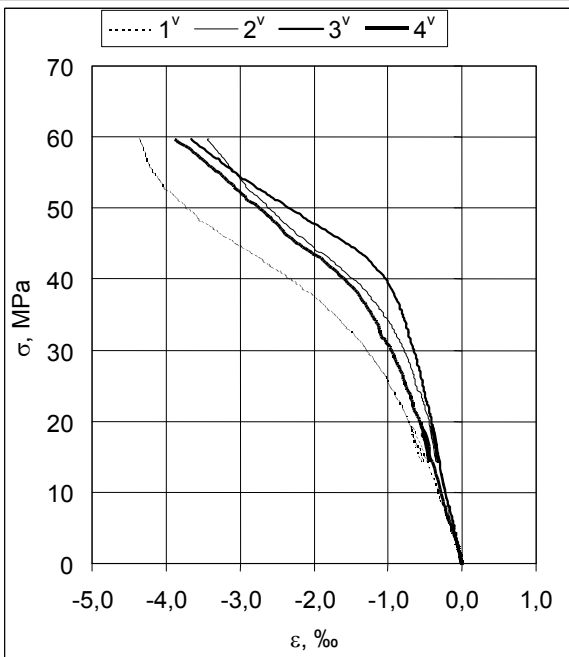
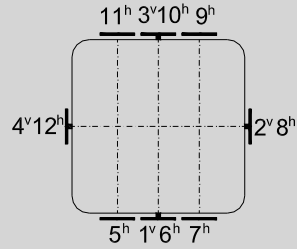


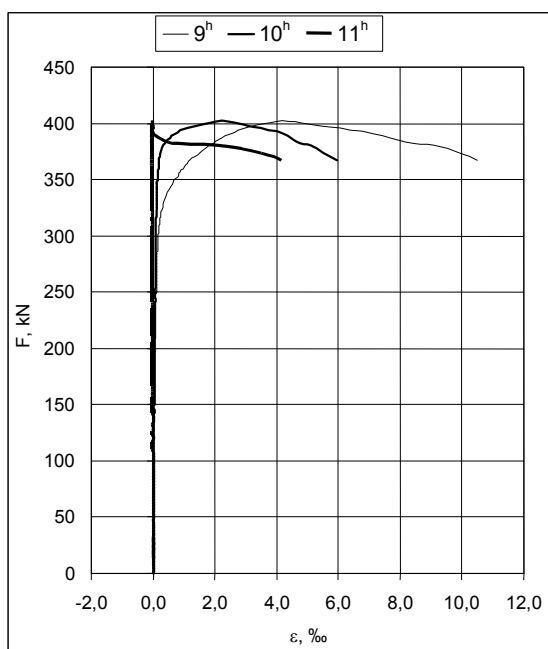
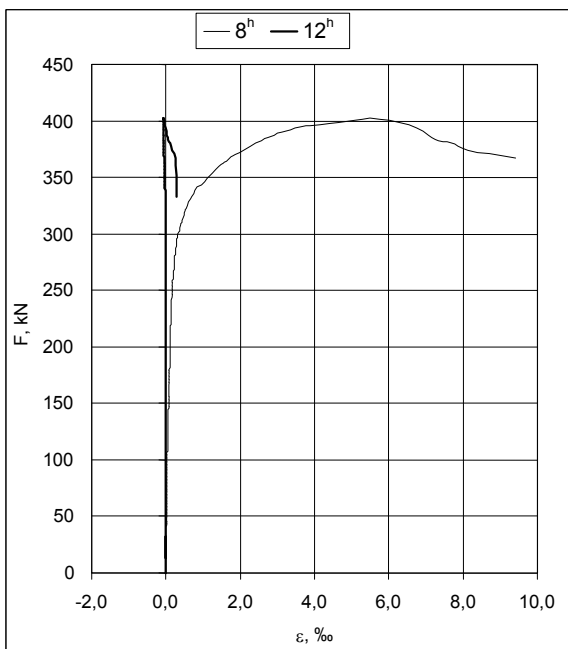
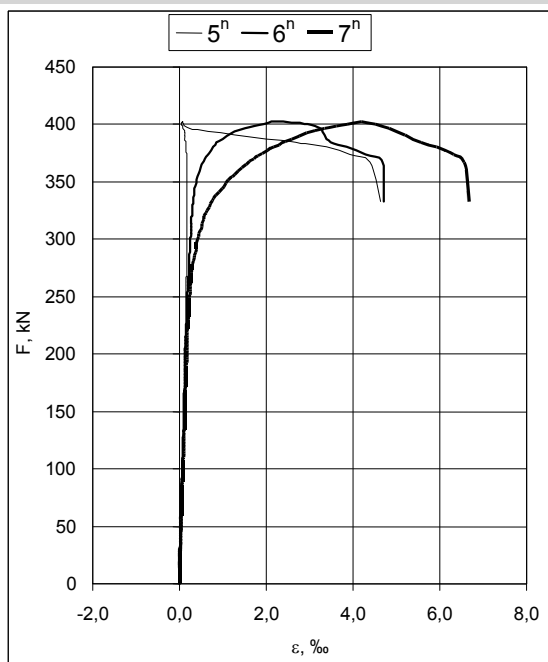
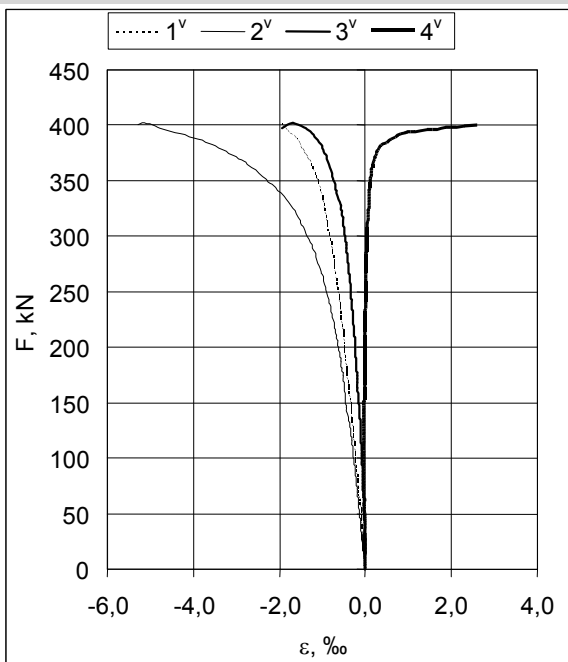
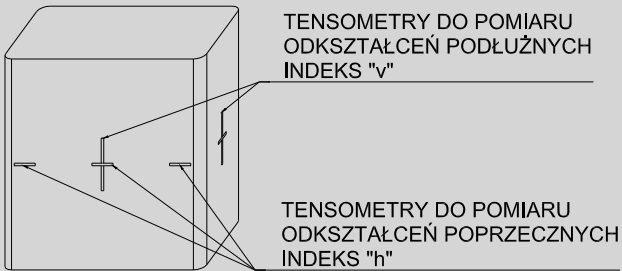


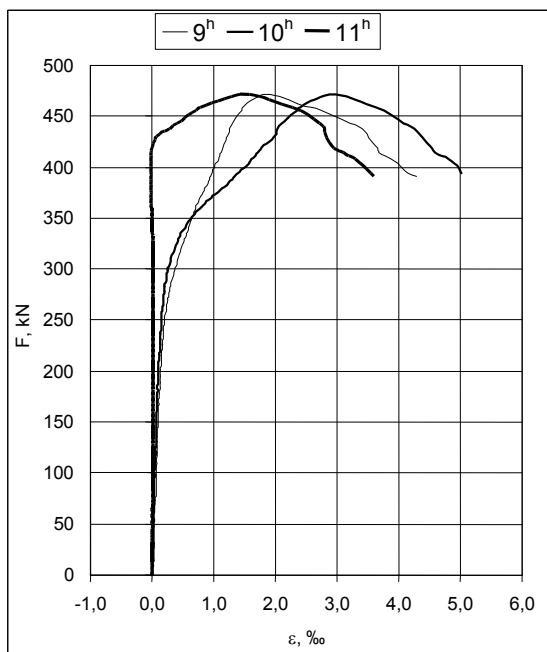
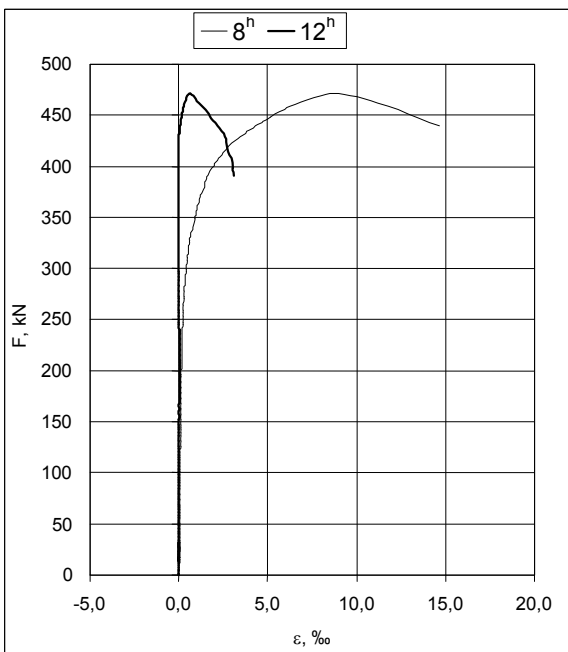
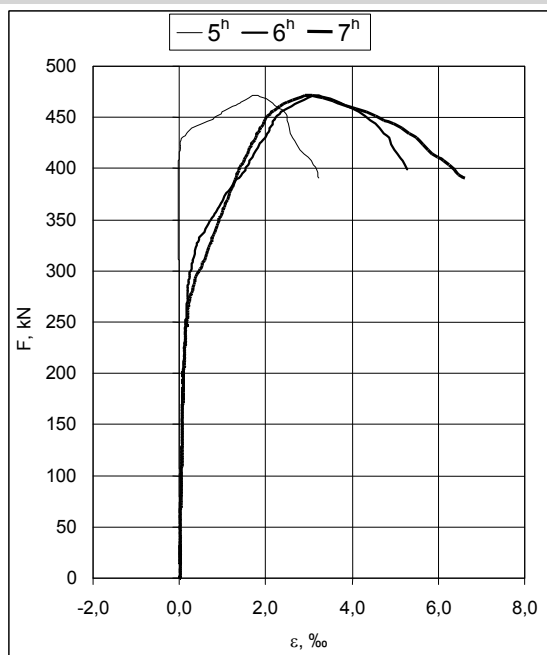
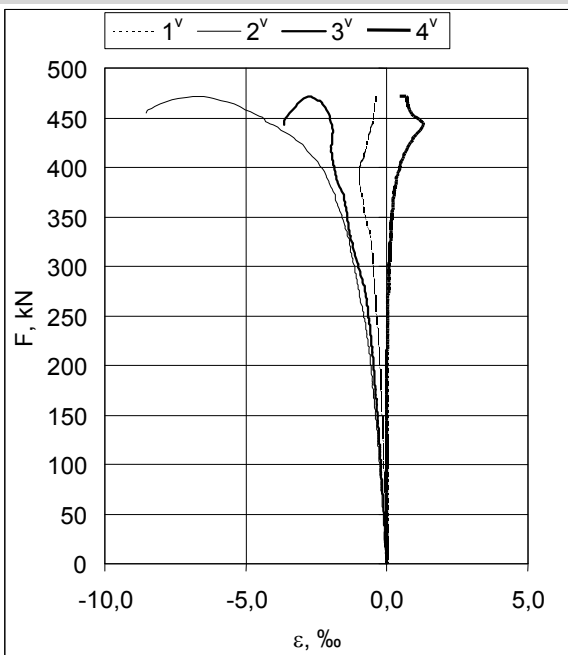
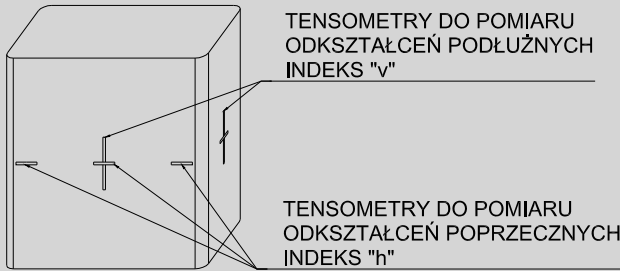
TENSOMETRY DO POMIARU
ODKSZTAŁCEŃ PODŁUŻNYCH
INDEKS "v"

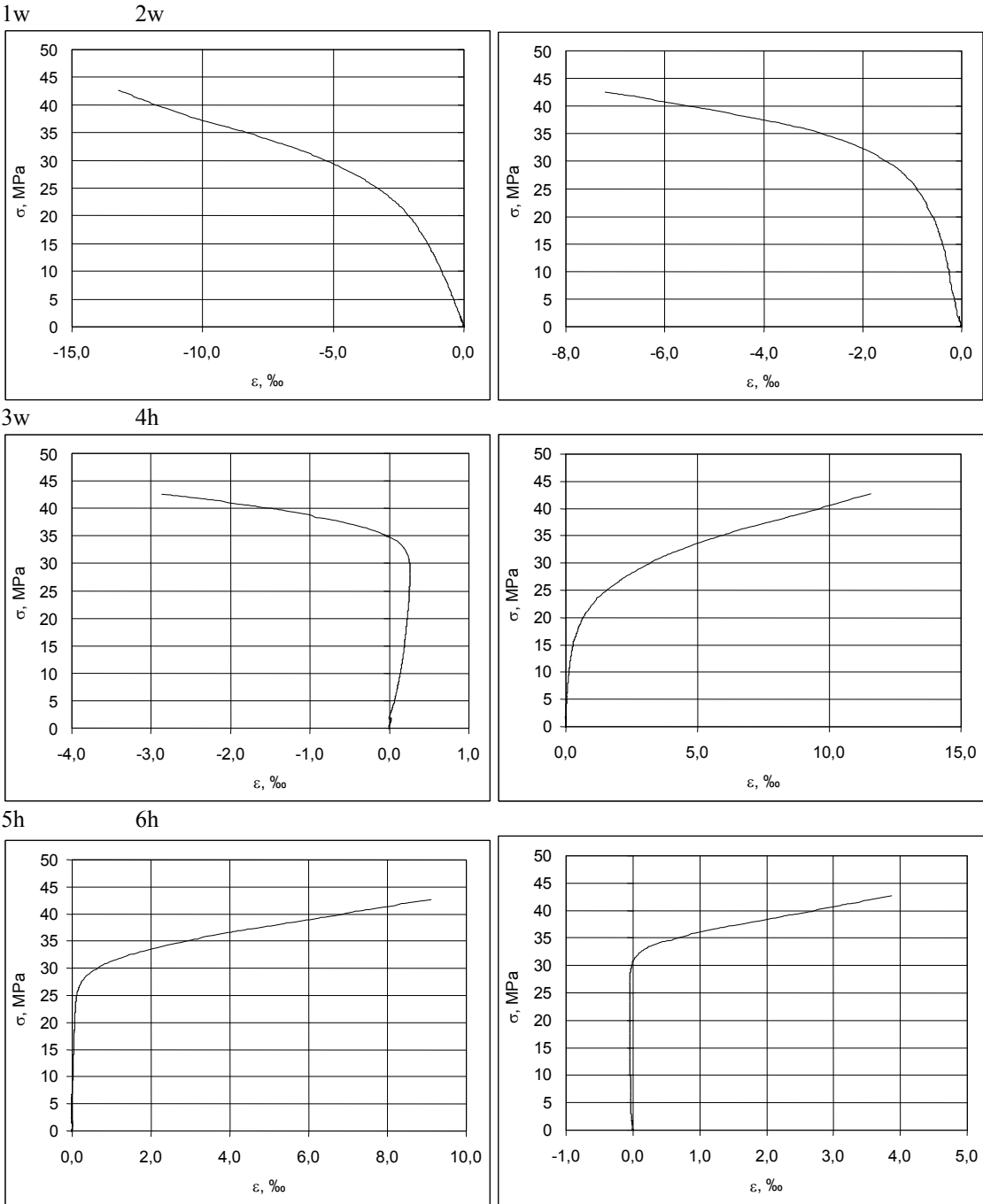
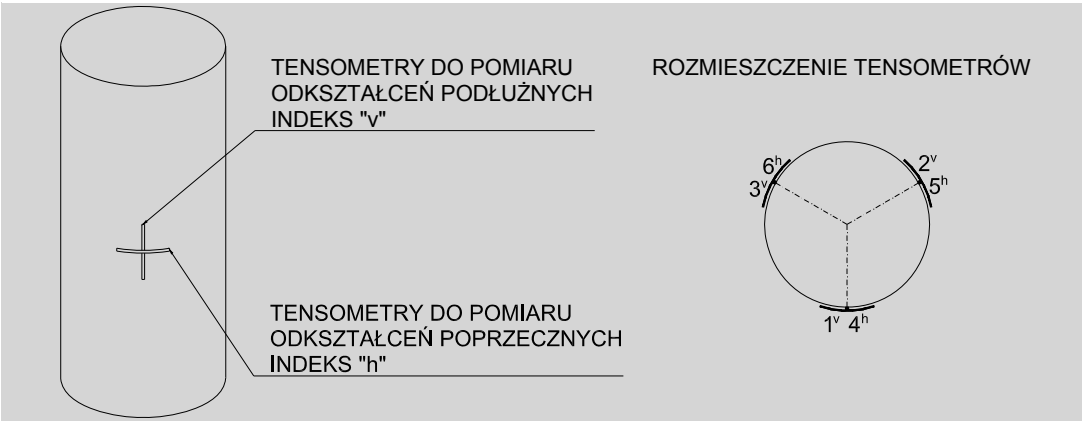
TENSOMETRY DO POMIARU
ODKSZTAŁCEŃ POPRZECZNYCH
INDEKS "h"

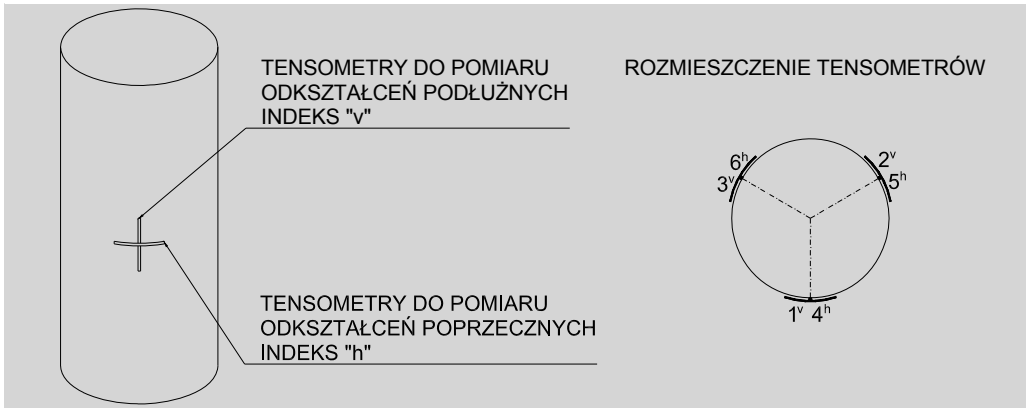
ROZMIESZCZENIE TENSOMETRÓW





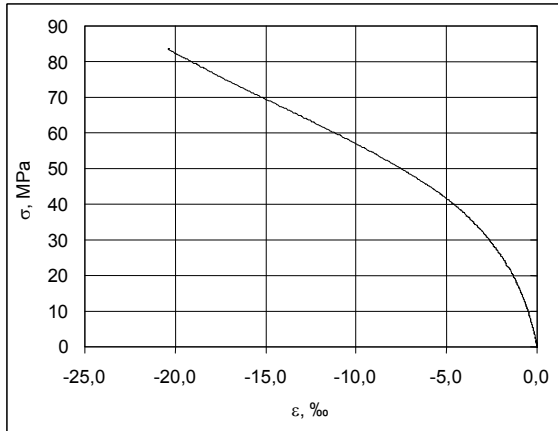
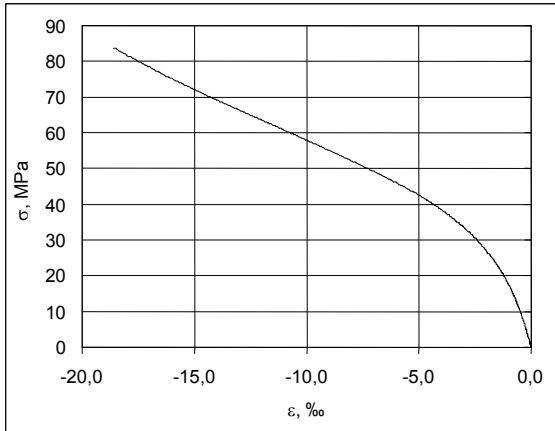






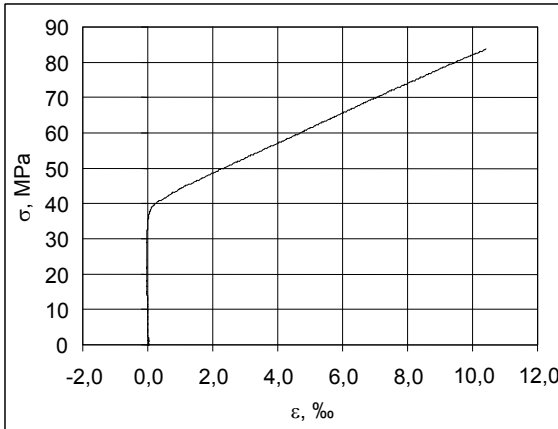
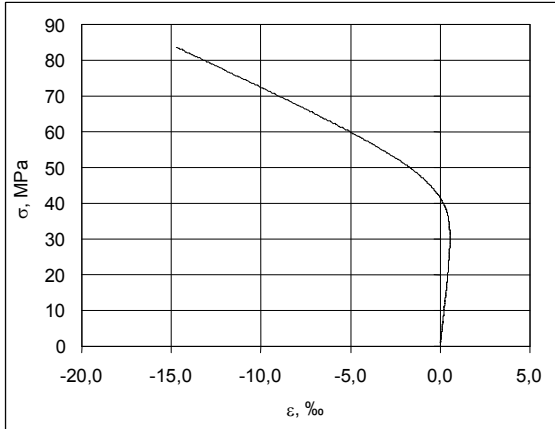
1w

2w



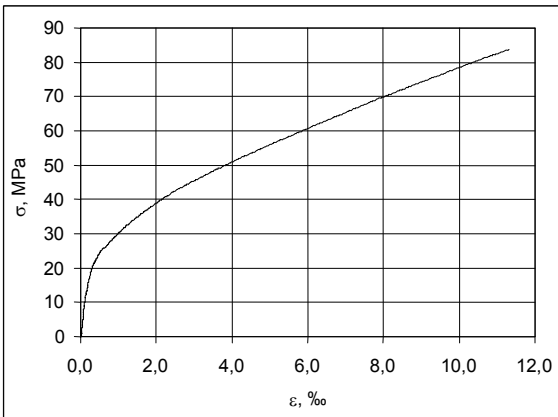
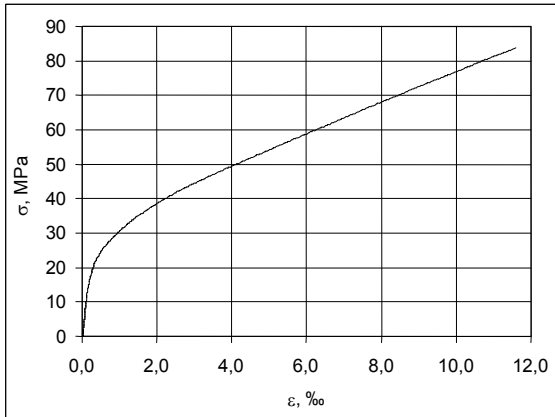
3w

4h



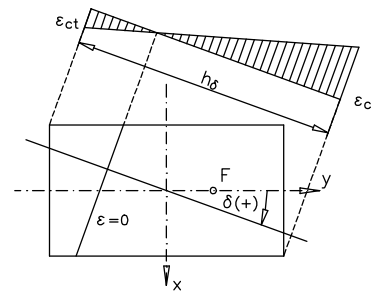
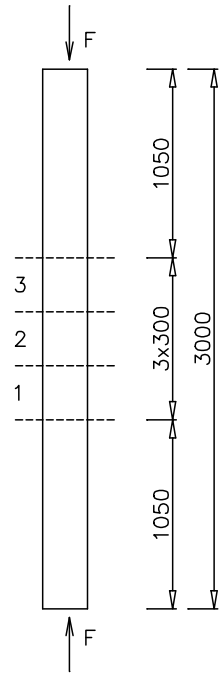
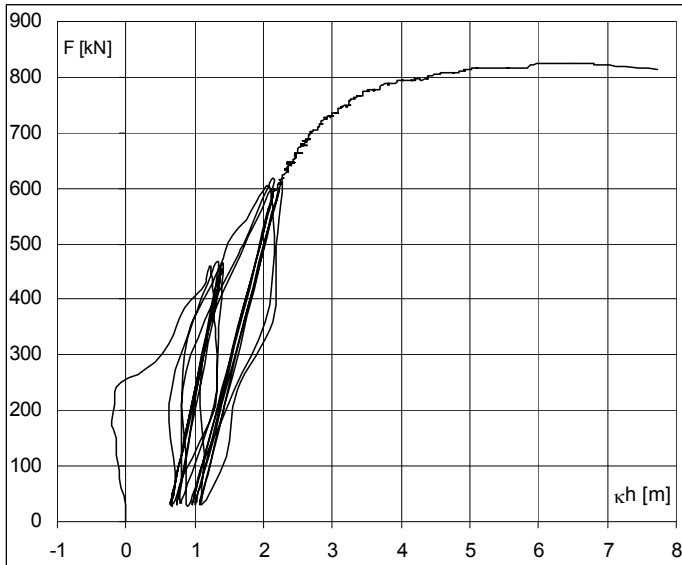
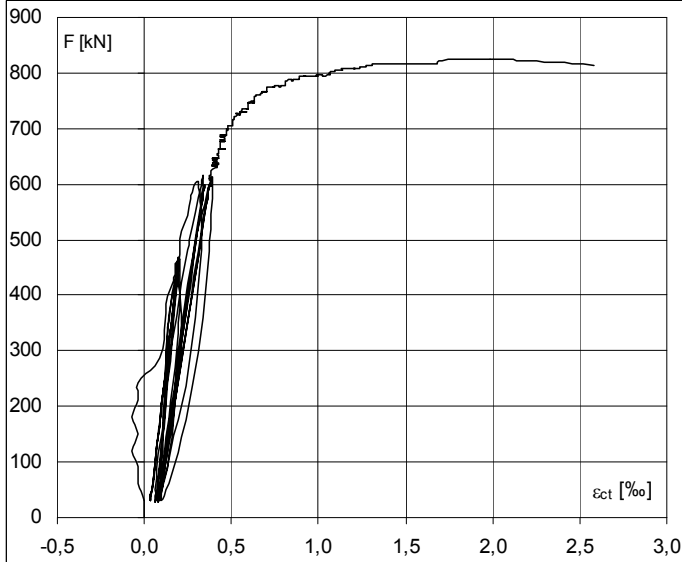
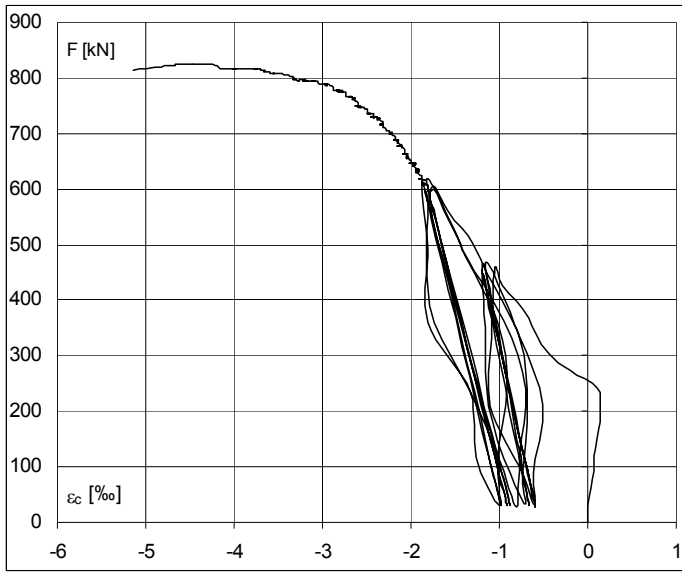
5h

6h

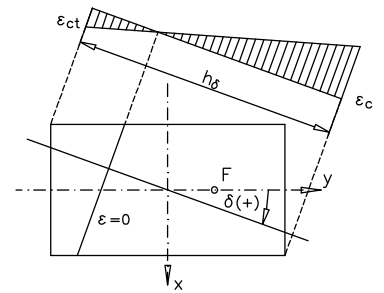
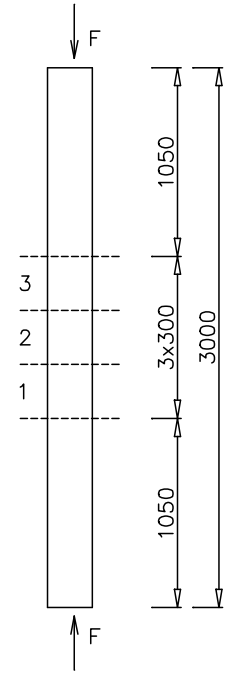
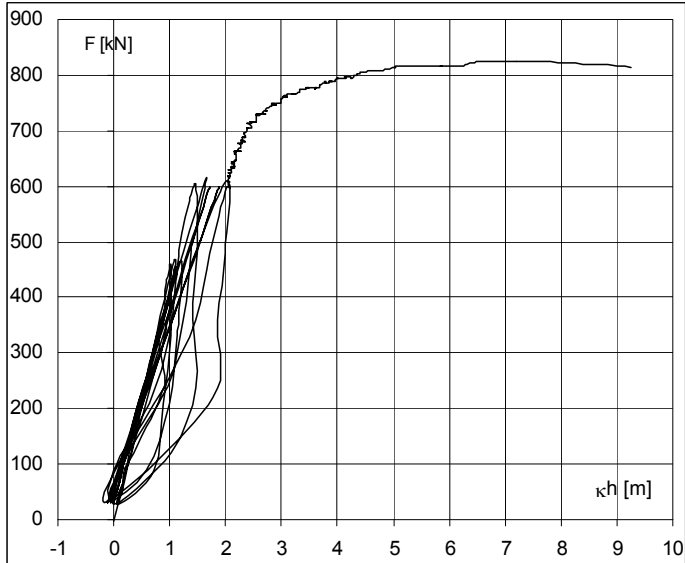
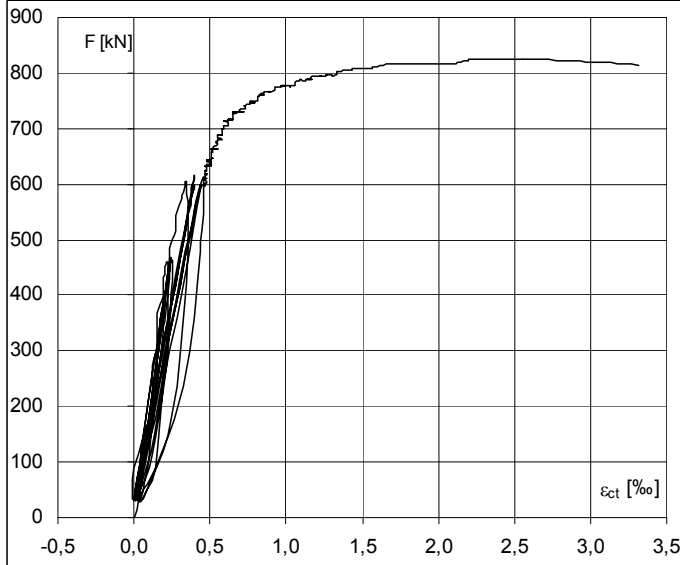
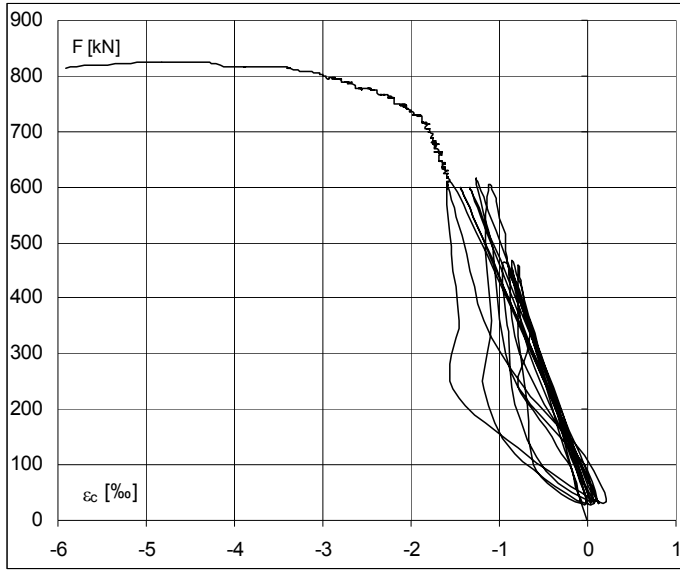


S-m/2m

Baza 1

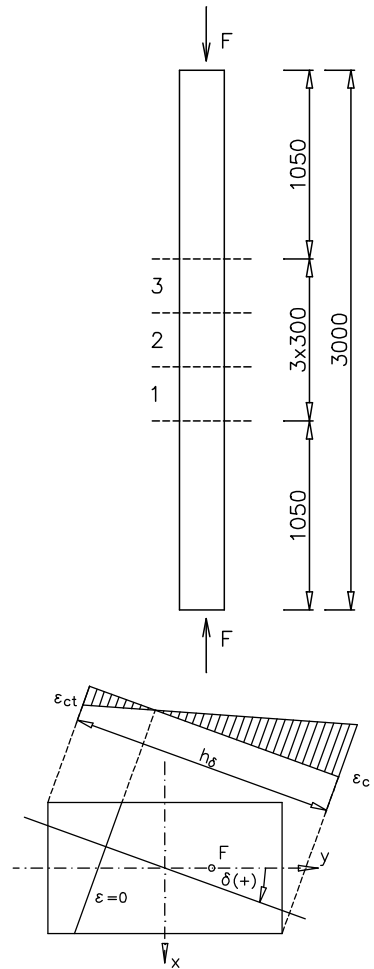
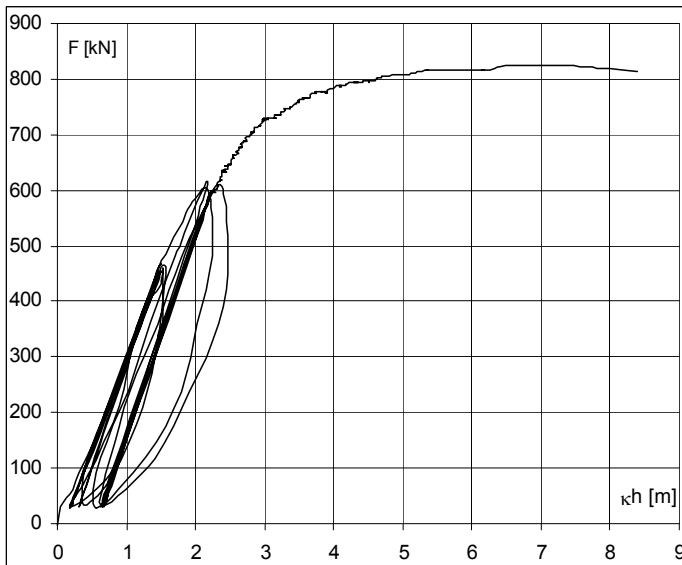
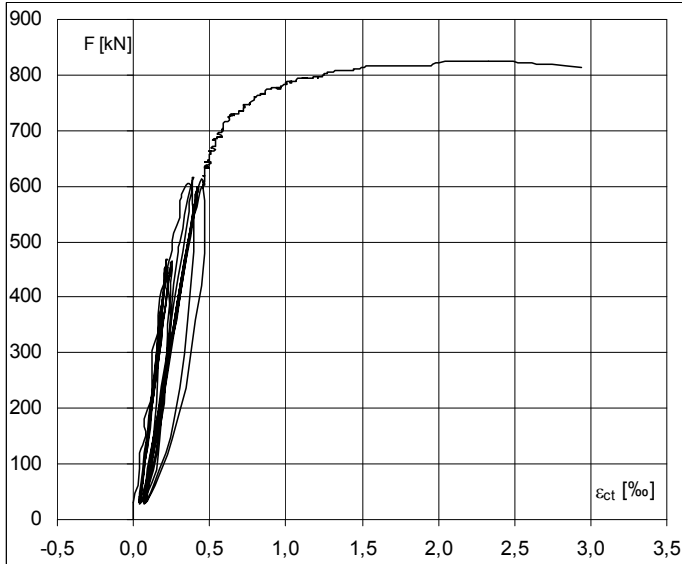
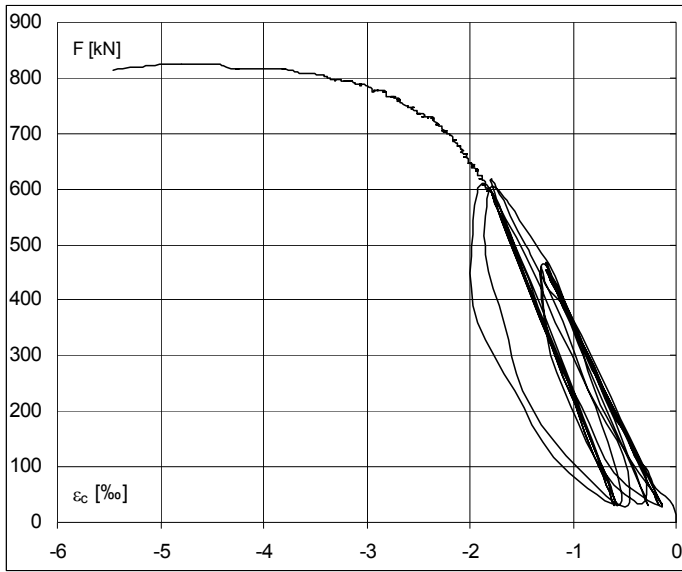


Baza 2

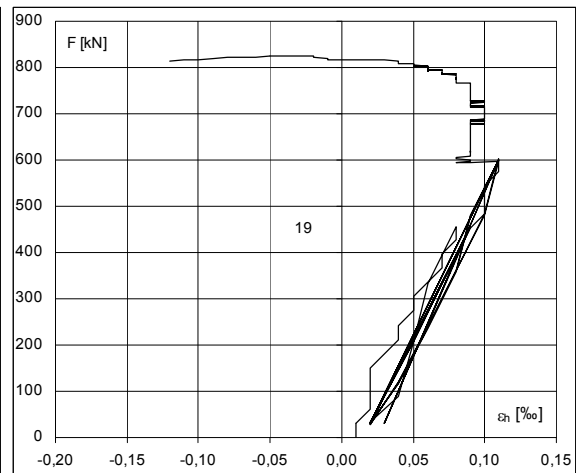
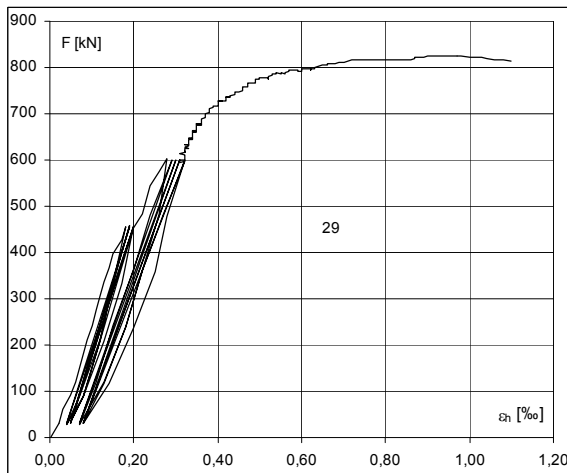
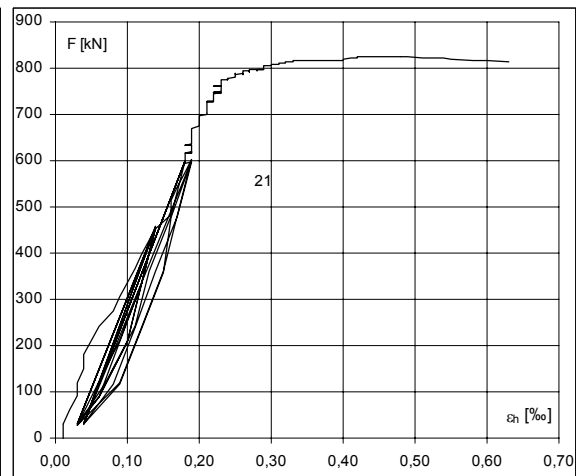
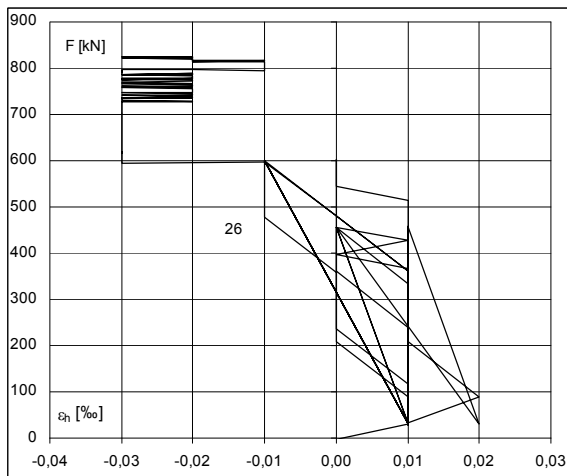
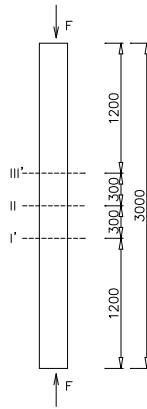
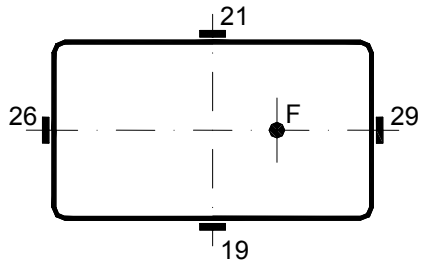


S-m/2m

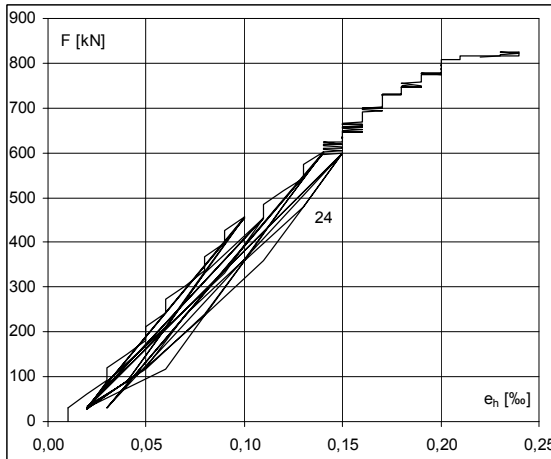
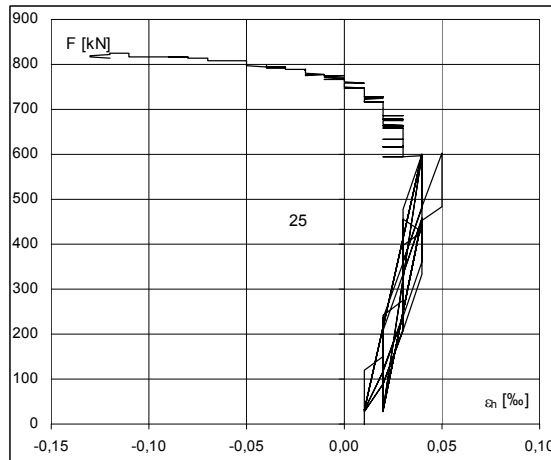
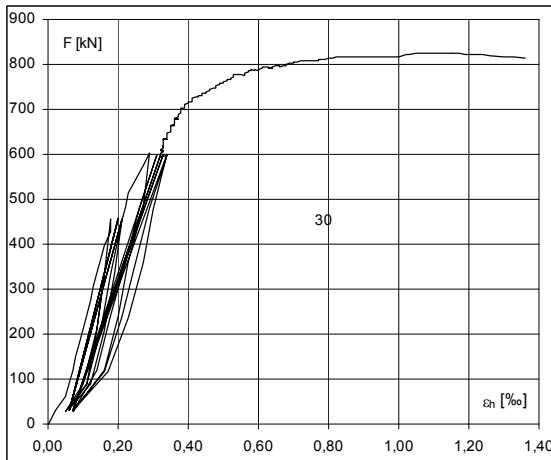
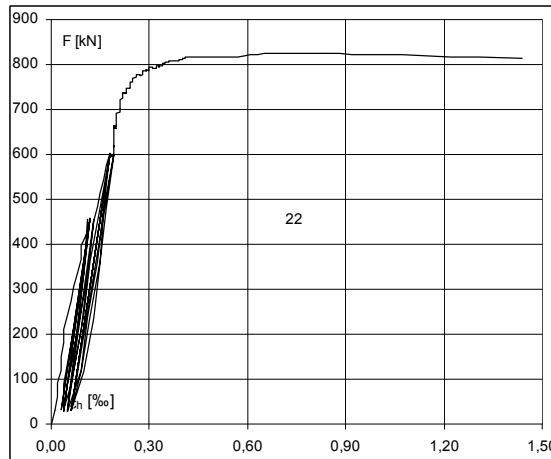
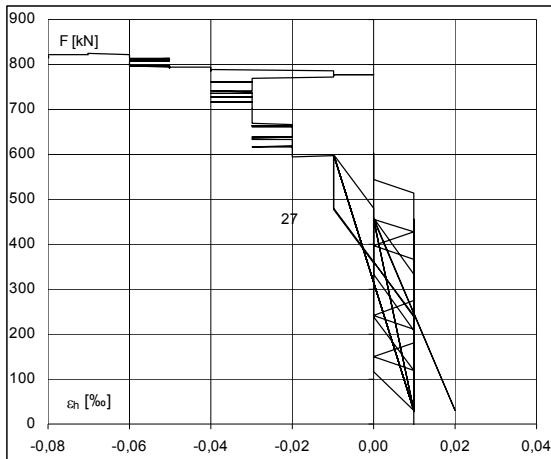
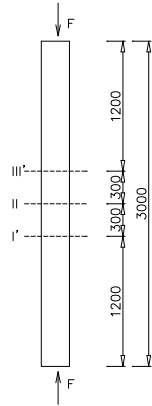
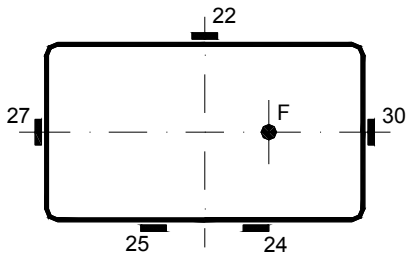
Baza 3



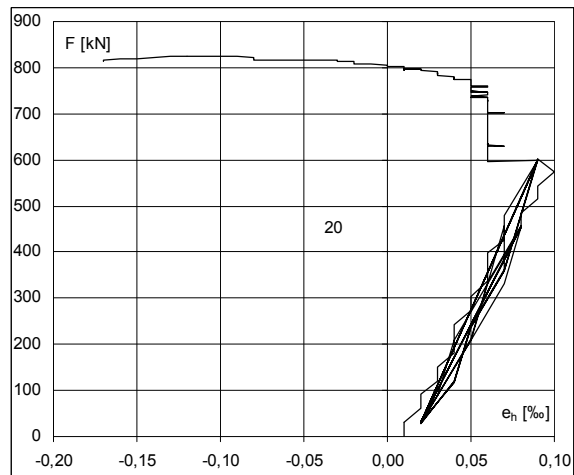
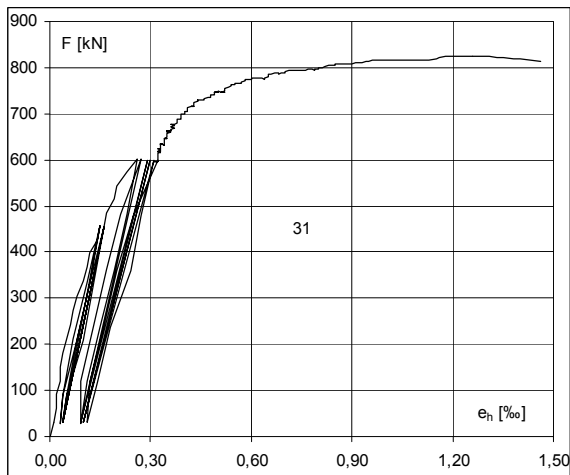
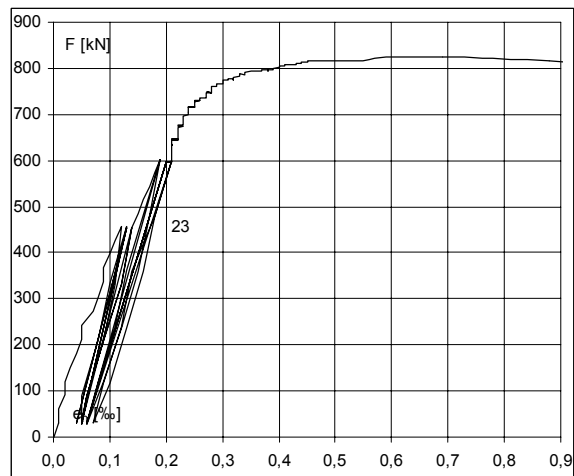
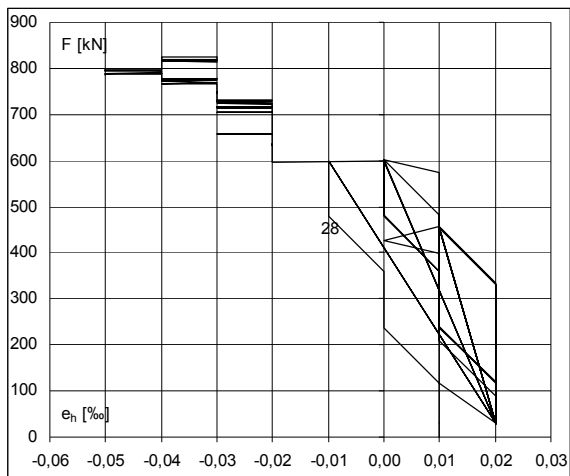
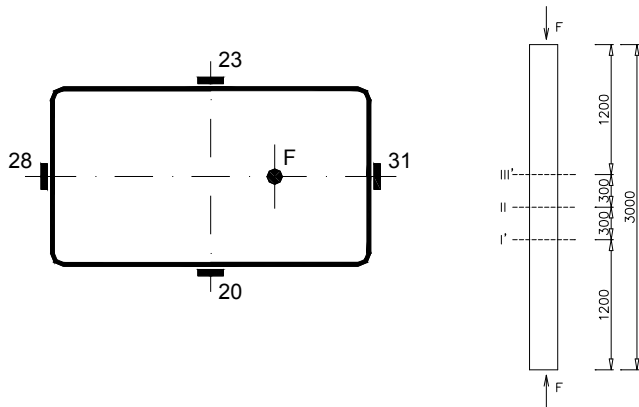
Przekrój I'



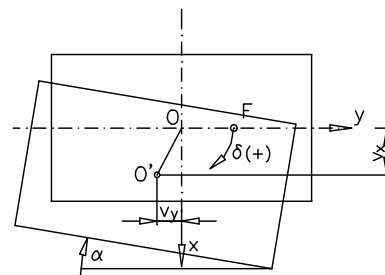
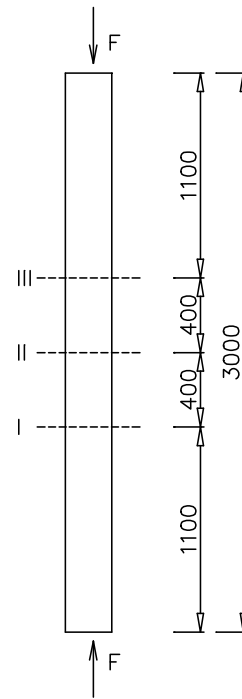
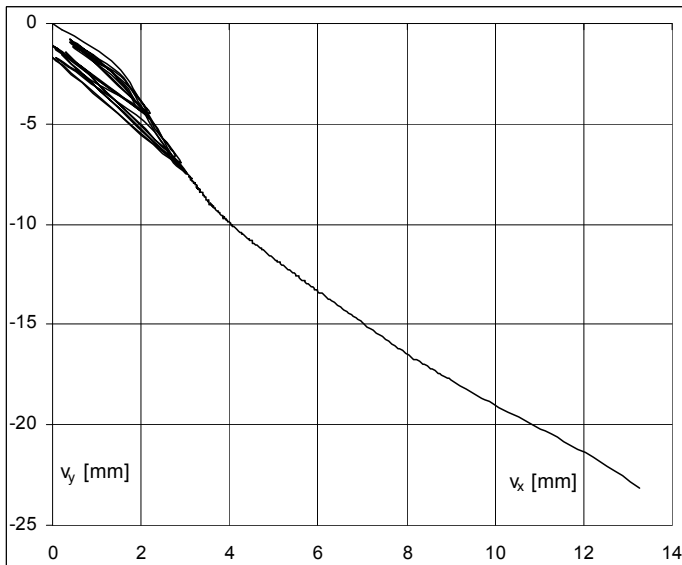
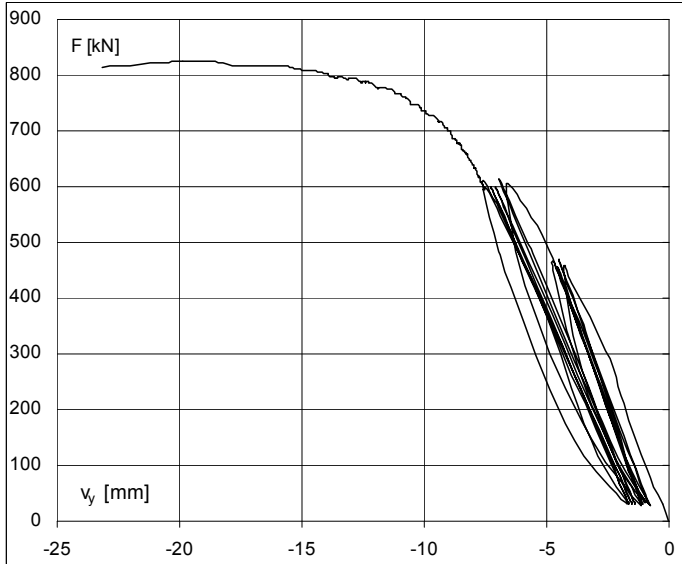
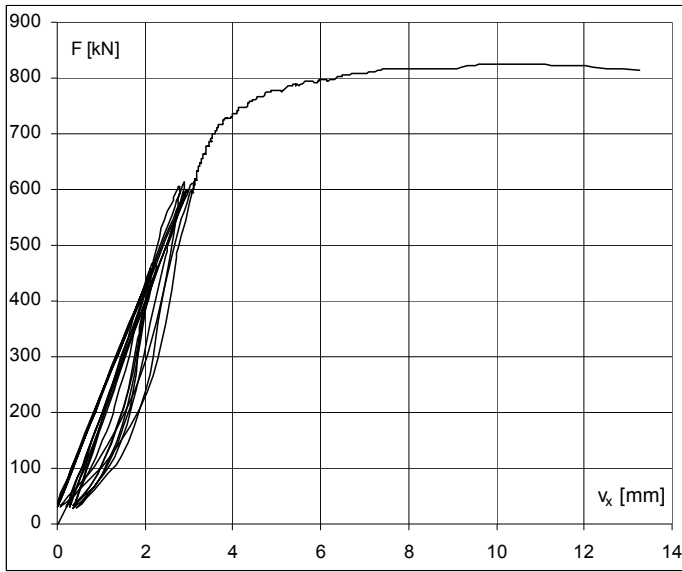
Przekrój II



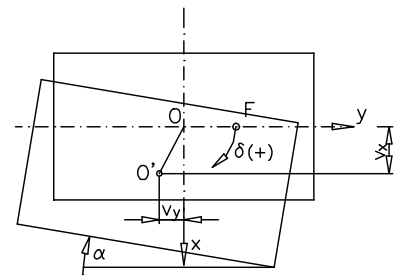
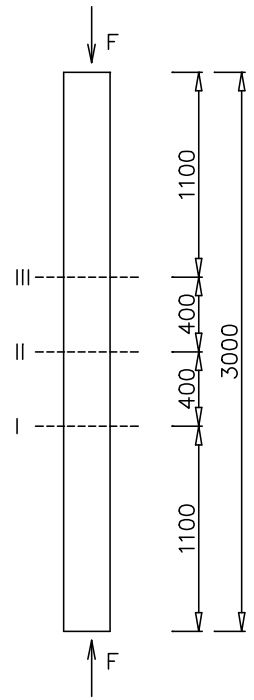
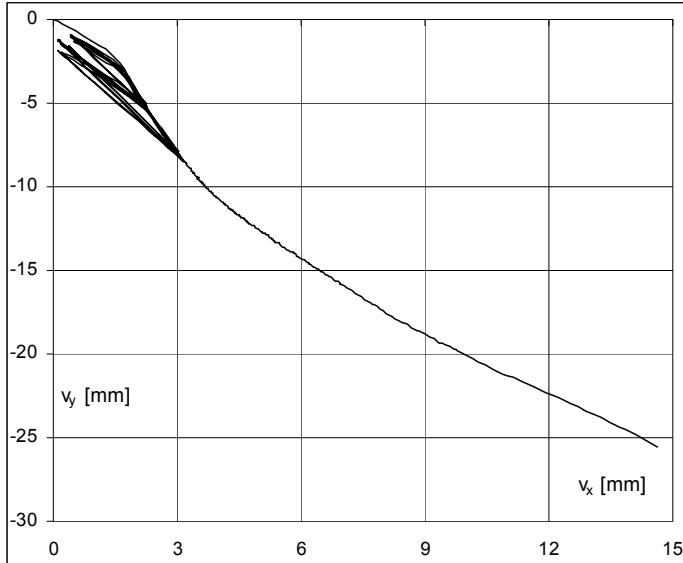
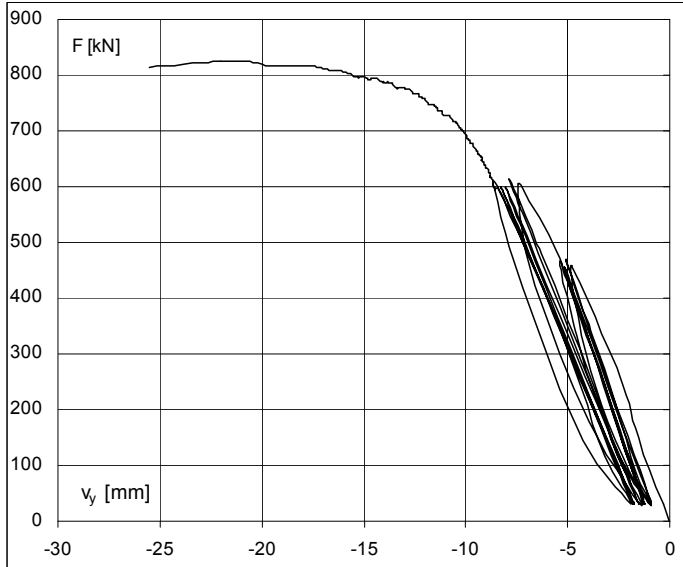
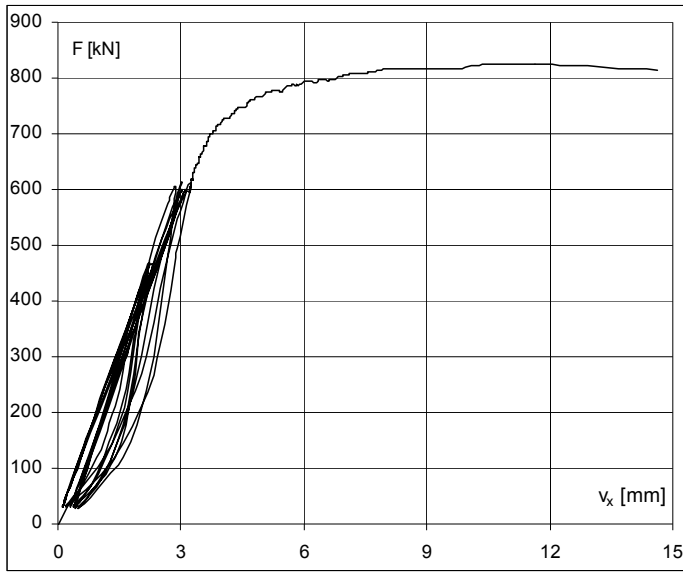
Przekrój III'



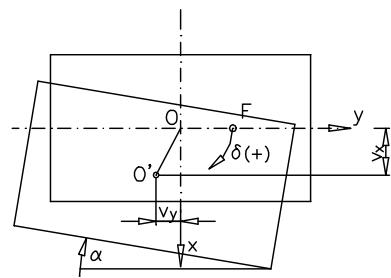
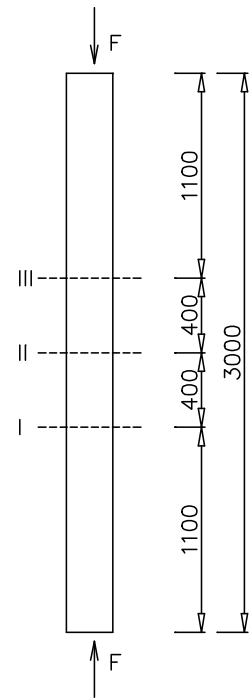
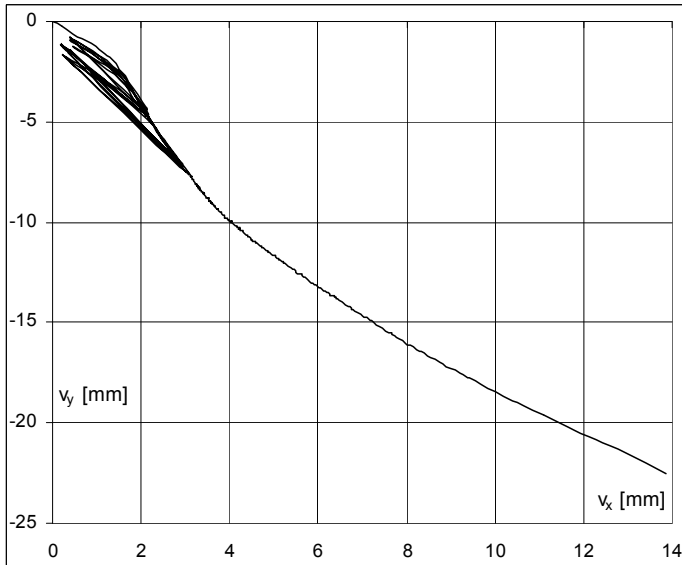
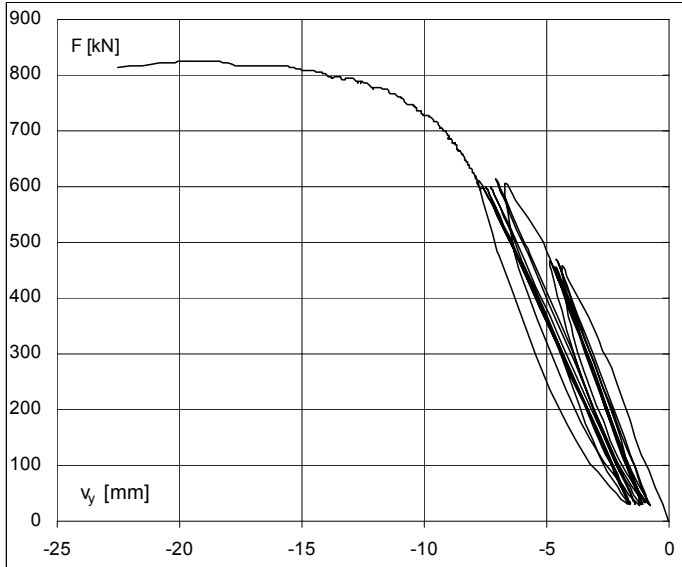
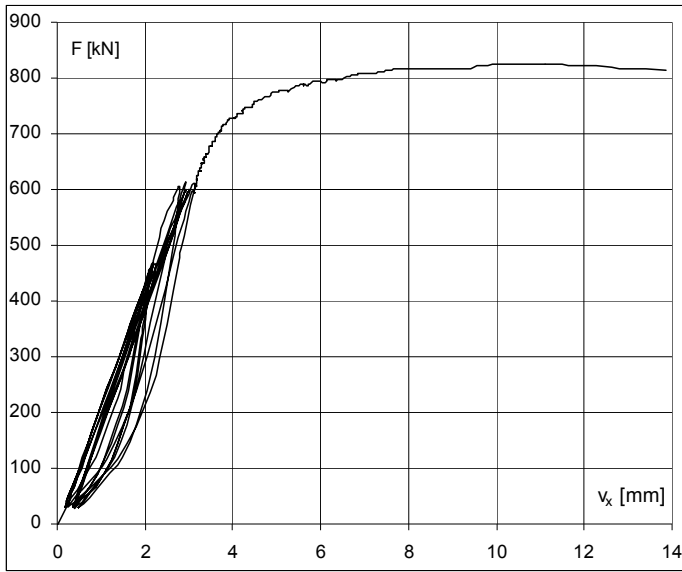
Przekrój I



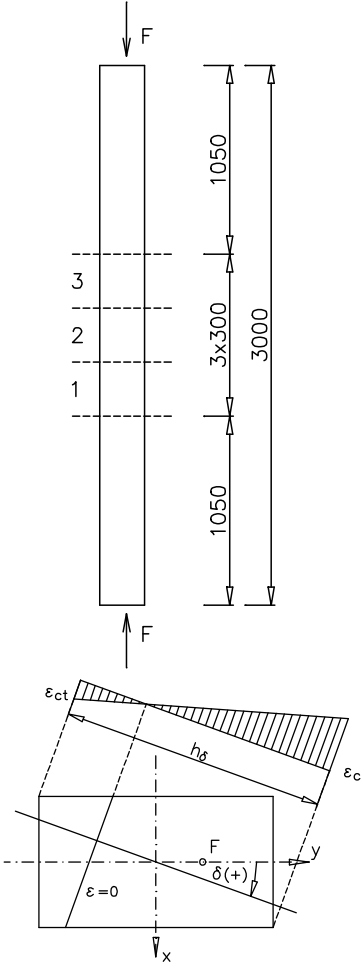
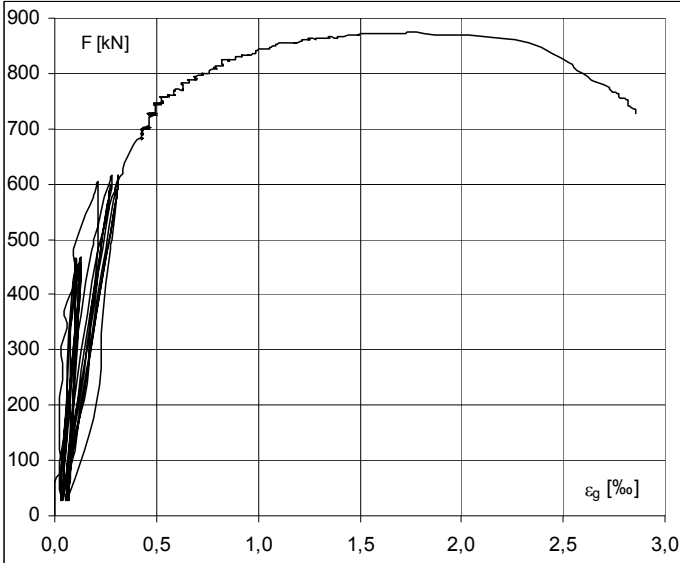
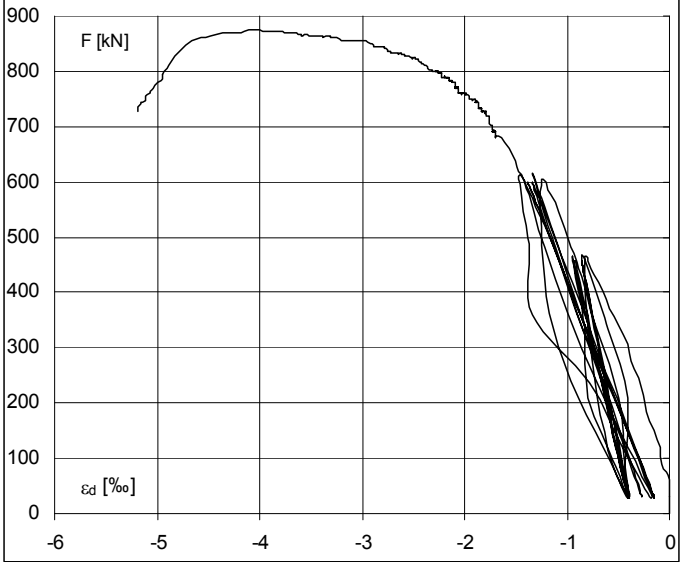
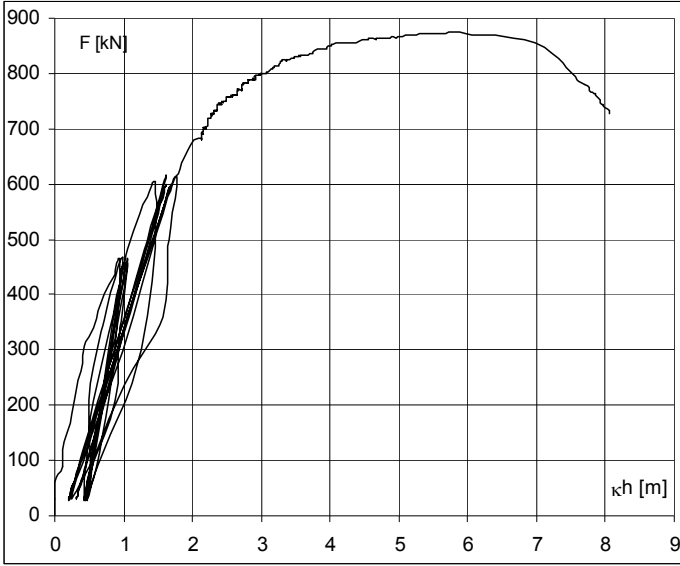
Przekrój II



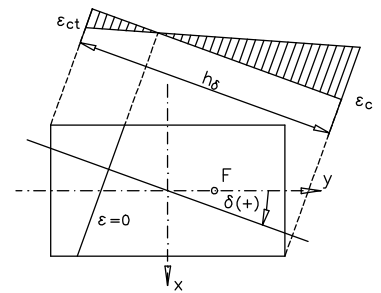
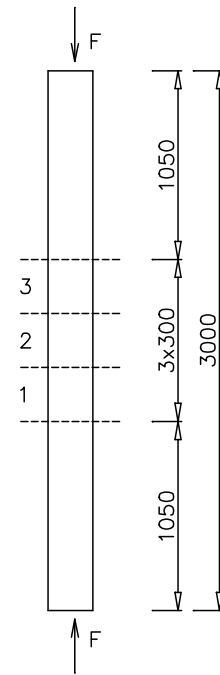
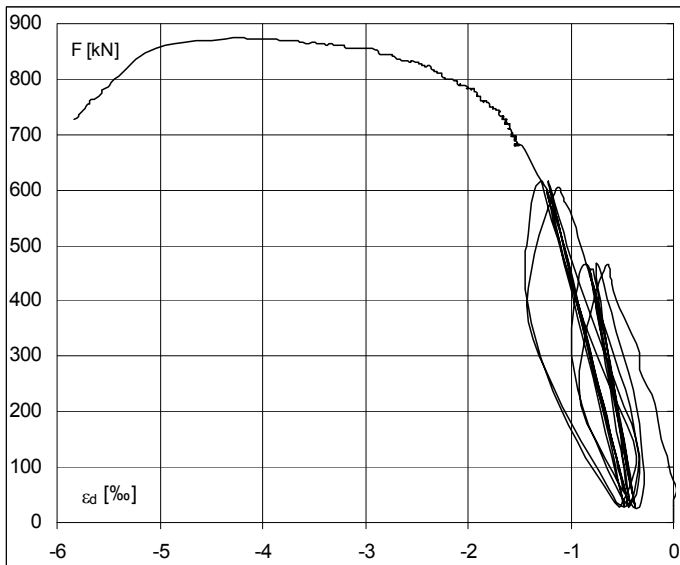
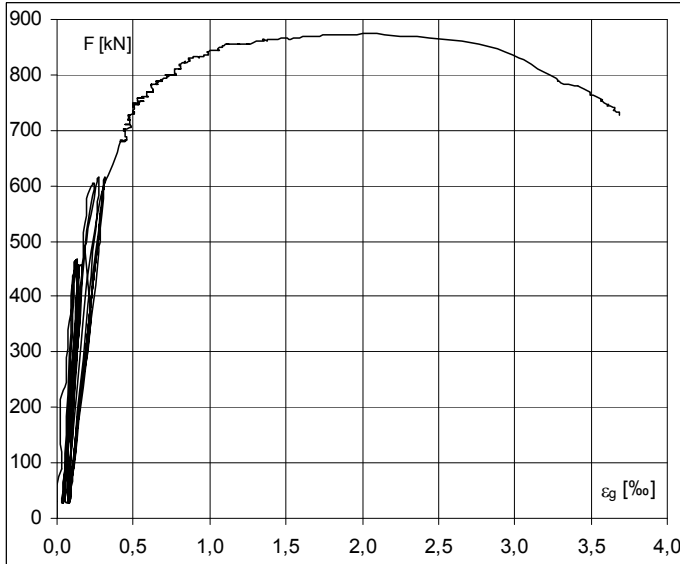
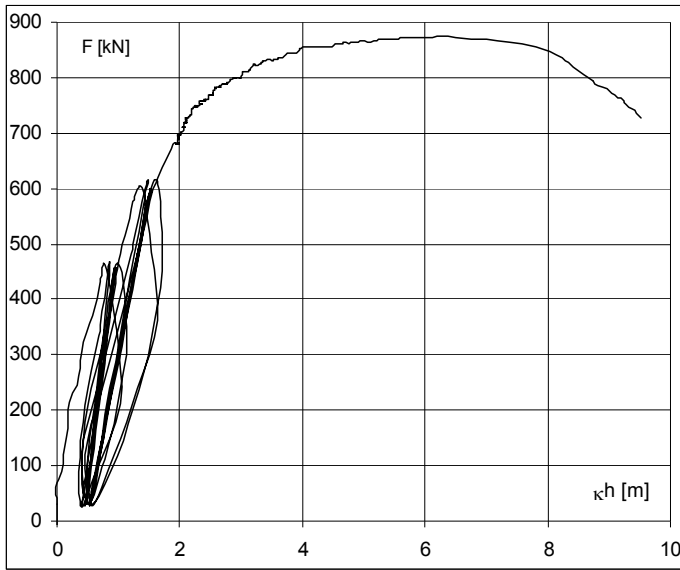
Przekrój III



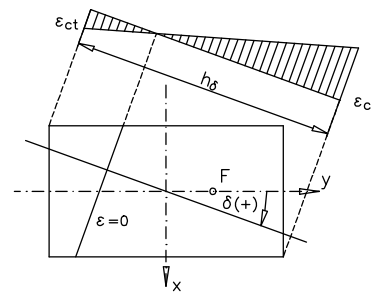
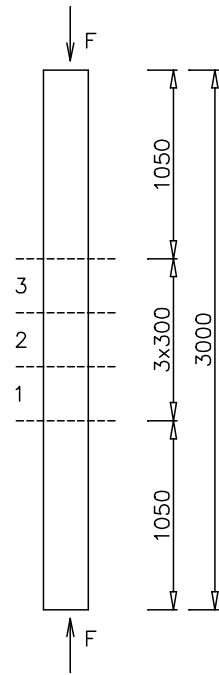
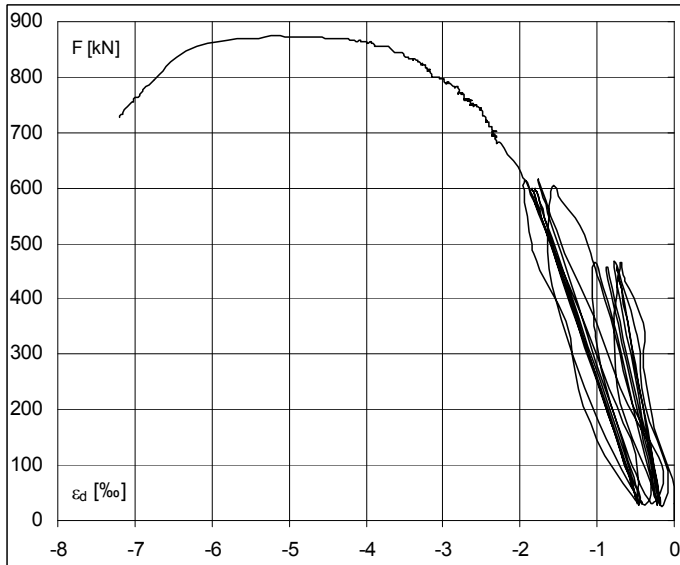
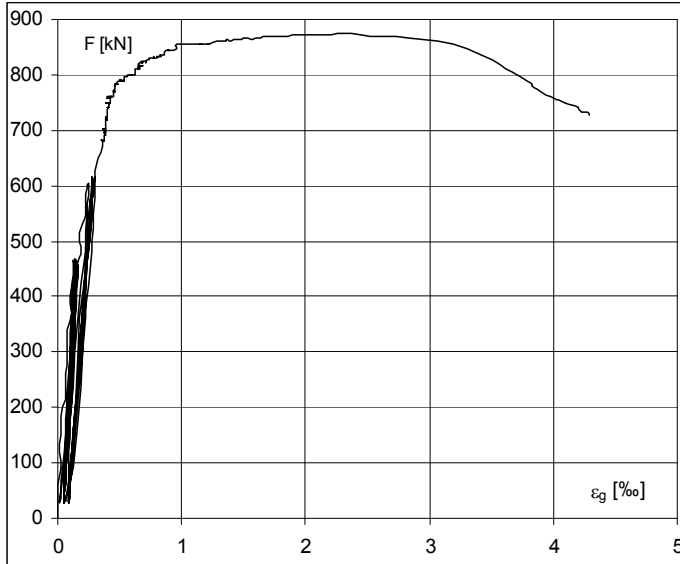
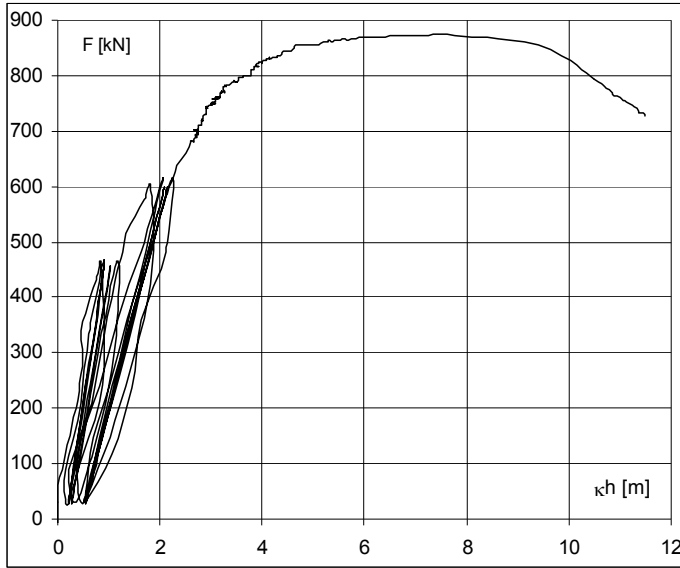
Baza 1



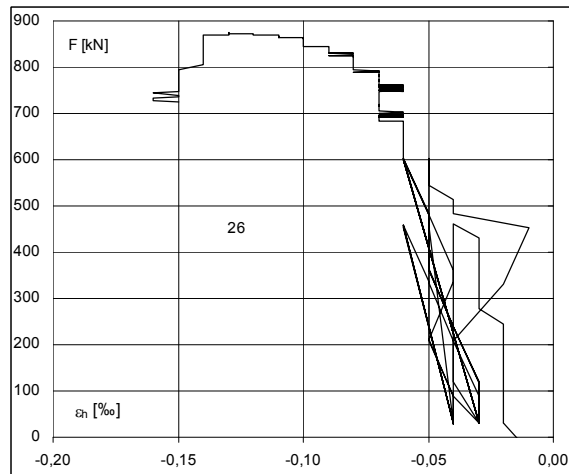
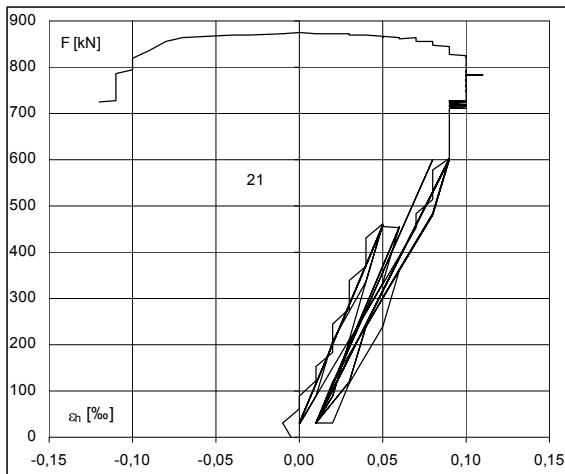
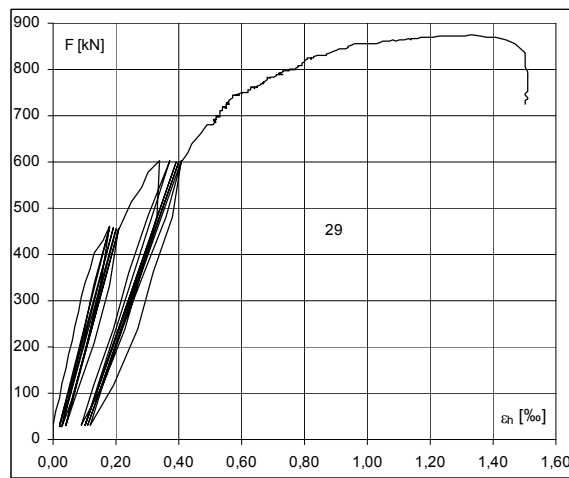
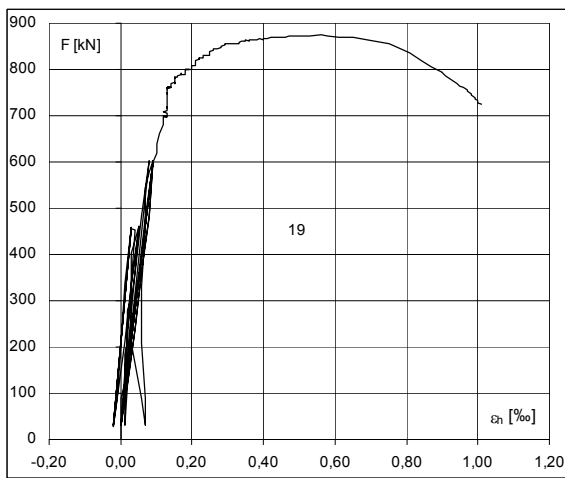
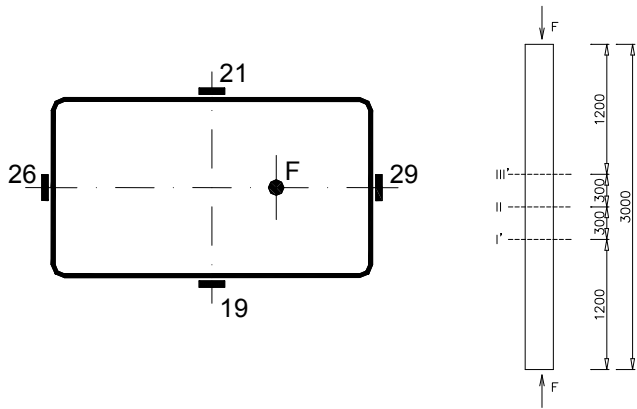
Baza 2



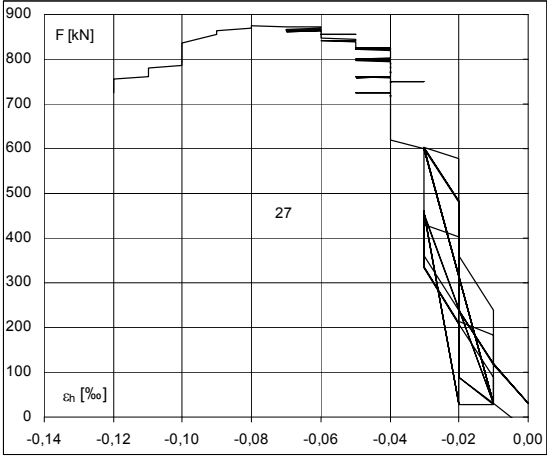
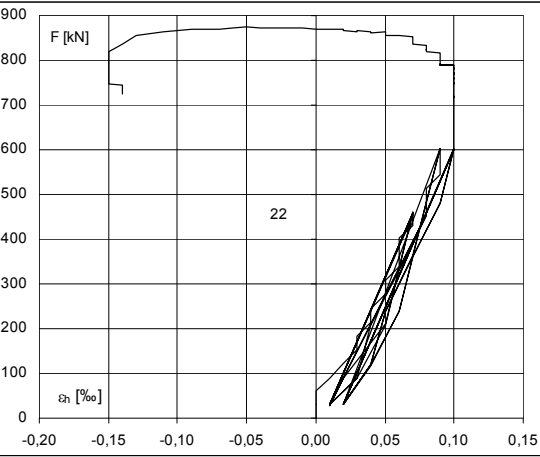
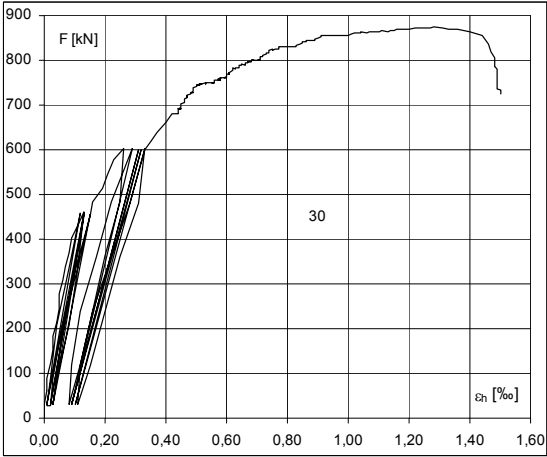
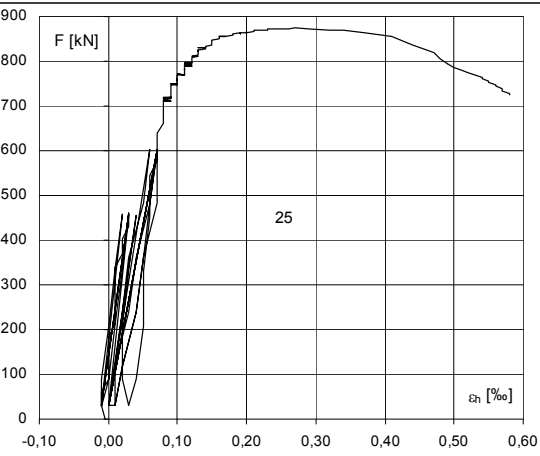
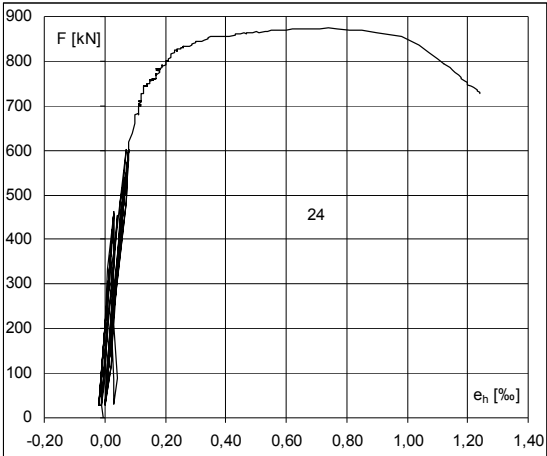
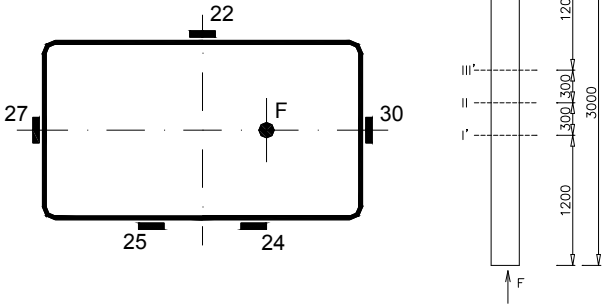
Baza 3



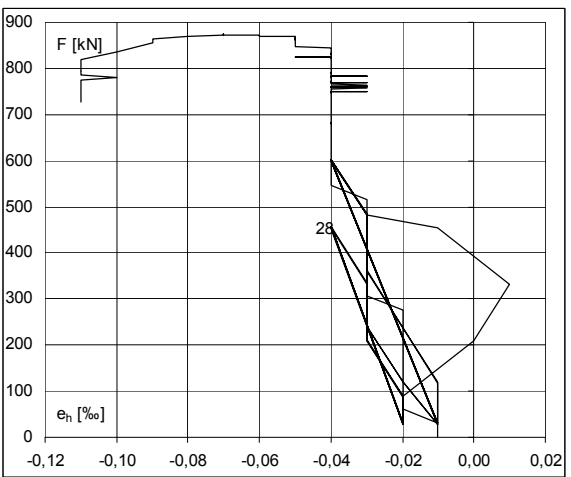
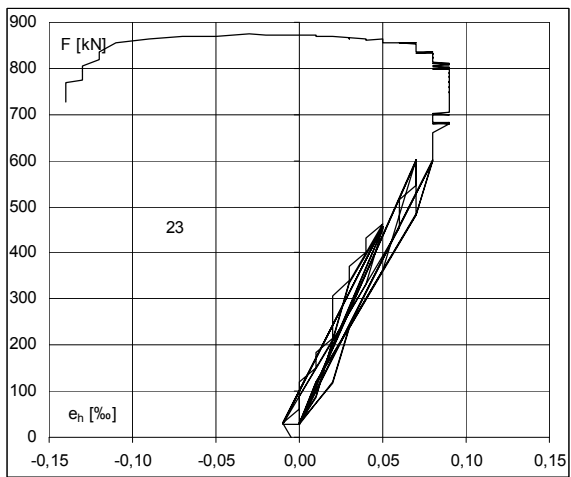
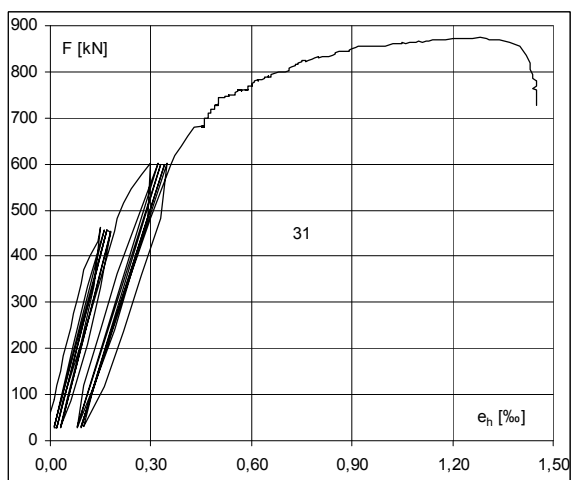
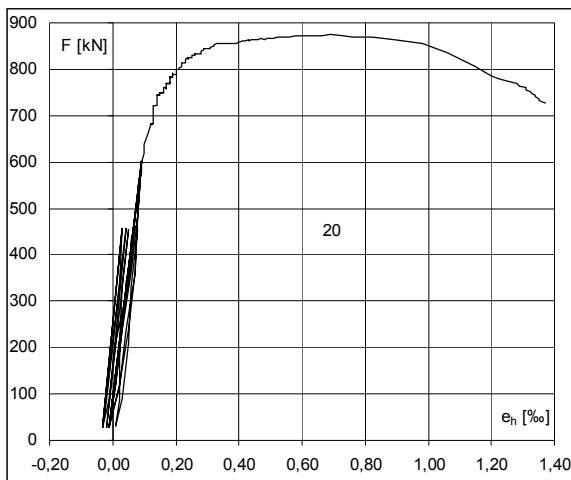
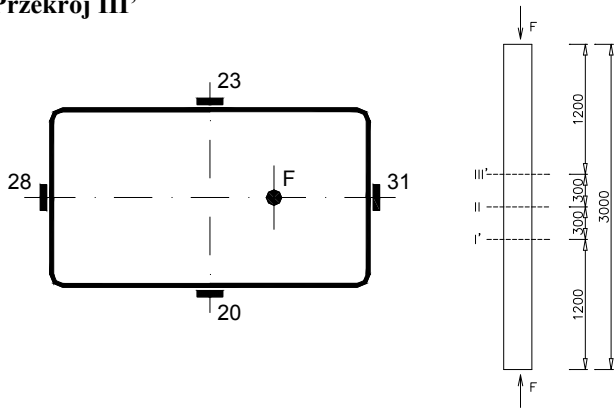
Przekrój I'



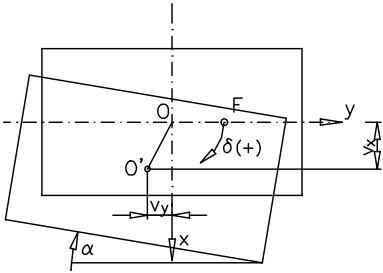
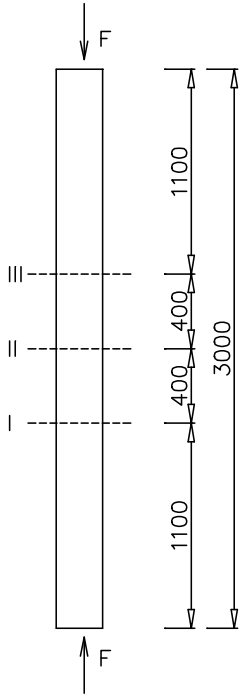
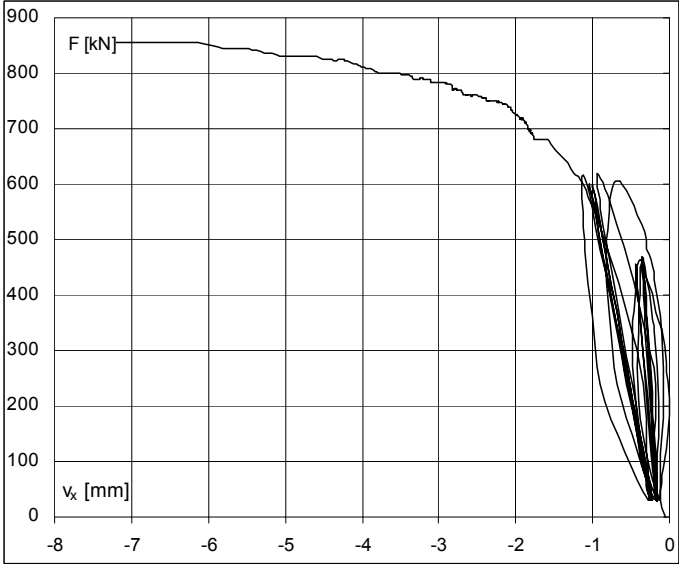
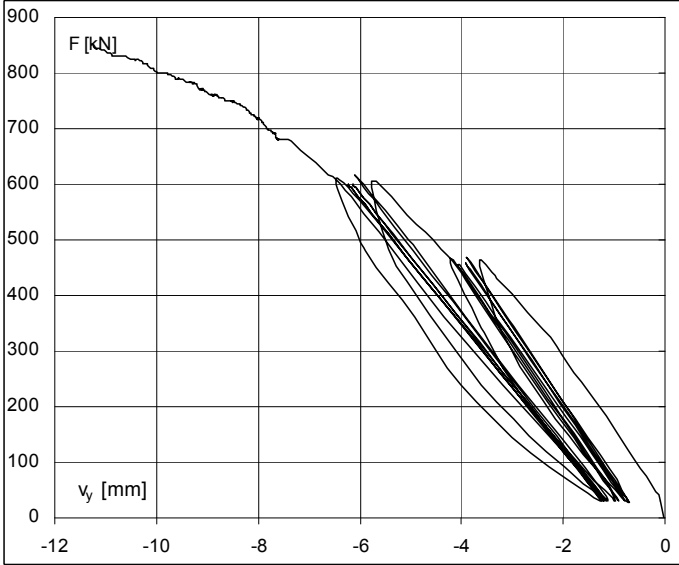
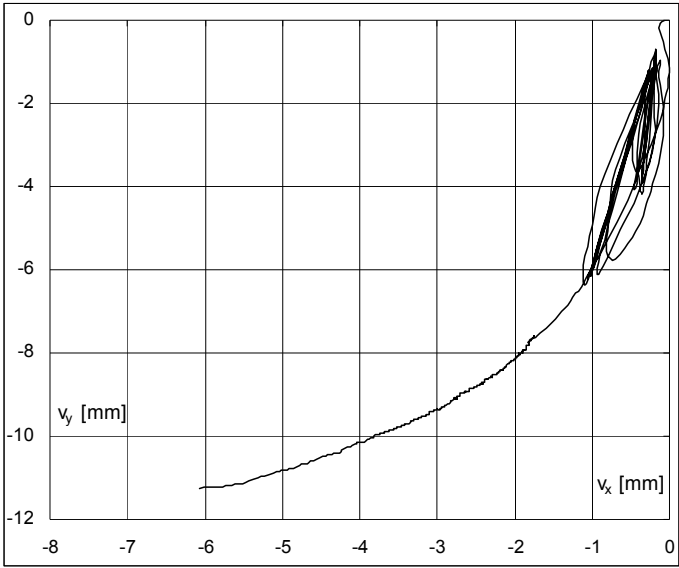
Przekrój II



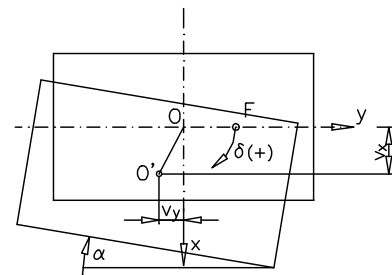
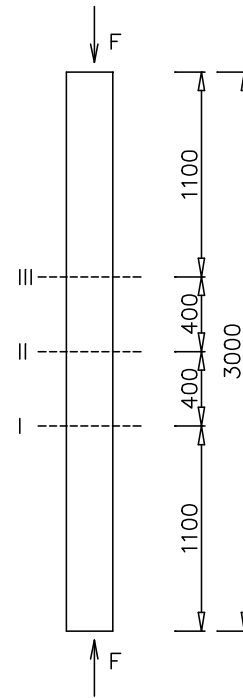
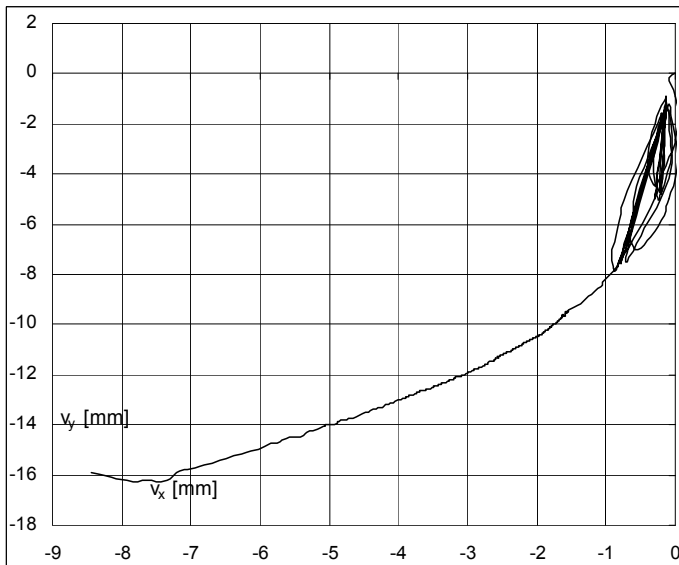
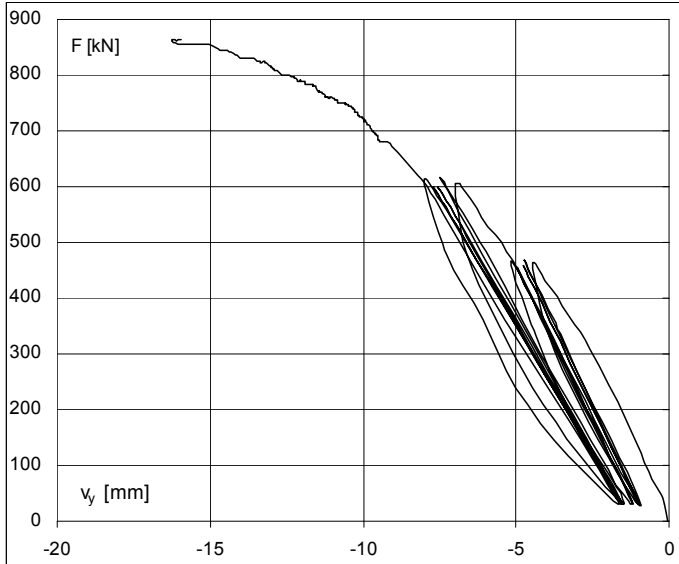
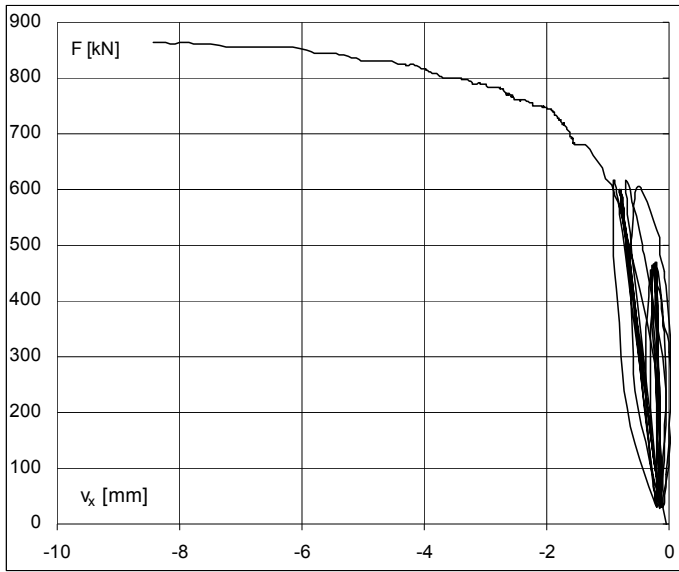
Przekrój III'



Przekrój I



Przekrój II



Przekrój III

