

BADANIA DOŚWIADCZALNE ELEMENTÓW I KONSTRUKCJI BETONOWYCH

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

ZESZYT NR 16

**Bond between
composite
materials
and concrete
in reinforced
concrete members
strengthened with
CFRP composites**

**Przyczepność zbrojenia
kompozytowego do betonu
w żelbetowych elementach
wzmocnionych za pomocą
materiałów kompozytowych CFRP**

Renata Kotynia

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr N506 006 31/0322
finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższe

Department of Concrete
Structures, Technical
University of Lodz, Poland
Lodz 2008

Katedra Budownictwa Betonowego
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Politechniki Łódzkiej
Łódź 2008

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

Skład tekstu / Text eddition
mgr inż. Jacek Filipeczak

©2008 Katedra Budownictwa Betonowego, Łódź, Polska
©2008 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
corresponding autor: Renata Kotynia, e-mail: renata.kotynia@p.lodz.pl

STRESZCZENIE

Projekt badawczy dotyczy zagadnienia przyczepności materiałów kompozytowych do betonu. Do badań zaadaptowano model badawczy zaproponowany przez RILEM (badania przyczepności zbrojenia stalowego do betonu, 1982).

Badania obejmowały łącznie 50 belek żelbetowych nie wzmocnionych i wzmocnionych materiałami kompozytowymi z włókien węglowych. Elementy podzielono na dwie zasadnicze serie, różniące się rodzajem technologii wzmocnienia (E i N).

W serii E, belki wzmocniono taśmami i matami naklejanymi na rozciąganej powierzchni elementów, w serii N, taśmy wklejano w betonową otulinę belek. W każdej z serii podstawowych (E, N) wyodrębniono belki niskie – typ I i wysokie – typ II oraz belki długie – typ L i krótkie – typ S. Zaproponowano również dwa różne stopnie zbrojenia stalowego: typ A - belki zbrojone 2#8mm, typ B - belki zbrojone 2#16mm. W belkach serii N, wzmocnionych wklejanymi taśmami, zaproponowano trzy długości badanego odcinka przyczepności taśm do betonu : 80mm, 120mm i 160mm. W obu seriach (E, N) przyjęto dwie klasy betonu o wytrzymałości 20MPa i 40MPa. W celu zbadania wpływu podłużnego zbrojenia stalowego na warunki przyczepności kompozytu do betonu, w czterech belkach przecięto pręty stalowe.

Wzmocnione belki z ciągłym zbrojeniem podłużnym, na ogół niszczyły się na skutek odspojenia zbrojenia kompozytowego wraz z otaczającą betonową otuliną. Ten typ zniszczenia jest charakterystyczny dla odspojenia końców taśm („end strip debonding”), w elementach wzmocnionych kompozytami o zbyt małej długości zakotwienia.

Badania wykazały, że wzrost wytrzymałości betonu opóźnia odspojenie taśm i wpływa na wzrost odkształceń granicznych kompozytu przy jego odspojeniu. Z uwagi na model zniszczenia belek (przy zginaniu), wytrzymałość betonu miała nieznaczny wpływ na nośność badanych elementów, zarówno w wypadku belek wzmocnionych wklejanymi taśmami, jak i belek wzmocnionych matami i taśmami przyklejanymi na rozciąganej ich powierzchni.

Pomiary odkształceń taśm kompozytowych na długości wklejonego odcinka, wykazały wpływ położenia badanego odcinka na odkształcalność kompozytu. Jeśli ten odcinek położony był w strefie czystego zginania, do odspojenia dochodziło później (przy większych odkształceniach granicznych taśm), niż w wypadku położenia badanego odcinka przyczepności w obszarze jednoczesnego działania momentu i siły tnącej.

Belki wzmocnione sztywnymi taśmami, przyklejanymi na powierzchni betonu, wykazały większe naprężenia przyczepności w porównaniu z belkami wzmocnionymi wiotkimi matami. Potwierdzono wpływ zbrojenia zwykłego na warunki przyczepności taśm wklejanych w betonową otulinę. Przecięcie tego zbrojenia spowodowało opóźnienie odspojenia taśm kompozytowych, a tym samym znaczące zwiększenie ich granicznych odkształceń.

SUMMARY

The research project concerns the problem of adherence of composite carbon fibre materials to concrete. The test model suggested by RILEM (the tests of steel reinforcement bonding to concrete, 1982) has been adopted to the bond test of composite materials to concrete.

The test included 50 concrete reinforced beams unstrengthened and strengthened with carbon fibre composite materials. The beams were divided into two basic Series distinguished by a kind of composite reinforcement (E and N).

In E Series, the beams were strengthened with strips and sheets bonded on the tension surface of the elements, in series N, the strips were bonded into grooves made in the concrete cover of the beams. In each of the basic series (E, N) the low beams of type I, tall beams of type II, long beams of type L, and short beams of type S were distinguished. Two different tapes of the steel reinforcement were adopted: type A – beams reinforced with 2#8mm, and type B – beams reinforced with 2#16mm. In N Series beams, reinforced with NSM strips, three bond lengths were assumed: 80mm, 120mm, 160mm. In both Series (E, N), two classes of concrete of compressive strength 20MPa and 40MPa were adopted. In order to test the influence of the longitudinal steel reinforcement on the bond conditions of the composite material to concrete, the steel bars in four beams were cut through.

The test results indicated that the increase in concrete strength delayed the debonding of the strips and increased the ultimate strain of the composite at its debonding. Due to the mode of failure of the beams under bending the concrete strength had an insignificant influence on the load bearing capacity of the tested elements, both in the case of beams strengthened with the NSM strips, and in the case of the beams externally strengthened with sheets and strips.

The measurements of the composite strain along the bond length proved the influence of the position of the tested section on the composite strain. If the section was situated within the pure bending zone, the debonding occurred later (with higher ultimate strains of the strips) than in the case of the position of the tested section within the zone of the simultaneous action of the moment and the shear force.

Beams reinforced with rigid strips externally bonded on the surface of concrete demonstrated higher bond stress, compared to the beams strengthened with flexible sheets. The influence of the steel reinforcement on bond behaviour between the strips and concrete was confirmed, and cutting through the reinforcement delayed the debonding of the strips, and thus made a significant increase in their ultimate strain.

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	7
1.1. Tematyka, cel i zakres badań	7
1.2. Wiadomości ogólne	8
2. Program badań	10
3. Opis badań	13
3.1. Materiały	13
3.1.1. Stal zbrojeniowa	13
3.1.2. Beton	13
3.1.3. Materiały kompozytowe CFRP	13
3.2. Elementy	14
3.2.1. Zbrojenie stalowe	14
3.2.2. Sposoby wzmacniania belek	16
3.2.3. Wykonanie i składowanie elementów	18
3.2.4. Technologia aplikacji taśm i mat CFRP	18
3.3. Stanowisko badawcze	19
3.4. Pomiar komputerowe	20
4. Wyniki badań materiałów	22
4.1. Stal zbrojeniowa	22
4.2. Beton	23
4.3. Taśmy Sika® CarboDur	24
4.4. Zaprawy klejowe	26
5. Wyniki badań elementów	27
5.1. Forma przedstawienia wyników	27
5.2. Mechanizmy zniszczenia belek	27
5.3. Siły niszczące, odkształcenia i układ rys	29
6. Analiza warunków przyczepności kompozytów do betonu	41
6.1. Wpływ wytrzymałości betonu na graniczne odkształcenia kompozytu	41
6.2. Wpływ wytrzymałości betonu i rodzaju zbrojenia kompozytowego na nośność belek	42
6.3. Wpływ wytrzymałości betonu na naprężenie przyczepności kompozytu do betonu	43
6.4. Wpływ długości zakotwienia taśm na nośność elementów i odkształcenia graniczne materiałów kompozytowych	44
6.5. Wpływ przecięcia wewnętrznego zbrojenia stalowego na warunki przyczepności taśm kompozytowych, ich odkształcalność i nośność belek	45
6.6. Wpływ wysokości przekroju belki na odkształcalność taśm	47
6.7. Wpływ położenia odcinka przyczepności kompozytu do betonu (wpływ rozpiętości belki) na odkształcalność taśm	48
6.8. Wpływ stopnia zbrojenia stalowego na odkształcalność taśm kompozytowych	49
6.9. Wpływ stopnia zbrojenia kompozytowego na odkształcalność taśm	50
7. Wnioski i kierunki dalszych badań	52
Bibliografia	54
Załącznik	55

CONTENTS

1. Introduction	7
1.1. Subject, aim and scope of the research	7
1.2. General information	8
2. Test program	10
3. Description of the tests	13
3.1. Materials	13
3.1.1. Steel reinforcement	13
3.1.2. Concrete	13
3.1.3. CFRP materials	13
3.2. Elements	14
3.2.1. Steel reinforcement	14
3.2.2. Strengthening modes	16
3.2.3. Production and storing of elements	18
3.2.4. Technology of CFRP strips and sheets application	18
3.3. Test setup	19
3.4. Computer measurements	20
4. Results of the material test	22
4.1. Steel reinforcement	22
4.2. Concrete	23
4.3. Sika® CarboDur strips	24
4.4. Adhesives	26
5. Test results of the beams	27
5.1. Mode of presentation of the results	27
5.2. Beams failure	27
5.3. Ultimate loads, strains and crack pattern	29
6. Analysis of bond conditions between composites and concrete	41
6.1. Influence of concrete compressive strength on the bond strain of composite	41
6.2. Influence of concrete strength and mode of composite reinforcement on load bearing capacity of beams	42
6.3. Influence of concrete strength on the bond stress of composite to concrete	43
6.4. Influence of the bond length of the strips on load bearing capacity of the elements and the ultimate strain of composite materials	44
6.5. Influence of cutting through the internal steel reinforcement on conditions of composite strips bond, strains of strips and load bearing capacity of beams	45
6.6. Influence of the beam's height on strips strains	47
6.7. Influence of the location of the strip's bond length (influence of the beam span) on strip's strain	48
6.8. Influence of the steel reinforcement ratio on composite strains	49
6.9. Influence of the composite reinforcement ratio on composite strains	50
7. Conclusions and proposals of further research	52
References	54
Appendix	55

OZNACZENIA

Duże litery łacińskie

A_f	-	pole powierzchni taśmy / maty FRP
A_s	-	pole przekroju zbrojenia
A_{s1}	-	pole przekroju zbrojenia rozciąganego
A_{s2}	-	pole przekroju zbrojenia ściskanego
E_c	-	moduł sprężystości betonu
E_f	-	moduł sprężystości taśmy / maty FRP
E_s	-	moduł sprężystości stali
F	-	siła obciążająca
F_u	-	obciążenie niszczące
L	-	długość elementu
L_0	-	rozpiętość elementu
L_b	-	długość przyczepności

Małe litery łacińskie

a	-	ugięcie elementu
b	-	szerokość elementu
b_f	-	szerokość taśmy
d	-	wysokość użyteczna przekroju
d_s	-	średnica prętów stalowych
f_a	-	wytrzymałość zaprawy klejowej na ściskanie
f_{at}	-	wytrzymałość zaprawy klejowej na rozciąganie
f_c	-	wytrzymałość betonu na ściskanie
$f_{c,cube}$	-	wytrzymałość betonu na ściskanie określona na kostkach o boku 150 mm
$f_{ct,sp}$	-	wytrzymałość betonu na rozciąganie określona metodą rozłupywania
f_{fu}	-	wytrzymałość taśmy / maty FRP na rozciąganie
f_{sy}	-	granica plastyczności stali zbrojeniowej
f_t	-	wytrzymałość stali zbrojeniowej na rozciąganie
h	-	całkowita wysokość przekroju
s	-	przemieszczenie taśmy FRP względem betonu (poślizg)
t_f	-	grubość taśmy / maty FRP

Małe litery greckie

ε	-	odkształcenie
ε_c	-	odkształcenie jednostkowe betonu w strefie ściskanej
ε_f	-	odkształcenie taśmy / maty FRP
ε_{fbmax}	-	maksymalne odkształcenie taśmy / maty na odcinke przyczepności w chwili zniszczenia belki
ε_{fu}	-	odkształcenie taśmy / maty FRP przy zerwaniu
ε_R	-	odkształcenie jednostkowe betonu w poziomie baz pomiarowych R
ε_{sy}	-	odkształcenie zbrojenia stalowego odpowiadające granicy plastyczności
ε_{su}	-	graniczne odkształcenie zbrojenia stalowego na rozciąganie
ρ_s	-	stopień podłużnego zbrojenia stalowego
ρ_f	-	stopień zbrojenia FRP
σ	-	naprężenie
σ_f	-	naprężenie taśmy / maty
σ_{sy}	-	naprężenie zbrojenia stalowego odpowiadające granicy plastyczności
τ_b	-	naprężenie przyczepności
τ_{bm}	-	średnie naprężenie przyczepności

NOTATION

Roman upper case letters

A_f	-	area of FRP strip / sheet
A_s	-	area of longitudinal steel reinforcement
A_{s1}	-	area of tensile steel reinforcement
A_{s2}	-	area of compressive steel reinforcement
E_c	-	modulus of elasticity of concrete
E_f	-	modulus of elasticity of FRP strip
E_s	-	modulus of elasticity of steel reinforcement
F	-	load
F_u	-	ultimate load
L	-	length
L_0	-	span length
L_b	-	bond length

Roman lower case letters

a	-	deflection of the member
b	-	width of member
b_f	-	width of strip
d	-	effective depth of member
d_s	-	diameter of steel rebars
f_a	-	compressive strength of adhesive
f_{at}	-	tensile strength of adhesive
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_{fu}	-	tensile strength of FRP strip / sheet
f_{sy}	-	yielding strength of steel reinforcement
f_t	-	tensile strength of steel reinforcement
h	-	total depth of member
s	-	relative displacement between FRP strip and concrete (slip)
t_f	-	thickness of FRP strip / sheet

Greek lower case letters

ε	-	strain
ε_c	-	compressive strain of concrete
ε_f	-	strain of FRP strip / sheet
ε_{fbmax}	-	maximum bond FRP strain of strip / sheet
ε_{fu}	-	ultimate FRP strain of strip / sheet
ε_R	-	strain of concrete at level of longitudinal gauges R
ε_{sy}	-	strain of yielding steel reinforcement
ε_{su}	-	ultimate tensile strain of steel reinforcement
ρ_s	-	longitudinal steel reinforcement ratio
ρ_f	-	FRP reinforcement ratio
σ	-	stress
σ_f	-	FRP strip / sheet stress
σ_{sy}	-	stress of yielding steel reinforcement
τ_b	-	bond shear stress
τ_{bm}	-	mean bond shear stress

1. WSTĘP

1.1. Tematyka, cel i zakres badań

Tematem badań jest zjawisko przyczepności materiałów kompozytowych CFRP (carbon fiber reinforced polymer), do betonu w ujęciu dwóch typów technologii wzmocnień:

- materiałów przyklejonych na powierzchni betonu (externally bonded reinforcement – EBR),
- materiałów wklejonych w głąb betonowej otuliny (near surface mounted reinforcement – NSMR).

W zaproponowanych badaniach, zjawisko przyczepności analizowano w warunkach zbliżonych do rzeczywistych tzn. odpowiadających belce wzmocnionej na zginanie. Element badawczy zbudowany był z dwóch odrębnych bloków betonowych, z ciągłym zbrojeniem podłużnym w strefie rozciąganej oraz ze stalowym przegubem położonym w ściskanej strefie przekroju, w środku rozpiętości belki. Zbadano łącznie 50 elementów.

Celem badań było:

- określenie przyczepności kompozytu przyklejonego na powierzchni zewnętrznej betonu i wklejonego w głąb betonowej otuliny betonu,
- określenie sposobu zniszczenia i granicznych odkształceń taśm kompozytowych w chwili odspojenia od powierzchni betonu w elementach z ciągłym i przeciętym (indeks „s”) podłużnym zbrojeniem stalowym,
- analiza efektywności wzmocnienia w zależności od następujących parametrów zmiennych:
 - stopnia podłużnego zbrojenia stalowego, belki typu I ($\rho_s = 0,004$ – 2 pręty o średnicy 8mm i $\rho_s = 0,017$ – 2 pręty o średnicy 16mm), belki typu II ($\rho_s = 0,002$ – 2 pręty o średnicy 8mm i $\rho_s = 0,007$ – 2 pręty o średnicy 16mm),
 - stopnia wklejonego zbrojenia kompozytowego belki typu I ($\rho_f = 0,0013$ – 1 taśma CFRP 15×2,4mm i $\rho_f = 0,0025$ – 2 taśmy CFRP 15×2,4mm), belki typu II ($\rho_f = 0,0006$ – 1 taśma CFRP 15×2,4mm i $\rho_f = 0,0013$ – 2 taśmy 15×2,4mm),
 - typu kompozytu (taśmy węglowe Sika®CarboDur® XS15×2,4mm, Sika®CarboDur®S 90×1,4mm, maty Sika®Wrap® Hex-230C),
 - położenia odcinka przyczepności w obszarze czystego zginania (belki o rozpiętości w osiach podpór $L_0 = 2000$ mm),
 - położenia odcinka przyczepności w obszarze łącznego ścinania i zginania (belki o rozpiętości w osiach podpór $L_0 = 1350$ mm),
 - wysokości belek: typu I – $h = 200$ mm, typu II – $h = 400$ mm (przyjęcie różnej wysokości belek miało na celu zbadanie wpływu krzywizny na efektywność wzmocnienia i sposób zniszczenia),
 - długości badanego odcinka przyczepności: 80mm, 120mm i 160mm (taśmy wklejone w otulinę) i 200mm (taśmy przyklejane na zewnętrznej powierzchni belek),
 - wytrzymałości betonu na ściskanie: 20MPa i 40MPa.

1. INTRODUCTION

1.1. The subject, aim and scope of the research

The subject of the test was a bond behaviour between the CRFP composite materials (carbon fibre reinforced polymer) and concrete, considered for two types of the strengthened technologies:

- composite materials bonded on concrete surface (externally bonded reinforcement - EBR),
- composite materials bonded inside the concrete cover (near surface mounted reinforcement – NSMR).

Within the scope of the test, the bond phenomenon was tested in the conditions similar to real ones, i.e. corresponding to a beam strengthened in bending. The test beam, made with two separate concrete blocks with the continuous longitudinal steel reinforcement within the tension zone, and with a steel joint situated in the compression zone of the beam, in the middle of the span of the beam, was exposed to bending. All in all, 50 beams were tested.

The aim of the test was:

- to determine the bond conditions of the composites externally bonded on the surface of concrete, and near surface mounted into the concrete cover,
- to determine the mode of failure and the ultimate composite strains at the moment of debonding from the concrete surface in beams with the continuous and cut through (index “s”) longitudinal steel reinforcement,
- to analyse the effectiveness of the strengthening depending on the following variable parameters:
 - the percentage of longitudinal steel reinforcement ratio:
 - beams of type I ($\rho_s = 0,004$ – 2 bars of 8mm in diameter, and $\rho_s = 0,017$ – 2 bars of 16mm in diameter),
 - beams of type II ($\rho_s = 0,002$ – 2 bars of 8mm in diameter, and $\rho_s = 0,007$ – 2 bars of 16mm in diameter),
 - the percentage of composite reinforcement ratio:
 - beams of type I ($\rho_f = 0,0013$ – 1 strip CFRP 15×2,4mm and $\rho_f = 0,0025$ – 2 strips CFRP 15×2,4mm),
 - beams of type II ($\rho_f = 0,0006$ – 1 strip CFRP 15×2,4mm and $\rho_f = 0,0013$ – 2 strips 15×2,4mm),
 - type of composite (carbon strips Sika®CarboDur® XS15×2,4mm, Sika®CarboDur®S 90×1,4mm, sheets Sika®Wrap® Hex-230C – 3 layers 90×0,13mm),
 - position of the bond length within the zone of pure bending (beams with the span $L_0 = 2000$ mm),
 - position of the bond length within the zone of shear and bending (beams with the span $L_0 = 1350$ mm),
 - depth of beams: type I – $h = 200$ mm, type II – $h = 400$ mm (different depth of beams was aimed in order to investigate the influence of the curvature on the effectiveness of the reinforcement and the mode of failure),
 - bond length: 80mm, 120mm, and 160mm (strips bonded inside concrete cover), and 200mm (strips externally bonded on the surface of the beams),
 - concrete compressive strength: 20MPa i 40MPa.

Opracowanie obejmuje łącznie 6 rozdziałów. W rozdziale 1 przedstawiono tematykę, cel, zakres pracy i wiadomości ogólne dotyczące stanu wiedzy w dziedzinie badań przyczepności kompozytów do betonu. Program badań i ich opis przedstawiono w rozdziałach 2 i 3.

Rozdział 4 obejmuje wyniki badań wszystkich materiałów (betonu, stali, materiałów kompozytowych), a wyniki badań elementów zamieszczono w rozdziale 5.

Rozdział 6 zawiera analizę warunków przyczepności kompozytów do betonu w aspekcie przyjętych parametrów zmiennych. W rozdziale 7 przedstawiono podstawowe wnioski i kierunki dalszych badań. Rozdział 8 obejmuje piśmiennictwo. Szczegółowe zestawienie wyników pomiarów zamieszczono w załączniku.

1.2. Wiadomości ogólne

Wzmacnianie konstrukcji budowlanych przy użyciu zewnętrznego zbrojenia kompozytowego przyklejanego do powierzchni betonu za pomocą kleju na bazie żywicy epoksydowej, jest coraz częściej wybieranym sposobem zwiększania nośności elementów betonowych na zginanie, ścinanie i ściskanie. Wyniki badań doświadczalnych dowiodły, że elementy żelbetowe wzmocnione na zginanie przy użyciu zewnętrznego zbrojenia kompozytowego, po wzmocnieniu wykazują ograniczenie rozwoju rys, szerokości ich rozwarcia oraz wzrost sztywności i nośności wzmocnionych elementów. Efektywność wzmocnienia na zginanie zależy od stopnia zbrojenia zwykłego, rozkładu momentów gnących na długości elementu, liczby warstw zbrojenia kompozytowego, sztywności jednej warstwy i odległości końca kompozytu od podpory.

Metoda wzmacniania konstrukcji przy użyciu przyklejonych taśm lub mat FRP do rozciąganej powierzchni elementów żelbetowych jest skuteczna, ale nie pozwala ona w pełni wykorzystać wytrzymałości na rozciąganie materiału kompozytowego. Stopień wykorzystania wytrzymałości kompozytu na rozciąganie szacuje się na poziomie zaledwie 15-35% [1].

Podwyższenie efektywności tego wzmocnienia można osiągnąć zwiększając powierzchnię styku kompozytu i betonu, a więc na przykład wklejając zbrojenie kompozytowe w podłużne szczeliny, wycięte w betonowej otulinie elementu (system wzmocnienia NSM). Dzięki dwukrotnie większej powierzchni styku kompozytu z zaprawą klejową, opóźnione jest odspojenie tego zbrojenia od podłoża, co zapewnia wzrost stopnia wykorzystania kompozytu na rozciąganie [2, 3, 4]. Ponadto, taki sposób wzmocnienia nie zmienia estetyki obiektu. Wzmacnianie za pomocą wklejanych taśm lub prętów kompozytowych niesie za sobą dodatkowe korzyści związane z użytkowaniem wzmocnionej konstrukcji [5, 6]. Mianowicie, kompozytowe zbrojenie ukryte w betonowej otulinie jest zabezpieczone przed mechanicznym uszkodzeniem w przypadku uderzenia pojazdu, ataku wandalizmu czy działania ognia.

Zagadnienie przyczepności kompozytu do betonu jest kluczowym problemem warunkującym efektywność wzmocnienia konstrukcji żelbetowej. Dotychczasowe doświadczalne badania w tym zakresie obejmowały kilka typów modeli badawczych:

- niesymetryczne ścinanie z pojedynczą taśmą tzw. „single shear” [7, 8],

The report includes all in 6 chapters. In chapter 1, the subject, aim, and scope of the experiment, as well as the general review on the state of knowledge in the research on bonding of composites and concrete, are presented. The program of the research and its description are presented in chapters 2 and 3.

Chapter 4 includes the results of the tests of all materials (concrete, steel, composite materials).

Chapter 5 includes the analysis of the bond behaviour of composites to concrete in the aspect of considered variable parameters. In chapter 6, basic conclusions and the directions of further research are presented. The detailed list of the results of measurements are given in the appendix.

1.2. General information

The strengthening of building structures with the external composites, bonded to the concrete surface with an epoxy resins adhesive, is more and more often chosen the way of increasing the load bearing capacity of concrete elements subjected to bending, shearing and compression. The results of experimental tests proved that the concrete elements strengthened in flexure with the externally bonded composites demonstrated limit of crack development and width, as well as the increase of beam's stiffness and the load bearing capacity. The effectiveness of the strengthening of the bending capacity is dependent on the percentage of the ordinary reinforcement, on the distribution of the bending moments along the span of a beam, number of layers of the composite reinforcement, stiffness of one layer, and the distance of the end of the composite from the support.

The method of structural strengthening by using bonded strips or RFP sheets to the tension surface of elements is effective, though it does not exhaust full tensile strength of composites. The level of the utilization of the composite tensile strength is estimated for as little as 15 to 35% [1].

The increase of effectiveness of that kind of reinforcement may be achieved by enlarging the contact surface of composite and concrete as, for example, bonding composite reinforcement into the longitudinal slots carved in the concrete cover of a member (the system of reinforcement called informally the NSM). Thanks to the doubled contact surface of the composite and the adhesive mortar, the debonding of that reinforcement from the basis is delayed which enables the increase of the composite strength utilization [2, 3, 4]. Moreover, such a way of reinforcement does not change the esthetics of an object. The reinforcement by using bonded composite strips or bars brings about additional advantages connected with the usage of the reinforced structure [5, 6]. Namely the composite reinforcement hidden in concrete cover is protected against mechanical damage in the case of being hit by a vehicle, act of vandalism, or influence of fire.

The bond condition of composite to concrete is a key problem in determining the effectiveness of strengthening of reinforced concrete structures. The previous tests in this matter included several test models:

- asymmetrical shear test with a single strip, the so-called “single shear” [7, 8],

- symetryczne ścinanie z dwiema taśmami tzw. „double shear” [9, 10],
- elementy belkowe, zginane [11, 12].

Wyniki tych badań są często rozbieżne, zwłaszcza w ocenie wpływu wytrzymałości betonu na warunki przyczepności kompozytu do betonu. Z reguły potwierdzają one opinię, że wraz ze wzrostem długości zakotwienia rośnie wartość maksymalnej siły przyczepności.

Żadne z badań nie uwzględniały jednak wpływu wewnętrznego zbrojenia stalowego, ani też wzajemnego położenia tego zbrojenia i zbrojenia kompozytowego na warunki przyczepności kompozytu do betonu.

Badania wykonano w ramach projektu badawczego nr N506 006 31/0322, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

- symmetrical shear test with doubled strip, the so-called “double shear” [9, 10],
- beams under flexure [11, 12].

The results of those bond tests were often discrepant, especially in the assessment of concrete strength influence on conditions of composite adherence to concrete. They mostly confirm the opinion that the value of the maximum force of bonding grows along with the increase of the length of the anchorage. None of the research though considered the influence of an internal steel reinforcement, neither the mutual position of steel reinforcement and composite one, on the conditions of composite adherence to concrete.

The research was executed within the framework of the project no N506 006 31/0322 financed by Ministry of Science and Higher Education.

2. PROGRAM BADAŃ

W badaniach przyczepności materiałów kompozytowych do betonu, zaadaptowano model RILEM (1982) [13], użyty w badaniach przyczepności zbrojenia stalowego do betonu.

Program przewidywał zbadanie dwóch zasadniczych serii belek różniących się rodzajem wzmocnienia kompozytowego:

- Seria E - taśmy / maty FRP naklejone na rozciąganej powierzchni belek (EB – externally bonded)
- Seria N - taśmy wklejane w betonową otulinę belek (NSM – near surface mounted).

W każdej z serii podstawowych (E, N) wyodrębniono:

- belki niskie – typ I ($h = 200$ mm) i wysokie – typ II ($h = 400$ mm),
- belki długie – typ L ($L_0 = 2000$ mm) i krótkie – typ S ($L_0 = 1350$ mm).

Schematy statyczne belek pokazano na rys. 2.1, a w tablicach 2.1 i 2.2 zestawiono odpowiednio charakterystykę elementów serii E i N.

Zaproponowano również dwa różne stopnie zbrojenia stalowego:

- typ A - belki zbrojone 2 prętami o średnicy 8mm,
- typ B - belki zbrojone 2 prętami o średnicy 16mm.

Belki wzmocniane zewnętrznie (typ E), różniły się rodzajem użytego kompozytu:

- 3m oznacza wzmocnienie w postaci 3 warstw maty o szerokości 90 mm i grubości jednej warstwy 0,13mm,
- S oznacza belki wzmocnione taśmami z włókien węglowych typu S914, o szerokości 90 mm i grubości 1,4mm.

Długość badanego odcinka przyczepności była we wszystkich elementach serii E jednakowa i wynosiła 200mm. W belkach serii N, wzmocnionych wklejonymi taśmami typu XS1524, zaproponowano trzy długości badanego odcinka przyczepności taśm do betonu: 80mm, 120mm i 160mm.

W obu seriach (E, N) przyjęto dwie klasy betonu o wytrzymałości 20MPa i 40MPa.

W celu zbadania wpływu podłużnego zbrojenia stalowego na warunki przyczepności kompozytu do betonu, w czterech belkach przecięto stalowe pręty (elementy z indeksem „s”). Założono, że wszystkie belki będą wzmocnione przed obciążeniem.

Program badań obejmował dodatkowo:

- określenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie oraz modułu sprężystości betonu,
- określenie wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości dwóch rodzajów prętów, o średnicach 8 i 16 mm, wykonanych ze stali zbrojeniowej typu BSt500,
- określenie wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości taśm i mat z włókien węglowych (XS1.524, S914, HEX 230C),
- określenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie zaprawy klejowej na bazie żywicy epoksydowej SikaDur®-30 oraz impregnatu żywicy epoksydowej SikaDur®-330.

2. TEST PROGRAM

In the bond test of the composite materials and concrete, the RILEM model (1982) [13] used in the bond test of the steel reinforcement to concrete was adopted.

The test program envisaged testing of two basic series of beams differing in mode of composite reinforcement.

- Series E – FRP strips/sheets bonded on the tension surface of the beams (EB – externally bonded),
- Series N – strips mounted inside the grooves made in the concrete cover of the beams (NSM – near surface mounted). In each of the basic series, low beams - type I ($h = 200$ mm) and tall – type II ($h = 400$ mm), long beams – type L ($L_0 = 2000$ mm) and short beam S – type S ($L_0 = 1350$ mm) were distinguished.

The static schemes of the beams are shown in Fig. 2.1. Tables 2.1, 2.2 present the characteristics of elements of the series E and N respectively.

Also two different levels of steel reinforcement were used:

- type A – beams reinforced with 2 bars of 8mm in diameter,
- type B – beams reinforced with 2 bars of 16mm in diameter.

The beams externally strengthened (E type) differed in kinds of composite applied.

- 3m – defines the strengthening with 3 layers of sheets 90 mm wide, with one layer 0.13 mm thick,
- S – defines the beams strengthened with CFRP strips of type S914 of 90 mm wide and 1.4 mm thick.

The bond length of 200 mm was identical in all elements of the E Series. In the beams of the N series, strengthened with NSM CFRP strips S914 type, three bond lengths of the composite to concrete were adopted: 80mm, 120mm, 160mm.

In both Series (E, N) two classes of concrete: 20MPa and 40MPa of the compressive strength were adopted.

In order to investigate the influence of the longitudinal steel reinforcement on the bond conditions of the composite, the steel bars (marked with “s” index) were cut through in four beams. It was assumed that all beams had been strengthened before loading.

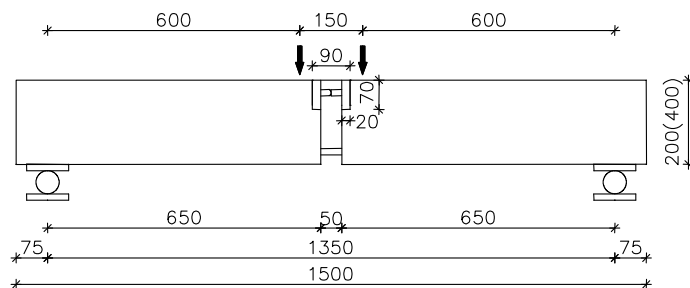
Additionally, the research program included:

- defining the compressive and tensile strength, as well as the modulus of elasticity of concrete,
- defining the tensile strength and elasticity modulus of two kinds of bars, 8 and 16 mm in diameter, made with reinforcement steel BSt500 type,
- defining the tensile strength and elasticity modulus of strips and sheets made of carbon fibre (XS1.524, S914, HEX 230C),
- defining the compressive and tensile strength of the epoxy adhesive SikaDur®-30 and SikaDur®-330.

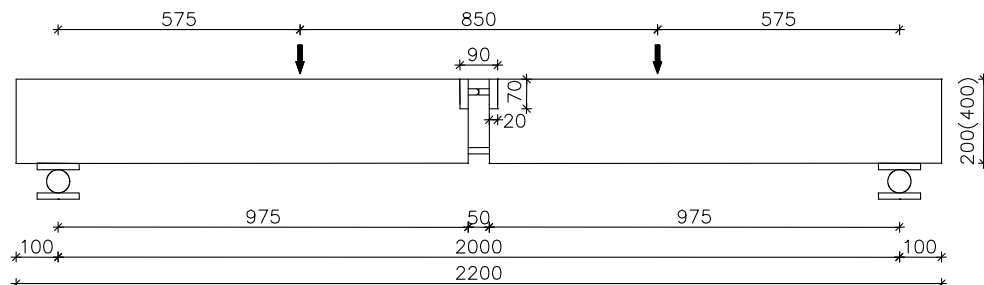
Tablica 2.1. Charakterystyka elementów serii E
 Table 2.1. Characteristic of members of E Series

Lp.	Seria / Series	Belka / Beam	Zbrojenie rozciągane / Tensile reinforcement	Wytrzymałość betonu na ściskanie / Compressive strength of concrete, f_c [MPa]	Typ kompozytu / FRP type
1	EIS H=200 mm L ₀ =1350 mm	EISA/20/S	Type A 2 Ø8	20	S 914
2		EISA/20/3m			3 warstwy maty / 3 sheet layers HEX 230C
3		EISA/40/S			S 914
4		EISA/40/3m	3 warstwy maty / 3 sheet layers HEX 230C		
5		EISB/20/S	Type B 2 Ø16	20	S 914
6		EISB/20/3m			3 warstwy maty / 3 sheet layers HEX 230C
7	EIL H=200 mm L ₀ =2000 mm	EILA/20/S	Type A 2 Ø8	20	S 914
8		EILA/20/3m			3 warstwy maty / 3 sheet layers HEX 230C
9		EILB/20/Ss	Type B 2 Ø16		20
10	EIILB/20/S	3 warstwy maty / 3 sheet layers HEX 230C			
11	EIIL H=400 mm L ₀ =2000 mm	EIILB/20/3m			3 warstwy maty / 3 sheet layers HEX 230C

a) belka typu S / beam S type



b) belka typu L / beam L type



Rys. 2.1. Schematy statyczne belek

Fig. 2.1. Static schemes of beams

Tablica 2.2. Charakterystyka elementów serii N
 Table 2.2. Characteristic of members of N Series

Lp.	Seria / Series	Belka / Beam	Zbrojenie rozciągane / Tensile reinforcement	Wytrzymałość betonu na ściskanie / Compressive strength of concrete, f_c [MPa]	Długość odcinka przy-czepności / Bond length, L_b [mm]	
1	NIS H=200mm L _o =1350mm	NISA/20	Typ A / Type A 2 Ø8	20	-	
2		NISA/20/80			80	
3		NISA/20/120			120	
4		NISA/20/160			160	
5		NISA/20/80p			80	
6		NISA/20/120p			120	
7		NISA/20/160p			160	
8		NISA/40			40	-
9		NISA/40/80				80
10		NISA/40/120				120
11	NIL H=200mm L _o =2000mm	NISB/20	Typ B / Type B 2 Ø16	20	-	
12		NISB/20/80			80	
13		NISB/20/120			120	
14		NILA/20	Typ A / Type A 2 Ø8		-	
15		NILA/20/80			80	
16		NILA/20/120			120	
17		NILA/20/120p				
18		NILA/20/120s				
19		NILA/20/120pp				
20		NILA/20/120sp			Typ B / Type B 2 Ø16	-
21	NILB/20	80				
22	NILB/20/80	120				
23	NILB/20/120					
24	NILB/20/120p					
25	NILB/20/120pp					
26	NILB/20/120s					
27	NILB/20/120sp	40	-			
28	NILA/40		80			
29	NILA/40/80		120			
30	NILA/40/120		2 x 80			
31	NILA/40/2x80	Typ B / Type B 2 Ø16	20	80		
32	NIISB/20/80			2 x 80		
33	NIISB/20/2x80			120		
34	NIISB/20/120			160		
35	NIISB/20/160			80		
36	NIILB/20/80			80		
37	NIILB/20/80p			2 x 80		
38	NIILB/20/2x80			120		
39	NIILB/20/120					

p – oznacza element powtórzony / repeated member
 s – oznacza przecięcie podłużnego zbrojenia stalowego w środku rozpiętości belki / cut thought longitudinal steel bars in beam's midspan

3. OPIS BADAŃ

3.1. Materiały

3.1.1. Stal zbrojeniowa

Do wykonania zbrojenia podłużnego zastosowano stal zbrojową klasy AIIIIN o znaku BSt500, o nominalnych średnicach 8mm i 16mm. Strzemiona wykonano z tej samej stali, co zbrojenie podłużne o średnicy 8mm. Z każdego rodzaju stali użytej do zbrojenia belek pobrano próbki w celu zbadania cech wytrzymałościowych. Badania przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej UFP 400, wyposażonej dodatkowo w rejestrator wydłużeń o bazie pomiarowej 40mm i 100mm (rys. 3.1). Na podstawie odczytów komputerowych określono odkształcenia (ϵ_u) przy maksymalnym naprężeniu, moduł sprężystości E_s , wytrzymałość na rozciąganie f_t oraz granicę plastyczności f_{sy} .



Rys. 3.1. Maszyna wytrzymałościowa UFP 400
Fig. 3.1. Testing machine UFP 400

3.1.2. Beton

Mieszankę betonową wykonano z piasku, żwiru 2/8 i 8/16, cementu portlandzkiego C32,5 i wody. Skład mieszanki dla suchych składników podano w tablicy 3.1.

Podczas betonowania każdej belki wykonano próbki walcowe o średnicy 150mm i wysokości 300mm oraz próbki sześciennie o boku 150mm. Na próbkach kostkowych określono wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie metodą rozłupywania, natomiast na próbkach walcowych, wytrzymałość słupową oraz moduł sprężystości betonu. Określenie cech wytrzymałościowych betonu każdej belki wykonano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej FORM+TEST (PRuFSYSTEM TYP 107/3000A).

3.1.3. Materiały kompozytowe CFRP

Taśmy Sika[®] CarboDur typu S914 i XS1524 oraz maty SikaWrap[®] typ HEX 230C zbadano na rozciąganie w maszynie wytrzymałościowej typu ZD 20. Z taśm typu S914, pobrano pięć próbek o długości 350mm i szerokości 15mm, wyciętych z taśm o fabrycznej szerokości 90mm. Pobrano pięć próbek taśm typu XS1524 o długości 350mm i fabrycznej szerokości 15mm.

3. DESCRIPTION OF THE TESTS

3.1. Materials

3.1.1. Steel reinforcement

The longitudinal reinforcement was made of ribbed steel bars of class AIIIIN marked BSt500, of nominal diameters 8 mm and 16 mm. The stirrups were made of the same steel as the longitudinal 8 mm reinforcement. Out of each kind of the steel applied to reinforcement of the beams, specimens were taken in order to test the strength characteristics. The test was carried out in the UFP 400 machine, additionally equipped in an elongation recording with the measurement bases of 40 mm and 100 mm (Fig. 3.1). Based on computer readings, the ultimate strains (ϵ_u), the elasticity modulus E_s , the tensile strength f_t , and the yield strength were defined.

Tablica 3.1. Skład mieszanki betonowej
Table 3.1. Composition of concrete mix

Składniki Component	$f_c = 20$ MPa	$f_c = 40$ MPa
	kg/m ³	kg/m ³
Cement / Cement	300	400
Woda / Water	184	170
Piasek / Sand	625	541
Żwir 2/8 Gravel 2/8	625	812
Żwir 8/16 Gravel 8/16	535	451
Suma / Sum	2269	2374

3.1.2. Concrete

The concrete mix was made of sand, gravel 2/8 and 8/16, portland cement C32,5 and water. The mixture proportions for dry components are shown in table 3.1.

During concreting the beams, cylindrical specimens 150mm in diameter and 300mm height and cubic specimens of a 150mm were produced. The compression and splitting tensile strength of the cubic specimens were defined, while on cylindrical specimens the compressive strength and the modulus of elasticity were defined. The concrete strength characteristics of each beam was determined using with the FORM+TEST (PRuFSYSTEM TYPE 107/3000A) test machine.

3.1.3. CFRP materials

The strips Sika[®] CarboDur type S914 i XS1524 and sheets SikaWrap[®] type HEX 230C were tested in the press type ZD 20. From the strips of S914 type, five specimens 350mm long and 15mm wide, cut out of the strips of the nominal width of 90mm were taken. Also five specimens of the type XS1524 strips 350mm long and of nominal width of 15mm were taken.

Z pasma maty o szerokości fabrycznej 300mm, pobrano dziesięć próbek o długości 350mm i szerokości 15mm. Do obu końców każdej próbki doklejono aluminiowe płaskowniki o szerokości 15mm, długości 80 mm i grubości 5mm, w celu zakotwienia próbek w szczękach maszyny wytrzymałościowej (rys. 3.2).

Do przyklejania taśm typu Sika®CarboDur S914 i XS1524 użyto dwuskładnikową epoksydową zaprawę klejową Sikadur®-30. Składnik typu A (żywica epoksydowa) i B (utwardzacz) w stosunku wagowym A:B = 3:1. Maty SikaWrap® typ HEX 230C przyklejano do powierzchni belki dwuskładnikowym impregnatem Sikadur®-330, który należy stosować w stosunku wagowym A:B = 4:1. W celu określenia własności wytrzymałościowych kleju Sikadur®-30 oraz impregnatu Sikadur®-330 (wytrzymałość na ściskanie f_c i rozciąganie przy zginaniu f_{at}) wykonano po trzy prostopadłościennne próbki o wymiarach 40×40×160mm, z każdego rodzaju kleju. Badanie wykonano w maszynie wytrzymałościowej FORM + TEST (PRuFSYSTEM TYP 107/3000A).

Ten specimens 350 mm long and 15 mm wide, were taken from the sheet of 300 mm nominal width. Up to both ends of each specimen aluminium flat plates 15mm wide, 80mm long, and 5mm thick were bonded, in order to anchor the specimens in the jaws of the test machine (Fig. 3.2).

For bonding the Sika®CarboDur S914 and XS1524 type strips, the two-component epoxy adhesive Sikadur®-30 was used. The component type A (epoxy resin), and B (hardener) were in a mass proportion of A : B = 3 : 1. The sheets SikaWrap® type HEX 230C were bonded on a surface of beam with a two-component adhesive Sikadur®-330 which is to be applied in the weight relation A:B = 4:1. In order to define the strength characteristics of the Sikadur®-30 adhesive, and the Sikadur®-330 adhesive, (compressive strength f_c and tensile strength f_{at} at bending) three rectangular specimens measuring 40×40×60mm were produced out of each kind of adhesive. The test was carried out in the test machine FORM + TEST (PRuFSYSTEM TYPE 107/3000A).



Rys. 3.2. Próbkki materiałów CFRP a) taśmy XS1524, b) taśmy S914, c) maty HEX 230C
Fig. 3.2. CFRP specimens a) strips XS1524, b) strips S914, c) sheets HEX 230C

3.2. Elementy

3.2.1. Zbrojenie stalowe

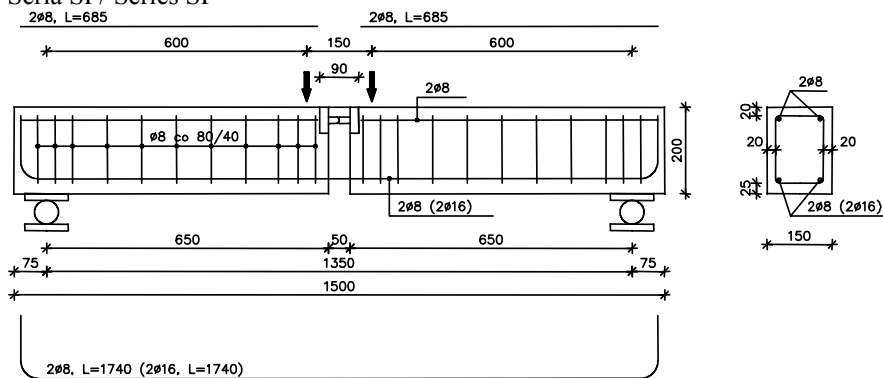
Z uwagi na różną wysokość belek serii I i II (seria I – $h = 200\text{mm}$, seria II – $h = 400\text{mm}$), wykonano szkielety zbrojeniuowe, dostosowane do wysokości belek. Belki zbrojone były prętami żebrowanymi ze stali BST500, w strefie ściskanej o nominalnej średnicy 8mm natomiast w strefie rozciąganej, prętami o średnicy 8mm (typ A) i 16mm (typ B) oraz strzemiomami o średnicy 8mm w rozstawie 80mm i 40mm. Kształt i zbrojenie belek krótkich pokazano na rysunku 3.3, a belek długich na rysunku 3.4.

3.2. Elements

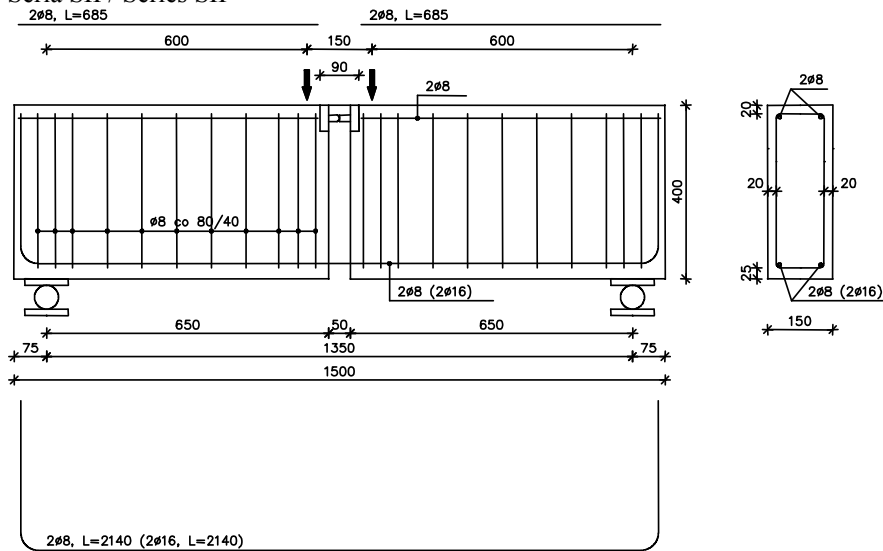
3.2.1. Steel reinforcement

Due to the different depth of the Series I and II beams (Series I – $h = 200\text{mm}$, Series II – $h = 400\text{mm}$), reinforcing skeletons adjusted to the depth of the beams were produced. The beams were reinforced with ribbed bars of BST 500 steel in nominal diameter 8mm in the compression zone, while with the 8mm (type A) and 16mm (type B) and with 8mm stirrups in the 80mm and 40mm spacing in the tension zone. The shape and reinforcement of the short beams are shown in Fig. 3.3, and of long beams in Fig. 3.4.

Seria SI / Series SI

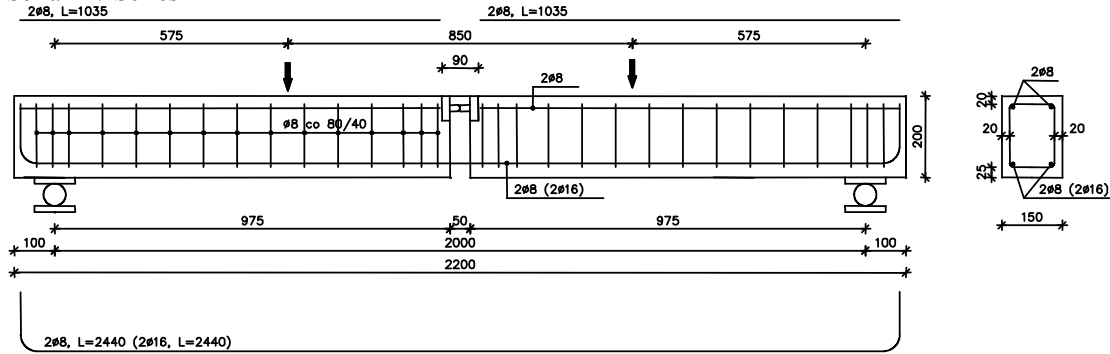


Seria SII / Series SII

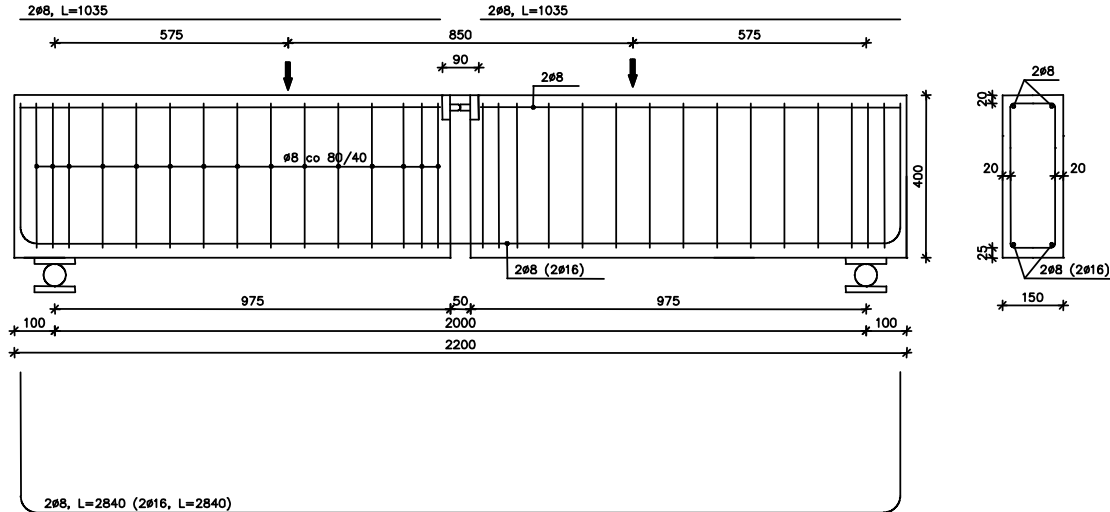


Rys. 3.3. Sposób zbrojenia belek krótkich (seria SI i SII)
 Fig. 3.3. Steel reinforcement of short beams (Series SI and SII)

Seria LI / Series LI



Seria LII / Series LII



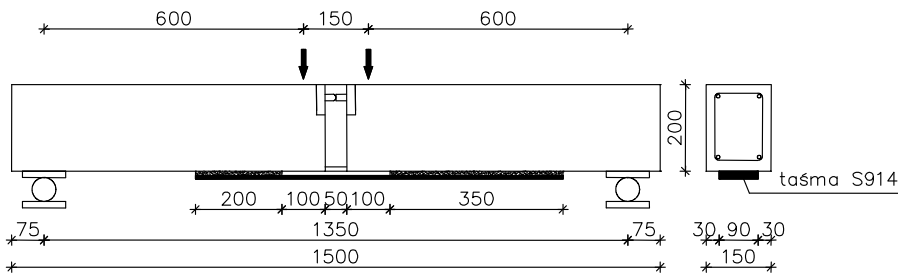
Rys. 3.4. Sposób zbrojenia belek długich (seria SI i SII)
Fig. 3.4. Steel reinforcement of long beams (SI and SII Series)

3.2.2. Sposob wzmacniania belek

Belki serii E wzmocniono taśmami i matami Sika® CarboDur, przyklejonymi na rozciąganej powierzchni belek. Belki wzmocniano przed ich obciążeniem w pozycji odwróconej, w celu łatwego dostępu do wzmocnionej powierzchni. Sposób wzmocnienia pokazano na rys. 3.5.

3.2.2. Strengthening modes

A certain part of the beams were strengthened with the Sika® CarboDur strips and sheets bonded on the tension surface of the beams. The beams had been strengthened before loading in the upside down position in order to facilitate access to the strengthened surface. The mode of strengthening is shown in Fig. 3.5.



Rys. 3.5. Sposób wzmocnienia belek serii ESI
Fig. 3.5. Strengthening mode of beams ESI Series

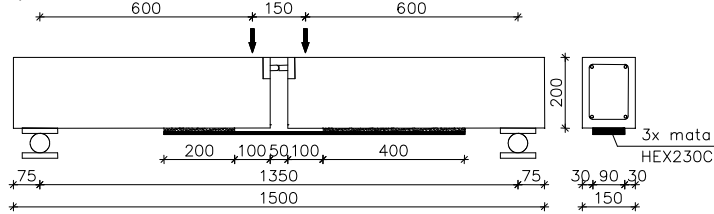
Część belek, z symbolem „s”, wzmocniono trzema warstwami mat SikaWrap® typu HEX 230C (szerokości 90mm, grubości pojedynczej warstwy 0,13mm i długości badanego odcinka zakotwienia 200mm), przyklejonymi na rozciąganej powierzchni belek (rys. 3.6).

The remaining E Series beams were strengthened with three layers of the SikaWrap® type HEX 230C sheets (90mm wide, 0,13mm thick of single layer, and 200mm bond length), bonded on the tension beams surface (Fig. 3.6).

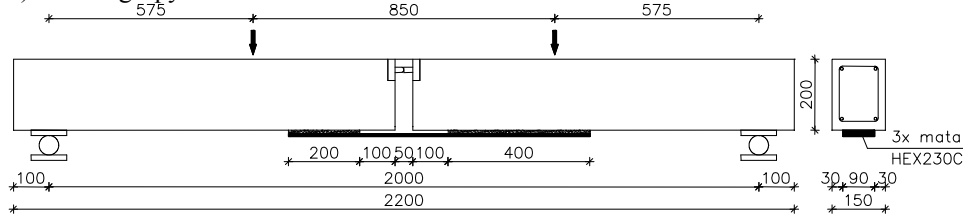
Serię belek typu N wzmocniono taśmami Sika® CarboDur XS1524 (szerokości 15mm, grubości 2,4mm i zmiennej długości zakotwienia badanego odcinka: 80mm, 120mm i 160mm), wklejonymi w jedną lub dwie bruzdy, wykonane w betonowej otulinie rozciąganej powierzchni belek (rys. 3.7 i 3.8).

The N Series beams were strengthened with the Sika® CarboDur XS1524 strips (15mm wide, 2,4mm thick, and the variable bond length of 80mm, 120mm, 160mm), bonded inside one or two grooves made in the concrete cover of the beams surface (Fig. 3.7 and 3.8).

a) belka serii ESI / beams ESI Series

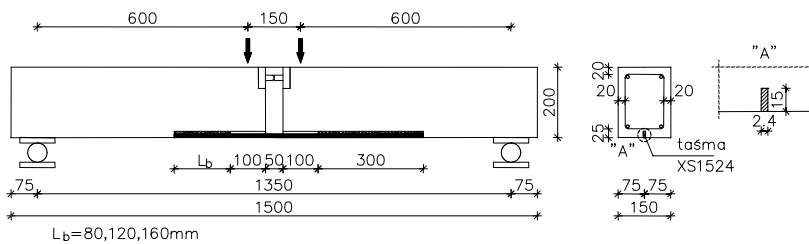


b) belka z grupy ELI / beams ELI Series



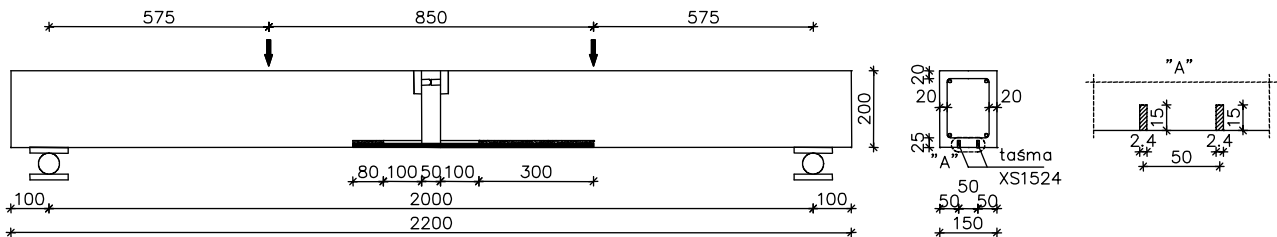
Rys. 3.6. Sposób wzmocnienia belek serii ESI i ELI (maty)

Fig. 3.6. Strengthening mode of beams ESI and ELI Series (sheets)



Rys. 3.7. Sposób wzmocnienia belek serii NSI

Fig. 3.7. Strengthening mode of beams NSI Series

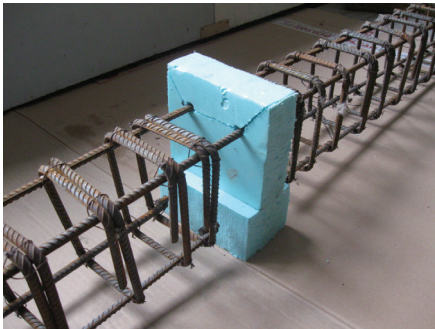


Rys. 3.8. Sposób wzmocnienia belek serii NLI/2x80

Fig. 3.8. Strengthening mode of beam NLI/2x80 Series

3.2.3. Wykonanie i składowanie elementów

Szkielety zbrojenia belek wykonano w laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej. Po środku każdego szkieletu zbrojenia ustabilizowano dwa prostopadłościowe wykonane ze styropianu o wymiarach odpowiednio dla belek niskich (typu I) 75×90×150mm i 125×50×150mm oraz dla belek wysokich (typu II) 75×90×150mm i 325×50×150mm, które po zabetonowaniu belek miały być usunięte i zapewniały przestrzeń pod stalowy przegub, położony w ściskanej strefie belki i pustkę powietrzną na pozostałej jej wysokości (rys. 3.9).



Rys. 3.9. Środkowy fragment szkieletu zbrojeniowego belek serii I ze styropianowym wkładem
Fig. 3.9. Midspan part of the steel reinforcement skeleton of beams Series I with foam polystyrene

Mieszankę betonową wykonano w betoniarnie wolnostojącej o pojemności 0,150 m³. W zależności od rodzaju belek, sporządzano odpowiednio dwa, trzy lub cztery zaroby. Z każdego zarobu pobrano próbki sześciennie i walcowe, w celu określenia cech wytrzymałościowych betonu. Betonowanie elementów odbywało się w pozycji poziomej, odwróconej (strona rozciągana górą), w stalowej formie. Do zagęszczania mieszanki w próbkach użyto stół wibracyjny TESTING, natomiast beton w belkach zagęszczano wibratorem węglowym firmy „Tremix” typu OM2.0 (buława ES50 o średnicy 50 mm, o częstotliwości 200Hz).

3.2.4. Technologia aplikacji taśm i mat CFRP

Materiały kompozytowe przyklejano na powierzchni belek po dwóch tygodniach od daty ich betonowania. W celu uzyskania odpowiedniej przyczepności kleju do betonu, szlifierką kątową zeszlifowano powierzchnię belek w miejscu gdzie miała zostać przyklejona taśma. Oczyszczono powierzchnię betonu z luźnych cząstek i kurzu.

Taśmy docięto na określoną długość za pomocą piłki ręcznej do cięcia metalu. Następnie oczyszczono i od tłuszczono powierzchnie kompozytów flanelową szmatką, zwilżoną w rozcieńczalniku. Dwuskładnikowy klej Sikadur[®]-30 dostarczono w dwóch oddzielnych pojemnikach (żywica – składnik A oraz utwardzacz – składnik B). Przed połączeniem składników odważono potrzebne proporcje w stosunku wagowym 3(A) : 1(B) i mieszano do uzyskania jednolitej barwy. Następnie klej naniesiono na taśmę formując „daszek”, tak aby grubość kleju na środku taśmy wynosiła około 5mm. Taśma przyłożona na zagruntowaną powierzchnię została dociśnięta. Nadmiar kleju wyciśnięty po obu stronach taśmy usunięto szpachelką.

3.2.3. Production and storing of elements

The reinforcing skeletons for the beams were produced in the laboratory of the Department of Concrete Structures of the Technical University of Lodz. In the center of each skeleton, three rectangular prisms made of foam polystyrene, corresponding in measurements of 70×90×150mm and 125×50×150mm with low beams (type I) and of 75×90×150mm and 325×50×150mm with tall beams (type II) were stabilized. The polystyrene was removed after the beams casting, providing the space for the steel joint situated in the compression zone of the beam, and an empty air space along its remaining depth (Fig. 3.9).

The concrete mix was produced in a free-standing concrete mixer of 0,150m³ capacity. Depending on kind of beams, two, three, or four batches of concrete were produced respectively. Cubic or cylindrical specimens were taken out from each batch in order to define the strength characteristics of concrete. Casting was carried out in a horizontal upside down position in the steel mold. A vibratory table was used to compact concrete in the specimens, while concrete in the beams was compacted with a vibrating spear made by “Tremix”, type OM2.0 ES59, 50mm in diameter, 200Hz frequency).

3.2.4. Technology of CFRP strips and sheets application

The composite materials were bonded on the surface of the beams after two weeks past the date of casting. In order to obtain proper adherence of the adhesive to concrete, the surface of the beams where a strip was to be bonded had been polished with a face grinder. The concrete surface had been cleaned of loose particles and dust.

The strips were cut to fit the defined length with a manual hack-saw. Next the composite surfaces were cleaned and degreased with a flannel rag dampened in a thinner. The two-component adhesive Sikadur[®]-30 were supplied in two separate containers (resin – component A and hardener – component B). Before the components were jointed, necessary proportions of 3(A) : 1(B) had been weighed and mixed until a unified colour was obtained. Next the adhesive was spread along the strip forming a “small roof”, so that the strip thickness in the middle came to about 5mm. The strip put against the grounded surface was pressed down. The excess adhesive was removed with a spatula.

W wypadku zastosowania mat, na przygotowaną powierzchnię belki naniesiono dwuskładnikowy klej Sikadur®-330. Następnie posmarowano obustronnie matę (złożoną z trzech warstw) i przyklejono na powierzchni belki dociskając szpachelką, rozprowadzając i wyrównując klej (rys. 3.10a)

W belkach wzmocnionych taśmami wklejonymi w głąb betonowej otuliny, przy użyciu szlifierki kątowej, wykonano podłużne bruzdy o głębokości 17mm, szerokości 6mm i odpowiedniej długości wklejonego odcinka. Taśmy typu XS1524 włożono w bruzdy wypełnione wcześniej klejem i dociśnięto na wymaganą głębokość (rys.3.10b). Belki po wzmocnieniu przechowywano w hali laboratoryjnej.

In the case of sheet application, a two-component adhesive Sikadur®-330 was spread on a prepared surface. Then a sheet (composed of three layers) was bilaterally smeared and stuck to the beam surface pressing down with a spatula, spreading and leveling the adhesive (Fig.3.10a).

In the beams strengthened with NSM strips bonded into the bottom of concrete layer, longitudinal grooves of 17mm in depth, 6mm wide, and an appropriate bond length, were cut. The XS1524 strips were inserted into the grooves filled with the adhesive and pressed down to the required depth (Fig.3.10b). After strengthening, the beams were stored in the laboratory hall.



a)



b)

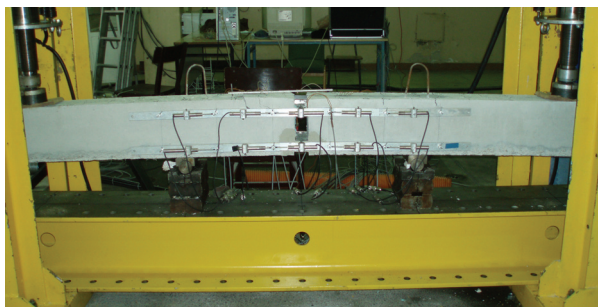
Rys. 3.10. Sposób aplikacji materiałów CFRP: a) przyklejanie mat, b) wklejanie taśm w bruzdy betonowej otuliny
Fig. 3.10. Mode of application of CFRP materials a) externally bonded sheets, b) NSM strips

3.3. Stanowisko badawcze

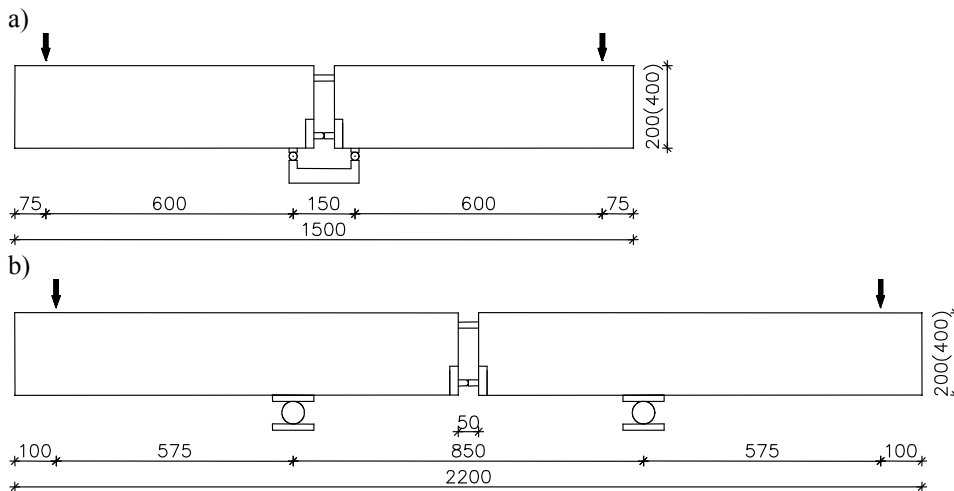
Stanowisko badawcze zbudowane było ze stalowej konstrukcji ramowej wykonanej z dwuteowników szerokostopowych oraz z ceowników, dwóch siłowników hydraulicznych, urządzenia zasilającego siłowniki, wyposażonego w regulator siły nacisku oraz stanowisko pomiarów komputerowych. Belki umieszczono w pozycji odwróconej na dolnej poziomej części ramy i podparto przegubowo (rys. 3.12). Elementy obciążano dwiema siłami skupionymi. Siły przekazywane były za pomocą siłowników hydraulicznych (rys. 3.11). Wszystkie elementy badano w pozycji odwróconej w celu wygodnej rejestracji procesu zarysowania i zniszczenia elementów.

3.3. Test setup

The test stand was constructed of a steel frame structure made of "H" elements and of channel elements, two hydraulic servomotors, a power supply device equipped with a pressing power regulator, and a computer measuring stand. The beams were tested in a upside down position and simply supported (Fig. 3.11). The elements were loaded with two concentrated forces. The forces were transmitted with hydraulic servomotors (Fig. 12). All the elements were tested in a upside down position in purpose of comfortable recording of the cracking pattern and failure.



Rys. 3.11. Stanowisko badawcze (belka typu NILA)
Fig. 3.11. Test set-up (beam type NILA)



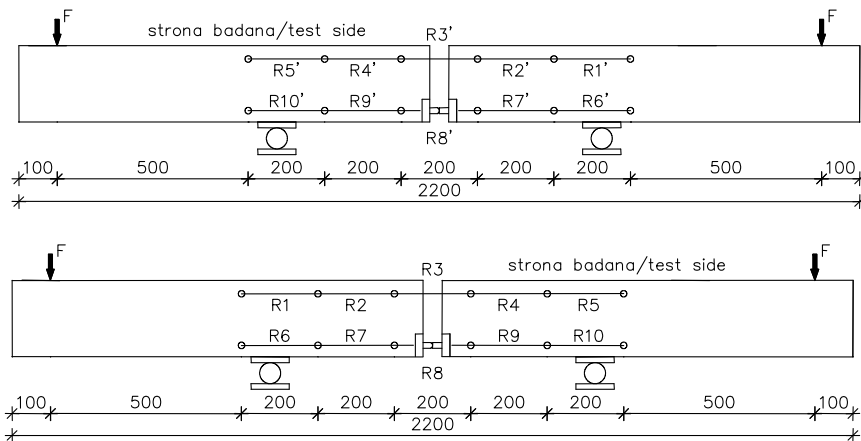
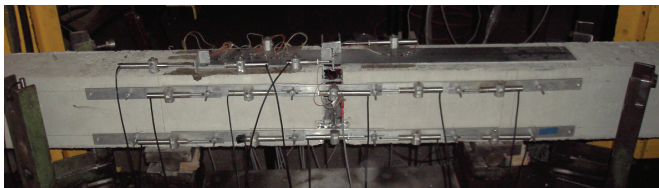
Rys. 3.12. Schemat statyczny belek a) krótkich, b) długich
 Fig. 3.12. Static scheme of beams a) short, b) long

3.4. Pomiar komputerowe

W trakcie badań mierzono odkształcenia betonu w strefie ściskanej i rozciąganej, za pomocą przetworników przemieszczeń liniowych typu PS×10 na bazach 200 mm, osadzonych na bokach belek, odpowiednio w podłużnej osi przegubu i w osi zbrojenia rozciąganego (rys. 3.13 i 3.14).

3.4. Computer measurements

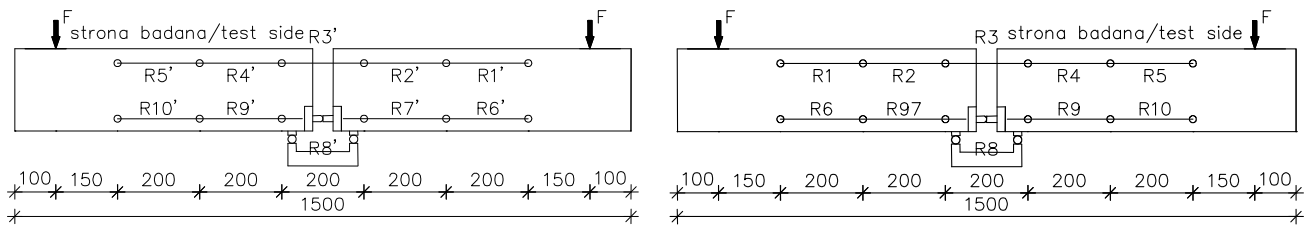
During the tests, concrete strain in the compression and tension zones were measured with linear displacement transducers PS×10 type, on the 200 mm bases fixed on the beam sides, in the longitudinal axis at the level of a hinge, and in the tensile reinforcement axis, respectively (Fig. 3.13 and 3.14).



Rys. 3.13. Położenie czujników do pomiaru odkształceń betonu na bocznych powierzchni długich belek
 Fig. 3.13. Location of longitudinal transducers for strain measurements of concrete on both lateral sides of long beams

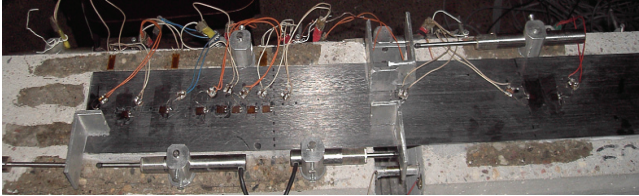
Odształcenia taśm CFRP mierzono przy użyciu różnego rodzaju tensometrów elektrooporowych. Przykład takich pomiarów pokazano na rysunku 3.15. Dodatkowo w części belek, mierzono odkształcenia betonu na rozciąganej powierzchni elementów w kierunku podłużnym (rys. 3.15 i 3.17) i prostopadłe do niego (rys. 3.16).

The strain of the CFRP strips was measured with different kinds of strain gauges of 5mm and 15mm bases. Examples of measurements are presented in Fig. 3.15. Additionally, in certain beams, strain of the tension concrete surface was measured with electric strain gauges of 50 mm bases, both perpendicularly (Fig. 3.16) as in parallel to the CFRP strips (Fig. 3.17).



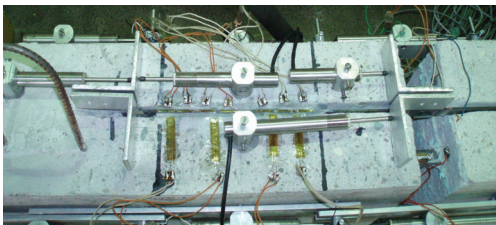
Rys. 3.14. Położenie czujników do pomiaru odkształceń betonu na bocznych powierzchni krótkich belek

Fig. 3.14. Location of longitudinal transducers for strain measurements in concrete on lateral sides of the short beams



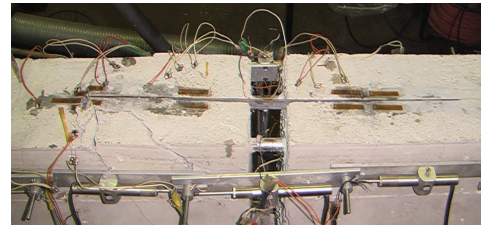
Rys. 3.15. Położenie tensometrów elektrooporowych na powierzchni taśm CFRP

Fig. 3.15. Location of strain gauges on CFRP strips



Rys. 3.16. Położenie tensometrów elektrooporowych na powierzchni taśm CFRP i betonu

Fig. 3.16. Location of strain gauges on CFRP strips and concrete

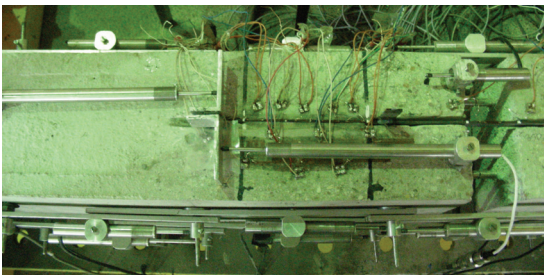


Rys. 3.17. Położenie tensometrów elektrooporowych na powierzchni betonu

Fig. 3.17. Location of strain gauges on concrete

Przemieszczenia taśm względem betonu (poślizg), na rozciąganej powierzchni belek mierzono przy użyciu przetworników przemieszczeń liniowych (rys. 3.18).

The slip of the strips in relation to adjacent concrete was measured with a LVDT gauges (Fig. 3.18).



Rys. 3.18. Pomiar przemieszczeń taśmy CFRP względem betonu przy użyciu czujników indukcyjnych

Fig. 3.18. CFRP strip – concrete slip measurement with LVDT gauges

4. WYNIKI BADAŃ MATERIAŁÓW

4.1. Stal zbrojeniowa

Charakterystykę wytrzymałościową σ - ε stali zbrojeniowej użytej do zbrojenia belek przedstawiono na rysunku 4.1, a w tabelicy 4.1 zamieszczono doświadczalne wartości granicy plastyczności zbrojenia stalowego dla wszystkich belek.

Tablica 4.1. Charakterystyka stali zbrojeniowej
Table 4.1. Characteristic of steel reinforcement

Ø8			
Nr / No	Belka / Beam	f_{sy} [MPa]	A_s [mm ²]
1	NISA/20	543	51,4
2	NISA/20/85		
3	NISA/20/130		
4	NISA/20/170		
8	NISA/30		
9	NISA/30/80		
18	NILA/40		
20	NILA/40/160		
25	NILA/50		
43	EISA/50/3m		
5	NISA/20/85p	516	49,6
6	NISA/20/120p		
7	NISA/20/160p		
10	NISA/30/120		
26	NILA/40/100		
19, 27	NILA/40/120		
28	NILA/50/2x80		
40	EISA/20/S		
41	EISA/20/3m		
42	EISA/50/S		
46	EILA/30/S		
47	EILA/30/3m		
21	NILA/40/120p	579	50,3
22	NILA/40/120s		
23	NILA/40/120pp		
24	NILA/40/120sp		

4.2. Beton

Na podstawie badań wytrzymałościowych betonowych próbek określono:

- wytrzymałość betonu na ściskanie, $f_{c.cube}$ (próbki sześciennie o boku 150mm),
 - wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu, $f_{ct.sp}$ (próbki sześciennie),
 - wytrzymałość betonu na ściskanie, f_c (próbki walcowe 150×300mm).
 - moduł sprężystości betonu, E_c (próbki walcowe).
- Wszystkie wyniki zamieszczono w tabelicy 4.2.

4. RESULTS OF THE MATERIAL TEST

4.1. Steel reinforcement

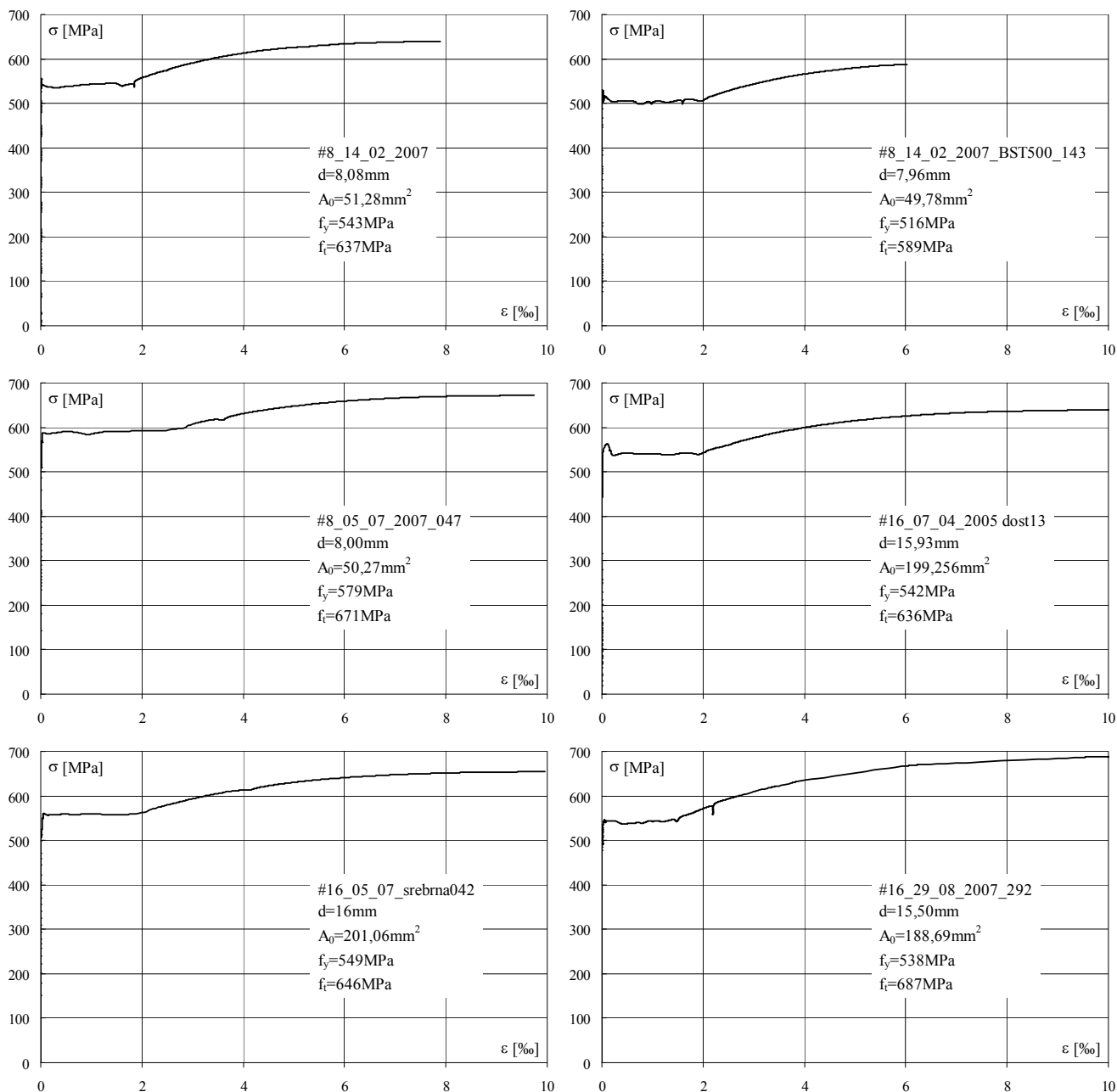
The strength – strain characteristics σ - ε of steel reinforcement is presented in Fig.4.1, and the experimental values of yield strength are shown in Table 4.1.

Ø16			
Nr / No	Belka / Beam	f_{sy} [MPa]	A_s [mm ²]
11	NISB/20	542	199,2
30	NILB/40/90		
31	NILB/40/120		
15	NIISB/40/2x80	549	201,1
16	NIISB/40/120		
17	NIISB/40/160		
29	NILB/40		
33	NILB/40/130pp		
36	NIILB/40/80		
37	NIILB/40/80p		
39	NIILB/40/120		
12	NISB/20/85	538	188,7
13	NISB/40/130		
14	NIISB/40/80		
32	NILB/40/120p		
34	NILB/40/120s		
35	NILB/40/120sp		
38	NIILB/40/2x80		
44	EISB/40/S		
45	EISB/40/3m		
48	EILB/20/Ss		
49	EIILB/30/S		
50	EIILB/30/3m		

4.2. Concrete

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

- concrete compressive strength, $f_{c.cube}$ (cubic specimens of 150mm),
 - concrete splitting tensile strength $f_{ct.sp}$ (cubic specimens),
 - concrete compressive strength, f_c (cylindrical specimens 150×300mm),
 - concrete elasticity modulus E_c (cylindrical specimens).
- All test results are presented in Table 4.2.



Rys. 4.1. Doświadczalne charakterystyki σ - ϵ stali zbrojeniowej
 Fig. 4.1. Experimental σ - ϵ characteristic of steel reinforcement

4.3. Taśmy Sika® CarboDur

Wytrzymałość na rozciąganie taśm określona eksperymentalnie we wszystkich przypadkach nie przekracza wartości zalecanej przez producenta materiałów kompozytowych (dla taśm typu S914 - $f_{fu,test} = 2911\text{MPa} < f_{fu,prod} = 3100\text{MPa}$, dla taśm typu XS1,524 - $f_{fu,test} = 1894\text{MPa} < f_{fu,prod} = 2500\text{MPa}$).

4.3. Sika® CarboDur strips

In all cases the tensile strength of the strips defined experimentally did not exceed the values recommended by the composite materials producer (for strips S914 type - $f_{fu,test} = 2911\text{MPa} < f_{fu,prod} = 3100\text{MPa}$, for strips XS1524 type - $f_{fu,test} = 1894\text{MPa} < f_{fu,prod} = 2500\text{MPa}$).

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

Nr /No	Belka / Beam	f _{c,cube} [MPa]		f _{ct,sp} [MPa]		f _c [MPa]		f _c /f _{c,cube}	E _c [GPa]	
		Wyniki / Results	Sredni / Mean	Wyniki / Results	Sredni / Mean	Wyniki / Results	Sredni / Mean		Wyniki / Results	Sredni / Mean
1	NISA/20	33, 29, 31, 32	31,2	-	-	22, 27	24,5	0,78	22,3; 26,0 23,6; 26,1 28,1; 26,8	25,5
2	NISA/20/85	-	-	1,6	1,6	21, 23, 23	22,3	-	18,0; 19,4; 16,4	17,9
3	NISA/20/130	-	-	1,4; 1,9; 1,6	1,6	24, 22, 23	23,0	-	19,6 ; 21,0; 20,6	20,4
4	NISA/20/170	-	-	-	-	23, 24	23,5	-	12,4; 15,0; 13,3	13,6
5	NISA/20/85p	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	NISA/20/120p	-	-	2,4; 1,6; 1,9	2,0	20, 20, 24	21,3	-	21,8; 23,6; 22,6 22,9; 25,4; 24,7 22,8; 24,7; 23,7	23,6
7	NISA/20/160p	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	NISA/30	26, 27, 28	26,0	-	-	-	-	-	-	-
9	NISA/30/80	-	-	-	-	-	-	-	25,8; 27,9; 27,6; 27,1 28,3; 28,0	27,4
10	NISA/30/120	34, 26, 32, 35	33,7	-	-	31, 34	32,5	0,96	-	-
11	NISB/20	25, 26, 25, 24,	-	2,1; 2,2; 2,2	-	-	-	-	24,8; 26,7; 25,5; 24,9; 27,0; 25,8 25,0; 27,2; 26,1; 25,6; 27,6; 26,5 24,2; 26,4; 25,4; 22,9; 25,2; 24,1	25,6
12	NISB/20/85	24, 26, 25, 25,	24,8	2,4; 2,8; 2,4 2,3; 2,1	2,1	-	-	-	-	-
13	NISB/20/130	23	-	-	-	-	-	-	-	-
14	NIISB/40/80	48, 48 47, 50 49,50	48,2	4,0; 3,7; 3,6; 3,8	3,8	41,5; 42,5; 42,5, 40,5; 40,5; 42,0	41,6	0,86	23,1; 27,6, 26,1; 29,5, 24,8; 25,4	26,1
15	NIISB/40/2x80	45, 50, 48, 48, 43, 44, 44, 46, 51, 50	46,2	4,25; 4,35 3,85; 5,05	4,4	43,4; 38,5; 40,0 39,5; 41,0; 40,5, 43,0	41,2	0,89	21,50; 23,90, 21,25	22,9
16	NIISB/40/120	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	NILA/40	44, 42, 39, 40, 41, 41	41,2	3,5; 2,9; 3,5; 2,3; 3,0; 2,9	3,2	39, 38, 36, 40	38,3	0,93	26,0; 28,4 27,2; 27,5, 29,9; 29,0; 25,8; 28,5, 27,7; 27,9, 30,2; 30,1	28,2
29	NILB/40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	NILA/40/120	43, 42, 46, 43, 41, 43, 43, 41	42,8	3,5; 3,4; 3,6 3,4; 3,4; 3,4	3,4	38, 38, 38, 40	38,5	0,90	25,7; 27,8, 27,0; 26,9, 29,2; 28,4, 28,3; 30,5, 30,4; 27,9, 30,7; 30,6	28,6
20	NILA/40/160	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	NILA/40/120p	47, 55	51,0	3,9	3,9	39,5; 40,0; 43,0; 45,0; 53,5	44,2	0,87	27,7; 27,9; 29,0; 30,4; 30,5	29,1
22	NILA/40/120s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	NILA/40/120pp	40,5; 43,5, 51,5	45,0	2,9; 2,7 2,8	2,8	38,5; 40,5, 41,0,	40	0,89	25,3; 27,9; 28,0	27,1
24	NILA/40/120sp	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	NILA/50	48, 53, 57, 55, 54	53,0	5,0; 4,0; 2,0 4,1 3,2; 3,6	3,8	47, 47, 50, 46	47,5	0,90	29,8; 31,7; 31,4; 31,9; 33,9 33,8; 29,6; 31,1; 31,1; 30,9 33,6; 33,4	31,8
28	NILA/50/2x80	51	-	-	-	-	-	-	-	-
26	NILA/40/100	52, 51, 50, 48, 49 47	49,5	3,0; 3,1; 3,3 3,7; 3,5; 3,3	3,3	42, 41, 43, 41	41,8	0,84	30,4; 32,4; 32,1; 30,7; 33,0; 32,8 32,1; 34,2; 34,1; 28,5; 30,7; 30,5	31,8
27	NILA/40/120	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	NILB/40/90	42, 39, 38, 39, 41, 40	39,8	3,3; 2,8; 3,0 3,4; 3,1; 3,2	3,1	38, 38, 37	37,7	0,95	27,8;30,1, 29,8;29,6, 31,3;31,2, 26,3;28,2, 27,3	29,1
31	NILB/40/120	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	NILB/40/120p	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	NILB/40/130pp	41,0; 47,0; 45,0	44,5	-	-	42,5 46,5; 42,0	43,7	0,98	-	-
34	NILB/40/120s	44,5; 45,5; 43,0	-	-	-	-	-	-	-	-
35	NILB/40/120sp	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	NIILB/40/80	49, 50, 45, 50	48,5	3,8; 4,2; 3,7 4,10	4,0	-	-	-	-	-
39	NIILB/40/120	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	NIILB/40/80p	42,5; 39,0; 45,0 45,0	42,9	3,2; 3,5; 3,4 3,1	3,3	-	-	-	-	-
38	NIILB/40/2x80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	EISA/20/S	27, 26, 30, 26	27,5	2,4; 2,2, 2,0	2,2	27, 25, 23	25,0	0,91	25,9; 28,3; 27,8; 23,3; 25,5; 24,5 22,5; 25,3; 24,2	25,3
41	EISA/20/3m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	EISA/50/S	59, 59, 57, 53, 58 60, 57, 58,	57,6	4,2; 4,6; 3,9 4,0; 3,7; 3,9 5,10	4,2	47, 50, 54, 53, 51, 51	51,0	0,88	32,5; 34,4, 34,1; 31,1, 32,7; 32,4, 31,5; 32,9, 32,7; 30,5; 3,22; 31,6, 31,0; 32,9, 32,2; 30,8; 32,8; 31,8	32,23
43	EISA/50/3m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	EISB/40/S	41,5; 40,5; 40,5	40,8	3,2; 3,4; 3,7	3,4	36,5; 38,5	37,0	0,91	23,0; 25,0; 23,5; 22,7	23,6
45	EISB/40/3m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	EILA/30/S	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	EILA/30/3m	41; 41,5; 39	40,5	2,8; 3,4; 2,9	3,0	27,5; 32,0; 28,5	29,2	0,72	35,6; 38,2; 29,1	34,3
48	EILB/30/Ss	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	EIILB/30/S	35,5; 45,0; 40,5 44,0	41,5	3,1; 3,6; 3,7 3,45	3,4	-	-	-	-	-
50	EIILB/30/3m	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Doświadczalne wartości modułu sprężystości sztywnych taśm przekraczały te, zalecane przez producenta (dla taśm typu S914 - $E_{f, \text{test}} = 171 \text{ GPa} > E_{f, \text{prod}} = 165 \text{ GPa}$, dla taśm XS1524 - $E_{f, \text{test}} = 169 \text{ GPa} > E_{f, \text{prod}} = 165 \text{ GPa}$). W trakcie badania kompozytów, przy zwiększaniu wartości obciążenia, pojedyncze włókna zaczynały pękać, co stopniowo doprowadziło do zerwania taśm w całym przekroju (rys. 4.2).

W wypadku wiotkich mat HEX 230C, bardzo trudno było wykonać próbę rozciągania (z uwagi na to, że poszczególne włókna maty zrywały się nierównomiernie), dlatego wartość modułu uzyskana w badaniu była niższa od zalecanej przez producenta, $E_{f, \text{test}} = 231,4 \text{ GPa} < E_{f, \text{prod}} = 238 \text{ GPa}$. Wyniki badań wytrzymałościowych taśm CFRP na rozciąganie zamieszczono w tablicy 4.3, a widok próbek po zniszczeniu na rysunkach 4.2 i 4.3.

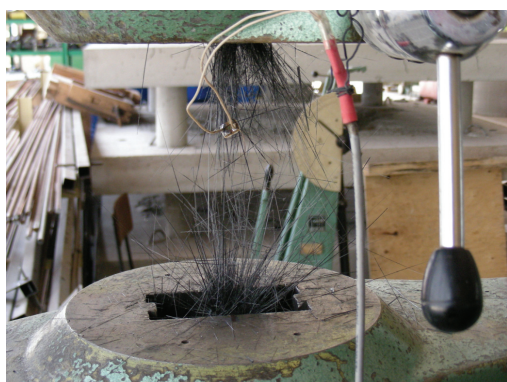
The experimental values of elasticity modulus of rigid strips exceeded those recommended by the producer (for strips S914 type - $E_{f, \text{test}} = 171 \text{ GPa} > E_{f, \text{prod}} = 165 \text{ GPa}$, for strips XS1524 type - $E_{f, \text{test}} = 169 \text{ GPa} > E_{f, \text{prod}} = 165 \text{ GPa}$). During the tests of composites, while increasing the load value, single fibres began to break which gradually led to break of the strips in the entire cross-section (Fig. 4.2).

In the case of flexible sheets HEX 230 C, the tension test was very difficult to carry out, due to the fact that the single fibres of the sheet began to break non-uniformly, and consequently the value of the modulus obtained in the test was lower than that one recommended by producer $E_{f, \text{test}} = 231,4 \text{ GPa} < E_{f, \text{prod}} = 238 \text{ GPa}$. The test results of the CFRP strips are presented in Table 4.3, and a view of the specimens after failure in Fig. 4.2 and 4.3.

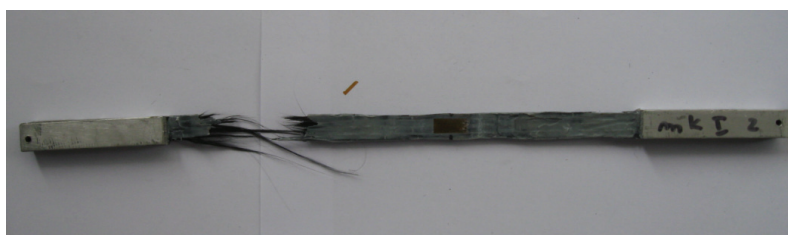
Tablica 4.3. Charakterystyka wytrzymałościowa taśm i mat CFRP

Table 4.3. Strength characteristic of CFRP strip and sheets

Typ Taśmy / CFRP type	Szerokość próbki / CFRP width, b_r [mm]	Grubość próbki / CFRP thickness, T_f [mm]	Pole przekroju / CFRP area A_r [mm ²]	Wytrzymałość na rozciąganie / Tensile strength, f_{tu} [MPa]	Moduł sprężystości / Modulus of elasticity, E_r [GPa]	Odkształcenie przy zerwaniu / ultimate tensile strain, ϵ_{fu} [‰]
S	15,31	1,42	21,74	2910,6	171,2	17,0
XS1.524	15,10	2,41	36,39	1893,7	169,4	11,2
Hex 230C	15,62	0,131	2,05	2713,6	231,4	11,7



Rys. 4.2. Próbkę taśm CFRP po zniszczeniu
Fig. 4.2. CFRP strips after failure



Rys. 4.3. Próbkę mat CFRP po zniszczeniu
Fig 4.3. CFRP sheets after failure



4.4. Zaprawy klejowe

Wyniki badań dwóch zapraw klejowych Sikadur[®]-330 i Sikadur[®]-30 na ściskanie (f_a) i rozciąganie przy zginaniu (f_{at}), zamieszczono w tablicy 4.4.

4.4. Adhesives

The results of compressive and splitting tensile (f_{at}) tests of two adhesives Sikadur[®]-330 and Sikadur[®]-30 are presented in Tab. 4.4.

Tablica 4.4. Charakterystyka wytrzymałościowa zaprawy klejowej

Table 4.4. Strength characteristic of adhesive

Typ zaprawy / Type of adhesive	Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, f_a [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie / Tensile strength, f_{at} [MPa]		Wiek kleju / Adhesive age
		doświadczalna / experimental	producenta / by producer	
Sikadur [®] -330	81,9	28,9	30	14
Sikadur [®] -30	87,7	52,1	50	

5. WYNIKI BADAŃ ELEMENTÓW

5.1. Forma przedstawienia wyników

W ramach projektu zbadano łącznie 50 belek żelbetonowych podzielonych na kilka serii odpowiadających przyjętym parametrom zmiennym, opisanym w rozdziale 2 (Program badań). Wyniki pomiarów odkształceń rejestrowane w trakcie badań belek przetworzono za pomocą programu komputerowego uzyskując:

- odkształcenia betonu strefy ściskanej (ϵ_{R6-10} , $\epsilon_{R6'-10'}$), w poziomie osi podłużnej przegubu i rozciąganej (ϵ_{R1-5} , $\epsilon_{R1'-5'}$), w poziomie zbrojenia zwykłego,
- odkształcenia taśmy CFRP (ϵ_f),
- odkształcenia betonu na powierzchni rozciąganej (ϵ_c),
- przemieszczenia zbrojenia kompozytowego względem rozciąganej powierzchni betonu.

Wszystkie wyniki pomiarów w postaci wykresów zamieszczono w Załączniku na płycie CD-ROM, dostępnym w Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej.

5.2. Mechanizmy zniszczenia belek

Prawie wszystkie elementy zniszczyły się na skutek odspojenia taśmy wraz z otaczającą otuliną betonową. Zasadniczo płaszczyzna tego odspojenia przebiegała w poziomie zbrojenia rozciąganego lub nieco ponad tym zbrojeniem (głównie w belkach wzmocnionych taśmami wklejanymi w betonową otulinę, typu NSM) oraz w cienkiej warstwie otuliny (w belkach wzmocnionych taśmami przyklejanymi na powierzchni betonu, typu EBR). Szczegółowe obserwacje rozwoju zarysowania i układu rys charakterystycznego dla zniszczenia, pozwoliły wyodrębnić cztery nieznacznie różniące się typy zniszczenia wzmocnionych elementów z ciągłym zbrojeniem stalowym i jeden znacząco różny mechanizm zniszczenia wzmocnionych elementów z przeciętym w środku rozpiętości zbrojeniem podłużnym.

Typ zniszczenia „A” – charakteryzował trójkątny układ rys niszczących na rozciąganej powierzchni belki (zbiegających się w miejscu końca wklejonego odcinka taśmy w postaci „kliny”, rys. 5.1).



Rys. 5.1. Typ zniszczenia „A” (pojedyncza wklejona taśma)
Fig. 5.1. Failure mode „A” (single NSM strip)

Typ zniszczenia „B” – charakteryzowało odspojenie taśmy wraz z otaczającą betonową otuliną. Rysa niszcząca przebiegała na całej szerokości belki, prostopadle do jej podłużnej osi (rys.5.2, 5.3 i 5.4).

5. TEST RESULTS OF THE BEAMS

5.1. Mode of presentation of the results

Within the framework of the project, all in all 50 reinforced concrete beams divided into several series, corresponding to the adopted variable parameters described in Chapter 2 (Program of the Research), were tested. The results of strain measurements, recorded during testing the beams, were transformed with a computer software, obtaining:

- concrete strain in compression area (ϵ_{R6-10} , $\epsilon_{R6'-10'}$), on the level of longitudinal and tension axis (ϵ_{R1-5} , $\epsilon_{R1'-5'}$), on the level of plain reinforcement,
- strains of strip CFRP (ϵ_f),
- concrete strains on the tensioned surface, (ϵ_c),
- displacement of composite reinforcement relative to the tension concrete surface.

All the test results are presented in the Appendix on a CD-ROM accessible in the Department of Concrete Structures of Łódź University of Technology.

5.2. Beams failure

Almost all beams failed due to debonding of the strip, together with the adjacent concrete cover. In principle, the debonding surface advanced along the level of the tensile reinforcement, or a slightly above the reinforcement level (mainly in beams strengthened with strips bonded into the concrete cover – NSM type), as well as in the thin concrete layer (in beams externally strengthened with strips bonded on concrete surface – EBR type). Detailed observations of the development of cracking, and of the crack pattern at failure, allowed to distinguish four slightly different types of failure of the strengthened elements with continuous steel reinforcement, and one significantly different mechanism of failure of the strengthened elements with the longitudinal reinforcement cut through in the middle of the span.

„A” type of failure – was characterized with a triangular composition of destructive cracks on the tension surface of the beam (converging in the end point of bond length in the form of a “wedge”, Fig. 5.1.



Rys. 5.2. Typ zniszczenia B (z zewnętrzną matą)
Fig. 5.2. Failure mode „B” (externally bonded sheet)

„B” type of failure – was characterized by a strip debonding together with the adjacent concrete cover. The critical crack proceeded across the entire width of the beam, perpendicularly to its longitudinal axis (Fig. 5.2, 5.3, 5.4).

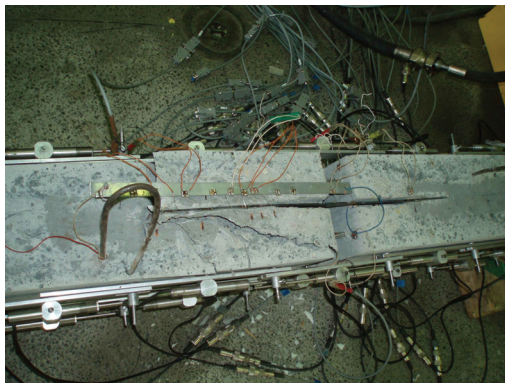
Ten typ odspojenia zaobserwowano wcześniej w belkach wzmocnionych taśmami kompozytowymi, które odspoiły się na końcu (ze względu na niewystarczającą długość zakotwienia taśm).



Rys. 5.3. Typ zniszczenia B (pojedyncza wklejona taśma)
Fig. 5.3. Failure mode „B” (single NSM strip)

Typ zniszczenia „C” – charakteryzowało odspojenie wklejonej taśmy w płaszczyźnie betonowej otuliny, wzdłuż rysy niszczącej, przebiegającej równoległe do wklejonego odcinka taśmy (rys.5.5).

Typ zniszczenia „D” – na ogół typowy dla elementów wzmocnionych taśmami i matami przyklejonymi na zewnętrznej powierzchni belek. Odspojenie kompozytu przebiegało w cienkiej warstwie betonowej otuliny (rys.5.6).



Rys. 5.5. Typ zniszczenia „C” (pojedyncza wklejona taśma)
Fig. 5.5. Failure mode „C” (single NSM strip)

Typ zniszczenia „E” – zarejestrowano we wszystkich nie wzmocnionych belkach. Do zniszczenia dochodziło zawsze na skutek uplastycznienia zbrojenia zwykłego i w końcu do jego zerwania.

Typ zniszczenia „F” – typowy dla belek wzmocnionych wklejonymi taśmami, z przeciętym zbrojeniem stalowym. Do zniszczenia dochodziło zawsze na skutek utraty przyczepności taśmy do podłoża, w warstwie stykowej taśmy i zaprawy klejowej. Poślizg obu końców wklejonej taśmy względem otaczającego betonu wyniósł 5 mm i widoczny jest na rysunku 5.7, jako przemieszczenie punktów 1 i 1' w miejsce 2 i 2', odpowiednio dla nie obciążonego i obciążonego końca wklejonej taśmy.

That type of debonding had been observed earlier in beams strengthened with CFRP strips which delaminated at ends (due to an insufficient length of the strips anchorage).



Rys. 5.4. Typ zniszczenia „B” (dwie wklejone taśmy)
Fig. 5.4. Failure mode „B” (double NSM strips)

“C” type of failure – was characterized with the debonding of NSM strip in the plane of concrete cover, along the destructive crack proceeding in parallel to the bonded length (Fig. 5.5).

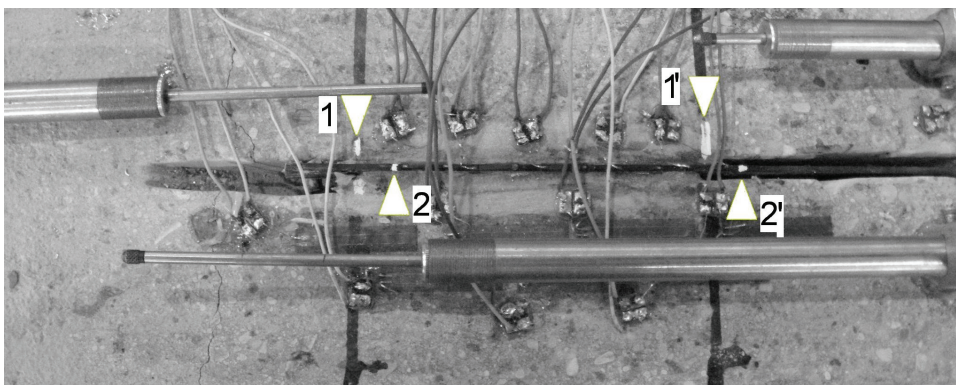
“D” type of failure – generally typical for elements strengthened with strips and sheets externally bonded. The CFRP debonding proceeded in the thin layer of concrete cover (Fig. 5.6).



Rys. 5.6. Typ zniszczenia „D” (zewnętrzna taśma)
Fig. 5.6. Failure mode „D” (externally bonded strip)

“E” type of failure – was recorded in all not strengthened beams. Failure occurred always as a result of steel yielding and finally its fracture.

“F” type of failure – typical for beams strengthened with bonded strips, with steel reinforcement cut through. The failure occurred as a result of loss of CFRP bond loss in the contact layer of strip and adhesive mortar. The slip slide of both bonded strips with respect to the neighboring concrete was 5mm, and is presented in Fig. 5.7, as a displacement of points 1 and 1' to the 2 and 2' respectively to the loaded and not loaded end of the bonded strip.



Rys. 5.7. Typ zniszczenia „F” (przecięte zbrojenie stalowe)
Fig. 5.7. Failure mode „F” (cut internal steel reinforcement)

5.3. Siły niszczące, odkształcenia i układ rys

- **Siły niszczące**

Wartości sił (F_{sy} , F_u) oraz odkształceń taśm (ϵ_{sy} , ϵ_{fu}), odpowiadających uplastycznieniu zbrojenia zwykłego i zniszczeniu elementów zamieszczono w tablicy 5.1.

Z wartości sił niszczących wynika, że belki krótkie, wzmocnione taśmami wklejanymi w betonową otulinę (NISA, NISB), wykazywały niższą nośność, niż odpowiadające im belki wzmocnione taśmami przyklejanymi na rozciąganej powierzchni betonu (EISA, EISB). Natomiast belki długie (NILA i NIILB), nie potwierdzają tej prawidłowości w porównaniu z belkami EILA i EIILB. Z porównania wartości sił niszczących niskich belek (typu I), o niskim stopniu zbrojenia zwykłego (NISA), wzmocnionych wklejonymi taśmami i nie wzmocnionych wynika, że stopień wzmocnienia nie przekraczał 17% w wypadku belek o wytrzymałości betonu na ściskanie 20MPa i 24% przy wytrzymałości 40MPa. Natomiast w belkach o tym samym zbrojeniu i tej samej wysokości, ale długich, zaobserwowano wzrost nośności od 20% do 42% (ten ostatni w belce wzmocnionej dwiema taśmami oraz w belce z wklejoną taśmą na długości 120 mm). W belkach niskich i długich o wysokim stopniu zbrojenia (NILB), uzyskano wzrost nośności nie przekraczający 26%. Przecięcie prętów stalowych spowodowało znaczące obniżenie nośności wzmocnionych belek i zdecydowanie różniący się mechanizm zniszczenia w porównaniu z odpowiadającymi im belkami z ciągłym zbrojeniem podłużnym (patrz p. 5.2). Analizę sił niszczących w aspekcie wybranych parametrów zmiennych zamieszczono w rozdziale 6.

- **Odkształcenia**

Z pomiarów odkształceń taśm, wykonanych przy użyciu tensometrów elektrooporowych, położonych na krawędzi taśm wklejonych w betonową otulinę wynika, że największe odkształcenia dla danego poziomu obciążenia zarejestrowano na odcinku nie wklejonym. Z reguły na długości wklejonego odcinka taśmy, odkształcenia osiągały wartość największą na początku tego odcinka, a następnie malały w stronę końca wklejonej taśmy (porównaj rys. 5.8 – 5.10).

5.3. Ultimate loads, strains and crack pattern

- **Destructive forces**

The values of load (F_{sy} , F_u) and strips strains corresponding to the yield of the tensile reinforcement and failure of the beam are presented in Tab. 5.1.

Test results indicated that short beams strengthened with strips bonded into the concrete cover (NISA, NISB), demonstrated lower ultimate load than the corresponding beams externally strengthened (EISA, EISB). While long beams (NILA and NIILB), did not confirm that regularity compared to the beams EILA and EIILB. Based on the comparison ultimate load low beams (type I), with low percentage of steel reinforcement (NISA), strengthened with NSM strips, to those not strengthened, the percentage of the strengthening did not exceed 17% in the case of beams made of concrete of 20 MPa compressive strength, and 24% in the case of 40 MPa compressive strength. While in the case of beams of the same reinforcement and the same depth but long, the increase of ultimate load from 20% to 42% was observed (the latter one in the beam strengthened with two strips, and in the beam with CFRP bond length of 120mm). In low and long beams, with the high reinforcement ratio (NILB), the increase in load bearing capacity exceeded 26%. Cutting through the steel bars, caused significant decrease in load bearing capacity of the strengthened beams, and sufficiently different mechanism of failure, compared to the corresponding beams with continuous longitudinal reinforcement (see 5.2). The analysis of the ultimate loads in the aspect of selected variable parameters is presented in chapter 6.

- **Strains**

Based on CFRP strain measurements carried out with the strain gauges situated on the edge of the NSM strips bonded into the concrete cover, indicated that the greatest strain values for the given load level were recorded along the non-bonded length. Strain along the bond length attained the greatest value at the beginning of the section, and then were decreasing towards the end of the bonded strip (compare Fig. 5.8 – 5.10).

Tablica 5.1. Zestawienie sił, odkształceń i typów zniszczenia

Table 5.1. Load, strain and failure modes specification

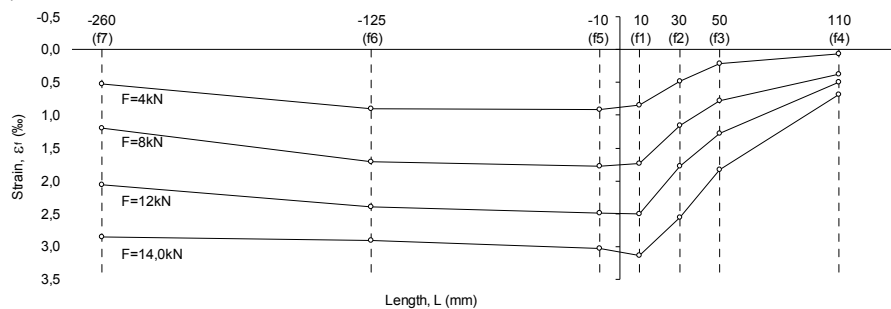
Nr / No	Seria / Series	Zbrojenie / Steel reinforcement	Belka / Beam	f_c [MPa]	L_b [mm]	F_{sy} [kN]	F_u [kN]	F_u / F_{uo}	ϵ_{sy} [‰]	ϵ_{fbmax} [‰]	Typ zniszczenia / Failure mode	
1	NIS	2#8	NISA/20	24,50	-		14,16	-	-	-	E	
2			NISA/20/85	22,30	85		13,27	0,94		2,08	A	
3			NISA/20/130	23,00	130	14,98	14,98	1,06	2,55	1,93	A	
4			NISA/20/170	23,50	170	15,02	16,61	1,17	2,69	2,34	A	
5			NISA/20/85p	21,30	85	12,99	14,62	1,03	2,87	2,97	B	
6			NISA/20/120p	21,30	120	13,40	15,21	1,07	2,87	2,60	B	
7			NISA/20/160p	21,30	160	15,20	15,63	1,10	2,86	2,58	E	
8			NISA/30	32,50	-	10,70	12,89	-	2,73	-	E	
9			NISA/30/80	32,50	80	15,60	15,96	1,24	2,84	2,64	B	
10			NISA/30/120	32,50	120	11,01	14,40	1,12	2,76	3,16	A	
11			2#16	NISB/20	19,84	-	32,20	49,91	-	2,68	-	E
12				NISB/20/85	19,84	85	32,21	38,92	0,78	2,68	2,93	A
13				NISB/20/130	19,84	130	34,76	35,79	0,72	2,85	2,64	B
14	NIIS	2#16	NIISB/40/80	41,58	80	110,00	130,00	-	2,45	3,37	E	
15			NIISB/40/2x80	41,19	80	129,99	129,99	-	2,34	1,98 (2,46)	B	
16			NIISB/40/120	41,19	120	116,18	137,20	-	2,65	3,51	B	
17			NIISB/40/160	41,19	160	119,47	138,65	-	2,86	4,16	A	
18	NIL	2#8	NILA/40	38,30	-	10,98	14,01	-	2,75	-	E	
19			NILA/40/120	38,50	120	15,07	17,64	1,26	2,72	3,17	B	
20			NILA/40/160	38,50	160	16,28	17,64	1,26	2,73	2,82	B	
21			NILA/40/120p	38,50	120	19,00	24,30	1,73	2,90	5,02	B	
22			NILA/40/120s	45,00	120	-	13,33	-	-	7,91	F	
23			NILA/40/120pp	39,58	120	17,50	19,90	1,42	2,92	2,35	B	
24			NILA/40/120sp	39,58	120	-	11,16	-	-	6,05	F	
25			NILA/50	47,50	-	11,24	13,60	-	2,44	-	E	
26			NILA/40/100	41,75	100	12,00	16,29	1,20	2,86	2,72	A	
27			NILA/40/120	41,75	120	16,02	18,71	1,36	2,64	3,34	B	
28			NILA/50/2x80	47,50	80	18,07	19,05	1,40	2,81	2,63 (2,40)	B	
29			2#16	NILB/40	38,30	-	35,00	46,61	-	4,24	-	E
30				NILB/40/90	37,67	90	40,00	54,33	1,17	2,81	3,91	B
31				NILB/40/120	37,67	120	40,04	53,60	1,15	2,75	3,45	B
32				NILB/40/120p	43,70	120	50,46	58,02	1,25	3,01	4,79	B
33				NILB/40/130pp	43,70	130	50,75	58,60	1,26	3,11	3,58	B
34				NILB/40/120s	43,70	120	-	9,70	-	-	6,06	F
35				NILB/40/120sp	43,70	120	-	10,58	-	-	6,43	F
36	NIIL	NIILB/40/80		38,80	80	-	60,68	-		2,38	awaria	
37		NIILB/40/80p	34,32	80	115,00	139,07	-	2,73	4,64	A		
38		NIILB/40/2x80	34,32	80	130,31	134,48	-	2,49	2,74 (3,25)	B		
39		NIILB/40/120	38,80	80	132,74	132,74	-	3,05	3,58	B		
40	EIS	2#8	EISA/20/S	25,00	120	16,22	16,22	1,15	1,84	1,57	D	
41			EISA/20/3m	25,00	200	18,3	18,3	1,29	3,18	3,74	D	
42			EISA/50/S	51,00	200	23,45	23,45	1,82	2,55	2,25	D	
43			EISA/50/3m	51,00	200	23,07	23,07	1,79	2,52	4,37	D	
44		2#16	EISB/40/S	37,00	200	11,48	11,48	0,23	0,73	1,13	D	
45	EISB/40/3m		37,00	200	44,08	44,08	0,88	2,89	3,09	D		
46	EIL	2#8	EILA/30/S	29,20	200	14,05	14,05	1,00	1,34	1,47	D	
47			EILA/30/3m	29,20	210	15,05	15,05	1,07	2,02	1,79	D	
48	2#16	EILB/30/Ss	29,20	211	-	11,00	-	-	1,42	D		
49	EIIL	2#16	EIILB/30/S	33,20	200	82,91	82,91	-	1,19	1,91	D	
50			EIILB/30/3m	33,20	200	137,81	137,81	-	2,93	4,26	B	

ϵ_{fbmax} – odkształcenie taśmy przy odspojeniu, (w nawiasach odkształcenia zarejestrowane na drugiej wklejonej taśmie) / debonding CFRP strain (in brackets strains of the second CFRP strip)
 F_u, F_{uo} – obciążenie niszczące dla belek wzmocnionych i nie wzmocnionych / ultimate load of strengthened and unstrengthened beams
 ϵ_{sy}, F_{sy} – odkształcenie zbrojenia podłużnego i obciążenie przy uplastycznieniu tego zbrojenia / yield strain of longitudinal reinforcement and yield load
p – element powtórzony / repeated element, s – element z przeciętym zbrojeniem podłużnym / beam with cut trough steel reinforcement

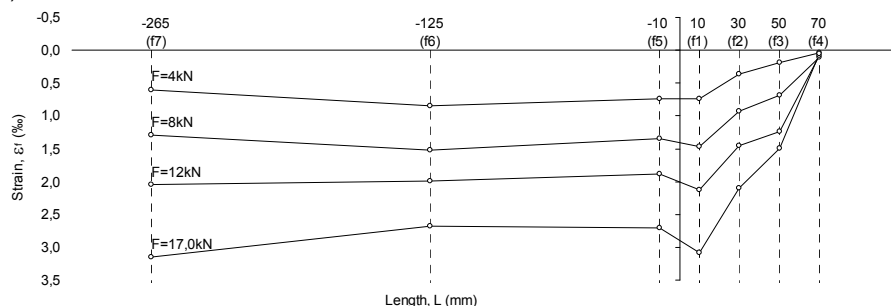
W elementach z wklejonymi taśmami zaobserwowano nieznacznie większe odkształcenia taśm po stronie, gdzie były one zakotwiczone na dłuższym odcinku, niż na długości badanego odcinka taśm. Jest to uzasadnione, gdyż taśma zakotwiona była na znacznie dłuższym odcinku niż ten badany, co skutecznie opóźniło jej odspojenie. Przykładowe wykresy odkształceń taśm CFRP na długości belek pokazano na rysunkach 5.8 - 5.10. Odkształcenia zewnętrznych taśm kompozytowych przyklejonych na powierzchni zewnętrznej belek potwierdzają podobne spostrzeżenie, jakie zostały zarejestrowane w belkach z taśmami wklejonymi w betonową otulinę (rys. 5.10a, 5.10b).

In the elements with NSM strips, a slightly greater strain of strips was observed on the side they had been anchored in longer length, than on the bond length. It was well-founded, since the strip was anchored on significantly longer section than the tested one, which considerably delayed its debonding. The exemplary strain diagrams of the CFRP strips along the beams length are presented in Fig. 5.8 – 5.10. The strain of external composite strips confirmed the similar observation recorded on beams with NSM strips (Fig. 5.10a, 5.10b).

a) NISA/30/120



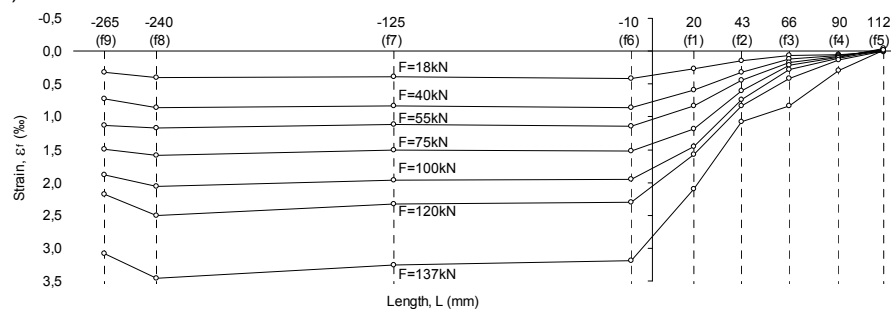
b) NILA/40/120



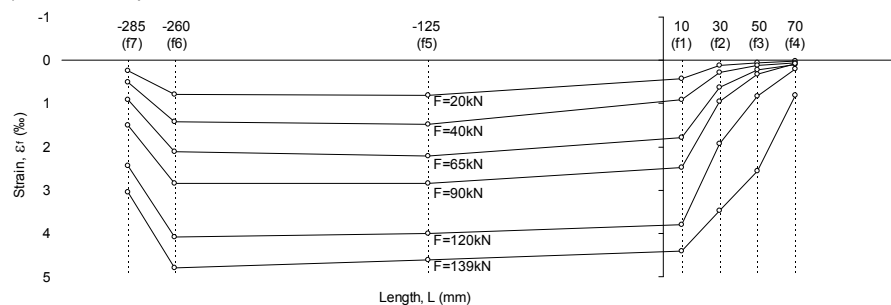
Rys. 5.8. Odkształcenia taśm CFRP wklejonych w belkach serii a) NIS i b) NIL

Fig. 5.8. Strain of CFRP NSM strips in beams Series a) NIS and b) NIL

a) NIISB/40/120



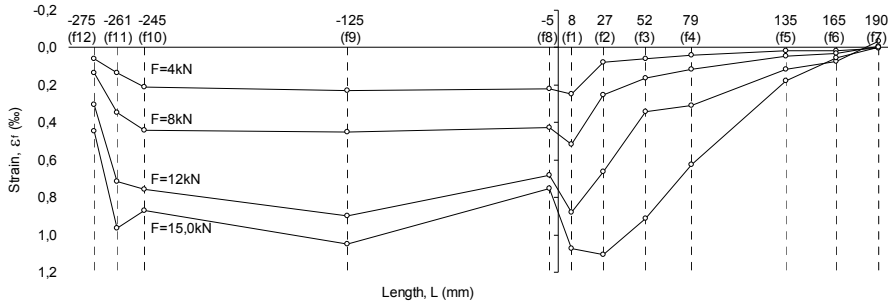
b) NIILB/40/80p



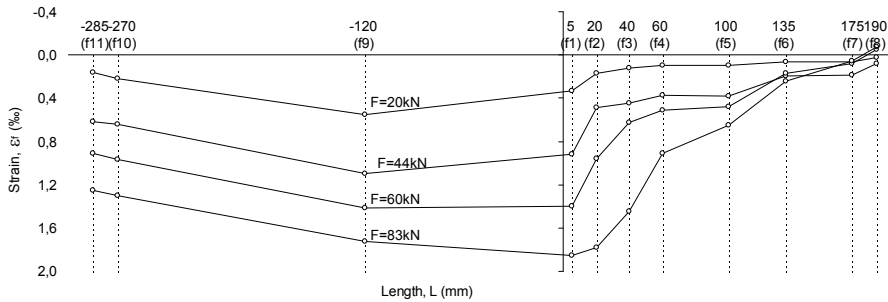
Rys. 5.9. Odkształcenia taśm CFRP wklejonych w belkach serii a) NIIS i b) NIIL

Fig. 5.9. Strain of CFRP NSM strips in beams Series a) NIIS and b) NIIL

a) EISB/40/S



b) EIILB/30/S

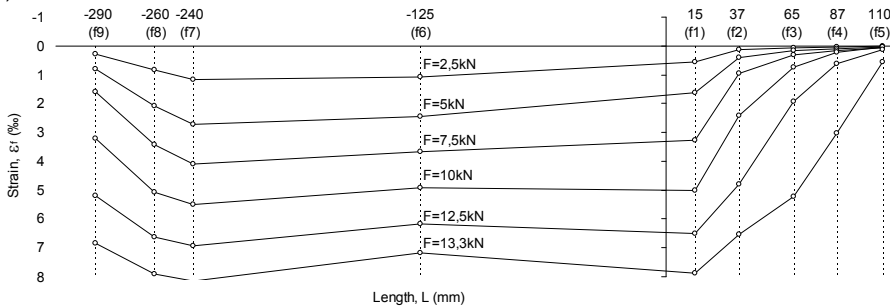


Rys. 5.10. Odształcenia taśm przyklejanych na powierzchni belek serii EISB i EIILB
 Fig. 5.10. Strain of CFRP externally bonded strips in beams Series a) EISB and b) EIILB

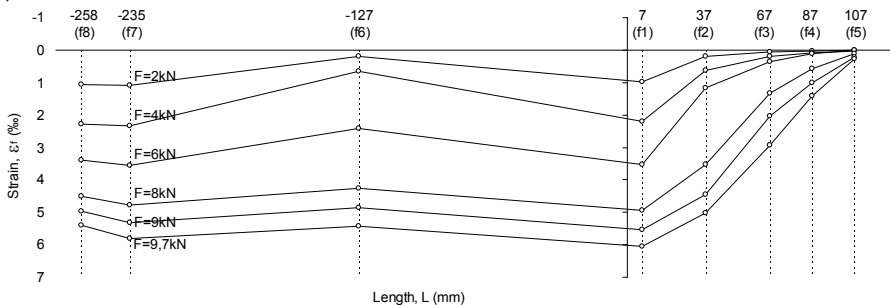
Przecięcie zbrojenia podłużnego w belkach NILA/40/120s, NILA/40/120sp, NILB/40/120s i NILB/40/120sp, spowodowało opóźnienie odspojenia taśm kompozytowych, a tym samym znaczące zwiększenie ich granicznych odkształceń przyczepności (średnio o 80%, patrz rys. 5.12). Przykładowy rozkład tych odkształceń na długości elementu, odpowiadający kolejnym poziomom obciążeń, pokazano na rysunku 5.11.

The cutting through the reinforcement in beams NILA/40/120s, NILA/40/120sp, NILB/40/120s and NILB/40/120sp caused the delay of CFRP strips debonding, thus significant increase in the CFRP bond strains (by average 80%, see Fig. 5.12). The exemplary CFRP strain on the beam's span length for several load level is shown in Fig. 5.11.

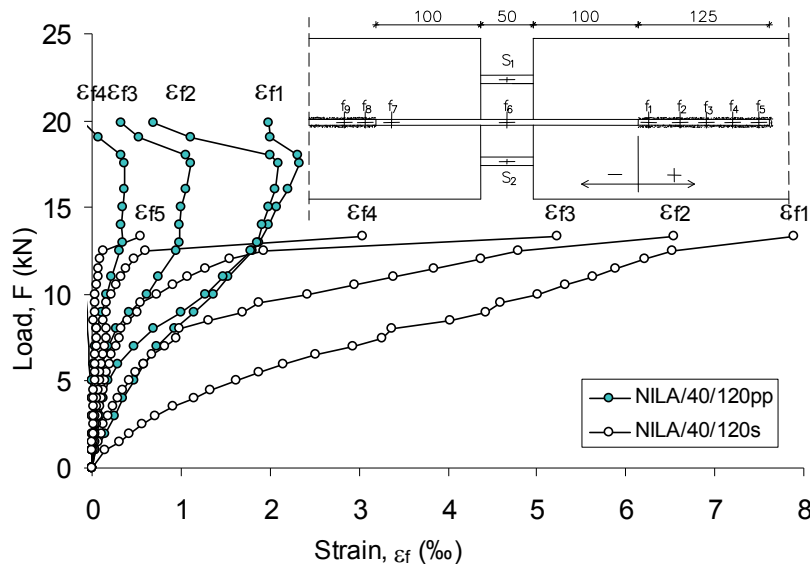
a) NILA/40/120s



b) NILB/40/120s



Rys. 5.11. Odształcenia wklejonych taśm CFRP w belkach z przeciętym zbrojeniem stalowym
 Fig. 5.11. Strain of CFRP NSM strip in beams with cut steel reinforcement



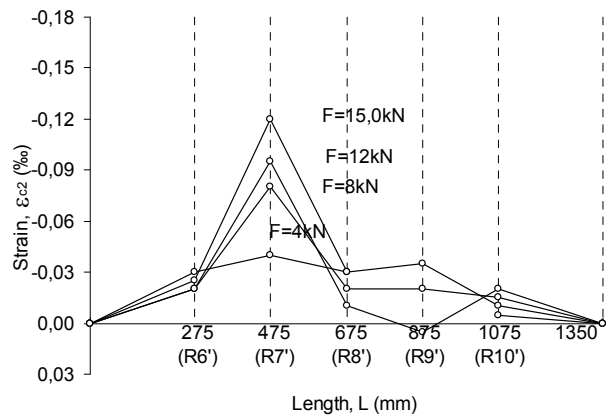
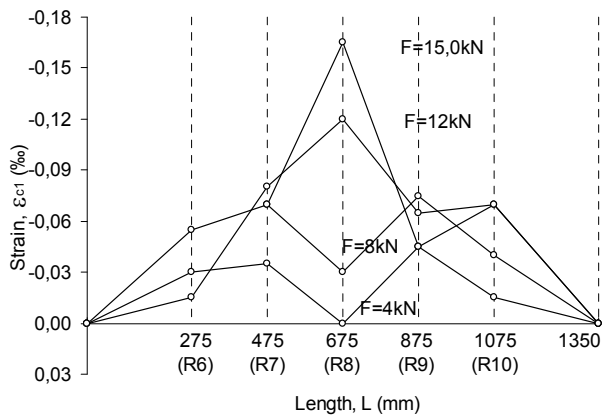
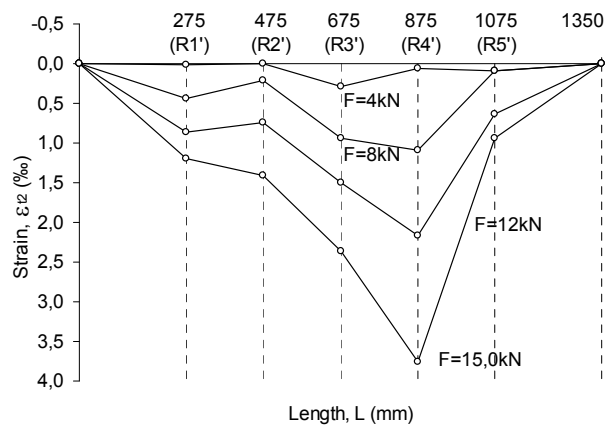
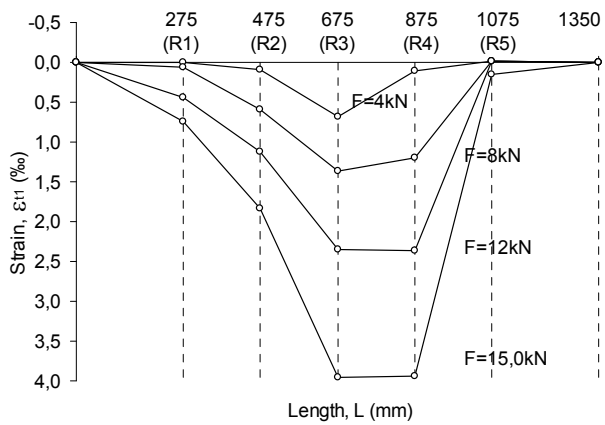
Rys. 5.12. Porównanie odkształceń wklejonych taśm CFRP w belce z ciągłym i przeciętym zbrojeniem stalowym
 Fig. 5.12. Comparison of CFRP NSM strain in beam with continuous and cut steel reinforcement

Analizę maksymalnych odkształceń taśm zarejestrowanych w badaniach, w aspekcie przyjętych parametrów zmiennych przeprowadzono w rozdziale 5.

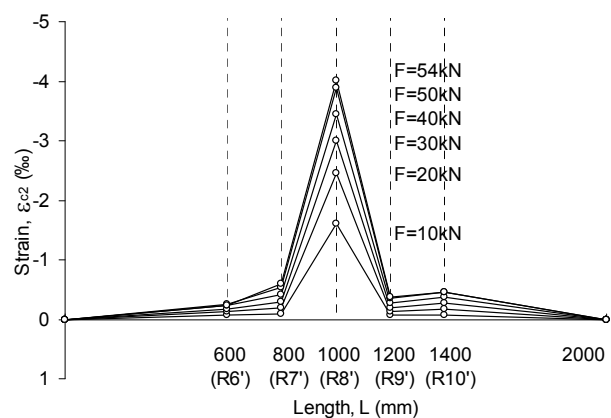
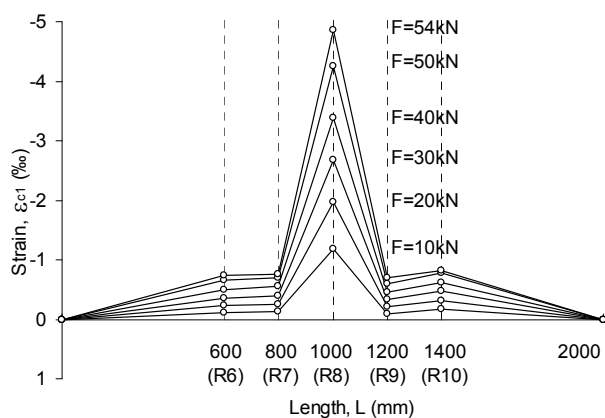
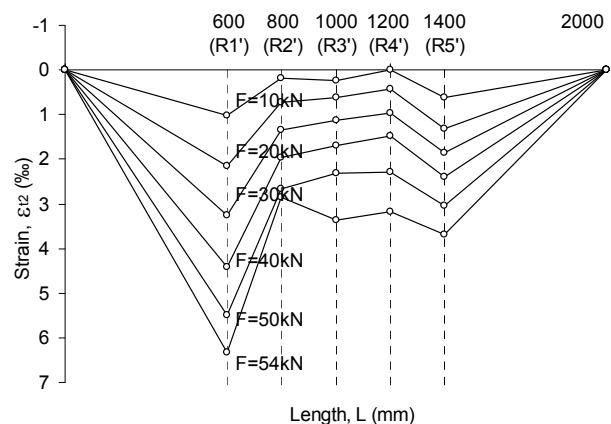
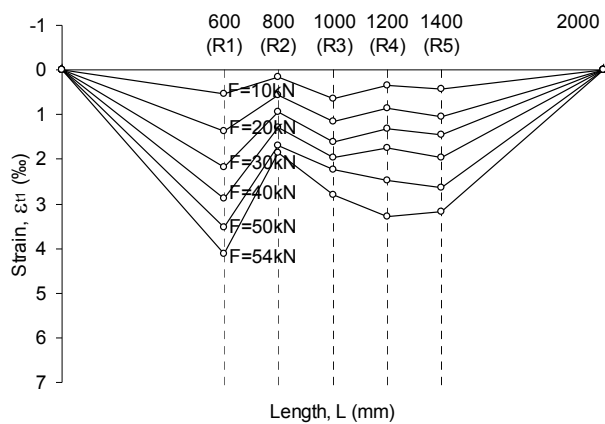
Jednocześnie z pomiarami odkształceń taśm, mierzono odkształcenia betonu w poziomie osi przegubu stalowego i osi zbrojenia rozciąganego, przy użyciu przetworników przemieszczeń liniowych. Odkształcenia mierzono na obu bocznych powierzchniach belek, aby sprawdzić, czy w trakcie badania belka nie ulegała skręceniu na skutek braku ciągłości betonu w środku rozpiętości elementu. Przykładowe wykresy odkształceń betonu w belkach z taśmami wklejonymi w betonową otulinę zamieszczono na rysunkach 5.13 – 5.15, a w belkach z taśmami przyklejonymi na powierzchni betonu na rysunkach 5.16 i 5.17. Różnice w wartościach odkształceń betonu po obu stronach belek, odpowiadających tym samym poziomom na wysokości przekroju, świadczą o tym, że odrębne betonowe fragmenty belek w trakcie obciążania odkształcały się nierównomiernie. Z uwagi jednak na fakt, że taśma wklejona była w środkowej części belki, można uznać, że w środku przekroju, różnice się niwelowały i ostatecznie nie miały wpływu na warunki przyczepności zbrojenia kompozytowego do betonu.

The analysis of maximal CFRP strain recorded during the tests, in the aspect of the adopted variable parameters, is carried out in chapter 5.

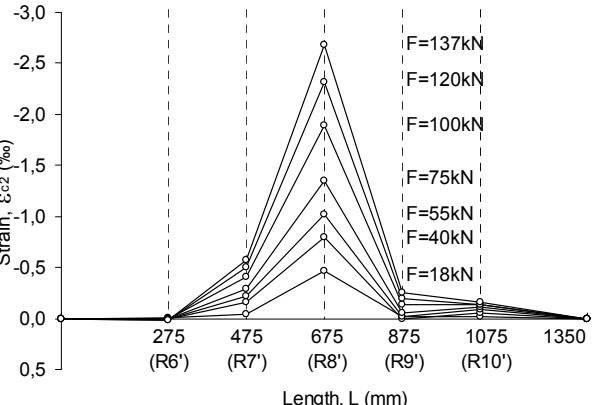
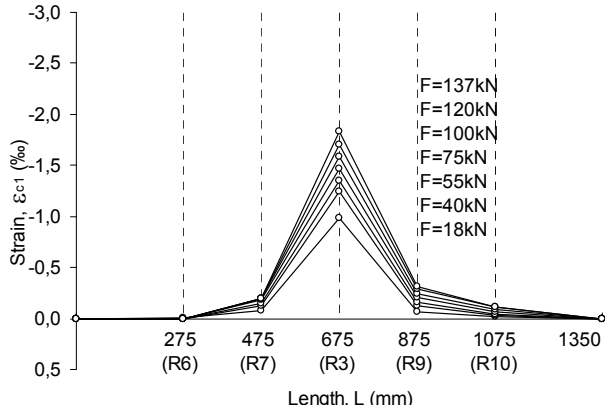
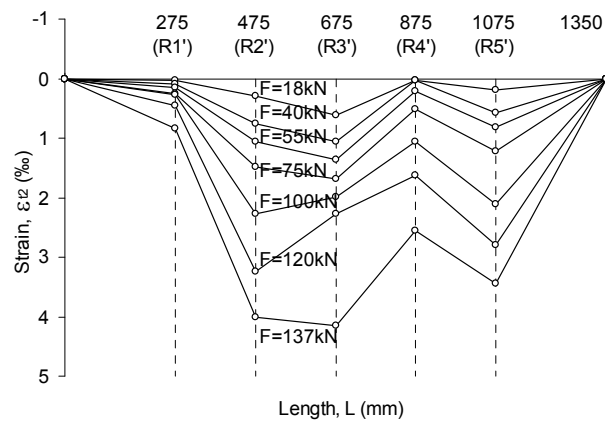
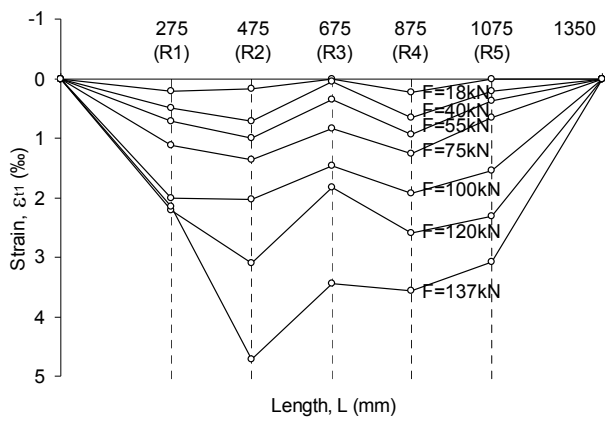
Simultaneously to measuring of strips strain, the concrete strain on the level of the steel joint axis, and the tensile reinforcement axis, were measured with the use of LVDT gauges. The displacements were measured along both side surfaces of beams in order to check if the beam did not undergo torsion resulted in the lack of concrete continuity in the middle of the beam's span. The exemplary diagrams of concrete strains in beams with NSM strips are presented in Fig. 5.13 – 5.15, and in beams with eternally bonded strips in Fig. 5.16 and 5.17. Differences in values of concrete strains on both sides of the beams, corresponding to the same levels on the depth of the cross section, proved that the separate fragments of beams were deformed non-uniformly during the test. However, considering the fact that the strip was bonded in the central fragment of the beam cross-section, it may be concluded that the differences leveled, and they had no influence on the CFRP bond conditions to concrete.



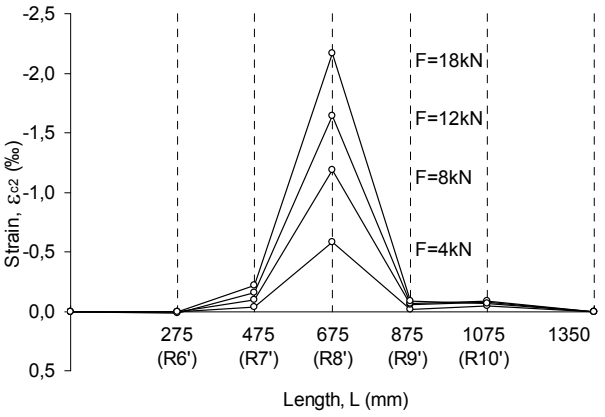
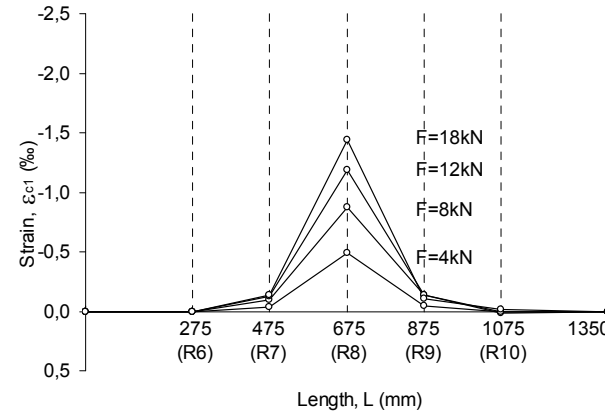
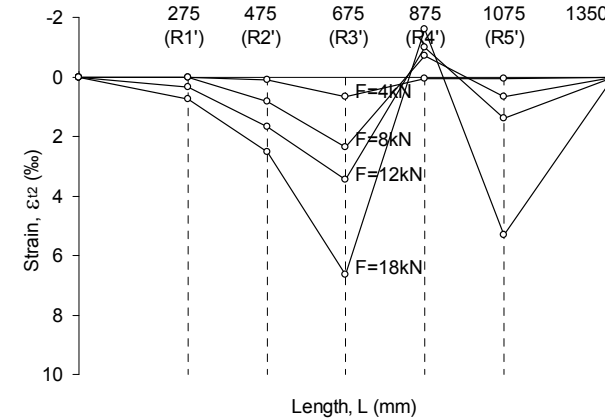
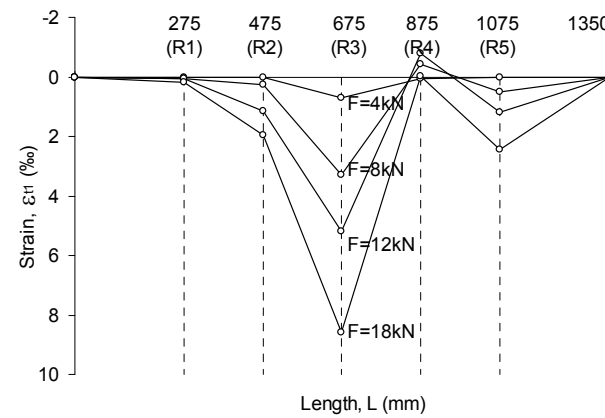
Rys. 5.13. Odkształcenia ściskanej (ϵ_{c1} , ϵ_{c2}) i rozciąganej (ϵ_{t1} , ϵ_{t2}) strefy betonu po obu stronach belki NISA/20/120p
 Fig. 5.13. Compressive (ϵ_{c1} , ϵ_{c2}) and tensile (ϵ_{t1} , ϵ_{t2}) strain in concrete on both sides of beam NISA/20/120p



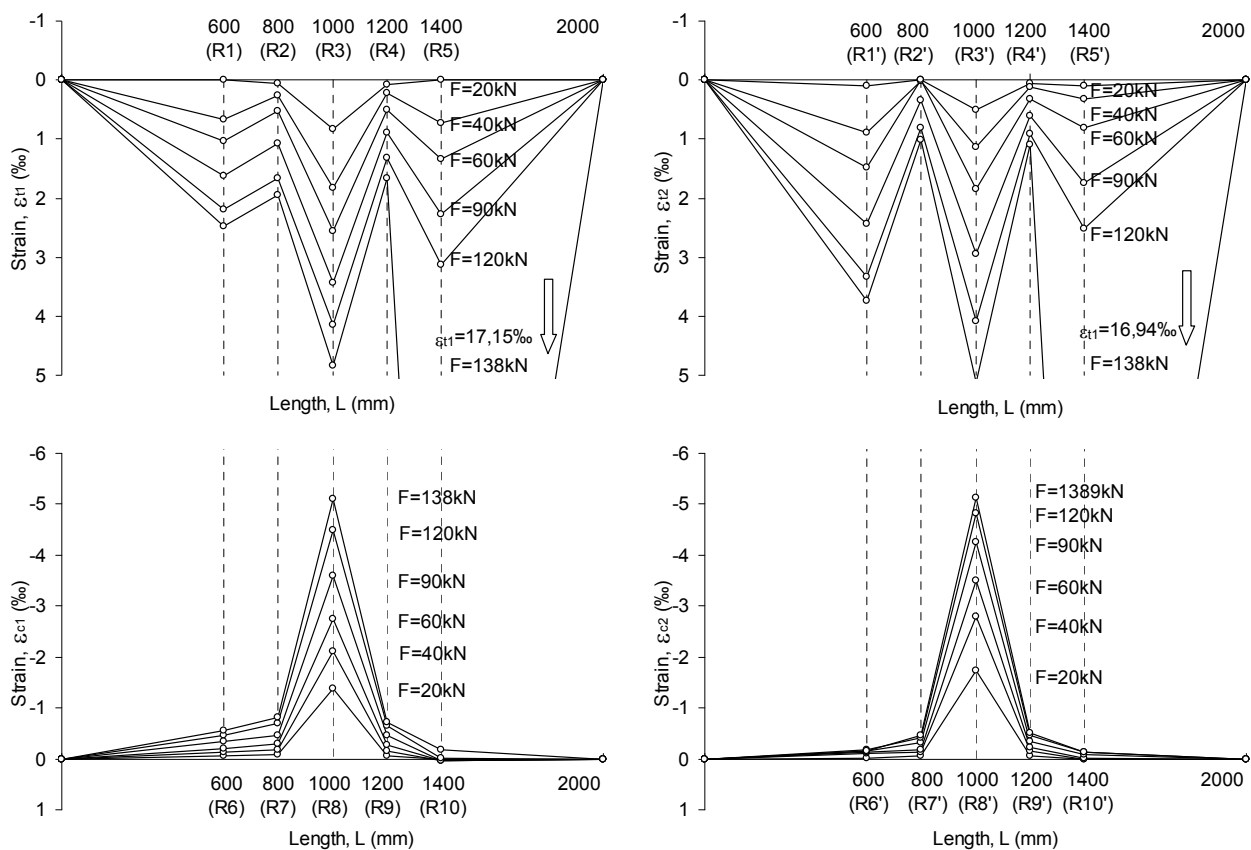
Rys. 5.14. Odkształcenia ściskanej (ϵ_{c1} , ϵ_{c2}) i rozciąganej (ϵ_{t1} , ϵ_{t2}) strefy betonu po obu stronach belki NILB/40/90
 Fig. 5.14. Compressive (ϵ_{c1} , ϵ_{c2}) and tensile (ϵ_{t1} , ϵ_{t2}) strain in concrete on both sides of beam NILB/40/90



Rys. 5.15. Odształcenia ściskanej (ϵ_{c1} , ϵ_{c2}) i rozciąganej (ϵ_{t1} , ϵ_{t2}) strefy betonu po obu stronach belki NIISB/40/120
 Fig. 5.15. Compressive (ϵ_{c1} , ϵ_{c2}) and tensile (ϵ_{t1} , ϵ_{t2}) strain in concrete on both sides of beam NIISB/40/120



Rys. 5.16. Odształcenia ściskanej (ϵ_{c1} , ϵ_{c2}) i rozciąganej (ϵ_{t1} , ϵ_{t2}) strefy betonu po obu stronach belki EISA/20/3m
 Fig. 5.16. Compressive (ϵ_{c1} , ϵ_{c2}) and tensile (ϵ_{t1} , ϵ_{t2}) strain in concrete on both sides of beam EISA/20/3m

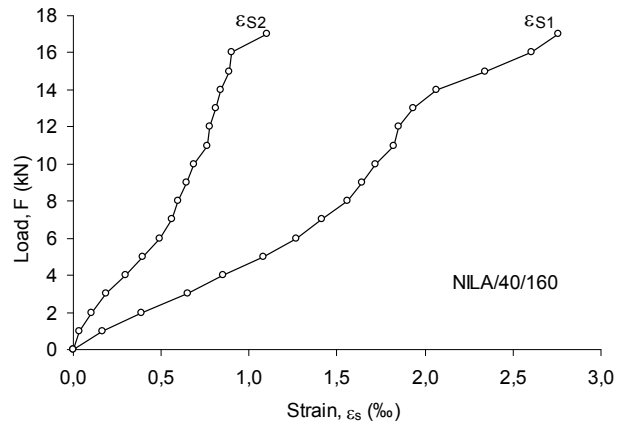
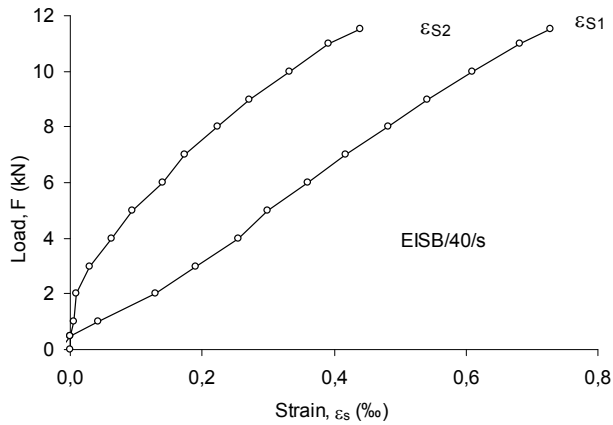
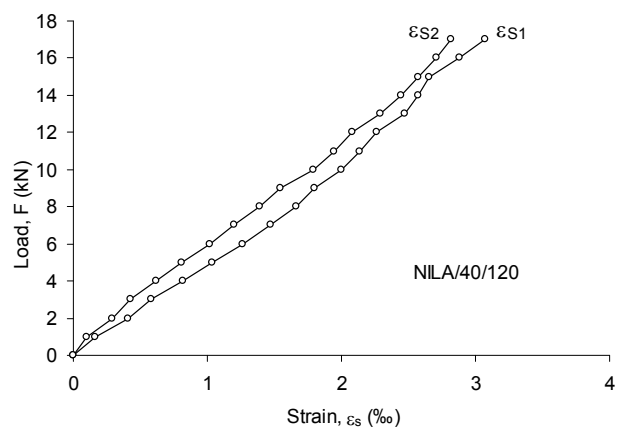
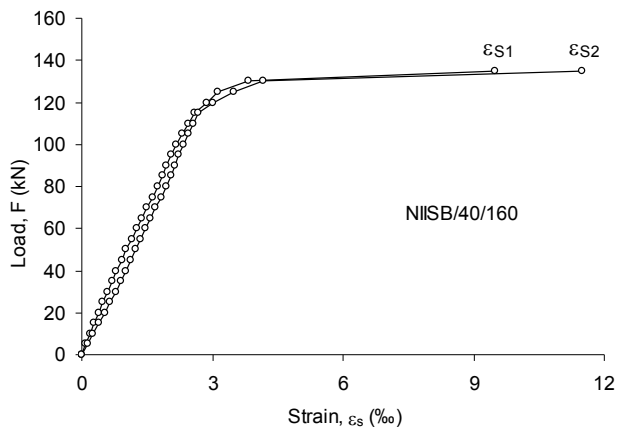


Rys. 5.17. Odształcenia ściskanej (ε_{c1} , ε_{c2}) i rozciąganej (ε_{t1} , ε_{t2}) strefy betonu po obu stronach belki EIILB/30/3m
 Fig. 5.17. Compressive (ε_{c1} , ε_{c2}) and tensile (ε_{t1} , ε_{t2}) strain in concrete on both sides of beam EIILB/30/3m

Dodatkowo w kilku belkach mierzono odkształcenia powierzchni betonu, zarówno w kierunku równoległym do taśm, jak i prostopadłym, za pomocą tensometrów elektrooporowych (wyniki pomiarów w Załączniku). Taki sposób pomiaru odkształceń taśm miał na celu sprawdzenie wartości odkształceń prostopadłych do wklejonej taśmy oraz odkształceń betonu sąsiadującego z taśmą, w kierunku do niej równoległym. Z pomiarów odkształceń betonu w kierunku prostopadłym do taśm, na powierzchni rozciąganej belek wzmocnionych zewnątrz (serie EILA, EIILB), można stwierdzić, że wartości tych odkształceń nie przekraczają wartości 0,08‰, a ich znak zależy od położenia względem rysy na powierzchni betonu. Natomiast w belce wzmocnionej taśmami wklejanymi (NIISB/40/160), maksymalne wartości tych odkształceń w chwili zniszczenia są znacznie większe (rzędu 2‰), co może świadczyć o przecięciu tensometru rysą. Większe wartości odkształceń betonu (rzędu 3‰), bezpośrednio sąsiadującego z wklejoną taśmą, zarejestrowano przy użyciu tensometrów równoległych do taśm (belki NIISB/40/120, NIISB/40/2×80, EISB/40/3m, EISB/40/S). W miejscach, gdzie rysa nie przecięła tensometru, wartość odkształcenia pozostała niezmienna, aż do zniszczenia.

Odształcenia zbrojenia stalowego mierzono przy użyciu tensometrów elektrooporowych na powierzchni obu prętów, w miejscu między blokami betonowymi. Z pomiarów odkształceń wynika, że w części belek pręty zbrojenia odkształcały się jednakowo, a w innych widać wyraźną różnicę w odkształceniach, świadcząca o nieosiowym obciążeniu belki, powodującym skrzywienie betonowych bloków tych belek (rys. 5.18).

Additionally, strain of concrete surface was measured in certain the beams both in the direction parallel to the strips, as a perpendicular one, with the strain gauges (see the appendix). Such a way of strain measuring was aimed at checking up the values of perpendicular strain of the bonded strip, and strain of the adjacent concrete to the strip in its parallel direction. On the basis of the concrete strain values parallel to the strips, on the tension surface of the beams, it may be stated that the value of these strain did not exceed 0,08‰, and its sign depends on their orientation relatively to cracks on concrete surface. While in the beam strengthened with bonded strips (NIISB/40/160), the maximal strain values at failure are significantly greater (close to 2‰), which may indicate crossing the gauge with a crack. Greater values of concrete strain (close to 3‰), directly adjacent to the bonded strip, were recorded with gauges parallel to the strips (beams NIISB/40/120, NIISB/40/2×80, EISB/40/3m, EISB/40/S). In places where the crack did not cross the gauge, the strain value remained unchanged, up until failure. Also the strains of steel reinforcement were measured in each beam using the resistance strain gauge, on the surface of both bars, in between the concrete blocks. As it results from the strain measurements, some of the steel bars deformed equally, while a distinct difference in strain was visible in the others, proving the non-axial loading of the beam, causing a partial torsion of concrete blocks of those beams (Fig. 5.18).



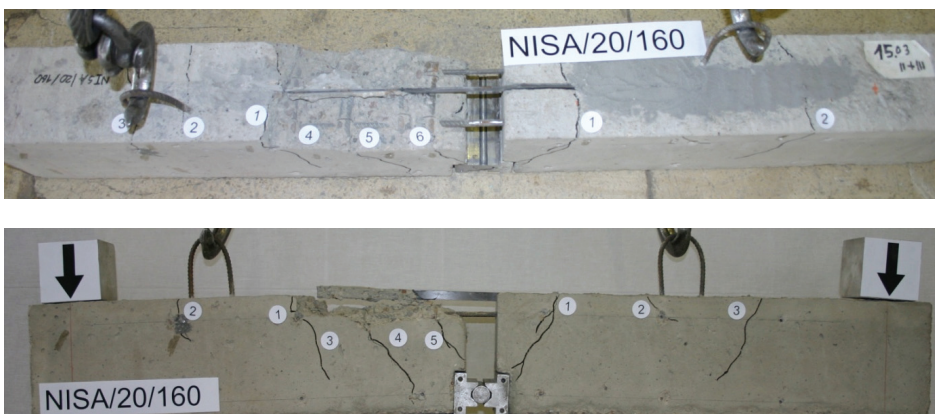
Rys. 5.18. Porównanie odkształceń (ϵ_{s1} , ϵ_{s2}) obu prętów zbrojenia stalowego
 Fig. 5.18. Comparison of strain (ϵ_{s1} , ϵ_{s2}) of both longitudinal steel bars

• **Układ rys**

Proces zarysowania przebiegał podobnie w belkach z ciągłym zbrojeniem stalowym. Z reguły pierwsza rysa pojawiała się na końcu wklejonego odcinka taśmy, następną rysę rejestrowano po stronie, gdzie taśma wklejona była na dłuższym odcinku (nie badanym), na początku wklejonej taśmy (patrz rys. 5.19a). Kolejne pionowe rysy powstały poza badanym wklejonym odcinkiem taśmy, zwykle w połowie odcinka ścinania, symetrycznie po obu stronach osi belki (rys. 5.19b). W miarę zwiększenia obciążenia rejestrowano rozwój zarysowania belek jedynie na długości badanego odcinka taśmy.

• **Crack pattern**

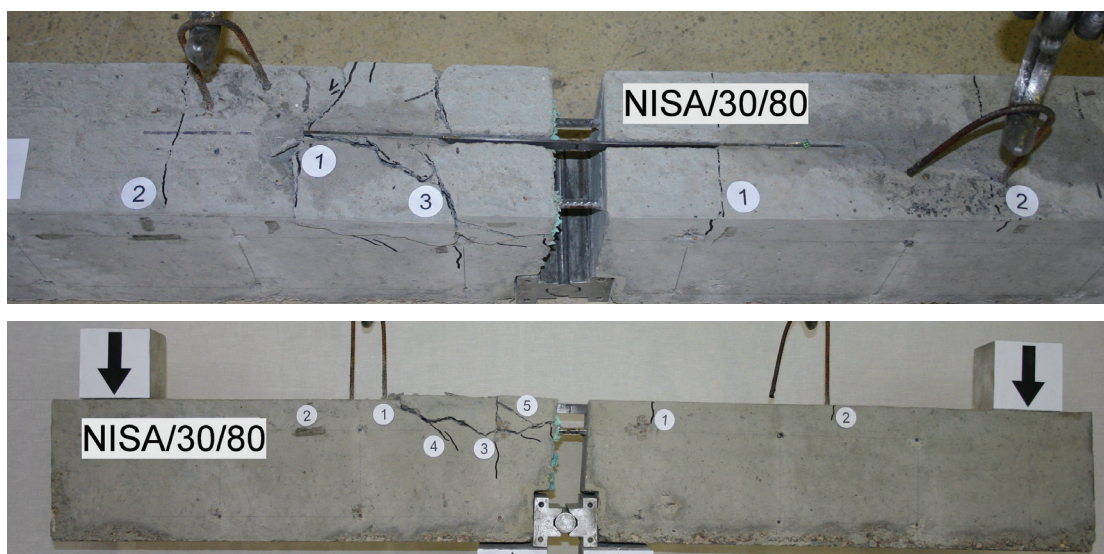
The process of cracking proceeded similarly in beams with continuous steel reinforcement. The first crack occurred as a rule on the end of the CFRP bond length, the next one was recorded on the side where the strip had been bonded on the longer section (not tested), at the beginning of the bonded strip (see Fig. 15.19a). Next cracks occurred out of the tested bonded strip section, usually in the half of the shear region, symmetrically on both sides of the beam (Fig. 5.19b). As the load increased, development of beam cracking occurred and was observed merely along the CFRP bond length.



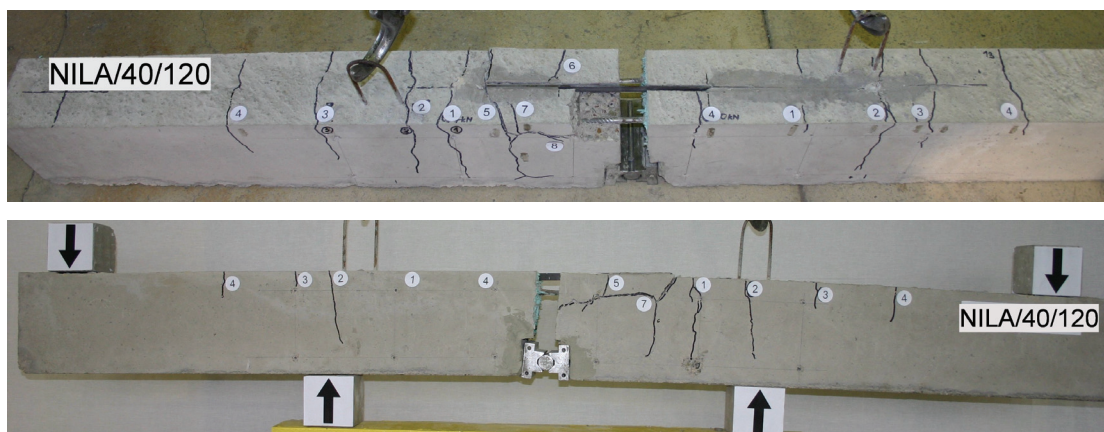
Rys. 5.19. Układ rys w belce NISA/20/160 a) widok z góry, b) widok z boku
 Fig. 5.19. Cracking pattern in beam NISA/20/160 a) top view, b) side view

W belkach długich, zarysowanie badanego wklejonego odcinka było znacznie silniejsze, niż w belkach krótkich, ale płaszczyzna odspojenia wklejonego kompozytu w obu wypadkach przebiegała jednakowo – w poziomie zbrojenia rozciągającego (porównaj rys. 5.20 i 5.21)

In the long beams, cracking of the tested bonded length was much intensive than in the short beams, but the debonding surface of the composite proceeded identically in both cases – on the level of the tensile reinforcement (see Fig. 5.20 and 5.21).



Rys. 5.20. Układ rys w belce NISA/30/80 a) widok z góry, b) widok z boku
Fig. 5.20. Cracking pattern in beam NISA/30/80 a) top view, b) side view



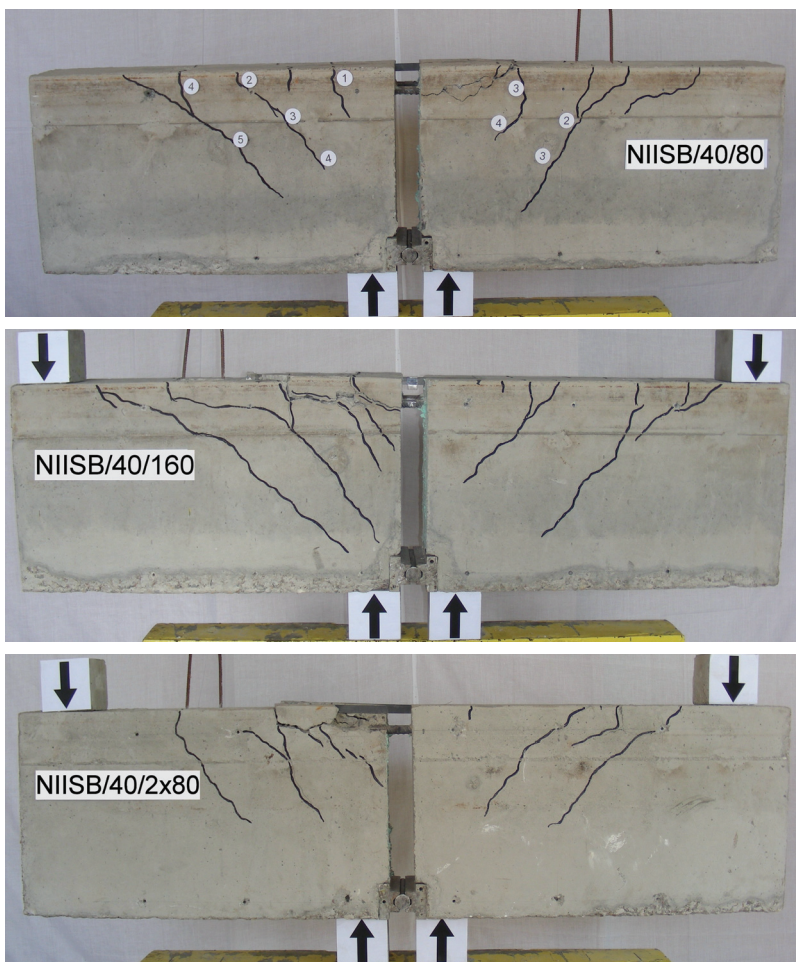
Rys. 5.21. Układ rys w długiej belce NILA/40/120 a) widok z góry, b) widok z boku
Fig. 5.21. Cracking pattern in long beam NISA/40/120 a) top view, b) side view

Z porównania sposobu zarysowania belek niskich i wysokich wynika, że belki wysokie były bardziej wyężone, o czym świadczy pojawienie się rys ukośnych w ich przypodporowej strefie (rys. 5.22). Taki sposób zarysowania był typowy zarówno dla belek wysokich i długich, jak i wysokich i krótkich (rys. 5.23).

Comparing the mode of low and tall beams cracking indicated that the tall beams were more exhausted which was proved by appearance of inclined cracks in the shear region closed to the support (Fig. 5.22). Such a mode of cracking was typical for both tall and long, as well as tall and short beams (Fig. 5.23).



Rys. 5.22. Układ rys w długiej i wysokiej belce NIILB/40/120 (widok z boku)
Fig. 5.22. Cracking pattern in long and high beam NIILB/40/120 (side view)



Rys. 5.23. Układ rys w belkach serii NIISB (widoki z boku)
 Fig. 5.23. Cracking pattern in beam Series NIISB (side view)

W belkach wysokich i krótkich (o wysokim stopniu zbrojenia stalowego, 2#16), z dwiema wklejonymi taśmami, zaobserwowano charakterystyczne poziome rysy na wysokości zbrojenia zwykłego, poprzedzające odspojenie wklejonych taśm wraz z otaczającą betonową otuliną (rys. 5.23). Natomiast w belkach niskich (o niskim stopniu zbrojenia stalowego, 2#8), wzmocnionych również dwiema taśmami, zarysowanie badanego odcinka wklejonej taśmy było bardziej intensywne niż w belkach wysokich, powstawały tam rysy o większej rozwarości, zwłaszcza w końcowej fazie badania, tuż przed zniszczeniem (rys. 5.24).

In the tall and short beams with two NSM strips (of the high steel reinforcement ratio 2#16), characteristic horizontal cracks on the level of the longitudinal reinforcement, preceding debonding of the strips together with the adjacent concrete cover, were observed (Fig. 5.23). While in low beams (of the low steel reinforcement ratio, 2#8), also strengthened with two NSM strips, cracking of the tested length of the strip was more intensive than in tall beams; greater crack opening appeared, especially during the final phase of the test, just before failure (Fig. 5.24).



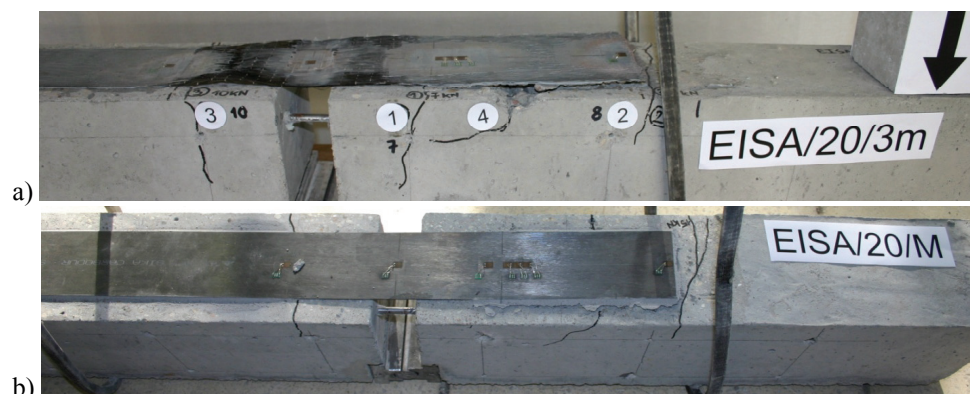
Rys. 5.24. Układ rys w belce NILA/50/2x80 (widoki z góry)
 Fig. 5.24. Cracking pattern in beam NILA/50/2x80 (top view)

Belki wzmocnione zewnętrznymi taśmami lub matami charakteryzowało znacznie słabsze zarysowanie. Pierwsza rysa powstała zawsze na początku badanego odcinka, druga na jego końcu, a następne na długości przyklejonego odcinka taśmy (rys. 5.25).

Beams externally strengthened with strips or sheets demonstrated much less intensive cracking. The first crack occurred on the beginning of the bond length, the second one on its end, and next along the bond length (Fig. 5.25).

Belki wysokie z taśmami przyklejonymi na powierzchni rozciąganej, były silniej zarysowane, co świadczy o ich większym wyężeniu w porównaniu z belkami niskimi (rys. 5.26). Podobne obserwacje zarejestrowano w belkach wysokich z taśmami wklejonymi. Płaszczyzna odspojenia taśm w belkach wysokich przebiegała w poziomie zbrojenia rozciąganego (rys. 5.26), podczas gdy w belkach niskich, taśmy odspoiły się w cienkiej warstwie betonowej otuliny (rys. 5.25).

Tall beams with strips externally bonded along the tension surface cracked more intensively which proves their greater tension, comparing to the low beams (Fig. 5.26). Similar observations were recorded in the case of tall beams with bonded strips. The debonding surface of the strips in tall beams proceeded on the level of the tensile reinforcement (Fig. 5.26), while in the low beams, the strips debonded within the thin layer of the concrete cover (Fig. 5.25).



Rys. 5.25. Układ rys w belkach wzmocnionych zewnętrznymi a) matami, b) taśmą
 Fig. 5.25. Cracking pattern in beams externally strengthened with a) sheets, b) strip



Rys. 5.26. Układ rys w belce EIILB/30/3m, wzmocnionej zewnętrznymi matami
 Fig. 5.26. Cracking pattern in beam EIILB/30/3m externally strengthened with sheets

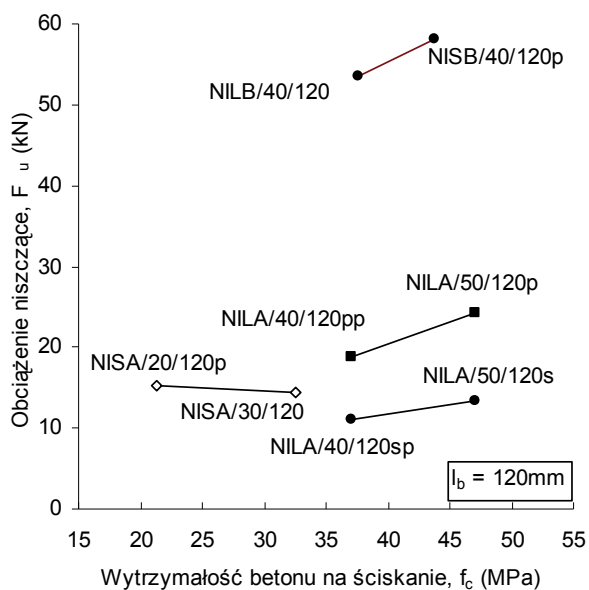
odspojeniu, ($\varepsilon_{fbmax} = 1,24\%$ – w belce EISA/20/S oraz $\varepsilon_{fbmax} = 1,97\%$ – w belce EISA/40/S).

Podobne spostrzeżenia dotyczące wzrostu wartości granicznych odkształceń kompozytu na skutek wzrostu wytrzymałości betonu, potwierdziły wyniki badań belek wzmocnionych matami ($\varepsilon_{fmax} = 3,39\%$ – w belce EISA/20/3m oraz $\varepsilon_{fmax} = 4,32\%$ – w belce EISA/50/3m, rys. 6.2).

W elementach o niskim stopniu zbrojenia zwykłego (EISA), odkształcenia graniczne mat były znacząco większe w porównaniu z odkształceniami granicznymi sztywnych taśm typu S (patrz tablica 4.4, rys. 6.2). Tę samą prawidłowość potwierdzają belki o wysokim stopniu zbrojenia zwykłego (EIILB i EISB), wzmocnione wiotkimi matami i sztywnymi taśmami.

6.2. Wpływ wytrzymałości betonu i rodzaju zbrojenia kompozytowego na nośność belek

Wyniki badań wykazały niewielki wpływ wytrzymałości betonu na nośność badanych belek, zarówno w wypadku belek wzmocnionych wklejanymi taśmami (rys. 6.3), jak i belek wzmocnionych zewnętrznymi matami i taśmami (rys. 6.4).



Rys. 6.3. Wpływ wytrzymałości betonu na nośność belek wzmocnionych metodą NSM

Fig. 6.3. Influence of concrete strength on ultimate load of NSM FRP strengthened beams

W elementach o niskim stopniu zbrojenia zwykłego, wzmocnionych zewnątrz (EISA), typ zastosowanego materiału (maty, taśmy) w zasadzie nie miał wpływu na nośność belek po wzmocnieniu (rys. 6.4) (przeciwnie do obserwacji dotyczących maksymalnych odkształceń tych materiałów przy odspojeniu). Nośność elementów o wysokim stopniu zbrojenia zwykłego (EISB, EIILB), wzmocnionych trzema warstwami mat, była znacząco większa niż nośność belek wzmocnionych sztywnymi taśmami typu S (rys. 6.4).

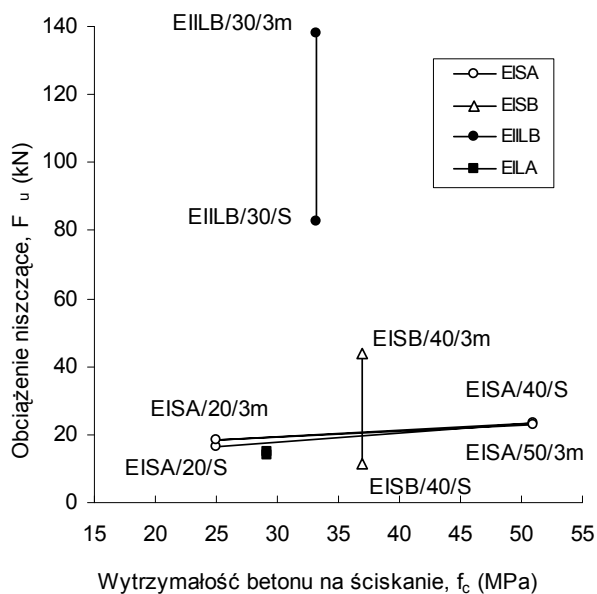
debonding, ($\varepsilon_{fmax} = 1,24\%$ – in EISA/20/S beam and $\varepsilon_{fmax} = 1,97\%$ – in EISA/40/S beam).

Similar observations regarding the increase of ultimate values of composite strain caused by the increase of concrete strength were confirmed by the results of the tests of beams strengthened with sheets ($\varepsilon_{fmax} = 3,39\%$ – in EISA/20/3m beam and $\varepsilon_{fmax} = 4,32\%$ – in EISA/50/3m beam, Fig. 6.2).

In elements with low level steel reinforcement (EISA), the ultimate strain of sheets were significantly greater compared to those of rigid strips S type (see Tab. 4.4, Fig. 6.2). The same regularity was confirmed in the case of beams with high percentage reinforcement (EIILB and EISB) strengthened with flexible sheets and rigid strips.

6.2. Influence of concrete strength and mode of composite reinforcement on load bearing capacity of beams

The result of the tests demonstrated minor influence of concrete strength on load bearing capacity of the tested beams, both in the case of beams strengthened with NSM strips (Fig. 6.3), as in the case of beams externally strengthened (Fig. 6.4).



Rys. 6.4. Wpływ wytrzymałości betonu na nośność belek wzmocnionych metodą EBR

Fig. 6.4. Influence of concrete strength on ultimate load of EBR strengthened beams

In the elements with the low steel reinforcement ratio externally strengthened (EISA), the mode of applied material (sheets, strips) had in principle no influence on beams load bearing capacity after strengthening (Fig. 6.3) (contrary to observations regarding the maximal strain of those materials at debonding). Ultimate load capacity of the elements with high level steel reinforcement EISB, EIILB), strengthened with three layers of sheets, was considerably greater than ultimate load of beams strengthened with S type rigid strips (Fig. 6.4).

6.3. Wpływ wytrzymałości betonu na naprężenie przyczepności kompozytu do betonu

Z uwagi na mechanizm zniszczenia (przy zginaniu) belek z ciągłym zbrojeniem podłużnym, wzmocnionych taśmami wklejanymi w betonową otulinę, nie było możliwe jednoznaczne określenie powierzchni przyczepności kompozytu do betonu. Z tego powodu nie określono wartości granicznych naprężeń przyczepności kompozytu do betonu, τ_{\max} . Dopiero w belkach z przeciętym podłużnym zbrojeniem stalowym, w których doszło do typowej utraty przyczepności taśm do betonu wzdłuż całego odcinka przyczepności, wartości granicznych naprężeń przyczepności określono według:

$$\tau_{\max} = F_{f_{\max}} / L_b(2w_f + t_f)$$

gdzie: $F_{f_{\max}}$ – graniczna siła rozciągająca w taśmie CFRP w chwili jej odspojenia od powierzchni betonu, (kN)

L_b – długość przyczepności, (mm)

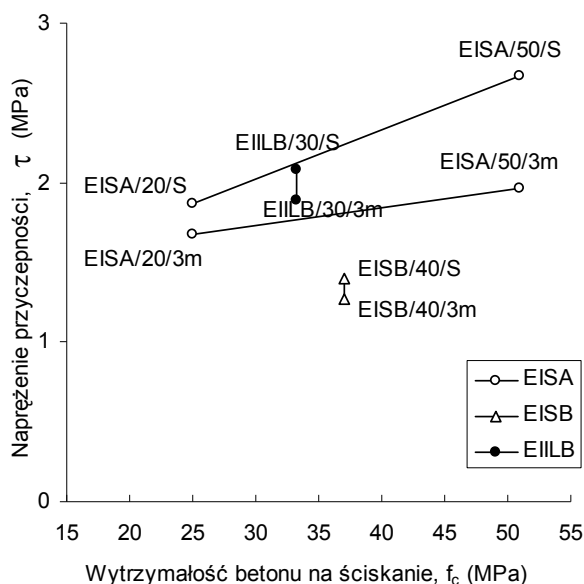
w_f, t_f – szerokość i grubość wklejonej taśmy, (mm)

Wyniki badań potwierdzają korzystny wpływ wytrzymałości betonu na naprężenia przyczepności w belkach z przeciętym zbrojeniem stalowym (rys. 6.6).

Natomiast w belkach wzmocnionych na rozciąganej powierzchni, naprężenia przyczepności określono według:

$$\tau_{\max} = F_{f_{\max}} / L_b w_f$$

Wyniki badań potwierdzają wpływ wytrzymałości betonu na naprężenia przyczepności taśm i mat. Wraz ze wzrostem tej wytrzymałości naprężenia przyczepności kompozytu do betonu rosną (rys. 6.5).



Rys. 6.5. Wpływ wytrzymałości betonu na naprężenia przyczepności belek wzmocnionych taśmami i matami

Fig. 6.5 Influence of concrete strength on CFRP bond strength in beams strengthened with externally bonded strips and sheets

6.3. Influence of concrete strength on the bond stress of composite to concrete

Owing to the failure mechanism (at bending) of beams with longitudinal steel reinforcement, strengthened with NSM strips, an unambiguous definition of the bond surface between NSM and concrete was impossible. Consequently, the ultimate values of the bond stress τ_{\max} were not defined. Only just in the beams with longitudinal steel reinforcement cut through, where a typical bond loss of strips to concrete occurred, the ultimate bond stress values were defined according to:

$$\tau_{\max} = F_{f_{\max}} / L_b(2w_f + t_f)$$

where: $F_{f_{\max}}$ – the ultimate tensile force in composite at the moment of its debonding from concrete surface (kN),

L_b – length of the anchorage (the length of the tested section of the strip),

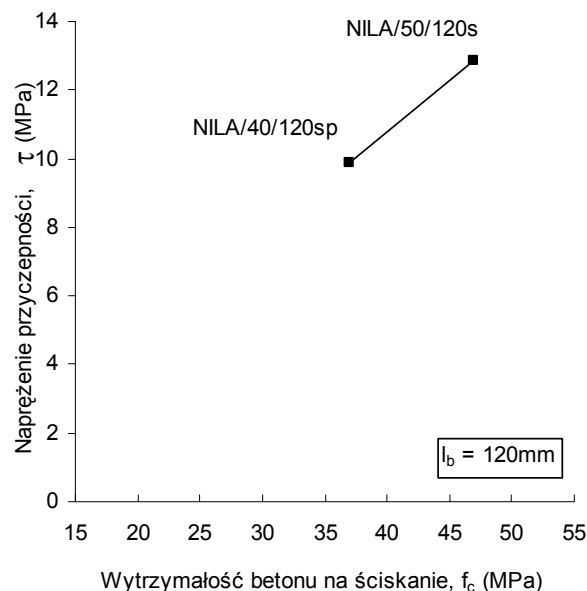
w_f, t_f – width and thickness of the bonded strip (mm).

The results of the research confirmed positive influence of concrete strength on the bonding stress in beams with steel reinforcement cut through (Fig. 6.6).

While in beams strengthened along the tensioned surface, the bond stress was defined according to:

$$\tau_{\max} = F_{f_{\max}} / L_b w_f$$

The results of the research confirmed the influence of the concrete strength on the bond stress of strips and sheets. Along with the strength increase, the bond stress of composite to concrete increased (Fig. 6.5).



Rys. 6.6. Wpływ wytrzymałości betonu na naprężenia przyczepności belek z przeciętym zbrojeniem stalowym, wzmocnionych wklejonymi taśmami

Fig. 6.6 Influence of concrete strength on CFRP bond strength in NSM strengthened beams with cut steel reinforcement

Belki wzmocnione na rozciąganej powierzchni taśmami typu S (o grubości 1,4 mm) wykazały większe naprężenia przyczepności w porównaniu z belkami wzmocnionymi wiotkimi matami (o łącznej grubości 3 warstw mat 0,39 mm). Potwierdza to opinię o negatywnym wpływie sztywności kompozytu na naprężenia przyczepności (tzn. wraz ze wzrostem tej sztywności maleją naprężenia, rys. 6.5).

6.4. Wpływ długości zakotwienia taśm na nośność elementów i odkształcenia graniczne materiałów kompozytowych

Wyniki badań elementów wzmocnionych taśmami wklejonymi w betonową otulinę, potwierdzają mało znaczący wpływ długości badanego odcinka zakotwienia na nośność wzmocnionego elementu. Powodem zniszczenia wszystkich wzmocnionych belek z ciągłym zbrojeniem stalowym, było odspojenie kompozytu wraz z otaczającą betonową otuliną, typowe dla elementów wzmacnianych na zginanie materiałami kompozytowymi, które uległy przedwczesnemu odspojeniu na ich końcach („end plate debonding”).

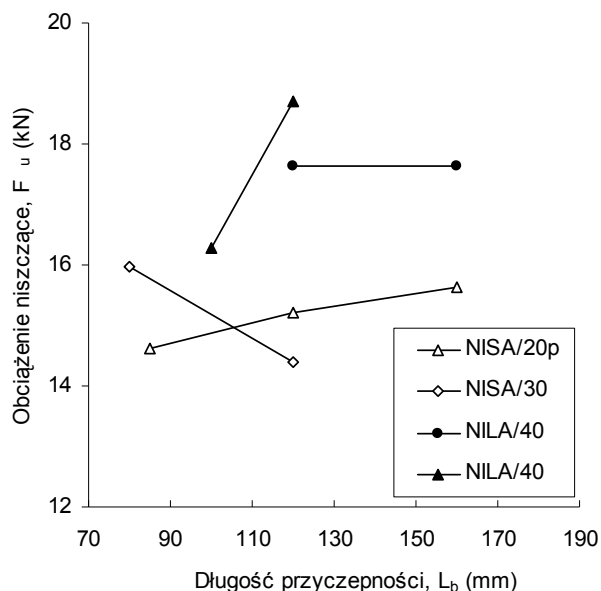
Różnice nośności badanych elementów są wynikiem różnego ich stopnia zbrojenia zwykłego, a nie długości zakotwienia zbrojenia kompozytowego. W elementach niskich o niskim i wysokim stopniu zbrojenia (NISA, NILA, NISB i NILB), nośność belek długich i krótkich jest prawie jednakowa (rys. 6.7). Podobne obserwacje potwierdzają belki wysokie, zarówno krótkie, jak i długie, o wysokim i niskim stopniu zbrojenia zwykłego (rys. 6.8).

Beams strengthened with S type 1.4 mm thick strips, demonstrated greater bond stresses compared to the beams strengthened with flexible sheets (of total thickness of 3 layers 0.39 mm). This confirmed the opinion on the negative influence of the composite stiffness on the bond stress (i.e. the stress decreases with the stiffness increase – Fig. 6.5).

6.4. Influence of the bond length of the strips on load bearing capacity of the elements and the ultimate strain of composite materials

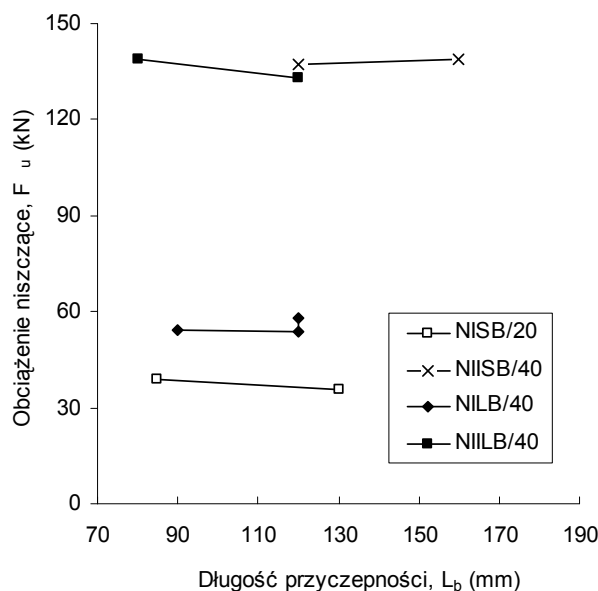
The test results of elements NSM strengthened, confirm a minor influence of the bond length of the strip on the ultimate load of the strengthened member. The reason of failure of all strengthened beams with continuous steel reinforcement was composite debonding together with the adjacent concrete cover, typical for elements strengthened in flexure with composites failed by a premature debonding of strip ends (“end plate debonding”).

Differences in ultimate load of the tested elements resulted from different steel ratio of the beams, not from the bond length. In low elements with the low and high steel reinforcement ratio (NISA, NILA, NISB i NILB), the load bearing capacity of long and short beams were almost identical (Fig. 6.7). Similar observations were confirmed in the case of tall beams, both short and long, with high and low steel reinforcement ratio (Fig. 6.8).



Rys. 6.7. Wpływ długości przyczepności na nośność belek o niskim stopniu zbrojenia stalowego, wzmocnionych wklejanymi taśmami

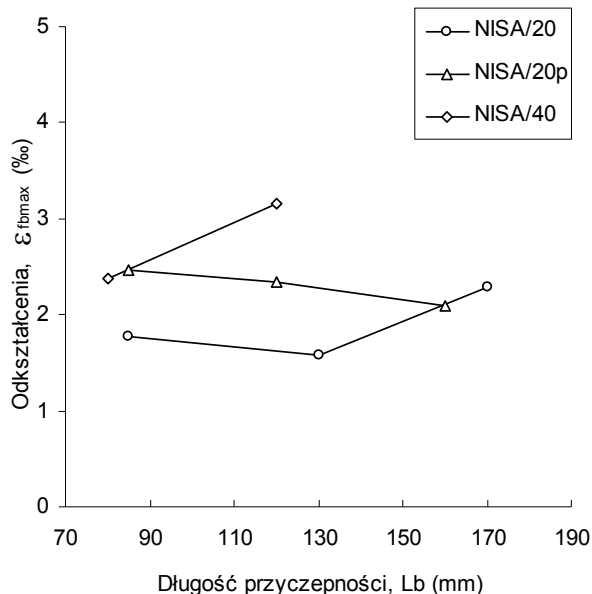
Fig. 6.7 Influence of bond CFRP length on ultimate load in beams with low steel reinforcement ratio, strengthened with NSM strips



Rys. 6.8. Wpływ długości przyczepności na nośność belek o wysokim stopniu zbrojenia stalowego, wzmocnionych wklejanymi taśmami

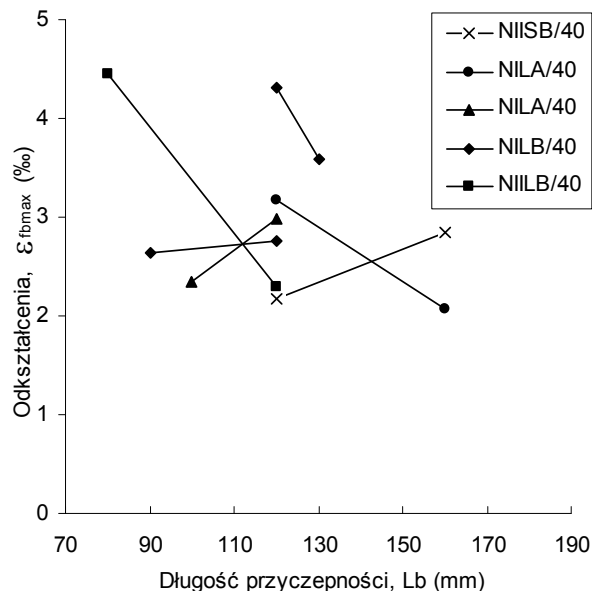
Fig. 6.8 Influence of bond CFRP length on ultimate load in beams with high steel reinforcement ratio, strengthened with NSM strips

Wyniki pomiarów odkształceń granicznych kompozytów przy ich odspojeniu od powierzchni betonu potwierdzają wcześniejsze obserwacje dotyczące nośności. Z powodu zniszczenia elementów ze względu na zginanie, nie można jednoznacznie określić wpływu długości przyczepności taśm na maksymalne odkształcenia przy odspojeniu (porównaj rys. 6.9 i 6.10).



Rys. 6.9. Wpływ długości przyczepności na graniczne odkształcenia taśm przy odspojeniu w belkach wzmocnionych klejonymi taśmami
Fig. 6.9 Influence of bond CFRP length on bond strain in beams strengthened with NSM strips

The measurements of the ultimate composite strain during its debonding, confirmed the earlier observations concerning ultimate load. Due to the flexural failure of the beams, an explicit definition of the influence of the bond length on maximal debonding strain is impossible (compare Fig. 6.9 and 6.10).



Rys. 6.10. Wpływ długości przyczepności na graniczne odkształcenia taśm przy odspojeniu w belkach wzmocnionych klejonymi taśmami
Fig. 6.10 Influence of bond CFRP length on bond strain in beams with strengthened with NSM strips

6.5. Wpływ przecięcia wewnętrznego zbrojenia stalowego na warunki przyczepności taśm kompozytowych, ich odkształcalność i nośność belek

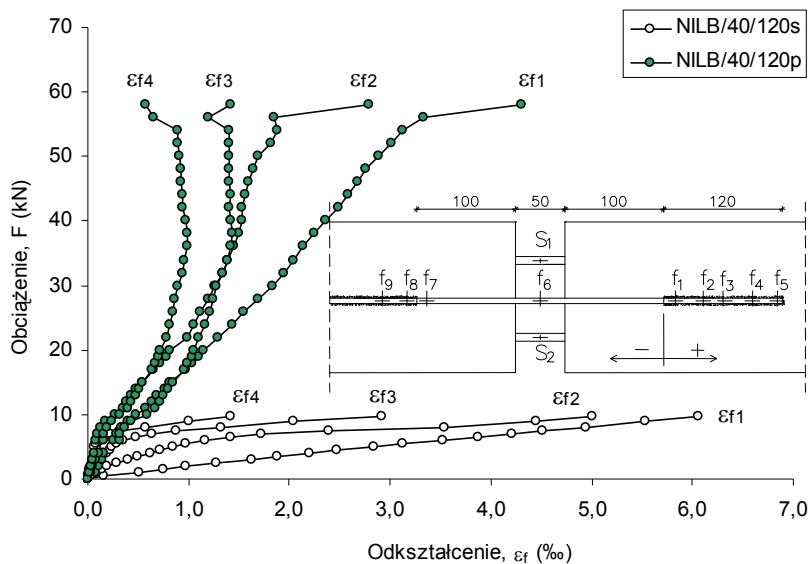
Przecięcie zbrojenia stalowego w czterech belkach (NILA/20/120s, NILA/20/120sp, NILB/20/120s, NILB/20/120sp), wpłynęło znacząco na odkształcalność taśm kompozytowych, szczególnie widoczną w elementach długich o niskim stopniu zbrojenia (porównaj rys. 6.11 i 6.12). Przecięcie zbrojenia podłużnego spowodowało opóźnienie odspojenia taśm kompozytowych, a tym samym znaczące zwiększenie ich granicznych odkształceń przy odspojeniu o 337% - w belce o niskim stopniu zbrojenia podłużnego (NILA) oraz w elemencie o wysokim stopniu zbrojenia (NILB) o 41%.

Z porównania wykresów odkształceń taśm (rys. 6.13), w punkcie pomiarowym f1, dla wszystkich wzmocnionych belek z ciągłym i przeciętym zbrojeniem stalowym wynika, że po przecięciu zbrojenia zwykłego, taśmy odkształcały się podobnie, mimo, że wklejone były w belki znacząco różniące się zbrojeniem podłużnym. Potwierdza to opinię o dużym wpływie zbrojenia stalowego na warunki przyczepności taśm do betonu.

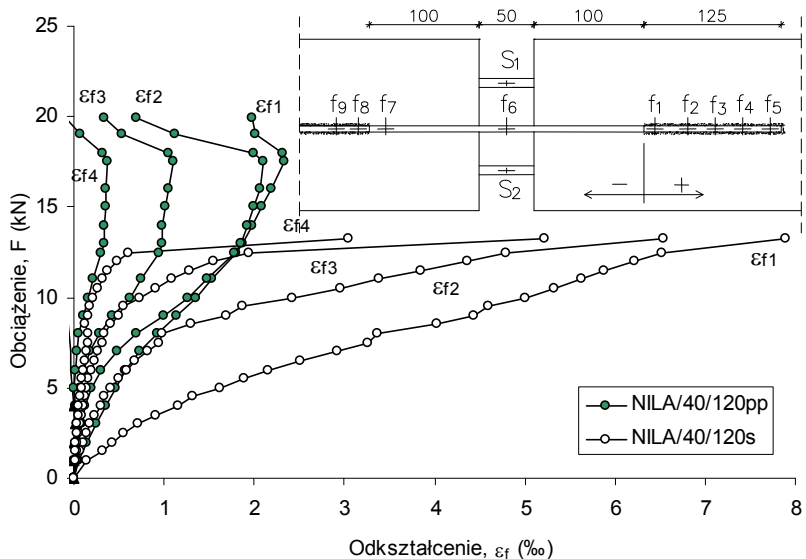
6.5. Influence of cutting through the internal steel reinforcement on conditions of composite strips bond, strains of strips and load bearing capacity of beams

Cutting through the steel reinforcement in four beams (NILA/20/120s, NILA/20/120sp, NILB/20/120s, NILB/20/120sp), significantly influenced the strain of composite strips, especially noticeable in long elements with low steel percentage (NILA, compare Fig. 6.11 and 6.12). Cutting through longitudinal reinforcement caused the delay in debonding of CFRP strips, thus significantly increasing their ultimate strain, by 337% - in the low steel percentage beam (NILA) and in the member with high steel percentage (NILB) by 41%.

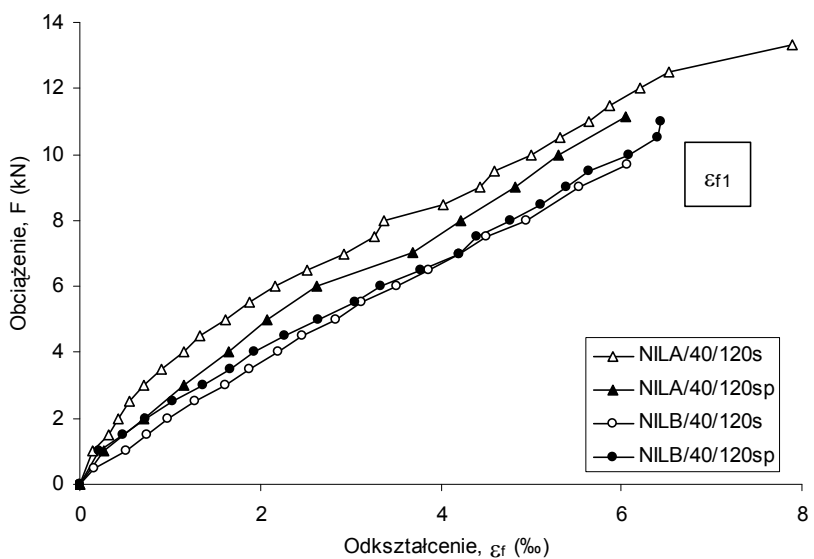
As it resulted from comparing the strips strain graphs (Fig. 6.13), in the measurement point f1, for all strengthened beams with continuous and cut steel reinforcement, the steel cutting resulted in similar through strips deformation, despite the beams had significantly different longitudinal steel reinforcement. This confirmed the opinion on a great influence of the steel reinforcement on the CFRP to concrete bond behaviour.



Rys. 6.11. Wpływ przecięcia zbrojenia stalowego na odkształcalność kompozytów w belkach NILB/40/120
 Fig. 6.11. Influence of cut steel bars on CFRP bond strain in beams NILB/40/120



Rys. 6.12. Wpływ przecięcia zbrojenia stalowego na odkształcalność kompozytów w belkach NILA/40/120
 Fig. 6.12. Influence of cut steel bars on CFRP bond strain in beams NILA/40/120



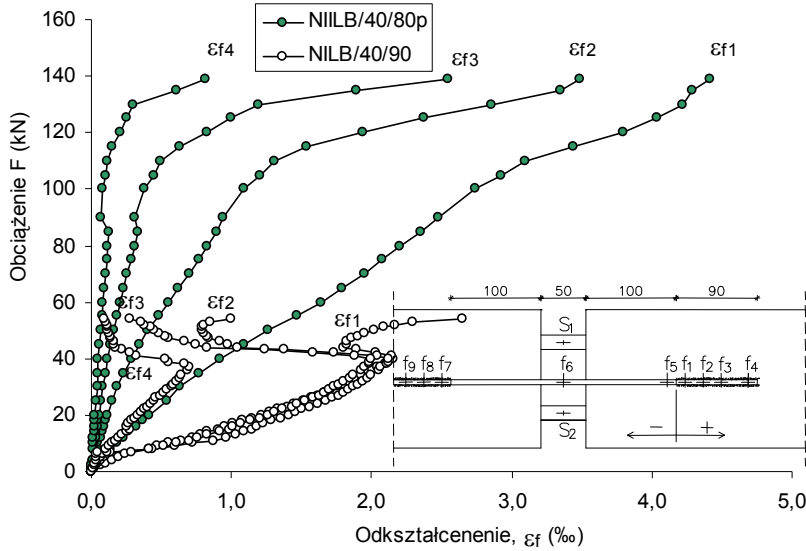
Rys. 6.13. Wpływ przecięcia zbrojenia stalowego na odkształcalność taśm CFRP w belkach NILA/40/120 i NILB/40/120
 Fig. 6.13. Influence of cut steel bars on CFRP bond strain in beams NILA/40/120 and NILB/40/120

6.6. Wpływ wysokości przekroju belki na odkształcalność taśm

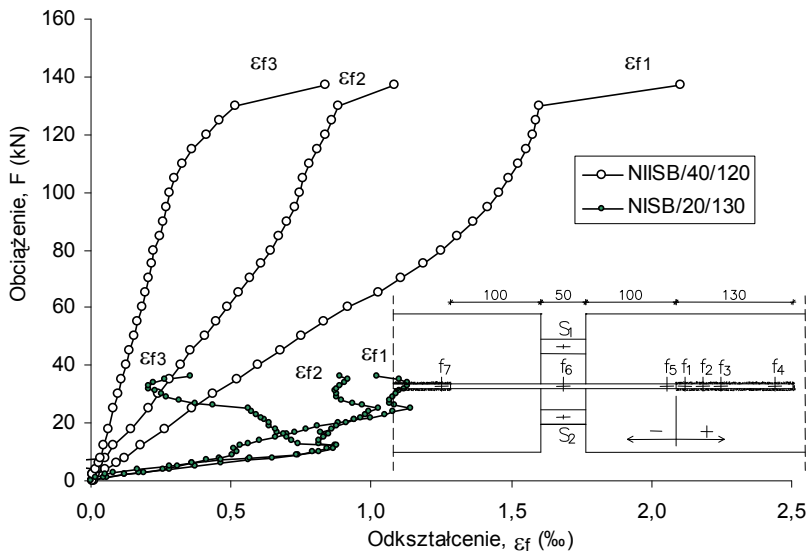
Odształcenia graniczne taśm wklejonych w belki wysokie, o dużym stopniu zbrojenia, wzrosły 67% (dla $L_b=80\text{mm}$ i 90mm) oraz 49% (dla $L_b=120\text{mm}$ i 130mm) w porównaniu z odkształceniami granicznymi taśm w belkach niskich o tym samym stopniu zbrojenia (rys. 6.14, 6.15).

6.6. Influence of the beam's height on strips strains

The ultimate strain values in the strips bonded into tall beams with high steel percentage were by 67% (for $L_b=80\text{mm}$ and 90mm) and by 49% (for $L_b=120\text{mm}$ and 130mm) greater than those in low beams with the same steel reinforcement (Fig. 6.14, 6.15).



Rys. 6.14. Wpływ wysokości belki na odkształcalność kompozytów w belkach NIILB/40/80p i NIILB/40/90
Fig. 6.14. Influence of beam's height on CFRP strain in beams NIILB/40/80p i NIILB/40/90



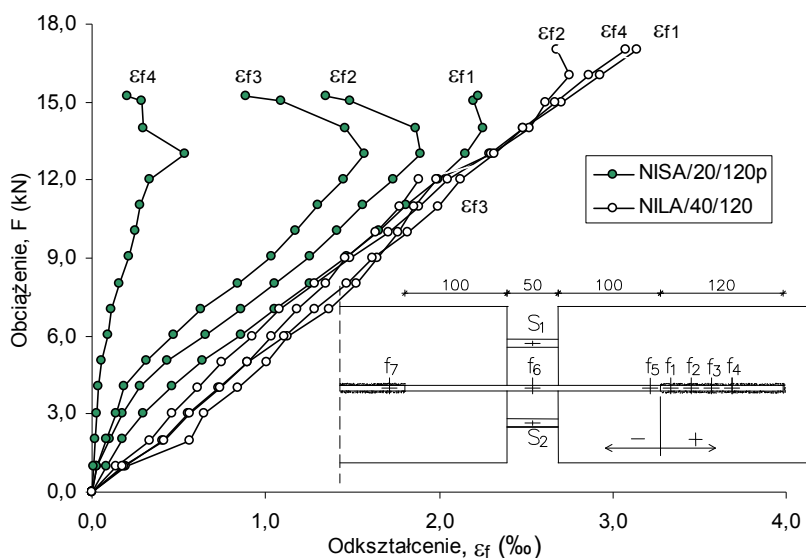
Rys. 6.15. Wpływ wysokości belki na odkształcalność kompozytów w belkach NIISB/40/120 i NISB/20/130
Fig. 6.15. Influence of beam's height on CFRP strain in beams NIISB/40/120 i NISB/20/130

6.7. Wpływ położenia odcinka przyczepności kompozytu do betonu (wpływ rozpiętości belki) na odkształcalność taśm

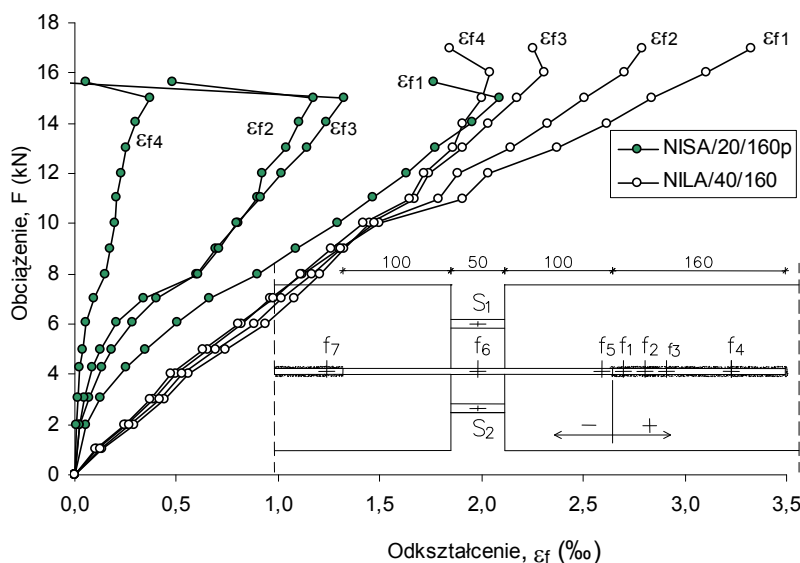
Pomiary odkształceń taśm kompozytowych na długości wklejonego odcinka, wykazały wpływ położenia badanego odcinka na odkształcalność kompozytu. Jeśli ten odcinek położony był w strefie czystego zginania ($L_0 = 2000\text{mm}$), do odspojenia dochodziło później (przy większych odkształceniach granicznych taśm), niż w wypadku położenia badanego odcinka przyczepności w obszarze jednoczesnego działania momentu i siły tnącej ($L_0 = 1500\text{mm}$). Porównanie odkształceń taśm wklejonych w belkach długich i krótkich zamieszczono na rysunkach 6.16, 6.17 i 6.18.

6.7. Influence of the location of the strip's bond length (influence of the beam span) on strip's strain

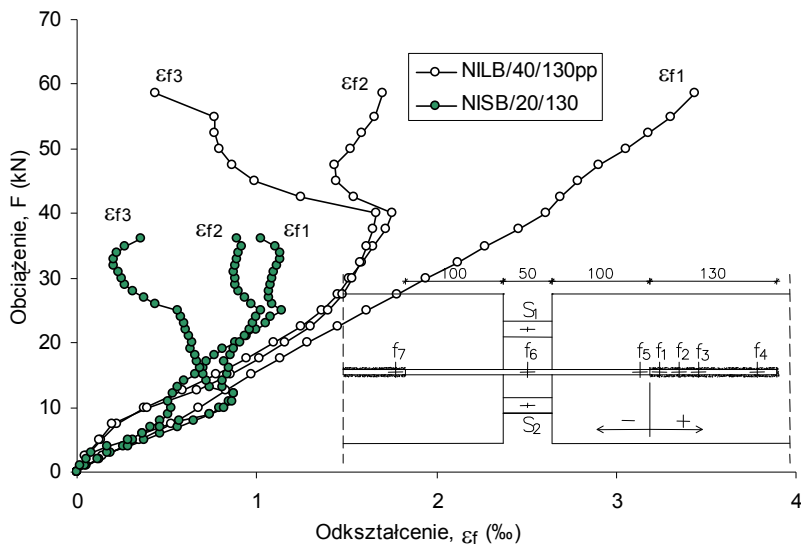
The measurements of CFRP strips along the bond length demonstrated the influence of the position of the bond sector on the composite strain. If the section was situated in the pure bending region ($L_0 = 2000\text{mm}$), debonding occurred later (with greater strips ultimate strain), than in the case of the position of bond length in the simultaneous shear – bending region ($L_0 = 1500\text{mm}$). Comparison of strips strain in long and short beams is presented in Fig. 6.16, 6.17, 6.18).



Rys. 6.16. Wpływ położenia odcinka przyczepności ($L_b = 120\text{ mm}$) na odkształcalność taśm CFRP w belkach NIA
 Fig. 6.16. Influence of location of bond length ($L_b = 120\text{ mm}$) on CFRP strain in beams NIA



Rys. 6.17. Wpływ położenia odcinka przyczepności ($L_b = 160\text{ mm}$) na odkształcalność taśm CFRP w belkach NIA
 Fig. 6.17. Influence of location of bond length ($L_b = 160\text{ mm}$) on CFRP strain in beams NIA



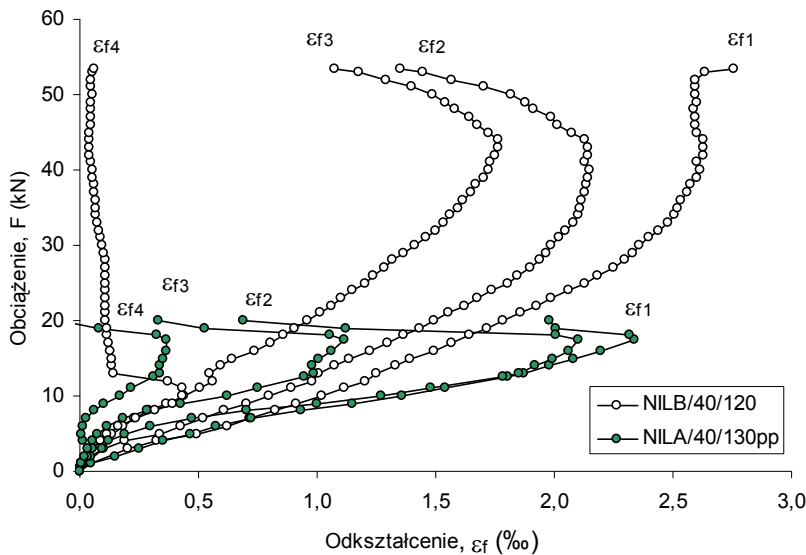
Rys. 6.18. Wpływ położenia odcinka przyczepności ($L_b = 130$ mm) na odkształcalność taśm CFRP w belkach NIB
 Fig. 6.18. Influence of location of bond length ($L_b = 130$ mm) on CFRP strain in beams NIB

6.8. Wpływ stopnia zbrojenia stalowego na odkształcalność taśm kompozytowych

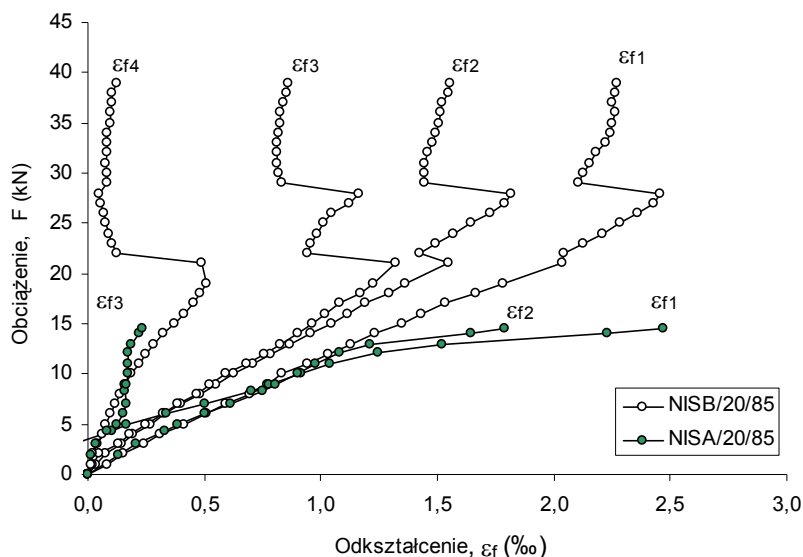
Mechanizm zniszczenia belek wzmocnionych klejonymi taśmami z włókien węglowych (na skutek zginania, poza odcinkiem przyczepności) uniemożliwił określenie wpływu stopnia zbrojenia zwykłego na odkształcalność taśm, zarówno w belkach długich (rys. 6.19), jak i krótkich (rys. 6.20 i 6.21).

6.8. Influence of the steel reinforcement ratio on composite strains

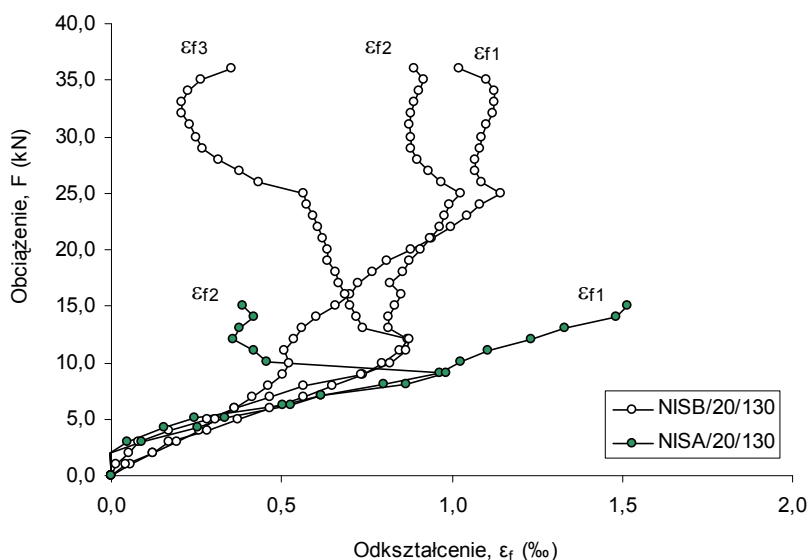
The mechanism of failure of beams NSM CFRP strengthened (due to bending out of the bond length) made it impossible to determine the influence of the steel percentage on the strips strains, both in long beams (Fig. 6.19) as in short ones (Fig. 6.20, 6.21)



Rys. 6.19. Wpływ stopnia zbrojenia stalowego na odkształcalność taśm CFRP ($L_b = 120$ mm) w belkach długich NIL
 Fig. 6.19. Influence of steel reinforcement ratio on CFRP strain ($L_b = 120$ mm) in long beams NIL



Rys. 6.20. Wpływ stopnia zbrojenia stalowego na odkształcalność taśm CFRP ($L_b = 85\text{mm}$) w krótkich belkach NIS
 Fig. 6.20. Influence of steel reinforcement ratio on CFRP strain ($L_b = 85\text{mm}$) in short beams NIS



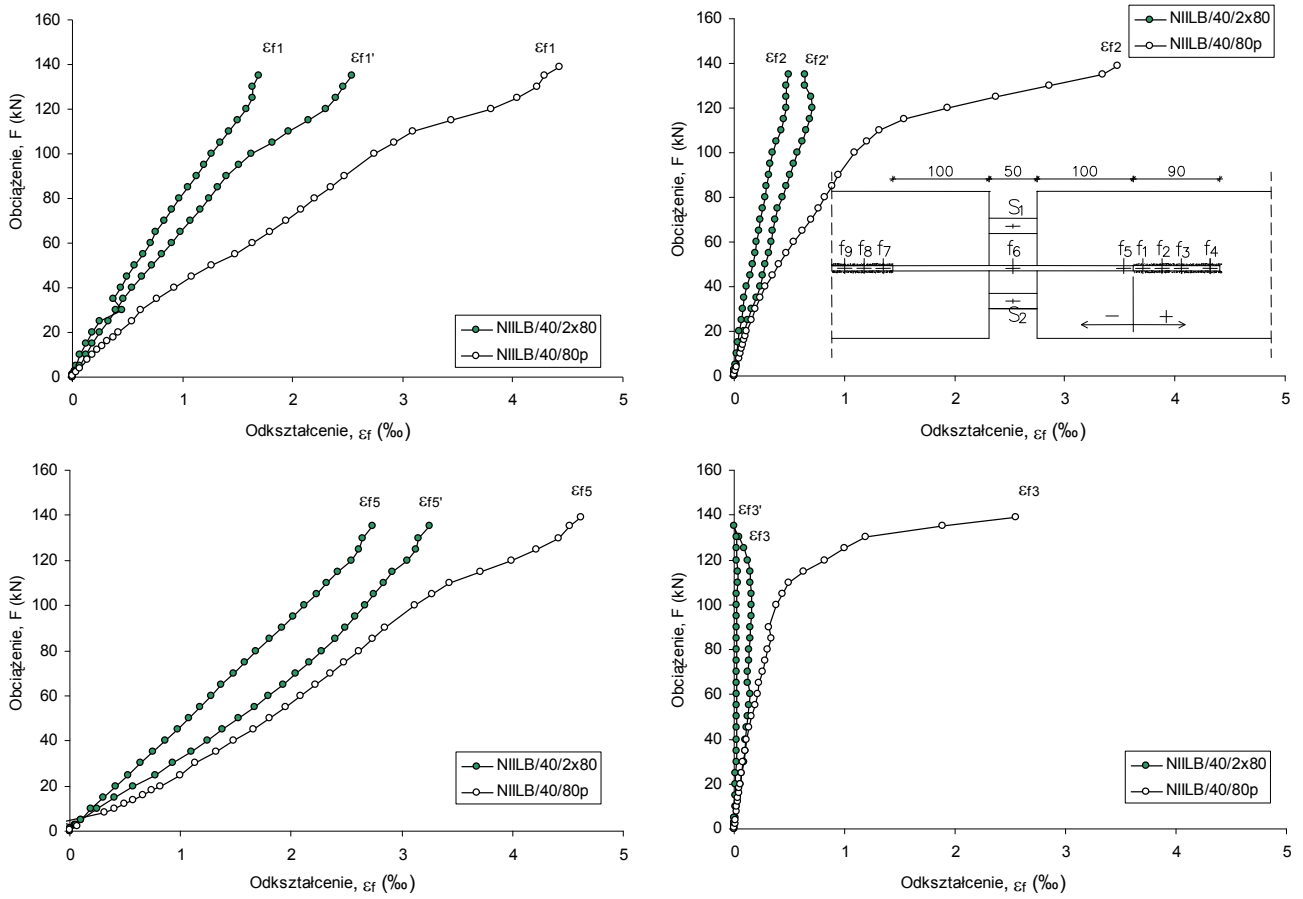
Rys. 6.21. Wpływ stopnia zbrojenia stalowego na odkształcalność taśm CFRP ($L_b = 130\text{mm}$) w krótkich belkach NIS
 Fig. 6.21. Influence of steel reinforcement ratio on CFRP strain ($L_b = 130\text{mm}$) in short beams NIS

6.9. Wpływ stopnia zbrojenia kompozytowego na odkształcalność taśm

Wyniki badań belek długich, o niskim stopniu zbrojenia (NILA), wzmocnionych jedną i dwiema taśmami wykazały większą odkształcalność taśm wklejonych pojedynczo, niż podwójnie (rys. 6.22). To znów potwierdza opinię o negatywnym wpływie stopnia zbrojenia kompozytowego na jego graniczne odkształcenia przy odspojeniu.

6.9. Influence of the composite reinforcement ration on composite strains

The results of the tests of long beams with the low steel percentage (NILA), strengthened with one and two strips, demonstrated greater single CFRP strains than double ones (Fig. 6.22). This again confirmed the opinion on negative influence of the composite percentage on its ultimate debonding strain.



Rys. 6.22. Wpływ stopnia zbrojenia kompozytowego belek NIILB na odkształcalność taśm ($L_b = 80\text{mm}$, $f_1 \div f_5$ – kolejne punkty pomiarowe na długości badanego odcinka przyczepności)
 Fig. 6.22. Influence of CFRP reinforcement ratio on CFRP strain in in beam NIILB ($L_b = 80\text{mm}$, $f_1 \div f_5$ – following strain gauges on bond length)

7. WNIOSKI I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Na podstawie analizy wyników badań można sprecyzować następujące wnioski:

- wzrost wytrzymałości betonu opóźnia odspojenie taśm i zwiększa odkształcenia graniczne kompozytu przy jego odspojeniu;
- w belkach wzmocnionych na zewnętrznej rozciąganej powierzchni taśmami i matami CFRP, wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie, osiągnięto większe naprężenia przyczepności;
- zaobserwowano korzystny wpływ wytrzymałości betonu na naprężenia przyczepności w belkach z przeciętym zbrojeniem stalowym;
- wytrzymałość betonu ma nieznaczny wpływ na nośność badanych belek, zarówno w wypadku belek wzmocnionych wklejanymi taśmami, jak i belek wzmocnionych matami i taśmami przyklejanymi na rozciąganej powierzchni belek;
- belki wzmocnione sztywnymi taśmami, przyklejanymi na powierzchni betonu, wykazały większe naprężenia przyczepności w porównaniu z belkami wzmocnionymi wiotkimi matami;
- wyniki badań potwierdzają mało znaczący wpływ długości badanego odcinka przyczepności na nośność wzmoczonego elementu i odkształcenia graniczne kompozytów przy odspojeniu od powierzchni betonu. Powodem tego jest zniszczenie wszystkich wzmocnionych belek (z ciągłym zbrojeniem stalowym) ze względu na zginanie, wywołane odspojeniem końców taśm CFRP wraz z otaczającą betonową otuliną („end plate debonding”);
- pomiary odkształceń taśm kompozytowych na długości wklejonego odcinka, wykazały wpływ położenia badanego odcinka na odkształcalność kompozytu. Jeśli ten odcinek położony był w strefie czystego zginania ($L=2000\text{mm}$), do odspojenia dochodziło później (przy większych odkształceniach granicznych taśm), niż w wypadku położenia badanego odcinka przyczepności w obszarze jednoczesnego działania momentu i siły tnącej ($L=1500\text{mm}$);
- wraz ze wzrostem zbrojenia kompozytowego maleją jego graniczne odkształcenia przy odspojeniu;
- jak przewidywano, badania potwierdziły wpływ zbrojenia zwykłego na warunki przyczepności taśm do betonu, przecięcie zbrojenia stalowego spowodowało opóźnienie odspojenia taśm kompozytowych, a tym samym znaczące zwiększenie ich granicznych odkształceń. Potwierdza to opinię o dużym wpływie zbrojenia stalowego na warunki przyczepności taśm do betonu.

Omówione w pracy wyniki badań skłaniają do podjęcia dalszych badań w dziedzinie przyczepności kompozytów do betonu. Powinny one obejmować „direct pull-out bond test”, z założeniem tych samych parametrów zmiennych, które przyjęto w omawianym w pracy programie badawczym („beam bond test”). Dokładnej analizy wymaga zbadanie wpływu wzajemnego położenia zbrojenia stalowego i taśm kompozytowych (w obu kierunkach) oraz wpływ położenia taśm względem bocznej krawędzi elementu betonowego.

7. CONCLUSIONS AND PROPOSALS OF FURTHER RESEARCH

Based on the analysis of the tests results, the following conclusions may be formed:

- increase of concrete strength delays the strips debonding and increases the ultimate strain of composite at its debonding;
- in beams externally strengthened with the CFRP strips and sheets, the greater bond stress is obtained along with the increase in concrete compression strength;
- a favourable influence of the concrete strength on the bond stress in beams with steel reinforcement cut through is observed;
- concrete strength has an insignificant influence on the ultimate load of the tested beams, both in the case of beams NSM strengthened as well as externally strengthened;
- beams externally strengthened with the rigid strips demonstrated greater bond stress in comparison to those strengthened with the flexible sheets;
- the tests results confirm an insignificant influence of the bond CFRP length on the ultimate load of the strengthened beam and the ultimate composite debonding strain. It results from the flexural failure of all tested beams (with continuous steel reinforcement) caused by the debonding of the CFRP strips ends together with the adjacent concrete cover (“end plate debonding”);
- the measurements of composite strips strain along the bond length demonstrated the influence of the location of the bond CFRP length on the composite strain. If that section was situated in the pure bending region ($L = 2000\text{ mm}$), the debonding occurred later (with greater strips ultimate strain), than in the case of the situation of the bond length within the simultaneous shear – bending region ($L = 1500\text{ mm}$);
- with the increase in the composite reinforcement, its ultimate debonding strain decreases;
- as expected, the tests confirmed the influence of the steel reinforcement on CFRP to concrete bond conditions; cutting through the steel reinforcement delayed debonding of composite strips, thus significantly increased their ultimate strain. This confirms the opinion on a great influence of the steel reinforcement on the CFRP strips bond behaviour.

The experimental results tests persuade to undertake, further tests on the topic of bond between composite and concrete. They should include concrete beams (without steel reinforcement), identically strengthened as in the discussed test program. The analysis of the test results of composite to concrete bond conditions and the mutual CFRP and steel bars location (in both beam's directions) should explain the influence of internal steel reinforcement on CFRP conditions.

Zdefiniowanie zjawiska przyczepności kompozytu do betonu powinno być poprzedzone badaniami osiowego wyciągania wklejonego kompozytu z betonu tzw. „direct pull-out bond test”, z założeniem tych samych parametrów zmiennych, które przyjęto w omawianym programie badawczym („beam bond test”).

Dokładnej analizy wymaga wpływ wzajemnego położenia zbrojenia stalowego i taśm kompozytowych oraz wpływ położenia taśm względem bocznej krawędzi elementu betonowego.

Defining the phenomenon of bond between the composite and concrete should be preceded with the “direct pull-out bond test”, assuming the same variable parameters as adopted in the presented test (“beam bond test”).

The influence of mutual orientation of the steel reinforcement and composite strips, as well as the influence of the strips position the side edge of the concrete member, require a detailed analysis.

Bibliografia / References

- [1] Kotynia R., Kamińska M. E.: „Odształcalność i sposób zniszczenia żelbetowych belek wzmocnionych na zginanie materiałami kompozytowymi CFRP”, Zeszyt 13, Wyd. Katedry Budownictwa Betonowego PŁ, Łódź, 2003.
- [2] Kotynia R.: “Analysis of reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted FRP reinforcement”. Archives of Civil Engineering, LII 2, September 2006, pp. 305-317.
- [3] Barros, J.A.O., Fortes, A.S.: “Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits”, Journal of Cement & Concrete Composites, Vol. 27, 2005, pp. 471-480.
- [4] De Lorenzis, L. and Teng, J., “Near-Surface Mounted FRP Reinforcement: An Emerging Technique for Strengthening Structures”, Composites Part B: Eng., 38, 2, 2007, pp. 119-143.
- [5] Hassan, T. and Rizkalla, S., “Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips”, Journal of. Composites for Construction., 7, 3, 2003, pp. 248-257.
- [6] Täljsten, B., Carolin, A., and Nordin, H., “Concrete structures strengthened with near surface mounted reinforcement of CFRP”, Advanced. Structural Engineering, 6, 3, 2003, pp. 201–213.
- [7] Blaschko M., “Zum tragverhalten von betonbauteilen mit in schlitz eingeklebten CFK-lamellen”. Bericht 8/2001 aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, TU Mnchen, 2001, 147 pp.
- [8] Seracino, R., Jones, M.N., Ali, M.S.M., Oehlers, J.D., “Bond strength of near-surface mounted FRP Strip-to-concrete joints”, Journal of. Composites for Construction, 11, 4, 2007, pp. 401-409.
- [9] Yao, J., Teng, J. G., and Chen, J. F. 2005a.: “Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints”, Composites Part B: Eng ., 36, pp. 99–113.
- [10] Maeda T, Asano Y, Ueda T, Kakuta Y.: “A study on bond mechanism of carbon fiber sheet. Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures”, Proceedings of 3rd Int. Symposium, Sapporo, Japan 1997, pp. 287–95.
- [11] De Lorenzis, L., Nanni, A.: “A Bond Between Near-Surface Mounted FRP Rods and Concrete in Structural Strengthening”, ACI Structural Journal, V. 99, No.2, 2001, pp. 123-132.
- [12] Sena-Cruz, J. M. S., Barros, J. A. O., “Bond Between Near Surface Mounted Carbon-fiber-reinforced Polymer Laminate Strips and Concrete”, Journal of. Composites for Construction, 8, 6, 2004, pp. 519–527.
- [13] RILEM, “Bond test for reinforcement steel. 1. Beam test”, TC9-RC, 1982.

Załącznik

Wyniki pomiarów

Badania zostały wykonane w Laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego.

Uczestniczyli w nich:

mgr inż. Jacek Filipczak
mgr inż. Radosław Walendziak
mgr inż. Jacek Łapiński
mgr inż. Tomasz Domański
mgr inż. Hubert Witkowski
tech. Adam Frątczak
tech. Monika Potapow
tech. Stanisław Młynarski
tech. Andrzej Wierzbicki
tech. Andrzej Szcześniak
tech. Andrzej Banasiak

dyplomaci KBB PŁ:

mgr inż. Łukasz Filas
mgr inż. Maciej Łukasiewicz
inż. Jakub Owczarz

współpraca zagraniczna:

dr inż. Hussein M. Abd El Baky (Postdoctoral Fellow, Department of Civil Engineering Faculty of Engineering, University of Sherbrooke)

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

Appendix

Results of measurements

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

The participants were as follow:

mgr inż. Jacek Filipczak
mgr inż. Radosław Walendziak
mgr inż. Jacek Łapiński
mgr inż. Tomasz Domański
mgr inż. Hubert Witkowski
tech. Adam Frątczak
tech. Monika Potapow
tech. Stanisław Młynarski
tech. Andrzej Wierzbicki
tech. Andrzej Szcześniak
tech. Andrzej Banasiak

PhD students KBB PŁ:

mgr inż. Łukasz Filas
mgr inż. Maciej Łukasiewicz
inż. Jakub Owczarz

international cooperation:

Postdoctoral Fellow Hussein M. Abd El Baky (Department of Civil Engineering Faculty of Engineering, University of Sherbrooke)

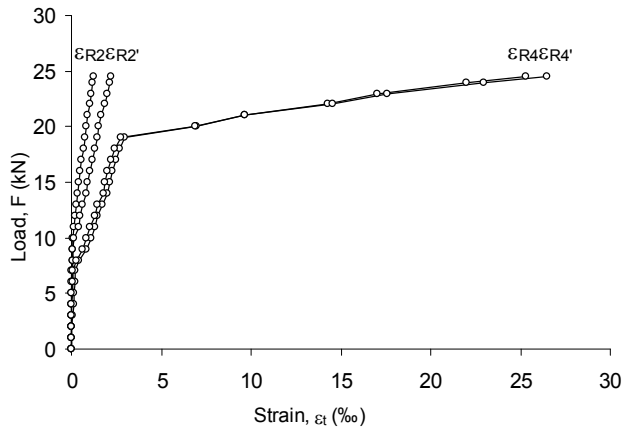
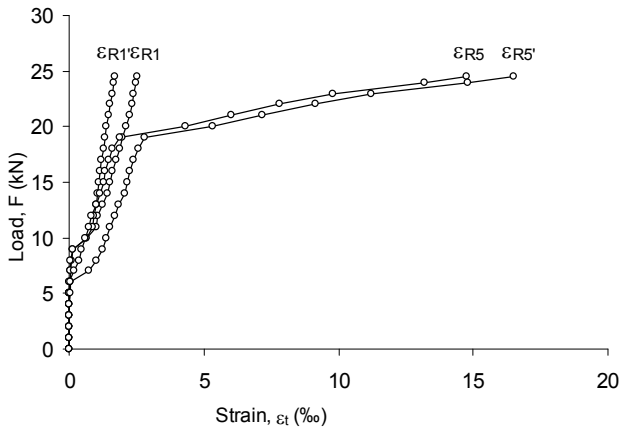
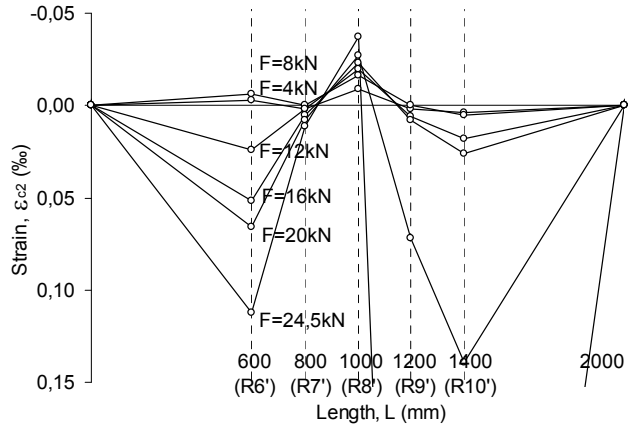
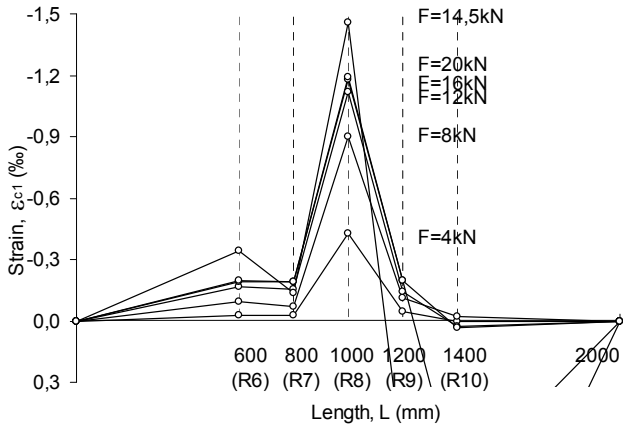
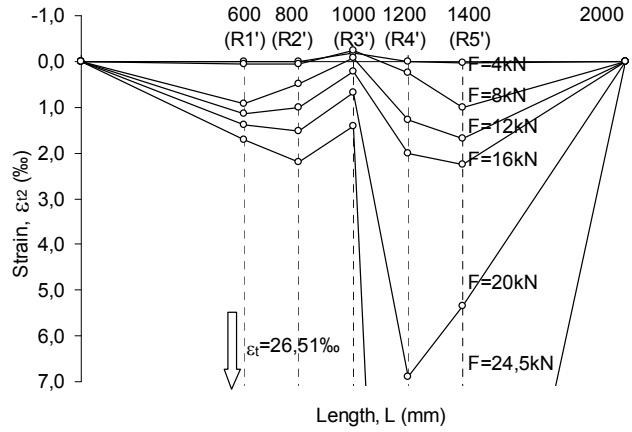
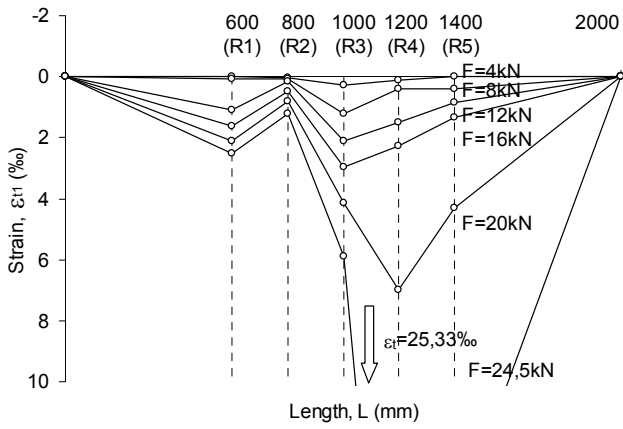
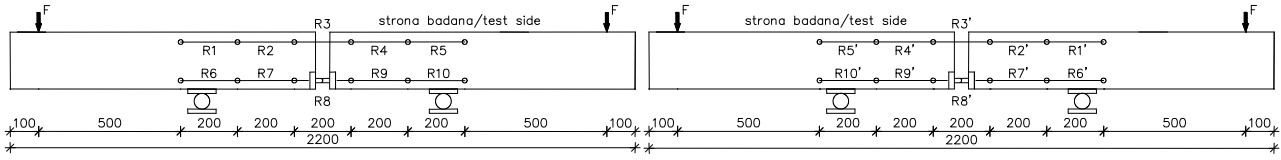
Example diagrams, containing test results, are presented in print. Remaining materials, documenting the course of tests are available at the Department of Concrete Structures of Łódź Technical University.

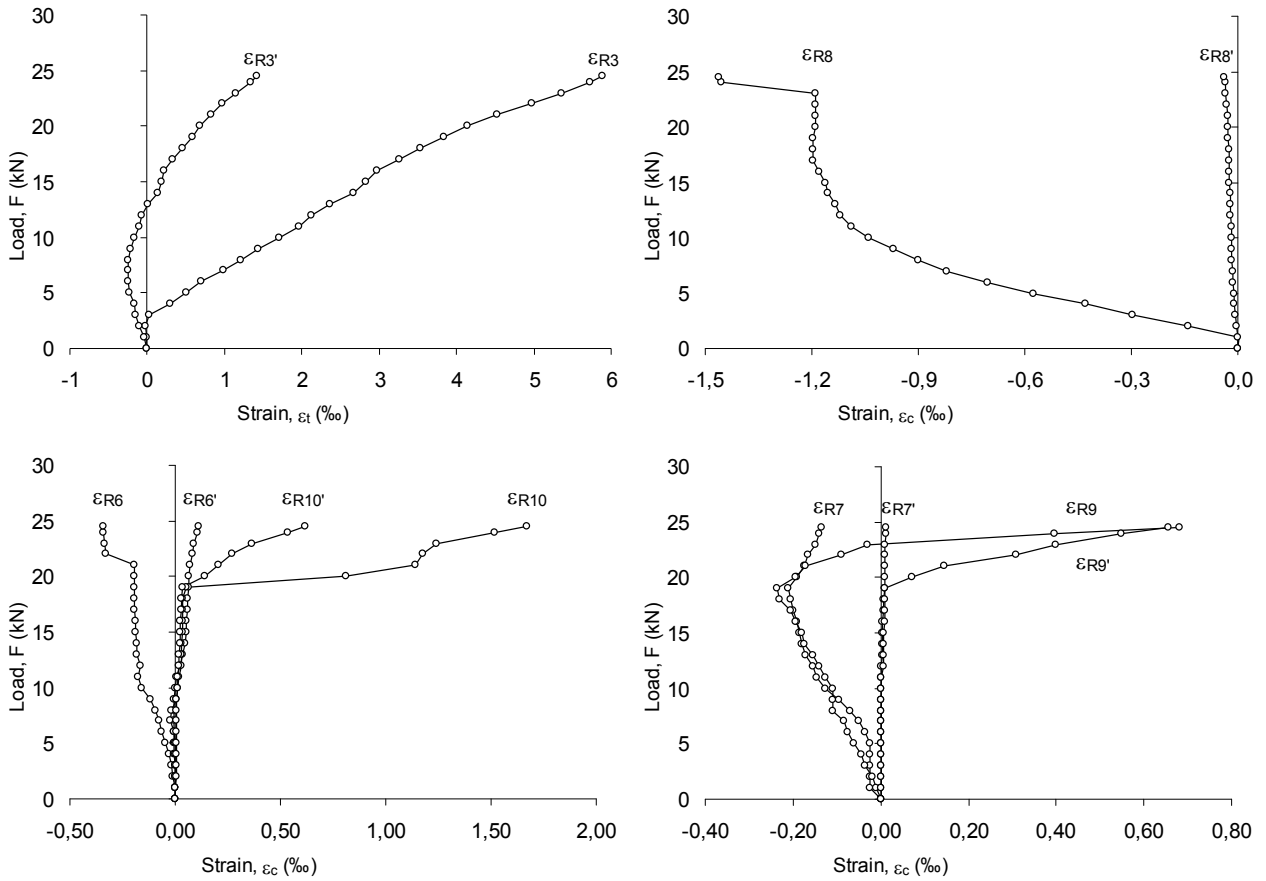
Model 21

NILA/40/120p

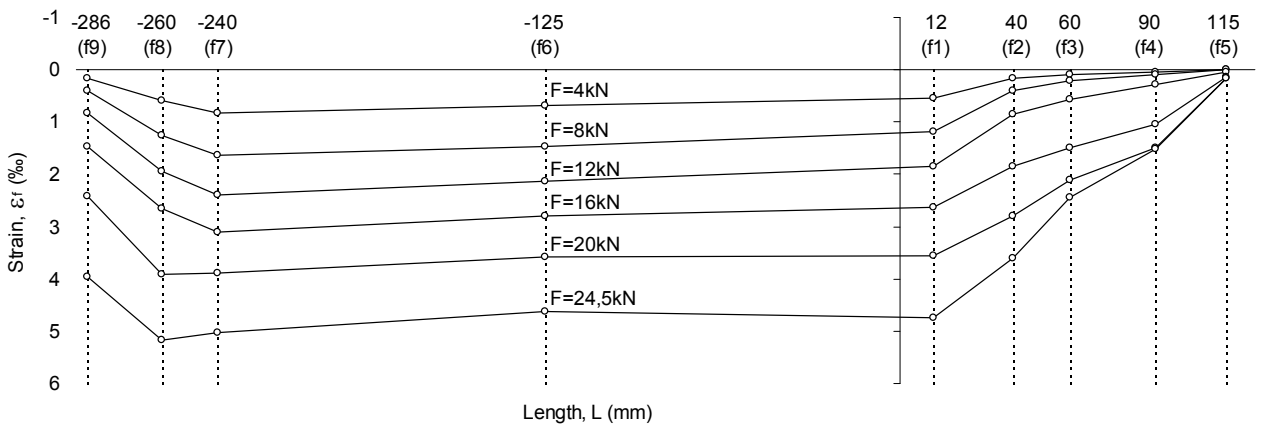
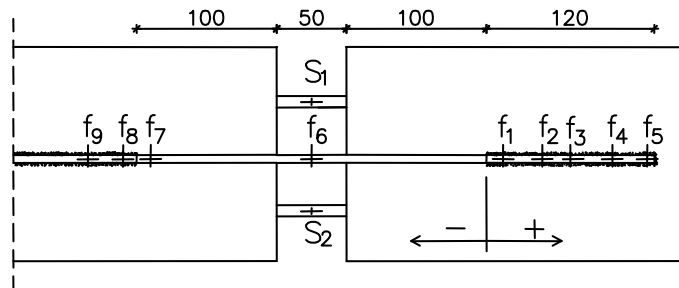
L=2200mm, H=200mm

Z21.1 Concrete strain

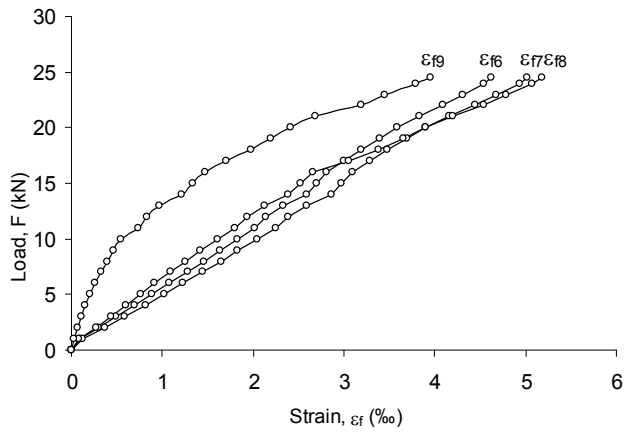
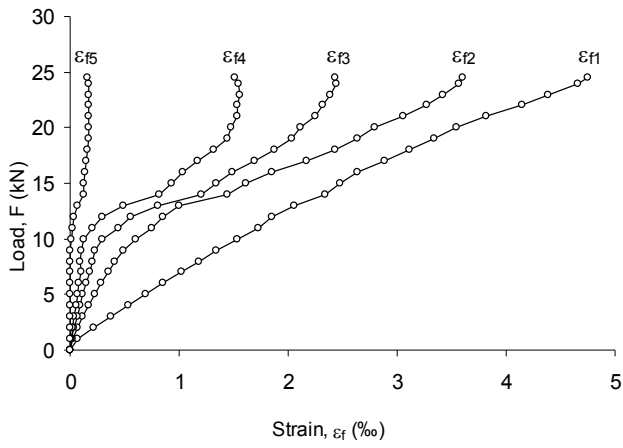




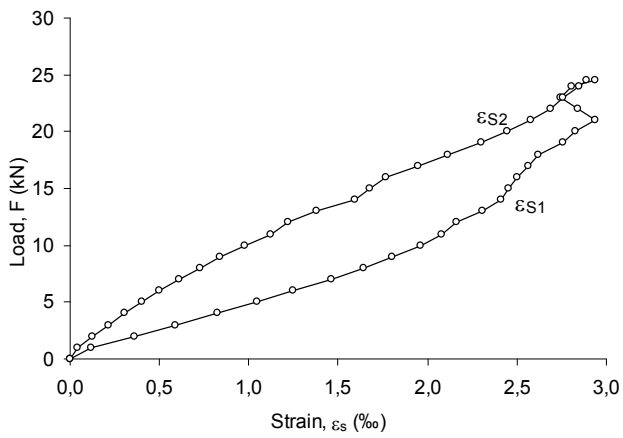
Z21.2 FRP strain



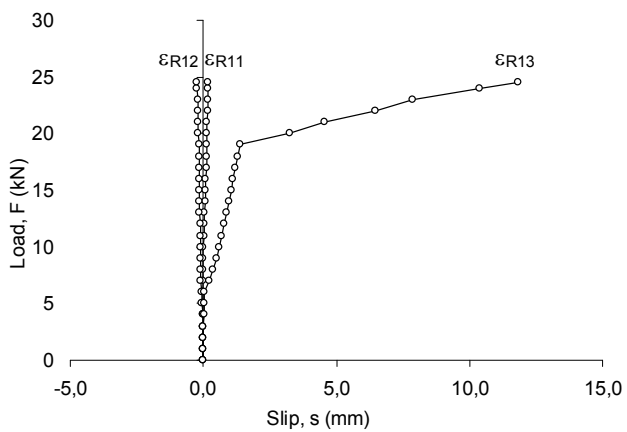
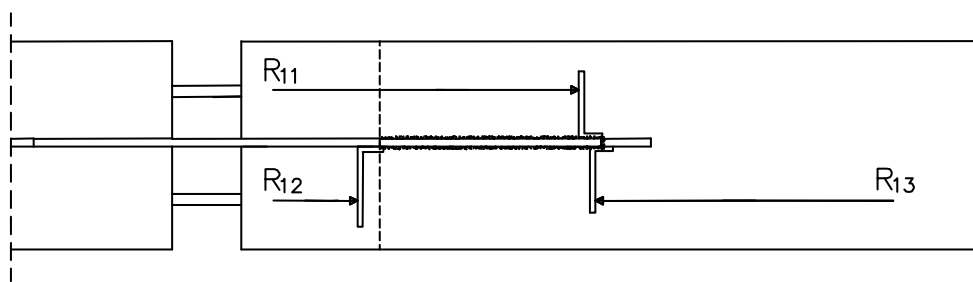
Z21.3 FRP strain



Z21.4 Steel strain



Z21.5 FRP slip / displacement

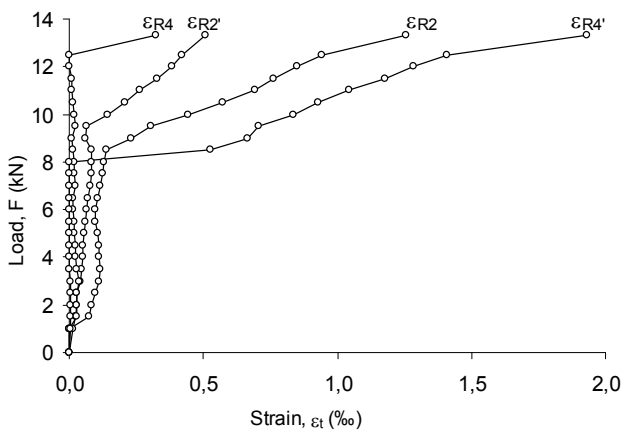
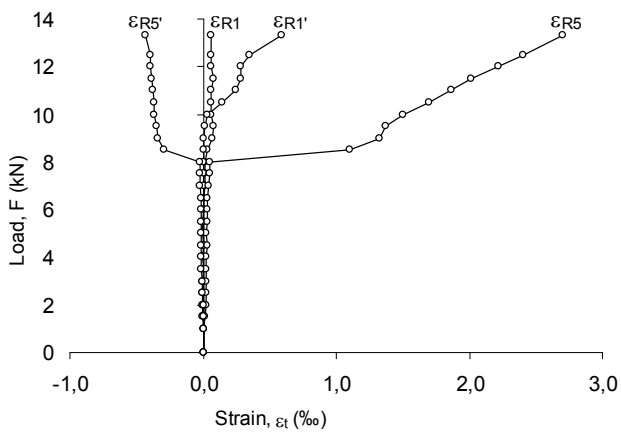
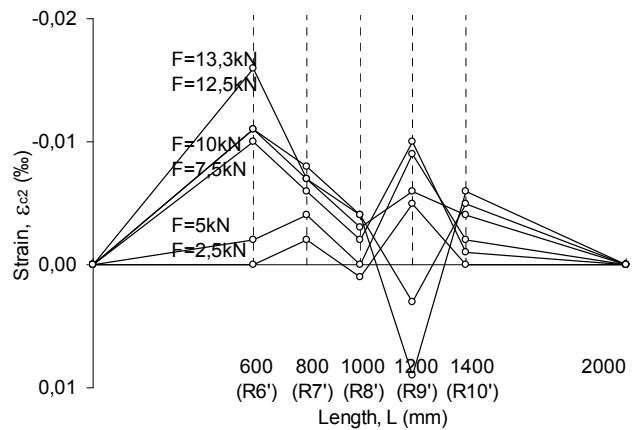
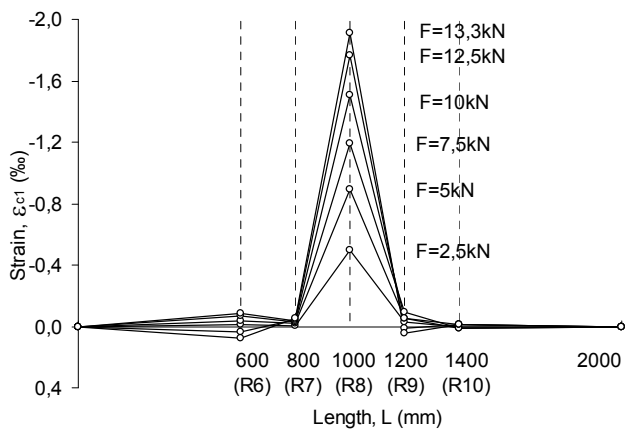
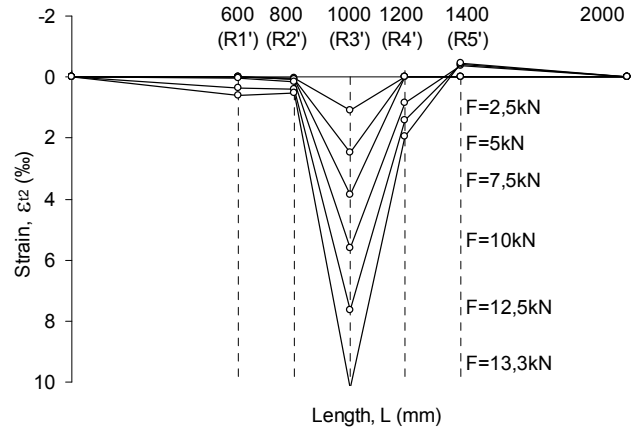
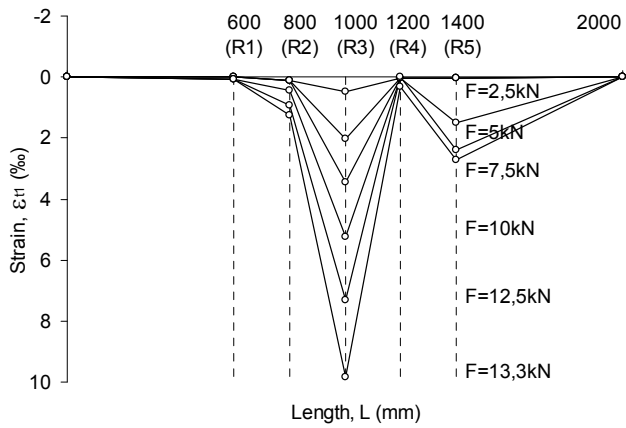
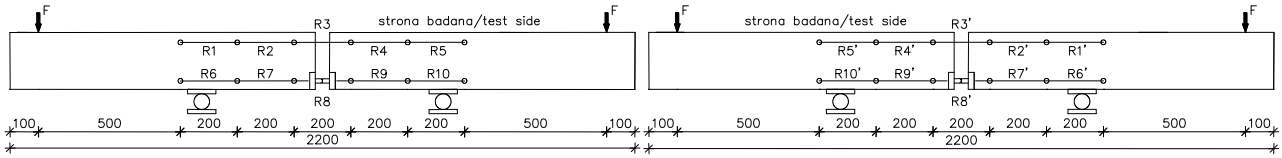


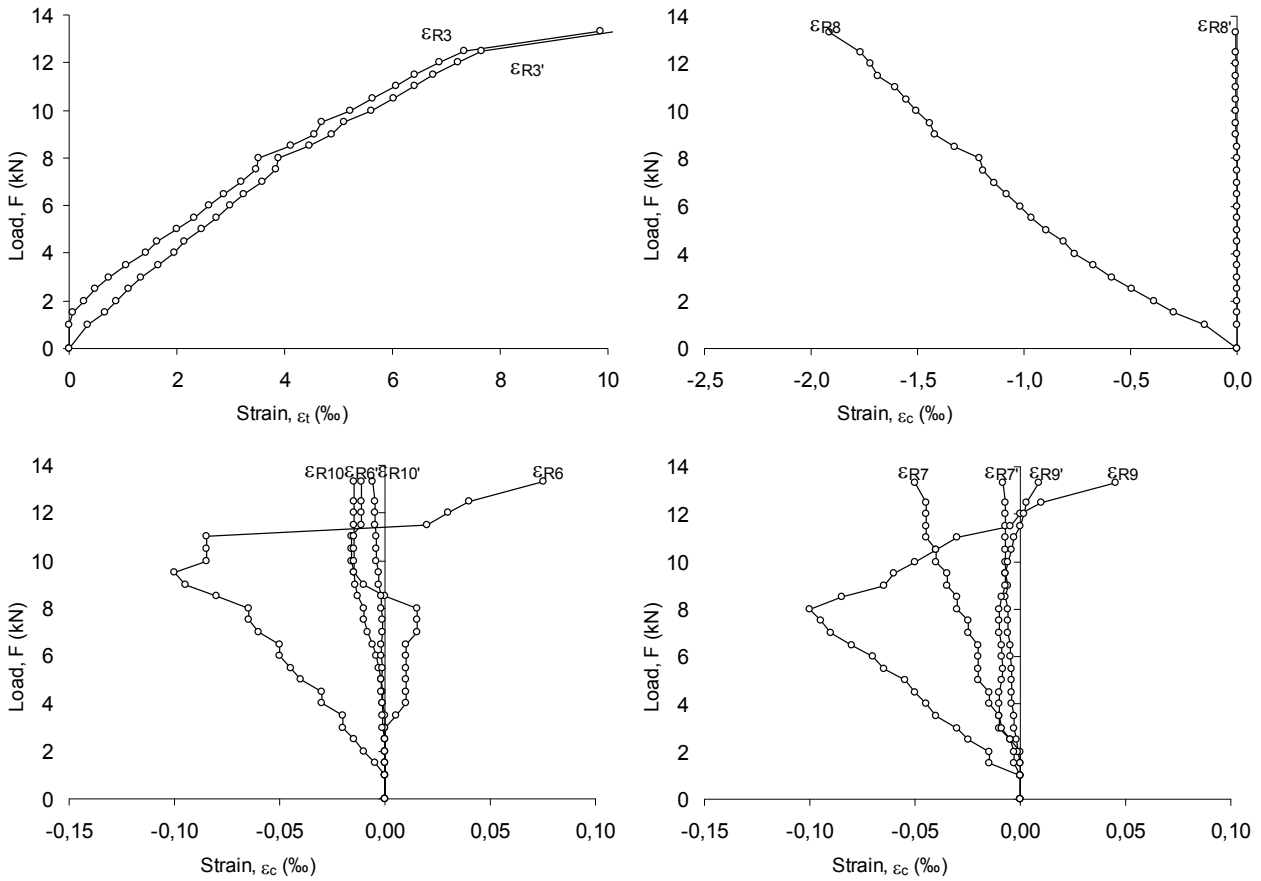
Model 22

NILA/40/120s

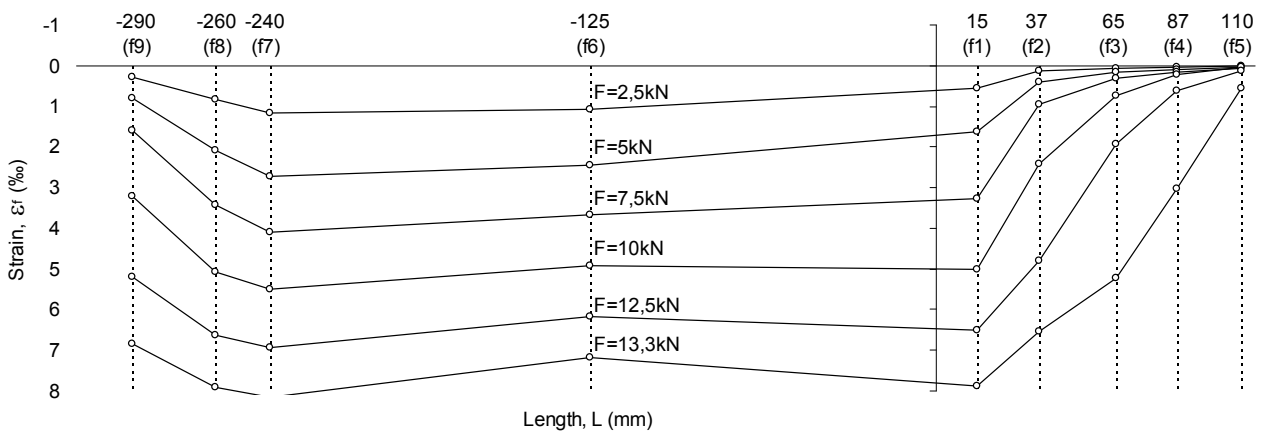
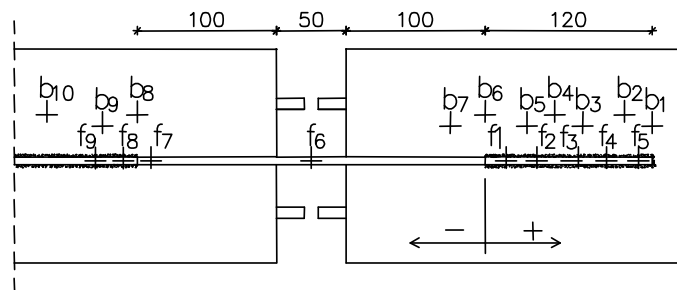
L=2200mm, H=200mm

Z22.1 Concrete strain

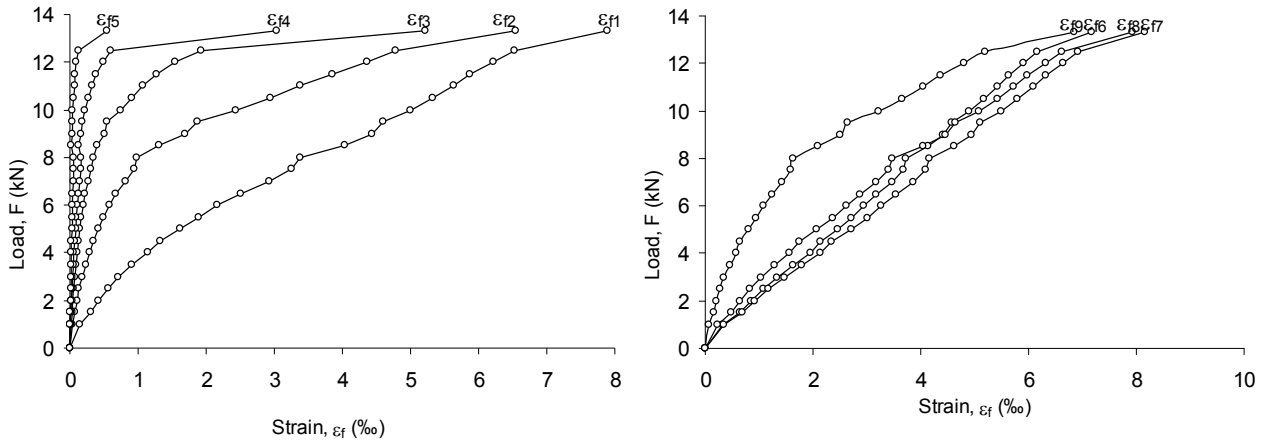




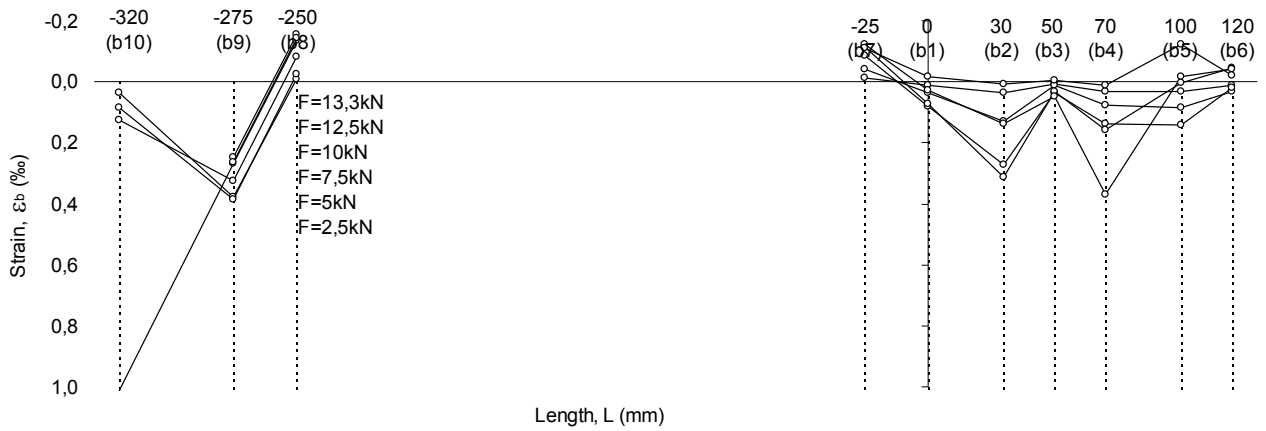
Z22.2 FRP strain



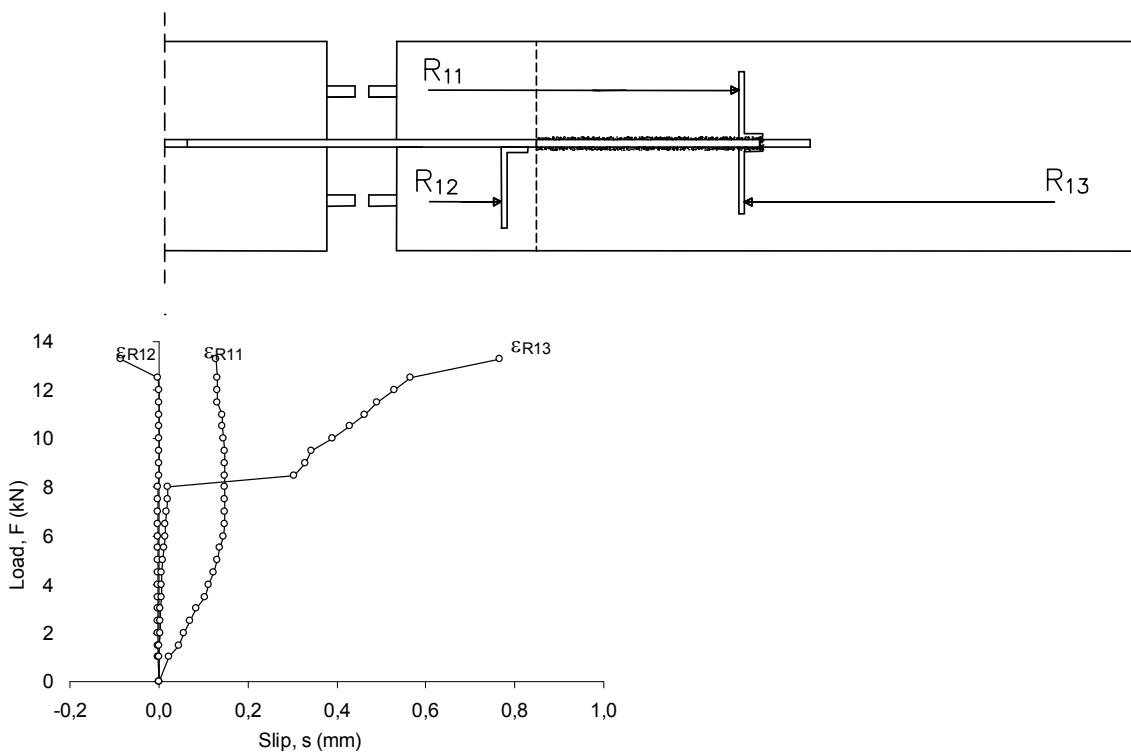
Z22.3 FRP strain



Z22.4 Concrete strain (strain gauges on tensile concrete surface)

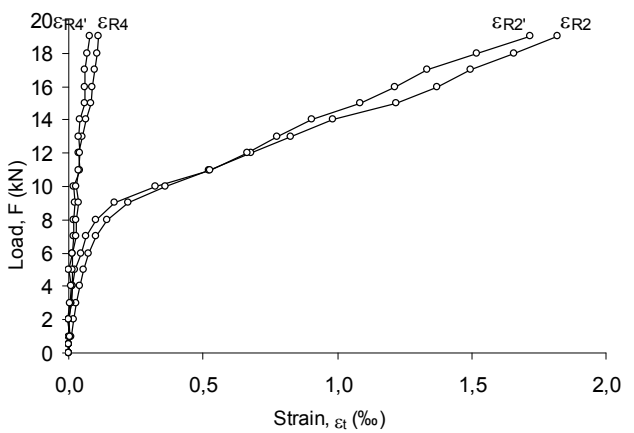
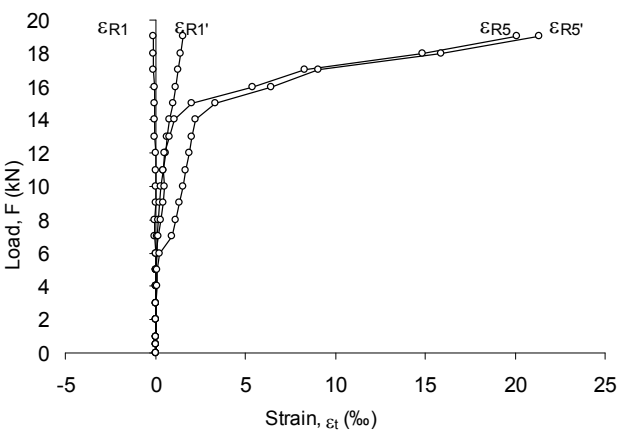
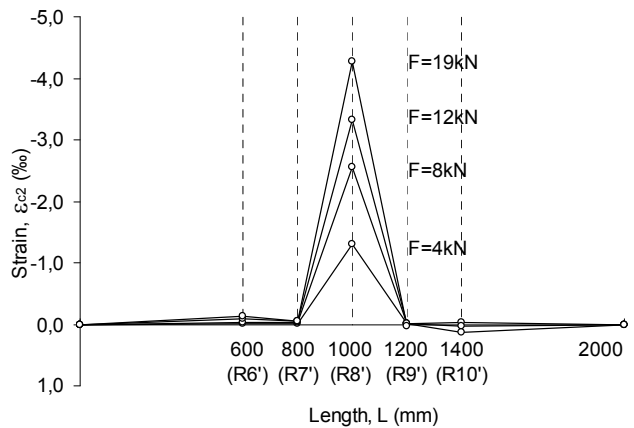
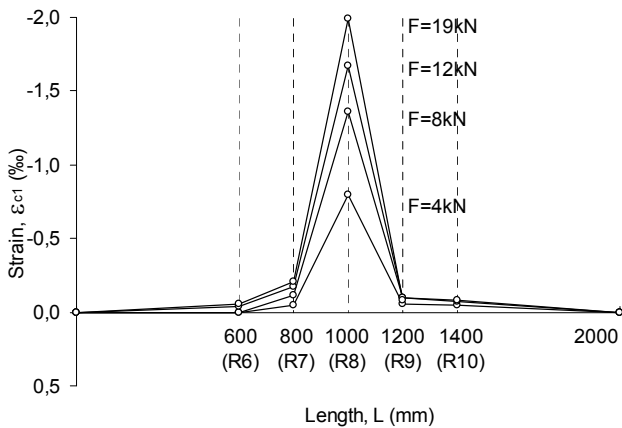
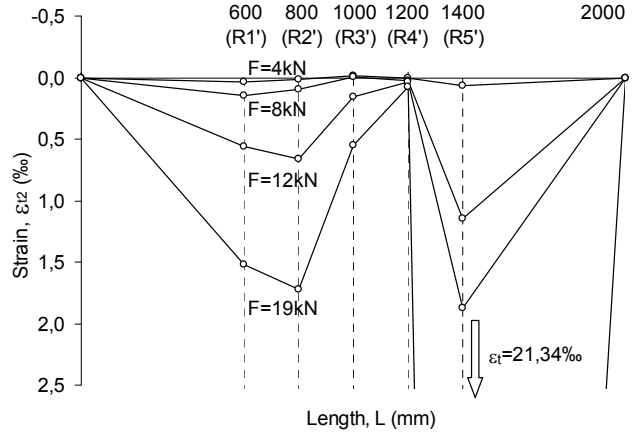
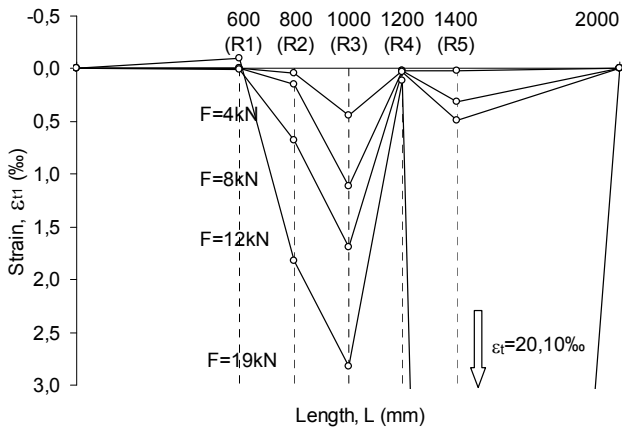
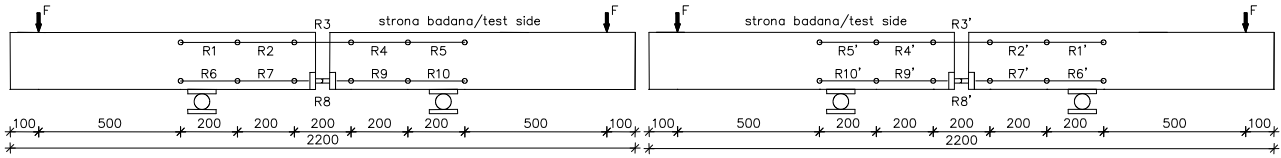


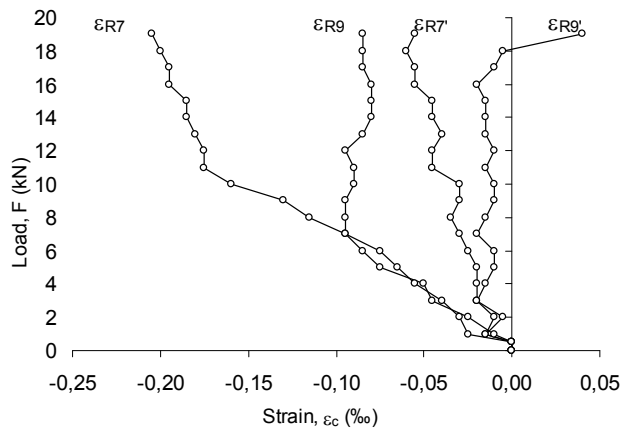
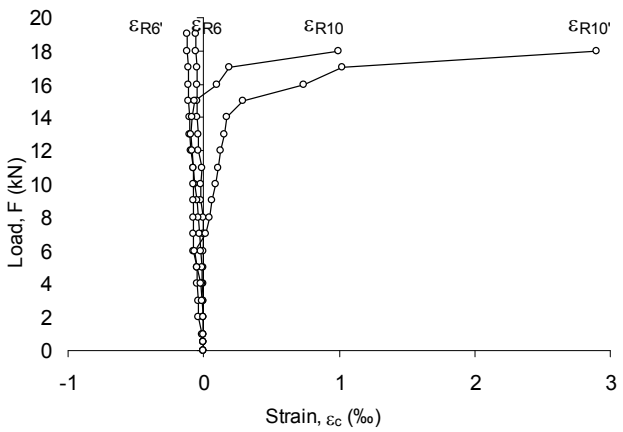
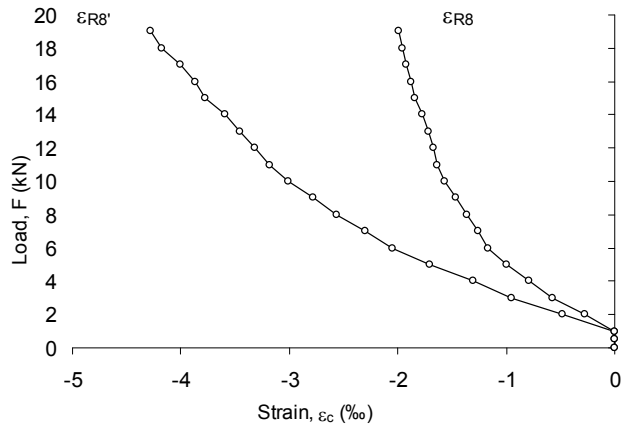
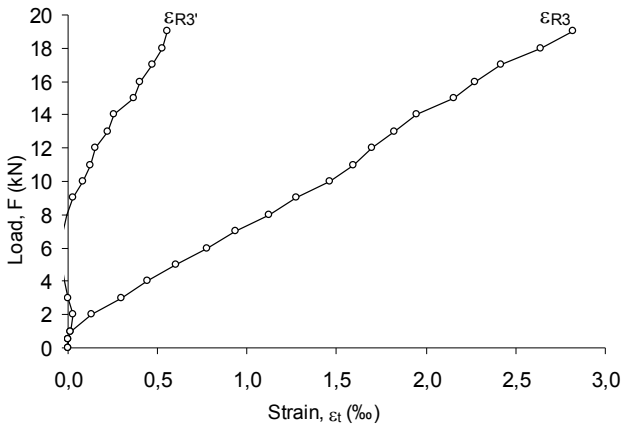
Z22.5 FRP slip / displacement



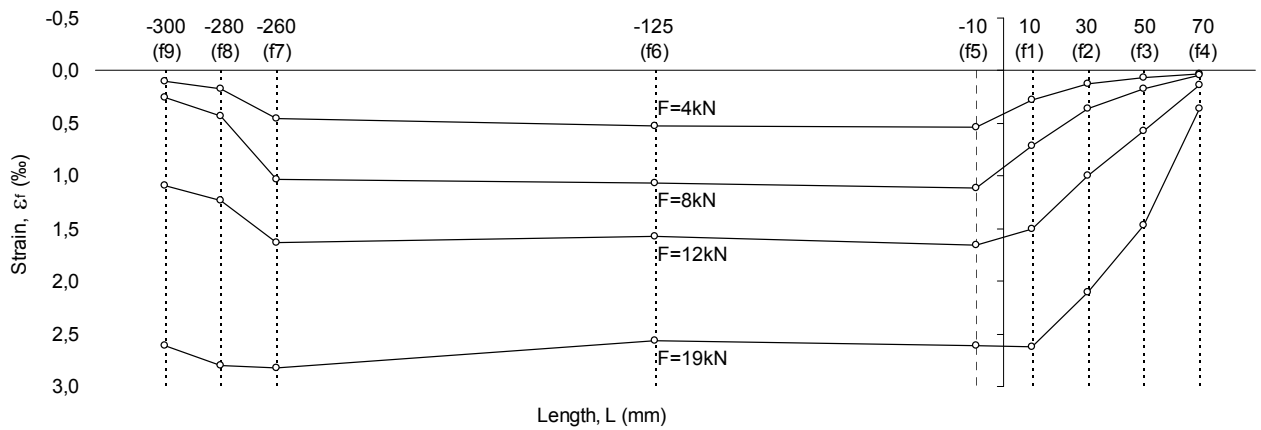
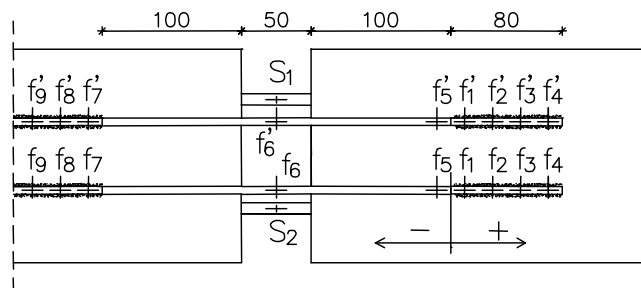
L=2200mm, H=200mm

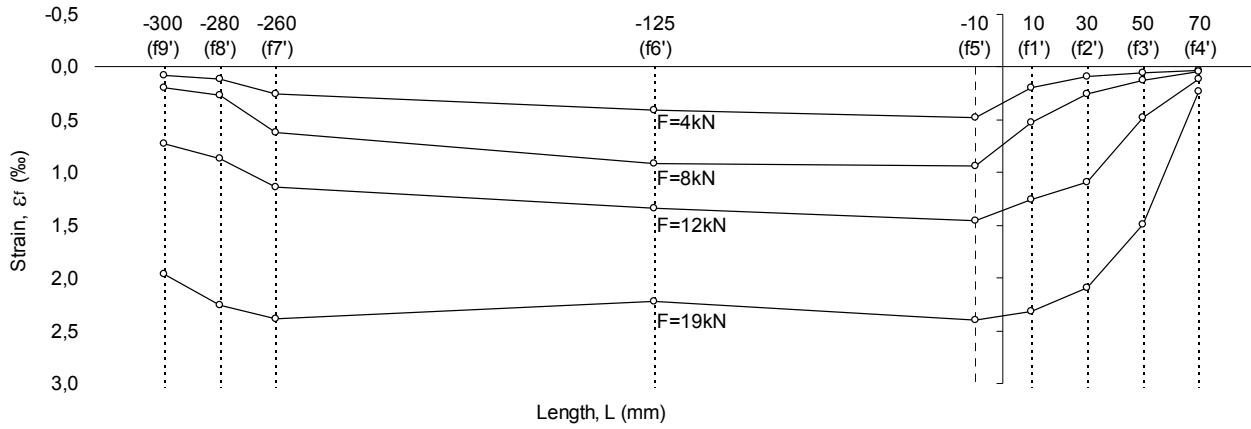
Z28.1 Concrete strain



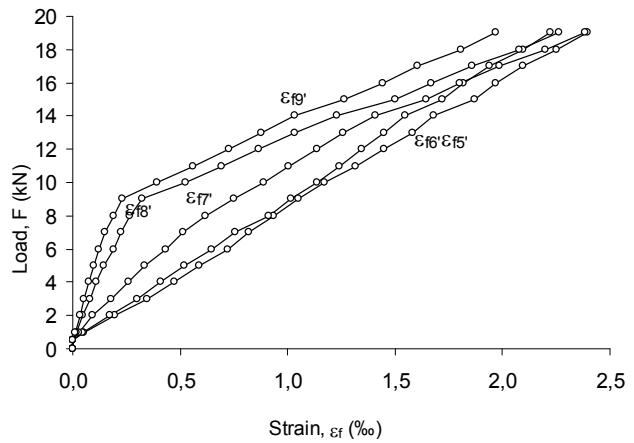
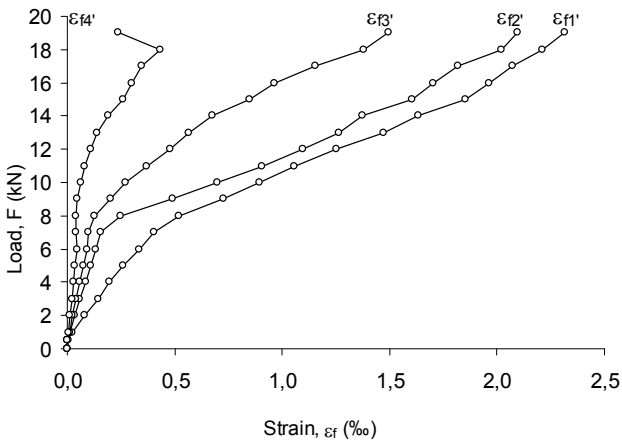
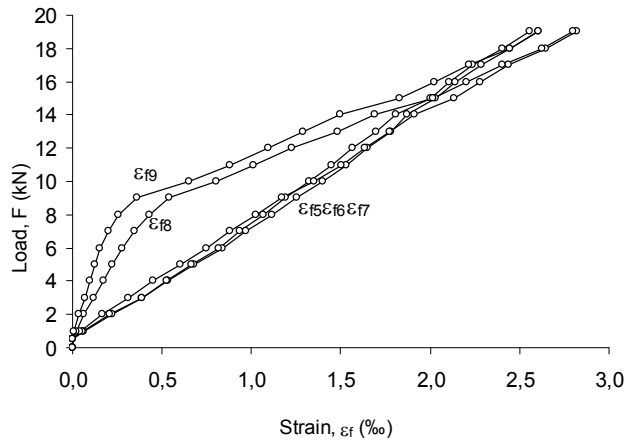
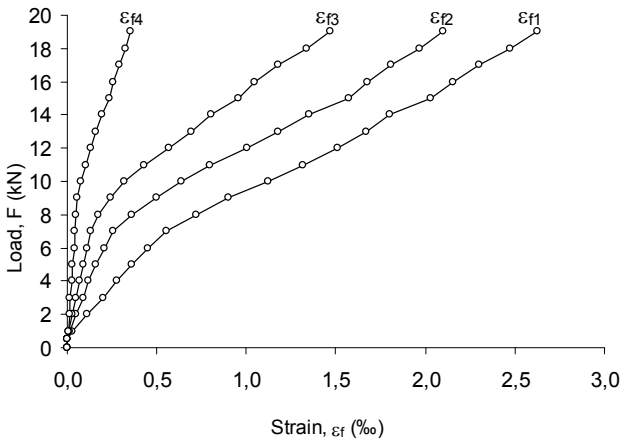


Z28.2 FRP strain





Z28.3 FRP strain



Z28.4 Steel strain

