

BADANIA DOŚWIADCZALNE ELEMENTÓW I KONSTRUKCJI BETONOWYCH

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

ZESZYT NR 10

BIBLIOTEKA GŁÓWNA PL
BIBLIOTEKA BUDOWNICTWA
I ARCHITEKTURY

P. M-23

**Experimental
research on
RC elements
under torsion**

**Doświadczalne badania żelbetowych
elementów poddanych skręcaniu**

Anna Kosińska
Andrzej B. Nowakowski

Pracę wykonano w ramach działalności statutowej
w latach 1995 - 1997

Department
of Concrete Structures
Technical University
of Lodz, Poland

Łódź 2001
Katedra Budownictwa Betonowego
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Politechniki Łódzkiej

BADANIA DOŚWIADCZALNE ELEMENTÓW I KONSTRUKCJI BETONOWYCH

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

ZESZYT NR 10

**Experimental
research on
RC elements
under torsion**

**Doświadczalne badania żelbetowych
elementów poddanych skręcaniu**

Anna Kosińska
Andrzej B. Nowakowski

Pracę wykonano w ramach działalności statutowej
w latach 1995 - 1997

Department
of Concrete Structures
Technical University
of Lodz, Poland

Łódź 2001
Katedra Budownictwa Betonowego
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Politechniki Łódzkiej

Recenzent / reviewer
dr hab. inż. Tadeusz Ciężak

Tłumaczenie / translation
mgr inż. Maciej Winiarski

Opracowanie wyników pomiarów i skład tekstu / preparing of measurement results and text
mgr inż. Barbara Janecka
mgr inż. Jacek Filipczak

©2001 Katedra Budownictwa Betonowego, Łódź, Poland

ISSN 1230-6010

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

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono badania eksperymentalne żelbetowych belek wykonanych z betonu o wysokiej wytrzymałości (8 belek) oraz z betonu zwykłego (2 belki). Pięć spośród nich poddanych było czystemu skręcaniu (seria I), pozostałe badane były przy jednoczesnym działaniu skręcania i zginania (seria II). Wszystkie belki charakteryzowały się jednakowymi wymiarami oraz zbrojeniem. Parametrami zmiennymi były natomiast: klasa betonu oraz sposób obciążenia.

Podczas obciążania belek były prowadzone pomiary odkształceń na powierzchni betonu, kątów skręcenia, ugięć oraz szerokości rozwarcia rys.

Przeanalizowano wpływ wytrzymałości betonu i sposobu obciążenia na nośność, sztywność, odkształcenia oraz zarysowanie belek.

SUMMARY

Experimental investigations of reinforced concrete beams cast of HSC (8 beams) and ordinary concrete (2 beams) are presented in the paper. Among them five were subjected to pure torsion (series I) and the remaining were tested under simultaneous action of torsion and bending (series II). All beams had the same dimensions and reinforcement. Variable parameters were: concrete class and type of loading.

During loading tests on beams, measurements were taken of: strains on surface of concrete, angles of rotation, deflections and crack widths.

Influence of concrete strength and arrangement of loading on load carrying capacity, stiffness, strains and cracking of beams was analysed.

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	7
2. Opis i program badań	7
2.1. Dane ogólne	7
2.2. Konstrukcja modeli	8
2.3. Materiały	10
2.3.1. Beton	10
2.3.2. Stal zbrojeniowa	13
2.4. Wykonanie modeli	14
2.5. Stanowisko badawcze	14
2.6. Badania i pomiary	16
2.6.1. Seria I (belki BT)	16
2.6.2. Seria II (belki BTM)	19
3. Wyniki badań	20
3.1. Seria I (belki BT)	20
3.1.1. Sztywność na skręcanie	20
3.1.2. Odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belek w kierunku podłużnym	21
3.1.3. Odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belek w kierunku poprzecznym	22
3.1.4. Średnie odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belek w kierunkach głównych	23
3.1.5. Zarysowanie	27
3.1.6. Nośność	28
3.2. Seria II (belki BTM)	29
3.2.1. Sztywność na skręcanie	29
3.2.2. Odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belek w kierunku podłużnym	29
3.2.3. Odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belek w kierunku poprzecznym	31
3.2.4. Średnie odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belek w kierunkach głównych	31
3.2.5. Zarysowanie	31
3.2.6. Nośność	32
4. Wnioski	33
Literatura	34
Załącznik	35

CONTENTS LIST

1. Introduction	7
2. Description and program of research	7
2.1. General data	7
2.2. Konstruktion of models	8
2.3. Materials	10
2.3.1. Concrete	10
2.3.2. Reinforcing steel	13
2.4. Casting of models	14
2.5. Test stand	14
2.6. Test and measurements	16
2.6.1. Series I (BT beams)	16
2.6.2. Series II (BTM beams)	19
3. Results of tests	20
3.1. Series I (BT beams)	20
3.1.1. Torsion stiffness	20
3.1.2. Concrete strains on the side surface of beams in longitudinal direfction	21
3.1.3. Concrete strains on the side surace of beams in transverse direction	22
3.1.4. Mean concrete strain in principal directions on the side surface of beams	23
3.1.5. Cracking	27
3.1.6. Load carrying capacity	28
3.2. Series II (BTM beams)	29
3.2.1. Torsion stiffness	29
3.2.2. Concrete strains on the side surface of beams in longitudinal direfction	29
3.2.3. Concrete strains on the side surace of beams in transverse direction	31
3.2.4. Mean concrete strain in principal directions on the side surface of beams	31
3.2.5. Cracking	31
3.2.6. Load carrying capacity	32
4. Conclusions	33
References	34
Appendix	35

OZNACZENIA

b	- szerokość belki
d	- wysokość użyteczna przekroju
e	- odległość końca taśmy od podpory
f_c	- wytrzymałość betonu na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia
$f_{c,cube}$	- wytrzymałość betonu na ściskanie określona na kostkach o boku 150 mm
$f_{ct,sp}$	- wytrzymałość betonu na rozciąganie określona metodą rozłupywania
f_p	- wytrzymałość taśmy na rozciąganie
f_t	- wytrzymałość stali zbrojeniowej na rozciąganie
h	- wysokość przekroju
r	- mimośród siły podłużnej w przekroju względem osi podłużnej
v	- ugięcie belki
x	- wysokość strefy ściskanej przekroju
A_p	- pole powierzchni taśmy
A_{s1}	- pole powierzchni zbrojenia odpowiednio rozciąganego i ściskanego
E_c	- moduł sprężystości betonu
E_p	- moduł sprężystości taśmy CFRP
E_s	- moduł sprężystości stali
F_c	- wypadkowa bryły naprężeń ściskanej strefy przekroju
F_p	- siła w taśmie
F_s	- siła w zbrojeniu
M_R	- nośność przekroju na zginanie
κ	- krzywizna przekroju
ξ	- względna wysokość strefy ściskanej
ω	- współczynnik opisujący wypadkową bryły naprężeń normalnych w strefie ściskanej
ζ	- współczynnik opisujący ramie sił w przekroju
ε_c	- odkształcenie jednostkowe betonu
ε_{sy}	- odkształcenie stali odpowiadające granicy plastyczności
ε_p	- odkształcenie taśmy
ε_{plim}	- odkształcenie taśmy w chwili odspojenia
ε_{pu}	- odkształcenie taśmy przy zerwaniu
ρ_p	- stopień zbrojenia taśmą
ρ_s	- stopień zbrojenia stalą zbrojeniową

NOTATION

b	- szerokość belki
d	- wysokość użyteczna przekroju
e	- odległość końca taśmy od podpory
f_c	- wytrzymałość betonu na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia
$f_{c,cube}$	- wytrzymałość betonu na ściskanie określona na kostkach o boku 150 mm
$f_{ct,sp}$	- wytrzymałość betonu na rozciąganie określona metodą rozłupywania
f_p	- wytrzymałość taśmy na rozciąganie
f_t	- wytrzymałość stali zbrojeniowej na rozciąganie
h	- wysokość przekroju
r	- mimośród siły podłużnej w przekroju względem osi podłużnej
v	- ugięcie belki
x	- wysokość strefy ściskanej przekroju
A_p	- pole powierzchni taśmy
A_{s1}	- pole powierzchni zbrojenia odpowiednio rozciąganego i ściskanego
E_c	- moduł sprężystości betonu
E_p	- moduł sprężystości taśmy CFRP
E_s	- moduł sprężystości stali
F_c	- wypadkowa bryły naprężeń ściskanej strefy przekroju
F_p	- siła w taśmie
F_s	- siła w zbrojeniu
M_R	- nośność przekroju na zginanie
κ	- krzywizna przekroju
ξ	- względna wysokość strefy ściskanej
ω	- współczynnik opisujący wypadkową bryły naprężeń normalnych w strefie ściskanej
ζ	- współczynnik opisujący ramie sił w przekroju
ε_c	- odkształcenie jednostkowe betonu
ε_{sy}	- odkształcenie stali odpowiadające granicy plastyczności
ε_p	- odkształcenie taśmy
ε_{plim}	- odkształcenie taśmy w chwili odspojenia
ε_{pu}	- odkształcenie taśmy przy zerwaniu
ρ_p	- stopień zbrojenia taśmą
ρ_s	- stopień zbrojenia stalą zbrojeniową

1. WPROWADZENIE

Ze zjawiskiem skręcania mamy do czynienia w przypadku wielu rodzajów konstrukcji żelbetowych, jak na przykład ramy przestrzenne, belki wsporcze płyt wspornikowych, belki zakrzywione w planie, schody spiralne itp. W konstrukcjach żelbetowych rzadko kiedy mamy do czynienia z przypadkiem czystego skręcania; na ogół występuje wraz ze zginaniem i ścinaniem. Zrealizowane dotychczas programy badawcze dotyczyły na ogół elementów żelbetowych wykonanych z betonu klas nie wyższych niż B30 [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

W latach 80-tych pojawiły się konstrukcje z betonu wysokowartościowego BWW o wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach powyżej 60MPa, który charakteryzuje się wysokimi walorami użytkowymi (duża trwałość osiągana dzięki bardzo dobrej szczelności i jednorodności) oraz technologicznymi (uzyskiwana w krótkim czasie wysoka wytrzymałość umożliwiającą szybki postęp robót). Zrozumiałe jest zatem obserwowane w naszym kraju zainteresowanie konstrukcjami z betonu wysokowartościowego, które zaowocowało szeregiem publikacji na ten temat, jak na przykład wydanie specjalnych zeszytów Inżynierii i Budownictwa (nr 9/93) oraz Przeglądu Budowlanego (nr 8-9/92). Również podczas konferencji naukowych prezentowane były prace dotyczące konstrukcji z betonu wysokowartościowego [8, 9, 10, 11]. Wynikało z nich, iż BWW w konkretnej konstrukcji charakteryzuje się nieco innymi cechami niż badany jedynie na próbkach [12]. W związku z powyższym autorzy niniejszego opracowania przygotowali i zrealizowali program, którego celem było rozpoznanie zachowania się betonu wysokowartościowego w belkach żelbetowych poddanych czystemu skręcaniu, jak również jednoczesnemu skręcaniu, zginaniu i ścinaniu. Dodatkowym argumentem przemawiającym za celowością realizacji takiego programu był fakt, iż dotychczas tego typu badań nie prowadzono w naszym kraju, a za granicą zrealizowano ich niewiele [12, 13].

2. OPIS I PROGRAM BADAŃ

2.1. Dane ogólne

Program badań obejmował dwie serie belek. Pierwsza zawierająca 5 belek oznaczonych symbolem BT była poddana czystemu skręcaniu (T). Druga składająca się również z 5 belek oznaczonych symbolem BTM poddana była jednoczesnemu działaniu momentu skręcającego (T), momentu zginającego (M) i siły poprzecznej (V). Ogólną charakterystykę zbadanych belek przedstawiono w tablicy 1.

Celem badań była doświadczalna weryfikacja wpływu wytrzymałości betonu oraz sposobu obciążenia (czyste skręcanie oraz jednoczesne oddziaływanie skręcania, zginania i ścinania) na odkształcalność, zarysowanie i nośność belek, ze szczególnym uwzględnieniem zachowania się BWW w rzeczywistych elementach konstrukcyjnych.

1. INTRODUCTION

The phenomenon of torsion is present in many kinds of reinforced concrete structures, such as space frames, beams supporting cantilever slabs, beams curved in plan, spiral staircases, etc. In reinforced concrete structures pure torsion is rare; usually, it is present accompanied by bending and shear. Research programs carried out hitherto concerned generally RC elements using concrete of class not higher than B30 [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

In the eighties appeared the structures of high strength concrete, which had 28-day compressive stress over 60MPa and high utility values (high durability attained thanks to very good tightness and homogeneity) as well as good technological properties (high early strength allowing fast pace of construction). Interest taken in our country in high strength concrete structures is therefore understandable. This has resulted in a number of publications on this subject, such as e.g. special issues of *Inżynieria i Budownictwo* (Engineering and Building) No. 9/93 and of *Przegląd Budowlany* (Building Review) No 8-9/92). During scientific conferences, papers on high strength concrete structures were also presented [8, 9, 10, 11]. The conclusions of these papers were that high strength concrete in given structures displays slightly different properties than HSC tested on samples only [12]. In view of this, the Authors of this paper prepared and carried out a program with the aim of investigating the behaviour of HSC in reinforced concrete beams subjected to pure torsion as well as simultaneous torsion, bending and shear. An additional reason for the advisability of carrying such a program was that research of this type has not yet been carried out in this country and only a few examples could be found abroad [12, 13].

2. DESCRIPTION AND PROGRAM OF RESEARCH

2.1. General data

The program included two series of beams. First, consisting of five beams denoted

BT was subjected to pure torsion (T). Second series, consisting also of five beams denoted BTM, was subjected to simultaneous action of torsion moment (T), bending moment (M) and transverse force (V). General characteristic of tested beams is given in Table 1.

The aim of the tests was experimental verification of influence of concrete strength and kind of loading (pure torsion or simultaneous action of torsion, bending and shear) on deformability, cracking and load carrying capacity of beams, with particular stress laid on the behaviour of high strength concrete in real structural elements.

Tablica 1. Ogólna charakterystyka badanych belek
Table 1. General characteristic of the tested beams

Seria Series	Oznaczenie belki Symbol	Sposób obciążenia Type of loading	Zbrojenie Reinforcement
I	BT-25	czyste skręcanie pure torsion	pręty podłużne 6#20 strzemiona Ø8 co 95mm longitudinal bars 6#20 stirrups Ø8, at 95mm
	BT-70/1		
	BT-70/2		
	BT-70/3		
	BT-70/4		
II	BTM-35	skręcanie ze zginaniem i ścinaniem torsion with bending and shear	dołem 4#20, górą 2#20, w środku 2#20 strzemiona #8 co 95mm bottom 4#20, top 2#20, mid-depth 2#20 stirrups #8, at 95mm
	BTM-70/1		
	BTM-70/2		
	BTM-70/3		
	BTM-70/4		

Parametrami stałymi były:

- wymiary przekroju poprzecznego belek: $b=0.20\text{m}$, $h=0.33\text{m}$,
- rozpiętość: $L=3.00\text{m}$,
- średnica i rozstaw strzemion: Ø8 co 95mm na całej długości belek.

Parametrami zmiennymi były:

- wytrzymałość betonu: projektowana wytrzymałość walcząca $f_c=25\text{MPa}$ oraz $f_c=70\text{MPa}$,
- sposób obciążania.

2.2. Konstrukcja modeli

Modelami badawczymi były belki o przekroju prostokątnym i wymiarach: szerokość $b=0.20\text{m}$, wysokość $h=0.33\text{m}$ i długość całkowita $l_c=3.30\text{m}$. Na końcach belek wykonstruowano masywne wsporniki o wymiarach: szerokość 0.30m , wysokość 0.33m i wysięg 0.60m .

Umożliwiło to przykładanie momentu skręcającego o wielkości niezależnej od wartości sił skupionych wywołujących zginanie.

Belki serii I zbrojone były 6 prętami o średnicy Ø20 ze stali 34GS oraz strzemionami o średnicy Ø8 ze stali 18G2 i rozstawie osiowym 95mm. Wymiary belki serii I oraz ich zbrojenie przedstawiono na rys. 1.

Constant parameters were:

- Cross-sectional dimensions of beams: $b=0.20\text{ m}$, $h=0.33\text{m}$,
- span: $L=3.00\text{m}$,
- diameter and spacing of stirrups: Ø8 at 95mm over the entire length of beams.

Variables were:

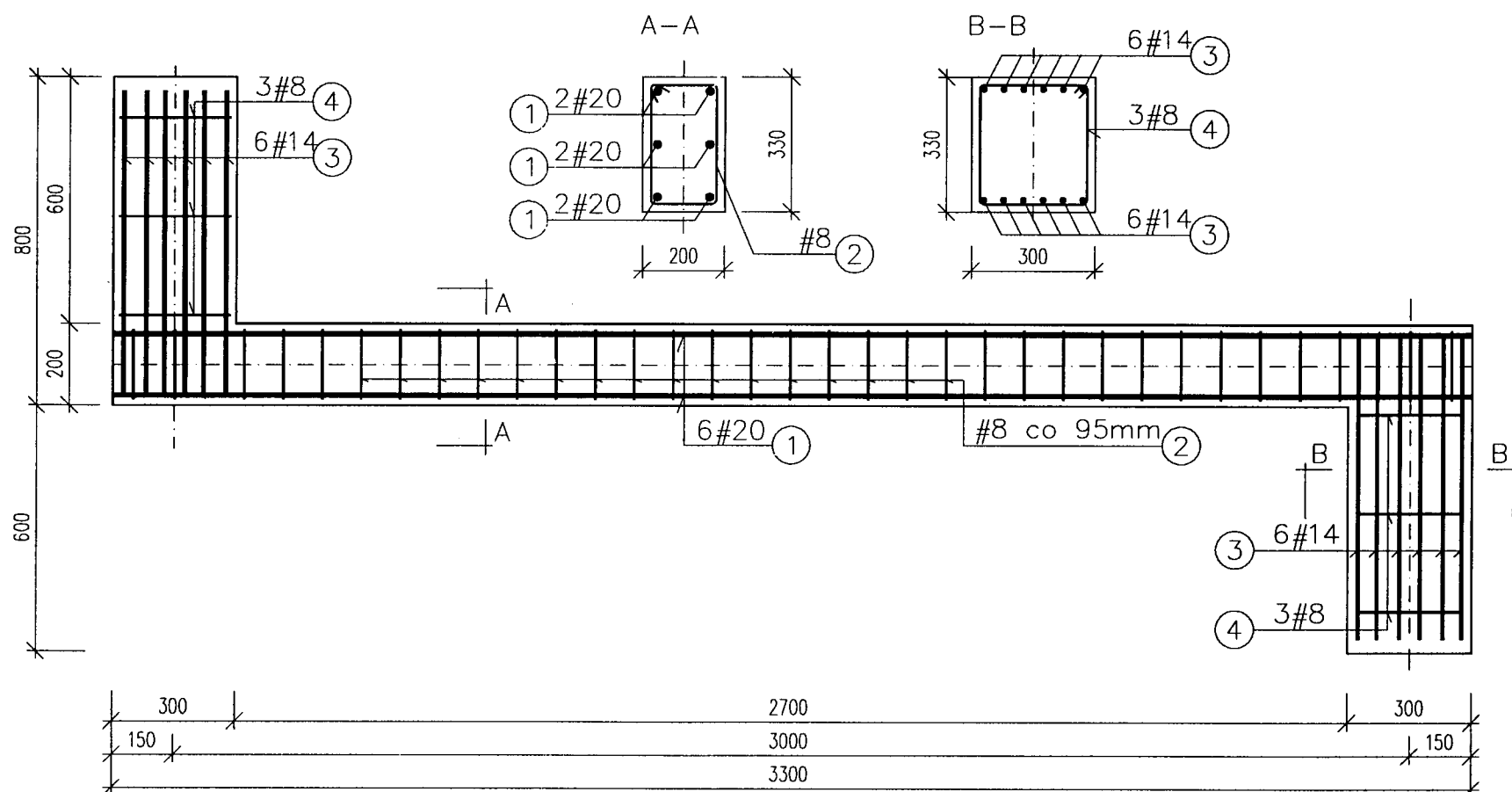
- concrete strength: design cylinder strength $f_c=25\text{MPa}$ and $f_c=70\text{MPa}$,
- type of loading.

2.2. Construction of models

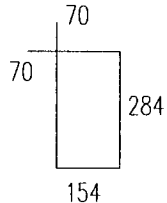
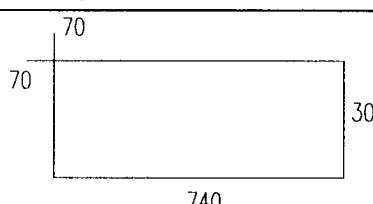
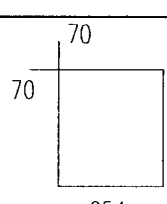
Test models were beams of rectangular cross-section and following dimensions: width $b=0.20\text{m}$, depth $h=0.33\text{m}$, total length $l_c=3.30\text{m}$. At beam ends massive cantilevers were constructed of: 0.30 m width, 0.33m depth and 0.60m reach.

This allowed to apply torsion moment of magnitude independent of the value of concentrated forces causing the bending moment.

Series I beams were reinforced by 6 Ø20mm bars of 34GS steel and Ø8mm stirrups of 18G2 steel at 95 mm spacing. Dimensions and reinforcement of series I beams are shown in Fig. 1.



Wykaz stali
Detailed list of steel

Nr pręta Bar number	Rodzaj stali Type of steel	Średnica Diameter	Liczba prętów Quantity	Kształt pręta Shape	Długość pręta, mm Length, mm
1	34GS	20	6	prosty straigh	3260
2	18G2	6	34		1016
3	18G2	14	12		2220
4	18G2	6	10		1216

Rys. 1. Konstrukcja belek – seria BT
Fig. 1. Construction of the beams - series I, BT

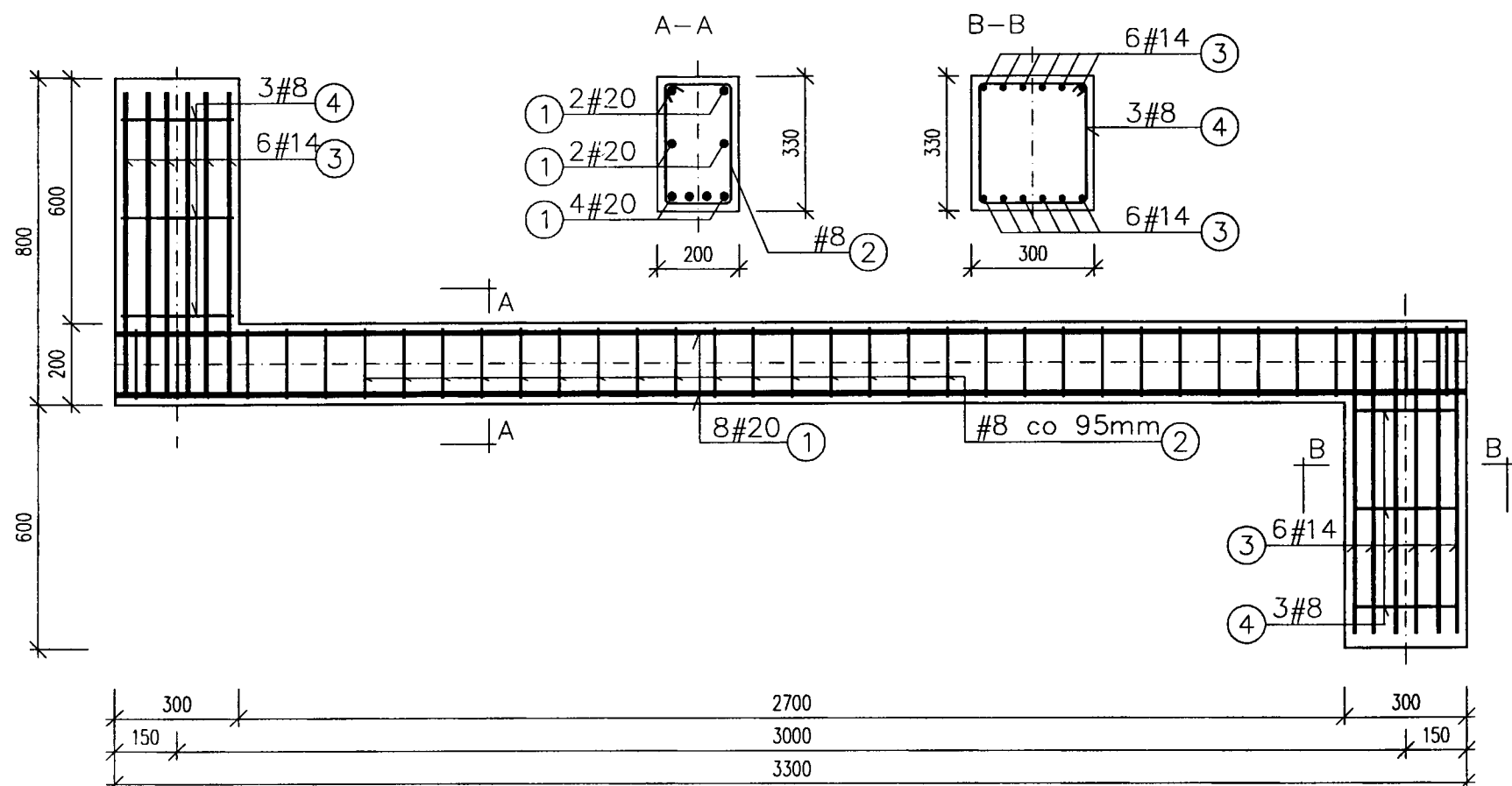
Belki serii II zbrojone były 8 prętami o średnicy $\varnothing 20$ ze stali 34GS oraz strzemionami o średnicy $\varnothing 8$ ze stali 18G2 i rozstawie osiowym 95mm.

Zbrojenie wsporników było identyczne dla wszystkich belek i składało się z usytuowanych pionowo 6 podłużnych pętli #14 oraz 3 strzemion $\varnothing 8$ co 250mm. Wymiary belek serii II oraz ich zbrojenie pokazano na rys. 2.

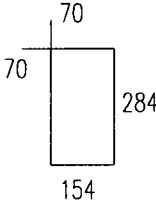
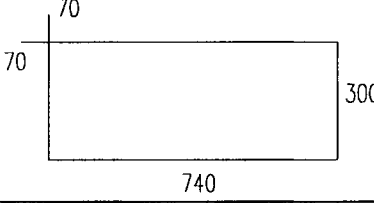
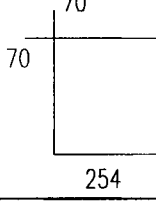
Series II beams were reinforced by 8 $\varnothing 20$ mm bars of 34GS steel and $\varnothing 8$ mm stirrups of 18G2 steel at 95 mm spacing.

Reinforcement of cantilevers was identical in all beams and consisted of 6 #14 longitudinal loops situated vertically and 3 $\varnothing 8$ stirrups at 250mm centres.

Dimensions and reinforcement of series II beams are shown in Fig. 2.



Wykaz stali
Detailed list of steel

Nr pręta Bar number	Rodzaj stali Type of steel	Średnica Diameter	Liczba prętów Quantity	Kształt pręta Shape	Długość pręta, mm Length, mm
1	34GS	20	8	prosty straigh	3260
2	18G2	8	34		1016
3	18G2	14	12		2220
4	18G2	6	10		1216

Rys. 2. Konstrukcja belek – seria BTM
Fig. 2. Construction of the beams - series II, BTM

2.3. Materiały

2.3.1. Beton

Zaprojektowano dwa rodzaje mieszanek betonowych: jedną dla betonu zwykłego o projektowanej wytrzymałości walcowej 25MPa, drugą dla BWW o projektowanej wytrzymałości walcowej 70MPa. Do pierwszej zastosowano kruszywo w postaci żwiru sortowanego i piasku kopalnianego oraz cement portlandzki CEM I 32.5.

2.3. Materials

2.3.1. Concrete

Two types of concrete mix were designed : one for ordinary concrete of design cylinder strength of 25MPa, and the other for HSC of the design cylinder strength 70 MPa. In the former, sorted, rinsed gravel pit sand and Portland cement CEM I 32.5 were used.

W przypadku BWW jako kruszywo zastosowano grys granitowy oraz piasek kopalniany i cement portlandzki CEM I 52.5. Receptury betonu zwykłego oraz BWW przedstawiono w tablicy 2.

In case of HSC, granite chips were used as aggregate, pit sand and Portland cement CEM I 52.5. Proportions for ordinary and HSC concrete are shown in Table 2.

Tablica 2. Receptury betonu zwykłego i BWW
Table 2. Concrete mix proportions for ordinary concrete and HSC

Składniki Materials	Belki BT-25 [kg/m ³] beams from NSC	Belki BT-70 [kg/m ³] Beams from HSC
Cement portlandzki CEM I 32.5 bez dodatków Portland cement CEM I 32.5 without additions	310	550
Pył krzemionkowy z huty „Łaziska” Silica fume from the mill „Łaziska”	-	55
Piasek z kopalni „Rydwan” Sand from the mine „Rydwan”	540	524
Żwir płukany z kopalni „Rydwan” Rinsed gravel from the mine „Rydwan”	1280	-
Grys granitowy 4/8mm Granite chips 4/8mm	-	1214
Upłynn timer SKP-26 Superplasticizer SKP-26	-	35
Woda Water	210	170*
w/c, w/(c+p _k)	0.68	0.28
*) całkowita zawartość wody w 1m ³ mieszanki betonowej liczona z uwzględnieniem wody zawartej w upłynn timerze oraz w kruszywie the total contents of the water in 1m ³ of the concrete mix is counted together with the water in the plasticizer and in the gravel		

Cechy wytrzymałościowe betonu określano w dniu badania belek na próbkach walcowych o średnicy 150mm i wysokości 300mm oraz kostkowych o boku 150mm. Badania modułu sprężystości oraz zależności σ - ϵ przeprowadzono według metody ASTM Standards na próbkach walcowych 150/300mm. Wyniki badań cech wytrzymałościowych betonu przedstawiono w tablicy 3 oraz na rys. 3 i rys. 4.

Strength properties of concrete were measured on cylindrical samples of 150 mm diameter and 300 mm high and on cubic samples of 150 mm sides on the day of beam testing . Modulus of elasticity and σ - ϵ tests were carried out according to ASTM Standards method on cylindrical 50/300mm samples. Results of strength properties tests on concrete are presented in Table 3 and in Figs 3 and 4.

Tablica 3. Wyttrzymałościowe cechy betonu
Strength properties of concrete

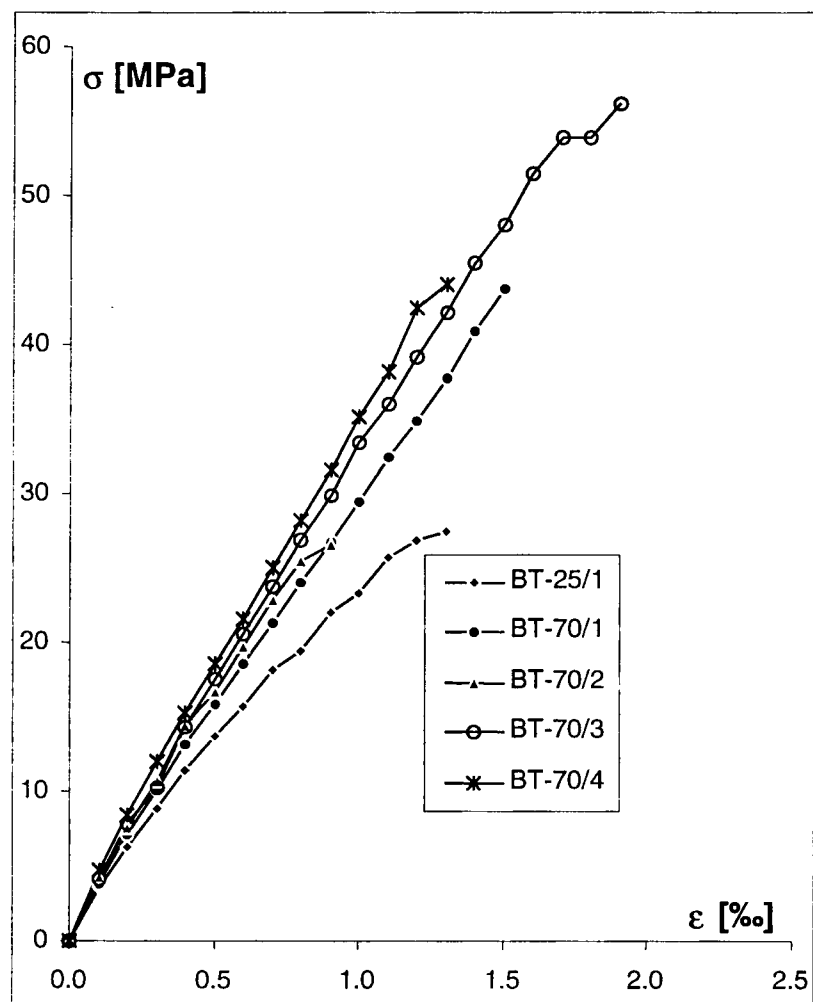
Model Specimen	Wiek betonu Age of concrete	f _{c,cube} [MPa]		f _c [MPa]		f _{ct,sp} [MPa]		E _c [GPa]**		$\frac{f_c}{f_{c,cube}}$
		wyniki results	średnia mean	wyniki results	średnia mean	wyniki results	średnia mean	wyniki results	średnia mean	
BT-25/1	50	31.2, 33.7 29.5, 35.4	32.5	30.1, 21.6, 15.4 19.4, 33.2, 24.3 29.9, 23.9	24.7	3.35, 2.59 3.69, 2.76	3.10	30.7, 26.4, 30.0 24.3	28.4	0.76
BT-70/1	74	74.2, 82.7 89.9	81.9	76.8, 70.8, 65.4 72.2, 71.3, 68.8	69.2	5.63, 4.30 5.38, 5.60 4.33, 5.07	5.05	28.3, 28.6, 29.2 32.9, 31.1, 29.2 31.1	29.1	0.84
BT-70/2	56	68.4, 68.0 86.0	74.1	70.7, 65.4, 70.2 71.6, 81.2, 72.7	71.2	4.53, 5.06 3.99, 3.93 4.27, 5.55	4.55	32.3, 33.1, 30.9	32.1	0.96
BT-70/3	28	75.6, 83.6 82.2	80.5	59.5, 58.0, 68.2 62.3, 59.5, 53.8 59.5, 61.2, 58.3	60.0	3.68, 4.02 4.30, 5.38 4.75, 4.98	4.52	32.3, 33.7, 34.8 32.4, 35.4, 36.4 33.8, 33.2, 31.0	33.7	0.75
BT-70/4	61	86.7, 88.9* 88.9*	88.2	75.9, 67.9, 63.9 65.8, 73.0, 68.3 61.4	68.0	4.40, 5.63 4.46, 5.63 5.80, 5.26	5.20	36.5, 36.9, 34.7 33.6, 33.8, 34.2 34.1	34.8	0.77
BTM-35/1	61	41.5, 39.1 49.8	43.5	36.8, 32.5, 33.4 39.6, 41.0, 34.4 30.0, 32.2, 36.5	35.1	3.74, 3.11 3.85, 2.12 3.51, 3.11	3.24	29.2, 28.2, 30.0 32.0, 28.0, 29.3 28.5, 29.0, 27.0	29.0	0.81
BTM-70/1	50	88.9*, 88.9* 88.9*	88.9*	70.0, 72.4, 68.9 65.0, 68.8, 66.0 67.8, 69.0	68.5	5.18, 5.35 4.70, 5.27 4.87, 4.56	5.00	31.6, 29.5, 32.0	31.0	0.77
BTM-70/2	56	88.3, 88.9* 88.9*	88.7	67.9, 67.1, 70.2 66.2, 69.0, 60.2	68.2	4.64, 4.47 5.01, 4.30 4.67, 4.76	4.64	29.9, 28.9, 37.1 27.7, 29.6, 28.9	31.4	0.77
BTM-70/3	55	88.9*, 88.9* 88.9*	88.9*	71.9, 70.8, 73.6 71.3, 74.7, 70.8 71.3, 71.7	71.9	5.09, 4.59 3.99, 4.84 4.25, 4.13	4.48	33.5, 32.9, 33.2 31.3, 35.5, 29.1 30.5, 31.6	32.2	0.81
BTM-70/4	93	88.9*, 88.9* 88.9*	88.9*	78.7, 70.9, 79.3 71.3, 74.7, 77.3 70.8, 69.7, 74.2	74.1	5.09, 4.24 5.09, 4.78 4.92, 4.64	4.79	28.7, 31.8, 30.1 28.8, 28.3, 30.5 32.2	31.2	0.83

*) próbka nie została zniszczona, ponieważ osiągnięto maksymalny zakres możliwości prasy, P=200kN

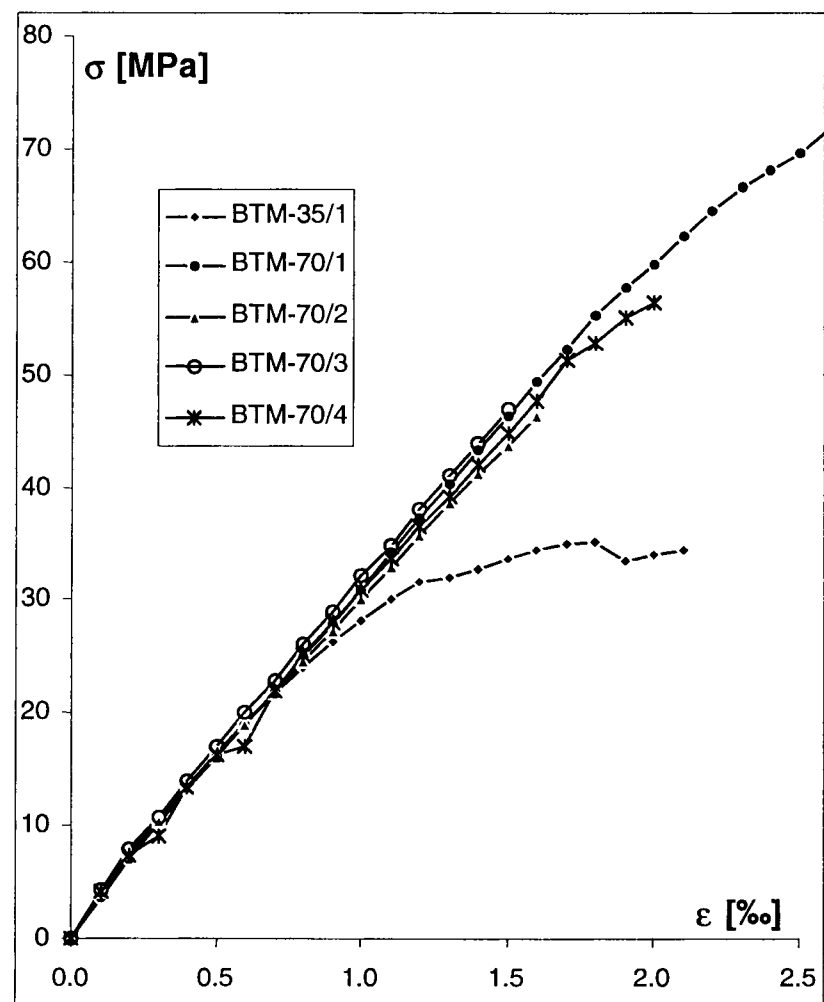
specimen did not fail because maximum press capacity (P=200kN) has been reached

**) moduł sprężystości E_c określony w przedziale (0.1 do 0.4)f_c

modulus of elasticity E_c defined within the interval (0.1 to 0.4)f_c



Rys. 3. Zależność σ - ϵ betonu belek serii I (BT)
Fig. 3. σ - ϵ relation for concrete in series I beams (BT)



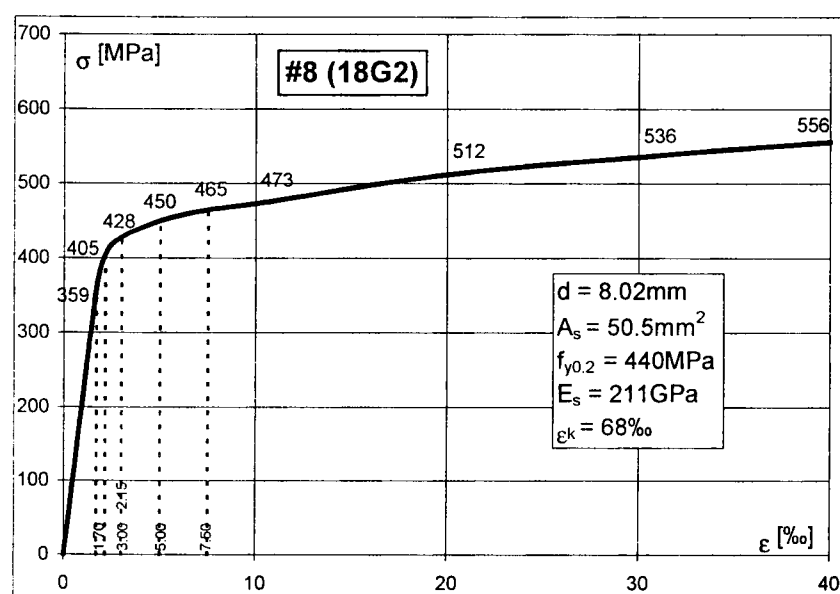
Rys. 4. Zależność σ - ϵ betonu belek serii II (BTM)
Fig. 4. σ - ϵ relation for concrete in series II beams (BTM)

2.3.2. Stal zbrojeniowa

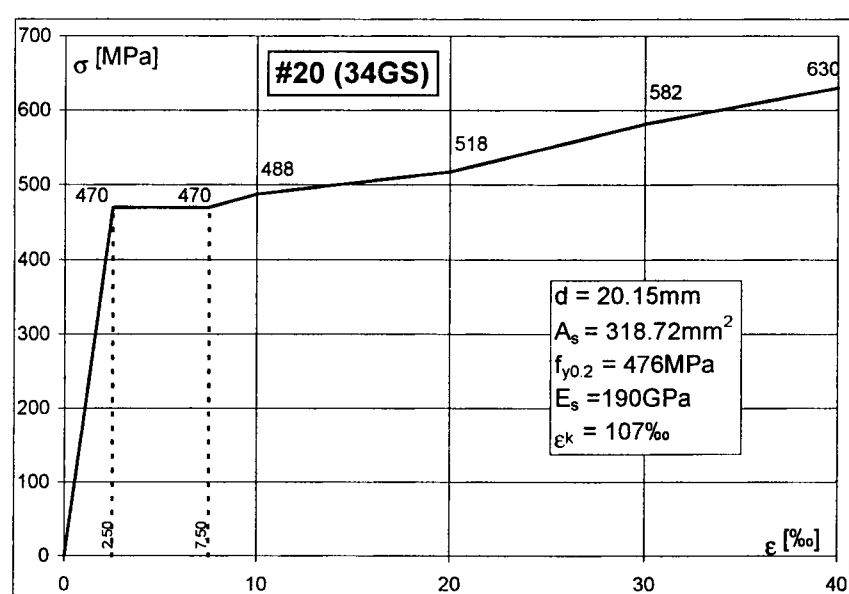
Wszystkie zbadane belki zbrojone były prętami podłużnymi o średnicy nominalnej $\varnothing 20$ ze stali żebrowanej 34GS oraz strzemionami ze stali żebrowanej 18G2 i średnicy $\varnothing 8$. Badania stali zbrojeniowej przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej ZD20 wyposażonej w rejestrator wydłużeń o bazie pomiarowej 50mm i powiększeniu 200:1, który umożliwiał pomiar odkształceń w zakresie do 40‰. Wyniki badań przedstawiono na rys. 5 i 6.

2.3.2. Reinforcing steel

All beams tested were reinforced by longitudinal bars of ribbed steel 34GS, $\varnothing 20$ nominal diameter and stirrups of ribbed steel 18G2, $\varnothing 8$ diameter. Tests on reinforcing steel were carried out in ZD20 strength-testing machine fitted with extension register of 50mm measuring base and 200:1 magnification. This enabled strain measurements to be made within the range of 400. Test results are presented in Figs 5 and 6.



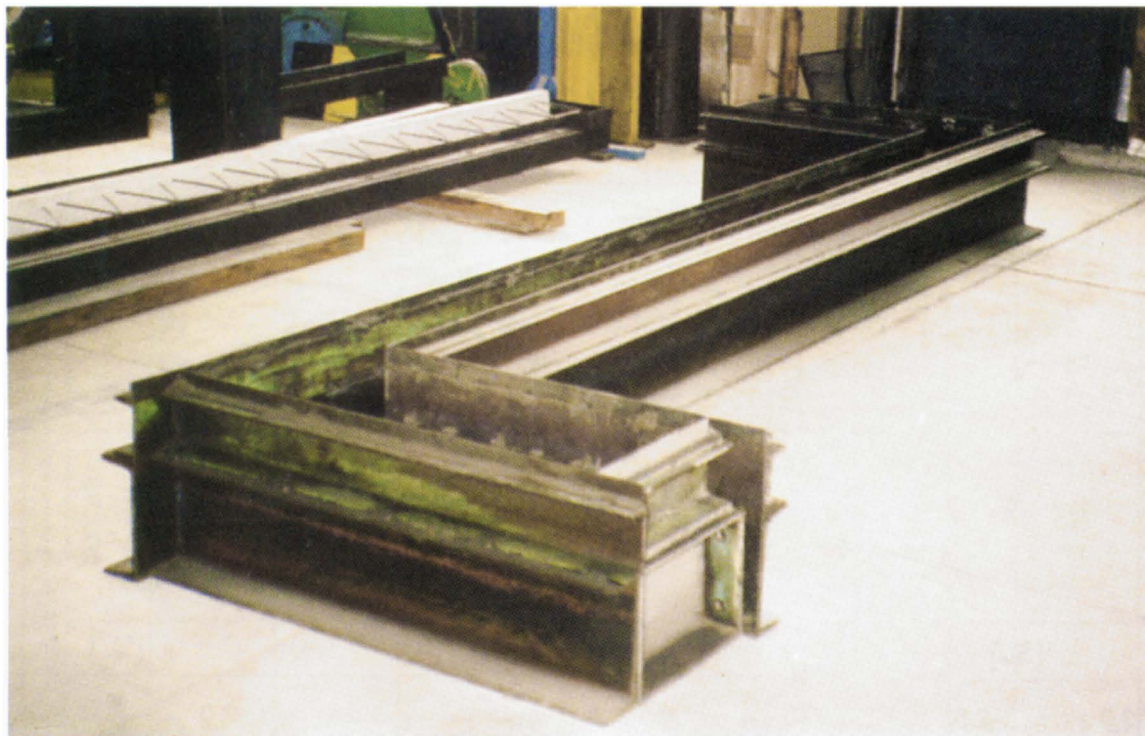
Rys. 5. Wykres zależności σ - ϵ dla prętów #8 (18G2)
Fig. 5. σ - ϵ graph for #8 bars (18G2 steel)



Rys. 6. Wykres zależności σ - ϵ dla prętów #20 (34GS)
Fig. 6. σ - ϵ graph for #20 bars (18G2 steel)

2.4. Wykonanie modeli

Belki betonowane były w specjalnie wykonanej formie stalowej (rys. 7), po uprzednim zamontowaniu zbrojenia. Ze względu na objętość betoniarki wykonywano po trzy zaroby, pobierając z każdego zarobu po 3 próbki walcowe oraz kostkowe.

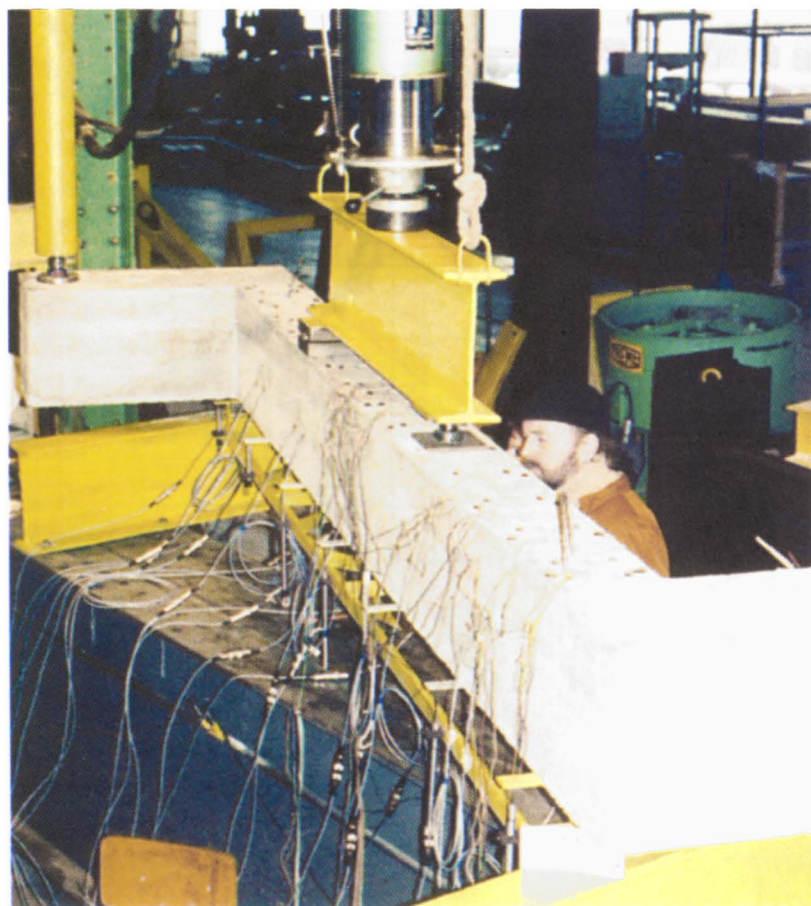


Rys. 7. Widok formy stalowej
Fig. 7. View of the steel form

Beton zagęszczano wibratorem wglębnym firmy TREMIX, typ OM2.0 (buława ES50) z częstotliwością 200Hz. Zarówno belki, jak i próbki były rozformowywane po około 24 godzinach, a następnie przez 28 dni były pielęgnowane przez polewanie wodą.

2.5. Stanowisko badawcze

Belki badane były w specjalnie skonstruowanym uniwersalnym stanowisku, które umożliwiała zarówno realizację czystego skręcania (seria BT), jak i skręcania ze zginaniem (seria BTM). Widok stanowiska badawczego pokazano na rys. 8.



2.3. Casting of specimens

Beams were cast in steel forms (Fig. 7) after reinforcement has been placed. In view of concrete mixer capacity, three batches were needed, of which three cylinder and cube samples were taken.

Concrete was compacted using TREMIX OM2.0 (with ES50 head) immersion vibrators of 200Hz frequency. The forms of both the beams and samples were struck after abt. 24 hrs; subsequently, they were cured by sprinkling with water.

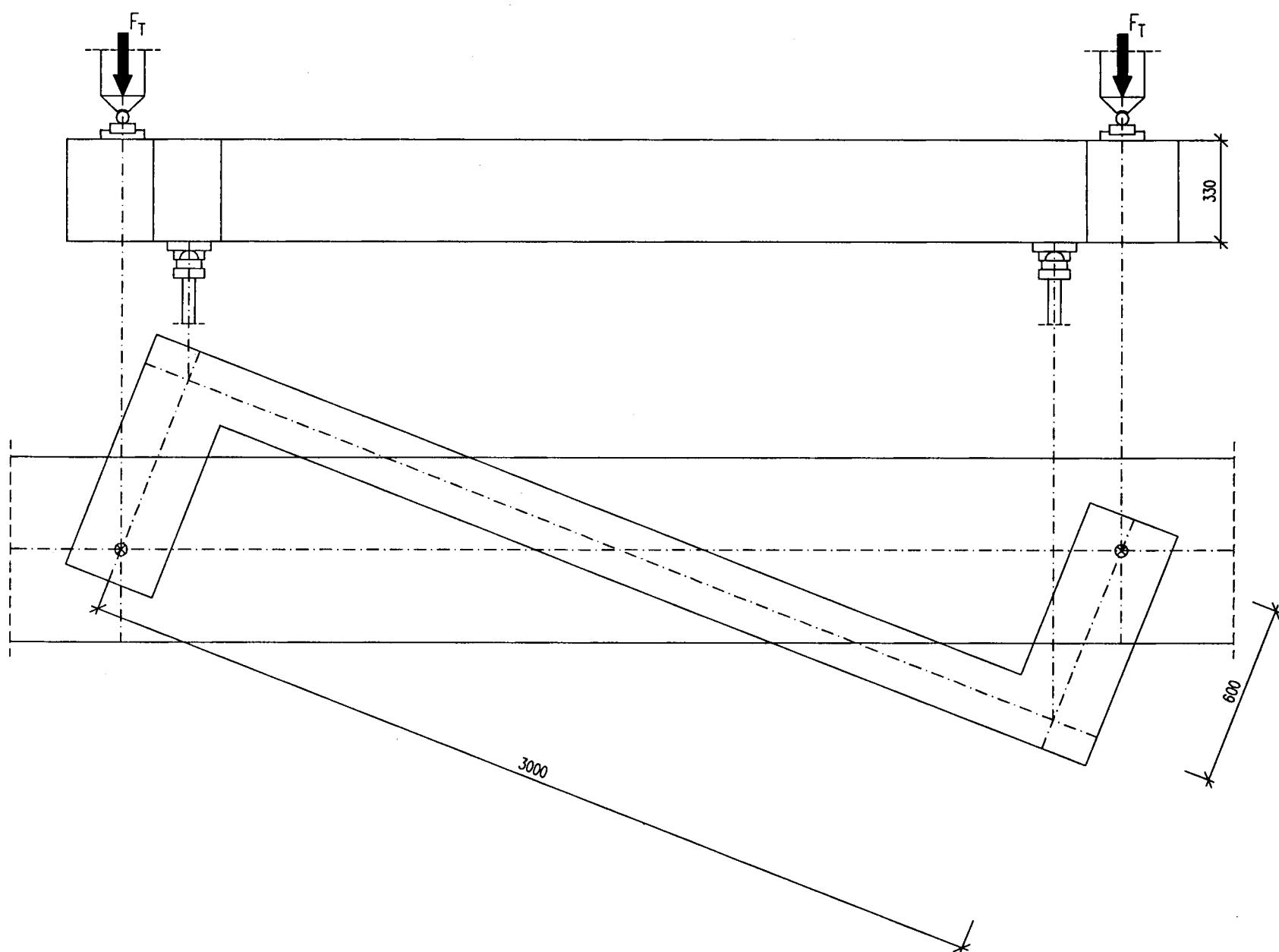
2.4. Test stand

The beams were tested in a specially constructed universal stand, which made possible to carry out both pure torsion (series BT) as well as torsion with bending (BTM series) tests. The view of the test stand is shown in Fig. 8.

Rys. 8. Widok stanowiska badawczego
Fig. 8. View of the test stand

Czyste skręcanie realizowane było poprzez przyłożenie siły skupionej (siłownik hydrauliczny o nośności 100kN) przyłożonej na ramieniu równym 0.60m do wspornika umiejscowionego na końcu belki. Siłownik hydrauliczny oddziaływał na żelbetowy wspornik siłą czynną, która poprzez podparcie drugiego wspornika oddziaływała nań siłą bierną, której wartość mierzono za pomocą siłomierza tensometrycznego. Sposób obciążania belek serii BT pokazano na rys. 9.

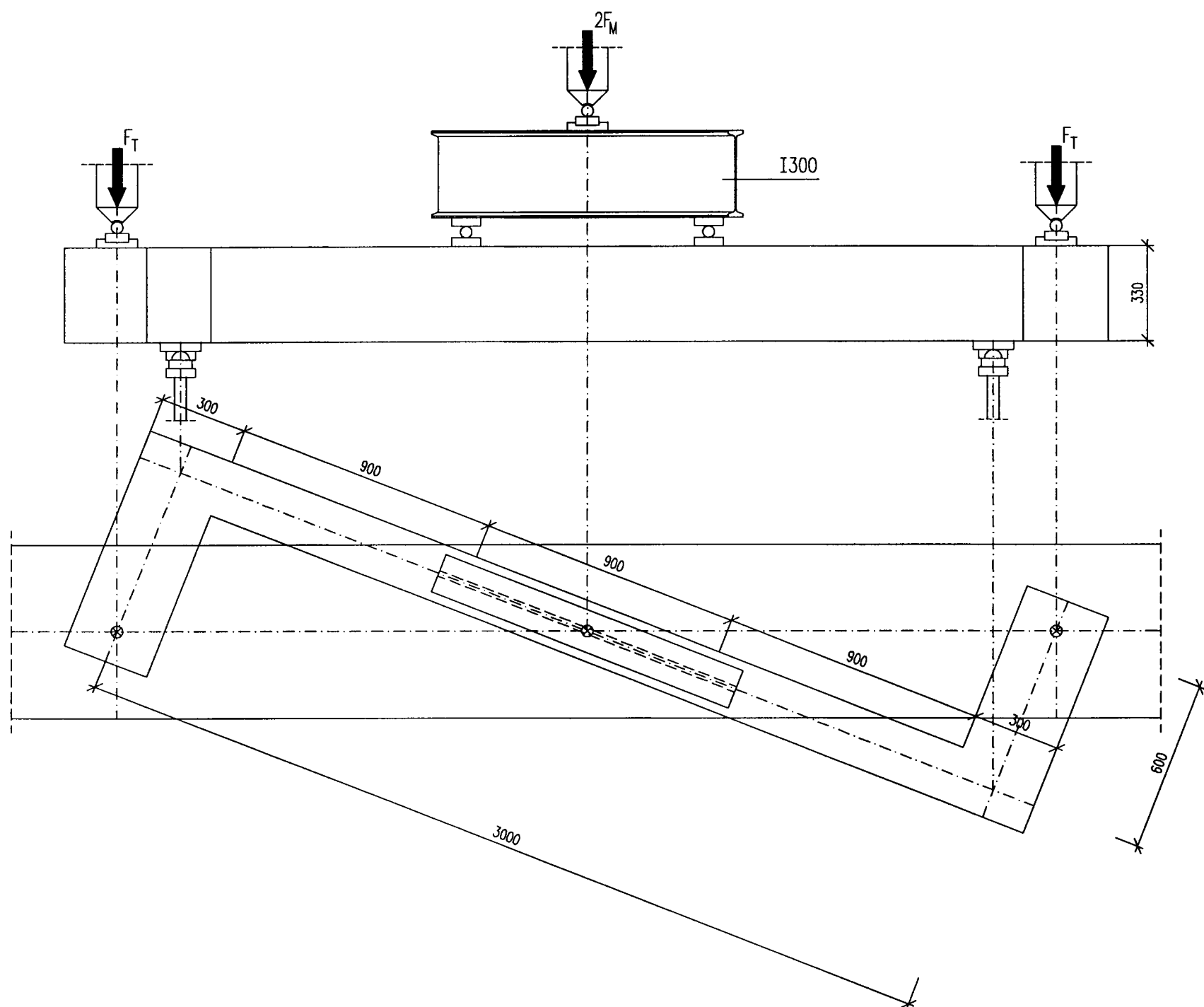
Pure torsion was realised by application of point force (hydraulic press of 100kN capacity) at an arm of 0.60m to the cantilever placed at beam end. Hydraulic press was acting on the RC cantilever as an active force; it acted as a passive force on the other cantilever by blocking its movement. Its magnitude was measured by means of a tensometric dynamometer. The way of loading series BT beams is shown in Fig. 9.



Rys. 9. Sposób obciążania belek poddanych czystemu skręcaniu (seria BT)
Fig. 9. The way of loading beams subjected to pure torsion (series BT)

W przypadku skręcania ze zginaniem (seria BTM) dodatkowy siłownik hydrauliczny o nośności 400kN wywoływał za pomocą belki stalowej (dwuteownik 300) dwie jednakowe siły skupione powodujące zginanie badanej belki żelbetowej. Wzajemna relacja pomiędzy siłami skupionymi F_T wywołującymi moment skręcający T a siłami skupionymi F_M wywołującymi moment zginający M mogła być dowolnie zadawana. W przypadku naszych badań stosunek $F_T:2F_M$ był równy $2/3$. Sposób obciążania belek serii BTM pokazano na rys. 10.

In case of torsion with bending (series BTM) an additional hydraulic jack of 400kN capacity applied two equal concentrated forces via a steel beam (300 I section), causing the bending of the tested RC beam. Mutual relation between concentrated forces F_T causing the torsion moment T , and concentrated forces F_M causing the bending moment M could be set arbitrarily. In case of the present tests, the relation $F_T : 2F_M$ was equal $2/3$. The way of loading of series BTM beams is shown in Fig. 10.



Rys. 10. Sposób obciążania belek poddanych skręcaniu ze zginaniem (seria BTM)
Fig. 10. The way of loading beams subjected to torsion with bending (series BTM)

2.6. Badania i pomiary

2.6.1. Seria I (belki BT)

W przypadku belek poddanych czystemu skręcaniu obciążenie narastało skokowo co 5kN do poziomu około 70% obciążenia niszczącego $F_T \approx 0.7F_{Tu}$. Następował teraz pięciokrotny cykl odciążania do poziomu $F_T = 5\text{kN}$ i ponownego obciążania do poziomu $F_T \approx 0.7F_{Tu}$. Gdy po raz szósty obciążenie osiągnęło wartość $F_T \approx 0.7F_{Tu}$, powiększane było dalej skokowo co 5kN do poziomu $F_T \approx 0.8F_{Tu}$, a następnie co 1kN aż do zniszczenia.

Każdy poziom obciążenia utrzymywany był przez czas niezbędny do wykonania następujących pomiarów:

- 1) odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belek w kierunku podłużnym (rys. 11),
- 2) odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belek w kierunku poprzecznym (rys. 12),
- 3) odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belki w kierunkach głównych (rys. 13, 14, 15),
- 4) odkształcenia betonu na górnej powierzchni belki w kierunku podłużnym (rys. 16),

2.6. Tests and measurements

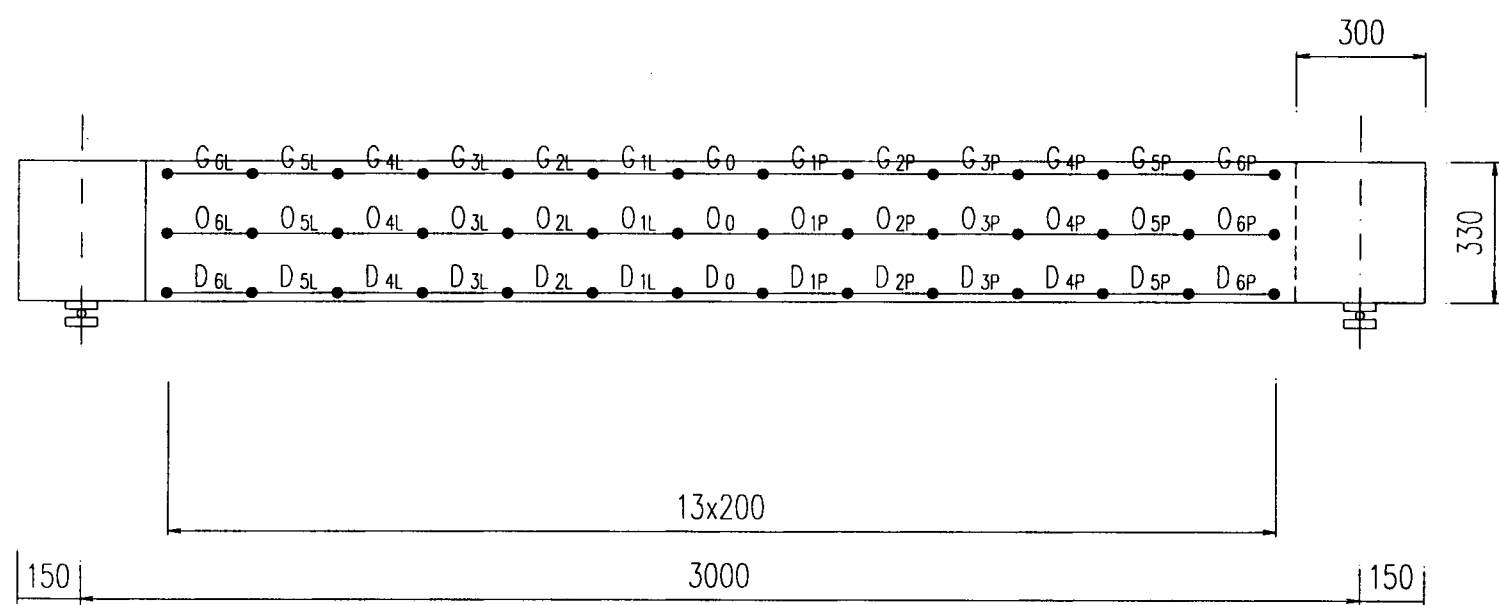
2.6.1. Series I (BT beams)

In the case of beams subjected to pure torsion the load was increased by 5kN steps to about the level of 70% of the load at failure $F_T \approx 0.7F_{Tu}$. A fivefold load reduction cycle followed, down to the level of $F_T = 5\text{kN}$ another cycle of loading up to the level $F_T \approx 0.7F_{Tu}$. When the load reached the value $F_T \approx 0.7F_{Tu}$ for the sixth time, it was increased further by 5kN steps to $F_T \approx 0.8F_{Tu}$ and subsequently by 1kN till failure.

Every load level was maintained for the period of time necessary to carry out the following measurements:

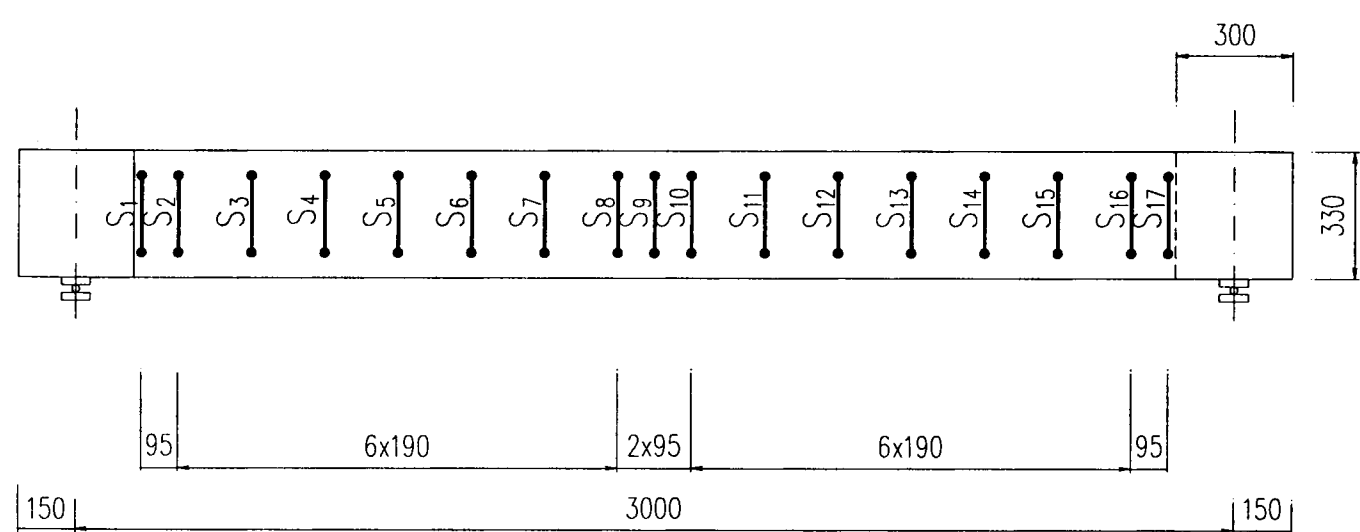
- 1) concrete strains on the side faces of beams - in longitudinal direction (Fig. 11),
- 2) concrete strains on the side faces of beams - in transverse direction (Fig. 12),
- 3) concrete strains on the side faces of beam in principal stress directions (Figs 13, 14, 15),
- 4) concrete strains on the upper surface of the beam - in longitudinal direction (Fig. 16),

- 5) odkształcenia betonu na górnej powierzchni belki w kierunku poprzecznym (rys. 17),
6) kątów skręcenia (rys. 18).
- 5) concrete strains on the upper surface of the beam - in transverse direction (Fig. 17),
6) angles of rotation (Fig. 18).



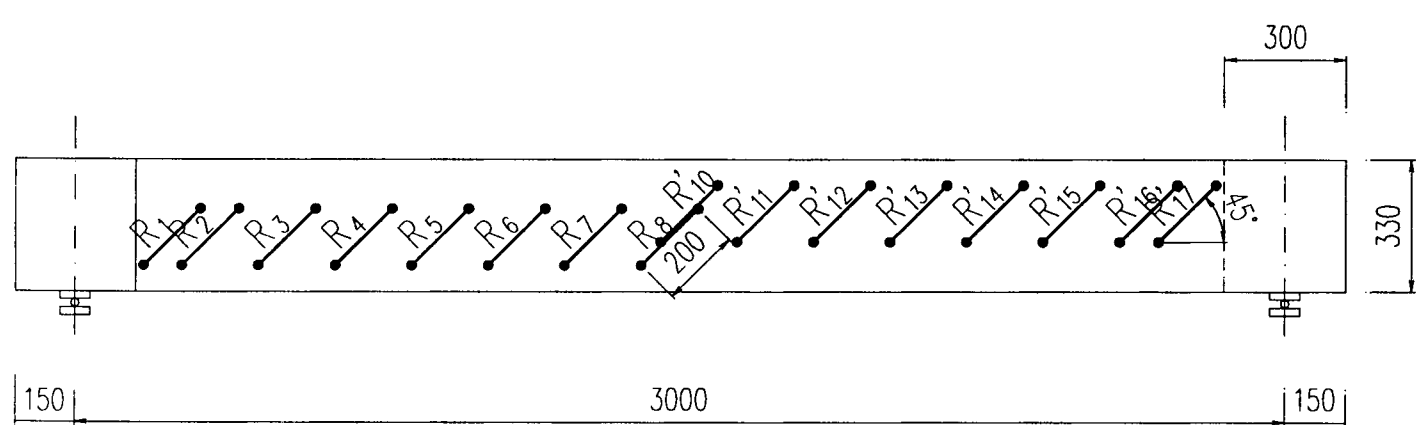
Rys. 11. Rozmieszczenie punktów do pomiaru odkształceń betonu na bocznej powierzchni belki w kierunku podłużnym – pomiar miernikiem nasadowym

Fig. 11. Layout of concrete strain measuring points on the side surface of beam in longitudinal direction - measurement using meter



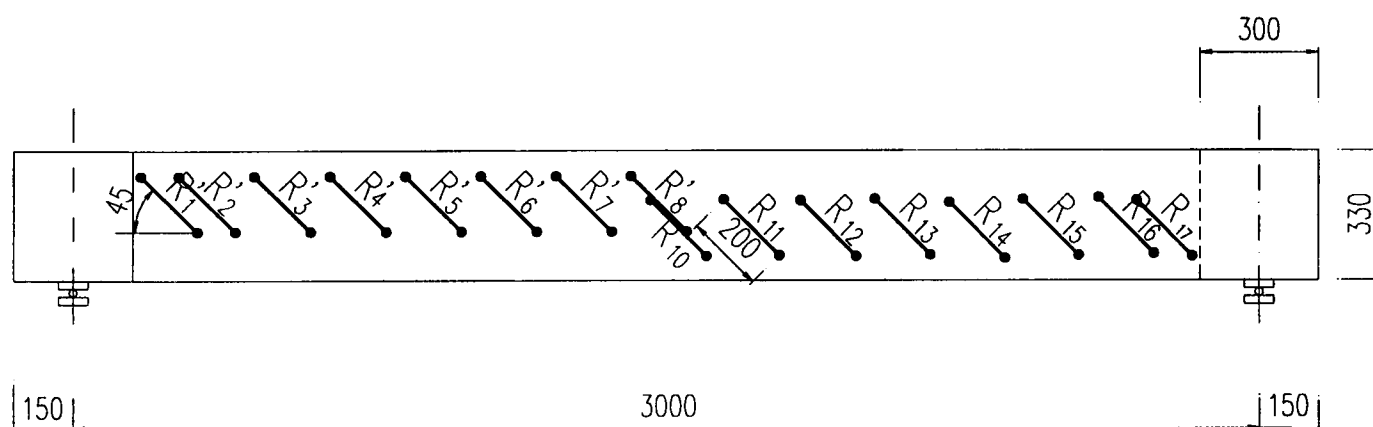
Rys. 12. Rozmieszczenie punktów do pomiaru odkształceń na bocznej powierzchni belki w kierunku poprzecznym - pomiar miernikiem nasadowym

Fig. 12. Layout of concrete strain measuring points on the side surface of beam in transverse direction - measurement using meter



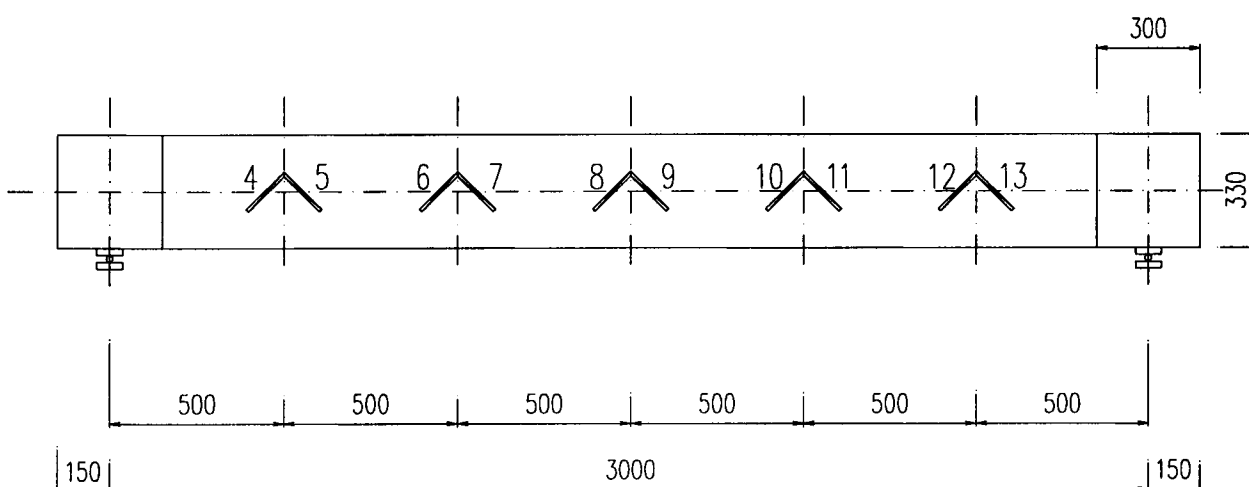
Rys. 13. Rozmieszczenie punktów do pomiaru odkształceń betonu na bocznej powierzchni bocznej belki w kierunku ukośnym (rozciąganie) – pomiar miernikiem nasadowym

Fig. 13. Layout of concrete strain measuring points on the side surface of beam in skew direction (tension) - measurement using meter



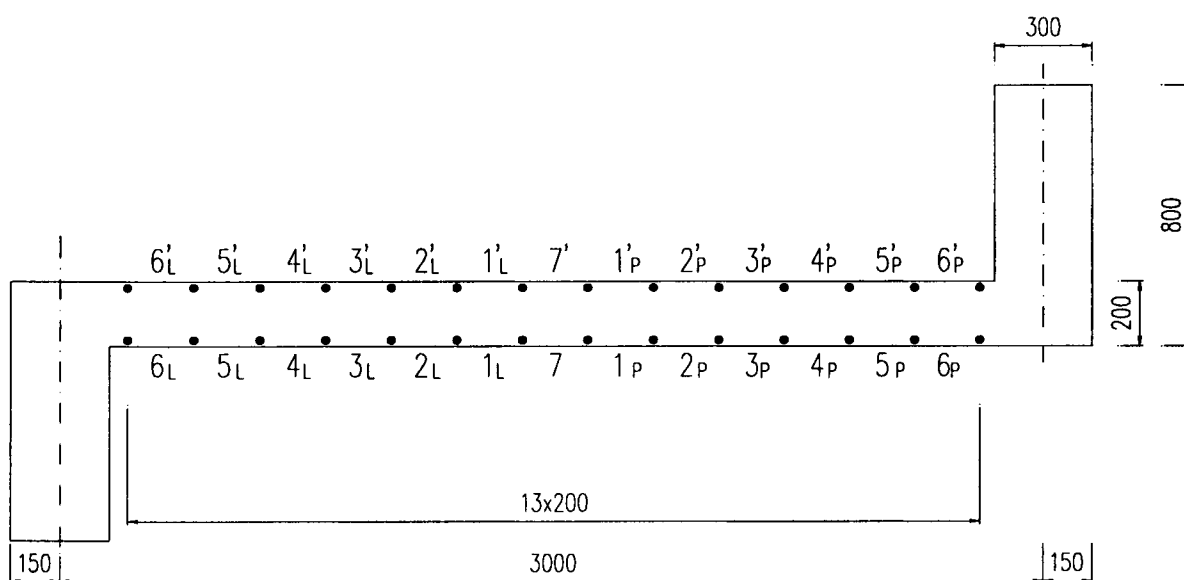
Rys. 14. Rozmieszczenie punktów do pomiaru odkształceń betonu na bocznej powierzchni belki w kierunku ukośnym (ściskanie) – pomiar miernikiem nasadowym

Fig. 14. Layout of concrete strain measuring points on the side surface of beam in skew direction (compression) - measurement using meter



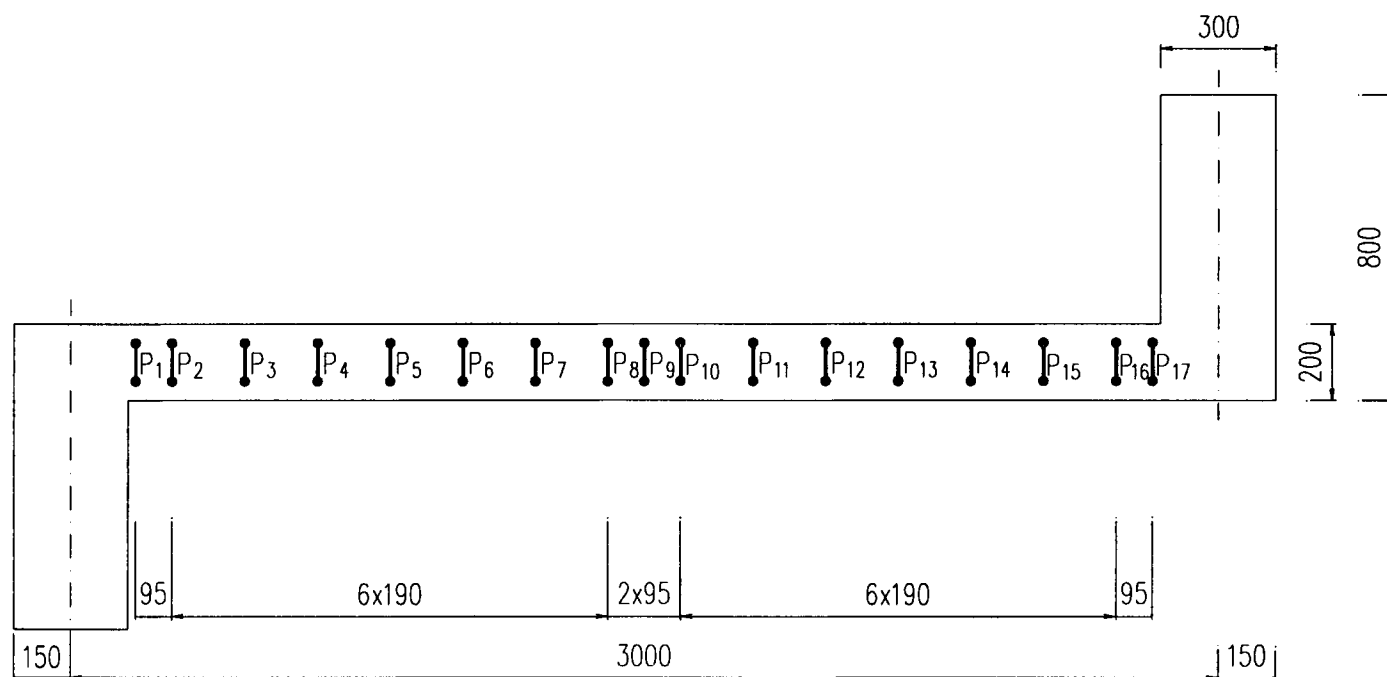
Rys. 15. Rozmieszczenie baz do pomiaru odkształceń betonu na bocznej powierzchni belki w kierunkach ukośnych – pomiar tensometrami elektrooporowymi

Fig. 15. Layout of concrete strain measuring bases on the side surface of beam in skew directions - measurement using electric resistance strain gauges



Rys. 16. Rozmieszczenie baz do pomiaru odkształceń betonu na górnej powierzchni belki w kierunku podłużnym w osiach prętów zbrojenia – pomiar miernikiem nasadowym

Fig. 16. Layout of concrete strain measuring bases on the upper surface of beam in longitudinal direction at the axes of reinforcing bars - measurement using meter



Rys. 17. Rozmieszczenie baz do pomiaru odkształceń betonu na górnej powierzchni belki w kierunku poprzecznym w osiach strzemion – pomiar miernikiem nasadowym

Fig. 17. Layout of concrete strain measuring bases on the upper surface of beam in transverse direction at the axes of stirrups - measurement using meter

Odkształcenia betonu na powierzchniach bocznych i powierzchni górnej mierzono za pomocą mechanicznych ekstensometrów nasadowych o bazie 100mm i 200mm, a także dodatkowo za pomocą tensometrów elektrooporowych o długości 50mm (wyników pomiarów tensometrami elektrooporowymi nie zamieszczono w Załączniku). Kąty skręcenia belek mierzono za pomocą czujników indukcyjnych, które były podłączone do automatycznego urządzenia pomiarowego współpracującego z komputerem IBM PC.

Ponadto rejestrowano rysy powstające na powierzchni bocznej oraz górnej belek; mierzono również szerokość rozwarcia rys za pomocą lupy o powiększeniu 25:1 z dokładnością około $\pm 0.02\text{mm}$.

2.6.2. Seria II (belki BTM)

W przypadku belek poddanych jednoczesnemu skręcaniu i zginaniu obciążenie narastało skokowo co 5kN w przypadku siły F_T wywołującej skręcanie oraz co 15kN w przypadku siły $2F_M$ obciążającej trawers wywołujący zginanie belek (porównaj rys. 10). Po osiągnięciu poziomu około 75% obciążenia niszczącego następował pięciokrotny cykl odciązania do pierwszego poziomu obciążenia ($F_T=5\text{kN}$ i $2F_M=15\text{kN}$) oraz obciążania. Po szóstym powrocie do poziomu około 0.75 obciążenia niszczącego, obciążenie narastało dalej skokowo co 1kN (F_T) i 3kN ($2F_M$), aż do zniszczenia belek.

Na każdym poziomie obciążenia dokonywano pomiarów opisanych w pkt. 2.6.1, przy czym w przypadku belek serii II za pomocą mierników indukcyjnych rejestrowano nie tylko kąty skręcenia lecz również ugięcie belek (rys. 18).

Dodatkowo były mierzone – za pomocą tensometrów elektrooporowych o długości 20mm – odkształcenia zbrojenia podłużnego oraz strzemion. Rozmieszczenie tensometrów pokazano na rys. 19. Wyników tych pomiarów nie zamieszczono w Załączniku.

Concrete strains on side and upper surfaces were measured using mechanical extensometers of 100mm and 200mm bases and - additionally - by means of electric resistance strain gauges of 50mm length (measurement results of electric resistance strain gauges are not included in the Appendix). Angles of beam rotation were measured using induction meters attached to the automatic measuring device connected to an IBM PC computer.

Apart from this, cracks forming on side and upper beam surfaces were recorded; crack width was also measured using 25:1 magnifying glass of with $\pm 0.02\text{mm}$ accuracy.

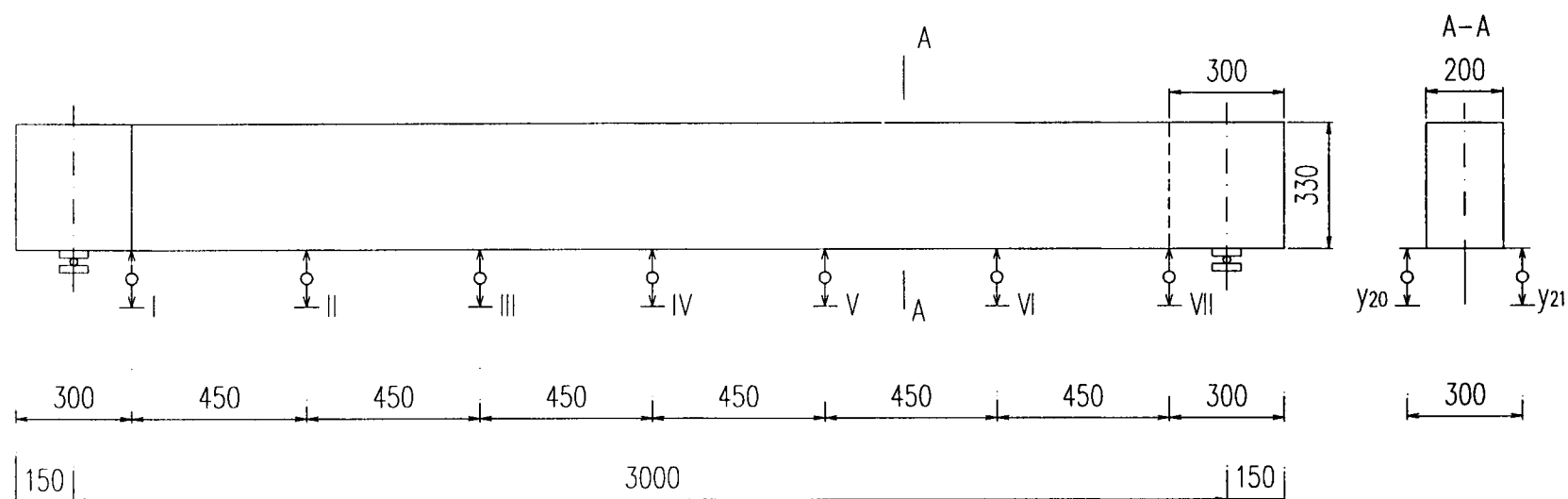
2.6.2. Series II (BTM beams)

For beams subjected to simultaneous torsion and bending, loading was increased by 5kN steps in case of torsion force F_T and by 15kN steps in case of force $2F_M$ applied to I-section traverse causing bending in the beam (cf. Fig. 10). After having reached the level of abt 75% of the load at failure, a fivefold cycle of load reduction to the initial load level ($F_T=5\text{kN}$ and $2F_M=15\text{kN}$) and re-loading

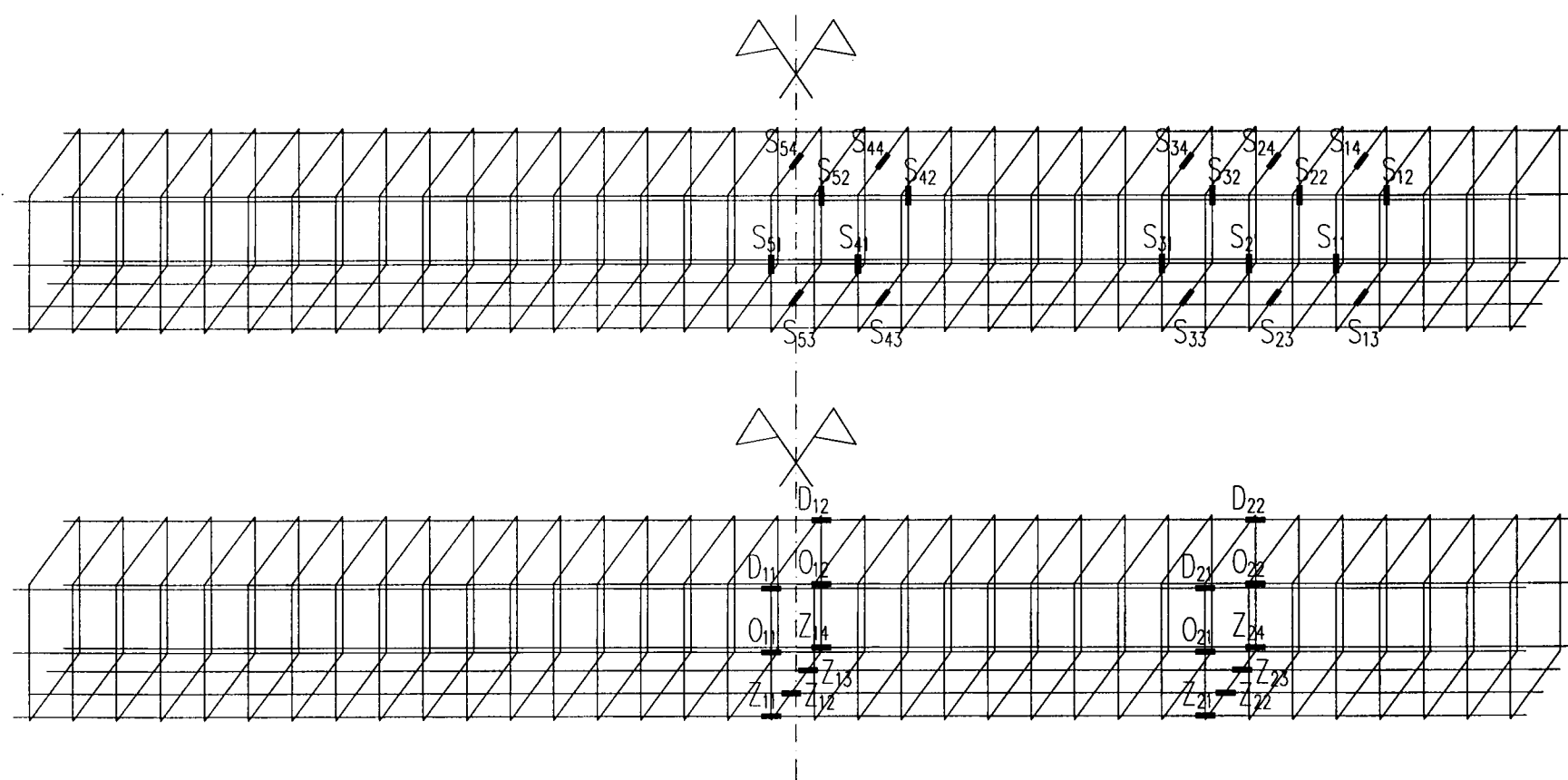
followed. After the sixth return to the level of abt 0.75 of the load at failure, loading was further increased by 1kN steps (in case of F_T) and by 3kN (in case of $2F_M$) till failure.

At every load level measurements were taken, described in sect. 2.6.1. with the difference, that in the case of series II beams induction meters were used not only for measuring rotation angles, but also the deflection of beams (Fig. 18).

Strains in longitudinal reinforcement and stirrups were additionally measured by electric resistance strain gauges of 20mm length. The distribution of strain gauges is shown in Fig. 19. The results of these readings are not included in the Appendix.



Rys. 18. Rozmieszczenie czujników indukcyjnych do pomiaru ugięć oraz kątów skręcenia
Fig. 18. Situation of induction meters for measurement of deflections and angles of rotation



Rys. 19. Rozmieszczenie tensometrów elektrooporowych na zbrojeniu podłużnym i poprzecznym belek
Fig. 19. Layout of electric resistance strain gauges on longitudinal and transverse reinforcement of beams

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Seria I (belki BT)

3.1.1. Sztywność na skręcanie

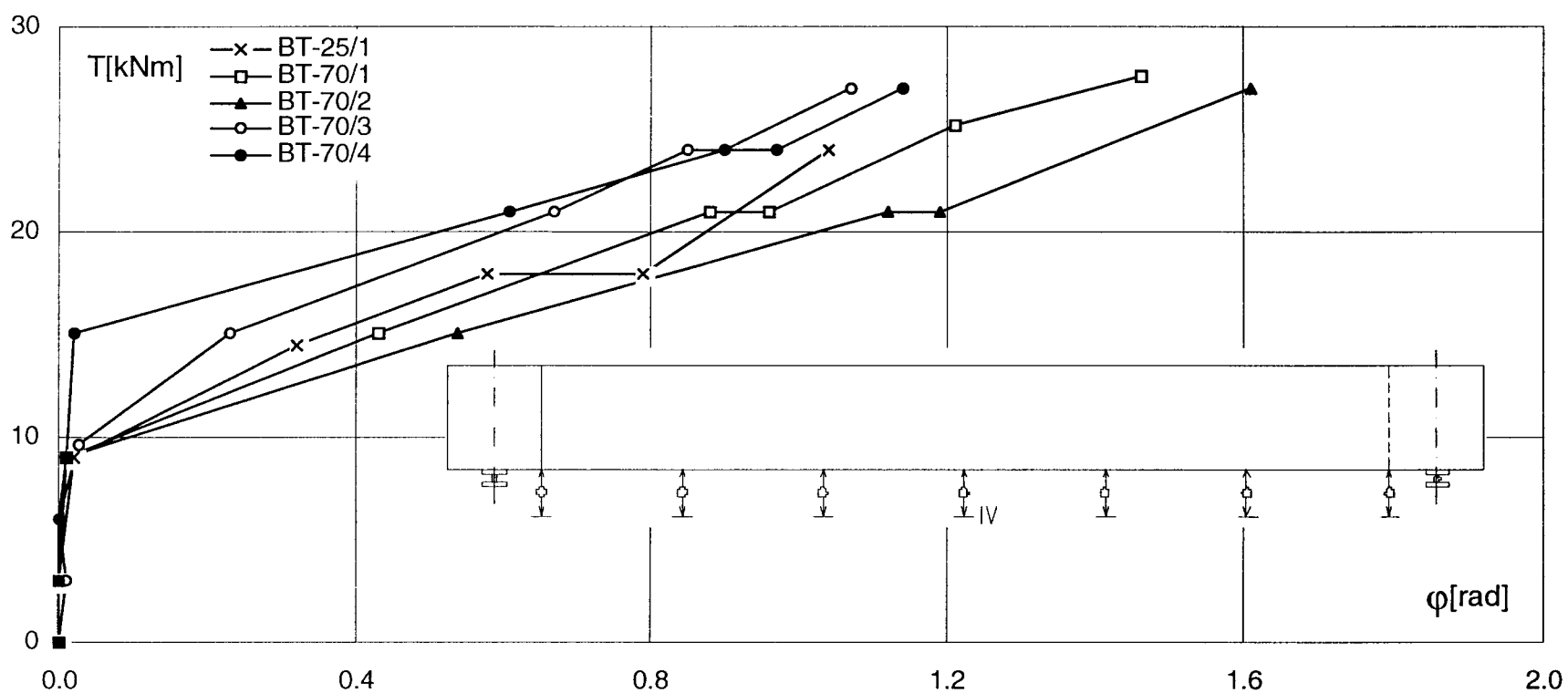
Ponieważ za miarę sztywności belek na skręcanie można przyjąć wielkość jednostkowego kąta skręcenia φ , dla każdej belki serii I wykonano obliczenia wartości jednostkowych kątów skręcania φ w przekrojach zlokalizowanych w środku rozpiętości belek. Wyniki otrzymane dla wszystkich belek serii I przedstawiono na rys. 20. Wynika stąd, że pomimo znacznie zróżnicowanej wytrzymałości betonu (B25 i B70) wszystkie belki wykazują zbliżoną sztywność na skręcanie. Zjawisko to wydaje się potwierdzać znaną z literatury technicznej [19] tezę, że „o sztywności na skręcanie po zarysowaniu decyduje ilość i rodzaj stali, a nie jakość betonu”, chociaż z drugiej strony może to być również skutkiem mało zróżnicowanych wartości modułów sprężystości betonu zwykłego i BWW (odpowiednio średnio 28,4 i 32,4 GPa).

3. RESULTS OF TESTS

3.1. Series I (BT beams)

3.1.1. Torsion stiffness

Since the measure of torsion stiffness of beams can be taken as the magnitude of unit angle of rotation φ , calculations of the unit angle of rotation φ were carried out at cross-sections placed at mid-span of every beam in series I. Results obtained for all series I beams are presented in Fig. 20. It follows from them, that all beams display similar torsion stiffness despite large difference in concrete strength. This phenomenon seems to confirm the thesis, well known in technical literature [19] that „torsion stiffness in cracked concrete is governed by amount and type of reinforcement and not by concrete quality”; on the other hand this can be also due to small difference between the moduli of elasticity of ordinary and HS concrete (28.4 and 32.4 GPa respectively).



Rys. 20. Zależność pomiędzy momentem skręcającym T a jednostkowym kątem skręcenia ϕ pomierzonym w przekroju zlokalizowanym w środku rozpiętości belek serii BT

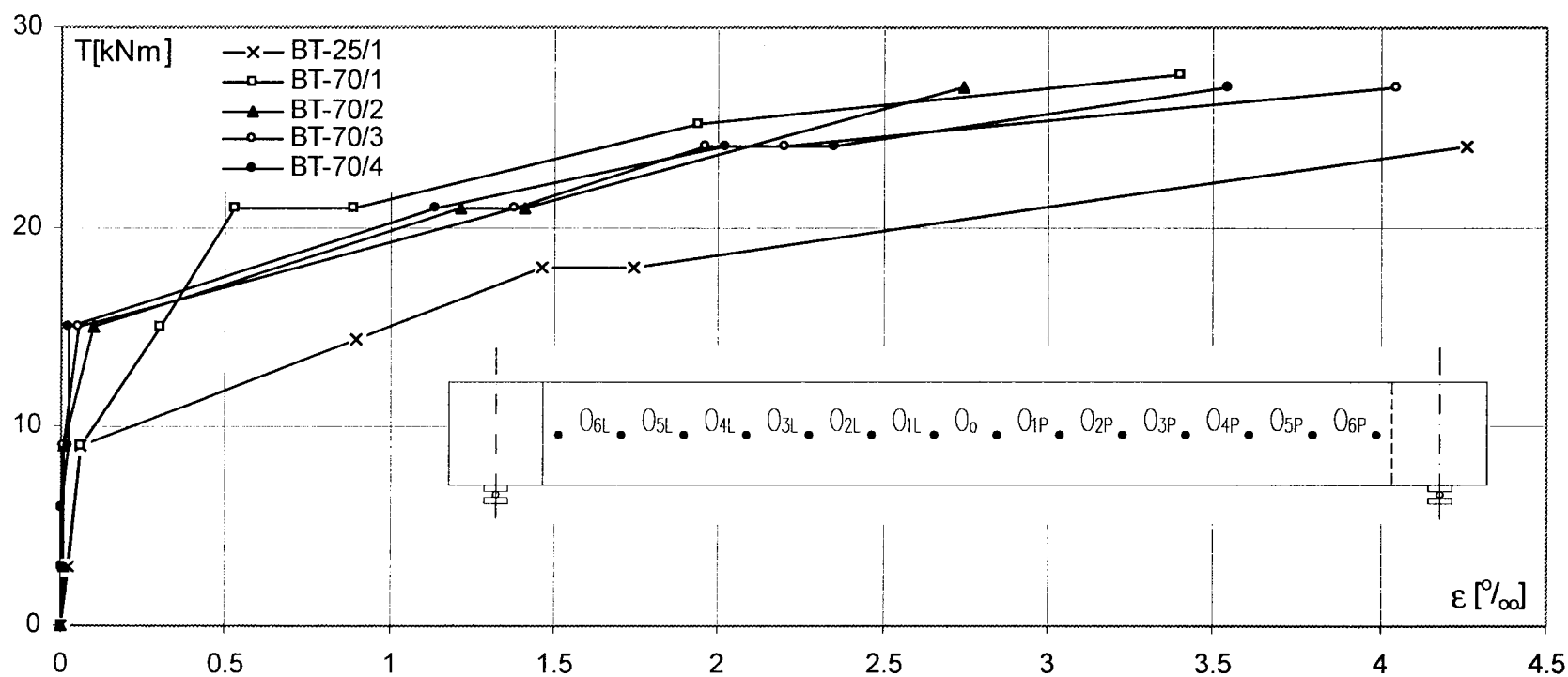
Fig. 20. Relation between the torsion moment T and the unit angle of rotation ϕ measured at mid-span of series BT beams

3.1.2. Odształcenia betonu na bocznej powierzchni belek w kierunku podłużnym

Dla wybranej bazy pomiarowej usytuowanej w środku rozpiętości belek oraz w połowie ich wysokości, obliczono jednostkowe odkształcenia betonu ϵ w przypadku wszystkich belek serii I i przedstawiono je na rys. 21 w zależności od wartości momentu skręcającego T .

3.1.2. Concrete strains on the side surface of beams in longitudinal direction

For the chosen measuring base, situated at mid-span of the beams at their mid-depth, unit strains ϵ of concrete in case of all series I beams were measured and are presented in Fig. 21, depending on the value of torsion moment T .



Rys. 21. Zależność pomiędzy momentem skręcającym T a średnimi odkształceniami jednostkowymi betonu ϵ pomierzonymi w połowie wysokości belek serii BT na powierzchni bocznej (bazy O_{6L} - O_{6P})

Fig. 21. Relation between the torsion moment T and the mean unit concrete strains ϵ measured at mid-depth of series BT beams at the side surface (of base O_{6L} - O_{6P}).

Z rysunku wynika, że tym samym wartościom momentu skręcającego T odpowiadają mniejsze wartości odkształcenia w przypadku belek wykonanych z BWW, niż w przypadku belki wykonanej z betonu zwykłego.

3.1.3. Odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belek w kierunku poprzecznym

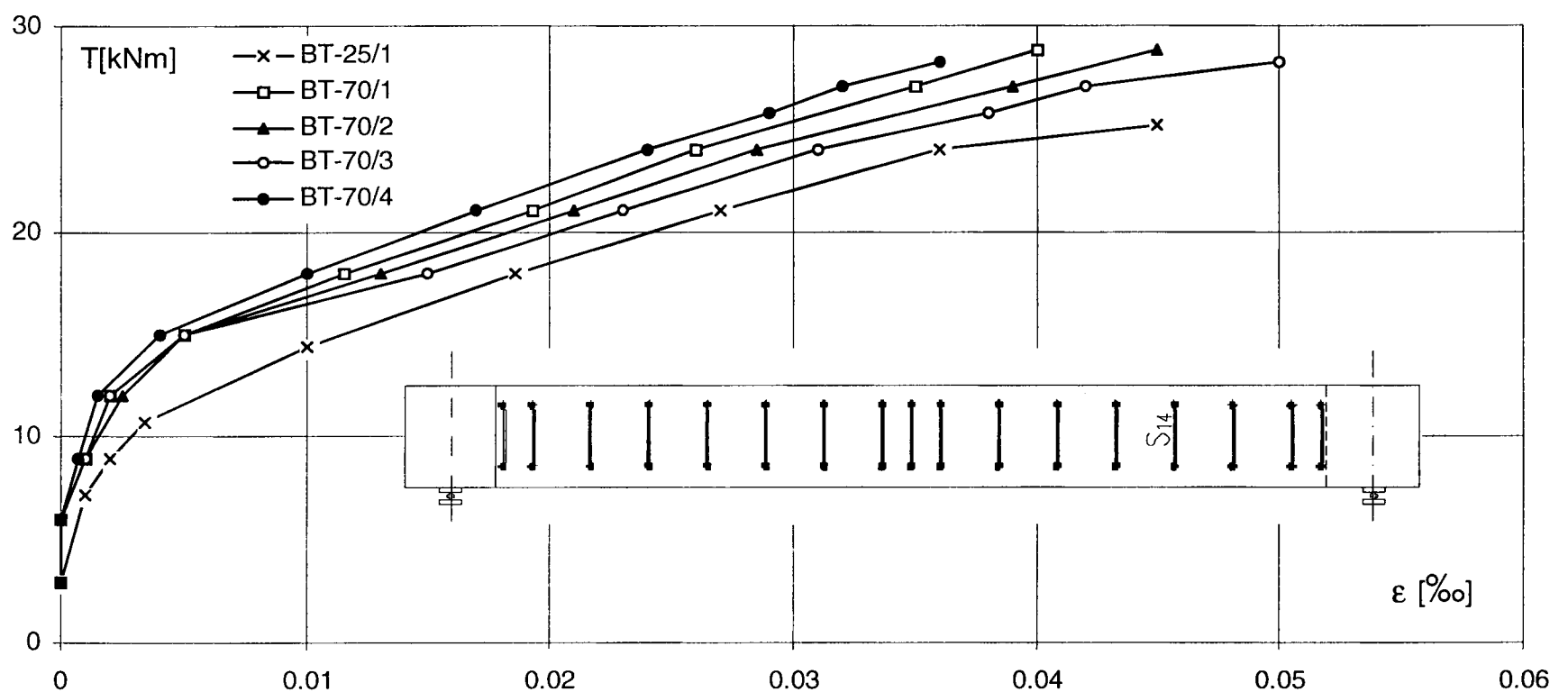
Wybrano bazę pomiarową S_{14} usytuowaną w odległości 0,64m od podpory (zlokalizowaną wzdłuż czwartego strzemienia – licząc od podpory) ze względu na zaobserwowane największe wyężenie tego obszaru.

Dla wszystkich belek serii I obliczono jednostkowe odkształcenia betonu i przedstawiono je na rys. 22 w zależności od wartości momentu skręcającego T .

It follows from Fig. 21 that for the same value of torsion moment T , smaller values of concrete strains occur in case of beams cast of HSC than in the case of beams cast of ordinary concrete.

3.1.3. Concrete strains on the side surface of beams in transverse direction

In view of the greatest observed effort in this area, S_{14} measuring base was chosen, situated at the distance 0.64m from the support (located along the fourth stirrup from the support). Unit strain of concrete was calculated for all series I beams; they are presented in Fig. 22 in relation to the value of the torsion moment T .



Rys. 22. Zależność pomiędzy momentem skręcającym a odkształceniami jednostkowymi betonu ϵ pomierzonymi w osi strzemienia usytuowanego wzdłuż bazy S_{14} belek serii BT

Fig. 22. Relation between torsion moment and unit strain ϵ of concrete measured along the axis of stirrup situated along base S_{14} in series BT beams

Z rysunku wynika, że tym samym wartościom momentu skręcającego T odpowiadają mniejsze wartości odkształceń (a tym samym i naprężeń) w strzemionach belek wykonanych z BWW, niż w przypadku belki wykonanej z betonu zwykłego. Można zatem postawić tezę o lepszej skuteczności strzemion w belkach z BWW; na przykład dla $T = 15,0 \text{ kNm}$ stosunek odkształceń strzemion w belce z betonu zwykłego do odkształceń tych samych strzemion w belkach z BWW wynosi około 2,6.

Fakt ten sugeruje lepszą przyczepność BWW do zbrojenia, w wyniku czego pionowa składowa siły ściskającej w betonowym krzyżulcu kratownicy przestrzennej [1, 3, 4, 6, 14, 15] jest w większym stopniu przenoszona przez zbrojenie poprzeczne belek wykonanych z BWW.

Naprężenia w analizowanych strzemionach wszystkich belek osiągały granicę plastyczności przy obciążeniu rzędu około 90% ich nośności.

It follows from Fig. 22 that for the same value of torsion moment T , smaller values of concrete strains (and therefore of stresses) occur in stirrups of beams cast of HSC than in the case of the beam cast of ordinary concrete. A thesis can be therefore put forward of better effectiveness of stirrups in HSC beams; for instance: for moment $T = 15.0 \text{ kNm}$, the ratio of strains in stirrups in beam cast of ordinary concrete to the strains in the same stirrups in HSC beams amounts to abt 2.6.

This result implies better bond of HS concrete to the reinforcement resulting in greater proportion of the vertical component of the compressive force in concrete cross brace of the space truss [1,3,4,6,14,15] transferred by the transverse reinforcement of HSC beams.

Stresses in analysed stirrups in all beams reached the plasticity limit at loading of the order of abt 90% of their carrying capacity.

Godzi się również zauważyć, że w całym zakresie obciążenia – zgodnie z klasycznymi zasadami skręcania prętów [6] – odkształcenia pomierzone w środku dłuższych ramion strzemion były większe od odkształceń pomierzonych w środkowym odcinku ich krótszych ramion (patrz Załącznik tablice 1.4, 1.9, 2.4, 2.9, 3.4, 3.9, 4.4, 4.9).

3.1.4. Średnie odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belek w kierunkach głównych

W przypadku każdej belki dysponowano wynikami odkształceń pomierzonych na bocznej powierzchni betonu wzdłuż 16 baz rozmieszczonych w kierunku naprężeń głównych rozciągających (rys. 13) oraz ściskających (rys. 14). Wyniki te zostały przedstawione w Załączniku odpowiednio w tablicach 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 i 5.5 oraz 1.6, 2.6, 3.6, 4.6 i 5.6.

W każdej z pięciu belek dla wszystkich poziomów obciążeń obliczono średnie (z 16-tu baz) wartości odkształceń betonu na bocznej powierzchni belek w kierunku głównych naprężeń ściskających oraz rozciągających, które przedstawiono w tablicach 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 oraz na rysunkach 23.1, 23.2, 23.3, 23.4, 23.5.

It is also worth mentioning that - in accordance with the classical principles of bar torsion [6] - the strains measured in the mid-spans of their longer arms were - over the entire range of loading - higher than those measured at mid-spans of the shorter arms (see Appendix, Tables 1.4, 1.9, 2.4, 2.9, 3.4, 3.9, 4.4, 4.9).

3.1.4. Mean concrete strain in principal directions on the side surface of beams

For every beam, the results of strains on the side surface of the beam were available along 16 bases arranged in the direction of principal tensile (Fig. 13) and compressive (Fig. 14) stresses. These results are presented in the Appendix, in the Tables 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 and 1.6, 2.6, 3.6, 4.6, 5.6, respectively.

The average values (of 16 bases) of concrete strains on the side faces of beams were calculated for all load levels in each of the five beams in the principal directions of compressive and tensile stresses; they are presented in Tables 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 and in Figs 22.1, 22.2, 22.3, 22.4 and 22.5.

Tab. 4.1. Średnie i maksymalne wartości odkształceń betonu na bocznej powierzchni belki BT-25/1 w kierunkach głównych

Table 4.1. Mean and maximum values of concrete strains in the principal directions on the side face of beam T-25/1

F _T	T	Rozciąganie/ Tension		Ściskanie / Compression	
		ε ₁	ε _{1max}	ε ₂	ε _{2max}
kN	kNm	‰	‰	‰	‰
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3	0.03	0.06	-0.04	-0.06
15	9	0.18	0.23	-0.11	-0.20
24	14.4	1.27	1.74	-0.56	-0.78
30	18	2.15	2.98	-0.71	-1.18
30	18	2.54	3.40	-1.37	-1.40
40	24	4.48	6.04	-1.51	-2.82

Tab. 4.2. Średnie i maksymalne wartości odkształceń betonu na bocznej powierzchni belki BT-70/1 w kierunkach głównych

Table 4.2. Mean and maximum values of concrete strains in the principal directions on the side face of beam T-70/1

F _T	T	Rozciąganie / Tension		Ściskanie / Compression	
		ε ₁	ε _{1max}	ε ₂	ε _{2max}
kN	kNm	‰	‰	‰	‰
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3	0.05	0.82	-0.02	0.00
15	9	0.20	0.93	-0.11	-0.07
25	15	1.50	2.40	-0.56	-0.26
35	21	3.36	4.80	-1.14	-0.90
35	21	3.85	5.21	-1.30	-1.05
42	25.2	5.43	6.94	-1.70	-1.41
46	27.6	6.41	7.80	-1.91	-1.56

Tab. 4.3. Średnie i maksymalne wartości odkształceń betonu na bocznej powierzchni belki BT-70/2 w kierunkach głównych

Table 4.3. Mean and maximum values of concrete strains in the principal directions on the side face of beam T-70/2

F_T	T	Rozciąganie		Ściskanie	
		ϵ_1	ϵ_{1max}	ϵ_2	ϵ_{2max}
kN	kNm	‰	‰	‰	‰
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3	0.03	0.11	-0.03	-0.02
15	9	0.28	1.5	-0.11	-0.02
25	15	1.77	3.04	-0.56	-0.38
35	21	3.81	4.81	-1.22	-1.01
35	21	4.32	6.9	-1.34	-1.02
45	27	6.49	9.15	-2.01	-1.35

Tab. 4.4. Średnie i maksymalne wartości odkształceń betonu na bocznej powierzchni belki BT-70/3 w kierunkach głównych

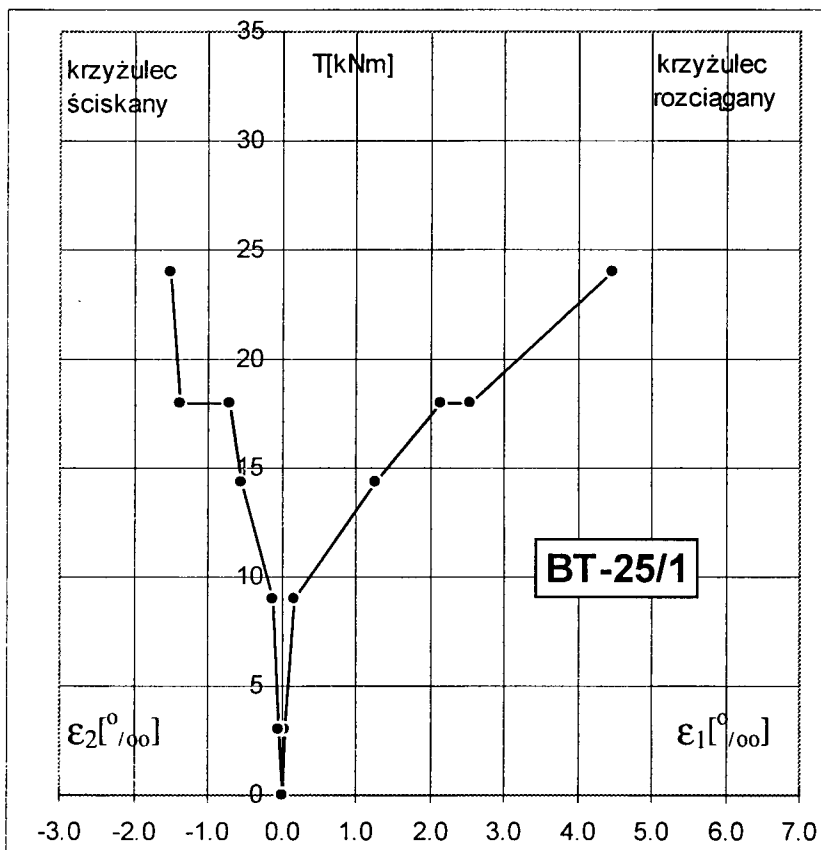
Table 4.4. Mean and maximum values of concrete strains in the principal directions on the side face of beam T-70/3

F_T	T	Rozciąganie		Ściskanie	
		ϵ_1	ϵ_{1max}	ϵ_2	ϵ_{2max}
kN	kNm	‰	‰	‰	‰
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3	0.00	0.01	-0.02	0.84
10	6	0.06	0.09	-0.06	0.79
15	9	0.09	0.23	-0.09	0.75
25	15	0.65	1.38	-0.41	0.66
35	21	2.46	3.48	-0.86	-0.06
40	24	3.13	4.48	-1.16	-0.38
40	24	3.97	5.78	-1.29	-0.46
45	27	5.34	7.53	-1.78	-0.90

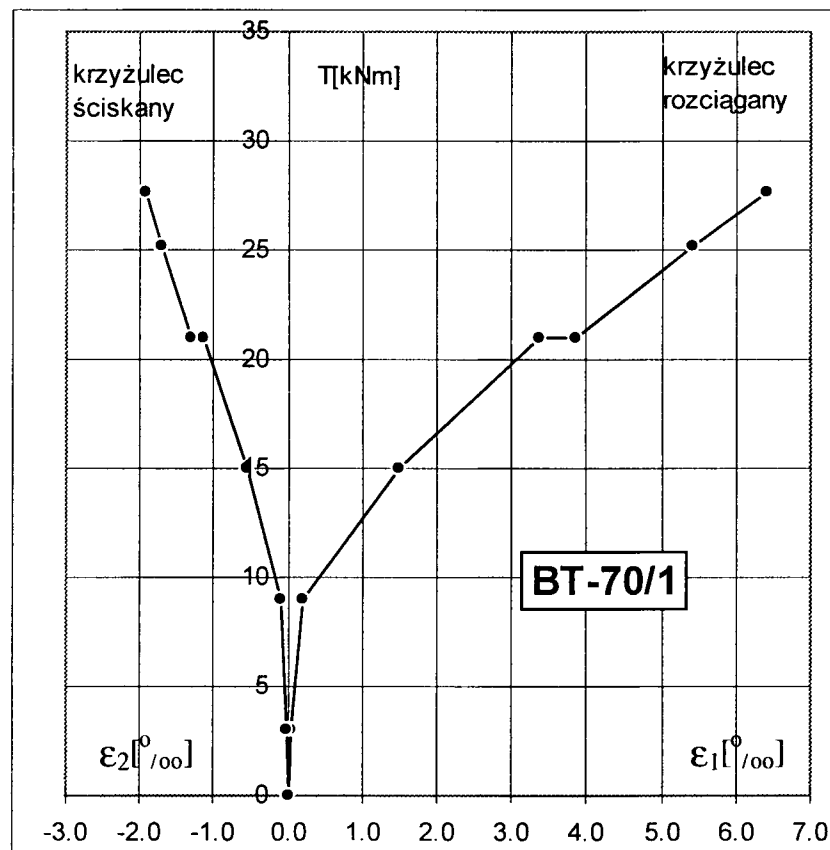
Tab. 4.5. Średnie i maksymalne wartości odkształceń betonu na bocznej powierzchni belki BT-70/4 w kierunkach głównych

Table 4.5. Mean and maximum values of concrete strains in the principal directions on the side face of beam T-70/4

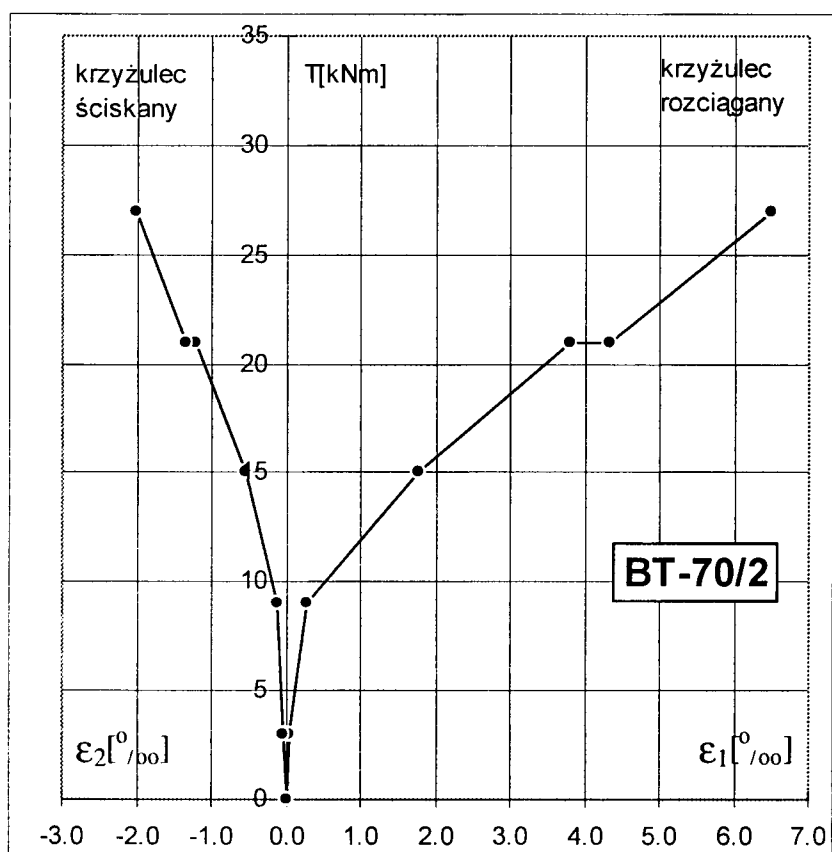
F_T	T	Rozciąganie		Ściskanie	
		ϵ_1	ϵ_{1max}	ϵ_2	ϵ_{2max}
kN	kNm	‰	‰	‰	‰
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3	0.03	0.06	-0.02	0.01
10	6	0.06	0.08	-0.06	-0.04
15	9	0.09	0.14	-0.09	0.10
25	15	0.43	1.24	-0.23	-0.17
35	21	2.40	3.93	-0.78	-0.62
40	24	3.44	5.04	-0.99	-0.53
40	24	3.60	5.23	-1.10	2.96
45	27	4.54	6.51	-1.38	2.88



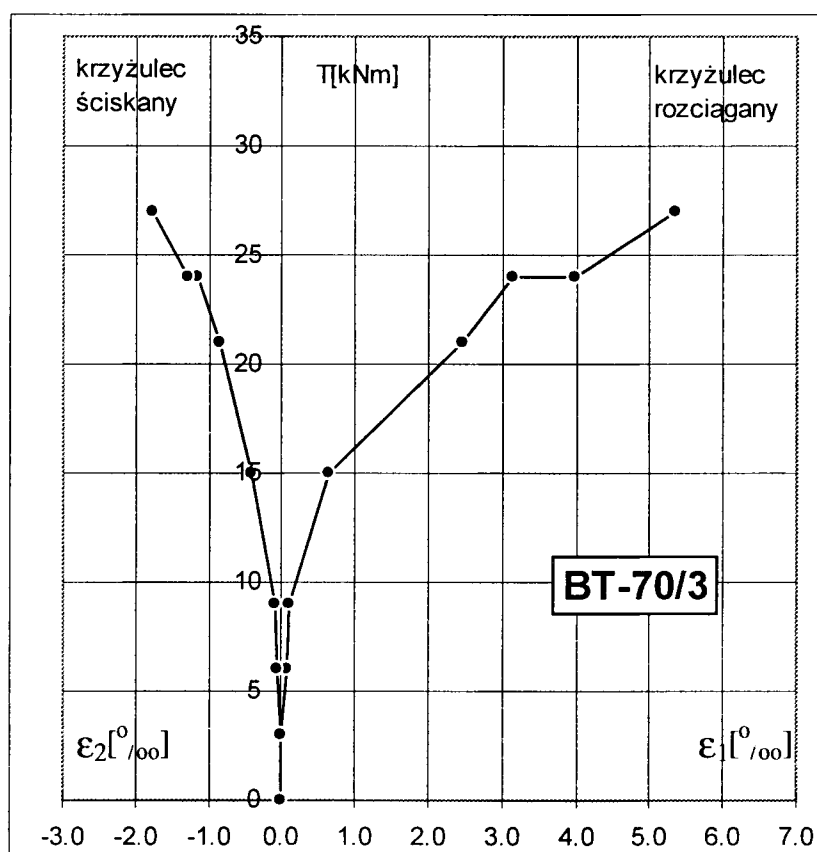
Rys. 23.1. Średnie odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belki BT-25/1 w kierunkach głównych
Fig. 23.1. Average strains of concrete in principal directions on the side face of beam BT-25/1



Rys. 23.2. Średnie odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belki BT-70/1 w kierunkach głównych
Fig. 23.1. Average strains of concrete in principal directions on the side face of beam BT-70/1



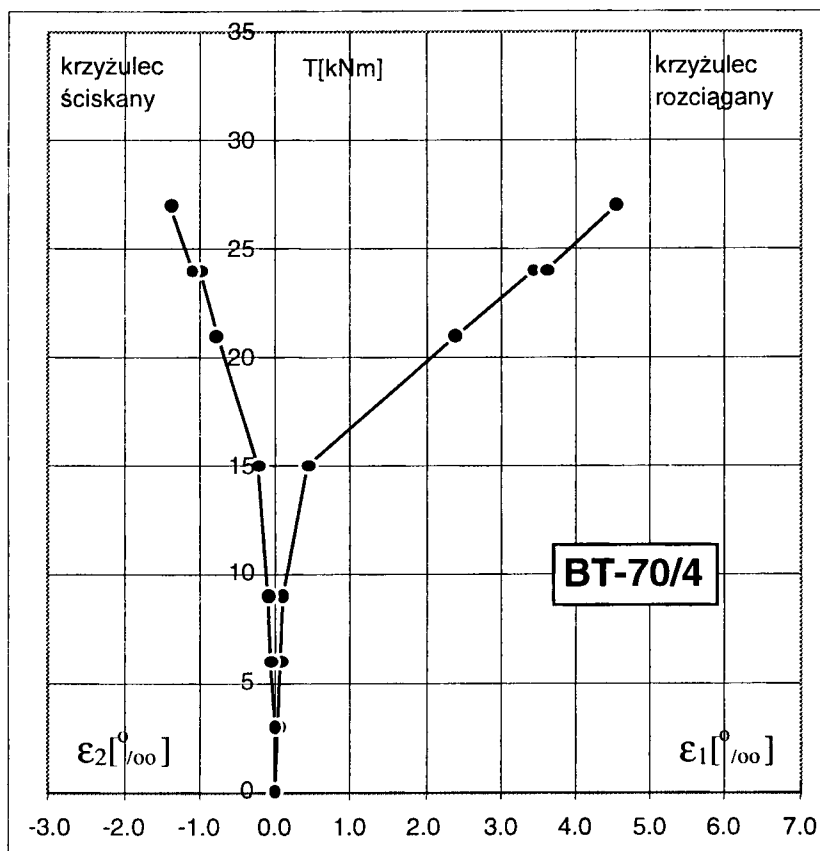
Rys. 23.3. Średnie odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belki BT-70/2 w kierunkach głównych
Fig. 23.3. Average strains of concrete in principal directions on the side face of beam BT-70/2



Rys. 23.4. Średnie odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belki BT-70/3 w kierunkach głównych
Fig. 23.4. Average strains of concrete in principal directions on the side face of beam BT-70/3

Wartości maksymalnych odkształceń betonu w kierunku naprężeń głównych rozciągających do ściskających są większe od 2,8 raza w przypadku belki BT-70/3 do 3,9 raza w przypadku belki BT-70/2, podczas gdy w belce wykonanej z betonu zwykłego stosunek ten wynosi 2,1.

The values of maximum concrete strains in the direction of principal tensile stresses are 2.8 times greater in case of beam BT-70/3 to 3.9 times greater in case of beam BT-70/2, while in the beam cast of ordinary concrete this ratio is 2.1.



Rys. 23.5. Średnie odkształcenia betonu na bocznej powierzchni belki BT-70/4 w kierunkach głównych
Fig. 23.5. Average strains of concrete in principal directions on the side face of beam BT-70/4

W przypadku średnich odkształceń betonu proporcje te wyrównują się i wynoszą dla belek z betonu BWV kształtują się w granicach od 3,1 (BT-70/3) do 3,4 (BT-70/1) a w belce z betonu zwykłego: 3,0.

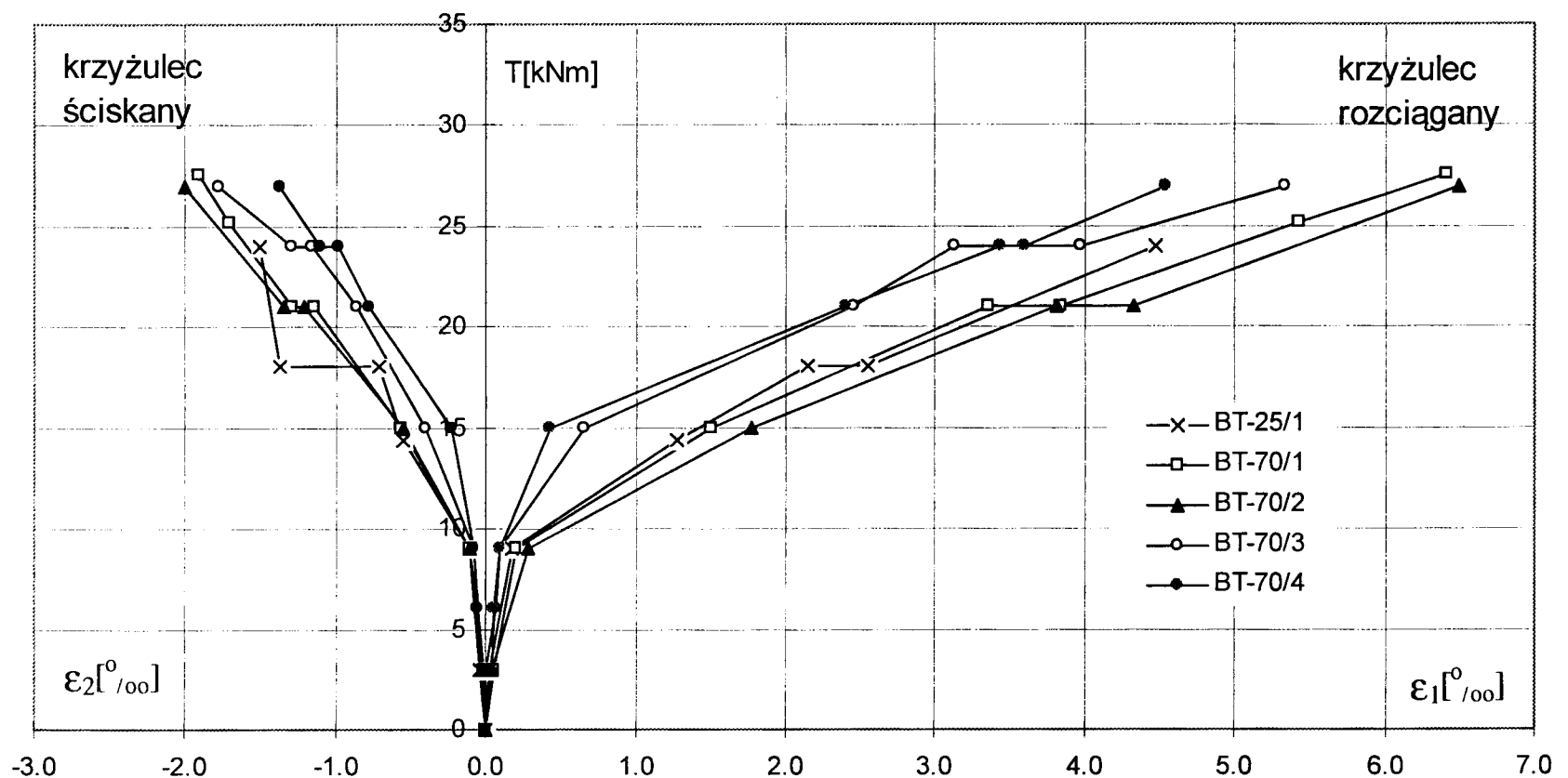
Największe pomierzone wartości odkształceń betonu na bocznej powierzchni belek wynosiły:

- w kierunku głównych naprężeń rozciągających: 9,1 ‰ (BWV) i 6,0 ‰ (beton zwykły)
- w kierunku głównych naprężeń ściskających: 2,5 ‰ (BWV) i 2,8 ‰ (beton zwykły).

In case of the mean concrete strains these proportions equalise and for HSC beams remain within the limits 3.1 (BT-70/3) to 3.4 (BT 70/1) while for ordinary concrete beam they equal 3.0.

The greatest values of concrete strains measured on the side faces of the beams were:

- in the direction of principal tensile stresses : 9.1‰ (HSC) and 6.0‰ (ordinary concrete).
- in the direction of principal compressive stresses: 2.5‰ (HSC) and 2.8‰ (ordinary concrete).



Rys. 24. Porównanie średnich odkształceń betonu na bocznych powierzchniach belek serii BT w kierunkach głównych
Fig. 24. Comparison of mean concrete strains in principal directions on side faces of BT series beams

Na rys. 24 zamieszczono wykresy średnich odkształceń betonu na bocznej powierzchni belek serii BT w kierunkach głównych naprężeń ściskających oraz rozciągających.

Wynika stąd, że nie można stwierdzić wyraźnego wpływu wytrzymałości betonu na zależność pomiędzy momentem skręcającym T a średnimi odkształceniami betonu na bocznej powierzchni belek w kierunkach naprężeń głównych.

3.1.5. Zarysowanie

W załączniku w tabelach 5.1 – 5.5. podano wartości rozwarcia rys pomierzone w poszczególnych etapach obciążenia. Pokazano tam również obraz zarysowania belek serii I.

Belki wykonane z BWW zarysowywały się przy bardziej zaawansowanych obciążeniach ($T_{cr}=13,5\text{kN}$) niż belka wykonana z betonu zwykłego ($T_{cr}=9,9\text{kN}$)., Wielkość momentu rysującego stanowiła odpowiednio $0,45T_{max}$ i $0,40T_{max}$. Na rys. 25 przedstawiono obraz zarysowania belki BT-25/1 a na rys. 26 obraz zarysowania belki BT-70/2.

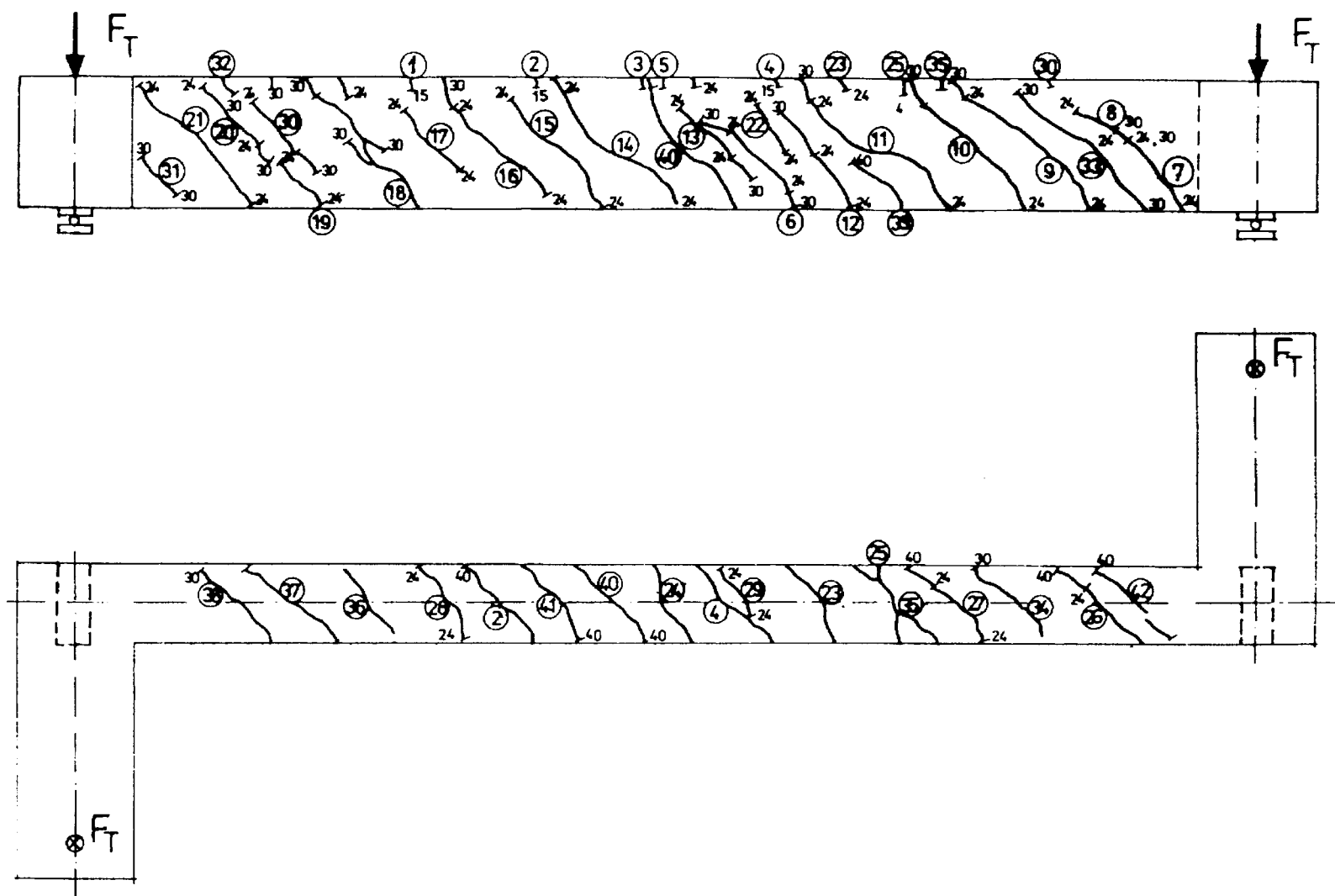
In Fig 24 are shown the graphs of mean concrete strains in principal directions of compressive and tensile stresses, on the side faces of BT series beams.

The conclusion is that no distinct influence of concrete strength can be proven on the relation between the torsion moment T and average concrete strains on side faces of beams in the principal stress directions.

3.1.5. Cracking

The widths of cracks measured at various stages of loading are shown in appendix in Tables 5.1 to 5.5. The pattern of cracks is also shown there for series I beams.

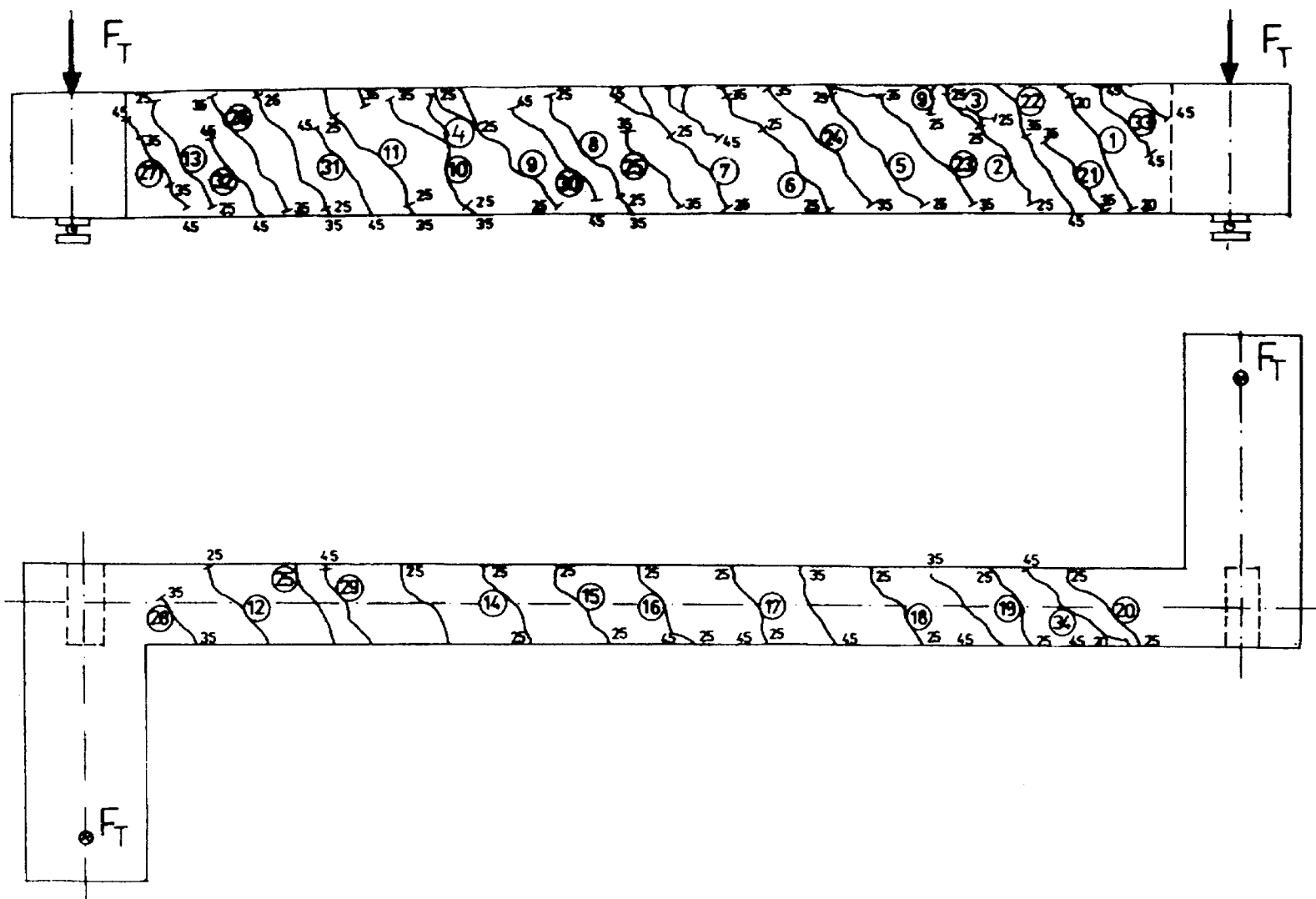
HSC beams cracked at higher loads ($T_{cr}=13,5\text{kN}$) than beams of ordinary concrete ($T_{cr}=9,9\text{kN}$). The magnitude of the cracking moment was $0,45T_{max}$ and $0,40T_{max}$. The pattern of cracks in beam BT-25/1 is shown in Fig. 25 and that in beam BT 70/2 - in Fig. 26.



Rys. 25. Obraz zarysowania belki BT-25/1
Fig. 25. Pattern of cracks in beam BT-25/1

W obu przypadkach stwierdzono obraz zarysowania charakterystyczny czystemu skręcaniu [16, 17]; liczba rys jest podobna. Podczas dokładniejszej obserwacji belek BT-70 można zauważyć, że rysy w betonie o wysokiej wytrzymałości są mniej postrzępione, bardziej „proste”. Prawdopodobnie wynika to z faktu, iż w betonach o wysokiej wytrzymałości rysy przebiegają zarówno poprzez matrycę, jak i przez kruszywo [18].

In both cases a classical pattern is characteristic of pure torsion [16,17]; the number of cracks is similar. More exact observations of beams BT-70 show that cracks in HSC are less fuzzy and tend to be more straight. This is probably due to the fact that in HSC concrete cracks are running across the matrix as well as across the aggregate [18].



Rys. 26. Obraz zarysowania belki BT-70/2
Fig. 26. Pattern of cracks in beam BT- 70/2

3.1.6. Nośność

Belki serii I zostały zaprojektowane w ten sposób, iż o ich nośności decydowały strzemiona. Stosunek maksymalnego momentu skręcającego przenieszonego przez ściskane, betonowe krzyżulce kratownicy zastępczej do momentu przenieszonego przez strzemiona wynosił dla belek wykonanych z BWW średnio 2,55 a w belce z betonu zwykłego zaledwie 1,05.

Fakt ten znalazł odzwierciedlenie w osiągniętych rezultatach badań (rys. 22).

W tabelicy 5 przedstawiono między innymi otrzymane z badań wartości nośności belek, jak również wartości nośności belek obliczone według Eurocodu nr 2 [14]. Wynika stąd, że średni współczynnik bezpieczeństwa belek wykonanych z BWW wynosi około 1,4 a w przypadku belki z betonu zwykłego około 1,2.

3.1.6. Load carrying capacity

Series I beams have been designed in such a manner, that their load carrying capacity depended on stirrups. The relation of the maximum torsion moment carried by the compressed members of the equivalent truss to the moment carried by stirrups was on the average equal to 2.55 for HSC beams and only 1.05 for beams in ordinary concrete.

This was reflected in obtained test results (Fig. 22). Test results of the obtained load carrying capacity values are shown a/a in Table 5, as well as values of beam load carrying capacities according to Eurocode 2 [14]. From this results that the average factor of safety of HSC beams amounts to 1.4 and in case of ordinary concrete beams - to about 1.2.

Tabl. 5. Zarysowanie oraz nośność belek serii I
Table 5. Cracking and load carrying capacity of series I beams

Symbol belki Symbol	T_{cr} [kNm]	T_{max}^{test} [kNm]	T_{max}^{cal} [kNm]	$T_{max}^{test} : T_{max}^{cal}$
BT-25	9,9	25,2	21,5	1,17
BT-70/1	13,5	29,4	21,5	1,37
BT-70/2	13,5	30,0	21,5	1,40
BT-70/3	15,0	28,2	21,5	1,31
BT-70/4	15,0	30,0	21,5	1,40

3.2. Seria II (belki BTM)

3.2.1. Sztywność belek

W celu oszacowania ubytku sztywności belek wywołanego skręcaniem określono narastające wartości kątów skręcenia ϕ [rad/m] belek osobno dla obszaru środkowego oraz dla obszaru przypodporowego – jako wartości średnie z dwóch obszarów przypodporowych. Otrzymane zależności przedstawiono na rys. 27.

W obszarze środkowym w całym zakresie obciążenia występuje niewielka różnica pomiędzy wartościami kąta skręcenia belki wykonanej z betonu zwykłego oraz belek wykonanych z BWW. Można uznać, o czym już wspomniano, że w przypadku czystego skręcania o sztywności po zarysowaniu decyduje ilość i rodzaj stali a nie jakość betonu.

Teza ta traci ważność w obszarze przypodporowym, gdzie dochodzi wpływ siły poprzecznej. Obserwujemy tu (rys. 27) dość znaczny ubytek sztywności na skręcanie, który w dodatku w belce wykonanej z betonu zwykłego jest większy niż w przypadku belek wykonanych z BWW.

3.2. Series II (BTM beams)

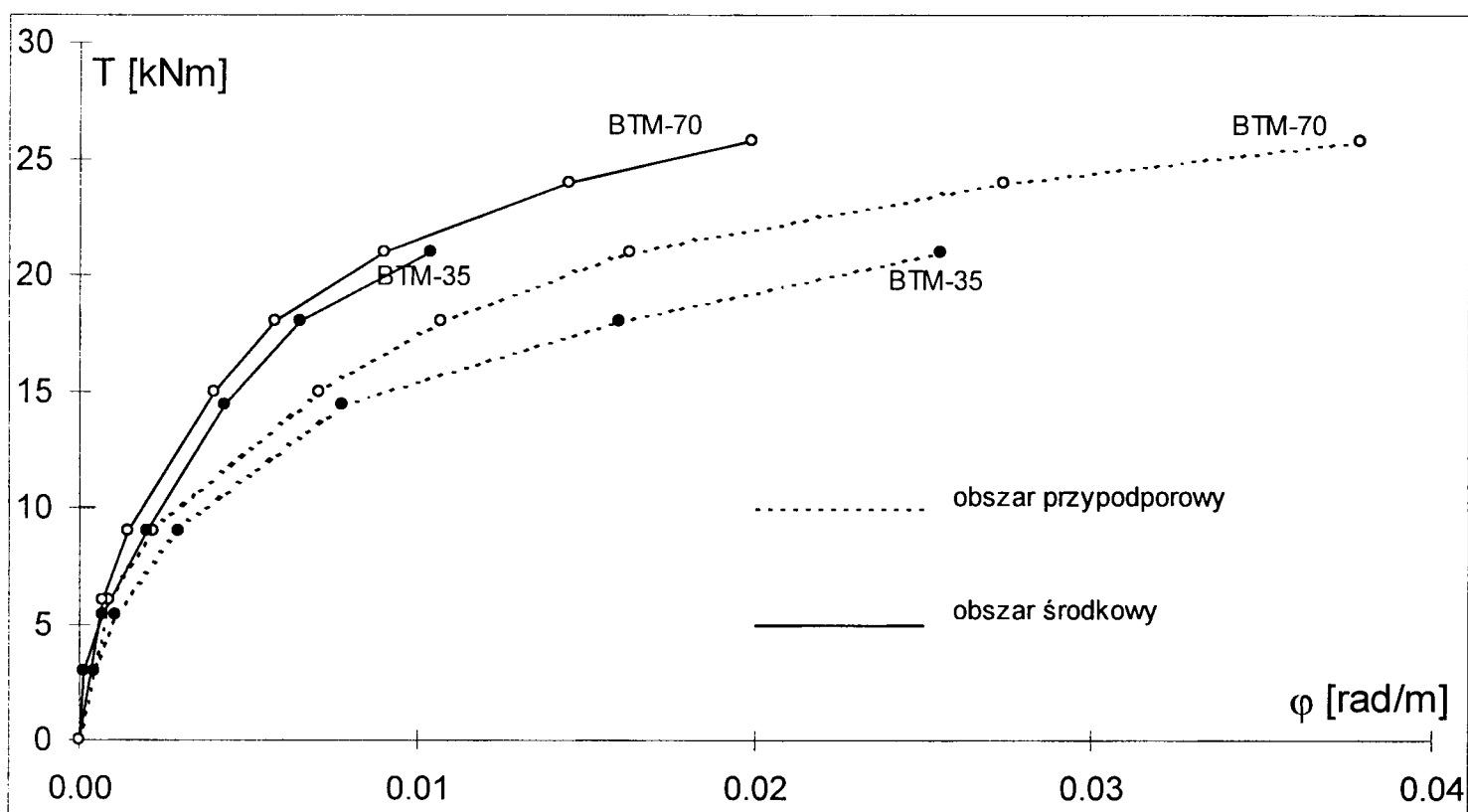
3.2.1. Stiffness of beams

In order to evaluate the loss of stiffness due to torsion, the increasing values of angles of rotation ϕ [rad/m] of beams were determined separately for the middle region and for support region - as average values of the two support regions. The obtained values are presented in Fig. 27.

Over the entire range of loading, small differences occur between the values of angle of rotation in the middle region in ordinary concrete and HSC beams,

It can be recognised, as mentioned above, that in case of pure torsion the stiffness of beam after cracking is governed by the amount and type of reinforcement and not by concrete quality.

This supposition loses its validity in the support region, where the influence of shear force is present in addition. We can notice here (Fig. 27) a fairly large loss of torsion stiffness, which for ordinary concrete beam is - in addition - larger than in the case of HSC beams.



Rys. 27. Zależność momentu skręcającego T - kąta skręcenia ϕ dla obszarów: środkowego oraz przypodporowego belek serii BTM

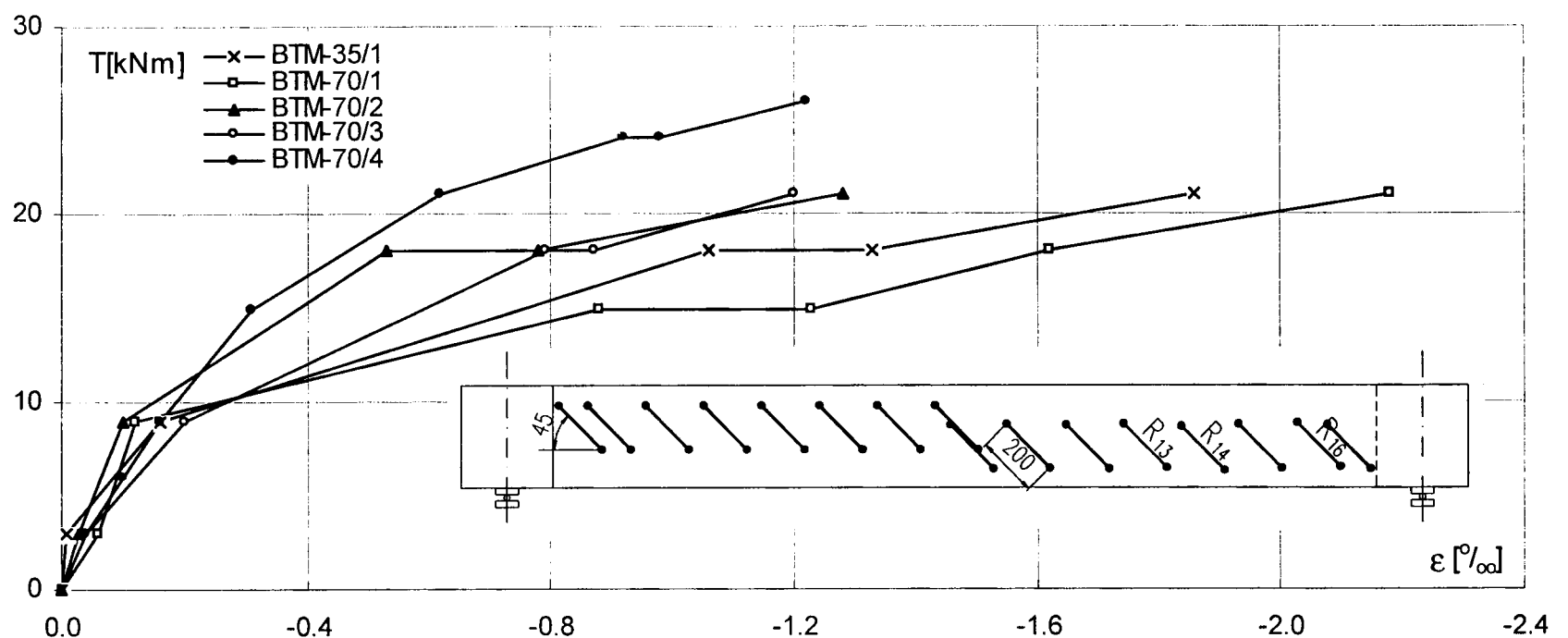
Fig. 27. Relation: torsion moment T - angle of rotation ϕ for middle and support regions in series BTM beams

3.2.2. Odształcenia betonu na bocznej powierzchni belek w kierunkach głównych

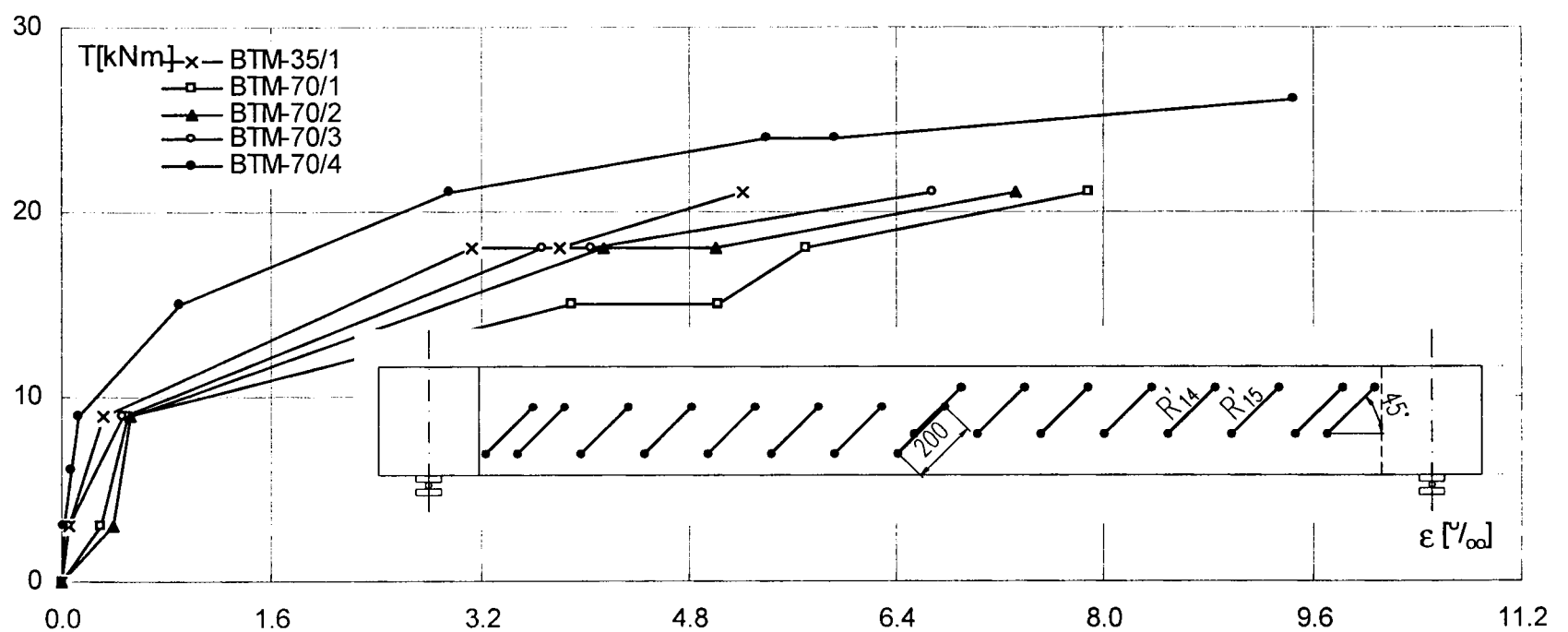
Do analizy wybrano obszar, w którym nastąpiło zniszczenie belek czyli strefę przypodporową w odległości ok. 0.6 m od podpory. Posłużono się przy tym znanym z literatury modelem kratownicy przestrzennej [1, 3, 4, 6, 14, 15]. Przedstawiono odkształcenia najbardziej wyężonych krzyżulców ściskanych (rys. 28) oraz krzyżulców rozciąganych (rys. 29).

3.2.2. Concrete strains in principal directions on side faces of beams

The region chosen for analysis was where the failure occurred, that is in support region, about 0.6m away from the support. The well known in literature space truss model was used [1, 3, 4, 6, 14, 15]. The strains of the most stressed compressive braces are presented in Fig. 28, and those of the most stressed tensile braces - in Fig. 29.



Rys. 28. Odształcenie najbardziej wyężonych krzyżulców ściskanych w obszarze zniszczenia belek serii BTM
Fig. 28. Strains in compression braces exposed to greatest effort - in BTM series of beams



Rys. 29. Odształcenia najbardziej wyężonych krzyżulców rozciąganych belek serii BTM
Fig. 29. Strains in tension braces exposed to greatest effort - in BTM series of beams

W przypadku odkształceń najbardziej wyężonych krzyżulców ściskanych w belkach z betonu o wysokiej wytrzymałości – za wyjątkiem belki BTM-70/1 – przy tym samym poziomie obciążenia, odkształcenia w belce z betonu zwykłego były większe niż w większości belek wykonanych z BWW, które niszczyły się na skutek wyczerpania nośności strzemion.

Natomiast w przypadku odkształceń najbardziej wyężonych krzyżulców rozciąganych nie zaobserwowano wpływu wytrzymałości betonu na ich wartość.

W przypadku belki wykonanej z betonu zwykłego zaobserwowane znaczne wyężenie betonowych krzyżulców ściskanych (odkształcenia rzędu 1,9‰) wskazuje na praktycznie równoległe przebiegający proces niszczenia krzyżulców betonowych oraz strzemion.

In cases of strains in HSC compression braces subjected to highest effort - with the exception of beam BTM-70/1 - at the same level of load, the strains in ordinary concrete beams were greater than in most HSC beams, as the latter failed by reaching the carrying capacity of stirrups.

On the other hand, in case of tension braces subjected to highest effort, no influence of concrete strength on strain was observed.

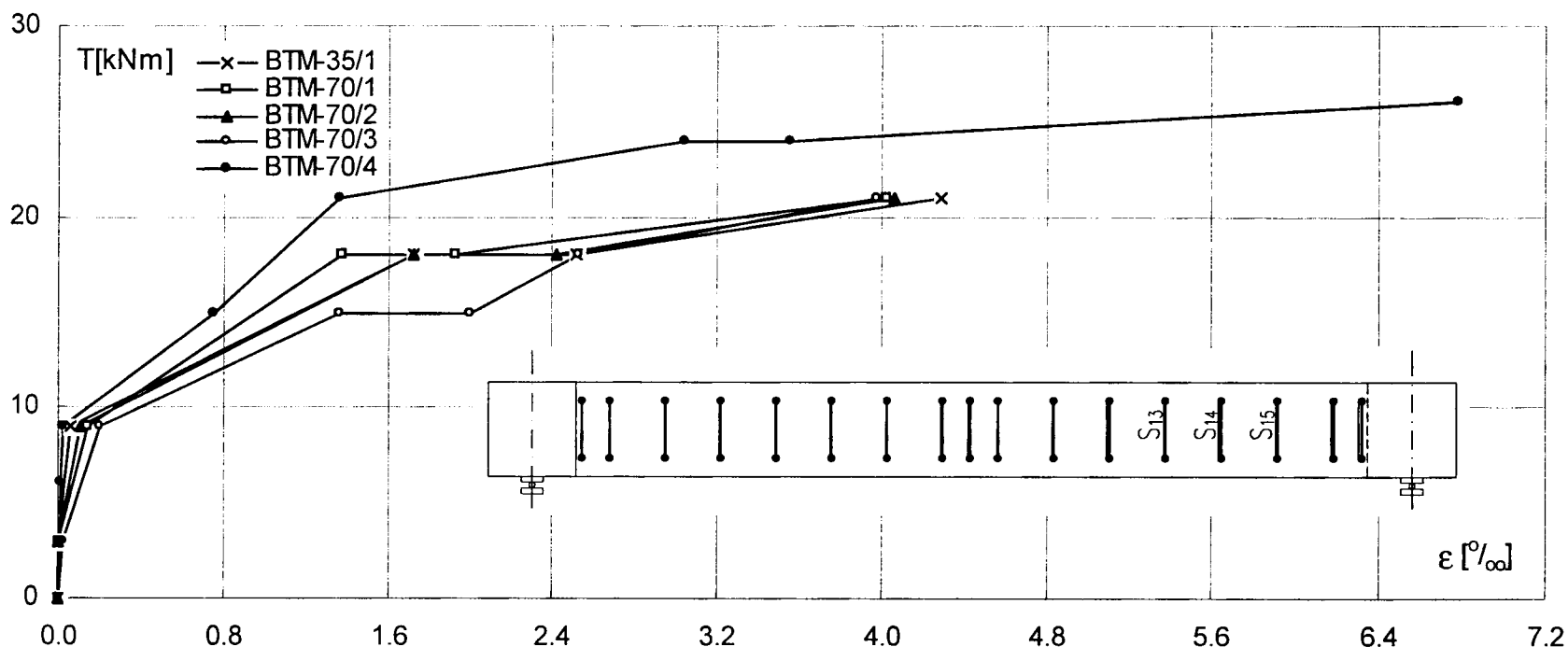
In case of ordinary concrete beams, appreciable effort in compressed concrete braces was observed (strains of the order of 1.9‰) indicating the parallel course of destruction in concrete strut braces and in stirrups.

3.2.3. Odształcenia betonu na bocznej powierzchni belek w kierunku poprzecznym

Analizując ten sam obszar jak w p. 3.2.2., w przypadku wszystkich belek serii BTM przedstawiono na rys. 30 odkształcenia najbardziej wyężonych strzemion, będących słupkami rozciąganyymi kratownicy przestrzennej.

3.2.3. Transverse concrete strains on side faces of beams

Analysing the same region as in section 3.2.2., in case of all beams of BTM series, the strains in stirrups subjected to highest effort (space truss posts in tension) are presented in Fig. 30.



Rys. 30. Odształcenia w najbardziej wyężonych rozciąganych strzemionach belek serii BTM

Fig. 30. Strains in stirrups under tension in BTM series of beams, subjected to highest efforts

Szczególnie w przypadku belki BTM-70/4 zaobserwowano zdecydowanie mniejsze odkształcenia – w tych samych poziomach obciążenia – niż w przypadku pozostałych belek. W tej samej belce w przypadku obciążenia bardzo bliskiego obciążeniu niszczącemu ($T=0,96T_{max}$), odkształcenia strzemion wynosiły około 7‰.

Particularly, in case of BTM-70/4 beam, significantly smaller strains were observed - at the same levels of loading - than in the remaining beams. In the same beam, at the load very near to failure ($T=0.96T_{max}$), stirrup strain was abt 7‰.

3.2.4. Ugięcia

W załączniku (tablice 4.1 do 4.5) przedstawiono wykresy ugięć pomierzonych wzdłuż długości elementów. Nie zaobserwowano różnic pomiędzy liniami ugięcia belki wykonanej z betonu zwykłego w stosunku do belek wykonanych z BWW.

3.2.4. Deflections

Graphs of deflections measured along the elements are presented in the Appendix (Tables 4.1 to 4.5). No difference was noticed between the deflection lines of ordinary concrete beams in comparison with HSC beams.

3.2.5. Zarysowanie

Pierwsze rysy pojawiały się na ogół w okolicy środka rozpiętości badanej belki i początkowo przebiegały pionowo do połowy jej wysokości. W tablicy 6 podano sprzężone ze sobą wartości momentów rysujących: skręcającego T_{cr} i zginającego M_{cr} . W przypadku belek wykonanych z BWW momenty rysujące mają na ogół większe wartości niż w przypadku belki wykonanej z betonu zwykłego.

3.2.5. Cracking

First cracks appeared usually around mid-span of the investigated beam and progressed at first vertically to its mid-depth. Mutually conjugate values of cracking moments: torsion T_{cr} and bending M_{cr} are presented in Table 6. In cases of HSC beams cracking moments have usually higher values than in ordinary concrete beams.

W załączniku w tabelach 5.6 – 5.10 podano wartości rozwarcia rys pomierzone w poszczególnych etapach obciążenia. Przedstawiono tam również obraz zarysowania wszystkich belek serii II: BTM-35, BTM-70/1, BTM-70/2, BTM-70/3 i BTM-70/4.

Values of crack widths measured at various stages of loading are given in Tables 5.6 to 5.10 of the Appendix. Crack patterns for all series II beams are also presented there: BTM-35, BTM 70/1, BTM 70/2, BTM-70/3 and BTM 70/4.

Tabl. 6. Zarysowanie oraz nośność belek serii II

Table. 6. Cracking and load carrying capacity of sreies II beams

Symbol belki Beam marking	T_{cr}/M_{cr} [kNm]	T_{max}^{test} [kNm]	$M_{correspond}^{test}$ [kNm]	$V_{correspond}^{test}$ [kN]
BT-35 / BTM-35	6,0 / 15,8	22,8	59,9	57,0
BT-70/1 / BTM-70/1	6,0 / 15,8	26,4	69,3	66,0
BT-70/2 / BTM-70/2	9,0 / 23,6	25,8	67,7	64,5
BT-70/3 / BTM-70/3	7,5 / 19,7	27,0	70,9	67,5
BT-70/4 / BTM-70/4	9,0 / 23,6	27,0	70,9	67,5

Analizując obraz zarysowania powierzchni bocznej belki BTM-70/1 można podzielić ją na trzy obszary: środkowy pomiędzy siłami F_M , w którym oddziałują moment zginający M i moment skręcający T oraz dwa obszary przypodporowe pomiędzy siłami F_M i F_T , gdzie dochodzi oddziaływanie siły poprzecznej $V = F_M$.

W obszarze środkowym w strefie rozciąganej obserwuje się rysy prostopadłe do osi podłużnej belki, natomiast w górnej części belki występują rysy nachylone pod kątem na ogół 45° . W tym z obszarów przypodporowych, w którym na rozpatrywanej powierzchni bocznej belki sumują się naprężenia główne wywołane momentem skręcającym z naprężeniami głównymi od zginania i ścinania – obraz rys jest podobny jak w przypadku belki poddanej czystemu skręcaniu (rys. 5.2 – 5.5 Załącznika).

Przebiegające pod kątem 45° rysy ukośne wydzielają kilka ściskanych krzyżulców betonowych. Drugi z obszarów przypodporowych znajdujących się na tej samej powierzchni bocznej belki można podzielić na dwie równe części. Obraz rys w części sąsiadującej z siłą F_M , gdzie moment zginający ma jeszcze stosunkowo dużą, chociaż stale malejącą wartość – jest niemal identyczny jak w obszarze środkowym. W drugiej części, natomiast, rysy są nachylone pod kątem 60° - 80° w stosunku do osi podłużnej belki.

Wszystkie belki zniszczyły się w strefie przypodporowej. Na przykład w belce BTM-70/1 rysą niszczącą była rysa numer 30.

3.2.6. Nośność

Analizę nośności badanych belek przeprowadzono posługując się najbardziej popularnym modelem zastępczej kratownicy przestrzennej [14, 15, 19]. Wykorzystując podane w [15] wzory na nośność na skręcanie:

$$T_{Rd2} = 2A_k \frac{A_{sw}}{s_w} f_{yw} \operatorname{ctg} \Theta \quad (1)$$

oraz na ścinanie:

$$V_{Rd3} = \frac{A_{sw}}{s_w} f_{yw} z \operatorname{ctg} \Theta \quad (2)$$

w których:

- A_k - powierzchnia wydzielonego przekroju cienkościennego,
- f_{yw}, A_{sw}, s_w - odpowiednio: granica plastyczności, powierzchnia przekroju oraz osiowy rozstaw strzemion,
- z - ramię sił wewnętrznych,

In analysing crack patterns on the side face of beam BTM 70/1, three regions can

be distinguished: central, between forces F_M , in which bending moment M and torsion moment T are acting, and two support regions between forces F_M and F_T , where shear force $V = F_M$ is acting in addition to above moments.

In the tension area of the middle region, cracks perpendicular to the longitudinal axis can be noticed, while in the upper part of the beam, cracks inclined an angle of (usually) 45° are present. In the support region where principal stresses due to torsion moment sum up with principal stresses due to bending and shear - crack pattern on the side surface of the beam is similar to that in beams subjected to pure torsion (Fig. 5.2 to 5.5 of the Appendix).

Cracks inclined at 45° are separating several compressed concrete braces.

The second of the support regions, situated on the same side face of the beam, can be divided into two equal parts. Crack pattern in the half adjoining force F_M , where the value of bending moment is still relatively great (but diminishing), is almost identical with the central part. On the other hand, in the second half, the cracks are inclined at an angle of 60° - 80° to the longitudinal axis of the beam.

All beams failed in the support region. In beam BTM-70/1, for instance, the crack that failed was crack No 30.

3.2.6. Load carrying capacity

Strength analysis of the investigated beams was carried out using the most widespread model - the equivalent space truss [14,15,19]. Using the formulae for load carrying capacity and for torsion given in [15]:

$$T_{Rd2} = 2A_k \frac{A_{sw}}{s_w} f_{yw} \operatorname{ctg} \Theta \quad (1)$$

and for shear:

$$V_{Rd3} = \frac{A_{sw}}{s_w} f_{yw} z \operatorname{ctg} \Theta \quad (2)$$

where:

- A_k - area of the separated thin-wall section,
- f_{yw}, A_{sw}, s_w - plastic limit, cross-sectional area, centre-to-centre stirrup spacing, respectively,
- z - lever arm of inner forces,
- Θ - angle of inclination to the longitudinal axis of beam of the concrete strut braces in the equivalent space frame.

- Θ - kąt nachylenia betonowych ściskanych krzyżulców zastępczej kratownicy przestrzennej w stosunku do osi podłużnej belki.

Metodą kolejnych przybliżeń obliczono wartość kąta Θ , przy której uzyskano obliczeniową nośność równą nośności otrzymanej z badań. W belkach z betonu wysokowartościowego tę zgodność uzyskano przy $\Theta=30^\circ$, zaś w belce z betonu zwykłego przy $\Theta=32^\circ$. Wynika stąd, że zarówno w jednym, jak i drugim przypadku obliczeniowe wartości kąta nachylenia krzyżulców ściskanych różnią się dość zdecydowanie od wartości uzyskanych w badaniach.

4. WNIOSKI

Z jednej strony mała liczba zbadanych belek nakazuje dużą ostrożność, z drugiej natomiast stosunkowo mały rozrzut otrzymanych wyników pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- Wyniki badań potwierdziły tezę, że przy czystym skręcaniu, o sztywności belek po zarysowaniu decyduje ilość i rodzaj zbrojenia, a nie wytrzymałość betonu.
- Zaprezentowane badania wykazały stosunkowo duży wpływ ścinania na ubytek sztywności na skręcanie belek poddanych jednoczesnemu oddziaływaniu momentu zginającego i skręcającego oraz siły poprzecznej. Wpływ ten był większy w przypadku belki wykonanej z betonu zwykłego niż w przypadku belek wykonanych z BWW.
- W obszarze jednoczesnego działania skręcania i ścinania w przedstawionych badaniach, uzyskano znaczną rozbieżność pomiędzy obliczoną według Eurocode 2 (około 30°), a rzeczywistą (około 45°) wartością kąta nachylenia ściskanych krzyżulców zastępczej kratownicy przestrzennej w stosunku do osi podłużnej belki.

Using successive approximations method such value of angle Θ was determined, at which the calculated load capacity was equal to that obtained in tests. In HSC, beams the compatibility was obtained at $\Theta=30^\circ$, while for ordinary concrete beams this occurred at $\Theta=32^\circ$. The conclusion is, that in both cases the values of inclination angles of compressed braces were differing decidedly from the values obtained in tests.

4. CONCLUSIONS

On the one hand small number of tested beams imposes careful approach, on the other - relatively small dispersion of the obtained results allows to formulate following inferences:

- Test results confirmed the thesis that in pure torsion, stiffness of beams after cracking depends on amount and type of reinforcement and not on concrete strength.
- Presented test results proved a relatively high influence of shear on loss of torsion stiffness in beams subjected to the action of torsion and bending moments as well as shear force. This influence was greater in case of ordinary concrete beams than in HSC beams.
- Within the region of simultaneous action of torsion and shear in tested beams large discrepancy was observed between the calculated value of angle of inclination (to the longitudinal axis of beam) of the compressed concrete braces in equivalent space truss, calculated according to Eurocode 2 (about 30°) and the experimental results (about 45°).

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Lampert P., Bruchwiderstand von Stahlbetonbalken unter Torsion und Biegung, Institut für Baustatik, ETH Zürich, Bericht Nr 26, Zürich, Januar 1970
- [2] Grob J., Thürlimann B., Wölb-torsionsversuche an Stahlbetonbalken mit offenem Querschnitt, Institut für Baustatik, ETH Zürich, Bericht Nr 6506-6, Zürich, Dezember 1974
- [3] Lampert P., Lüchinger P., Thürlimann B., Torsionsversuche an Stahl- und Spannbetonbalken, Institut für Baustatik, ETH Zürich, Bericht Nr 6506-6, Zürich, Februar 1971
- [4] Lampert P., Thürlimann B., Torsionsversuche an Stahlbetonbalken, Institut für Baustatik, ETH Zürich, Bericht Nr 6506-2, Zürich, Juni 1968
- [5] Lüchinger P., Thürlimann B., Versuche an Stahlbetonbalken unter Torsion, Biegung und Querkraft, Institut für Baustatik, ETH Zürich, Bericht Nr 6506-5, Zürich, Juli 1973
- [6] Leonhardt F., Schelling G., Torsionsversuche an Stahlbetonbalken, Universität Stuttgart, DAfSt., H. 239, Berlin 1974
- [7] Thürlimann B., Lüchinger P., Steifigkeit von gerissenen Stahlbetonbalken unter Torsion und Biegung, Institut für Baustatik, ETH Zürich, Bericht Nr 46, Zürich, Juni 1973
- [8] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., Odkształcalność doraźna betonów wysokiej wytrzymałości, XLIV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i KN PZITB, Poznań-Krynica, 1998
- [9] Kosińska A., Nowakowski A.B., Badania żelbetowych belek wykonanych z betonu wysokowartościowego poddanych czystemu skręcaniu, XLII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Kraków-Krynica, 1996
- [10] Kosińska A., Nowakowski A.B., Badania belek z betonu wysokowartościowego poddanych jednoczesnemu skręcaniu i zginaniu, XLIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Kraków-Krynica, 1997
- [11] Abdall A.M., Kamińska M.E., Doświadczalne badania żelbetowych słupów z betonu o wysokiej wytrzymałości, XLIII, Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Poznań-Krynica, 1997
- [12] Rasmussen L.J., Baker G., Torsion in Reinforced Normal and High-Strength Concrete Beams – Part 1: Experimental Test Series, ACI Structural Journal, January-February 1995
- [13] Fasil F.W., Sabri A.S., Samir A.A., Ali A.A., Prestressed High-Strength Concrete Beams under Torsion, Journal of Structural Engineering, September 1995
- [14] Eurocode nr 2, Projektowanie konstrukcji żelbetowych i sprężonych. Część 1: Reguły ogólne i reguły projektowania budynków. Wersja robocza, czerwiec 1992
- [15] PN-B-03264:1999, Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [16] Godycki - Ćwirko T., Morfologia rys w konstrukcjach z betonu, Rozprawy Naukowe nr 13, Białystok 1992
- [17] Ciężak T., Rozwarcie rys w skręcanych elementach żelbetowych, Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej 218, Budownictwo 40, Lublin 1990
- [18] High Strength Concrete, State of the Art Report, FIP/CEB Bulletin d'Information 197, 1990
- [19] Godycki - Ćwirko T., Mechanika betonu, Arkady 1982

Załącznik

Wyniki pomiarów

Badania zostały wykonane w Laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego. Uczestniczyli w nich pracownicy:

tech. Adam Frączak
tech. Wojciech Klichowski
tech. Andrzej Szcześniak

W druku podano tylko przykładowe tablice zawierające wyniki badań. 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 Chair of Concrete Structures. The participants were also the following:

tech. Adam Frączak
tech. Wojciech Klichowski
tech. Andrzej Szcześniak

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

BTM - 70 / 1

TABLICA 7.1

ODKSZTAŁCENIA BETONU NA BOCZNEJ POWIERZCHNI BELKI
W KIERUNKU PODŁUŻNYM W OSI PRĘTÓW ZBROJENIA
GÓRNEGO.

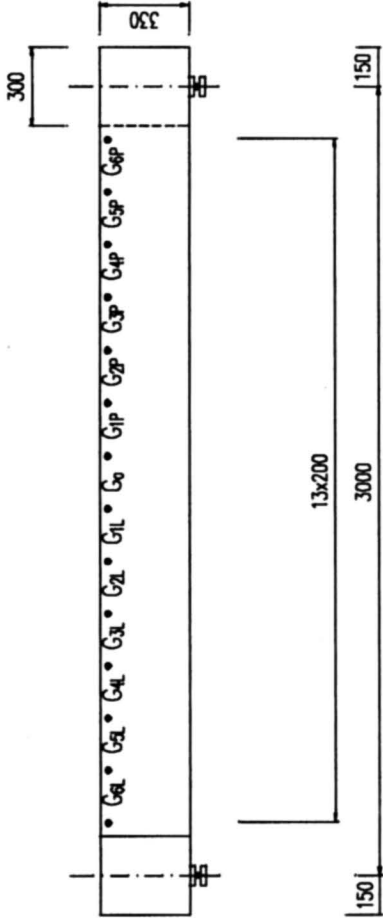
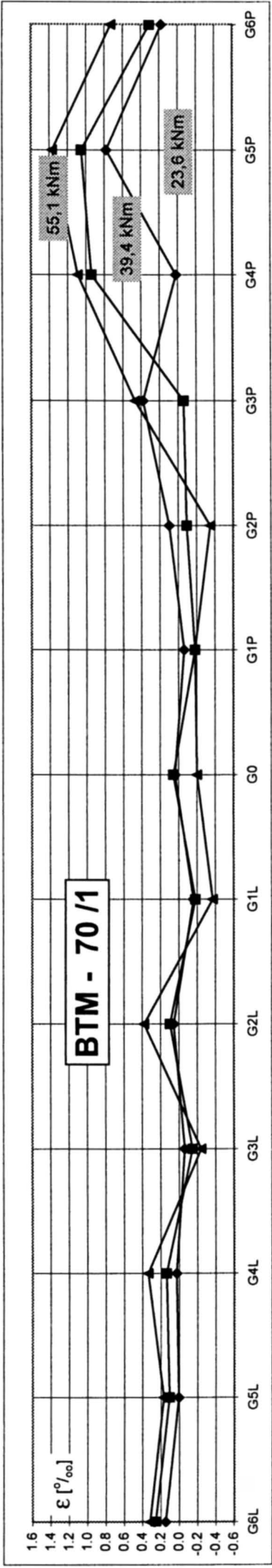


TABLE 7.1

CONCRETE STRAINS ON THE SIDE SURFACE OF THE BEAM
IN THE LONGITUDINAL DIRECTION ALONG THE AXIS
OF THE UPPER BARS.

M	T	Odkształcenia (strains)														ε _c śr		
		G _{6L}	G _{5L}	G _{4L}	G _{3L}	G _{2L}	G _{1L}	G ₀	G _{1P}	G _{2P}	G _{3P}	G _{4P}	G _{5P}	G _{6P}	G _{6L} - G _{3L}	G _{2L} - G _{2P}	G _{3P}	G _{6P}
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.9	3	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
23.6	9	0.15	0.01	0.03	-0.06	0.06	-0.16	0.04	-0.06	0.10	0.38	0.02	0.78	0.18	0.03	0.00	0.00	0.34
39.4	15	0.15	0.02	0.03	-0.16	0.02	-0.26	0.01	0.21	0.00	0.48	0.02	0.98	0.22	0.01	0.00	0.00	0.43
0	0	0.26	0.25	0.17	-0.10	0.18	-0.17	0.22	0.42	0.24	0.68	0.16	0.68	0.27	0.14	0.18	0.18	0.45
39.4	15	0.26	0.11	0.14	-0.14	0.10	-0.18	0.06	-0.18	-0.09	-0.06	0.94	1.05	0.31	0.09	-0.06	0.09	0.56
47.3	18	0.26	0.10	0.10	-0.20	0.09	-0.22	0.02	-0.24	-0.14	-0.02	0.84	1.14	0.37	0.07	-0.10	0.07	0.58
55.1	21	0.32	0.17	0.34	-0.24	0.38	-0.37	-0.20	-0.18	-0.35	0.47	1.09	1.37	0.73	0.15	-0.14	0.15	0.92



BT M- 70 / 1

TABLICA 7.2

ODKSZTAŁCENIA BETONU NA BOCZNEJ POWIERZCHNI BELKI
W KIERUNKU PODŁUŻNYM W OSI PRĘTÓW ZBROJENIA
USYTUOWANYCH W POŁOWIE WYSOKOŚCI BELKI.

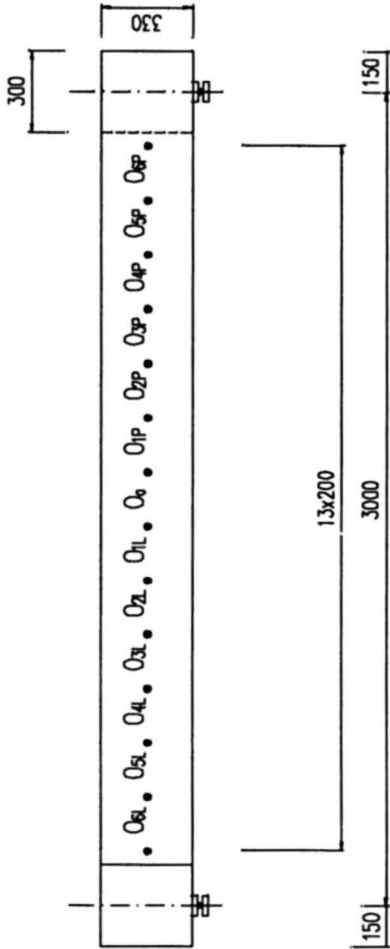
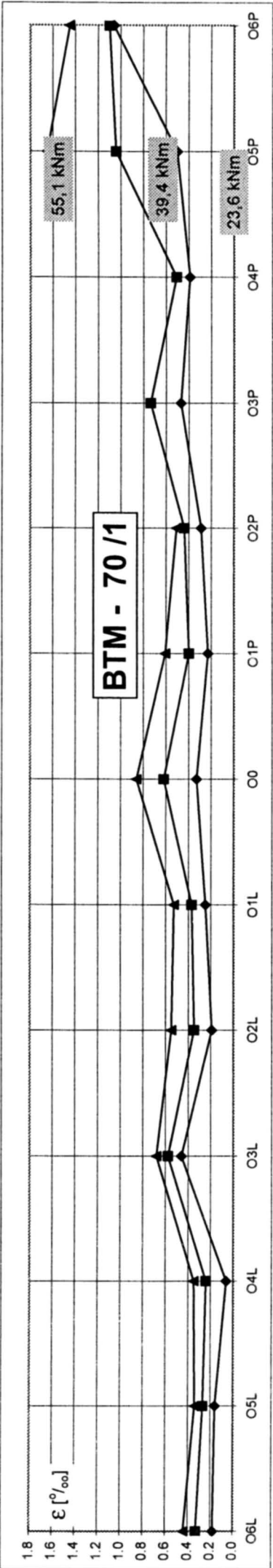


TABLE 7.2

CONCRETE STRAINS ON THE SIDE SURFACE OF THE BEAM
IN THE LONGITUDINAL DIRECTION ALONG THE AXIS
OF THE BARS IN THE MIDDLE OF THE BEAM'S DEPTH

M	T	Odkształcenia (strains)											ϵ_c śr				
kNm	kNm	O _{6L}	O _{5L}	O _{4L}	O _{3L}	O _{2L}	O _{1L}	O ₀	O _{1P}	O _{2P}	O _{3P}	O _{4P}	O _{5P}	O _{6P}	O _{6L} - O _{3L}	O _{2L} - O _{2P}	O _{5P} - O _{6P}
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.9	3	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.03	0.03	0.00	0.07	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.03	0.02
23.6	9	0.18	0.16	0.06	0.46	0.19	0.25	0.33	0.23	0.29	0.47	0.39	0.50	1.06	0.22	0.26	0.61
39.4	15	0.18	0.18	0.06	0.54	0.26	0.34	0.46	0.32	0.37	0.68	0.53	0.74	1.26	0.24	0.35	0.80
0	0	0.26	0.22	0.17	0.42	0.18	0.24	0.34	0.26	0.28	0.42	0.35	0.49	0.68	0.27	0.26	0.49
39.4	15	0.33	0.27	0.24	0.58	0.35	0.37	0.62	0.40	0.44	0.74	0.51	1.04	1.10	0.36	0.44	0.85
47.3	18	0.34	0.30	0.26	0.63	0.40	0.40	0.70	0.47	0.49	0.93	0.59	1.22	1.17	0.38	0.49	0.98
55.1	21	0.44	0.34	0.35	0.68	0.55	0.53	0.86	0.61	0.51	-	-	1.65	1.45	0.45	0.61	1.55



BT M- 70 / 1

TABLICA 7.3

ODKSZTAŁCENIA BETONU NA BOCZNEJ POWIERZCHNI BELKI
W KIERUNKU PODŁUŻNYM W OSI PRĘTÓW ZBROJENIA DOLNEGO

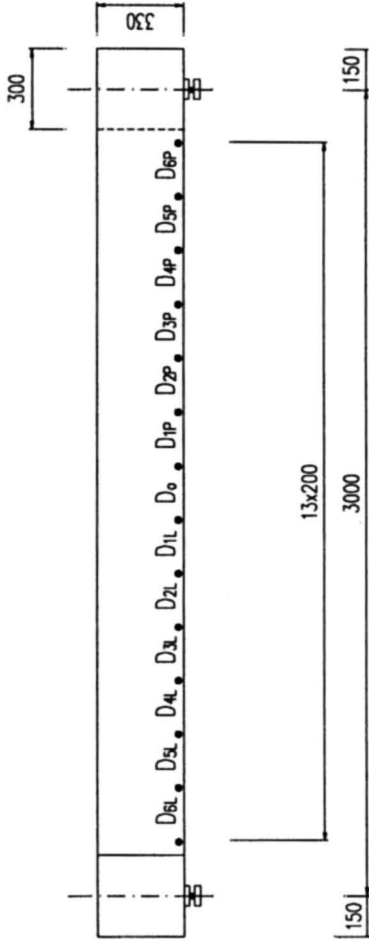
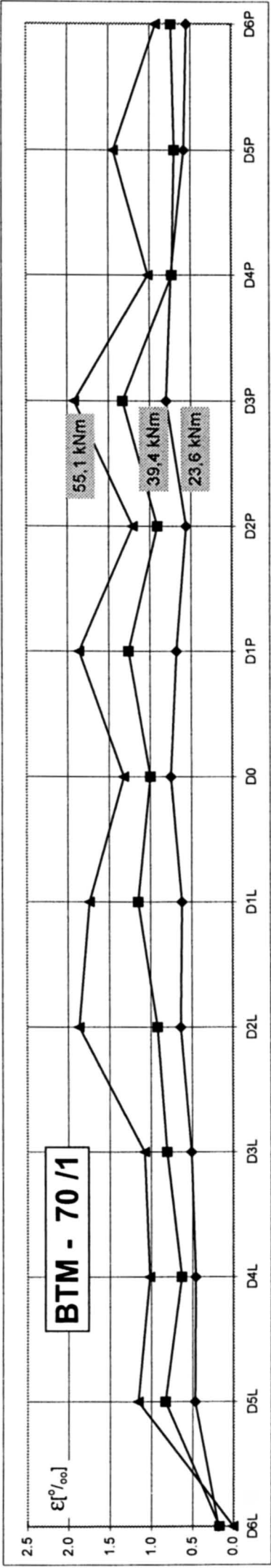


TABLE 7.3

CONCRETE STRAINS ON THE SIDE SURFACE OF THE BEAM
IN THE LONGITUDINAL DIRECTION ALONG THE AXIS
OF BOTTOM REINFORCEMENT.

M	T	Odkształcenia (strains)														ϵ_c [‰]			$\epsilon_{c\text{ śr}}$		
kNm	kNm	D _{6L}	D _{5L}	D _{4L}	D _{3L}	D _{2L}	D _{1L}	D ₀	D _{1P}	D _{2P}	D _{3P}	D _{4P}	D _{5P}	D _{6P}	D _{6L} -D _{3L}	D _{2L} -D _{2P}	D _{5P} -D _{6P}				
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
7.9	3	0.02	0.00	0.03	0.02	0.02	0.05	0.06	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.04	0.01				
23.6	9	0.18	0.47	0.46	0.51	0.64	0.62	0.75	0.68	0.56	0.80	0.74	0.58	0.55	0.41	0.65	0.67				
39.4	15	0.22	0.67	0.67	0.73	0.95	0.97	1.07	1.05	0.88	1.19	0.73	0.82	0.76	0.57	0.98	0.88				
0	0	0.10	0.38	0.23	0.24	0.36	0.31	0.28	0.41	0.21	0.49	0.26	0.39	0.36	0.24	0.31	0.38				
39.4	15	0.17	0.83	0.63	0.81	0.92	1.15	1.00	1.26	0.91	1.33	0.73	0.70	0.74	0.61	1.05	0.88				
47.3	18	0.18	0.96	0.85	1.01	1.29	1.37	1.18	1.49	1.08	1.54	0.84	0.98	0.86	0.75	1.28	1.06				
55.1	21	-	1.16	1.02	1.08	1.87	1.74	1.32	1.86	1.21	1.92	1.02	1.44	0.93	0.82	1.60	1.33				



BTM - 70 / 1

TABLICA 7.4

ODKSZTAŁCENIA BETONU NA BOCZNEJ POWIERZCHNI BELKI
W KIERUNKU POPRZECZNYM W OSIACH STRZEMIION

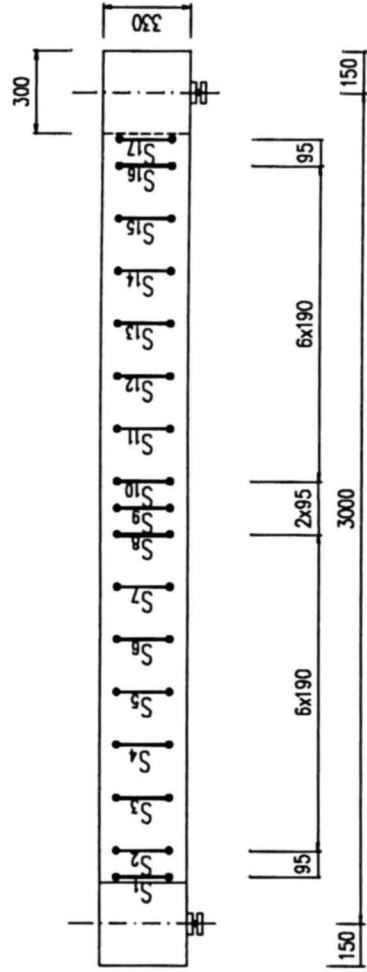
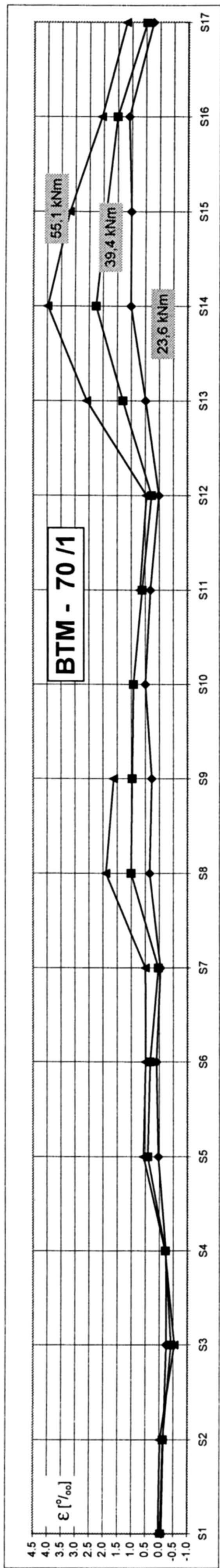


TABLE 7.4

CONCRETE STRAINS ON THE SIDE SURFACE OF THE BEAM
IN THE TRANSVERSE DIRECTION AT THE AXIS OF STIRRUPS.

M	T	Odkształcenia (strains) ϵ_c [10^{-3}]																	ϵ_c śr			
kNm	kNm	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅	S ₁₆	S ₁₇	S ₁ - S ₆	S ₇ - S ₁₁	S ₁₂ - S ₁₇	
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
7.9	3	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
23.6	9	-0.08	-0.14	-0.25	-0.24	0.04	0.10	-0.04	0.35	0.27	0.50	0.32	0.02	0.49	1.02	1.02	1.10	0.24	-0.10	0.28	0.65	
39.4	15	-0.06	-0.17	-0.35	-0.33	0.06	0.12	-0.06	0.47	0.44	0.71	0.34	0.22	0.77	1.37	1.38	1.40	3.00	-0.12	0.38	1.36	
0	0	-0.02	-0.06	-0.17	-0.07	0.24	0.18	0.00	0.59	0.44	0.57	0.34	0.14	0.68	1.22	1.22	0.02	0.26	0.02	0.39	0.41	
39.4	15	-0.04	-0.12	-0.42	-0.22	0.41	0.33	0.04	1.01	0.97	0.92	0.61	0.28	1.30	2.26	1.91	1.51	0.47	-0.01	0.71	1.29	
47.3	18	-0.05	-0.12	-0.47	-0.25	0.46	0.37	0.08	1.24	1.16	-	0.62	0.35	1.48	2.53	2.17	1.35	0.54	-0.01	0.78	1.40	
55.1	21	0.04	-0.02	-0.54	-0.21	0.56	0.49	0.50	1.90	1.63	-	0.69	0.46	2.59	3.98	3.21	2.07	1.19	0.05	1.18	2.25	



BTM - 70 / 1

TABLICA 7.5

ODKSZTAŁCENIA BETONU NA BOCZNEJ POWIERZCHNI BELKI
W KIERUNKU UKOŚNYM ($\alpha=45^\circ$ - ROZCIĄGANIE)

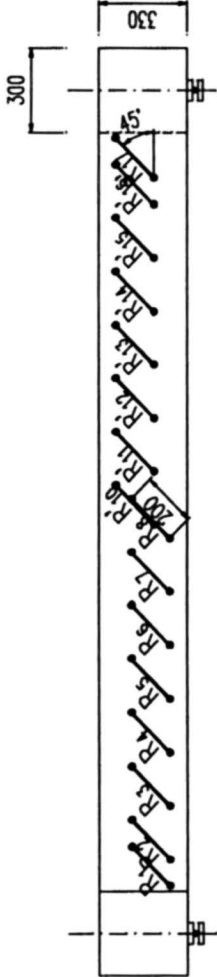
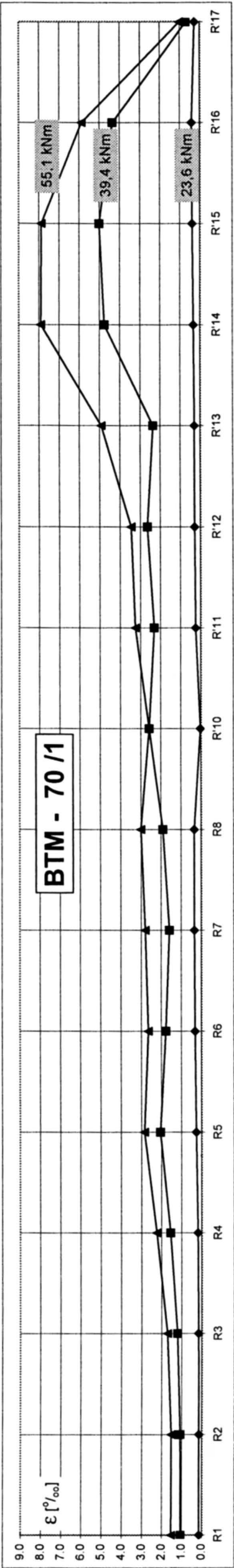


TABLE 7.5

CONCRETE STRAINS ON THE SIDE SURFACE OF THE BEAM
IN THE DIAGONAL DIRECTION ($\alpha=45^\circ$ -TENSION)

M	T	Odkształcenia (strains)															ϵ_c [‰]					$\epsilon_{c\acute{s}r}$				
kNm	kNm	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R' ₁₀	R' ₁₁	R' ₁₂	R' ₁₃	R' ₁₄	R' ₁₅	R' ₁₆	R' ₁₇	R' ₁ - R' ₅	R' ₆ - R' ₁₂	R ₁₃ - R ₁₇						
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
7.9	3	0.04	0.04	0.02	0.02	0.20	0.06	0.05	0.06	0.05	0.02	0.04	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.00	0.06	0.05	0.02					
23.6	9	0.14	0.15	0.16	0.18	0.26	0.32	0.34	0.34	0.02	0.25	0.29	0.29	0.33	0.38	0.41	0.27	0.18	0.26	0.34						
39.4	15	0.77	0.8	0.86	0.34	1.32	1.23	1.19	1.30	1.78	1.62	2.30	1.87	3.46	3.90	3.92	0.60	0.82	6.00	2.75						
0	0	0.56	0.6	0.63	0.74	1.14	1.94	0.75	0.95	1.50	1.27	1.54	1.23	2.63	2.66	2.28	0.28	0.73	1.33	1.82						
39.4	15	1.07	1.08	1.22	1.56	2.06	1.78	1.60	1.91	2.58	2.32	2.65	2.36	4.76	5.02	4.36	0.70	1.40	2.14	3.44						
47.3	18	1.18	1.19	1.38	1.76	2.28	1.96	1.90	2.18	2.58	2.46	2.94	2.68	5.33	5.70	4.88	0.78	1.56	2.34	3.87						
55.1	21	1.55	1.53	1.71	2.24	2.85	2.65	2.80	3.01	2.58	3.26	3.46	4.92	7.91	7.88	5.88	1.03	1.98	2.96	5.52						



BTM - 70 / 1

TABLICA 7.6

ODKSZTAŁCENIA BETONU NA BOCZNEJ POWIERZCHNI BELKI
W KIERUNKU UKOŚNYM ($\alpha=45^\circ$ - ŚCISKANIE)

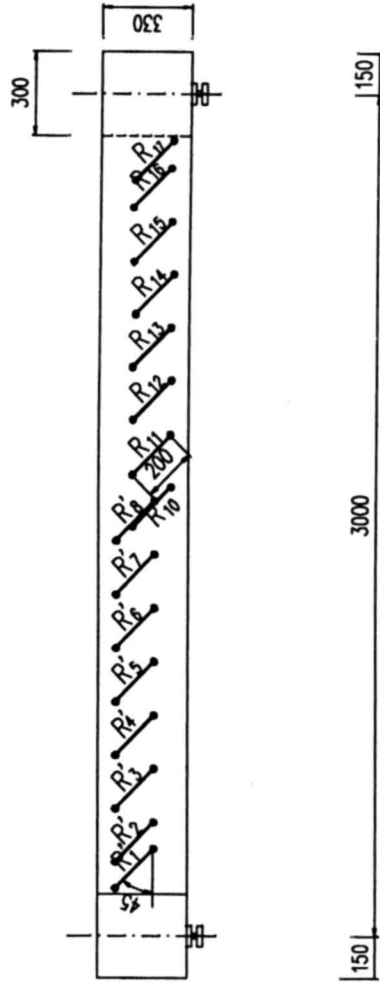
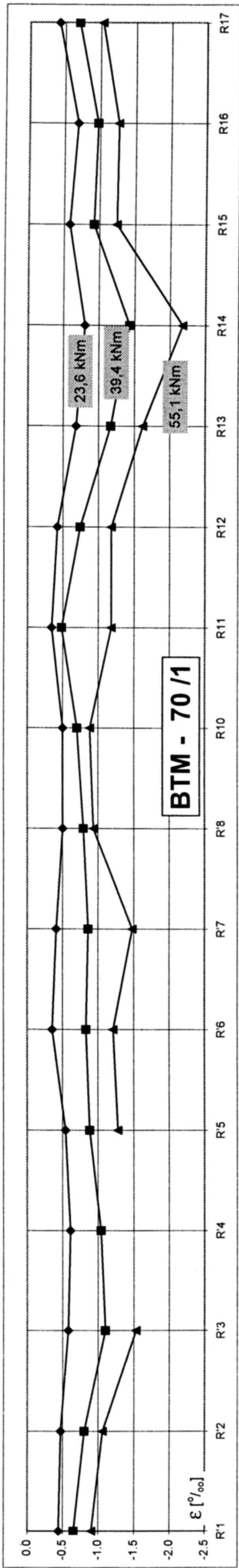


TABLE 7.6

CONCRETE STRAINS ON THE SIDE SURFACE OF THE BEAM
IN THE DIAGONAL DIRECTION ($\alpha=45^\circ$ -COMPRESSION)

M	T	Odkształcenia (strains) ϵ_c [‰]															$\epsilon_{c\ 45^\circ}$			
kNm	kNm	R' ₁	R' ₂	R' ₃	R' ₄	R' ₅	R' ₆	R' ₇	R' ₈	R' ₁₀	R' ₁₁	R' ₁₂	R' ₁₃	R' ₁₄	R' ₁₅	R' ₁₆	R' ₁₇	R' ₁ -R' ₅	R' ₆ -R' ₁₂	R' ₁₃ -R' ₁₇
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.9	3	-0.04	-0.04	-0.05	0.00	-0.04	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03	-0.02	-0.06	-0.04	-0.03	-0.04	-0.03	0.00	0.00	-0.03	-0.03
23.6	9	-0.44	-0.47	-0.58	-0.61	-0.54	-0.35	-0.41	-0.50	-0.50	-0.34	-0.42	-0.68	-0.80	-0.58	-0.69	-0.42	-0.53	-0.42	-0.63
39.4	15	-0.61	-0.57	-0.82	-0.84	-0.75	-0.66	-0.58	-0.67	-0.66	-0.50	-0.62	-0.97	-1.00	-0.80	-0.91	-0.60	-0.72	-0.62	-0.86
0	0	-0.25	-0.30	-0.39	-0.43	-0.38	-0.31	-0.31	-0.57	-0.38	-0.31	-0.32	-0.52	-0.68	-0.40	-0.44	-0.28	-0.35	-0.37	-0.46
39.4	15	-0.65	-0.80	-1.10	-1.04	-0.88	-0.83	-0.86	-0.79	-0.70	-0.48	-0.74	-1.17	-1.43	-0.92	-0.97	-0.70	-0.89	-0.73	-1.04
47.3	18	-0.74	-0.88	-1.20	-1.14	-0.98	-0.95	-0.91	-0.90	-0.75	-0.87	-0.90	-1.30	-1.62	-1.02	-1.08	-0.78	-0.99	-0.88	-1.16
55.1	21	-0.90	-1.06	-1.53	-	-1.28	-1.21	-1.48	-0.93	-0.88	-1.18	-1.18	-1.62	-2.18	-1.24	-1.26	-1.03	-1.19	-1.14	-1.47



BTM - 70 / 1

TABLICA 7.7

ODKSZTAŁCENIA BETONU NA GÓRNEJ POWIERZCHNI BELKI
W KIERUNKU PODŁUŻNYM W OSI PRĘTÓW ZBROJENIA

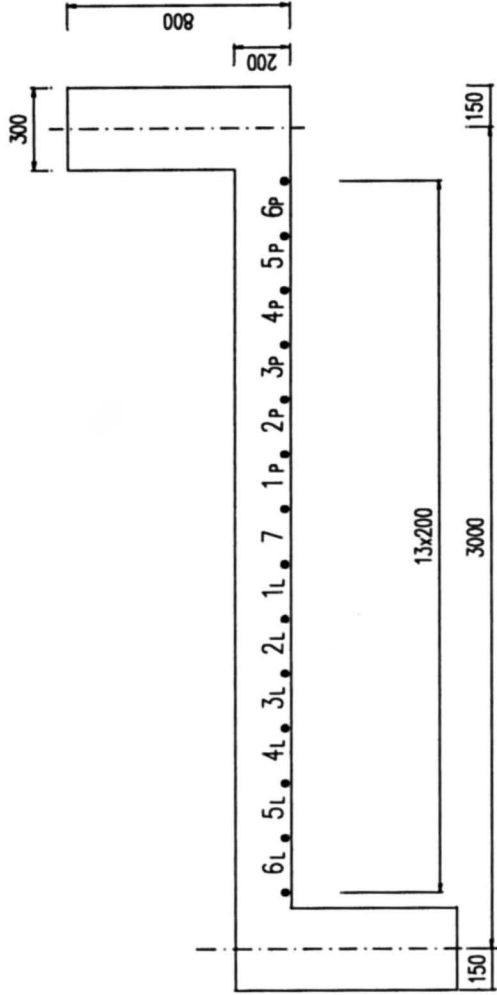
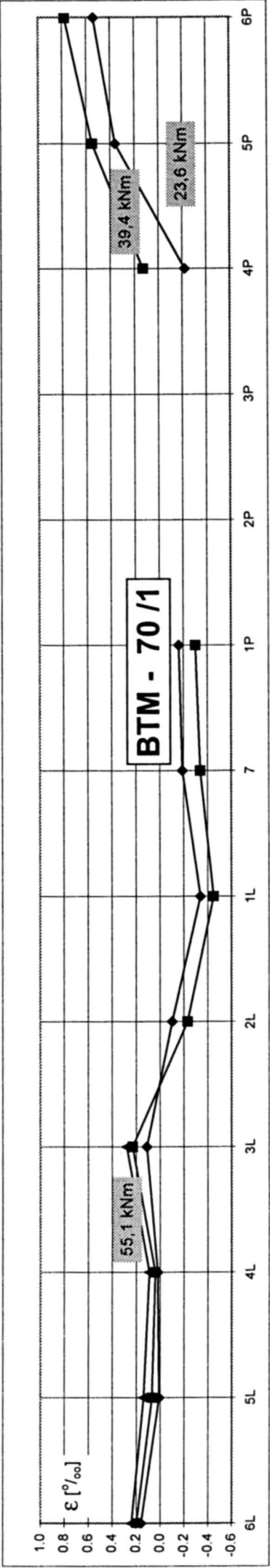


TABLE 7.7

CONCRETE STRAINS ON THE UPPER SURFACE OF THE BEAM
IN THE LONGITUDINAL DIRECTION ALONG THE AXIS
OF THE BARS

M	T	Odkształcenia (strains)											ϵ_c [‰]			$\epsilon_{c\text{śr}}$		
kNm	kNm	6 _L	5 _L	4 _L	3 _L	2 _L	1 _L	7	1 _P	2 _P	3 _P	4 _P	5 _P	6 _P	6 _L - 3 _L	2 _L - 2 _P	3 _P - 6 _P	
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
7.9	3	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	-0.01	-	-	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01	
23.6	9	0.16	0.01	0.02	0.11	-0.10	-0.34	-0.19	-0.16	-	-	-0.22	0.36	0.54	0.08	-0.20	0.23	
39.4	15	0.14	0.06	0.13	0.28	-0.30	-0.58	-0.32	-0.46	-	-	-0.34	0.45	0.67	0.15	-0.42	0.26	
0	0	0.26	0.15	0.34	0.21	-0.32	-0.26	-0.05	0.61	-	-	0.10	0.50	0.52	0.24	-0.01	0.37	
39.4	15	0.20	0.07	0.04	0.23	-0.23	-0.45	-0.34	-0.30	-	-	0.13	0.55	0.78	0.14	-0.33	0.49	
47.3	18	0.20	0.06	0.02	0.31	-	-	-	-	-	-	0.13	0.86	1.10	0.15	0.00	0.70	
55.1	21	0.24	0.14	0.09	0.28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.19	0.00	0.00	



BTM - 70 / 1

TABLICA 7.8

ODKSZTAŁCENIA BETONU NA GÓRNEJ POWIERZCHNI BELKI
W KIERUNKU PODŁUŻNYM W OSI PRĘTÓW ZBROJENIA

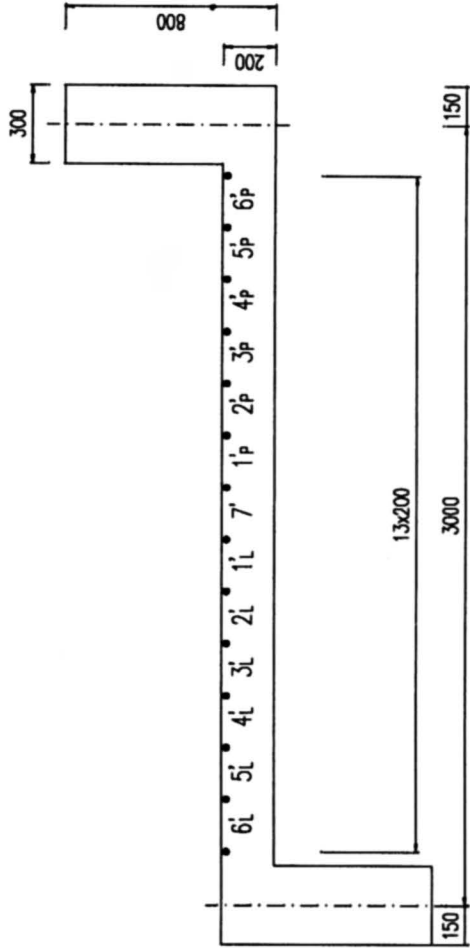
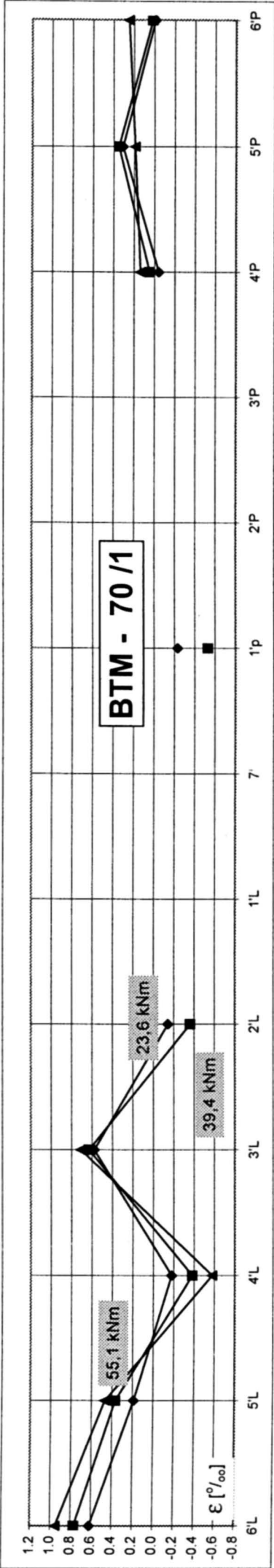


TABLE 7.8

CONCRETE STRAINS ON THE UPPER SURFACE OF THE BEAM
IN THE LONGITUDINAL DIRECTION ALONG THE AXIS
OF THE BARS

M	T	Odkształcenia (strains)														$\epsilon_{c\ sr}$			
		6'L	5'L	4'L	3'L	2'L	1'L	7'	1'p	2'p	3'p	4'p	5'p	6'p	6'L - 3'L	2'L - 2'p	3'p - 6'p		
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
7.9	3	0.00	0.00	-0.04	0.07	-0.01	-0.01	0.01	-0.01	-	-	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01		
23.6	9	0.62	0.19	-0.18	0.58	-0.14	-	-	-0.23	-	-	-0.04	0.31	-0.01	0.30	-0.19	0.09		
39.4	15	0.86	0.19	-0.31	0.46	-0.34	-	-	-0.55	-	-	-0.16	0.32	-0.04	0.30	-0.45	0.04		
0	0	0.61	0.41	-0.03	0.95	0.25	-	-	0.37	-	-	0.38	0.46	0.14	0.49	0.31	0.33		
39.4	15	0.77	0.37	-0.38	0.63	-0.36	-	-	-0.53	-	-	0.05	0.35	0.02	0.35	-0.45	0.14		
47.3	18	0.82	0.40	-0.42	0.61	-	-	-	-	-	-	0.27	0.03	0.02	0.35	0.00	0.11		
55.1	21	0.95	0.47	-0.58	0.71	-	-	-	-	-	-	0.14	0.19	0.25	0.39	0.00	0.19		



BTM - 70 / 1

TABLICA 7.9

ODKSZTAŁCENIA BETONU NA GÓRNEJ POWIERZCHNI BELKI
W KIERUNKU POPRZECZNYM W OSIACH STRZEMION

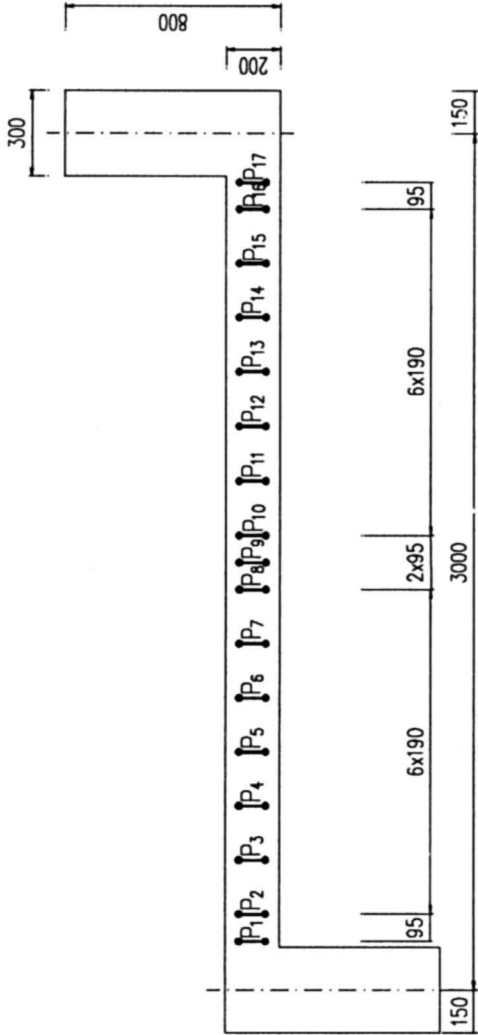
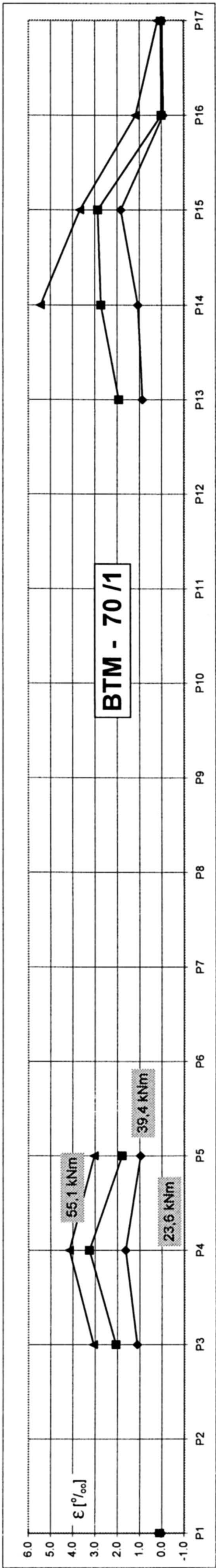


TABLE 7.9

CONCRETE STRAINS ON THE UPPER SURFACE OF THE BEAM
IN THE TRANSVERSE DIRECTION ALONG THE AXIS OF THE STIRRUPS

M	T	Odkształcenia (strains)																	ε_c [‰]			
kNm	kNm	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₅	P ₁₆	P ₁₇	P ₁ -P ₆	P ₇ -P ₁₁	P ₁₂ -P ₁₇	
0	0	0.02	-	0.00	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	-	0.00
7.9	3	0.02	-	0.00	0.06	-0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	-	0.00
23.6	9	0.02	-	1.11	1.63	0.96	-	-	-	-	-	-	-	0.86	1.07	1.83	-0.07	-0.02	1.24	-	-	0.73
39.4	15	0.04	-	1.43	2.15	1.21	-	-	-	-	-	-	-	1.29	1.03	2.39	0.00	0.00	1.61	-	-	0.94
0	0	0.02	-	1.03	1.92	1.11	-	-	-	-	-	-	-	1.05	1.53	1.65	0.06	0.02	1.36	-	-	0.86
39.4	15	0.10	-	2.07	3.26	1.79	-	-	-	-	-	-	-	1.93	2.73	2.87	0.02	0.04	2.41	-	-	1.52
47.3	18	0.02	-	2.27	3.48	1.95	-	-	-	-	-	-	-	-	3.26	3.18	0.04	0.02	2.57	-	-	1.63
55.1	21	0.18	-	3.07	4.16	3.04	-	-	-	-	-	-	-	-	5.45	3.68	1.17	0.18	3.48	-	-	2.62



BTM-70/1

TABLICA 3.7
KĄTY SKRĘCENIA

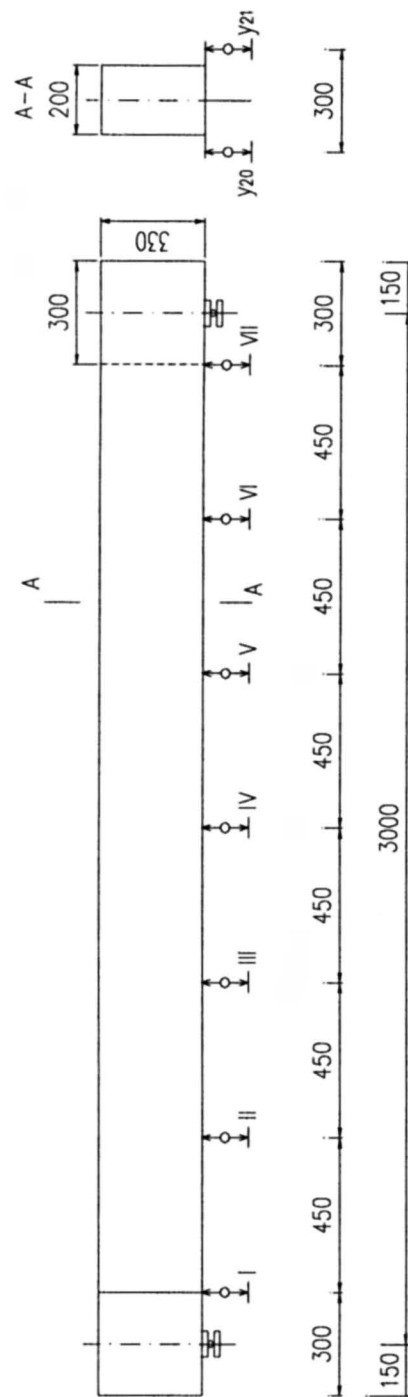
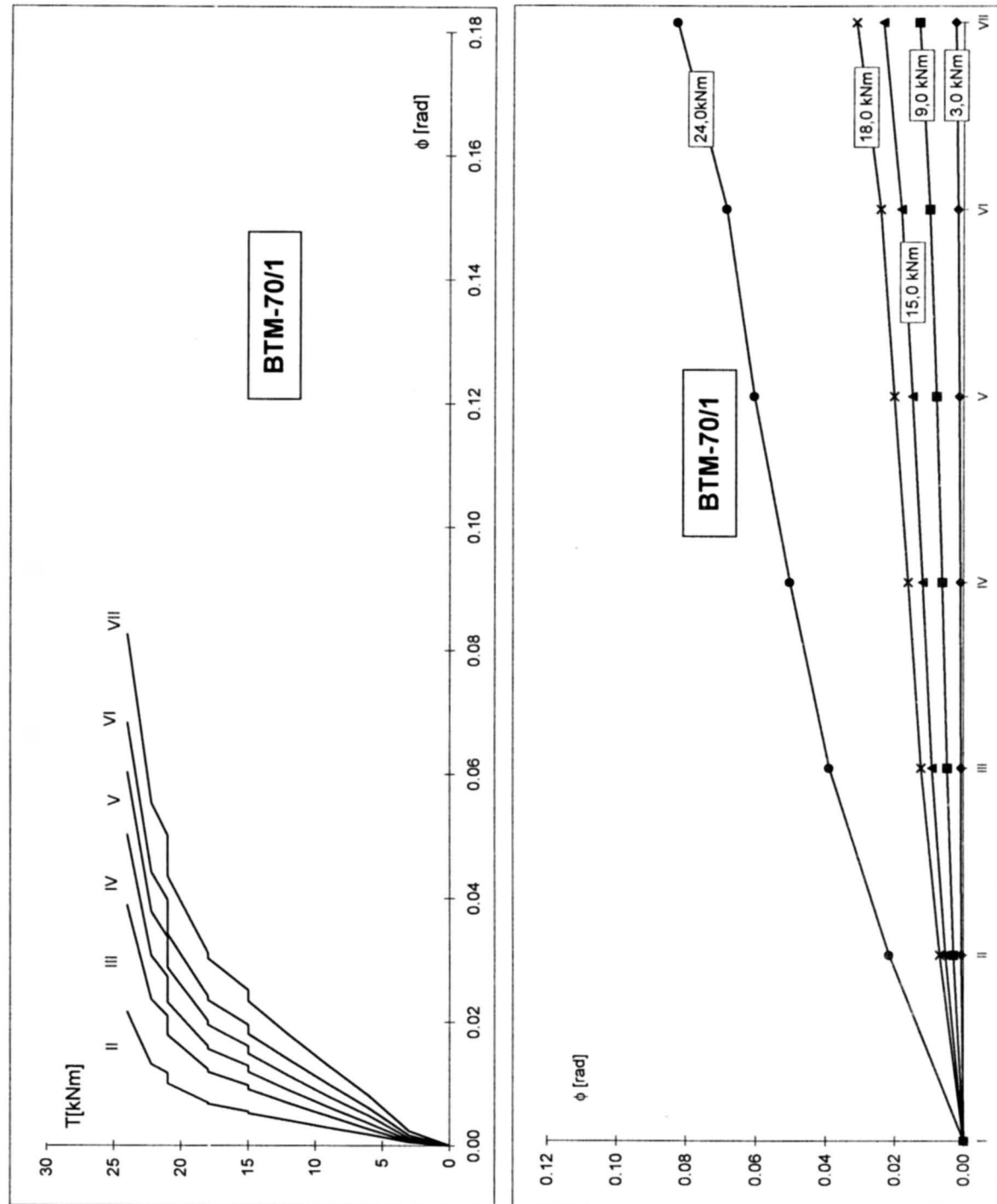


TABLE 3.7
THE ANGLE OF TWIST

M [kNm]	T [kNm]	Kąty skrećenia (the angle of twist) [rad]						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
0	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
7.9	3.0	0.0000	0.0006	0.0007	0.0009	0.0012	0.0017	0.0024
15.8	6.0	0.0000	0.0018	0.0027	0.0036	0.0048	0.0061	0.0081
23.6	9.0	0.0000	0.0029	0.0048	0.0062	0.0079	0.0099	0.0129
31.5	12.0	0.0000	0.0041	0.0069	0.0090	0.0113	0.0139	0.0180
39.4	15.0	0.0001	0.0053	0.0091	0.0119	0.0149	0.0181	0.0233
47.3	18.0	0.0001	0.0069	0.0123	0.0161	0.0201	0.0241	0.0311
55.1	21.0	0.0001	0.0100	0.0179	0.0231	0.0287	0.0342	0.0435
58.3	22.2	0.0002	0.0117	0.0209	0.0273	0.0337	0.0397	0.0501
63.0	24.0	0.0000	0.0216	0.0388	0.0502	0.0602	0.0682	0.0826



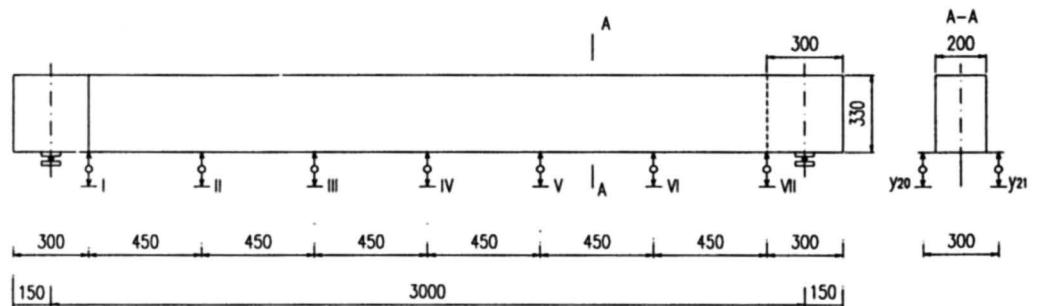
BTM-70/1

TABLICA 4.2

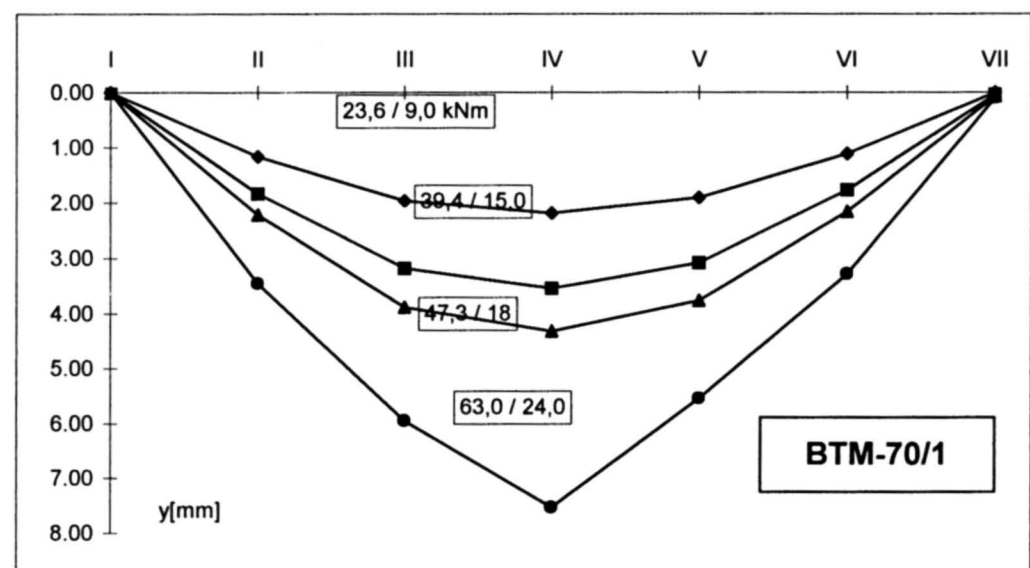
UGIĘCIA

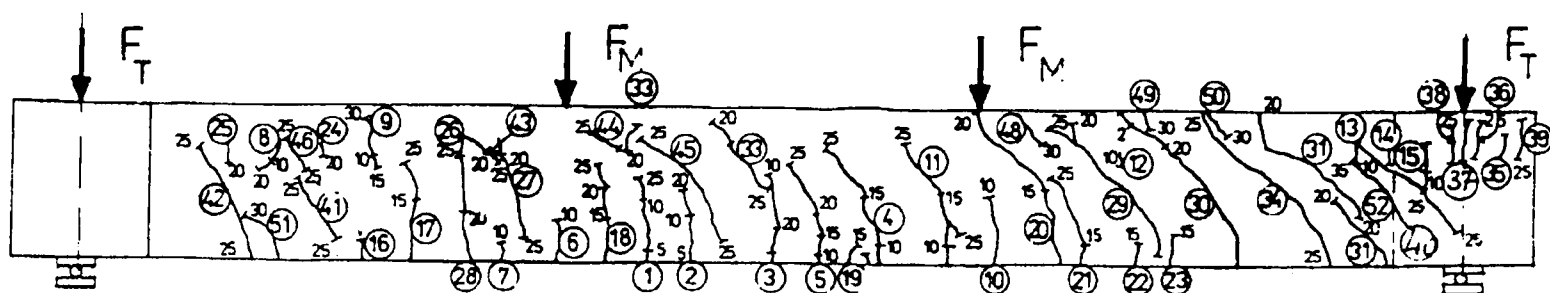
TABLE 4.2

DEFLECTIONS



M [kNm]	T [kNm]	Ugięcia (deflections) [mm]						
		I (14+15)/2	II (16+17)/2	III (18+19)/2	IV (20+21)/2	V (22+23)/2	VI (24+25)/2	VII (26+27)/2
0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.9	3.0	0.00	0.44	0.73	0.82	0.73	0.46	0.02
15.8	6.0	0.00	0.79	1.31	1.46	1.29	0.75	0.01
23.6	9.0	0.00	1.16	1.96	2.18	1.90	1.11	0.00
31.5	12.0	0.00	1.49	2.56	2.83	2.47	1.44	0.02
39.4	15.0	0.00	1.81	3.13	3.47	3.03	1.74	0.04
39.4	15.0	0.00	1.83	3.18	3.54	3.08	1.76	0.04
23.6	9.0	0.00	1.23	2.15	2.40	2.10	1.21	0.03
7.9	3.0	0.00	0.51	0.88	1.00	0.87	0.49	0.00
23.6	9.0	0.01	1.22	2.10	2.32	2.03	1.17	0.01
39.4	15.0	0.01	1.83	3.19	3.53	3.08	1.76	0.05
23.6	9.0	0.01	1.22	2.13	2.37	2.06	1.21	0.04
7.9	3.0	0.00	0.50	0.87	1.00	0.86	0.48	0.01
23.6	9.0	0.01	1.22	2.10	2.33	2.02	1.17	0.03
39.4	15.0	0.01	1.83	3.18	3.52	3.07	1.76	0.05
23.6	9.0	0.01	1.21	2.12	2.36	2.06	1.19	0.05
7.9	3.0	0.00	0.51	0.89	1.02	0.87	0.50	0.02
23.6	9.0	0.01	1.22	2.11	2.34	2.04	1.18	0.03
39.4	15.0	0.01	1.84	3.20	3.55	3.09	1.77	0.05
23.6	9.0	0.01	1.22	2.14	2.39	2.08	1.20	0.05
7.9	3.0	0.00	0.51	0.89	1.03	0.88	0.50	0.02
23.6	9.0	0.01	1.23	2.12	2.35	2.04	1.18	0.03
39.4	15.0	0.02	1.84	3.21	3.56	3.09	1.78	0.05
23.6	9.0	0.01	1.22	2.13	2.38	2.07	1.20	0.05
7.9	3.0	0.00	0.51	0.89	1.03	0.88	0.51	0.01
23.6	9.0	0.01	1.24	2.13	2.36	2.06	1.20	0.03
39.4	15.0	0.01	1.85	3.22	3.57	3.10	1.79	0.06
39.4	15.0	0.02	1.85	3.23	3.60	3.13	1.79	0.06
47.3	18.0	0.02	2.17	3.82	4.24	3.68	2.11	0.08
47.3	18.0	0.01	2.21	3.88	4.32	3.76	2.15	0.07
55.1	21.0	0.01	2.64	4.66	5.17	4.51	2.58	0.12
55.1	21.0	0.01	2.70	4.80	5.30	5.00	2.65	0.15
58.3	22.2	0.01	2.88	5.13	5.67	4.90	2.82	0.16
63.0	24.0	0.01	3.45	5.95	7.53	5.54	3.28	0.10

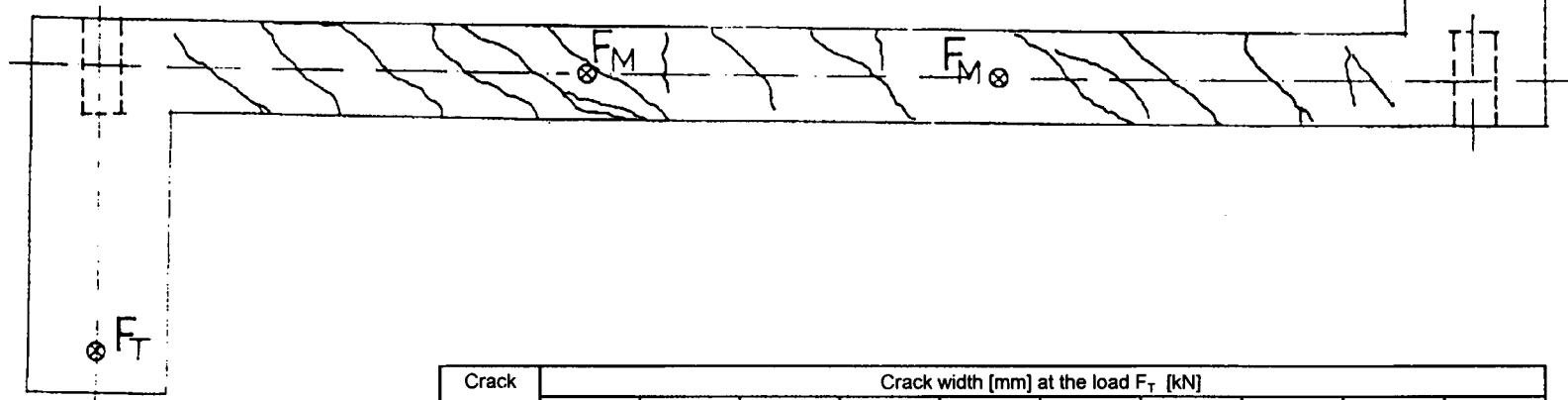




BTM-70/1

TABELA 5.7
OBRAZ RYS

TABLE 5.7
PATTERN OF CRACKS



Crack Nr	Crack width [mm] at the load F_T [kN]									
	5	10	15	20	25	25	25	25	30	35
1	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04	0.07	0.07	0.07	0.10	0.15
2	0.02	0.05	0.05	0.05	0.12	0.12	0.07	0.07	0.15	0.20
3	0.01	2.00	0.05	0.05	0.10	0.18	0.18	0.25	0.30	0.40
4	0.02	0.02	0.03	0.05	0.15	0.20	0.20	0.25	0.30	0.35
5		0.01	0.03	0.07	0.10	0.12	0.10	0.10	0.15	0.15
6		0.03	0.03	0.05	0.08	0.10	0.10	0.10	0.15	0.15
7		0.03	0.03	0.04	0.05	0.08	0.05	0.07	0.12	0.15
8		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08	0.08	0.10	0.10
9		0.08	0.10	0.12	0.12	0.15	0.15	0.15	0.20	0.20
10		0.04	0.04	0.05	0.10	0.15	0.15	0.15	0.15	0.20
11		0.01	0.02	0.05	0.12	0.12	0.15	0.20	0.25	0.25
12		0.05	0.06	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.07	0.07
13		0.01	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03
14		0.01	0.03	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03
15		0.05	0.06	0.08	0.10	0.10	0.15	0.15	0.15	0.15
16			0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.05	0.05
17			0.02	0.04	0.07	0.12	0.15	0.15	0.20	0.20
18			0.03	0.03	0.07	0.08	0.10	0.12	0.15	0.15
19			0.02	0.04	0.10	0.10	0.07	0.07	0.07	0.07
20			0.03	0.07	0.18	0.25	0.03	0.35	0.35	0.35
21			0.02	0.03	0.18	0.25	0.30	0.40	0.40	0.40
22			0.01	0.03	0.05	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03
23			0.02	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
24				0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
25				0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
26				0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
27				0.01	0.10	0.10	0.10	0.15	0.20	0.20
28				0.02	0.07	0.10	0.12	0.12	0.15	0.18
29				0.07	0.30	0.30	0.35	0.40	0.40	0.45
30				0.05	0.25	0.30	0.35	0.40	0.50	0.85
31				0.15	0.50	0.55	0.50	0.50	0.50	0.50
32				0.05	0.07	0.07	0.05	0.05	0.07	0.07
33				0.06	0.12	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
34					0.35	0.35	0.35	0.40	0.65	0.70
35					0.10	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
36					0.15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
37					0.12	0.15	0.18	0.18	0.20	0.20
38					0.12	0.15	0.18	0.20	0.20	0.25
39					0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.07
40					0.15	0.02	0.18	0.22	0.25	0.30
41					0.05	0.10	0.15	0.20	0.20	0.20
42					0.05	0.10	0.12	0.15	0.18	0.20
43						0.10	0.10	0.12	0.15	0.20
44						0.07	0.08	0.10	0.15	0.15
45						0.12	0.20	0.20	0.20	0.20
46							0.15	0.20	0.26	0.25
48									0.15	0.30
49									0.10	0.30
50									0.25	0.30
51									0.10	0.10
52										0.10

1. Czkwianianc A., Kamińska M., *Badania monolitycznych węzłów żelbetowych ram portalowych [Tests of RC Portal Frames Corners]*, Ulańska D., *Badania jednoprzęsłowych tarcz ze wspornikami [Research on Single Span Deep Beams with Brackets]*. Badania doświadczalne elementów i konstrukcji żelbetowych, Z. 1, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej, Łódź 1991.
2. Czkwianianc A., Kamińska M., *Badania monolitycznych ram portalowych obciążonych siłami pionowymi lub poziomymi [Tests of RC Portal Frames Subjected to Vertical or Lateral Force]*. Badania doświadczalne elementów i konstrukcji żelbetowych, Z. 2, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Łódzkiej, Łódź 1993.
3. Urban T., *Nośność na przebicie w aspekcie proporcji boków słupa [Punching Capacity in Aspect of Column Cross Section Ratio]*. Badania doświadczalne elementów i konstrukcji żelbetowych, Z. 3, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, Łódź 1994.
4. Ulańska D., *Przenoszenie sił ścinających przez zbrojenie osiowo rozciągane w zarysowanych przekrojach elementów żelbetowych [Transfer of Shear Forces Through the Axially Tension Reinforcement in Cracked Reinforced Concrete Sections Experimental Investigations]*. Badania doświadczalne elementów i konstrukcji żelbetowych, Z. 4, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Łódzkiej, Łódź 1995.
5. Kozicki J., Urban T., Sitnicki M., *Badania modelu stropu płytowo-słupowego poddanego działaniu obciążeń krótko i długotrwałych [Tests on Model of Slab - Column Structure Subject to Short- and Longlasting Loads]*. Badania doświadczalne elementów i konstrukcji żelbetowych, Z. 5, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Łódzkiej, Łódź 1995.
6. Czkwianianc A., *Badania doświadczalne płaskich i przestrzennych węzłów monolitycznych ustrojów prętowych [Experimental Investigations of Beam - Column Joints]*, Urban T., Kosińska A., Czkwianianc A., *Badania doświadczalne węzłów płytowo ściennych [Experimental Investigations of Slab - Wall Joints]*, Badania doświadczalne elementów i konstrukcji żelbetowych, Z. 6, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Łódzkiej, Łódź 1995.
7. Kamińska M.E., *Doświadczalne badania żelbetowych słupów ukośnie mimośrodowo ściskanych [Experimental Investigations of RC Columns under Biaxial Bending]*, Badania doświadczalne elementów i konstrukcji żelbetowych, Z. 7, Wydawnictwo Budownictwa Betonowego Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Łódzkiej, Łódź 1995
8. Kamińska M.E., *Doświadczalne badania żelbetowych elementów prętowych z betonu wysokiej wytrzymałości [Experimental research on HSC one-dimensional members]*, Badania doświadczalne elementów i konstrukcji żelbetowych, Z. 8, Wydawnictwo Budownictwa Betonowego Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Łódzkiej, Łódź 1999
9. Kamińska M.E., Kotynia R., *Doświadczalne badania żelbetowych belek wzmocnionych taśmami CFRP [Experimental research on RC beams strengthened with CFRP strips]*, Badania doświadczalne elementów i konstrukcji żelbetowych, Z. 9, Wydawnictwo Budownictwa Betonowego Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000

