

BADANIA DOŚWIADCZALNE ELEMENTÓW I KONSTRUKCJI BETONOWYCH

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

ZESZYT NR 13

Ductility and failure mode of RC Beams Strengthened for Flexure with CFRP

Odkształcalność i sposób zniszczenia żelbetowych belek wzmocnionych na zginanie materiałami CFRP

Renata Kotynia
Maria E. Kamińska

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

Department of Concrete
Structures Technical
University of Lodz, Poland

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

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

Tłumaczenie / Translation
dr inż. Renata Kotynia

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

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

ISSN 1230-6010

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

STRESZCZENIE

Badania dotyczyły mechanizmów zniszczenia żelbetowych belek wzmocnionych materiałami kompozytowymi CFRP, naklejonymi na powierzchni elementu. Wszystkie badania wykazały, że jednym z powodów zniszczenia wzmocnionego elementu może być odspojenie kompozytu, rozpoczynające się w obszarze maksymalnego momentu i postępujące w kierunku jednej z podpór. Następuje to na skutek poprzecznego nacisku betonowej otuliny stalowego zbrojenia rozciąganego na zewnętrzne zbrojenie CFRP, przy odkształceniach kompozytu rzędu 5 – 10%. Oznacza to, że wytrzymałość materiału kompozytowego może być wykorzystana w niewielkim stopniu.

Badania miały na celu sprawdzenie, czy wprowadzenie dodatkowego zbrojenia kompozytowego może opóźnić proces odspojenia kompozytu, a tym samym spowodować lepsze wykorzystanie jego nośności.

Przedmiotem badania były jednoprzęsłowe, swobodnie podparte belki żelbetowe o przekroju prostokątnym 150×300mm i rozpiętości 4200mm. Zbadano 6 belek w I serii i 4 belki w II serii. W belkach I serii zastosowano dodatkowe zbrojenie kompozytowe o kierunku włókien prostopadłym do podłużnej osi belki, w postaci mat i kształtek typu L. Badania wykazały, że takie dodatkowe zbrojenie powoduje opóźnienie procesu odspajania głównego zbrojenia kompozytowego, ale nie wpływa znacząco na wzrost nośności elementu na zginanie. Bardziej skuteczny okazał się sposób zbrojenia przyjęty w II serii, z matami CFRP o kierunku włókien równoległym do podłużnej osi belki, zwłaszcza w tym przypadku, gdy maty sięgały na boczne powierzchnie belki.

Badania potwierdziły wcześniejsze obserwacje dotyczące sposobu zniszczenia na skutek odspojenia kompozytu od powierzchni betonu.

Model obliczeniowy, w którym przyjęto zasadę zachowania płaskiego przekroju oraz zależności $\sigma - \varepsilon$ odpowiadające rzeczywistym właściwościom zastosowanych materiałów, bardzo dobrze opisuje zachowanie się wzmocnionych elementów w całym zakresie obciążenia. Umożliwia on także uwzględnienie obciążenia belki przed jej wzmocnieniem

SUMMARY

The experimental tests concerned failure modes of RC beams strengthened with externally bonded CFRP composites. Previous tests indicated that delamination of the strip from the concrete surface was one of the reasons of failure. It started in the maximum bending moment region and moved to one of the support. The reason of failure was vertical pressure of the concrete cover round the tension steel reinforcement for the external CFRP reinforcement for the CFRP strains equal 5 – 10%. It seems that the ratio of composite utilisation was very low. The aim of the tests was to check if application of the additional external reinforcement delays delamination of the bottom composite and to increase the ratio of utilisation of the CFRP strength. 6 beams of Series I and 4 beams of Series II were tested.

Single-span, simply supported RC beams with the rectangular cross section of 150×300mm and a span of 4200mm were the object of the test. Beams of Series I were strengthened with the bottom strips and additional CFRP sheets or L-shaped strips with fibres perpendicular to the longitudinal beam direction. Tests of Series I indicated that the additional external reinforcement delayed cracking of the beam, but it did not increase sufficiently the load bearing capacity of the beams. Strengthening of Series II beams by CFRP sheets with fibres parallel to the beam span was more effective, especially while the sheets were applied on the lateral sides of the beam. The tests confirmed results of previous test concerning failure modes by the CFRP delamination from the concrete surface.

Analytical model based on the plane section principle and real non-linear $\sigma - \varepsilon$ characteristic of all materials corresponded with experimental results over the entire range of loads. The model considers state of initial loading of the element before its strengthening.

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	7
2. Mechanizmy zniszczenia belek wzmocnionych na zginanie	9
2.1. Spostrzeżenia doświadczalne	9
2.2. Interpretacja obliczeniowa	10
3. Program badań	12
3.1. Założenia badawcze	12
3.2. Opis elementów	12
3.2.1. Zbrojenie i betonowanie elementów	12
3.2.2. Wzmacnianie elementów	13
3.3. Stanowisko badawcze i obciążenie	15
3.4. Pomiar	15
4. Wyniki badań	18
4.1. Materiały	18
4.1.1. Stal zbrojeniowa	18
4.1.2. Beton	18
4.1.3. Materiały kompozytowe	19
4.2. Elementy	21
4.2.1. Mechanizmy zniszczenia belek	21
4.2.2. Siły niszczące, odkształcenia i rysy	25
5. Analiza wyników badań	31
6. Posumowanie	34

Bibliografia	36
------------------------	----

Załącznik	37
---------------------	----

CONTENTS

1. Introduction	7
2. Failure modes of the strengthened beams	9
2.1. Experimental observations	9
2.2. Computational interpretation	10
3. Program of the test	12
3.1. Experimental foundations	12
3.2. Description of elements	12
3.2.1. Steel reinforcement and casting of elements	12
3.2.2. Strengthening of elements	13
3.3. Test stand and loading	15
3.4. Measurements	15
4. Test results	18
4.1. Materials	18
4.1.1. Steel reinforcement	18
4.1.2. Concrete	18
4.1.3. Composite materials	19
4.2. Elements	21
4.2.1. Failure modes of the beams	21
4.2.2. Ultimate loads, strains and cracks	25
5. Analysis of the test results	31
6. Conclusions	34

References	36
----------------------	----

Appendix	37
--------------------	----

OZNACZENIA

b	- szerokość belki
d	- wysokość użyteczna przekroju
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
f_y	- granica plastyczności stali zbrojeniowej
h	- wysokość przekroju
l	- rozpiętość belki
v	- ugięcie belki
x	- wysokość strefy ściskanej przekroju
A_p	- pole powierzchni taśmy / maty
A_s	- pole przekroju zbrojenia
A_{s1}	- pole przekroju zbrojenia rozciąganego
A_{s2}	- pole przekroju zbrojenia ściskanego
E_c	- moduł sprężystości betonu
E_p	- moduł sprężystości taśmy / maty CFRP
E_s	- moduł sprężystości stali
F	- siła obciążająca
F_s	- siła rozciągająca przenoszona przez zbrojenie stalowe
F_p	- siła rozciągająca przenoszona przez kompozyt
F_u	- obciążenie niszczące
M_R	- nośność przekroju na zginanie
κ	- krzywizna
ε	- odkształcenie
ε_c	- odkształcenie jednostkowe betonu
ε_{cu}	- graniczne odkształcenia betonu
ε_{sy}	- odkształcenie stali odpowiadające granicy plastyczności
ε_p	- odkształcenie taśmy / maty
$\varepsilon_{p,test}$	- odkształcenie taśmy / maty przy odspojeniu
ε_{pu}	- odkształcenie taśmy / maty przy zerwaniu
σ	- naprężenie

NOTATION

b	- width of a cross-section
d	- effective depth of a cross-section
f_c	- compressive strength of concrete cylinder
$f_{c,cube}$	- compressive strength of concrete cube 150×150×150 mm
$f_{ct,sp}$	- splitting tensile strength of concrete
f_p	- tensile strength of CFRP strip
f_t	- tensile strength of steel reinforcement
f_y	- yielding strength of steel reinforcement
h	- cross-section depth
l	- span of a beam
v	- deflection of a beam
x	- neutral axis depth
A_p	- cross sectional area of a strip
A_s	- cross sectional area of steel reinforcement
A_{s1}	- cross sectional area of tension steel reinforcement
A_{s2}	- cross sectional area of compression steel reinforcement
E_c	- elasticity modulus of concrete
E_p	- elasticity modulus of CFRP strip
E_s	- elasticity modulus of steel reinforcement
F	- load
F_s	- acting tensile force in the steel reinforcement
F_p	- acting tensile force in the strip / sheet
F_u	- load bearing capacity
M_R	- bending moment capacity
κ	- curvature
ε	- strain
ε_c	- compressive strain of concrete
ε_{cu}	- ultimate compressive strain of concrete
ε_{sy}	- strain of yielding steel reinforcement
ε_p	- strain of CFRP strip / sheet
$\varepsilon_{p,test}$	- strain of a strip / sheet during debonding
ε_{pu}	- ultimate strain of a strip / sheet
σ	- stress

1. WSTĘP

Materiały kompozytowe zawierające włókna węglowe (CFRP) są coraz częściej stosowane do wzmacniania konstrukcji budowlanych i inżynierskich, jako zewnętrzne zbrojenie, przyklejane do powierzchni betonu za pomocą dwuskładnikowego kleju na bazie żywicy epoksydowej. Charakterystyka fizyczna i wytrzymałościowa materiałów kompozytowych zbudowanych z włókien węglowych CFRP, aramidowych AFRP i szklanych GFRP była już wcześniej omawiana w licznych publikacjach zagranicznych np. [1,2,3,4,5] i krajowych np. [6,7,8,9,10,11,12,13].

Do wzmocnień konstrukcji budowlanych najczęściej są stosowane materiały kompozytowe wykonane z jednokierunkowo ułożonych włókien węglowych. Mogą to być płaskie laminaty (grubości 1,2 i 1,4 mm, szerokości 50÷120 mm), wiotkie maty (grubości około 0,13 mm, szerokości 300 i 600 mm) o luźno ułożonych włóknach, spiętych w poprzek specjalnymi polipropylenowymi włóknami, zapobiegającymi rozproszeniu włókien węglowych, oraz kształtki (grubości 1,2 mm, szerokości 40 mm i długości boków 200÷1000 mm), wykonane jako kątowe laminaty o prostokątnych ramionach [14,15,16].

Zastosowanie wzmocnienia w postaci zewnętrznego zbrojenia kompozytowego uwarunkowane jest wytrzymałością podłoża betonowego, która nie może być niższa od 1,5 MPa (w próbie na odrywanie metodą "pull-off"). Efektywność wzmocnienia zależy także od ścisłego przestrzegania reżimów technologicznych, obejmujących zarówno przygotowanie powierzchni podłoża jak i samych kompozytów.

Szczegółową analizę ograniczonej skuteczności wzmocnienia taśmami CFRP ze względu na wadliwe przygotowanie podłoża oraz zawodność strefy zakotwienia taśm CFRP w zarysowanych belkach przeprowadzono w [17].

Liczba praktycznych zastosowań tej techniki wzmacniania rośnie nie tylko za granicą, ale również i w kraju, dzięki prostocie technologicznej i szybkości realizacji. Dotyczy to zwłaszcza konstrukcji inżynierskich, w tym mostowych i przemysłowych, które powinny być wzmacniane bez wyłączenia obiektu z ruchu lub przy wyłączeniu nie dłuższym niż kilka dni [18,19,20,21]. Nieco mniejszą liczbę aplikacji odnotowano w obiektach budownictwa ogólnego, ze względu na ograniczenia związane z warunkami użytkowania – przewidywane temperatury nie mogą przekraczać 50°C. Wymaganą odporność ogniową elementu można natomiast zapewnić przez zastosowanie odpowiednio dobranych wykładzin ogniochronnych [22].

Równocześnie z upowszechnieniem tej techniki wzmocnień, prowadzone są prace badawcze mające na celu określenie efektywności wzmocnienia i opracowanie wytycznych do projektowania. Podstawowe kierunki badań materiałów i złożonych zagadnień związanych z zachowaniem się wzmocnionych konstrukcji są omawiane m. in. w pracach [2,3,4,10,12,13].

Dotychczasowe doświadczalne badania elementów żelbetowych [10,23,23,25,26,27], wzmocnionych na zgięcie dowiodły, że zastosowanie taśm CFRP jako zbrojenia zewnętrznego doklejanego do spodu żelbetowych belek znacznie opóźnia proces zarysowania, a po zary-

1. INTRODUCTION

Composite materials based on the carbon fibres (CFRP) are more often used for strengthening building and engineering structures as an external reinforcement, bonded to concrete surface with two components epoxy resin adhesive. Physical and strength characteristics of the CFRP, AFRP and GFRP composites were discussed earlier in foreign publications e.g. [1,2,3,4,5] and national publications [6,7,8,9,10,11,12,13].

Composite materials made of one-direction fibres are the most often used for strengthening of engineering structures. They may be produced as the plane strips – laminates (thickness 1,2mm and 1,4mm; width 50mm and 120mm), flexible sheets (thickness 0,13mm and width 300mm and 600mm), with incoherent longitudinal carbon fibres sewed up with transverse polypropylene fibres. The last type of composites is made as the laminated L-shaped strips with perpendicular arms (thickness 1,2mm; width 40mm and length of the arms 200-1000mm) [14,15,16].

Strengthening with composite materials is limited by the strength of the concrete substratum which can't be lower than 1,5 MPa (in the pull-off test). Effectiveness of the strengthening is then limited by very precise technological conditions, which contain both the substrate surface preparing and composites surface as well.

Detailed analysis of the limited applications of the strengthening with CFRP strips in view of wrong preparation of the substratum and wrong the CFRP strips anchorage conditions for the cracked beams were considered in [17].

The number of practical applications of this strengthening technique increase due to technological simplicity and speed not only abroad but in the country as well. It concerns particularly engineering structures (bridges and industrial), which should be strengthened not excluding the traffic for time not longer than some days [18,19,20,21]. In regard of service conditions (temperature below 50°C) slightly less applications were carried out in civil structures. Required fire resistant of the strengthened element may be assured by suitable fire-resisting covering [22].

Simultaneously with disseminating of this strengthening method, the experimental tests have been carried out in order to determine the effectiveness of strengthening and working up the design guidelines. Basic directions of the material tests and complex problems connected with strengthened structures were discussed in [2,3,4,10,12,13].

Recent research of RC elements strengthened for flexure [10,23,24,25,26,27] proved that CFRP strips application as the outside reinforcement bonded to the bottom surface of the beam, sufficiently delayed the cracking moment and mitigated the course of cracking. Decisive

sowaniu ogranicza rozwój i szerokość rys. Decydujący wpływ na sztywność takich elementów ma rodzaj materiałów kompozytowych oraz sposób i miejsce ich przyklejenia [28,29,30].

W laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej od roku 1996 prowadzone są prace badawcze żelbetowych belek wzmocnionych taśmami, matami i kształtkami kompozytowymi CFRP [23,30,31], ze względu na zginanie i ścinanie.

Badania doświadczalne dowiodły, że żelbetowe elementy wzmocnione na zginanie za pomocą zewnętrznego zbrojenia kompozytowego CFRP niszczą się zawsze na skutek odspojenia (delaminacji) tego materiału od powierzchni elementu (o ile o nośności nie decyduje strefa ściskana). Stopień wykorzystania wytrzymałości kompozytu jest przy tym niewielki, rzędu 15-30%, w zależności od przyczyny odspojenia tego zewnętrznego zbrojenia.

Kontynuacją dotychczasowych badań, omówionych szczegółowo w pracy [9], są badania 10 jednoprzęsłowych, wolnopodpartych belek żelbetowych przedstawione w tym opracowaniu. Belki wzmocniono materiałami CFRP ze względu na zginanie. Celem badań było sprawdzenie możliwości osiągnięcia wyższego stopnia wykorzystania wytrzymałości kompozytu dzięki wprowadzenie innych układów zewnętrznego zbrojenia kompozytowego.

Badania wykonano w ramach projektu badawczego nr 8 T07E 006 21, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

influence of the types of materials and a way of strengthening on the stiffness of the elements were shown in [28,29,30].

The research on RC beams strengthened for flexure and shear with CFRP strips, sheets and L-shaped strips has been carried out at the Department of Concrete Structures since 1996 [23,30,31].

The experimental tests indicated that failure of RC elements strengthened for flexure with external CFRP reinforcement is always caused by delamination of the strips from the concrete surface. The ratio of composite's exhaustion was only 15-30%, depending on the cause of delamination.

The research of 10 single-span, simply supported RC beams strengthened for flexure with CFRP composites is continuation of the previous test discussed in [9]. The results of the test are shown below. The aim of the test was to obtain higher exhaustion of the composite strength due to the application of different strengthening kinds of the external composite reinforcement.

The Research Project No 8 T07E 006 21 was supported by the State Committee for Scientific Research.

2. MECHANIZMY ZNISZCZENIA BELEK WZMOCNIONYCH NA ZGINANIE

2.1. Spostrzeżenia doświadczalne

Z dotychczasowych badań żelbetonowych belek wzmocnionych na zginanie za pomocą taśm CFRP, przeprowadzonych w Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej wynika, że do zniszczenia belek dochodzi zawsze na skutek odspojenia taśmy CFRP. Oczywiście możliwe jest także zniszczenie elementu na skutek zmiążdżenia betonu w strefie ściskanej, oznacza to jednak nadmierny stopień wzmocnienia elementu i nie będzie dalej rozważane.

Odspojenie materiału kompozytowego ma charakter gwałtowny i nie jest wcześniej sygnalizowane np. przez narastanie przemieszczeń czy rozwój rys.

W badaniach, prowadzonych na wolnopodpartych belkach obciążonych dwiema siłami skupionymi, wyróżniono dwa mechanizmy zniszczenia różniące się miejscem występowania i obrazem odspojenia zewnętrznego zbrojenia kompozytowego.

Pierwszy z nich, oznaczony jako typ „P”, miał miejsce w strefie przypodporowej, w pobliżu końca taśmy wzmacniającej (Rys. 2.1.a). Taśma odspajała się na krótkim odcinku obejmującym strefę przypodporową, nie osiągając punktu przyłożenia siły obciążającej belkę. Towarzyszył temu gwałtowny przyrost szerokości rozwarcia ukośnej rysy w pobliżu końca taśmy i postępująca utrata przyczepności betonu do zbrojenia w sąsiedztwie tej rysy. Płaszczyzna odspojenia przebiegała wzdłuż zbrojenia zwykłego, a taśma CFRP odspajała się wraz z betonową otuliną.

Przy drugim sposobie zniszczenia, oznaczonym jako typ „Z”, taśma odspajała się na znacznie dłuższym odcinku, obejmującym zarówno strefę przypodporową jak i obszar czystego zginania, między siłami obciążającymi (Rys. 2.1.b). Odspojenie zewnętrznego zbrojenia rozpoczynało się w obszarze czystego zginania, w sąsiedztwie pionowej rysy i postępowało w kierunku jednej z podpór. Płaszczyzna odspojenia przebiegała częściowo w warstwie zaprawy klejowej i częściowo w otulinie zbrojenia głównego.

Z pomiarów odkształceń taśmy, dokonywanych na odcinku czystego zginania wynika, że w chwili odspojenia odkształcenia zbrojenia kompozytowego były wyraźnie mniejsze niż graniczne, odpowiadające wytrzymałości

2. FAILURE MODES OF THE STRENGTHENED BEAMS

2.1. Experimental observations

Previous tests carried out on reinforced concrete beams strengthened with CFRP strips indicated that failure of the beams was always resulted by delamination of the strip. Failure of the beam by concrete crushing in the compression zone is obviously possible. It means that the strengthening ratio is too high and this mode of failure will not be further discussed.

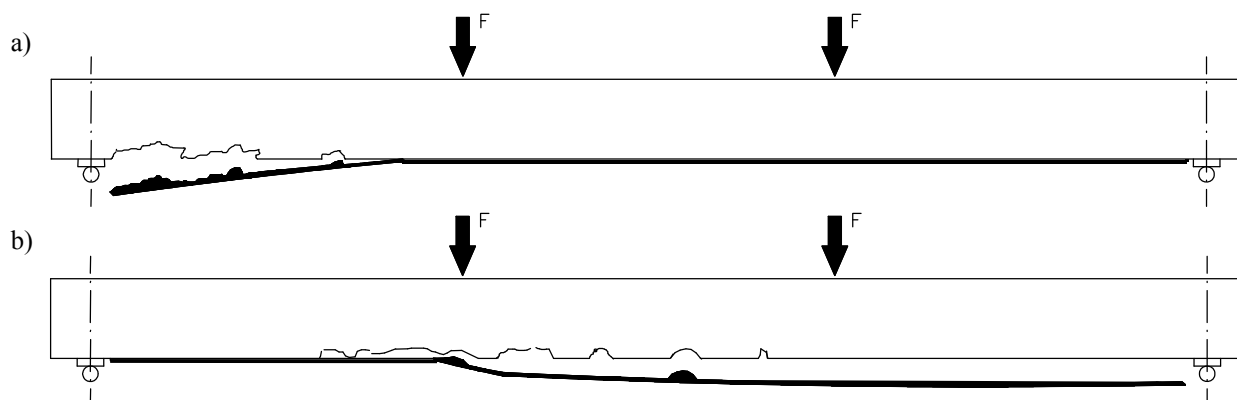
CFRP debonding appears abruptly without any previous signals e.g. increasing of deflections or the cracking extension.

Two modes of failure differed in location and view were observed in the tests of the single span, simply supported four point loaded RC beams strengthened for flexure.

The first one called “P” was located in the support region, close to the end of the CFRP strip (Fig. 2.1.a). The strip debonded on the short interval including the support region only and did not reach the place where the loading point was located. The sudden failure started just after occurring inclined cracks with the sufficient width, located close to the end of the strip. The plane of delamination initiated along the ordinary steel reinforcement, and CFRP strip debonded with the deep concrete cover.

The second mode of failure called “Z” started in the pure bending region close to the vertical crack and moved in direction to one of the supports. The strip debonded on longer interval including the pure bending region as well as the support region (Fig. 2.1.b). The plane of the strip’s delamination initiated partially in thin adhesive layer and concrete cover as well.

The strip’s strain measurements in the pure bending segment were sufficiently lower than ultimate strains, especially for “P” mode of failure. In this case the maximum strains measured in the pure bending region did not



Rys. 2.1. Sposoby zniszczenia belek wzmocnionych taśmami CFRP na zginanie: a) typ „P”, b) typ „Z”
Fig. 2.1. Failure modes of the beams strengthened for flexure with CFRP strips: a) “P” mode, b) “Z” mode

kompozytu, zwłaszcza w belkach, które uległy zniszczeniu w strefie przypodporowej. Przy sposobie zniszczenia typu „P” maksymalne odkształcenia taśmy CFRP, mierzone na odcinku czystego zginania nie przekraczały 3,5‰, a przy zniszczeniu typu „Z” były rzędu 6 ‰. Oznacza to, że nośność kompozytu jest wykorzystana w niewielkim stopniu, około 35%, bo graniczne odkształcenia taśm wynoszą około 17‰ [9].

Czynnikiem inicjującym proces zniszczenia w obszarze maksymalnego momentu jest poprzeczny nacisk na taśmę betonowej otuliny, odpajającej się od zbrojenia zwykłego w sąsiedztwie pionowej rysy. W przypadku wzmocnienia za pomocą mat, o sztywności poprzecznej mniejszej niż sztywność taśm, krytyczne odkształcenia w chwili odspojenia osiągają wartość 10‰ [32,39].

2.2. Interpretacja obliczeniowa

Do zniszczenia zginanych belek wzmocnionych taśmami CFRP może dojść w jednym z dwóch przekrojów krytycznych:

- w przekroju w obszarze występowania maksymalnego momentu zginającego,
- w przekroju przez koniec taśmy.

W pierwszym wypadku delaminacja rozpoczyna się w obszarze maksymalnego momentu, przy odkształceniach taśmy około 6‰. W tym wypadku przekroju przez koniec taśmy, rozciągające siły w zbrojeniu (od łącznego wpływu momentu i siły poprzecznej), nie powodują uplastycznienia stalowego zbrojenia wewnętrznego (rys. 2.2.).

exceeded 3,5‰ but for the “Z” mode of failure were about 6‰. Considering limit strains equal 17‰ it seems that the strength of the strip was utilized in low degree (about 35%) [9].

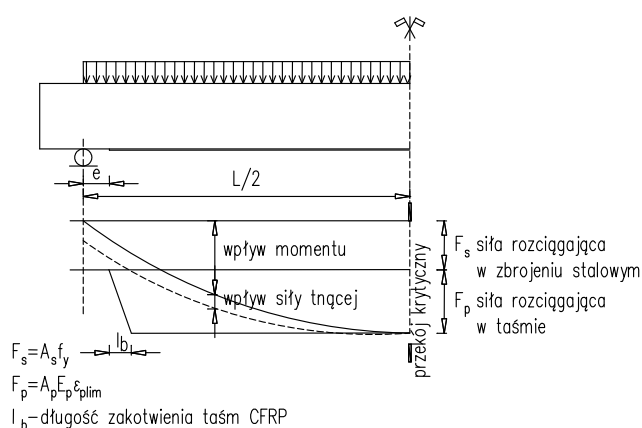
The reason of the failure by delamination in the pure bending region is vertical pressure of the concrete cover on the strip, which starts to debond from the steel reinforcement close to the vertical crack. In the case of the strengthening with flexible sheets the strains of the composite reached 10‰ [32,39].

2.2. Computational interpretation

The failure of beams strengthened with CFRP strips may occur in one of the two critical cross-sections:

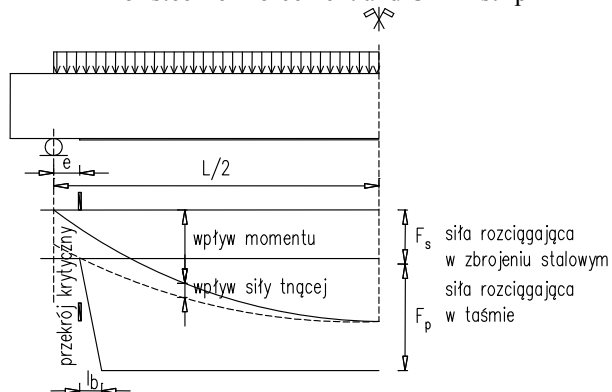
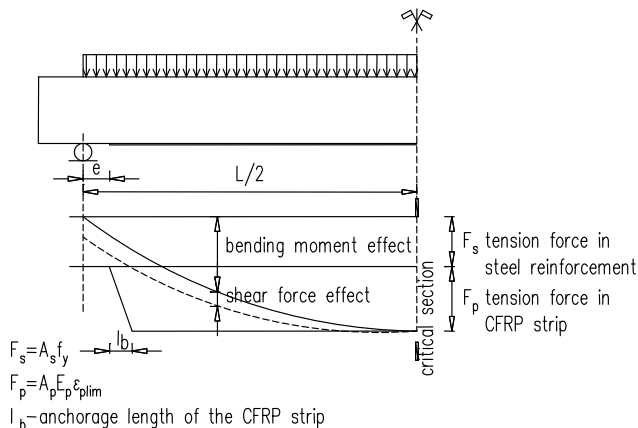
- in the region of maximum bending moment,
- in the region of the end of the strip.

In the first case the strip delamination starts in the region of maximum moment („Z” mode of failure), while the strip’s strains equals about 6‰. Tensile forces of total bending moment and shear transverse force do not cause then yielding of the longitudinal steel reinforcement in the cross-section located at the end of the strip (Fig. 2.2).



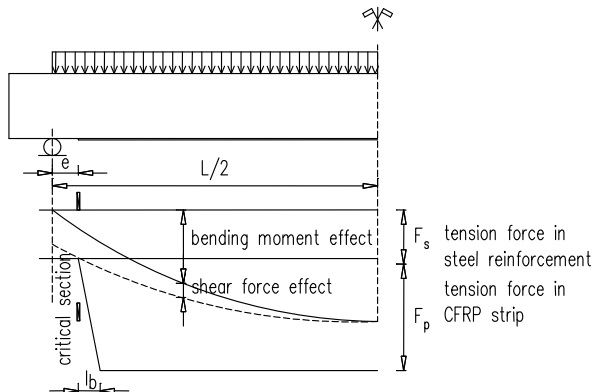
Rys. 2.2. Przekrój krytyczny w miejscu maksymalnego momentu zginającego - obwiednia sił od obciążenia zewnętrznego i obwiednia zdolności nośnych zbrojenia zwykłego i taśmy

Fig. 2.2. Critical cross-section at the maximum bending moment location - envelop of external loads, and load capacities of steel reinforcement and CFRP strip



Rys. 2.3. Przekrój krytyczny na końcu taśmy

Fig. 2.3. Critical cross-section at the strip end



W drugim wypadku proces odspajania końca taśmy rozpoczyna się wtedy, gdy w sąsiednim, niewzmocnionym przekroju belki dochodzi do uplastycznienia rozciąganego zbrojenia (rys. 2.3.). Towarzyszy temu gwałtowny przyrost szerokości rozwarcia ukośnej rysy przebiegającej w pobliżu końca taśmy i postępująca utrata przyczepności betonu i zbrojenia w sąsiedztwie rysy. To wyjaśnia, dlaczego zniszczenie występuje w płaszczyźnie zbrojenia, a beton otuliny pozostaje zespolony z taśmą.

Nośność obydwu przekrojów można wyznaczyć na podstawie analizy ich stanu odkształcenia, przy założeniu, że odkształcony przekrój pozostaje płaski. W wypadku zniszczenia typu „P” wystarczy znajomość charakterystyki $\sigma_s - \varepsilon_s$ zastosowanej stali zbrojeniowej i oczywiście miejsca usytuowania przekroju krytycznego, wyznaczonego przez koniec taśmy CFRP. Przy zniszczeniu typu „Z” trzeba przyjąć doświadczalnie ustaloną wielkość odkształceń, przy których dochodzi do odspojenia taśmy.

The second mode of failure („P” mode) is located at the end of the strip. Debonding process starts while yielding of the steel reinforcement occurs at the not strengthened cross-section of the beam (Fig. 2.3). Sudden increase of inclined crack width occurs close to the end of the strip as well as moving loss of bond between concrete and steel in the vicinity of the crack. It explains why delamination occurs at the steel reinforcement level and concrete remains joined with the strip.

The load bearing capacity of the both critical cross sections may be calculated on the bases of the plane cross section principle. In the case of the “P” mode of failure $\sigma - \varepsilon$ relationship of the ordinary steel reinforcement and the location of the end of the strip should be considered. However in the ultimate state for the “Z” mode of failure, the value of the strip’s strains registered during its debonding should be assumed additionally.

3. PROGRAM BADAŃ

3.1. Założenia badawcze

Jak wynika z wcześniejszych spostrzeżeń dotyczących mechanizmu zniszczenia typu „Z”, proces odspajania zewnętrznego zbrojenia kompozytowego wywołany jest poprzecznym naciskiem betonowej otuliny na to zbrojenie. W celu ograniczenia tego nacisku, a tym samym zwiększenia efektywności wzmocnienia belek na zginanie przy użyciu taśm CFRP, założono wprowadzenie dodatkowego (poza taśmami dolnymi), zewnętrznego zbrojenia kompozytowego w postaci L-kształtek Sika®Shear i mat SikaWrap®Hex230C, o kierunku włókien prostopadłym do podłużnej osi belki. Analizie tego problemu była poświęcona I seria badań, obejmująca 6 belek.

W II serii badań, obejmującej 4 belki, układano zbrojenie kompozytowe w taki sposób, aby włókna były równoległe do podłużnej osi belki. Zbrojenie kompozytowe, w postaci taśm i mat, było przyklejone tylko do spodniej lub do spodniej i bocznych powierzchni belek. Założono, że jedna z belek serii II będzie wzmocniona pod wstępnym stałym obciążeniem.

Badania prowadzono na jednoprzęsłowych, wolno podpartych belkach żelbetowych o przekroju prostokątnym 150×300mm i rozpiętości w osiach podpór 4200mm. Stopień zbrojenia zwykłego był dla wszystkich belek taki sam ($\rho=0,008$), chociaż rozciągane zbrojenie podłużne w obu seriach miało różną charakterystykę wytrzymałościową. Wszystkie belki obciążano dwiema siłami skupionymi o rozstawie 1200mm.

Założono, że w trakcie badania belki będą odciążane i ponownie obciążane, przy założonym poziomie obciążenia.

3.2. Opis elementów

3.2.1. Zbrojenie i betonowanie elementów

Kształt i zbrojenie belek żelbetowych pokazano na rys. 3.1. Elementy zbrojone były prętami żebrowanymi $\varnothing 10$ i $\varnothing 12$ mm oraz strzemionami ze stali gładkiej $\varnothing 6$ mm, w rozstawie 100 i 200mm.

Betonowanie elementów odbywało się w pozycji poziomej w stalowej formie. Beton przygotowywano w betoniarni wolnospadowej o pojemności 0,15m³. Do wykonania każdego elementu sporządzono dwa zaroby po 0,145m³. Z każdego zarobu wykonywano próbki sześciennie i walcowe, w celu określenia cech wytrzymałościowych betonu. Beton w elementach i próbkach zagęszczano wibratorem wglębnym OM2.0 (buława ES50 o średnicy 50mm), z częstotliwością 150Hz. Elementy i próbki rozformowywano po 24 godzinach i przez pierwsze trzy dni po betonowaniu polewano wodą. Belki wzmocniano po upływie około dwóch tygodni od ich betonowania.

3. PROGRAM OF THE TEST

3.1. Experimental foundations

The previous tests concerning “Z” mode of failure of the beams strengthened for flexure indicated that the reason of the strip delamination is transverse vertical pressure of the concrete cover on the strip. To limit this pressure as well as to increase an effectiveness of the beams’ strengthening for flexure, additional external composite reinforcement in the form of the L-shaped Sika®Shear and the sheets SikaWrap®Hex230C were applied on the lateral sides of the beam together with the bottom main strip. Fibers of the lateral composites were perpendicular to the longitudinal axis of the beam. This problem was analysed in Series I beams comprising 6 elements.

The Series II beams strengthened for flexure by composites with fibers parallel to the beam’s axis contained 4 beams. The composite reinforcement was bonded to the bottom and lateral surfaces of the beams. It was founded that one of Series II beams would be strengthened under prior steady loading.

The test was carried out on single span, simply supported reinforced concrete beams with a rectangular cross section of 150x300mm and a span of the 4200mm. The longitudinal steel reinforcement ratio was the same for all beams ($\rho=0,008$) but the tension reinforcement had a different strength characteristic for both series (I, II). Four points loading with the 1200mm spacing loaded all beams.

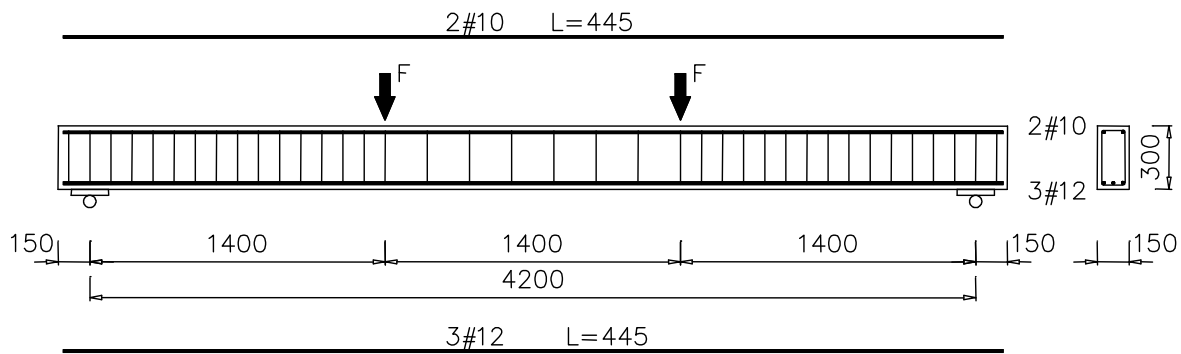
It was assumed that the beams would be relieved and loaded again under assumed loading.

3.2. Description of elements

3.2.1. Steel reinforcement and casting of element

Dimensions of the beams and steel reinforcement are shown in Fig. 3.1. Elements were reinforced with longitudinal steel ribbed bars of nominal diameters 10 and 12mm and stirrups of round bars of 6mm diameter at a spacing 100 and 200mm.

Beams were casted in horizontal steel mould. Concrete was prepared in a free-fall mixer of 0,150m³ volume. Two batches of 0,145m³ volume were made for casting one beam. From each concrete batch cubic and cylindrical samples were made in order to estimate the strength characteristic of concrete. Concrete mix was compacted in the mould with immersion vibrator, mode OM2.0 (with ES50 head of 50mm dia.) and 150Hz frequency. The big forms and concrete specimens were struck after 24 hrs and stored in the laboratory hall. During the first three days after casting, the elements and samples were sprinkled with water. All beams were strengthened two weeks after casting.



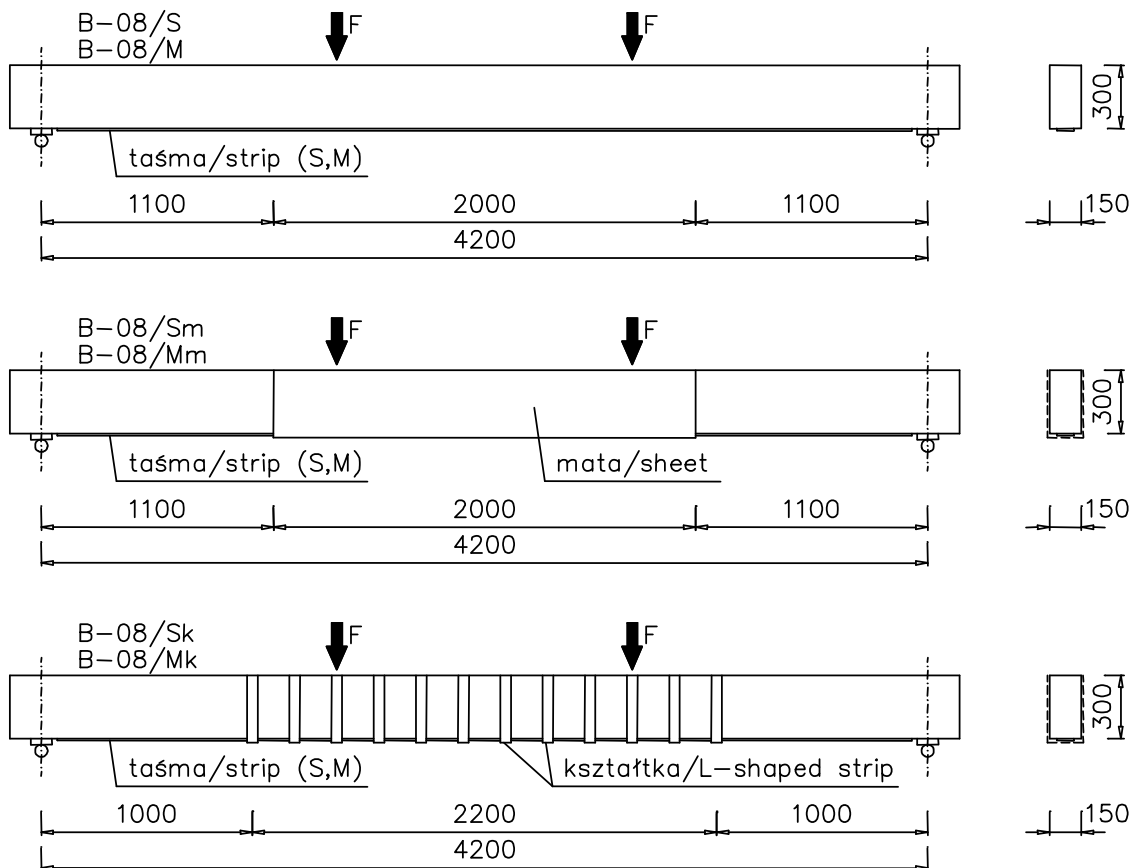
Rys. 3.1. Zbrojenie belek
Fig. 3.1. Reinforcement of the beams

3.2.2. Wzmacnianie elementów

Belki wzmacniano przez przyklejanie zewnętrznego zbrojenia kompozytowego na rozciąganej lub bocznych powierzchniach belek, stosując się ściśle do zaleceń producenta [14,15]. Taśmy i kształtki CFRP przyklejano za pomocą zaprawy epoksydowej Sikadur®30, a do przyklejania mat zastosowano impregnat Sikadur®330.

3.2.2. Strengthening of elements

Beams were strengthened with external composite reinforcement bonded to the tension and lateral sides of the beams. The producer prescriptions were strictly complied [14,15]. The CFRP strips and L-shaped strips were bonded with Sikadur®30 but the sheets with Sikadur®330 epoxy adhesive.



Rys. 3.2. Sposoby wzmacnienia belek I serii
Fig. 3.2. Strengthening of Series I beams

Wszystkie sześć belek serii I wzmacniono taśmami typu S i M, przyklejonymi do rozciąganej powierzchni elementów. Dwie z nich (B-08S i B-08M) wzmacniono tylko dolnym zbrojeniem kompozytowym. W dwóch następ-

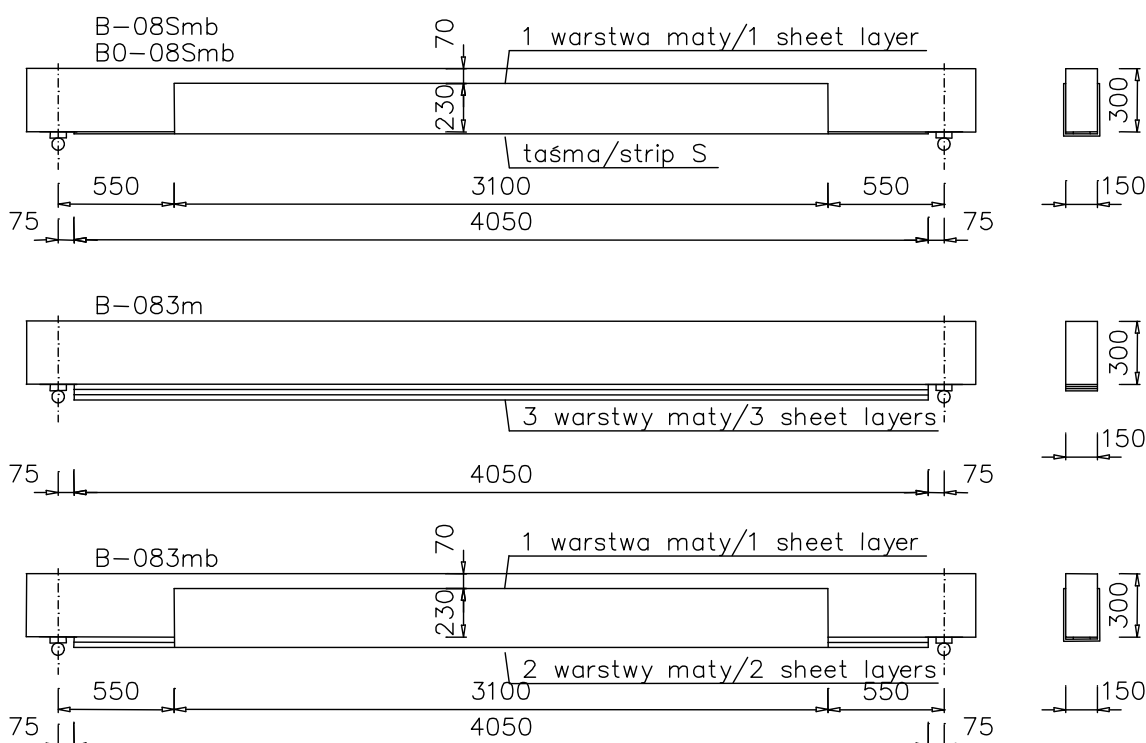
All six beams of Series I were strengthened with the strips of type S and M, bonded to the tension side of the element. Two of them (B-08S and B-08M) were strengthened with only bottom composite reinforcement. In two next-

nych (B-08Sk, B-08Mk), na środkowym odcinku belki, o długości 2000mm, przyklejono dodatkowo zbrojenie kompozytowe w postaci L-kształtek Sika® CarboShearL tak, aby dłuższe ramiona kształtek obejmowały całą wysokość bocznych powierzchni belek, a krótsze przyklejone były na zakład na dolnej powierzchni elementu. Przyjęto rozstaw kształtek 180mm i 200mm. Dwie następne belki oklejono dodatkowo matami SikaWrap® na tym samym odcinku (B-08Sm, B-08Mm). Sposoby wzmocnienia belek serii I przedstawiono na rys. 3.2.

Wszystkie belki serii II wzmocniono materiałami kompozytowymi o kierunku włókien równoległym do podłużnej osi belki (rys. 3.3). Dwie pierwsze belki (B-08Smb i BO-08Smb) wzmocniono taśmami typu S, przyklejonymi na rozciąganej powierzchni elementów i jedną warstwą mat przyklejonych na spodniej i bocznych powierzchniach belek. Maty naklejono po 24 godzinach od przyklejenia taśm. Dwa arkusze maty o szerokości 300mm naklejano na środkowym odcinku belki o długości 2000 mm, w ten sposób, że każdy z nich objął połowę dolnej powierzchni belki i część powierzchni bocznej, o wysokości około 230mm. Belkę BO-08Smb wzmocniono pod wstępnym obciążeniem, stanowiącym około 50% obciążenia niszczonego, obliczonego dla żelbetowej belki nie wzmocnionej.

The next two beams (B-08Sk and B-08Mk) were strengthened with additional L-shaped strips (Sika®CarboShearL) so as longer arms were bonded on the whole height of the lateral sides of the beam and shorter arms overlapped on the bottom side of the beam. The L-shaped strips were applied at a spacing 180 and 200mm. The next two beams (B-08Sm and B-08Mm) were strengthened with additional sheets (SikaWrap®) on the same interval as previous. Modes of strengthening of Series I beams are shown in Fig. 3.2.

All beams of Series II were strengthened with the composite materials with fibres parallel to the longitudinal axis of the beam (Fig. 3.3). The first two beams (B-08Smb and BO-08Smb) were strengthened with the strips of type S, bonded to the tension sides of the beams and one layer of the sheets, bonded both to the bottom and lateral sides of the beam. The sheets were bonded 24 hours after strips application. Two sheets of 300mm wide were applied on the central interval of the 2000mm length so as the sheets covered the whole bottom and part of the lateral sides (on the 230mm height). The BO-08Smb beam were strengthened under initial loading equalled 50% of the ultimate load, calculated for non-strengthened reinforced concrete beams.



Rys. 3.3. Sposoby wzmocnienia belek II serii
Fig. 3.3. Strengthening of Series II beams

Dwie pozostałe belki tej serii wzmocniono matami. Na spodniej powierzchni jednej z nich (B-083m) przyklejono trzy warstwy maty, natomiast drugą wzmocniono dwiema warstwami mat na spodniej powierzchni i dodatkowo jedną warstwą obejmującą spód i boki belek (B-083mb). Do wzmocnienia dolnej powierzchni obu belek stosowano arkusze maty o szerokości 150mm. Sposoby oklejania belek II serii pokazano na rys. 3.3.

The last two beams of Series II were strengthened with sheets. Three layers of the sheets were bonded to the tension side of the first one (B-083m). However the second one was strengthened with two layers of the sheet on the bottom and one additional layer covering the tension and lateral sides of the beam (B-083mb). The sheets of 150mm width were used for strengthening of the bottom sides of the beam. Modes of strengthening of Series I beams are shown in Fig. 3.3.

Program badań obejmował dodatkowo:

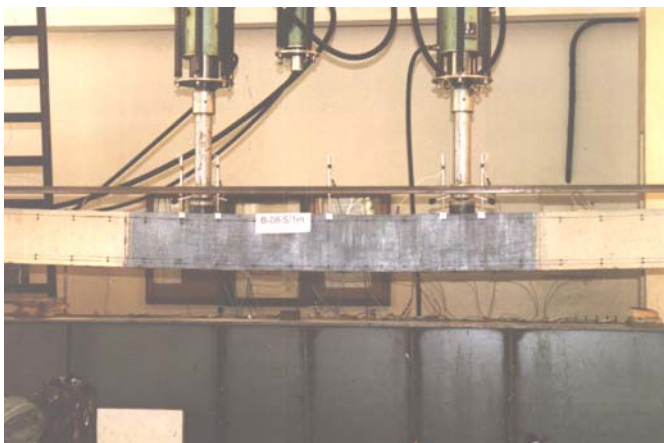
- określenie wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie (metodą rozłupywania) oraz modułu sprężystości betonu,
- określenie zależności $\sigma_s - \epsilon_s$ stali zbrojeniowej przy rozciąganiu,
- określenie wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości materiału L-kształtek Sika® CarboShearL.

3.3. Stanowisko badawcze i obciążenie

Stanowisko badawcze zbudowane było z następujących elementów (rys. 3.4):

- konstrukcja ramowa z blachownic stalowych,
- dwa siłowniki zamocowane do górnej części ramy,
- urządzenie zasilające siłowniki,
- stanowisko pomiarów komputerowych.

Wszystkie belki obciążano dwiema siłami skupionymi o rozstawie 1400mm, przekazywanymi na belkę wprost za pomocą siłowników hydraulicznych. Stosowano siłowniki o zakresie 400kN. Elementy były umieszczane na dolnej, poziomej części ramy i podpierane przegubowo na dwóch podporach o osiowym rozstawie 4200mm.



Rys. 3.4. Widok stanowiska badawczego

Fig. 3.4. View of the test stand

Siły obciążające belkę zwiększano skokowo, aż do zniszczenia. Przy poziomie obciążeń rzędu 0,5 obciążenia krytycznego wykonywano proces odciążenia – obciążenia. Wielkość siły ustalano na podstawie wskazań urządzenia zasilającego obciążnik hydrauliczny oraz dodatkowo kontrolowano za pomocą czujnika ciśnieniowego, wmontowanego w układ hydrauliczny i współpracującego z miernikiem.

3.4. Pomiary

Przy każdym poziomie obciążenia wykonywano pomiary przemieszczeń pionowych, odkształceń betonu i stanu zarysowania elementów.

Pionowe przemieszczenia mierzono w pięciu punktach na długości belki (rys. 3.5) za pomocą przetworników przemieszczeń liniowych PSx50, przytwierdzonych do stalowej listwy, opartej przegubowo na belce w osi jednej z podpór i przegubowo przesuwnie w osi drugiej podpory.

The test program comprised the following additional works:

- estimation of the compressive and tensile strength (determined in splitting test) of concrete,
- estimation of the $\sigma - \epsilon$ relationship for steel reinforcement in tension test,
- estimation of the tension strength and modulus of elasticity of the CFRP L-shaped strips (Sika® CarboShearL).

3.3. Test stand and loading

The test stand was composed of the following elements (Fig. 3.4):

- frame of steel plate girders,
- two hydraulic servomotors attached to upper part of the frame,
- device supplying the servomotors,
- computer measurement statement.

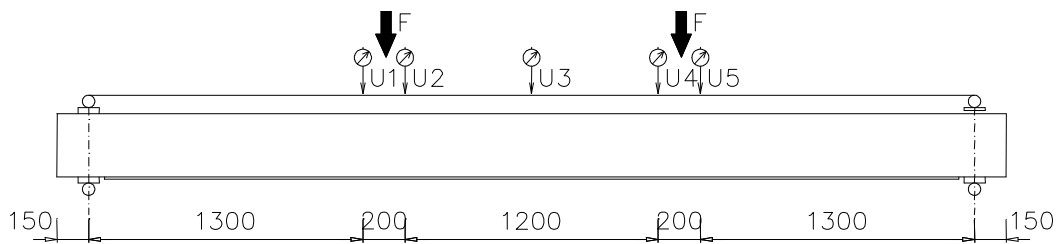
All beams were four point loaded at a spacing 1400mm, transferred by hydraulic servomotors of 400kN range. Elements were placed on lower horizontal part of the frame and supported on two hinged supports spaced at 4200mm.

Loads increased by steps till failure. At the loading level equalled 0,5 ultimate load, five unloading - loading cycles were carried out. The value of the loading was established on the basis of indications of the device supplying hydraulic servomotor; contributed with the hydraulic and measuring system.

3.4. Measurements

Vertical displacements, concrete strains and crack pattern were registered at every level of loading.

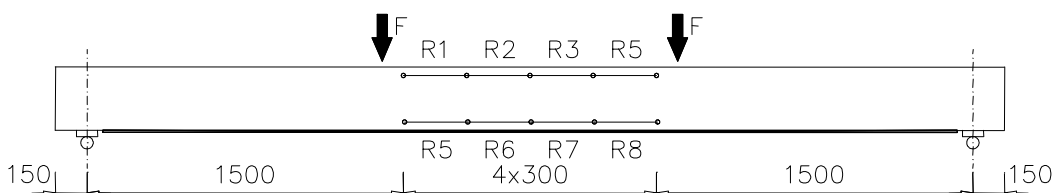
Vertical displacements were measured with linear displacement transducers of the type PSx50, attached to a steel slat supported on hinged bearing at one end and shift hinged at the other.



Rys. 3.5. Rozmieszczenie czujników do pomiaru pionowych przemieszczeń
Fig. 3.5. Location of gauges for vertical displacements

Pomiary odkształceń betonu strefy ściskanej i rozciąganej prowadzono na odcinku czystego zginania, w odległości 40mm odpowiednio od górnej i dolnej krawędzi belki, za pomocą czterech przetworników przemieszczeń liniowych typu PSx10 i PSx20, na bazach 300mm (rys. 3.6).

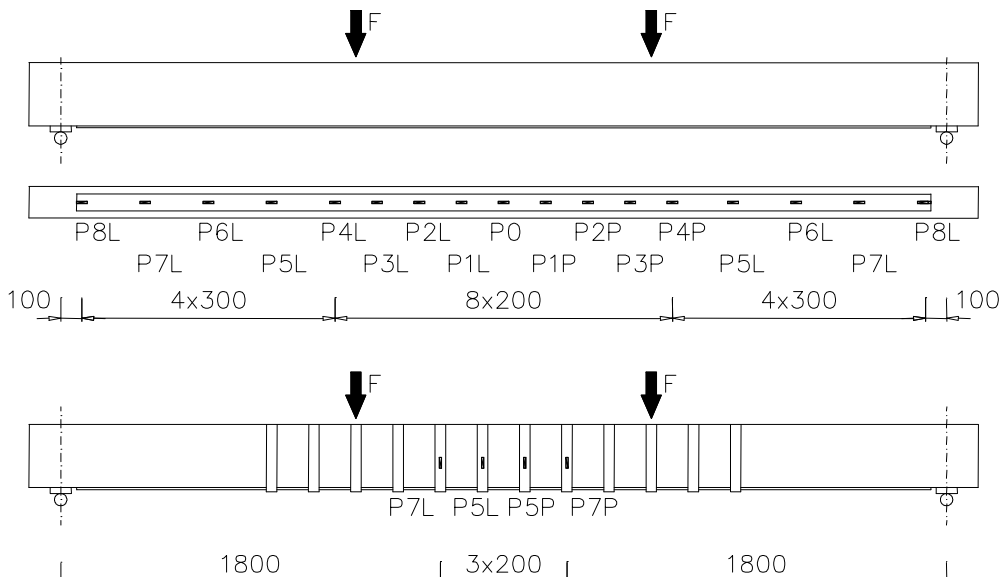
Strains of concrete in the compressive and tension zone were measured in the pure bending region at the level of 40 mm from the compressive edge and tension edge of the beam respectively. The measurements were registered with four linear resistant transducers of the type PSx10 and PSx20 on bases 300mm (Fig. 3.6).



Rys. 3.6. Rozmieszczenie czujników do pomiaru odkształceń betonu
Fig. 3.6. Location of gauges for concrete strain measurements

Odształcenia zewnętrznego zbrojenia kompozytowego mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych o bazach 50mm, naklejonych na powierzchni tych materiałów (rys. 3.7).

Strains of the external composite reinforcement were measured with electric resistance gauges on the bases 50mm, bonded on the CFRP reinforcement (Fig. 3.7).



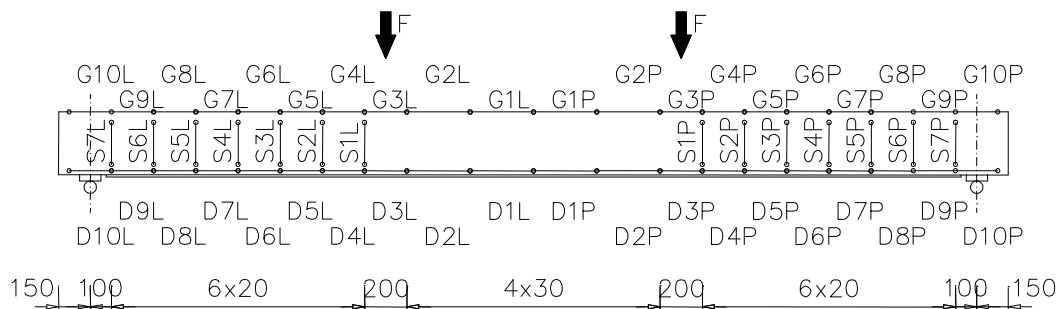
Rys. 3.7. Rozmieszczenie czujników do pomiaru odkształceń materiałów kompozytowych
Fig. 3.7. Location of gauges for composite strain measurements

Odczyty wszystkich rodzajów czujników rejestrowano automatycznie przy każdym poziomie obciążenia, 20 razy co 1.5 sekundy. Do sterowania pomiarami i zapisu odczytów stosowano uniwersalny miernik współpracujący z komputerem IBM PC według programu PC-LAB.

All measurements were recorded automatically at each loading level, 20 times per 1.5 seconds. The automatic program control of the measurements was carried out with measuring instrument connected with the PC computer.

Jednocześnie z pomiarami komputerowymi mierzono ręcznie odkształcenia betonu strefy ściskanej i rozciąganej oraz pionowych słupków za pomocą ekstensometru o bazie 200mm i dokładności pomiaru $0,8 \times 10^{-5}$ (rys. 3.8).

Simultaneously with computer measurements strains of concrete in the compression and tension zone together with strains of the vertical bases were measured manually with extensometer on the bases 200mm with measure precision $0,8 \times 10^{-5}$ (Fig. 3.8).



Rys. 3.8. Rozmieszczenie czujników do ręcznego pomiaru odkształceń
Fig. 3.8. Location of gauges for for handly carried concrete strain measurement

W trakcie badania rejestrowano układ rys na powierzchni belek, oznaczając obok numeru rys ich zasięg przy danym poziomie obciążenia. Dodatkowo mierzono szerokość rozwarcia rys za pomocą specjalnej lupy z powiększeniem 24x.

During the test the crack pattern of the beam was recorded, with the value of the load level noted - next to the crack - at which it occurred. The crack's width was measured with special reading glass with enlargement 24x.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Materiały

4.1.1. Stal zbrojeniowa

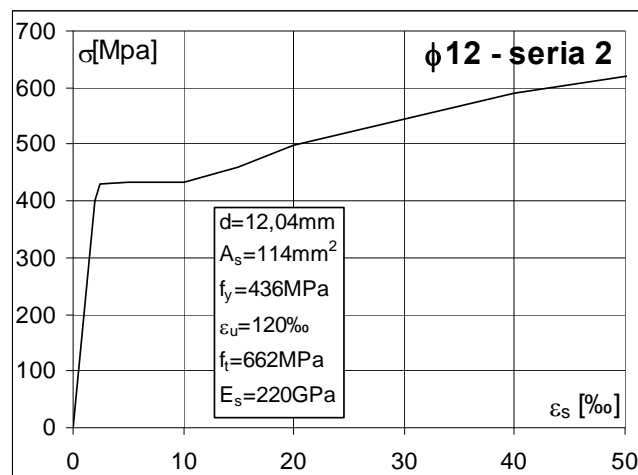
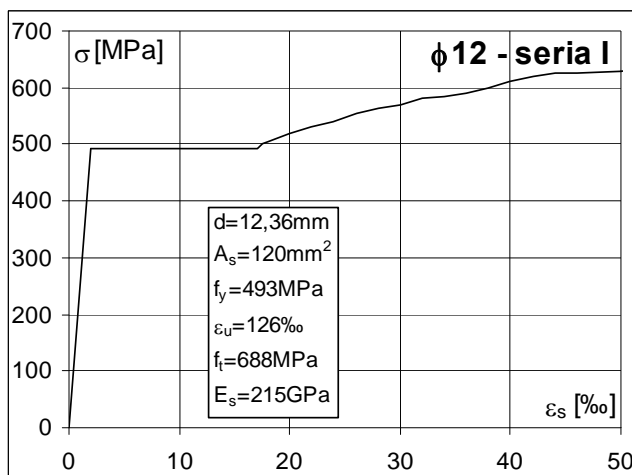
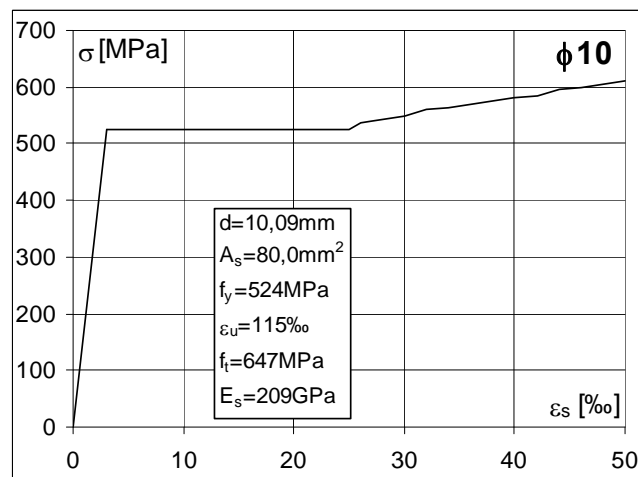
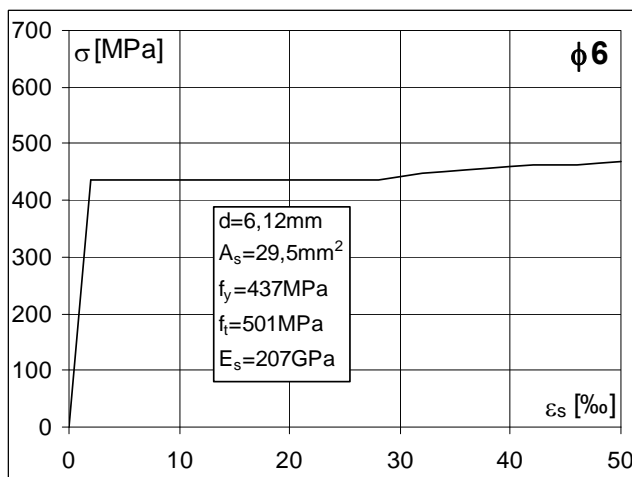
Zbrojenie podłużne wykonano ze stali żebrowanej klasy AIII o znaku 34GS i nominalnych średnicach 10 i 12mm, a strzemiona ze stali gładkiej klasy A-0 o znaku St0S i średnicy 6mm. Z każdego pręta użytego do zbrojenia belek pobrano próbki w celu zbadania cech wytrzymałościowych. Badania próbek stali przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej UFP 400, wyposażonej w rejestrator wydłużeń o bazie pomiarowej o zmiennej długości od 20 do 100mm, sterowanej komputerowo. Określono odkształcenia (ϵ_u) przy maksymalnej sile, moduł sprężystości E_s , wytrzymałość na rozciąganie f_t i granicę plastyczności f_y . Wytrzymałościową charakterystykę stali zbrojeniowej dla belek obu serii przedstawiono na rys. 4.1. Wartości ϵ_u we wszystkich wypadkach przekraczały 100‰.

4. TEST RESULTS

4.1. Materials

4.1.1. Steel reinforcement

Longitudinal steel reinforcement was made of the ribbed bars, class AIII, symbol 34GS and nominal diameters 10 and 12mm. The stirrups were made of round bars, class A-0, symbol St0S and 6mm diameter. From each steel bar used for reinforcement samples were taken to determine strength properties. Test on the steel samples were carried out in UFP 400 testing machine provided additionally with extension register of changing length of the measuring base from 20 to 100mm, controlled by computer. Ultimate strain of the steel (ϵ_u) for ultimate load, the elasticity modulus of steel E_s , tension strength f_t and steel yielding strength f_y were determined. Strength characteristics of reinforcing steel for both series beams are presented in Fig. 4.1. All strains were higher than 100‰.



Rys. 4.1. Zależność σ - ϵ stali zbrojeniowej

Fig. 4.1. The σ - ϵ characteristic of steel reinforcement

4.1.2. Beton

W mieszance betonowej zastosowano piasek kopalniany płukany, żwir sortowany i cement portlandzki CEM I 32,5. Skład mieszanki na 1m^3 podano w tablicy 4.1

4.1.2. Concrete

Washed pit sand, graded gravel and Portland cement CEM I 32,5 were used for preparing concrete mix, and without additives. Composition of 1m^3 concrete mix is given in Table 4.1.

Tablica 4.1. Skład mieszanki betonowej
Table 4.1. Composition of the concrete mix

Składniki / Components	Ilość / Amount [kg/m ³]
żwir / gravel	990
piasek / sand	843
cement / cement	274
woda / water	200
razem / sum	2307
w/c ratio	0.73

Z każdej partii betonu użytej do wykonania belek wykonano sześć próbek walcowych o średnicy 150mm i wysokości 300mm oraz dziewięć sześciennych o boku 150mm. Wytrzymałość na ściskanie $f_{c,cube}$ i na rozciąganie metodą rozłupywania $f_{ct,sp}$ określono odpowiednio na 6 i 3 próbkach kostkowych, a wytrzymałość słupową f_c oraz moduł sprężystości betonu E_c na próbkach walcowych kapslowanych. Wartość modułu sprężystości betonu ustalono w ostatnim cyklu obciążania, zgodnie z DIN 1045. Badania próbek wykonywano w dniu badania belki, w maszynie wytrzymałościowej FORM+TEST (PRÜFSYSTEM Typ 107/3000A).

Cechy wytrzymałościowe betonu zestawiono w tablicy 4.2.

Six cylindrical samples of 150mm diameter and 300mm height and nine cube samples of 150mm were made during casting of each batch of concrete. Compressive strength $f_{c,cube}$ and tensile strength by splitting $f_{ct,sp}$ were determined on the cubic samples while column strength f_c and modulus of elasticity E_c - on the cylindrical samples. The elasticity modulus value was determined in the last cycle of loading in accordance with DIN 1045. Strength properties of concrete specimens were determined simultaneously with the test of the beams using FORM + TEST (PRÜFSYSTEM type 107/3000A) strength testing machine.

Strength properties of concrete are presented in Table 4.2.

Tablica 4.2. Charakterystyka wytrzymałościowa betonu
Table 4.2. Strength characteristic of concrete

Nr seria No. series	Symbol elementu Symbol of element	Wiek betonu Age of concrete dni days	E_c [GPa]		f_c [MPa]		$f_{c,cube}$ [MPa]		$f_{ct,sp}$ [MPa]		$f_c / f_{c,cube}$ -
			wyniki results	średnia mean	wyniki results	średnia mean	wyniki results	średnia mean	wyniki results	średnia mean	
1/I	B-08M	76	22,5;22,2;24,9 25,1;24,1;25,1	24,0	38;34;39 37;37;39	37,3	39;46;43 39;38	41,0	3,5;3,4 3,7	3,5	0,91
2/I	B-08Mk	106	22,5;23,1;23,2 22,6;21,8;22,9	22,7	33;34;29 32;31;33	32,0	35;35;35 33;33;34	34,2	2,9;3,1 3,4	3,1	0,94
3/I	B-08Mm	105	25,9;24,3;24,2 25,2;24,7;25,9	25,0	33;41;33 41;39;42	38,2	39;36;44 44;38;35	40,0	3,5;2,8 3,5	3,3	0,95
4/I	B-08S	77	22,4;23,2;22,2 22,4;22,1;23,8	22,7	34;32;32 33;31;32	32,3	35;35;35 36;36;34	35,2	2,5;3,1 2,9	2,8	0,92
5/I	B-08Sk	91	21,4;22,9;22,7 22,1;21,7;23,6	22,4	34;35;37 31;32;34	33,8	36;35;37 37;33	35,6	3,3;3,3 3,1	3,2	0,95
6/I	B-08Sm	90	23,7;24,3;23,7 24,1;24,7;23,4	24,0	33;33;33 33;36;33	33,5	41;40;40 36;37;35	38,2	3,9;3,2 3,2	3,4	0,88
7/II	B-08Smb	32	23,0;21,4;17,7 25,2;19,9;20,4	21,3	25;29;22 30;24;24	25,7	32;30;31 27;27;27	29,0	2,3;2,2 2,4;2,6	2,4	0,89
8/II	B-083m	46	22,7;28,6;24,1 27,4;25,9	25,7	36;33;32 36;35	34,4	39;36;35 36;36;32	35,7	2,8;3,0 2,9	2,9	0,96
9/II	B-083mb	42	22,8;22,9;25,4 23,8;22,3	23,4	28;26;28 22;25	25,8	29;30;31 31;30	30,2	2,9;2,5 2,6	2,7	0,85
10/II	BO-08Smb	52	22,5;22,2;21,7 21,4;21,8	21,9	26;27;27 28;29	27,4	30;30;31 30;30;31	30,3	2,6;2,5 3,0	2,7	0,90

4.1.3. Materiały kompozytowe

Materiały kompozytowe, tj. taśmy CarboDur typ S512, CarboDur typ M1214 i kształtki CarboShearL zbadano na rozciąganie, określając moduł sprężystości E_p , wytrzymałość na rozciąganie f_p i odkształcenie przy zerwaniu ϵ_{pu} . Badaniu poddano sześć próbek każdego z materiałów, w maszynie wytrzymałościowej UFP 400.

Do końców każdej próbki doklejano aluminiowe płaskowniki, które umożliwiały uchwycenie próbek w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Nie udało się zbadać w ten sposób maty HEX230C, gdyż nie można było zapewnić równomiernego obciążenia wszystkich włókien.

4.1.3. Composite materials

Elasticity modulus E_p , tensile strength f_p and the ultimate fracture strain ϵ_{pu} of the composite materials e.g. CFRP strips CarboDur type S512, CarboDur type M1214 and L-shaped CarboShearL strips were determined in the tension test. Six samples of each composite material were tested in the UFP400 testing machine.

In order to improve anchorage conditions of the CFRP specimens in the testing machine jaws aluminum plates were bonded to each end of the sample. Test of the CFRP sheets type HEX230C failed because uniform loading of all fibres of the sheet was difficult to provide.

Wyniki badań wytrzymałościowych są zestawione w tabelicy 4.3 i na rys. 4.2.

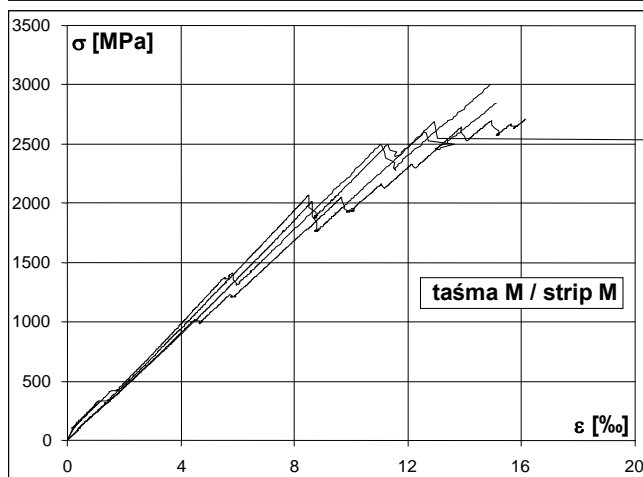
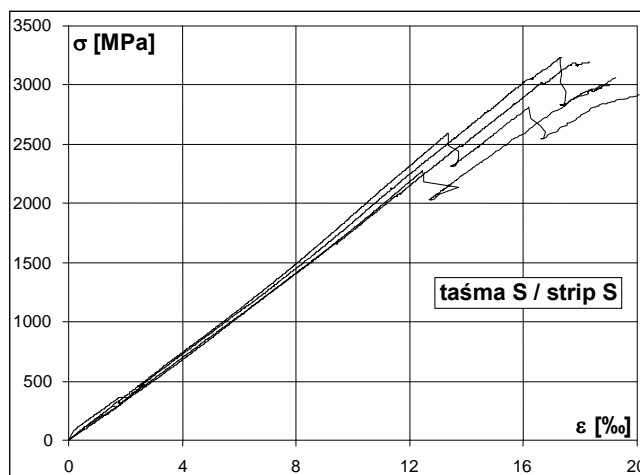
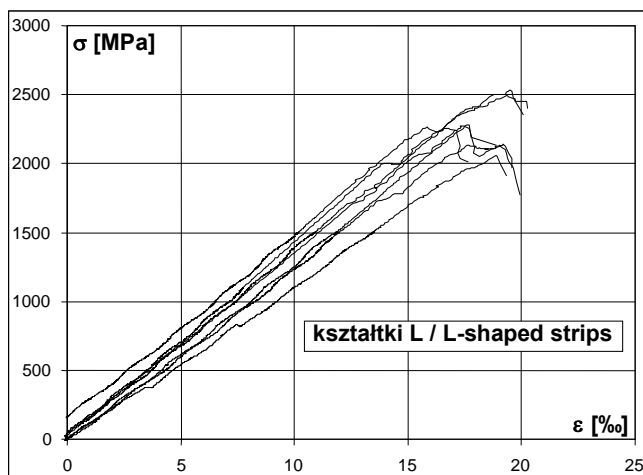
Results of the strength tests of the CFRP materials are shown in Table 4.3 and in Fig. 4.2.

Tablica 4.3. Charakterystyka wytrzymałościowa materiałów kompozytowych

Table 4.3. Stress – strain characteristic of CFRP materials

Typ taśmy Strip	f_p , MPa		E_p , GPa		ϵ_{pu} , ‰	
	wyniki / results	średnie / mean	wyniki / results	średnie / mean	wyniki / results	średnie / mean
M1214 120×1,4mm	2682	2742	224,4	220	12,0	12,4
	2797		216,4		12,9	
	2781		219,2		12,7	
	2755		220,8		12,5	
	2729		220,0		12,4	
	2710		221,5		12,2	
S512 50×1,2mm	3137	2915	172,1	172	18,2	17,0
	2658		172,3		15,5	
	2922		165,8		17,0	
	2951		169,7		17,4	
	2879		174,1		16,6	
	2941		177,5		17,1	
Carbo Shear L 40×1,4mm	2317	2282	136,3	132	17,0	17,3
	2264		130,1		17,4	
	2358		139,5		16,9	
	2293		134,1		17,1	
	2300		131,4		17,5	
	2159		120,6		17,9	
HEX230C ¹⁾	-	3500	-	230	-	15,0

1) dane według producenta, wymiary 300×0,13mm / by the producer, dimensions 300×0,13mm



Rys. 4.2. Zależność σ - ϵ materiałów kompozytowych
Fig. 4.2. The σ - ϵ characteristic of composite materials

4.2. Elementy

4.2.1. Mechanizmy zniszczenia belek

Wszystkie belki zniszczyły się na skutek odspojenia materiałów kompozytowych od powierzchni betonu. W żadnej belce nie doszło do zmiężdżenia betonu w strefie ściskanej ani do zerwania materiałów CFRP.

Zniszczenie belek I serii wzmocnionych sztywną taśmą typu S lub M, przyklejoną na rozciąganej powierzchni belki, przebiegało gwałtownie, bez wcześniejszej sygnalizacji. Towarzyszył mu trzask pękającego betonu i odpadanie jego kawałków (rys 4.1).

Proces odspajania taśmy zawsze rozpoczął się w obszarze czystego zginania i postępował w kierunku jednej z podpór. Taśma po zniszczeniu pozostawała odspojona na długim odcinku obejmującym obszar czystego zginania i strefę przypodporową (porównaj rys 4.1.a, b).

W belce wzmocnionej taśmą typu S (szerokości 50mm i grubości 1.2mm), płaszczyzna odspojenia przebiegała zarówno w warstwie kleju jak i w cienkiej warstewce otuliny betonowej (rys. 4.2.a). Nieco inaczej odspoiła się taśma typu M (szerokości 120mm i grubości 1.4mm). Tutaj do odspojenia doszło w głębiej położonych warstwach otuliny betonowej, przy czym lokalnie wraz z taśmą wyrywały się duże kawałki betonu na granicy zbrojenia rozciąganego (rys.4.2.b).

Obserwacje belek wzmocnionych dodatkowymi matami i kształtkami, o układzie włókien prostopadłym do podłużnej osi belki, potwierdziły spostrzeżenia dotyczące mechanizmu zniszczenia. Utrata przyczepności taśmy do powierzchni betonu, postępująca od środka belki w stronę jednej z podpór, była szczególnie wyraźna w belkach wzmocnionych dodatkowymi kształtkami (B-08Sk, B-08Mk). Dochodziło do poślizgu w warstwie kleju między taśmą główną, a naklejonymi na niej kształtkami. Taśma główna, odspajając się wzdłuż belki w kierunku podpory, pociągając ze sobą kształtki (rys. 4.3.a). Na rys. 4.3.b widoczny jest prześwit między taśmą, a powierzchnią betonu na odcinkach między kształtkami. Taki sposób zniszczenia potwierdza także zapis wideo, na którym wyraźnie widać jak odspojona taśma podtrzymywana była tylko lokalnie kształtkami. W miarę wzrostu obciążenia dochodziło do raptownego odspojenia skrajnych kształtek i całkowitego odspojenia taśmy głównej

Na powierzchni odspojonych kształtek zaobserwowano szereg pęknięć równoległych do ich włókien. Jest to wynikiem działania, na odcinku stałego momentu, podłużnych sił rozciągających, prostopadłych do kierunku włókien w kształtkach. Brak możliwości przeniesienia tych sił przez matycę z żywicy epoksydowej powodował poprzeczne rozdzielanie się włókien w kształtkach.

Szerokość taśmy miała wpływ na obraz płaszczyzny odspojenia, podobnie jak w belkach B-08S i B-08M. W przypadku węższej taśmy typu S512, płaszczyzna odspojenia przebiegała na całej długości taśmy w cienkiej warstwie otuliny betonowej (rys. 4.3.a), podczas gdy w belce wzmocnionej taśmą typu M1214, zaobserwowano bardziej nierównomierne odspojenie taśmy na długości belki (rys. 4.4.a). Na odcinku z przyklejonymi kształtkami, odspojenie taśmy postępujące od środka belki do podpory hamowane było obecnością kształtek. Kiedy odspojenie

4.2. Elementy

4.2.1. Failure modes of the beams

All beams failed by delamination of the composites from the concrete surface. Neither concrete crushing in compression zone nor fracture of the CFRP strip was observed.

Failure of Series I beams strengthened with the stiff strip type S and M, bonded to the tension surface of the beam proceeded abruptly, without prior signals. Explosion of breaking concrete and dropping off its pieces accompanied the failure (Fig. 4.1).

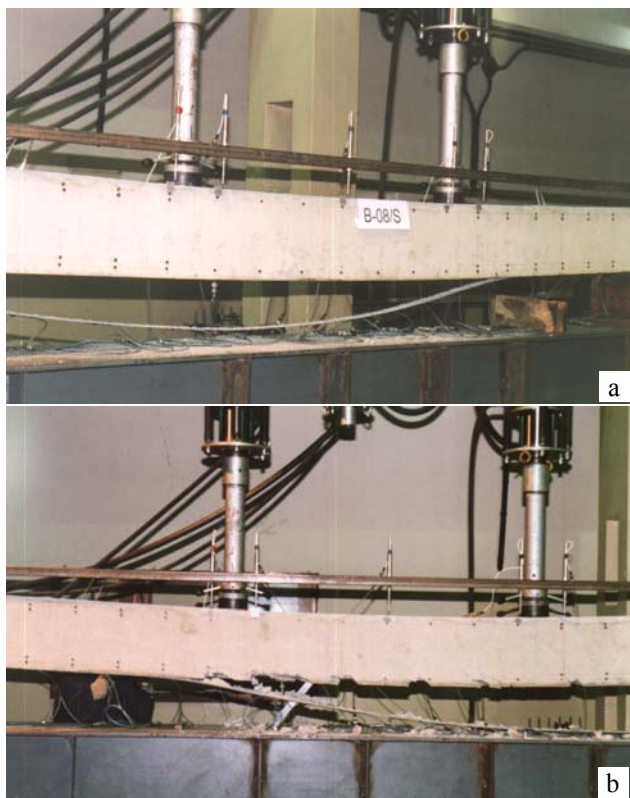
The strip's delamination always started in the pure bending region and moved to one of the supports. The strip after failure remained debonded over the long segment in the entire pure bending and supporting region (Fig. 4.1.a, b).

In case of the beam strengthened with the strip type S (width – 50mm, thickness – 1.2mm) the delamination plane initiated partially in adhesive layer and in thin concrete cover as well (Fig. 4.2.a). Delamination of strip type M (width – 120mm, thickness – 1.4mm) was slightly different. It initiated in deep concrete cover and only locally the strip debonded with picked concrete cover in the plane of the ordinary steel reinforcement (Fig. 4.2.b).

Observation of all beams strengthened with additional CFRP strips and sheets confirmed opinion concerning “Z” mode of failure. The strip's delamination from concrete beam moving from the centre of the beam to the one of the supports was clearly observed in the beams strengthened with additional L-shaped strips (B-08Sk, B-08Mk). The slip occurred in adhesive layer between the main strip and bonded on it the L-shaped strips. The bottom strip delamination moved from the centre of the beam to the support pulling L-shaped strips bonded on it (Fig. 4.3.a). The horizontal gap between the strip and the concrete surface on the interval of the vicinity L-shaped strips is shown in Fig. 4.3.b. The video recording confirmed that, delaminated strip was locally supported by the L-shaped strips. Increasing of external loading made abrupt delamination of L-shaped strips and finally debonding of the bottom strip occurred.

A lot of cracks parallel to the fibres direction appeared in the L-shaped strips. Longitudinal tensile forces in the pure bending region of the beam, perpendicular to the L-shaped fibres are the cause of the lateral strips cracking. Impossibility of these forces transferring by epoxy matrix resulted in transverse separation of the fibres in the L-shaped strips.

The strip width influenced the strip's delamination view (B-08S and B-08M). In the case of the strip of type S512 delamination plane initiated in thin concrete cover on the whole length of the beam (Fig. 4.3.a) while in the beam strengthened with the wider strip of type M1214, delamination plane was slightly different (Fig. 4.4.a). L-shaped strips delayed the strip's delamination from the center of the beam to the support on the interval with additional strips. While the strip delamination extended the external L-shaped strips location, abrupt debonding

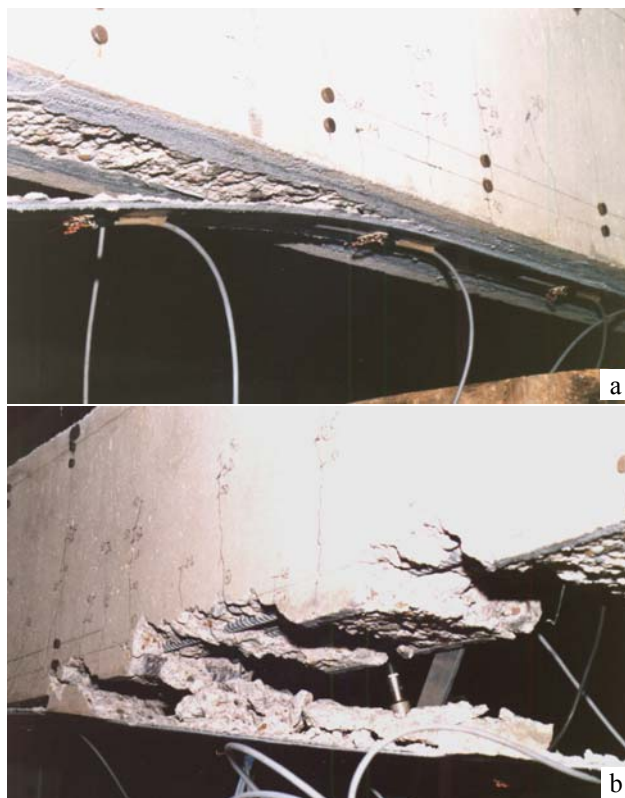


Rys. 4.1. Zniszczenie belek: a) B-08S, b) B-08M
 Fig. 4.1. The failure of the beams: a) B-08S, b) B-08M

taśmy osiągnęło położenie skrajnych kształtek, doszło do ich raptownego odklejenia, a w chwilę później do odrywania pozostałego odcinka taśmy (rys. 4.4.b). Płaszczyzna odspojenia taśmy na odcinku środkowym belki przebiegała w cienkiej warstwie otuliny betonowej, natomiast na pozostałym odcinku od skrajnej kształtki do podpory, przy której doszło do zniszczenia, taśma odspoiła się wraz z otuliną betonową na granicy zbrojenia zwykłego (rys. 4.4.b).

Spostrzeżenia dotyczące mechanizmu zniszczenia zaobserwowane w belkach z dodatkowymi kształtkami potwierdziły się w belkach wzmocnionych jednocześnie taśmą dolną i dodatkowymi matami (B-08Sm i B-08Mm). Mimo, że mata naklejona na całym odcinku zginania nie dała możliwości obserwacji rozwoju zarysowania belki B-08Sm, to widoczne były charakterystyczne, pionowe pęknięcia, wzdłuż jej włókien. Towarzyszyły im trzaski pękającego betonu, a przy obciążeniu bliskim niszczącemu nastąpiło wyraźne pochylenie się włókien maty wzdłuż podłużnej osi belki (rys. 4.5.a). Zaraz po tym doszło do zerwania włókien maty wzdłuż dolnej krawędzi belki (rys. 4.5.b) i całkowitego odspojenia taśmy.

Jak widać na rysunku 4.5.b, płaszczyzna odspojenia taśmy w belce B-08Sm przebiegała na całej długości taśmy w cienkiej warstwie otuliny betonowej. Nieco inaczej odspoiła się taśma typu M1214 w belce B-08Mm. Na odcinku wzmocnionym matą, taśma w miarę utraty przyczepności do betonu odpajała się od środka belki w kierunku podpory, się na styku kleju i otuliny betonowej. W chwili, gdy odspojenie taśmy głównej osiągnęło przekrój nie wzmocniony matą, płaszczyzna odspojenia zmieniła

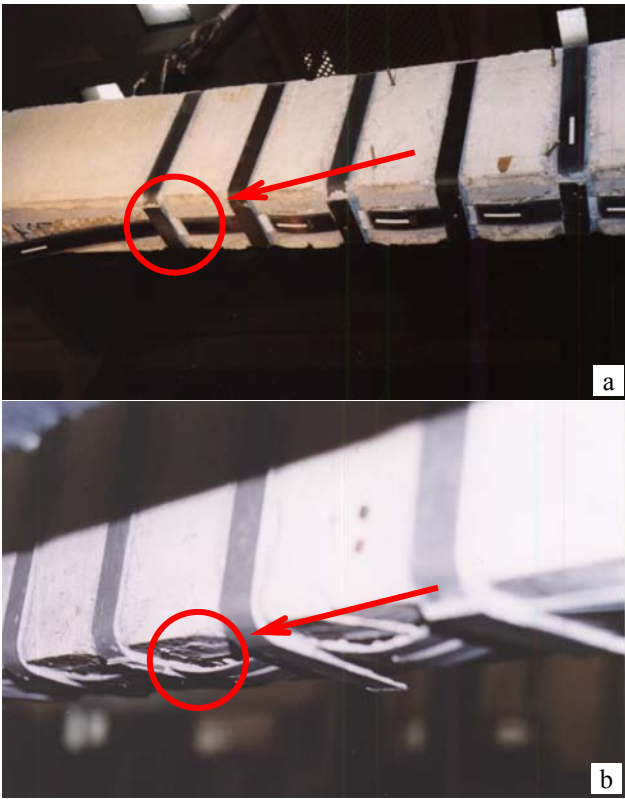


Rys. 4.2. Płaszczyzna odspojenia taśmy: a) B-08S, b) B-08M
 Fig. 4.2. Delamination of the strip: a) B-08S, b) B-08M

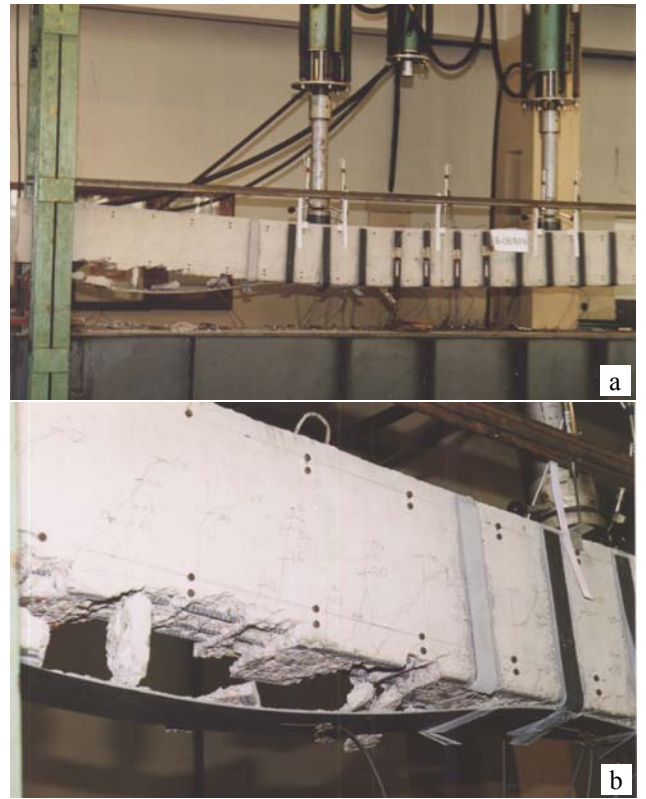
of the lateral strips occurred. In a moment later remaining length of the main strip debonded immediately (Fig. 4.4.b). The strip delamination plane initiated in thin concrete cover on the central beam's interval, but on the left interval (from the external L-shaped strip to the support) the strip debonded with concrete cover in the plane of the ordinary steel reinforcement (Fig. 4.4.b).

The same observations concerning the mode of failure repeated for beams strengthened with the bottom main strip and additional perpendicular CFRP sheets (B-08Sm and B-08Mm). Although the sheet bonded on the whole bending region didn't enable to observe cracking of the beam, special vertical cracks along the fibres of the sheet were clearly visible. Explosion of breaking concrete preceded the failure and significant inclination of the sheet's fibers along the longitudinal axis occurred (Fig. 4.5.a). In a moment later the sheet's fibres fractured along the tension edge of the beam and delamination of the left length of the bottom strip appeared (Fig. 4.5.b).

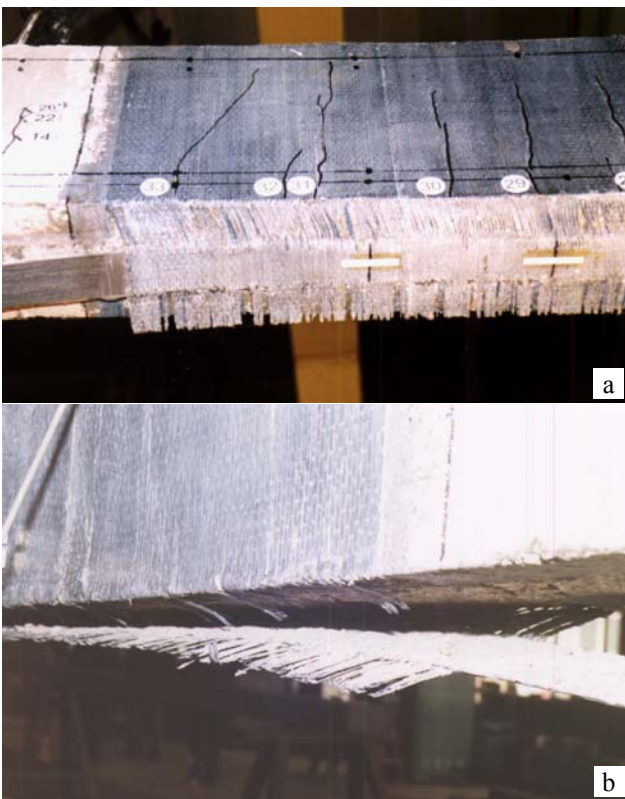
Delamination plane of the main strip for the beam B-08Sm was initiated in thin concrete cover on the whole length of the beam (Fig. 4.5.b). In case of the beam B-08Mm the bottom strip of type M1214 debonded from the beam in slightly different manner. On the interval strengthened with the U-jacked sheets the main strip delamination moved from the center of the beam in the direction to the support both in adhesive and thin concrete cover. When the bottom strip's delamination extended the



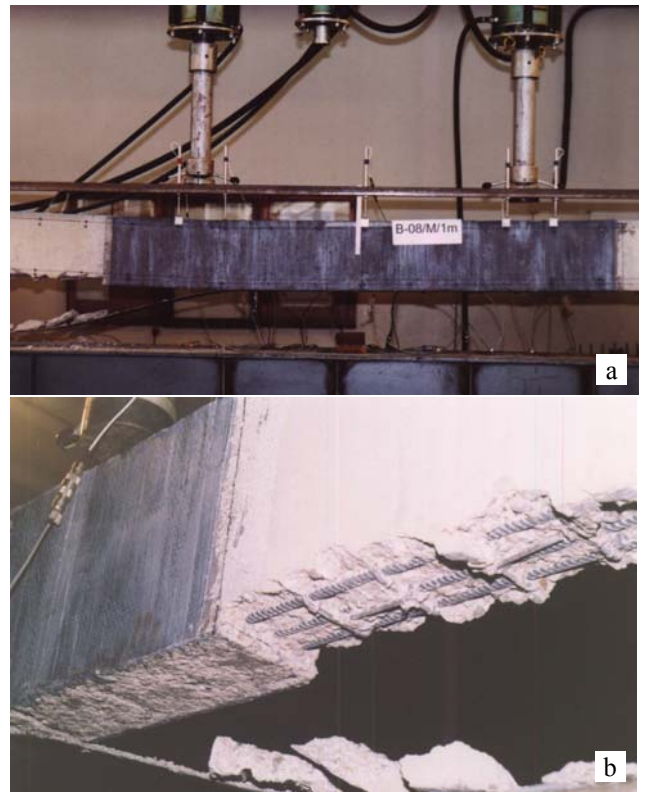
Rys. 4.3. Zniszczenie belki B-08Sk: a) poślizg między taśmą i kształtkami b) lokalne odspojenie taśmy
 Fig. 4.3. Failure of B-08Sk beam: a) slip of the strip and L-shaped strips, b) local delamination of the strip



Rys. 4.4. Zniszczenie belki B-08Mk: a) widok z boku na stanowisku, b) płaszczyzna odspojenia taśmy
 Fig. 4.4. Failure of B-08Mk beam: a) lateral view, b) delamination plane of the strip



Rys. 4.5. Zniszczenie belki B-08Sm: a) pochylenie włókien, b) zerwanie włókien maty wzdłuż krawędzi belki
 Fig. 4.5. Failure of B-08Sm beam: a) inclination, b) fracture of the sheet's fibres along the beam's edge



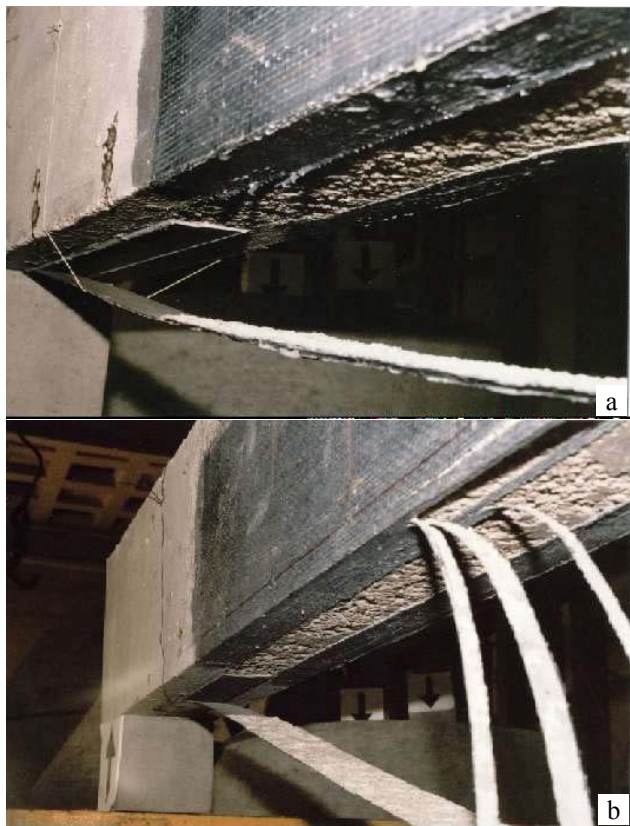
Rys. 4.6. Zniszczenie belki B-08Mm: a) widok belki z boku, b) płaszczyzna odspojenia taśmy
 Fig. 4.6. Failure of B-08Mm beam: a) lateral view, b) delamination plane of the strip

swoje położenie i na pozostałym odcinku przebiegała na granicy zbrojenia zwykłego (rys. 4.6).

Wszystkie belki II serii zniszczyły się w podobny sposób jak belki serii I, na skutek odspojenia mat i taśm od powierzchni betonu.

Zniszczenie belki B-083m wzmocnionej trzema warstwami mat przyklejonych na spodniej powierzchni belki przebiegało gwałtownie, bez wcześniejszej sygnalizacji.

Zastosowanie mat przyklejanych na bocznych powierzchniach belek (B-08Smb i B-083mb) opóźniło nieco zniszczenie i złagodziło jego przebieg. Charakterystyczne trzaski betonu, pękającego pod powierzchnią mat bocznych, sygnalizowały postępujące odspojenie taśm i mat dolnych. Proces odspojenia materiałów kompozytowych także rozpoczynał się zawsze w obszarze czystego zginania i postępował w kierunku jednej z podpór.



Rys. 4.7. Płaszczyzna odspojenia taśmy głównej w belkach: a) B-08Smb, b) BO-08Smb

Fig. 4.7. Delamination plane of the strip for beams: a) B-08Smb, b) BO-08Smb

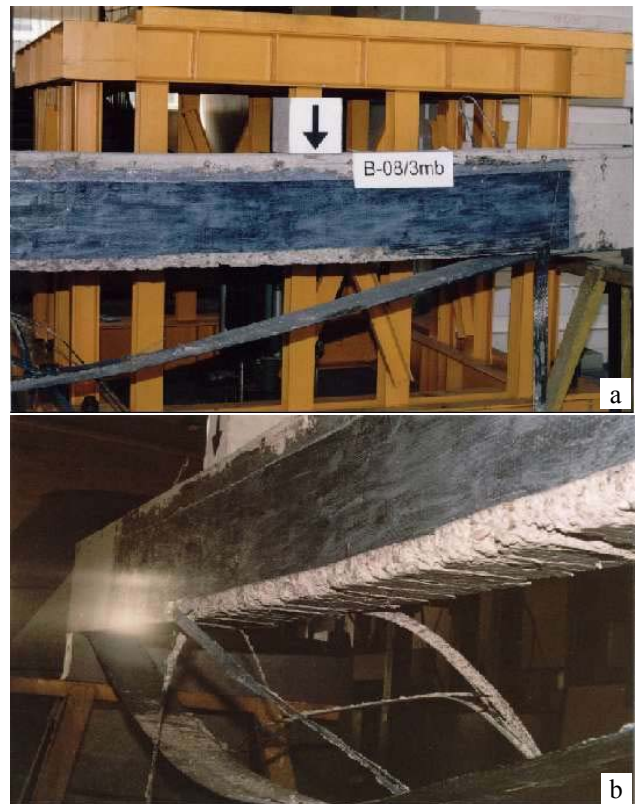
Zaobserwowano bardzo dobrą współpracę taśmy dolnej z dodatkowymi matami w belce B-08Smb. Odpajająca się taśma pociągała za sobą naklejoną na niej matę i ostatecznie odspoiła się od powierzchni betonu wraz z wydzielonym fragmentem maty o szerokości taśmy (50mm), na długim odcinku, obejmującym obszar czystego zginania i strefę przypodporową (rys. 4.7.a). Pozostała część maty naklejonej bezpośrednio na dolnej i bocznych powierzchniach betonu pozostała nienaruszona. Płaszczyzna odspojenia taśmy głównej, na odcinku oklejonym

cross section of the end of the sheets, the plane of the main strip delamination changed the level for the plane of the steel reinforcement (Fig. 4.6).

Failure of all beams of the Series II was similar to the failure of Series I beams due to delamination of the composites from the concrete surface.

Failure of B-083m beam strengthened with three layers of the sheets on the bottom side of the beam occurred abruptly without any signals.

Application of the additional sheets on the lateral faces of the beams B-08Smb and B-083mb delayed failure and mitigated its extension. Explosion of breaking concrete proceeded the bottom strip's and sheet's delamination. The strip's delamination always started in the pure bending region and moved to the one of the supports.



Rys. 4.8. Zniszczenie belki B-083mb: a) widok z boku, b) płaszczyzna odspojenia mat dolnych i bocznych

Fig. 4.8. Failure of B-083mb beam: a) lateral view, b) delamination plane of bottom and lateral sheets

Very good cooperation of the main bottom strip with the additional U-jacket sheets (with longitudinal fibres) were observed for the beam B-08Smb. The main strip moving under the sheet from the beam center to its support resulted in partial debonding of the vicinity fibres of the lateral sheets. Finally the strip debonded from the concrete surface together with the relevant part of the sheet (width 50mm) comprising pure bending and support regions (Fig. 4.7.a). Remaining part of the sheet bonded directly to the bottom and lateral faces of the concrete

matą przebiegała w cienkiej warstwie otuliny betonowej, a poza tym odcinkiem, na końcu taśmy, w cienkiej warstwie kleju.

Obserwacje procesu zniszczenia belki BO-08Smb (wzmocnionej pod obciążeniem), potwierdziły opinię o inicjacji procesu odspojenia materiałów kompozytowych w obszarze czystego zginania. Odsypająca się taśma doprowadziła do oderwania nieco szerszego fragmentu maty niż w belce B-08Smb (rys. 4.7.b).

Badanie belki B-083mb, wzmocnionej matami przyklejonymi na dolnej i bocznych jej powierzchniach, wykazało, że jednocześnie z odspojeniem mat dolnych doszło do odklejenia fragmentu mat bocznych na wysokości nie przekraczającej 50 mm od dolnej krawędzi belki (rys. 4.8). Płaszczyzna odspojenia przebiegała częściowo w warstwie kleju i cienkiej warstwie otuliny betonowej. Taki mechanizm zniszczenia świadczy o znacznie lepszej współpracy mat dolnych z bocznymi (B-083mb), niż w przypadku belki wzmocnionej sztywną taśmą główną i dodatkowymi matami (B-08Smb).

Z obserwacji wszystkich zbadanych belek wynika, że taśma dolna – lub maty – zachowywały się jak ściąg, który na krótko przed zniszczeniem połączony był z belką tylko lokalnie na końcach kompozytu. Podobne spostrzeżenia zarejestrowano we wcześniejszych badaniach przeprowadzonych na belkach o rozpiętości 3000mm [9].

4.2.2. Siły niszczące, odkształcenia i rysy

Wartości sił niszczących i średnich odkształceń taśm lub mat CFRP, zarejestrowane w chwili zniszczenia elementów, zestawiono w tablicy 4.4. W tablicy określono też stopnie wykorzystania nośności materiałów kompozytowych, jako iloraz $\varepsilon_{p, test} / \varepsilon_{pu}$.

beam didn't debond. The plane of the main strip's delamination on the interval strengthened with U-jacket sheets initiated in thin concrete cover and adhesive layer as well.

Results of the beam BO-08Smb (strengthened under loading) confirmed opinion about the beginning of the strip's delamination in the pure bending region. The sheets debonded on the entire bottom surface of the beam B0-08Smb (strengthened after initial loading), not on the part equivalent to the strip width only as it appeared for the beam B-08Smb (Fig. 4.7.b).

Observations of the beam B-083mb which was strengthened with three layers of the bottom sheets and one layer of the lateral sheets confirmed that the bottom sheets moving from the beam center to its support caused partial debonding of the lateral sheets. Finally, the sheets debonded on the level of about 50-mm above the bottom beam edge. The plane of the sheets debonding initiated in a thin layer of the concrete cover and only partially in the adhesive layer. This mode of failure confirmed more effective cooperation of the lateral sheets with the bottom flexible sheets (B-083mb) than the stiff bottom strip with the lateral sheets (B-08Smb).

Results of all tested beams confirmed that the main CFRP strip behaved as the bowstring, which was connected with the beam only locally at the strip's ends just before the failure. Similar remarks were registered in the previous test carried out on the beams with span 3000 mm [9].

4.2.2. Ultimate loads, strains and cracks

Values of the ultimate loads and the mean strains of the strips or sheets are shown in Table 4.4. Ratio of the composite utilization $\varepsilon_{p, test} / \varepsilon_{pu}$ are presented in Table 4.4 as well.

Tablica 4.4. Wartości sił niszczących, średnie odkształcenia dolnej taśmy CFRP i $\varepsilon_{p, test} / \varepsilon_{pu}$

Table 4.4. Ultimate loads, mean strains of a bottom CFRP strip in failure and $\varepsilon_{p, test} / \varepsilon_{pu}$ ratio

Seria Series	Typ belki Symbol of element	Obciążenie niszczące Ultimate load $2F_u$, [kN]	$\varepsilon_{p, test}$ [‰]	ε_{pu} [‰]		$\varepsilon_{p, test} / \varepsilon_{pu}$	
				Taśma / Strip	Mata / Sheet	Taśma / Strip	Mata / Sheet
I	B-08M	140	5,06	12,4	-	0,41	-
	B-08Mk	150	5,65			0,46	
	B-08Mm	152	5,48			0,44	
	B-08S	94	6,17	17,0		0,36	
	B-08Sk	102	8,64			0,51	
	B-08Sm	102	6,60			0,39	
II	B-083m	92	6,81	-	15	-	0,45
	B-083mb	123	8,42			-	0,56
	B-08Smb	114	7,68	17		0,45	0,51
	BO-08Smb	110	6,27*			0,37	0,42

$\varepsilon_{p, test}$ – odkształcenie taśmy lub maty naklejonej na spodniej powierzchni belki w chwili odspojenia
strain of the CFRP strip or sheet bonded to the bottom surface of the beam during the delamination

ε_{pu} – graniczne odkształcenie taśmy lub maty przy zerwaniu
ultimate strain of the strip or sheet

$\varepsilon_{p, test} / \varepsilon_{pu}$ – stopień wykorzystania wytrzymałości taśmy lub maty przy odspojeniu
the ratio of the tension strength of the strip or sheet during delamination

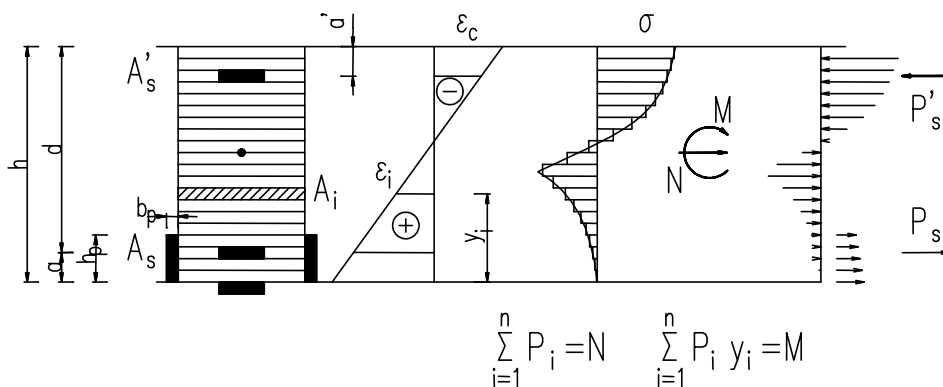
* – odkształcenie maty na spodniej powierzchni belki, mierzone od chwili wzmocnienia belki
strain of the CFRP sheet bonded to the bottom surface of the beam measured from the strengthening

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Do obliczeniowej analizy odkształceń i nośności zginanych elementów żelbetowych wzmocnionych materiałami CFRP zastosowano model nieliniowej analizy żelbetowych elementów prętowych według Kamińskiej i Czkwianianca, [34], w którym uwzględnia się tylko naprężenia normalne oraz przyjmuje:

- nieliniową zależność σ - ϵ dla betonu strefy ściskanej,
- doświadczalne zależności σ - ϵ dla stali zbrojeniowej i kompozytów CFRP,
- zasadę tension stiffening oraz założenie, że rysy prostopadłe do osi pręta są rozmyte na jego długości,
- zasadę zachowania płaskiego przekroju.

Rozważono prostokątny przekrój żelbetowy wzmocniony zewnętrznym zbrojeniem kompozytowym CFRP, przyklejonym na dolnej i bocznych powierzchniach tego przekroju (rys. 5.1). Przekrój zostaje podzielony na wysokości na około 150 warstw. Ten podział dotyczy betonu w strefie ściskanej i rozciąganej oraz materiału CFRP, przyklejonego na bocznych powierzchniach belki, o włóknach równoległych do jej osi. Stalowe zbrojenie ściskane i rozciągane oraz dolna taśma CFRP są traktowane jako odrębne warstwy o zadanym położeniu i polu przekroju.



Rys. 5.1. Model obliczeniowy

Fig. 5.1. Calculated model

Obciążenie zewnętrzne jest wyznaczone z warunków równowagi sił i momentów w przekroju, dla kolejnych stanów jego odkształcenia. Za nośność przekroju przyjmuje się takie obciążenie, przy którym zostają osiągnięte graniczne odkształcenia któregoś z materiałów: betonu ϵ_{cu} , stali ϵ_{su} lub odkształcenie taśmy dolnej $\epsilon_{p, test}$, odpowiadające jej odspojeniu od powierzchni betonu.

Model obliczeniowy wg [34] zastosowano już wcześniej do obliczeniowej weryfikacji badań żelbetowych belek wzmocnionych taśmami CFRP [9], uzyskując dobrą zgodność wyników obliczeniowych i doświadczalnych.

Na rysunku 5.2 zamieszczono doświadczalne i obliczeniowe zależności $2F - \epsilon_p$ (obciążenie – średnie odkształcenie taśmy dolnej) dla dwu podstawowych belek I serii, B-08M i B-08S. Nie podano rysunków z dodatkowym zbrojeniem poprzecznym, gdyż różnią się one tylko nieco większymi odkształceniami końcowymi, przy których doszło do odspojenia kompozytu.

5. ANALYSIS OF THE TEST RESULTS

A non-linear model of RC members strengthened with CFRP materials [34] (Kamińska, Czkwianianc) was used for analysis of strains and load bearing capacity. The model considers only normal stresses and other assumptions are as follows:

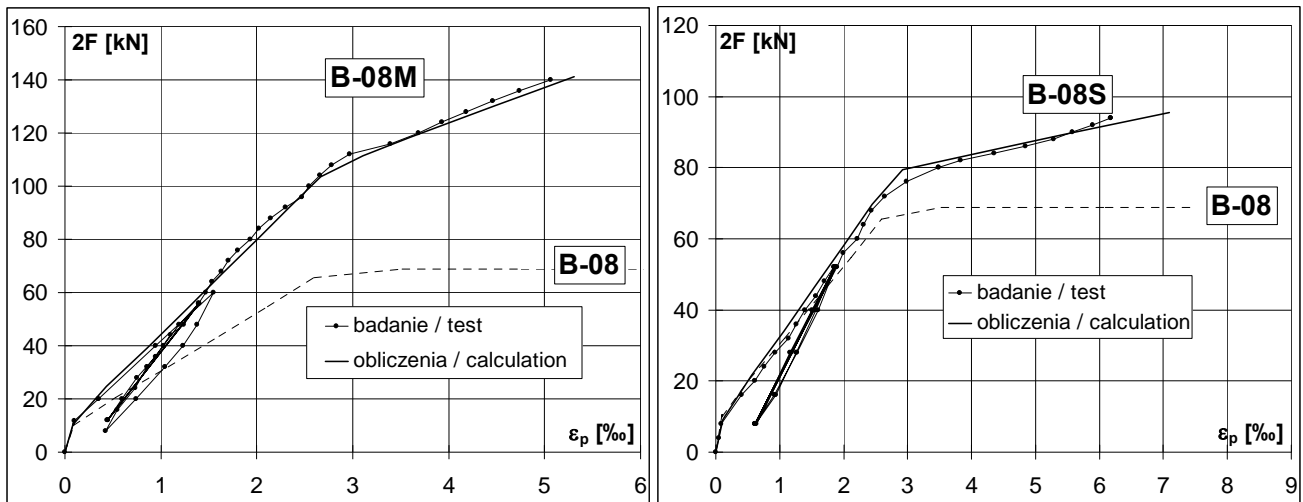
- non-linear σ - ϵ relationship for concrete in compression,
- experimental σ - ϵ relationships for reinforcing steel and CFRP composites,
- tension stiffening principle and assumption that cracks perpendicular to element axis are fuzzy over its length;
- plane section principle.

A rectangular cross section of reinforced concrete beam strengthened with an external CFRP reinforcement bonded to the bottom and lateral sides of the element was considered (Fig. 5.1). The cross-section was divided over its depth into about 150 layers. Compressive and tensile steel reinforcement and CFRP strips are treated as a separate layers of known position and the cross-sectional area.

External load value was calculated based on the equilibrium condition of generalized forces in the cross-section. Load for which limit strain in one of the materials was reached (ϵ_{cu} - of concrete, ϵ_{su} - of steel, $\epsilon_{p, test}$ - of CFRP during delamination failure) was accepted as the load bearing capacity of the cross-section.

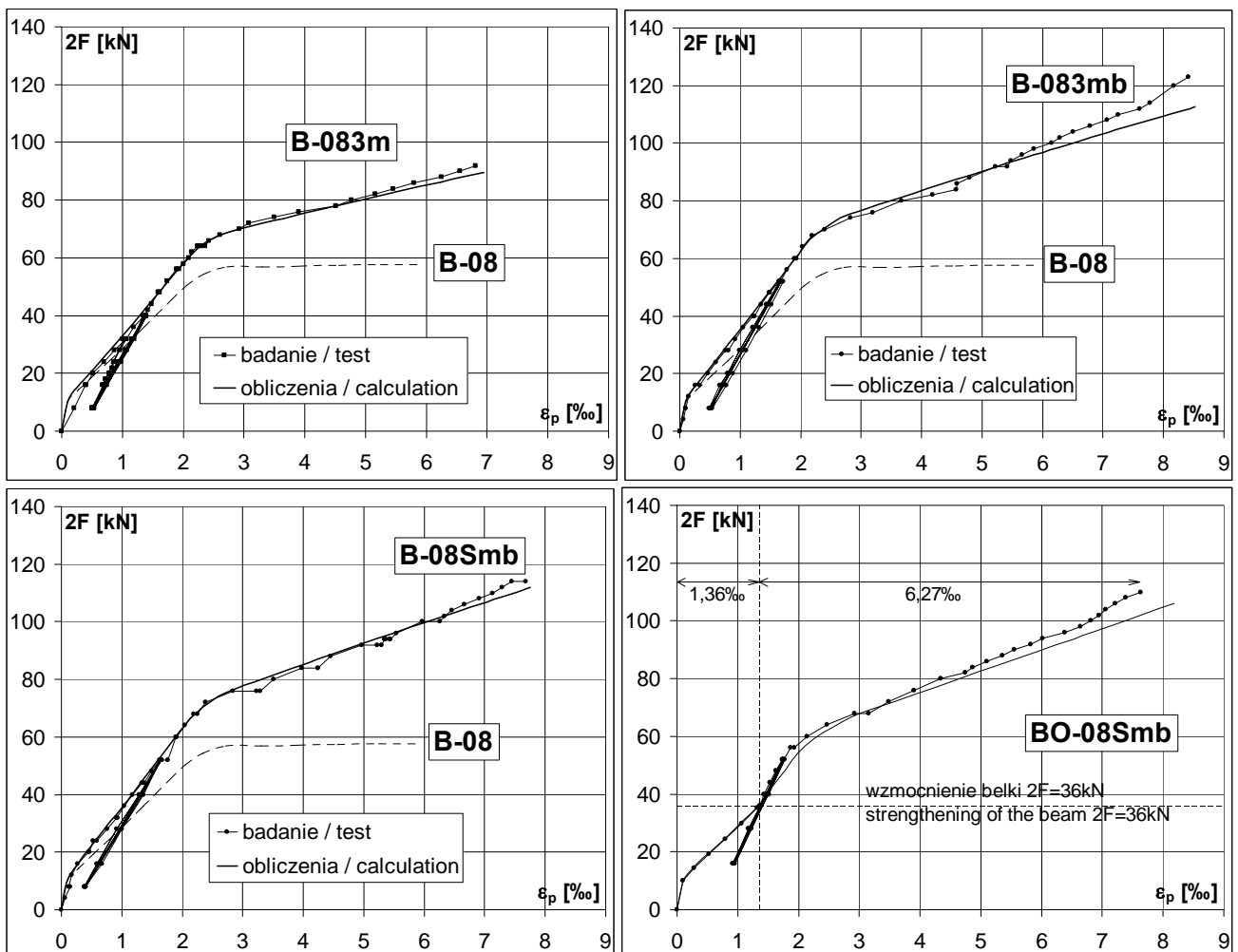
This model [34] was applied earlier to analytical verification of the tests results of RC beams strengthened by CFRP [9]. Compatibility of analytical and experimental results was gained.

Experimental and calculated relationships $2F - \epsilon_p$ (load – average strain of the bottom strip) for two basic beams of Series I (B-08M, B-08S) are shown in Fig. 5.2. Curves for the beams strengthened with additional vertical CFRP reinforcement are not presented because they are different only in final strains of the strip registered during delamination failure.



Rys. 5.2. Porównanie obliczeniowych i doświadczalnych zależności $2F - \epsilon_p$ dla belek wzmocnionych i niewzmocnionych I serii

Fig. 5.2. Comparison of calculated and experimental $2F - \epsilon_p$ characteristic for strengthened and unstrengthened Series I beams



Rys. 5.3. Porównanie obliczeniowych i doświadczalnych zależności $2F - \epsilon_p$ dla belek wzmocnionych i niewzmocnionych serii II

Fig. 5.3. Comparison of calculated and experimental $2F - \epsilon_p$ characteristic for strengthened and non-strengthened Series II beams

Analogiczne wykresy dla wszystkich czterech belek II serii są przedstawione na rys. 5.3. Dotyczy to także belki wstępnie obciążonej przed przyklejeniem kompozytów, gdyż przyjęty model obliczeniowy umożliwi uwzględnienie takiego przypadku.

Jak widać, przyjęty model bardzo dobrze opisuje zachowanie się wzmocnionego elementu w prawie całym zakresie obciążeń uzyskanych w badaniach, zwłaszcza w odniesieniu do obciążenia rysującego i obciążenia, przy którym dochodzi do uplastycznienia stalowego zbrojenia. Niewielkie różnice pomierzonych i obliczeniowych odkształceń w końcowym etapie badania można przypisać rozpoczynającemu się procesowi odspajania kompozytu, co podważa podstawowe założenie o obowiązywaniu zasady zachowania płaskiego przekroju.

Na wykresach podano też (linią przerywaną) obliczeniowe zależności obciążenie – odkształcenie belki nie wzmocnionej, oznaczonej jako B-08, dzięki czemu można ocenić stopień wzmocnienia uzyskany za pomocą kompozytów CFRP.

Jak można zauważyć, stopień wzmocnienia na zginanie wynosi od 1,37 do 2,21. Zależy on od rodzaju i ilości kompozytu oraz wielkości odkształceń, przy jakich dochodzi do odspojenia kompozytu. Im są one wyższe, tym oczywiście większy jest stopień wykorzystania nośności zastosowanego materiału kompozytowego (por. tabl. 4.4).

Efekt wzmocnienia jest zależny od poziomu wstępnego obciążenia belki. Im bardziej wyężony jest element w chwili wzmocnienia tym mniejszy jest przyrost nośności po wzmocnieniu i mniejszy jest stopień wykorzystania kompozytu. Wyjaśnia to rys. 5.4, na którym przedstawiono obliczeniowe zależności $2F - \varepsilon_p$ dla belki B-08Smb, wzmocnionej pod różnym obciążeniem wstępnym wynoszącym: $2F_0 = 36 \text{ kN}$, 52 kN i 56 kN .

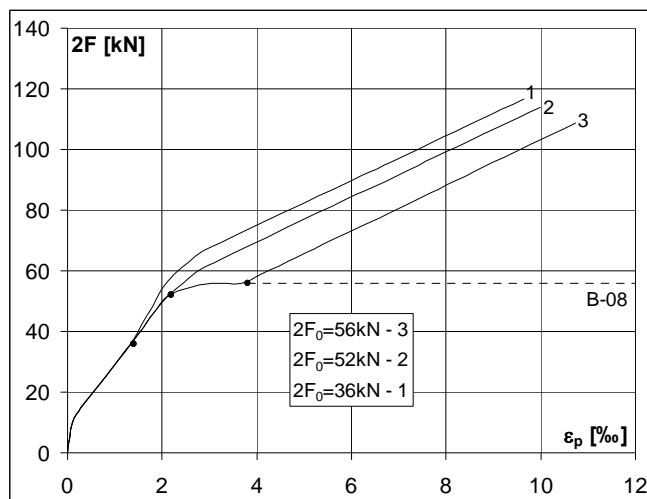
Analogous curves to all four beams of Series II are shown in Fig. 5.3. It considers the beam strengthened under loading because this model takes into account the initial loading before strengthening of the beam.

The diagrams confirm the correctness of the adopted analytical model over the entire range of loads carried out in the tests, especially for the cracking and yielding moment. Slight differences between calculated and test results may be caused by the beginning of the bottom strip delamination at the end of the test. During the strip delamination the plane cross-section principle does not oblige.

Calculated curves $2F - \varepsilon_p$ for non-strengthened beam B-08 (dashed line) are shown in the diagrams as well. Comparison of the non-strengthened and strengthened beams makes possible to determine the strengthening ratio.

The strengthening ratio for flexure equals from 1,37 to 2,21. It depends on the kind and the amount of the composite. The higher are values of the elasticity modulus and the cross-section of CFRP the higher is the strengthening ratio (compare Table 4.4).

The strengthening effect depends on the initial load. The more is loaded element before the strengthening the lower is the increase in the bearing capacity and the ratio of CFRP utilization. Calculated curves $2F - \varepsilon_p$ for the beam strengthened under three different levels of the initial load $2F_0 = 36 \text{ kN}$, 52 kN and 56 kN are shown in Fig. 5.4.



Rys. 5.4. Obliczeniowe zależności $2F - \varepsilon_p$ dla belki B – 08Smb, wzmocnionej pod różnym obciążeniem wstępnym $2F_0$
 Fig. 5.4. Calculated $2F - \varepsilon_p$ characteristic for B – 08Smb beam strengthened under different initial loading $2F_0$

6. PODSUMOWANIE

Badania potwierdziły zaobserwowany we wcześniejszych badaniach sposób zniszczenia elementów wzmocnionych materiałami CFRP przez odspojenie kompozytu, rozpoczynające się w obszarze maksymalnego momentu zginającego. To odspojenie jest inicjowane poprzecznym naciskiem na kompozyt bryłek betonu otuliny, oddzielających się od rozciąganego zbrojenia w sąsiedztwie rys.

Odształcenia podłużne, przy których dochodzi do odspojenia kompozytu, zależą od poprzecznej sztywności zastosowanego materiału kompozytowego. Przy sztywnych taśmach typu M, o module sprężystości $E_p=220\text{GPa}$ i grubości $t=1,4\text{mm}$, było to około 5%, przy taśmach typu S o $E_p=172\text{GPa}$ i grubości $t=1,2\text{mm}$ około 6%, a w wypadku zastosowania mat od 7% do 8,5%. Maty charakteryzują się wprawdzie wyższym niż taśmy współczynnikiem sprężystości, bo $E_p=230\text{GPa}$, ale grubość pojedynczej warstwy maty wynosi zaledwie 0,13mm, a więc nawet przy klejeniu w kilku warstwach poprzeczna sztywność ciągle pozostaje mniejsza niż sztywność taśm.

Badania wykazały też małą skuteczność stosowania dodatkowego zbrojenia kompozytowego, o kierunku włókien prostopadłym do kierunku podłużnego zbrojenia kompozytowego, w postaci warstw maty lub specjalnych kształtek typu L. To dodatkowe zbrojenie podtrzymuje w mechaniczny sposób główne zbrojenie kompozytowe podczas jego odspajania się od powierzchni betonu, co powoduje przyrost odształceń rzędu 1-2%, lecz w niewielkim stopniu wpływa na nośność.

Korzystne jest natomiast układanie podłużnego zbrojenia kompozytowego w taki sposób, aby obejmowało ono oprócz spodu belki także dolne części jej bocznych powierzchni. Jest to możliwe przy stosowaniu samych mat lub mat towarzyszących taśmom. Takie ukształtowanie zbrojenia powoduje zwiększenie odształceń, przy których następuje odspajanie kompozytu, rzędu 24%. Ten efekt można przypisać hamowaniu rozwoju rys w rozciąganej strefie przekroju i ograniczaniu destrukcji otuliny wewnętrznej stalowego zbrojenia.

Model obliczeniowy, w którym przyjęto zasadę zachowania płaskiego przekroju oraz zależności $\sigma - \varepsilon$ odpowiadające rzeczywistym właściwościom zastosowanych materiałów, bardzo dobrze opisuje zachowanie się wzmocnionych elementów w całym zakresie obciążenia. Ten model obliczeniowy może być wykorzystywany przy projektowaniu konstrukcji żelbetowych wzmocnionych na zginanie. Można to uczynić w dwojaki sposób. Pierwszy to przeprowadzenie obliczeń dla średnich wartości materiałowych i określenie obliczeniowej nośności przez wprowadzenie globalnego współczynnika pewności. Drugi sposób, odpowiadający założeniom normowym, to wykonanie obliczeń przy obliczeniowych wartościach wytrzymałości materiałów. Przy czym dla zbrojenia kompozytowego ta obliczeniowa wartość wytrzymałości powinna być określona na podstawie maksymalnych odształceń taśmy podczas jej odspojenia. W obydwu przypadkach odształcenia, przy których dochodzi do odspojenia kompozytu i których wartość pozwala na określenie naprężenia granicznego w kompozycie, powinny być przyjęte przez projektanta, na podstawie wyników badań doświadczalnych dostępnych w literaturze.

6. CONCLUSIONS

The tests confirmed previous observations concerning failure modes by the CFRP delamination from the concrete surface of RC elements strengthened for flexure. The strip delamination starts in the region of maximum bending moment. Vertical pressure of the concrete cover round the tension steel reinforcement on the external CFRP reinforcement is the reason of the strip's delamination.

Longitudinal strip strains during delamination depend on the of the CFRP composite stiffness. They equaled 5% for the stiff strips type M with modulus of elasticity $E_p=220\text{GPa}$ and the thickness of $t=1,4\text{mm}$ and about 6% for the strip type S with $E_p=172\text{GPa}$ and $t=1,2\text{mm}$. In case of the beams strengthened with flexible sheets the strain values equaled from 7% to 8,5%. Even though the modulus of elasticity of the CFRP sheets is higher than for the strips $E_p=230\text{GPa}$ but the thickness of one sheet layer is only $t=0,13\text{mm}$ so the stiffness of even several layers of the sheets is still lower than the stiffness of one strip.

The tests indicated that the application of additional CFRP sheets or L-shaped strips with fibres perpendicular to the longitudinal beam direction was ineffective. This additional reinforcement carried the main bottom CFRP reinforcement during its delamination from the concrete surface. It makes increase in the strains of the bottom strip about 1-2% but increase in the load bearing capacity is very low.

Strengthening by the CFRP sheets with the fibres parallel to the beam span is more effective, especially while the sheets are applied on the lower part of the lateral sides of the beam together with the bottom strips. This mode of the strengthening brings an increase in the strip strains during its delamination by about 24%. This effect is caused by delaying of the cracking process in the tension zone of the cross section of the beam and by confinement of the concrete cover destruction.

Analytical model based on the plane section principal and real nonlinear $\sigma - \varepsilon$ characteristic of all materials corresponded with experimental results over the entire range of loads. This model can be used for designing of the RC beams strengthening for flexure. It may be done in two ways. The first one based on the mean values of the strength material characteristic concerns determining of the design load bearing capacity by introducing of global self-confidence coefficient. The second one, up to the standard assumptions confirms design load bearing capacity determined on the design strength of all materials. The maximum design strength of the CFRP reinforcement should be determined on its maximum delamination strains. In both cases strains of the strip during its delamination should be taken from the experimental tests available in the literature.

Obecne procedury obliczeniowe projektowania wzmocnień żelbetowych elementów na zginanie wprowadzają ograniczenie maksymalnych odkształceń dolnego zbrojenia kompozytowego CFRP do wartości 6÷7 ‰. Jednoczesne zastosowanie podłużnie naklejonych mat dolnych i bocznych pozwala na zwiększenie tej wartości do 8 - 9 ‰ (w zależności od liczby warstw mat), co daje wymierny efekt zwiększenia nośności na zginanie.

W badaniach rozważano przede wszystkim aspekty stanu granicznego nośności analizując mechanizmy zniszczenia, wartości sił niszczących i odpowiadające im wartości granicznych odkształceń zewnętrznego zbrojenia kompozytowego. W projektowaniu konstrukcji wzmocnionych na zginanie tak samo istotna jest analiza stanów granicznych użytkowości, a więc dopuszczalnych szerokości rozwarcia rys i ugięć. Stan użytkowości może bowiem w dużej mierze wpłynąć na ilość projektowanego zbrojenia kompozytowego. Dotychczasowe wyniki badań, dostępne w literaturze światowej, nie poświęcają wiele uwagi takiej analizie. Zatem celem dalszych badań powinno być opracowanie wytycznych do projektowania konstrukcji żelbetowych wzmocnionych na zginanie materiałami CFRP z uwzględnieniem zarówno stanu granicznego nośności, jak i użytkowości.

Present guidelines for the flexural strengthening of RC members impose the limitation of the bottom CFRP strain equal 6,7‰. Simultaneous application of the longitudinal bottom and lateral sheets allows increasing the strain value to 8 - 9‰ (depending on the number of the sheet layers). It makes the increase in the load bearing capacity of the strengthened elements.

First of all the tests confirmed aspects of the ultimate limit states analyzing failure modes ultimate loads and strains of the bottom strip during delamination failure. For designing of the flexural strengthening of RC structures analysis of serviceability limit states (admissible width of the cracks and admissible deflections) is also the same important as ultimate limit states analysis. The serviceability limit state may influence sufficiently on the amount of the design composite reinforcement. Up to now test results available in the world literature do not devote a lot of attention to SLS analysis. Therefore the aim of the future tests should be an elaboration of the design guidelines of RC structures strengthened for flexure by FRP with taking into account as well ultimate limit state as serviceability limit state.

Bibliografia / References

- [1] Meier U.: Composites for Structural Repair and Retrofitting. Proc. of the 1st Int. Conference on Fiber Composites in Infrastructure, ICCI 1996, pp.1202-1216.
- [2] Meier U.: Post strengthening by continuous fiber laminates in Europe. Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures. Proc. of the 3rd International Symposium, 1997, Vol. 1, pp. 42-56.
- [3] Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, Technical report, Biulletin no 14 (fib). Lusanne, Switzerland 2001.
- [4] Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. Reported ACI 440.2R-02.
- [5] Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials. Rechnical Report No. 55 of the Concrete Society Committee, 2000.
- [6] Brandt A.N.: O zastosowaniu uzbrojenia i sprzężenia konstrukcji prętami, ciągłymi i taśmami z materiałów kompozytowych. XLII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1996, mat. pokonferencyjne, Tom 9, s. 169-191.
- [7] Radomski W.: Nowe materiały w mostownictwie, XLV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Wrocław-Krynica 1999, Tom 6, s. 281-302.
- [8] Radomski W.: Zastosowania materiałów kompozytowych w mostownictwie. Konferencja Naukowo-Techniczna „Materiały Kompozytowe w Budownictwie Mostowym”. Zeszyt pokonferencyjny, s. 7 – 22, Łódź, grudzień 2000.
- [9] Kamińska M.E., Kotynia R.: Doświadczalne badania żelbetowych belek wzmocnionych taśmami CFRP. Zeszyt 9, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2000.
- [10] Cichocki M.: Odkształcalność i nośność zarysowanych belek żelbetowych wzmocnionych taśmami kompozytowymi CFRP. „Inżynieria i Budownictwo” nr 12/99, s.698-703.
- [11] Rybak M., Łagoda M.: Wzmacnianie mostów betonowych za pomocą przyklejanego zbrojenia zewnętrznego. XVIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awary Budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje, 19-22.05.1997, s.
- [12] Łagoda M., Olaszek P.: Badania mostów wzmacnianych przez doklejenie zbrojenia. XLV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1999, Tom 9, s. 169-191.
- [13] Kamińska M. E., Kotynia R.: „Obliczeniowe określenie nośności żelbetowych belek wzmocnionych taśmami CFRP”, Inżynieria i Budownictwo 2000 nr 11, s. 620-625.
- [14] Zestaw wyrobów Sika CarboDur do wzmacniania i napraw konstrukcji betonowych ITB2002 AT-15-5604/2002
- [15] Zestaw wyrobów Sika CarboDur do wzmacniania i napraw konstrukcji betonowych ITB2002 AT-15-5604/2002
- [16] Taśmy kompozytowe na bazie żywicy epoksydowych z włóknami węglowymi. S&P CFK-Lamellen. IBD0M AT/2000-04-0822
- [17] Cichocki M.: Badania zarysowanych belek teowych wzmocnionych taśmami kompozytowymi z włókien węglowych – CFRP. „Współczesne metody wzmacniania i przebudowy mostów”, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej, Poznań 8-9.06.1999, s. 34-43.
- [18] Siwowski T.: Wzmocnienie mostu żelbetowego za pomocą taśm kompozytowych z włóknami węglowymi (CFRP), III Ogólnopolska Konferencja Mostowców, Wisła 1997, s. 283-392.
- [19] Siwowski T., Radomski W.: Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu. „Inżynieria i Budownictwo” nr 7/98, s.382-388.
- [20] Furtak K.: Wzmocnienie oczępów wiaduktu drogowego taśmami kompozytowymi z włókien węglowych. „Inżynieria i Budownictwo” nr 8/98, s. 435-437.
- [21] Furtak K.: Przypadek wzmocnienia żelbetowych belek mostowych za pomocą mat kompozytowych z włókien węglowych. IX Seminarium „Współczesne metody wzmacniania i przebudowy mostów”, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej, Poznań 8-9.06.1999, s. 53-59.
- [22] Kamiński M., Wydra W.: Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych za pomocą włókien węglowych z uwzględnieniem wymagań ochrony przeciwpożarowej. XIII Konferencja „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji”, Ustroń 26-28.02.1998, s. 87-98.
- [23] Kotynia R.: Load bearing capacity and strains of reinforced concrete beams strengthened with carbon composite plates, The 3rd International PhD Symposium in Civil Engineering, V. II, Vienna 2000, pp. 193- 202 .
- [24] Ahmed O., Van Gemert D.: Effect of Longitudinal Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates of Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams, Fourth Symposium Fiber Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, SP 188-79, pp. 933-943.
- [25] Grace N.F.: Strengthening of Negative Moment Region of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strips, ACI Structural Journal, May-June 2001, V. 98, No.3.
- [26] Takahashi Y., Hata Y., Sato T., Ueda T., Maeda T.: Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Carbon Fiber Sheets, Fourth Symposium Fiber Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, SP 188-62, pp. 711-724.
- [27] Shahawy M., Chaallal O., Beitelman T., El-Saad, A.: Flexural Strengthening with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites of Preloaded Full-Scale Girders, ACI Structural Journal, September-Oktober 2001, V. 98 Nr 5, pp. 735 – 742
- [28] Cha O., Balaguru P., Chung L.: Experimental and Analytical Investigation of Partially Prestressed Concrete Beams Strengthening with Carbon Reinforcement, Fourth International Symposium Fiber Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, SP 188-55, pp. 625-633.
- [29] Breña S.F., Bramblett R.M., Wood S.L., Kreger M.E.: Increasing Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites, ACI Structural Journal, January-February 2003, V. 100, No 1, pp. 36 – 46.
- [30] Kamińska M.E., Kotynia R.: Effect of Different Parameters on Strengthening Ratio of RC Beams Strengthened with CFRP Plates, Proceedings of the International Conference Composites in Construction -CCC2001, pp. 529-534, Porto 2001.
- [31] Kamińska M. E, Kotynia R., Sowa Ł., Waśniewski T.: „Efektywność wzmocnienia belek żelbetowych na ścinanie materiałami kompozytowymi CFRP”, XLIX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB Krynica 2003, s. 49-56.
- [32] Ross, A., Jermore D.M., Tedesco J.W., Hughes M.L.: Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite Laminates, ACI Structural Journal, March-April 1999, V.96, No.2, pp. 212-220.
- [33] Kamińska M. E., Kotynia R.: Discussion 96-S23 ACI Structural Journal, January - February 2000, pp. 204-205.
- [34] Czkwianianc A., Kamińska M. E.: Metoda nieliniowej analizy żelbetowych elementów prętowych. KILiW PAN IPPT, Studia z Zakresu Inżynierii nr 36, Warszawa 1993.

Załącznik

Wyniki pomiarów

Badania zostały wykonane w Laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego.

Uczestniczyli w nich:

Adam Frątczak

Monika Potapow

Andrzej Szcześniak

Radosław Walendziak

Andrzej Wierzbicki

oraz dyplomanci Katedry:

Damian Leśniewski

Piotr Lewicki

Michał Sil

Piotr Urbański

Appendix

Results of measurements

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

The participants were also the following:

Adam Frątczak

Monika Potapow

Andrzej Szcześniak

Radosław Walendziak

Andrzej Wierzbicki

and graduated students of Department:

Damian Leśniewski

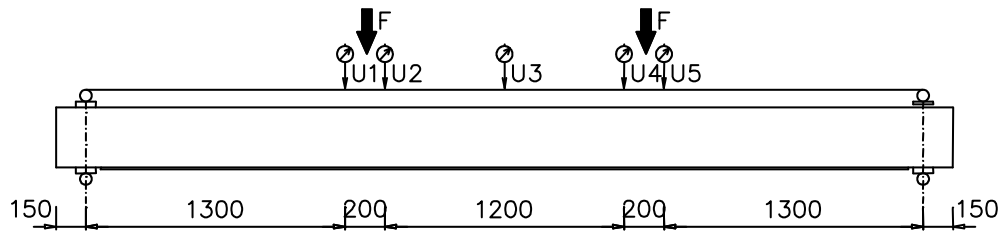
Piotr Lewicki

Michał Sil

Piotr Urbański

W druku podano przykładowe tablice zawierające wyniki badań jednego elementu. Pozostałe wyniki są dostępne w Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej.

Example tables containing investigation results, are presented in print. Remaining results of the research available at the Department of Concrete Structures of Lodz Technical University.



B-08Smb

Tablica A1. Ugięcia / Table A1. Deflections

Nr obciążenia	Pomiar pierwszy ostatni średni	Siła 2F kN	Ugięcia				
			u1	u2	u3	u4	u5
			mm				
1	p	0	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
	o		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	s		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	p	4	0,81	0,87	0,96	0,83	0,75
	o		0,80	0,87	0,96	0,83	0,78
	s		0,81	0,87	0,96	0,83	0,77
3	p	8	1,24	1,34	1,48	1,28	1,17
	o		1,23	1,35	1,50	1,29	1,18
	s		1,24	1,34	1,49	1,28	1,18
4	p	8	1,33	1,44	1,57	1,37	1,27
	o		1,32	1,43	1,60	1,38	1,28
	s		1,33	1,44	1,59	1,38	1,28
5	p	12	2,08	2,23	2,47	2,14	2,00
	o		2,10	2,26	2,49	2,17	2,02
	s		2,09	2,24	2,48	2,16	2,01
6	p	16	2,73	2,92	3,24	2,80	2,61
	o		2,77	2,98	3,30	2,87	2,66
	s		2,75	2,95	3,27	2,84	2,64
7	p	20	4,09	4,36	4,87	4,23	3,97
	o		4,11	4,39	4,91	4,27	4,00
	s		4,09	4,38	4,89	4,26	3,99
8	p	20	4,47	4,77	5,33	4,63	4,36
	o		4,46	4,78	5,34	4,65	4,35
	s		4,46	4,77	5,34	4,65	4,36
9	p	24	4,81	5,14	5,75	5,00	4,70
	o		4,79	5,15	5,77	5,01	4,71
	s		4,80	5,15	5,76	5,01	4,71
10	p	24	5,21	5,58	6,24	5,42	5,10
	o		5,22	5,58	6,26	5,44	5,11
	s		5,21	5,59	6,25	5,44	5,11
11	p	28	6,52	7,02	7,85	6,82	6,44
	o		6,54	7,05	7,89	6,86	6,47
	s		6,53	7,03	7,87	6,84	6,45
12	p	32	7,88	8,51	9,53	8,31	7,85
	o		7,88	8,52	9,54	8,34	7,86
	s		7,88	8,51	9,53	8,33	7,86
13	p	32	8,43	9,09	10,19	8,92	8,42
	o		8,43	9,10	10,20	8,93	8,43
	s		8,43	9,10	10,19	8,93	8,43
14	p	32	8,43	9,10	10,19	8,92	8,42
	o		8,43	9,11	10,20	8,92	8,43
	s		8,43	9,10	10,20	8,92	8,43
15	p	36	9,38	10,14	11,36	9,95	9,39
	o		9,38	10,14	11,36	9,96	9,40
	s		9,38	10,14	11,36	9,96	9,40
16	p	40	10,53	11,38	12,74	11,19	10,56
	o		10,56	11,43	12,79	11,25	10,60
	s		10,55	11,41	12,77	11,22	10,58
17	p	44	11,83	12,77	14,29	12,58	11,85
	o		11,84	12,78	14,31	12,59	11,85
	s		11,83	12,78	14,30	12,59	11,85
18	p	44	12,36	13,33	14,91	13,15	12,36
	o		12,37	13,34	14,93	13,16	12,37
	s		12,36	13,33	14,92	13,16	12,37
19	p	48	13,23	14,27	15,98	14,08	13,24
	o		13,26	14,30	16,02	14,11	13,27
	s		13,25	14,28	16,00	14,10	13,26
20	p	52	14,43	15,55	17,43	15,35	14,44
	o		14,48	15,61	17,49	15,40	14,49
	s		14,46	15,58	17,46	15,38	14,47

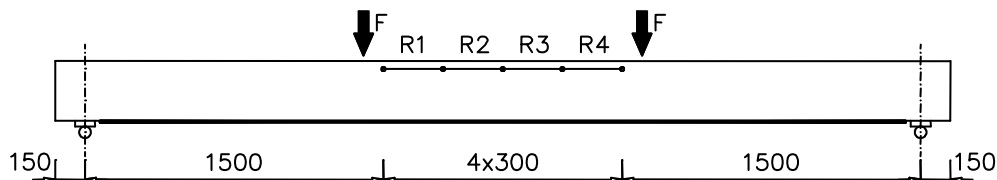
21	p	52	15,03	16,20	18,14	15,99	15,05
	o		15,03	16,20	18,15	16,01	15,05
	s		15,03	16,20	18,15	16,00	15,05
22	p	40	12,53	13,50	15,11	13,33	12,54
	o		12,53	13,50	15,11	13,34	12,54
	s		12,53	13,50	15,12	13,34	12,54
23	p	28	9,84	10,62	11,88	10,47	9,86
	o		9,84	10,62	11,88	10,48	9,86
	s		9,84	10,62	11,89	10,48	9,87
24	p	16	7,10	7,62	8,53	7,48	7,09
	o		7,10	7,62	8,53	7,49	7,08
	s		7,10	7,62	8,53	7,49	7,09
25	p	8	4,89	5,20	5,81	5,13	4,85
	o		4,89	5,20	5,82	5,13	4,84
	s		4,89	5,20	5,82	5,14	4,86
26	p	28	9,28	10,01	11,20	9,86	9,30
	o		9,31	10,05	11,23	9,90	9,33
	s		9,30	10,03	11,22	9,88	9,32
27	p	40	12,22	13,18	14,75	13,02	12,24
	o		12,22	13,18	14,75	13,02	12,24
	s		12,22	13,18	14,75	13,02	12,24
28	p	52	14,99	16,17	18,11	15,95	15,02
	o		15,04	16,22	18,18	16,01	15,06
	s		15,02	16,19	18,14	15,98	15,04
29	p	8	4,97	5,29	5,93	5,23	4,95
	o		4,98	5,30	5,94	5,24	4,95
	s		4,98	5,30	5,93	5,24	4,95
30	p	52	15,05	16,22	18,17	16,00	15,07
	o		15,08	16,25	18,21	16,04	15,09
	s		15,06	16,24	18,19	16,03	15,08
31	p	8	4,98	5,29	5,92	5,22	4,93
	o		4,98	5,29	5,92	5,23	4,94
	s		4,97	5,29	5,92	5,23	4,94
32	p	52	15,14	16,33	18,29	16,12	15,18
	o		15,16	16,34	18,30	16,14	15,19
	s		15,15	16,34	18,30	16,13	15,18
33	p	8	4,95	5,27	5,89	5,17	4,90
	o		4,95	5,27	5,89	5,17	4,91
	s		4,95	5,27	5,89	5,19	4,91
34	p	52	15,32	16,51	18,49	16,31	15,34
	o		15,32	16,51	18,49	16,30	15,35
	s		15,31	16,51	18,49	16,30	15,35
35	p	40	12,45	13,42	15,03	13,26	12,47
	o		12,45	13,43	15,03	13,27	12,47
	s		12,45	13,42	15,03	13,27	12,48
36	p	28	9,78	10,55	11,82	10,41	9,81
	o		9,77	10,56	11,81	10,41	9,81
	s		9,78	10,56	11,82	10,41	9,81
37	p	16	6,91	7,42	8,30	7,28	6,89
	o		6,91	7,42	8,31	7,29	6,88
	s		6,91	7,42	8,31	7,29	6,89
38	p	8	4,88	5,19	5,81	5,12	4,83
	o		4,88	5,20	5,81	5,13	4,84
	s		4,88	5,19	5,81	5,13	4,84
39	p	16	6,81	7,29	8,15	7,15	6,77
	o		6,79	7,30	8,15	7,15	6,78
	s		6,80	7,30	8,15	7,15	6,78
40	p	28	9,58	10,33	11,54	10,17	9,60
	o		9,64	10,40	11,63	10,25	9,68
	s		9,61	10,37	11,59	10,22	9,65
41	p	40	12,65	13,63	15,24	13,45	12,68
	o		12,66	13,65	15,26	13,48	12,70
	s		12,66	13,64	15,25	13,47	12,68

42	p o s	52	15,40	16,60	18,59	16,40	15,43
			15,41	16,61	18,59	16,40	15,44
			15,40	16,61	18,59	16,40	15,43
43	p o s	52	15,48	16,69	18,70	16,48	15,52
			15,50	16,71	18,71	16,49	15,53
			15,49	16,70	18,70	16,49	15,53
44	p o s	52	16,28	17,56	19,67	17,35	16,32
			16,34	17,63	19,74	17,42	16,39
			16,31	17,59	19,70	17,38	16,35
45	p o s	60	17,36	18,72	20,97	18,52	17,42
			17,41	18,77	21,03	18,57	17,46
			17,38	18,74	21,00	18,55	17,44
46	p o s	60	18,05	19,46	21,75	19,28	18,10
			18,04	19,46	21,75	19,28	18,12
			18,05	19,46	21,75	19,28	18,11
47	p o s	64	18,91	20,46	22,82	20,29	19,05
			18,92	20,46	22,81	20,30	19,05
			18,92	20,46	22,82	20,29	19,05
48	p o s	68	19,89	21,50	24,05	21,40	20,06
			19,93	21,54	24,10	21,44	20,10
			19,91	21,52	24,07	21,42	20,08
49	p o s	68	20,46	22,07	24,72	22,00	20,60
			20,46	22,08	24,73	22,01	20,59
			20,46	22,07	24,72	22,01	20,60
50	p o s	72	21,38	23,12	25,90	23,07	21,55
			21,46	23,21	25,99	23,16	21,64
			21,42	23,17	25,94	23,12	21,60
51	p o s	76	23,46	25,44	28,63	25,45	23,71
			23,80	25,83	29,09	25,85	24,05
			23,64	25,65	28,87	25,67	23,89
52	p o s	76	25,73	28,02	31,55	28,09	26,06
			25,75	28,01	31,55	28,09	26,06
			25,73	28,01	31,55	28,09	26,06
53	p o s	76	26,02	28,34	31,90	28,40	26,33
			26,02	28,33	31,89	28,40	26,33
			26,02	28,33	31,89	28,40	26,32
54	p o s	80	27,31	29,77	33,50	29,89	27,65
			27,47	29,95	33,71	30,07	27,81
			27,40	29,87	33,63	29,99	27,75
55	p o s	84	29,98	32,78	36,95	32,94	30,39
			30,13	32,93	37,11	33,09	30,52
			30,07	32,86	37,05	33,03	30,47
56	p o s	84	31,80	34,80	39,21	34,92	32,15
			31,80	34,79	39,20	34,92	32,14
			31,80	34,79	39,20	34,92	32,14
57	p o s	84	31,83	34,84	39,23	34,95	32,17
			31,83	34,82	39,23	34,95	32,15
			31,83	34,83	39,23	34,95	32,16
58	p o s	88	33,00	36,14	40,69	36,28	33,36
			33,24	36,39	40,97	36,54	33,58
			33,13	36,28	40,83	36,42	33,48
59	p o s	92	36,24	39,76	44,68	40,03	36,70
			36,57	40,11	45,08	40,38	37,00
			36,42	39,93	44,88	40,21	36,85
60	p o s	92	38,34	42,07	47,34	42,41	38,84
			38,33	42,05	47,33	42,39	38,81
			38,34	42,06	47,33	42,40	38,83
61	p o s	92	38,77	42,54	47,91	42,89	39,28
			38,77	42,53	47,88	42,89	39,27
			38,77	42,54	47,89	42,89	39,28
62	p o s	94	39,23	43,07	48,50	43,42	39,76
			39,19	43,03	48,43	43,37	39,71
			39,19	43,02	48,43	43,37	39,71
63	p o s	94	39,30	43,15	48,60	43,52	39,84
			39,30	43,14	48,59	43,51	39,84
			39,31	43,14	48,59	43,51	39,83
64	p o s	94	36,73	36,31	43,55	38,06	39,26
			36,74	36,31	43,54	38,06	39,25
			39,31	43,14	48,59	43,51	39,83
65	p o s	94	36,80	36,38	43,62	38,13	39,33
			36,81	36,39	43,63	38,14	39,33
			39,38	43,22	48,67	43,59	39,90
66	p o s	96	37,52	37,21	44,51	38,98	40,07
			37,58	37,26	44,58	39,05	40,12
			40,13	44,07	49,61	44,47	40,67

67	p o s	100	40,26	40,32	48,08	42,21	42,96
			40,45	40,50	48,29	42,41	43,13
			42,92	47,23	53,21	47,75	43,60
68	p o s	100	42,78	43,04	51,10	44,97	45,50
			42,78	43,01	51,07	44,95	45,48
			45,35	49,85	56,13	50,40	46,06
69	p o s	102	43,25	43,53	51,63	45,47	45,97
			43,25	43,52	51,62	45,48	45,96
			45,82	50,35	56,67	50,92	46,53
70	p o s	104	43,98	44,32	51,81	46,30	46,72
			44,14	44,47	51,82	46,46	46,86
			46,63	51,23	56,85	51,83	47,36
71	p o s	106	45,28	45,74	51,81	47,76	48,04
			45,57	46,06	51,80	48,09	48,33
			48,00	52,72	56,85	53,37	48,75
72	p o s	108	47,12	47,80	51,81	49,91	49,92
			47,29	47,98	51,80	50,08	50,05
			49,80	54,74	56,85	55,47	50,58
73	p o s	110	48,59	49,48	51,82	51,59	50,08
			48,66	49,78	51,79	51,94	50,06
			51,22	56,46	56,85	57,23	50,63
74	p o s	112	48,68	50,17	51,82	51,95	50,08
			48,65	50,13	51,78	51,95	50,03
			51,23	56,98	56,85	57,39	50,63
75	p o s	114	48,66	50,16	51,81	51,95	50,07
			48,65	50,13	51,78	51,95	50,04
			51,23	56,97	56,84	57,40	50,62
76	p o s	114	48,67	50,16	51,81	51,95	50,10
			48,67	50,15	51,81	51,94	50,06
			51,24	56,99	56,86	57,39	50,63

Pomiary ugięć wykonano przetwornikami przemieszczeń liniowych o zakresie 50mm.

Deflection measurements were carried out by means of linear displacement transducers of 50mm working range.



B-08Smb

Tablica A2. Odształcenia strefy ściskanej
Table A2. Strains of compression zone

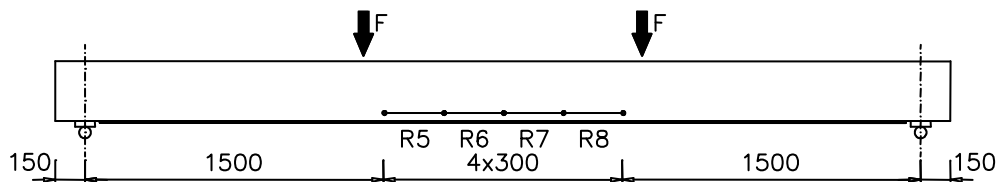
Nr obciążenia	Pomiar pierwszy ostatni średni	Siła 2F kN	Odształcenia strefy ściskanej ϵ_c			
			R1	R2	R3	R4
			‰			
1	p o s	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	p o s	4	-0,07	-0,10	-0,07	-0,07
3	p o s	8	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13
4	p o s	8	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17
5	p o s	12	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20
6	p o s	16	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23
7	p o s	20	-0,30	-0,30	-0,30	-0,30
8	p o s	20	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33
9	p o s	24	-0,33	-0,37	-0,33	-0,37
10	p o s	24	-0,37	-0,37	-0,37	-0,40
11	p o s	28	-0,43	-0,43	-0,43	-0,47
12	p o s	32	-0,47	-0,50	-0,47	-0,53
13	p o s	32	-0,50	-0,53	-0,50	-0,57
14	p o s	32	-0,53	-0,53	-0,53	-0,57
15	p o s	36	-0,57	-0,57	-0,57	-0,63
16	p o s	40	-0,63	-0,63	-0,63	-0,70
17	p o s	44	-0,67	-0,67	-0,67	-0,77
18	p o s	44	-0,70	-0,70	-0,70	-0,80
19	p o s	48	-0,73	-0,77	-0,73	-0,83
20	p o s	52	-0,80	-0,80	-0,80	-0,90

21	p o s	52	-0,83	-0,83	-0,80	-0,97
22	p o s	40	-0,73	-0,70	-0,70	-0,83
23	p o s	28	-0,57	-0,60	-0,57	-0,67
24	p o s	16	-0,43	-0,43	-0,40	-0,50
25	p o s	8	-0,30	-0,30	-0,27	-0,33
26	p o s	28	-0,53	-0,57	-0,53	-0,60
27	p o s	40	-0,70	-0,73	-0,70	-0,80
28	p o s	52	-0,83	-0,87	-0,80	-0,97
29	p o s	8	-0,30	-0,30	-0,30	-0,33
30	p o s	52	-0,83	-0,87	-0,80	-0,97
31	p o s	8	-0,30	-0,30	-0,27	-0,33
32	p o s	52	-0,83	-0,83	-0,80	-0,97
33	p o s	8	-0,30	-0,33	-0,30	-0,33
34	p o s	52	-0,83	-0,83	-0,80	-0,97
35	p o s	40	-0,73	-0,77	-0,70	-0,83
36	p o s	28	-0,63	-0,60	-0,57	-0,67
37	p o s	16	-0,43	-0,43	-0,40	-0,50
38	p o s	8	-0,30	-0,33	-0,30	-0,33
39	p o s	16	-0,40	-0,43	-0,37	-0,47
40	p o s	28	-0,57	-0,57	-0,53	-0,63
41	p o s	40	-0,73	-0,70	-0,67	-0,80
42	p o s	52	-0,83	-0,87	-0,80	-0,97

43	p o s	52	-0,87 -0,87 -0,87	-0,83 -0,83 -0,83	-0,83 -0,80 -0,97	-0,97 -0,97 -0,97
44	p o s	52	-0,90 -0,90 -0,90	-0,87 -0,90 -0,87	-0,87 -0,87 -0,87	-1,03 -1,03 -1,03
45	p o s	60	-0,97 -0,97 -0,97	-0,93 -0,93 -0,93	-0,90 -0,90 -0,90	-1,10 -1,10 -1,10
46	p o s	60	-1,03 -1,07 -1,07	-1,00 -1,00 -1,00	-0,97 -0,97 -0,97	-1,17 -1,17 -1,17
47	p o s	64	-1,10 -1,07 -1,07	-1,03 -1,03 -1,03	-1,00 -1,00 -1,00	-1,20 -1,20 -1,20
48	p o s	68	-1,13 -1,10 -1,13	-1,10 -1,07 -1,07	-1,07 -1,07 -1,07	-1,27 -1,27 -1,27
49	p o s	68	-1,13 -1,17 -1,17	-1,13 -1,10 -1,10	-1,10 -1,10 -1,10	-1,33 -1,33 -1,33
50	p o s	72	-1,20 -1,20 -1,23	-1,17 -1,17 -1,17	-1,17 -1,17 -1,17	-1,40 -1,40 -1,40
51	p o s	76	-1,30 -1,33 -1,30	-1,27 -1,27 -1,27	-1,23 -1,23 -1,23	-1,50 -1,53 -1,53
52	p o s	76	-1,43 -1,43 -1,43	-1,37 -1,37 -1,37	-1,37 -1,37 -1,37	-1,63 -1,63 -1,63
53	p o s	76	-1,40 -1,37 -1,40	-1,40 -1,40 -1,40	-1,37 -1,37 -1,37	-1,67 -1,67 -1,67
54	p o s	80	-1,43 -1,43 -1,43	-1,47 -1,47 -1,43	-1,43 -1,43 -1,43	-1,73 -1,73 -1,73
55	p o s	84	-1,50 -1,53 -1,53	-1,53 -1,53 -1,53	-1,53 -1,53 -1,53	-1,83 -1,87 -1,87
56	p o s	84	-1,60 -1,63 -1,63	-1,63 -1,63 -1,63	-1,60 -1,63 -1,60	-1,97 -1,97 -1,97
57	p o s	84	-1,63 -1,63 -1,63	-1,63 -1,63 -1,63	-1,60 -1,63 -1,63	-1,97 -1,97 -1,97
58	p o s	88	-1,67 -1,70 -1,67	-1,67 -1,70 -1,67	-1,67 -1,67 -1,67	-2,03 -2,03 -2,03
59	p o s	92	-1,80 -1,80 -1,80	-1,80 -1,80 -1,80	-1,77 -1,80 -1,77	-2,17 -2,17 -2,17
60	p o s	92	-1,93 -1,90 -1,93	-1,90 -1,90 -1,90	-1,87 -1,87 -1,87	-2,30 -2,30 -2,30
61	p o s	92	-1,93 -1,93 -1,93	-1,93 -1,93 -1,93	-1,93 -1,93 -1,93	-2,37 -2,37 -2,37
62	p o s	94	-1,97 -1,97 -1,97	-1,97 -1,97 -1,97	-1,93 -1,93 -1,93	-2,40 -2,40 -2,40
63	p o s	94	-1,97 -1,97 -1,97	-1,97 -1,97 -1,97	-1,93 -1,93 -1,93	-2,40 -2,40 -2,40
64	p o s	94	-2,00 -2,00 -2,00	-2,00 -2,00 -2,00	-1,97 -1,97 -1,97	-2,43 -2,43 -2,43
65	p o s	94	-2,00 -2,00 -2,00	-2,00 -2,00 -2,00	-1,97 -1,97 -1,97	-2,43 -2,43 -2,43
66	p o s	96	-2,03 -2,03 -2,03	-2,03 -2,03 -2,03	-2,00 -2,00 -2,00	-2,47 -2,47 -2,47
67	p o s	100	-2,13 -2,13 -2,13	-2,10 -2,13 -2,13	-2,10 -2,10 -2,10	-2,60 -2,60 -2,60

68	p o s	100	-2,27 -2,27 -2,27	-2,27 -2,23 -2,23	-2,20 -2,20 -2,20	-2,77 -2,77 -2,77
69	p o s	102	-2,30 -2,30 -2,30	-2,27 -2,27 -2,27	-2,23 -2,23 -2,23	-2,80 -2,80 -2,80
70	p o s	104	-2,30 -2,33 -2,33	-2,30 -2,30 -2,30	-2,27 -2,27 -2,27	-2,83 -2,83 -2,83
71	p o s	106	-2,37 -2,37 -2,37	-2,37 -2,37 -2,37	-2,30 -2,33 -2,30	-2,90 -2,90 -2,90
72	p o s	108	-2,43 -2,43 -2,43	-2,43 -2,40 -2,40	-2,37 -2,37 -2,37	-3,00 -3,00 -3,00
73	p o s	110	-2,50 -2,50 -2,50	-2,47 -2,47 -2,47	-2,43 -2,43 -2,43	-3,07 -3,10 -3,10
74	p o s	112	-2,57 -2,57 -2,57	-2,50 -2,50 -2,50	-2,47 -2,47 -2,47	-3,20 -3,20 -3,20
75	p o s	114	-2,60 -2,63 -2,63	-2,57 -2,57 -2,57	-2,50 -2,53 -2,53	-3,27 -3,30 -3,27
76	p o s	114	-2,70 -2,70 -2,70	-2,63 -2,63 -2,63	-2,57 -2,60 -2,60	-3,37 -3,40 -3,40

Pomiary odkształceń wykonano przetwornikami przemieszczeń liniowych o zakresie 10 i 20mm.
Strain measurements were carried out by means of linear displacement transducers of 10 and 20mm working range.



B-08Smb

Tablica A3. Odształcenia strefy rozciąganej

Table A3. Strains of tension zone

Nr obciążenia	Pomiar pierwszy ostatni średni	Siła 2F kN	Odształcenia strefy ściskanej ϵ_c			
			R5	R6	R7	R8
			‰			
1	p o s	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
2	p o s	4	0,07 0,07 0,07	0,00 0,00 0,00	0,03 0,03 0,03	0,03 0,03 0,03
3	p o s	8	0,13 0,13 0,13	0,00 0,00 0,00	0,13 0,10 0,13	0,10 0,07 0,10
4	p o s	8	0,17 0,17 0,17	0,03 0,03 0,03	0,13 0,13 0,13	0,10 0,10 0,10
5	p o s	12	0,13 0,17 0,17	0,00 0,00 0,03	0,17 0,17 0,17	0,13 0,13 0,13
6	p o s	16	0,20 0,23 0,23	0,00 0,03 0,03	0,23 0,27 0,23	0,17 0,20 0,20
7	p o s	20	0,33 0,33 0,33	0,10 0,13 0,13	0,40 0,40 0,40	0,37 0,40 0,37
8	p o s	20	0,37 0,37 0,37	0,17 0,13 0,17	0,43 0,43 0,43	0,40 0,40 0,40
9	p o s	24	0,40 0,40 0,40	0,20 0,20 0,20	0,47 0,47 0,47	0,47 0,43 0,43
10	p o s	24	0,43 0,43 0,43	0,23 0,23 0,23	0,50 0,50 0,50	0,50 0,50 0,50
11	p o s	28	0,57 0,57 0,57	0,33 0,37 0,37	0,67 0,67 0,67	0,63 0,63 0,63
12	p o s	32	0,70 0,70 0,70	0,47 0,47 0,47	0,80 0,80 0,80	0,77 0,77 0,77
13	p o s	32	0,77 0,77 0,77	0,53 0,53 0,53	0,87 0,87 0,87	0,83 0,83 0,83
14	p o s	32	0,77 0,73 0,77	0,53 0,53 0,53	0,87 0,83 0,83	0,83 0,83 0,83
15	p o s	36	0,83 0,87 0,87	0,63 0,63 0,63	0,93 0,97 0,93	0,93 0,93 0,93
16	p o s	40	0,97 0,97 0,97	0,73 0,73 0,73	1,07 1,07 1,07	1,03 1,03 1,03
17	p o s	44	1,10 1,10 1,10	0,87 0,87 0,87	1,20 1,20 1,20	1,17 1,17 1,17
18	p o s	44	1,13 1,13 1,13	0,90 0,90 0,90	1,27 1,23 1,27	1,20 1,20 1,20
19	p o s	48	1,23 1,23 1,23	1,00 1,00 1,00	1,33 1,33 1,33	1,30 1,30 1,30
20	p o s	52	1,33 1,33 1,33	1,10 1,10 1,10	1,47 1,47 1,47	1,43 1,43 1,43

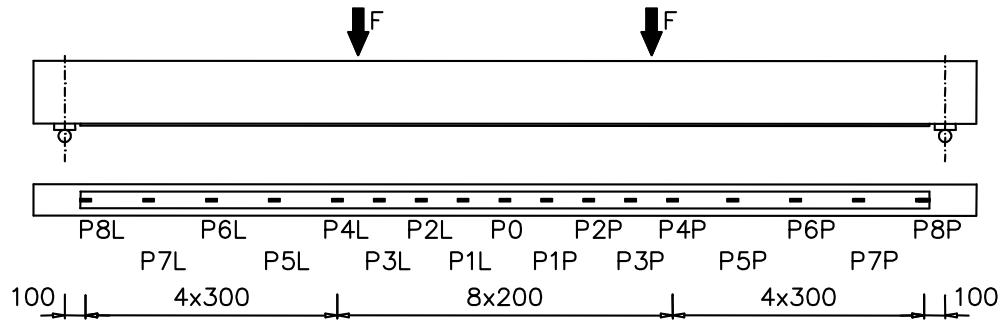
21	p o s	52	1,40 1,37 1,37	1,13 1,13 1,13	1,50 1,50 1,50	1,47 1,47 1,47
22	p o s	40	1,30 1,30 1,30	1,13 1,13 1,13	1,23 1,27 1,23	1,23 0,97 1,23
23	p o s	28	1,03 1,07 1,03	0,90 0,93 0,93	0,97 0,97 0,97	0,93 0,97 0,93
24	p o s	16	0,77 0,80 0,77	0,67 0,67 0,67	0,70 0,67 0,67	0,67 0,67 0,67
25	p o s	8	0,57 0,57 0,57	0,47 0,47 0,47	0,47 0,47 0,47	0,47 0,47 0,47
26	p o s	28	0,83 0,83 0,83	0,77 0,77 0,77	0,93 0,90 0,90	0,90 0,90 0,90
27	p o s	40	1,13 1,13 1,13	1,07 1,07 1,07	1,23 1,20 1,20	1,20 1,20 1,20
28	p o s	52	1,40 1,40 1,40	1,33 1,33 1,33	1,50 1,50 1,50	1,47 1,47 1,47
29	p o s	8	0,60 0,60 0,60	0,47 0,47 0,47	0,47 0,50 0,50	0,47 0,47 0,47
30	p o s	52	1,40 1,40 1,40	1,30 1,30 1,30	1,50 1,50 1,50	1,47 1,47 1,47
31	p o s	8	0,57 0,57 0,60	0,47 0,47 0,47	0,50 0,47 0,47	0,47 0,47 0,47
32	p o s	52	1,40 1,40 1,40	1,30 1,30 1,30	1,50 1,50 1,50	1,47 1,47 1,47
33	p o s	8	0,57 0,57 0,57	0,47 0,47 0,47	0,47 0,47 0,47	0,47 0,47 0,47
34	p o s	52	1,43 1,40 1,43	1,30 1,30 1,30	1,53 1,53 1,53	1,47 1,50 1,47
35	p o s	40	1,33 1,33 1,33	1,20 1,20 1,20	1,27 1,27 1,27	1,23 1,23 1,23
36	p o s	28	1,07 1,07 1,07	0,93 0,93 0,93	0,97 0,97 0,97	0,97 0,93 0,97
37	p o s	16	0,77 0,77 0,77	0,67 0,67 0,67	0,67 0,67 0,67	0,67 0,63 0,63
38	p o s	8	0,57 0,57 0,57	0,47 0,47 0,47	0,47 0,47 0,47	0,47 0,47 0,47
39	p o s	16	0,60 0,57 0,60	0,47 0,47 0,47	0,63 0,63 0,63	0,60 0,60 0,60
40	p o s	28	0,83 0,87 0,87	0,73 0,73 0,73	0,93 0,93 0,93	0,90 0,90 0,90
41	p o s	40	1,13 1,13 1,13	1,00 1,03 1,03	1,23 1,23 1,23	1,20 1,20 1,20
42	p o s	52	1,43 1,43 1,43	1,30 1,30 1,30	1,53 1,53 1,53	1,50 1,50 1,50

43	p o s	52	1,43	1,30	1,53	1,47
			1,43	1,30	1,53	1,47
			1,43	1,30	1,53	1,47
44	p o s	52	1,50	1,40	1,60	1,57
			1,50	1,40	1,63	1,57
			1,50	1,40	1,63	1,57
45	p o s	60	1,63	1,50	1,73	1,67
			1,60	1,50	1,73	1,67
			1,60	1,50	1,73	1,67
46	p o s	60	1,67	1,53	1,77	1,70
			1,67	1,53	1,77	1,73
			1,67	1,53	1,77	1,70
47	p o s	64	1,77	1,63	1,87	1,80
			1,77	1,63	1,87	1,80
			1,77	1,63	1,87	1,80
48	p o s	68	1,87	1,73	1,97	1,93
			1,87	1,73	2,00	1,93
			1,87	1,73	2,00	1,93
49	p o s	68	1,90	1,77	2,03	1,93
			1,90	1,77	2,03	1,97
			1,90	1,77	2,03	1,97
50	p o s	72	2,00	1,87	2,13	2,07
			2,00	1,90	2,17	2,07
			2,00	1,87	2,13	2,07
51	p o s	76	2,33	2,17	2,50	2,47
			2,40	2,23	2,57	2,53
			2,40	2,20	2,53	2,50
52	p o s	76	2,73	2,50	2,87	2,77
			2,73	2,50	2,87	2,77
			2,73	2,50	2,87	2,77
53	p o s	76	2,77	2,53	2,90	2,77
			2,77	2,53	2,90	2,77
			2,77	2,53	2,90	2,77
54	p o s	80	2,90	2,70	3,10	2,90
			2,93	2,73	3,13	2,93
			2,93	2,73	3,13	2,93
55	p o s	84	3,27	3,13	3,57	3,23
			3,30	3,17	3,60	3,23
			3,27	3,13	3,57	3,23
56	p o s	84	3,47	3,47	3,77	3,37
			3,47	3,47	3,77	3,37
			3,47	3,47	3,77	3,37
57	p o s	84	3,47	3,47	3,80	3,40
			3,47	3,50	3,77	3,37
			3,47	3,50	3,77	3,37
58	p o s	88	3,63	3,53	3,93	3,53
			3,67	3,63	3,97	3,57
			3,67	3,60	3,97	3,53
59	p o s	92	4,17	4,03	4,40	3,90
			4,23	4,07	4,43	3,93
			4,20	4,07	4,43	3,93
60	p o s	92	4,37	4,33	4,63	4,10
			4,37	4,33	4,63	4,10
			4,37	4,33	4,63	4,10
61	p o s	92	4,37	4,33	4,63	4,10
			4,37	4,33	4,67	4,13
			4,37	4,33	4,63	4,13
62	p o s	94	4,37	4,33	4,70	4,17
			4,37	4,33	4,70	4,17
			4,37	4,33	4,70	4,17
63	p o s	94	4,37	4,43	4,73	4,17
			4,37	4,43	4,73	4,20
			4,37	4,43	4,73	4,20
64	p o s	94	4,50	4,50	4,77	4,23
			4,50	4,50	4,77	4,23
			4,50	4,50	4,77	4,23
65	p o s	94	4,50	4,47	4,77	4,23
			4,50	4,50	4,77	4,23
			4,50	4,50	4,77	4,23
66	p o s	96	4,50	4,53	4,87	4,30
			4,50	4,57	4,87	4,30
			4,50	4,53	4,87	4,30
67	p o s	100	4,97	4,83	5,23	4,67
			5,00	4,90	5,27	4,67
			5,00	4,87	5,27	4,67

68	p o s	100	5,23	5,17	5,47	4,90
			5,23	5,17	5,43	4,90
			5,23	5,17	5,43	4,90
69	p o s	102	5,27	5,20	5,50	4,93
			5,27	5,23	5,50	4,97
			5,27	5,23	5,50	4,97
70	p o s	104	5,37	5,30	5,60	5,07
			5,37	5,33	5,63	5,07
			5,37	5,33	5,60	5,07
71	p o s	106	5,40	5,43	5,77	5,23
			5,43	5,47	5,80	5,27
			5,43	5,47	5,77	5,23
72	p o s	108	5,60	5,57	5,97	5,43
			5,63	5,60	6,00	5,47
			5,63	5,60	6,00	5,47
73	p o s	110	5,80	5,73	6,17	5,63
			5,90	5,80	6,20	5,70
			5,87	5,77	6,20	5,67
74	p o s	112	5,97	5,90	6,27	5,77
			6,03	5,93	6,33	5,80
			6,00	5,90	6,30	5,80
75	p o s	114	6,10	6,00	6,40	5,90
			6,17	6,10	6,47	5,97
			6,13	6,07	6,43	5,93
76	p o s	114	6,27	6,20	6,57	6,10
			6,30	6,23	6,60	6,17
			6,30	6,23	6,60	6,13

Pomiary odkształceń wykonano przetwornikami przemieszczeń liniowych o zakresie 10 i 20mm.

Strain measurements were carried out by means of linear displacement transducers of 10 and 20mm working range.



B-08Smb

Tablica A4. Odształcenia taśmy ϵ_p
Table A4. Strains of the strip ϵ_p

Nr obciążenia	Pomiar pierwszy ostatni średni	Siła 2F kN	Odształcenia taśmy / Strains of the strip ϵ_p [%]																	
			P8L	P7L	P6L	P5L	P4L	P3L	P2L	P1L	P0	P1P	P2P	P3P	P4P	P5P	P6P	P7P	P8P	
1	p o s	0	-0,01 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	-0,01 0,00 0,00	0,00 0,01 0,01	0,00 0,02 0,00	0,01 0,04 0,00		0,01 0,01 0,01	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 0,01 0,01	0,01 0,01 0,01	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	
2	p o s	4	0,00 0,00 0,00	-0,01 0,00 -0,01	-0,02 0,00 -0,01	0,03 0,02 0,03	0,03 0,04 0,03		0,07 0,08 0,07	0,07 0,08 0,08	0,07 0,07 0,07	0,06 0,05 0,06	0,07 0,05 0,06	0,06 0,06 0,06	0,06 0,06 0,06	-0,06 -0,01 -0,05	0,04 0,03 0,03	0,03 0,02 0,02	0,01 0,01 0,01	-0,01 -0,01 -0,01
3	p o s	8	0,00 0,00 0,00	0,01 0,01 0,01	0,02 0,02 0,02	0,07 0,07 0,07	0,12 0,11 0,12		0,15 0,14 0,15	0,19 0,19 0,19	0,18 0,17 0,18	0,12 0,12 0,12	0,12 0,13 0,13	0,11 0,10 0,11	0,07 0,06 0,07	0,08 0,07 0,08	0,05 0,05 0,05	0,02 0,02 0,02	0,01 0,01 0,01	0,01 0,01 0,00
4	p o s	8	-0,01 -0,02 -0,02	-0,02 -0,02 -0,02	0,06 0,06 0,05	0,04 0,03 0,04	0,09 0,07 0,08		0,12 0,11 0,12	0,18 0,17 0,17	0,16 0,16 0,16	0,11 0,11 0,11	0,12 0,11 0,12	0,10 0,09 0,09	0,21 0,27 0,24	0,06 0,05 0,06	0,03 0,03 0,03	0,01 0,00 0,00	0,01 0,00 0,00	-0,03 -0,04 -0,04
5	p o s	12	-0,01 -0,02 -0,01	-0,01 -0,02 -0,01	0,09 0,08 0,08	0,07 0,06 0,06	0,14 0,13 0,13		0,18 0,17 0,17	0,23 0,23 0,23	0,21 0,21 0,21	0,15 0,15 0,15	0,16 0,17 0,16	0,13 0,13 0,13	0,33 0,32 0,32	0,09 0,09 0,08	0,04 0,04 0,04	0,01 0,01 0,01	0,01 0,01 0,01	-0,05 -0,04 -0,04
6	p o s	16	-0,01 -0,01 -0,01	0,00 -0,01 -0,01	0,14 0,13 0,13	0,11 0,12 0,12	0,21 0,22 0,21		0,27 0,27 0,26	0,34 0,34 0,33	0,30 0,30 0,30	0,24 0,24 0,24	0,24 0,25 0,24	0,25 0,25 0,25	0,51 0,53 0,52	0,12 0,12 0,12	0,06 0,05 0,05	0,02 0,02 0,02	0,02 0,02 0,02	-0,05 -0,05 -0,05
7	p o s	20	-0,01 -0,02 -0,02	0,01 0,00 0,01	0,17 0,16 0,16	0,20 0,19 0,19	0,36 0,36 0,36		0,43 0,43 0,43	0,49 0,49 0,49	0,45 0,45 0,45	0,43 0,43 0,43	0,45 0,45 0,45	0,47 0,47 0,47	0,72 0,71 0,72	0,18 0,17 0,18	0,09 0,07 0,08	0,04 0,03 0,04	0,04 0,03 0,04	-0,03 -0,09 -0,08
8	p o s	20	-0,03 -0,02 -0,03	-0,02 -0,02 -0,02	0,16 0,16 0,16	0,18 0,18 0,18	0,36 0,36 0,36		0,44 0,44 0,44	0,49 0,49 0,49	0,46 0,44 0,45	0,46 0,45 0,45	0,46 0,46 0,46	0,47 0,50 0,50	0,87 0,86 0,87	0,21 0,21 0,21	0,08 0,08 0,08	0,04 0,04 0,04	0,04 0,04 0,04	-0,05 -0,05 -0,05
9	p o s	24	-0,02 -0,02 -0,02	0,00 0,00 0,00	0,18 0,18 0,18	0,22 0,23 0,23	0,40 0,41 0,41		0,50 0,51 0,50	0,55 0,56 0,56	0,51 0,53 0,52	0,51 0,51 0,51	0,52 0,52 0,52	0,55 0,56 0,56	0,95 0,94 0,96	0,22 0,23 0,23	0,08 0,08 0,08	0,04 0,04 0,04	0,04 0,04 0,04	-0,05 -0,05 -0,05
10	p o s	24	-0,01 -0,01 -0,01	0,01 0,00 0,00	0,19 0,20 0,19	0,27 0,27 0,27	0,45 0,46 0,45		0,55 0,55 0,55	0,61 0,61 0,61	0,58 0,59 0,58	0,55 0,56 0,55	0,58 0,59 0,59	0,61 0,62 0,61	1,02 1,01 1,03	0,28 0,29 0,28	0,10 0,09 0,10	0,05 0,05 0,05	0,05 0,04 0,05	-0,05 -0,04 -0,05
11	p o s	28	-0,01 -0,01 -0,01	0,01 0,02 0,01	0,25 0,26 0,25	0,40 0,42 0,41	0,63 0,63 0,63		0,73 0,73 0,73	0,78 0,78 0,78	0,75 0,75 0,74	0,72 0,72 0,72	0,76 0,77 0,77	0,79 0,79 0,79	1,17 1,16 1,16	0,44 0,44 0,44	0,15 0,14 0,15	0,07 0,07 0,07	0,07 0,07 0,07	-0,05 -0,05 -0,05
12	p o s	32	-0,01 -0,01 -0,01	0,03 0,03 0,03	0,32 0,33 0,33	0,53 0,54 0,54	0,77 0,77 0,77		0,90 0,90 0,90	0,92 0,92 0,92	0,89 0,90 0,90	0,91 0,90 0,90	0,93 0,93 0,93	0,95 0,95 0,95	1,32 1,40 1,40	0,59 0,58 0,58	0,24 0,24 0,24	0,09 0,08 0,08	0,09 0,08 0,08	-0,05 -0,06 -0,06
13	p o s	32	-0,02 -0,02 -0,02	0,02 0,02 0,02	0,29 0,29 0,29	0,54 0,55 0,55	0,78 0,78 0,78		0,91 0,90 0,90	0,93 0,92 0,93	0,91 0,90 0,91	0,92 0,92 0,92	0,94 0,94 0,94	0,97 0,97 0,97	1,48 1,46 1,45	0,61 0,60 0,60	0,26 0,26 0,26	0,10 0,10 0,10	0,10 0,10 0,10	-0,05 -0,05 -0,04
14	p o s	32	-0,02 -0,02 -0,03	0,02 0,02 0,01	0,29 0,30 0,29	0,54 0,54 0,53	0,78 0,78 0,77		0,91 0,90 0,90	0,93 0,93 0,93	0,90 0,90 0,90	0,91 0,92 0,91	0,94 0,94 0,93	0,97 0,97 0,96	1,49 1,46 1,46	0,60 0,60 0,60	0,26 0,26 0,26	0,10 0,10 0,09	0,10 0,10 0,09	-0,05 -0,04 -0,04
15	p o s	36	-0,02 -0,02 -0,02	0,03 0,02 0,03	0,37 0,35 0,35	0,62 0,61 0,61	0,88 0,88 0,88		1,03 1,01 1,02	1,05 1,04 1,04	1,03 1,02 1,03	1,03 1,03 1,03	1,06 1,06 1,06	1,08 1,08 1,09	1,58 1,56 1,55	0,67 0,67 0,67	0,30 0,30 0,30	0,11 0,11 0,11	0,11 0,11 0,11	-0,05 -0,06 -0,05
16	p o s	40	-0,01 -0,02 -0,01	0,05 0,05 0,05	0,44 0,43 0,44	0,72 0,71 0,72	1,05 1,05 1,05		1,15 1,15 1,15	1,18 1,18 1,18	1,15 1,15 1,15	1,14 1,14 1,14	1,20 1,20 1,20	1,22 1,22 1,22	1,79 1,75 1,75	0,77 0,76 0,76	0,40 0,40 0,40	0,13 0,13 0,13	0,13 0,13 0,13	-0,05 -0,06 -0,06
17	p o s	44	-0,01 -0,02 -0,01	0,10 0,10 0,10	0,53 0,52 0,52	0,84 0,85 0,84	1,19 1,18 1,19		1,32 1,32 1,32	1,33 1,32 1,33	1,30 1,29 1,29	1,31 1,31 1,31	1,34 1,35 1,34	1,38 1,38 1,38	1,97 1,96 1,96	0,86 0,86 0,86	0,49 0,49 0,49	0,16 0,16 0,16	0,16 0,16 0,17	-0,08 -0,09 -0,08
18	p o s	44	-0,01 -0,02 -0,01	0,13 0,12 0,12	0,60 0,58 0,59	0,87 0,86 0,87	1,22 1,23 1,23		1,36 1,35 1,35	1,35 1,35 1,35	1,33 1,33 1,33	1,37 1,36 1,36	1,38 1,38 1,38	1,43 1,43 1,43	2,38 2,08 2,22	0,91 0,91 0,91	0,54 0,53 0,53	0,20 0,20 0,20	0,20 0,20 0,20	-0,06 -0,06 -0,06

19	p o s	48	-0,02 -0,03 -0,03	0,14 0,14 0,14	0,63 0,63 0,63	0,95 0,95 0,95	1,33 1,33 1,33		1,46 1,47 1,47	1,47 1,47 1,47	1,47 1,46 1,48	1,48 1,52 1,52	1,54 1,54 1,54	2,44 2,41 2,42	1,02 1,02 1,02	0,58 0,58 0,58	0,22 0,22 0,22	-0,05 -0,05 -0,05	
20	p o s	52	-0,01 -0,02 -0,02	0,21 0,22 0,21	0,71 0,72 0,72	1,04 1,05 1,05	1,46 1,47 1,46		1,60 1,61 1,60	1,61 1,61 1,60	1,60 1,61 1,60	1,65 1,66 1,65	1,68 1,68 1,68	2,53 2,51 2,56	1,13 1,13 1,13	0,67 0,68 0,67	0,32 0,33 0,33	-0,05 -0,07 -0,06	
21	p o s	52	-0,04 -0,05 -0,04	0,23 0,23 0,23	0,74 0,72 0,72	1,05 1,05 1,05	1,46 1,46 1,46		1,60 1,60 1,60	1,61 1,61 1,61	1,62 1,62 1,63	1,63 1,68 1,68	1,70 1,70 1,70	3,02 2,56 2,63	1,15 1,15 1,15	0,71 0,71 0,70	0,37 0,37 0,37	-0,09 -0,09 -0,09	
22	p o s	40	-0,04 -0,04 -0,04	0,19 0,19 0,19	0,65 0,63 0,64	0,90 0,89 0,90	1,22 1,21 1,21		1,33 1,33 1,33	1,34 1,34 1,34	1,32 1,32 1,32	1,37 1,37 1,37	1,37 1,36 1,41	1,42 2,27 2,27	0,96 0,96 0,96	0,60 0,60 0,60	0,33 0,33 0,33	-0,10 -0,10 -0,10	
23	p o s	28	-0,05 -0,06 -0,05	0,14 0,14 0,14	0,41 0,41 0,42	0,67 0,66 0,66	0,88 0,87 0,88		0,98 0,97 0,97	1,00 0,99 0,99	0,99 1,00 0,99	1,02 1,01 1,02	1,03 1,02 1,05	1,05 2,01 2,03	0,72 0,72 0,72	0,47 0,46 0,46	0,26 0,26 0,26	-0,11 -0,12 -0,11	
24	p o s	16	-0,06 -0,07 -0,07	0,08 0,08 0,08	0,29 0,31 0,29	0,45 0,44 0,44	0,60 0,60 0,60		0,63 0,63 0,63	0,66 0,66 0,66	0,67 0,67 0,68	0,69 0,68 0,67	0,68 0,71 0,71	1,83 1,69 1,71	0,49 0,50 0,49	0,32 0,32 0,32	0,19 0,18 0,19	-0,14 -0,13 -0,14	
25	p o s	8	-0,10 -0,09 -0,10	0,00 0,00 0,00	0,11 0,13 0,13	0,23 0,24 0,24	0,34 0,35 0,35		0,36 0,36 0,36	0,38 0,38 0,38	0,38 0,37 0,38	0,43 0,43 0,42	0,41 0,43 0,41	0,43 1,24 1,29	1,44 0,31 0,31	0,20 0,20 0,20	0,13 0,12 0,13	-0,15 -0,13 -0,14	
26	p o s	28	-0,08 -0,08 -0,08	0,08 0,08 0,08	0,46 0,45 0,46	0,58 0,58 0,58	0,79 0,78 0,79		0,88 0,88 0,88	0,90 0,91 0,90	0,89 0,89 0,89	0,92 0,93 0,92	0,93 0,96 0,96	1,85 1,81 1,84	0,63 0,64 0,64	0,38 0,39 0,39	0,22 0,22 0,22	-0,15 -0,14 -0,14	
27	p o s	40	-0,05 -0,06 -0,06	0,16 0,14 0,15	0,60 0,59 0,60	0,84 0,82 0,83	1,16 1,14 1,15		1,26 1,24 1,25	1,29 1,29 1,29	1,26 1,25 1,26	1,28 1,27 1,27	1,30 1,29 1,29	1,33 1,33 1,33	2,20 2,19 2,20	0,87 0,85 0,87	0,54 0,54 0,54	0,29 0,29 0,29	-0,12 -0,13 -0,13
28	p o s	52	-0,05 -0,05 -0,05	0,22 0,21 0,22	0,71 0,71 0,71	1,05 1,05 1,05	1,46 1,45 1,46		1,60 1,60 1,60	1,63 1,64 1,63	1,62 1,62 1,63	1,63 1,64 1,63	1,67 1,67 1,67	1,69 2,54 2,58	2,56 1,14 1,14	0,68 0,69 0,69	0,37 0,37 0,37	-0,10 -0,13 -0,12	
29	p o s	8	-0,07 -0,07 -0,07	0,01 0,01 0,01	0,19 0,18 0,17	0,26 0,26 0,26	0,37 0,37 0,37		0,37 0,37 0,37	0,39 0,39 0,40	0,38 0,38 0,38	0,45 0,44 0,44	0,42 0,41 0,41	0,44 1,35 1,37	1,53 0,31 0,31	0,20 0,21 0,20	0,13 0,12 0,13	-0,15 -0,14 -0,14	
30	p o s	52	-0,04 -0,06 -0,04	0,23 0,21 0,22	0,73 0,70 0,72	1,06 1,05 1,06	1,47 1,45 1,47		1,61 1,59 1,61	1,63 1,63 1,63	1,63 1,62 1,63	1,64 1,64 1,64	1,67 1,67 1,67	1,70 1,69 1,69	2,55 2,49 2,53	1,15 1,14 1,15	0,70 0,68 0,69	0,38 0,37 0,38	-0,11 -0,12 -0,12
31	p o s	8	-0,07 -0,07 -0,07	0,01 0,02 0,02	0,31 0,31 0,31	0,25 0,26 0,25	0,36 0,36 0,36		0,36 0,36 0,36	0,39 0,39 0,39	0,38 0,38 0,38	0,45 0,45 0,45	0,41 0,41 0,41	0,43 1,39 1,39	1,44 0,31 0,31	0,20 0,18 0,19	0,13 0,13 0,13	-0,13 -0,14 -0,15	
32	p o s	52	-0,05 -0,05 -0,05	0,23 0,23 0,23	0,74 0,74 0,73	1,05 1,05 1,05	1,46 1,46 1,46		1,61 1,61 1,61	1,63 1,63 1,63	1,62 1,61 1,62	1,64 1,65 1,65	1,67 1,66 1,66	1,69 2,58 2,56	2,57 1,14 1,14	0,71 0,70 0,70	0,38 0,38 0,38	-0,13 -0,12 -0,13	
33	p o s	8	-0,07 -0,07 -0,07	0,00 0,00 0,00	0,38 0,37 0,37	0,24 0,24 0,24	0,35 0,35 0,35		0,35 0,35 0,35	0,39 0,38 0,38	0,38 0,37 0,37	0,44 0,42 0,43	0,41 0,40 0,40	0,41 1,45 1,46	0,30 0,31 0,30	0,19 0,19 0,20	0,13 0,13 0,13	-0,14 -0,15 -0,15	
34	p o s	52	-0,05 -0,05 -0,05	0,22 0,22 0,22	0,74 0,73 0,74	1,05 1,05 1,05	1,46 1,46 1,46		1,61 1,60 1,61	1,64 1,64 1,64	1,63 1,63 1,63	1,66 1,66 1,66	1,68 1,69 1,70	1,70 2,47 2,46	2,52 1,14 1,14	0,71 0,70 0,70	0,38 0,39 0,39	-0,12 -0,13 -0,12	
35	p o s	40	-0,06 -0,08 -0,07	0,19 0,17 0,18	0,64 0,63 0,63	0,88 0,86 0,88	1,20 1,18 1,20		1,29 1,28 1,29	1,35 1,33 1,34	1,31 1,30 1,31	1,36 1,35 1,36	1,35 1,33 1,34	1,38 1,38 1,38	2,27 2,20 2,25	0,91 0,89 0,90	0,59 0,57 0,58	0,33 0,32 0,33	-0,12 -0,14 -0,13
36	p o s	28	-0,10 -0,07 -0,08	0,11 0,13 0,12	0,51 0,52 0,51	0,63 0,64 0,64	0,83 0,85 0,86		0,92 0,95 0,94	0,99 0,99 0,99	0,97 0,99 0,98	1,00 1,01 1,01	1,00 1,01 1,01	1,03 1,96 1,94	1,96 0,68 0,70	0,45 0,46 0,45	0,25 0,26 0,26	-0,15 -0,14 -0,15	
37	p o s	16	-0,08 -0,08 -0,08	0,05 0,05 0,05	0,42 0,41 0,41	0,42 0,42 0,42	0,56 0,56 0,56		0,59 0,59 0,59	0,62 0,62 0,62	0,63 0,63 0,63	0,65 0,65 0,65	0,64 0,64 0,64	0,66 1,69 1,69	1,80 0,45 0,45	0,29 0,29 0,29	0,18 0,18 0,18	-0,16 -0,17 -0,16	
38	p o s	8	-0,10 -0,09 -0,10	0,00 0,00 0,00	0,25 0,23 0,24	0,24 0,33 0,33	0,34 0,33 0,33		0,34 0,35 0,34	0,39 0,39 0,39	0,36 0,37 0,36	0,42 0,42 0,42	0,39 0,40 0,39	0,41 1,41 1,42	1,44 0,30 0,30	0,19 0,18 0,18	0,12 0,13 0,12	-0,16 -0,15 -0,16	
39	p o s	16	-0,09 -0,09 -0,09	0,04 0,04 0,04	0,33 0,33 0,33	0,36 0,35 0,36	0,49 0,49 0,49		0,53 0,53 0,53	0,59 0,58 0,58	0,57 0,57 0,57	0,60 0,60 0,60	0,59 0,59 0,62	0,61 1,50 1,56	1,50 0,40 0,40	0,26 0,26 0,26	0,15 0,15 0,16	-0,15 -0,14 -0,15	
40	p o s	28	-0,08 -0,08 -0,08	0,09 0,10 0,10	0,45 0,46 0,49	0,57 0,58 0,58	0,78 0,79 0,79		0,86 0,87 0,87	0,91 0,92 0,91	0,90 0,90 0,90	0,92 0,93 0,93	0,93 0,97 0,97	0,96 1,85 1,89	1,92 0,64 0,65	0,39 0,39 0,40	0,23 0,24 0,24	-0,14 -0,14 -0,14	
41	p o s	40	-0,07 -0,09 -0,08	0,16 0,15 0,16	0,60 0,60 0,61	0,84 0,85 0,84	1,15 1,16 1,16		1,26 1,26 1,26	1,29 1,30 1,29	1,27 1,27 1,27	1,30 1,30 1,30	1,31 1,32 1,31	1,33 1,34 1,34	2,18 2,18 2,19	0,88 0,89 0,88	0,56 0,56 0,56	0,31 0,32 0,31	-0,16 -0,14 -0,14
42	p o s	52	-0,07 -0,06 -0,06	0,23 0,23 0,22	0,72 0,73 0,73	1,06 1,07 1,06	1,46 1,46 1,45		1,61 1,61 1,60	1,64 1,64 1,64	1,63 1,63 1,63	1,66 1,66 1,66	1,69 1,67 1,68	1,70 1,71 1,70	2,54 2,52 2,49	1,15 1,15 1,15	0,71 0,71 0,71	0,39 0,39 0,38	-0,13 -0,12 -0,13
43	p o s	52	-0,06 -0,06 -0,06	0,21 0,21 0,21	0,74 0,74 0,74	1,05 1,05 1,05	1,44 1,46 1,45		1,60 1,60 1,60	1,63 1,64 1,64	1,64 1,63 1,64	1,66 1,66 1,67	1,69 1,69 1,69	1,71 2,48 2,44	2,41 1,16 1,16	0,71 0,71 0,71	0,39 0,39 0,39	-0,11 -0,11 -0,11	

44	p o s	52	-0,06 -0,07 -0,06	0,26 0,24 0,25	0,76 0,79 0,77	1,12 1,11 1,12	1,57 1,55 1,56		1,70 1,68 1,70	1,73 1,74 1,74	1,73 1,73 1,73	1,77 1,76 1,77	1,79 1,78 1,78	1,81 1,81 1,81	2,64 2,49 2,55	1,22 1,21 1,22	0,75 0,75 0,75	0,42 0,41 0,41	-0,11 -0,14 -0,12
45	p o s	60	-0,07 -0,07 -0,06	0,27 0,28 0,28	0,83 0,82 0,83	1,21 1,23 1,23	1,66 1,67 1,68		1,84 1,84 1,85	1,87 1,87 1,87	1,85 1,85 1,86	1,88 1,89 1,90	1,91 1,92 1,92	1,95 1,95 1,95	2,72 2,75 2,73	1,30 1,30 1,31	0,81 0,81 0,81	0,45 0,45 0,46	-0,13 -0,14 -0,13
46	p o s	60	-0,07 -0,07 -0,07	0,33 0,32 0,32	0,86 0,85 0,85	1,26 1,24 1,25	1,70 1,68 1,69		1,84 1,85 1,84	1,89 1,90 1,89	1,88 1,89 1,88	1,94 1,93 1,93	1,94 1,96 1,95	1,98 1,98 1,98	2,83 2,82 2,81	1,32 1,33 1,32	0,83 0,84 0,84	0,48 0,48 0,48	-0,16 -0,15 -0,16
47	p o s	64	-0,07 -0,07 -0,06	0,36 0,36 0,36	0,90 0,89 0,90	1,33 1,33 1,34	1,80 1,80 1,81		1,97 1,97 1,98	2,03 2,04 2,04	2,02 2,02 2,02	2,04 2,04 2,05	2,06 2,07 2,07	2,10 2,10 2,10	2,97 2,98 2,99	1,43 1,43 1,43	0,89 0,89 0,89	0,51 0,51 0,51	-0,15 -0,15 -0,14
48	p o s	68	-0,07 -0,07 -0,07	0,41 0,43 0,42	0,94 0,95 0,96	1,42 1,43 1,43	1,94 1,95 1,95		2,09 2,11 2,11	2,17 2,17 2,17	2,15 2,15 2,15	2,21 2,22 2,22	2,20 2,21 2,21	2,23 2,23 2,24	3,12 2,99 3,05	1,52 1,52 1,53	0,96 0,96 0,96	0,55 0,56 0,56	-0,15 -0,15 -0,15
49	p o s	68	-0,04 -0,04 -0,04	0,49 0,49 0,49	0,99 1,00 1,00	1,49 1,49 1,49	2,02 2,02 2,02		2,18 2,17 2,18	2,23 2,22 2,22	2,22 2,22 2,22	2,28 2,28 2,28	2,28 2,27 2,27	2,32 2,32 2,32	3,08 3,14 3,09	1,59 1,59 1,59	1,02 1,01 1,02	0,62 0,61 0,61	-0,13 -0,13 -0,13
50	p o s	72	-0,05 -0,03 -0,05	0,51 0,52 0,51	1,05 1,04 1,04	1,56 1,57 1,55	2,10 2,12 2,10		2,28 2,30 2,28	2,35 2,37 2,36	2,35 2,39 2,36	2,39 2,41 2,39	2,43 2,45 2,43	2,48 2,51 2,49	3,42 3,22 3,30	1,66 1,68 1,66	1,06 1,07 1,06	0,64 0,65 0,64	-0,13 -0,12 -0,13
51	p o s	76	-0,03 -0,05 -0,04	0,58 0,57 0,58	1,14 1,11 1,11	1,67 1,65 1,66	2,25 2,24 2,24		2,75 2,81 2,79	2,68 2,74 2,71	2,71 2,74 2,73	2,72 2,80 2,76	2,95 3,03 2,99	2,99 3,02 3,01	3,56 3,63 3,52	1,77 1,76 1,77	1,15 1,15 1,15	0,71 0,70 0,70	-0,11 -0,13 -0,12
52	p o s	76	-0,03 -0,03 -0,03	0,64 0,65 0,65	1,17 1,20 1,18	1,72 1,73 1,73	2,38 2,38 2,38		3,13 3,13 3,14	3,15 3,15 3,15	3,06 3,06 3,06	3,24 3,24 3,24	3,41 3,41 3,41	3,35 3,35 3,35	4,27 4,25 4,27	1,83 1,83 1,84	1,19 1,19 1,19	0,75 0,75 0,75	-0,15 -0,14 -0,14
53	p o s	76	-0,03 -0,02 -0,02	0,65 0,67 0,66	1,19 1,19 1,19	1,72 1,73 1,73	2,40 2,42 2,42		3,17 3,18 3,18	3,25 3,24 3,24	3,14 3,15 3,14	3,29 3,30 3,29	3,44 3,45 3,45	3,39 3,40 3,40	4,68 4,69 4,69	1,85 1,87 1,86	1,21 1,21 1,21	0,77 0,78 0,78	-0,12 -0,11 -0,11
54	p o s	80	-0,01 -0,02 -0,01	0,70 0,70 0,70	1,26 1,25 1,26	1,81 1,81 1,81	2,58 2,60 2,59		3,37 3,39 3,38	3,47 3,50 3,49	3,42 3,46 3,45	3,48 3,52 3,50	3,65 3,68 3,66	3,59 3,62 3,61	4,90 4,92 4,92	1,96 1,96 1,96	1,26 1,26 1,26	0,81 0,80 0,81	-0,10 -0,11 -0,10
55	p o s	84	0,00 -0,02 -0,01	0,77 0,77 0,76	1,35 1,33 1,35	1,91 1,91 1,91	2,99 3,03 3,01		3,80 3,82 3,81	3,95 3,96 3,95	3,91 3,94 3,93	3,97 4,00 3,98	4,11 4,14 4,12	4,06 4,09 4,07	5,37 5,38 5,35	2,07 2,07 2,06	1,33 1,33 1,33	0,88 0,88 0,88	-0,10 -0,11 -0,11
56	p o s	84	0,01 0,00 0,01	0,88 0,87 0,88	1,44 1,43 1,44	1,96 1,95 1,95	3,33 3,31 3,32		4,05 4,04 4,05	4,19 4,19 4,19	4,20 4,19 4,20	4,26 4,25 4,26	4,38 4,38 4,38	4,36 4,35 4,36	5,78 5,75 5,76	2,15 2,14 2,15	1,39 1,38 1,38	0,97 0,96 0,97	-0,09 -0,09 -0,09
57	p o s	84	0,00 0,02 0,01	0,87 0,89 0,88	1,42 1,43 1,42	1,94 1,96 1,96	3,32 3,34 3,33		4,04 4,06 4,05	4,20 4,20 4,20	4,19 4,21 4,20	4,25 4,27 4,26	4,38 4,39 4,38	4,35 4,36 4,36	5,73 5,76 5,76	2,13 2,15 2,14	1,38 1,38 1,38	0,96 0,96 0,96	-0,10 -0,09 -0,09
58	p o s	88	0,02 0,00 0,01	0,91 0,90 0,91	1,46 1,45 1,45	2,03 2,02 2,03	3,49 3,50 3,50		4,25 4,26 4,26	4,39 4,43 4,41	4,39 4,42 4,41	4,46 4,49 4,48	4,58 4,61 4,60	4,56 4,59 4,58	5,91 5,92 5,91	2,21 2,20 2,21	1,43 1,42 1,42	1,00 1,00 1,00	-0,08 -0,09 -0,09
59	p o s	92	0,01 0,02 0,02	0,98 0,99 0,99	1,51 1,52 1,53	2,19 2,22 2,21	3,91 3,97 3,95		4,71 4,77 4,75	4,89 4,93 4,91	4,89 4,94 4,92	4,97 5,03 5,01	5,09 5,15 5,13	5,04 5,11 5,08	6,34 6,45 6,41	2,38 2,42 2,40	1,49 1,51 1,50	1,07 1,10 1,09	-0,09 -0,08 -0,08
60	p o s	92	0,03 0,04 0,04	1,00 1,02 1,01	1,57 1,58 1,57	2,32 2,32 2,32	4,15 4,16 4,16		5,00 5,02 5,01	5,12 5,12 5,12	5,21 5,21 5,21	5,30 5,32 5,31	5,35 5,36 5,35	5,33 5,34 5,33	6,44 6,52 6,48	2,54 2,56 2,55	1,53 1,54 1,54	1,18 1,19 1,18	-0,08 -0,07 -0,08
61	p o s	92	0,07 0,06 0,07	1,04 1,04 1,04	1,93 2,14 1,90	2,39 2,39 2,39	4,24 4,24 4,24		5,09 5,08 5,09	5,18 5,18 5,18	5,29 5,28 5,29	5,39 5,38 5,39	5,41 5,41 5,41	5,41 5,41 5,41	6,75 6,90 6,82	2,61 2,61 2,61	1,57 1,57 1,57	1,21 1,21 1,21	-0,05 -0,06 -0,06
62	p o s	94	0,06 0,06 0,06	1,05 1,05 1,05	2,21 2,06 2,19	2,42 2,42 2,41	4,28 4,28 4,28		5,14 5,14 5,13	5,25 5,25 5,24	5,35 5,35 5,34	5,45 5,45 5,45	5,47 5,47 5,46	5,47 5,47 5,46	6,76 6,75 6,77	2,64 2,64 2,64	1,60 1,60 1,60	1,23 1,23 1,23	-0,05 -0,06 -0,06
63	p o s	94	0,04 0,05 0,05	1,04 1,03 1,04	1,99 2,00 1,99	2,41 2,41 2,41	4,29 4,29 4,29		5,16 5,16 5,16	5,26 5,26 5,26	5,35 5,35 5,35	5,45 5,45 5,45	5,48 5,48 5,48	5,50 5,50 5,49	6,82 6,73 6,76	2,64 2,64 2,64	1,58 1,58 1,58	1,19 1,20 1,19	-0,09 -0,10 -0,10
64	p o s	94	0,04 0,04 0,04	1,03 1,03 1,03	1,84 1,75 1,78	2,43 2,42 2,43	4,33 4,33 4,33		5,22 5,21 5,22	5,33 5,32 5,32	5,43 5,41 5,42	5,54 5,53 5,53	5,55 5,54 5,55	5,57 5,56 5,57	6,81 6,80 6,81	2,67 2,67 2,67	1,60 1,59 1,60	1,24 1,24 1,24	-0,06 -0,06 -0,06
65	p o s	94	0,04 0,05 0,05	1,04 1,04 1,04	1,79 1,94 1,86	2,44 2,44 2,44	4,34 4,33 4,33		5,22 5,22 5,22	5,33 5,33 5,33	5,42 5,42 5,42	5,54 5,54 5,54	5,55 5,55 5,55	5,57 5,57 5,57	6,82 6,85 6,84	2,67 2,67 2,67	1,60 1,60 1,60	1,24 1,24 1,24	-0,06 -0,06 -0,06
66	p o s	96	0,07 0,06 0,06	1,08 1,07 1,07	1,97 1,97 1,98	2,49 2,49 2,49	4,41 4,42 4,42		5,30 5,31 5,31	5,41 5,42 5,42	5,52 5,53 5,52	5,63 5,64 5,64	5,65 5,66 5,66	5,66 5,66 5,66	6,87 6,83 6,85	2,77 2,76 2,76	1,64 1,63 1,63	1,27 1,26 1,26	-0,04 -0,05 -0,05
67	p o s	100	0,06 0,06 0,06	1,13 1,13 1,13	2,20 2,17 2,17	2,69 2,72 2,70	4,78 4,80 4,79		5,70 5,72 5,71	5,83 5,85 5,84	5,95 5,98 5,97	6,06 6,08 6,07	6,08 6,11 6,09	6,08 6,10 6,09	7,22 7,22 7,22	3,21 3,25 3,22	1,70 1,69 1,69	1,32 1,32 1,32	-0,05 -0,05 -0,05
68	p o s	100	0,09 0,09 0,09	1,13 1,13 1,13	2,89 3,03 3,02	3,14 3,14 3,14	5,02 5,02 5,03		6,01 6,01 6,02	6,10 6,10 6,10	6,29 6,30 6,30	6,39 6,39 6,39	6,36 6,36 6,36	6,38 6,38 6,38	7,51 7,52 7,51	3,57 3,57 3,57	1,71 1,71 1,71	1,35 1,35 1,35	0,06 0,07 0,07

69	p o s	102	0,10	1,16	3,07	3,19	5,09		6,08	6,18	6,36	6,46	6,43	6,46	7,61	3,62	1,75	1,38	0,09
			0,09	1,16	3,06	3,19	5,09		6,08	6,18	6,36	6,46	6,43	6,46	7,60	3,63	1,75	1,37	0,08
			0,10	1,16	3,06	3,19	5,09		6,08	6,18	6,36	6,46	6,43	6,46	7,61	3,62	1,75	1,37	0,09
70	p o s	104	0,10	1,19	3,09	3,26	5,19		6,20	6,29	6,48	6,57	6,56	6,58	7,68	3,70	1,78	1,40	0,09
			0,09	1,16	3,08	3,26	5,19		6,20	6,31	6,50	6,58	6,57	6,59	7,67	3,71	1,77	1,38	0,08
			0,10	1,18	3,08	3,26	5,19		6,20	6,30	6,49	6,58	6,56	6,58	7,67	3,70	1,77	1,39	0,09
71	p o s	106	0,09	1,19	3,11	3,37	5,33		6,38	6,48	6,67	6,79	6,74	6,76	7,83	3,86	1,80	1,41	0,09
			0,09	1,19	3,11	3,42	5,36		6,42	6,51	6,71	6,83	6,78	6,80	7,83	3,91	1,81	1,41	0,09
			0,10	1,21	3,12	3,41	5,36		6,41	6,50	6,69	6,82	6,76	6,79	7,84	3,90	1,81	1,42	0,09
72	p o s	108	0,08	1,20	3,14	3,67	5,54		6,62	6,70	6,91	7,02	6,99	7,03	8,06	4,15	1,84	1,42	0,08
			0,09	1,22	3,16	3,72	5,60		6,67	6,73	6,96	7,07	7,03	7,08	8,03	4,19	1,86	1,43	0,09
			0,09	1,21	3,15	3,70	5,58		6,65	6,72	6,94	7,05	7,01	7,06	8,05	4,17	1,85	1,43	0,08
73	p o s	110	0,09	1,23	3,19	3,89	5,73		6,83	6,90	7,13	7,25	7,20	7,24	8,17	4,31	1,89	1,46	0,08
			0,09	1,24	3,20	3,97	5,78		6,89	6,95	7,18	7,33	7,26	7,32	8,27	4,35	1,90	1,46	0,09
			0,10	1,24	3,20	3,94	5,77		6,87	6,93	7,16	7,29	7,24	7,29	8,26	4,34	1,90	1,46	0,09
74	p o s	112	0,10	1,25	3,23	4,14	5,87		7,01	7,08	7,28	7,42	7,36	7,43	8,30	4,45	1,92	1,47	0,06
			0,12	1,27	3,25	4,16	5,90		7,03	7,10	7,29	7,43	7,38	7,45	8,35	4,47	1,93	1,47	0,07
			0,13	1,28	3,25	4,16	5,90		7,04	7,10	7,30	7,43	7,38	7,45	8,34	4,47	1,93	1,48	0,08
75	p o s	114	0,14	1,31	3,30	4,28	6,02		7,16	7,23	7,45	7,60	7,52	7,60	8,53	4,58	1,98	1,51	0,09
			0,13	1,30	3,30	4,31	6,05		7,20	7,26	7,48	7,65	7,55	7,63	8,55	4,62	1,98	1,50	0,07
			0,13	1,31	3,30	4,30	6,04		7,19	7,25	7,47	7,63	7,54	7,62	8,55	4,60	1,98	1,51	0,08
76	p o s	114	0,15	1,34	3,38	4,49	6,21		7,39	7,45	7,67	7,82	7,73	7,85	8,74	4,79	2,06	1,54	0,09
			0,15	1,35	3,40	4,53	6,25		7,44	7,50	7,71	7,87	7,77	7,90	8,80	4,82	2,08	1,55	0,08
			0,15	1,34	3,39	4,51	6,23		7,42	7,48	7,69	7,85	7,75	7,88	8,74	4,81	2,07	1,55	0,08

Pomiary odkształceń wykonano tensometrami elektrooporowymi o bazie 50mm.

Strain measurements were carried out by means of electric resistance gauges on the bases 50mm.