ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: BUDOWNICTWO z. 93 Nr kol. 1514

Marcin GÓRSKI*
Politechnika Śląska

EFEKTYWNOŚĆ NAPRAW ZNISZCZONYCH ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH ZA POMOCĄ LAMINATÓW ZBROJONYCH WŁÓKNAMI WĘGLOWYMI

Streszczenie. W poszukiwaniu niezawodnego i łatwego w aplikacji sposobu naprawy i wzmacniania istniejących konstrukcji sięgnięto po zaawansowaną technologię włókien węglowych. Referat prezentuje obserwacje badań laboratoryjnych przeprowadzonych na żelbetowych elementach belkowych. Belki poddane obciążeniu doprowadzono do kontrolowanego zniszczenia, które zgodnie z postanowieniami normy można uznać za kompletne. Elementy naprawiono wzmacniając je matami z włókien węglowych i ponownie zniszczono.

EFFECTIVENESS OF REPAIRS OF DAMAGED R.C. MEMBERS BY MEANS OF CFRP LAMINATES

Summary. In order to seek for an effective and easy in applying method of retrofitting and strengthening of existing concrete structures some laboratory tests were carried out on a set of RC beam models. The paper presents the results and observations of tests performed on the beams failed and repaired by using carbon fibre reinforced composites.

1. Wstęp

W ostatnich latach niezwykle istotnym zagadnieniem stał się problem rewitalizacji konstrukcji i wzmacniania ich elementów nośnych. W celu spełnienia wymagań rynku prac inżynierskich opracowano szereg nowych technologii. Jedną z najatrakcyjniejszych wydaje się metoda wzmacniania elementów konstrukcji za pomocą kompozytów zbrojonych włóknami o wysokiej wytrzymałości. Metoda ta pozwala bowiem na dokonywanie szybkich napraw zagrożonych elementów, bez ingerencji w ich strukturę oraz zmiany ich geometrii i wymiarów. Istnieje wiele powodów, by uznać opracowanie naprawy i wzmacniania istniejących elementów betonowych za na tyle istotne, by podjąć się prób ilościowego określenia wpływu

* Opiekun naukowy: Prof. dr inż. Andrzej Ajdukiewicz.

wzmocnienia kompozytami. Do przyczyn należy zaliczyć problemy spotykane na co dzień w praktyce inżynierskiej, tj.:

- błędy projektowe,
- imperfekcje wykonawcze, np. niedostateczna otulina prętów lub brak prętów, co powoduje zarysowanie konstrukcji,
- zmiana sposobu eksploatacji obiektu, co przynosi zmianę wielkości lub rozkładu obciążeń,
- zmiana schematu statycznego w czasie prac renowacyjnych,
- agresywne środowisko, na które konstrukcja jest narażona.

Praktyka dowodzi, iż maty węglowe, mimo ich krótkiej historii na światowym rynku, cieszą się dużym uznaniem i są chętnie stosowanym materiałem do wzmocnień. Eksperci i projektanci wzmocnień nie mają jednak procedur obliczeniowych, które umożliwiłyby efektywne i bezpieczne wzmocnienie. Próby opracowania takich procedur zostały podjęte w wielu ośrodkach naukowych i wdrożeniowych. Procedury te rozpatrują jednak proste stany naprężeń.

Obecne prace w ośrodkach polskich nie zdeterminowały do tej pory zwartego aparatu obliczeniowego do zastosowań technicznych wzmocnień, uwzględniającego współpracę betonu z wiotkimi nakładkami z laminatów na bazie włókien węglowych.

W celu skutecznego wykonywania wzmocnień za pomocą mat z włókien węglowych potrzebne jest rozpoznanie doświadczalne i opracowanie statystyczne skuteczności poszczególnych metod wzmacniania uszkodzonych elementów konstrukcji betonowych, jak również określenie cech wytrzymałościowych samych laminatów.

2. Cel i zakres badań laboratoryjnych

Podstawowym celem przeprowadzonych badań jest obserwacja zachowania się zniszczonych i następnie naprawionych elementów oraz ustalenie wpływu wzmocnienia laminatem na bazie włókien węglowych. Badania opisane poniżej są częścią planowanych kompleksowych badań rozpatrujących zachowanie się wzmocnionych elementów w złożonych stanach naprężeń.

Wstępnym celem podjętych prac było przygotowanie stanowisk badawczych do kompleksowych badań laminatów i wzmocnionych elementów.

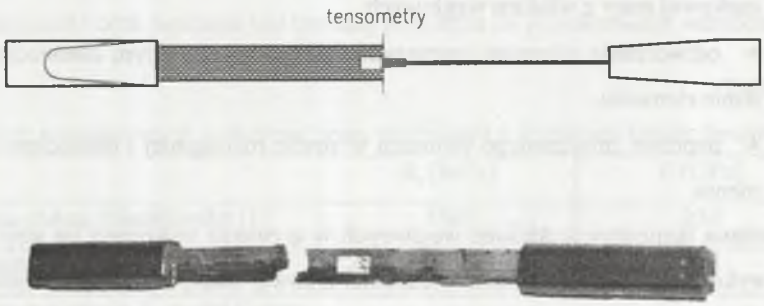
W ramach opisanej tu pierwszej fazy projektu badawczego ograniczono się do następujących zadań:

- opracowanie oprzyrządowania do badań kompozytów w zrywarce;
- zaprojektowanie i przetestowanie kalibrujące modelu oprzyrządowania pomiarowego dla elementów betonowych niszczonych „na ścinanie" i wzmocnionych laminatem z mat z włókien węglowych;
- wstępne badania właściwe pierwszej serii belek niszczonych przez ścinanie.

3. Opis badań

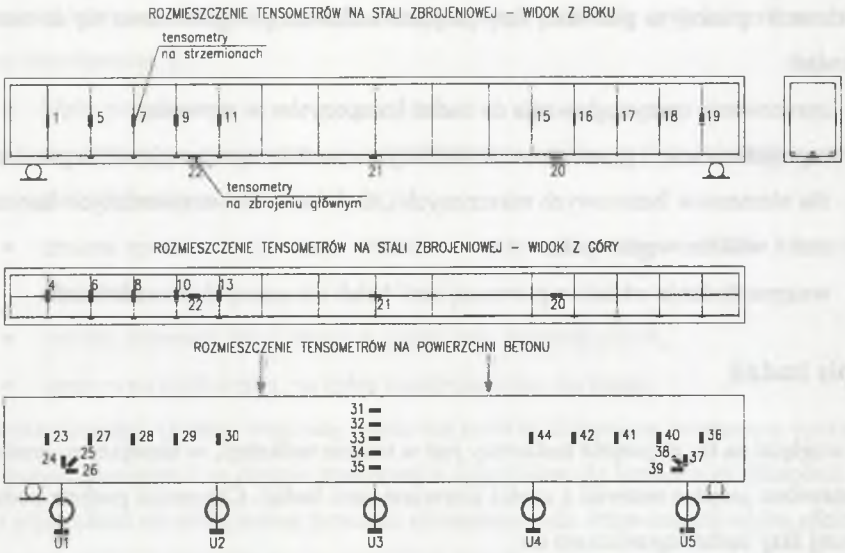
Ze względu na to, że projekt badawczy jest w trakcie realizacji, w niniejszym opracowaniu przedstawiono jedynie materiał z części pierwszej serii badań. Czynności podjęte podczas tej pierwszej fazy badań ograniczono do:

- wykonania wielu prób sposobu uchwycenia próbek laminatu w zrywarce; w wyniku tych badań ustalono kształt i wymiary uchwytów oraz ustalono optymalny sposób rozmieszczenia czujników tensometrycznych na próbkach (rys.1),



Rys. 1. Schemat badania laminatu i obraz zniszczenia
Fig. 1. Scheme of laminate test and picture presenting form of its failure

- wykonanie belkowego elementu żelbetowego; (elementy o wymiarach 0,2x0,3x3 m, beton o wytrzymałości kostkowej 36 MPa). Schemat oprzyrządowania pomiarowego elementu przedstawiono na rysunku 2; wykorzystano czujniki tensometryczne do pomiaru poziomu odkształceń (na zbrojeniu podłużnym i poprzecznym oraz na powierzchni betonu) oraz czujniki zegarowe do pomiaru przemieszczeń,



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia tensometrów i czujników do pomiaru ugięć
Fig. 2. Lay-out of strain gauges and deflectometers

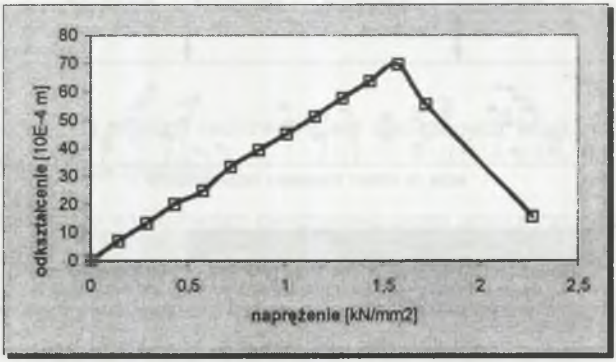
- naprawa zniszczonego elementu z użyciem iniekcji kompozycji epoksydowych i wzmocnienie za pomocą laminatu z dwóch ortogonalnie ułożonych warstw jednokierunkowej maty z włókien węglowych,
- odtworzenie schematu oprzyrządowania w naprawionym elemencie i ponowne badanie elementu,
- naprawa zniszczonego elementu w strefie rozciąganej i ostateczne zniszczenie elementu.

Badania laminatów z włókien węglowych w zrywarce wykonano na serii 6 próbek laminatu wykonanego z dwóch warstw jednokierunkowej maty, ułożonej ortogonalnie. Ten sposób aplikacji maty zalecany jest przez producenta; producent nie podaje jednak charakterystyk fizykalnych takiego laminatu.

Cechami zmiennymi w badaniach kolejnych próbek były:

- długość osadzenia w uchwytach,
- szerokość próbki,
- sposób obciążania (poziom siły w kolejnych krokach realizacji obciążenia),
- sposób ułożenia oprzyrządowania pomiarowego.

Skuteczność przyjętego schematu sprawdzono na 4 kolejnych próbkach laminatu. Wyniki badań tych elementów uznano za satysfakcjonujące, tzn. identyczność krzywej $\sigma - \varepsilon$, zbliżone wartości modułu sprężystości i naprężeń granicznych.



Rys. 3. Zależność $\sigma - \varepsilon$ dla typowej próby rozciągającej
Fig. 3. Relation $\sigma - \varepsilon$ for typical CRFP laminate tension test

W tablicy 1 przedstawiono porównanie otrzymanych rezultatów badań laminatu z danymi materiałowymi podanymi przez producenta. Producent nie podaje jednak wartości cech fizykalnych laminatu na bazie włókien węglowych i żywic epoksydowych, lecz samej maty. W ten sposób należy tłumaczyć rozbieżności pomiędzy prezentowanymi wartościami. Wydaje się jednak, że znajomość cech laminatu jest bardziej przydatna do projektowania wzmocnień.

Tablica 1

Porównanie cech materiałowych podanymi przez producenta z wynikami testów laminatu

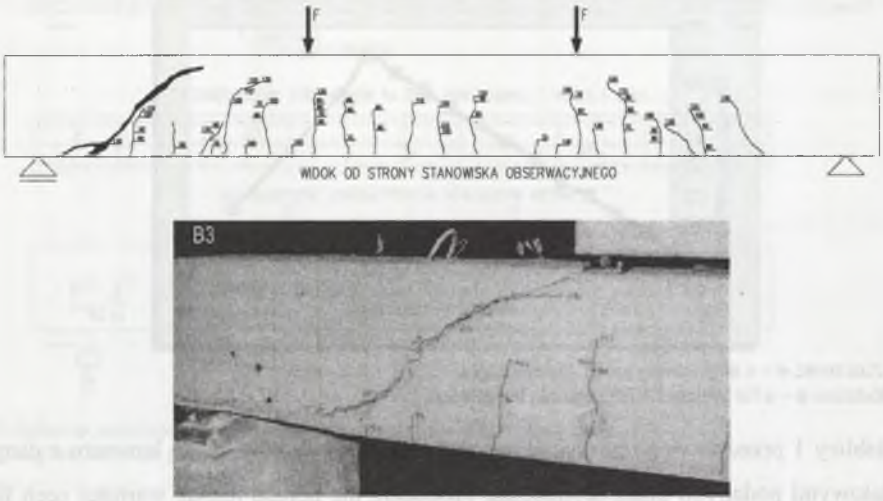
	R_e [MPa]	E [GPa]
Dane producenta (Mata SikaWrap®) [1]	3500	230
Uśrednione wyniki badań	2160	225

R_e – wytrzymałość na rozciąganie, E – moduł Younga

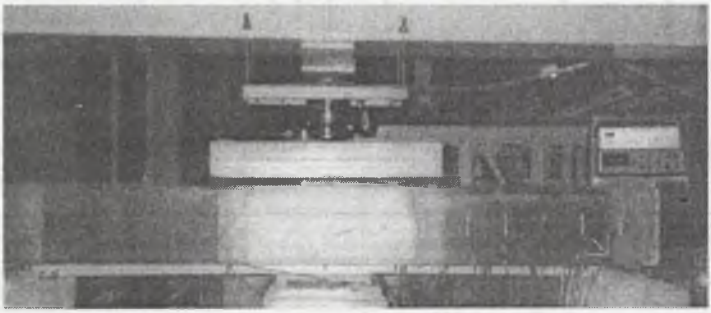
Badania zginanej i ścinanej belki żelbetowej stanowią pierwszy etap. Wybrano schemat obciążenia dwiema szeroko rozstawionymi siłami w celu poddania elementu wpływowi zginania ze znacznym udziałem sił tnących i doprowadzenia do jego zniszczenia przez ścinanie. Zadanie to ułatwiło celowe niedozbrojenie elementu na ścinanie. Na strzemionach umieszczono tensometry w celu późniejszej analizy udziału zbrojenia poprzecznego i laminatu w przenoszeniu sił tnących.

Belka została zniszczona w sposób zgodny z oczekiwaniami przy sile obciążającej równej 2F=130 kN. Zniszczony w ten sposób element (z rysą w strefie przypodporowej o rozwarciu

ponad 20 mm – rys. 4) został naprawiony za pomocą kompozycji epoksydowej i następnie wzmocniony dwiema warstwami maty z włókien węglowych SikaWrap®. Wzmocnienie zostało zaaplikowane w strefach ścinanych (rys.5).



Rys. 4. Obraz zniszczenia na przykładzie belek MB i B3
Fig. 4. Failure of the element shown for MB and B3 beams



Rys. 5. Wzmocnienie strefy przypodporowej dla modelu MB
Fig. 5. Strengthening of support zone in beam model MB

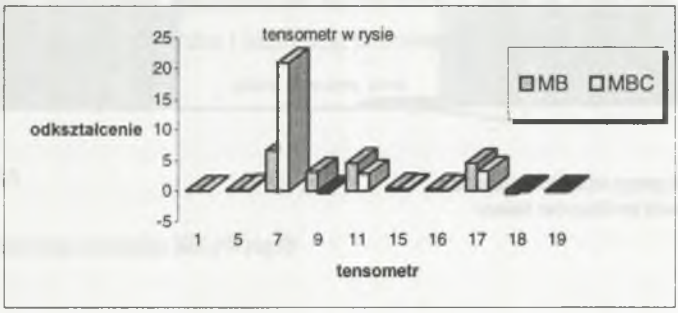
Po wzmocnieniu odtworzono oprzyrządowanie pomiarowe i ponowiono próbę, obciążając belkę w założonym poprzednio schemacie. Osiągnięto poziom siły niszczącej wyższy o ponad 20 kN (tzn. ok. 15%) od siły niszczącej model wyjściowy.

Analogiczną procedurę powtórzono w kolejnych trzech modelach belkowych. Elementem zmiennym był sposób wzmocnienia. Pierwszy element został wzmocniony poprzez „owinięcie" belki dwiema warstwami maty; w kolejnych modelach zdecydowano się na stopniowe redukowanie wzmocnienia. Przyjęte schematy prezentuje rysunek 6.

Rys. 6. Rodzaje wzmocnienia
Fig. 6. Types of strengthening

Podczas porównawczej analizy zachowania się obciążonych belek przed i po naprawie zaobserwowano następujące zjawiska:

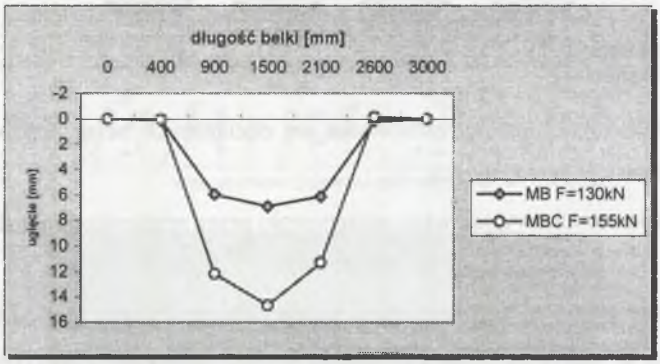
- zniszczenie modelu wyjściowego następowało przez przekroczenie nośności na ścinanie,
- zniszczenie elementu naprawionego i wzmocnionego (niezależnie od sposobu naprawy – rys. 6) następuje przez zniszczenie strefy rozciąganej; zmierzono wysokie odkształcenia prętów zbrojenia podłużnego (wielkość odkształcenia wzrosła o 110%), przy których naprężenia osiągnęły poziom ok. 770 MPa,
- niewielkie odkształcenia zarówno na powierzchni betonu, jak i wzmocnienia, w związku z czym zrezygnowano z umieszczania tensometrów w założonym układzie,
- po wzmocnieniu nastąpił wyraźny spadek naprężeń w zbrojeniu poprzecznym obciążonych elementów, co ilustruje wykres przedstawiony na rys.7. Wykres przedstawia sytuację z badań belki modelowej w chwili zniszczenia elementu; w przypadku badań pierwotnych podano odczyt dla 2F=130,9 kN, dla belki naprawionej odczyt dla 2F=154,8 kN. Wstępnie można oszacować spadek naprężeń w prętach zbrojenia poprzecznego na poziomie 0,75 wytężenia z pierwszego badania.



Rys. 7. Rozkład odkształceń na strzemionach przed i po wzmocnieniu w chwili zniszczenia elementu
Fig. 7. Stirrups' strain distribution at failure with and without strengthening

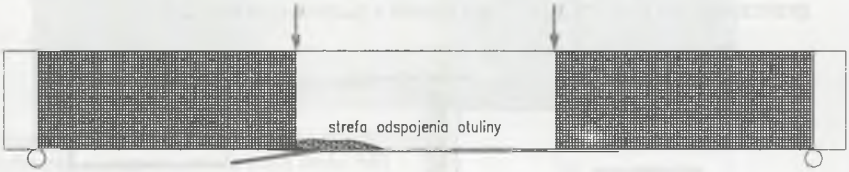
Skok odkształceń na trzecim strzemieniu (tensometr nr 7) spowodowany jest przejściem przez ten przekrój rysy niszczącej, a nieregularność odczytów wiąże się z nieuniknionym uszkodzeniem partii tensometrów;

- wyraźny wzrost ugięć przy niewyczerpanej nośności elementu wzmocnionego (rys. 8),



Rys. 8. Porównanie ugięć dla belki przed i po wzmocnieniu
Fig. 8. Deflection lines for the beam before and after strengthening

- po próbach dokonanych na elementach naprawionych powtórnie, tym razem, po wzmocnieniu laminatem strefy rozciąganej, zaobserwowano zmianę sposobu redystrybucji naprężeń; wyczerpaniu nośności ulegała strefa ściskana betonu. Zniszczenie (na poziomie $2F_{max}$=180 kN) następowało jednak przez zniszczenie laminatu. Wyróżniono dwa schematy zniszczenia laminatu (rys.9):
  - rozerwanie,
  - odspojenie jednego z brzegów laminatu wraz z otuliną



Rys. 9. Zniszczenie przez odspojenie laminatu
Fig. 9. CFRP laminate peeling-out failure

4. Wnioski

- Pierwsze wyniki badania skuteczności napraw za pomocą mat z włókien węglowych zniszczonego elementu i sprawdzenie poziomu siły niszczącej dowodzi dużych możliwości wzmocnień z włókien węglowych w zastosowaniach inżynierskich i tłumaczy zainteresowanie autora tą tematyką.
- Badania pozwoliły na sprawdzenie, korektę i przyjęcie stanowisk pomiarowych do badań laminatów w zrywarce i badań elementów żelbetowych wzmocnionych takim laminatem.
- Na podstawie badań w zrywarce określono parametry wytrzymałościowe laminatów z włókien węglowych.
- Prace badawcze skierowane były na optymalizację kompleksowego wzmocnienia elementu. Efektywność wzmocnienia modelu w schemacie B3 daje niemal takie same rezultaty, jak całkowite „owinięcie" stref przypodporowych.
- Istotnym elementem efektywnego wzmocnienia wydaje się zakotwienie poziomego wzmocnienia strefy rozciąganej we wzmocnieniu strefy ścinanej. Z obserwacji wynika, że powinno ono wynosić mniej więcej tyle ile, szerokość aplikowanego wzmocnienia, nie powinno być jednak mniejsze niż połowa tej szerokości. W przypadku niespełnienia tego warunku następuje odspojenie maty – oznacza to niewykorzystanie pełnej nośności wzmocnienia.
- Pierwsza seria badań stanowi bazę do wykonania kolejnej serii, w której kluczową rolę odgrywać będzie skręcanie; tak przygotowany materiał badawczy pozwoli na dalsze rozważania teoretyczne i kalibrację budowanego modelu numerycznego.

LITERATURA

1. Karta techniczna systemu SikaWrap®

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski

Abstract

Observed mechanisms of failure help to establish most effective way of complementary strengthening of beams subjected bending and shearing influence. Strain gauges placed on shear and main reinforcement allow to determine the distribution of stresses in tested RC beam before and after repairing and strengthening. Noted in the moment of failure stresses in stirrups have decreased after strengthening sheared zones to the level of 75% of those from the original test; additionally it has been observed, that the results does not differ much for the sections bonded around and those strengthen in reduced form – U. So repaired elements shall be additionally strengthen in tensioned zone, for strengthening support zones causes change of stress distribution and failure mechanism. Anchoring of laminate reinforcing tensioned zone seems to be essential problem; insufficient overlapping cause it's pilling-out correlated with damaging concrete cover.

Performed tests' results prove necessity of considering advanced composites during the process of choosing and designing methods of repairing. In the expanding range of structure retrofitting based on non-metallic materials, CRFP composite mates may be considered as very promising alternative to classic methods for its high resistance and durability connected with easiness of application.