

Wzmacnianie płaskich elementów stalowych materiałami kompozytowymi FRP FRP composite materials strengthening of flat steel elements

Marek Łagoda¹, Maciej Kowal^{2*}

¹ Instytut Badawczy Dróg i Mostów,
Road and Bridge Research Institute
ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa
e-mail: mlagoda@ibdim.edu.pl,

² Katedra Dróg i Mostów, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
Department of Road and Bridge, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology,
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin
e-mail: m.kowal@pollub.pl

Streszczenie

Artykuł opisuje badania wpływu wzmocnienia płaskich elementów stalowych materiałami kompozytowymi FRP. Badano wpływ zmian geometrii końca złącza na zachowanie się trzypunktowo zginanych płaskowników stalowych, wzmocnionych jednostronnymi nakładkami z taśm węglowych. Przedstawiono wyniki badań, które pokazały, że zastosowanie tradycyjnych analiz obliczeniowych jest niewystarczające i może mieć negatywny wpływ na wzmocnienie. Opisano wnioski i przedstawiono plan dalszych prac nad wzmocnianiem elementów stalowych taśmami CFRP.

Abstract

Article describes experiments on the effect of FRP strengthening of flat steel elements. The influence of changing of bond end geometry on behaviour of steel bars reinforced by CFRP patch under three point bending. The test results showed that use of traditional computational analysis is inadequate and may have a negative impact on strengthening. Conclusions and plan of further works on steel elements CFRP strengthening were described.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, wzmacnianie, stal, kompozyty FRP, kształtowanie złącza
Keywords: metallic structures, strengthening, steel, FRP composites, bond end shaping

5. Wstęp

Doklejanie kompozytów FRP do konstrukcji metalowych jest obecnie przyjętą praktyką w Europie (szczególnie w Wielkiej Brytanii). Biorąc pod uwagę cenę jednostkową w porównaniu z materiałami konwencjonalnymi, CFRP jest materiałem drożym. Jednak przy porównaniu i analizie kosztów stosowania różnych materiałów, bardzo ważne jest aby cena jednostkowa nie była jedyną podstawą. Wysoka wytrzymałość i mała masa jednostkowa FRP powoduje, że do ich aplikacji wymagany jest mniejszy nakład materialny na sprzęt i roboty towarzyszące. Dodatkowo, doskonała trwałość FRP powoduje, że koszty utrzymania są niższe. Konsekwentnie, podstawą służącą analizom porównawczym powinien być oczekiwany cykl życia konstrukcji. Kompozyty polimerowe (FRP) są używane w konstrukcjach metalowych w celu podnoszenia sztywności i nośności konstrukcji. Ogólnie wiadomo, że aktualny stan wiedzy w tej dziedzinie nie jest tak rozległy jak w przypadku konstrukcji z betonu lub konstrukcji murywanych. Aktualnie dobrze opisane są zastosowania jednostkowe. Obecne, polskie badania reprezentują wstępne kroki do określenia projektowych wskazówek [2,3,4]. Skutki tych badań są przydatne w identyfikowaniu nie wszystkich problemów, część z nich nadal pozostaje nierozwiązana, co wymaga koncentracji się na nich w ciągu następnych kilku latach.

1. Introduction

The bonding of FRP composites to metallic structures is now accepted practice in Europe (especially in the UK). CFRP is an expensive material when compared weight-for-weight with conventional materials. It is important not to carry out comparative cost analysis between FRP and conventional materials on such a basis. The high strength and light weight of FRP means that much less material is required and thus the amount of false work, lifting gear and labour required is reduced. Additionally, the excellent durability of FRP means that maintenance costs are lower. Consequently, comparisons need to be made on the basis of expected life cycle. Fibre reinforced polymer composites (FRP) are used for stiffening and strengthening metallic structures. It is also well-known that the current state-of-the-art on this topic is not as advanced as that of concrete or masonry constructions. In fact, adequate solutions are currently available only for a few specific applications. The present Polish studies represents the first step towards the definition of specific design guidelines [2,3,4]. The results of this studies will be useful in identifying any problems that still remain unresolved, to concentrate upon them over the next few years.

* Autor jest uczestnikiem projektu „Kwalifikacje dla rynku pracy – Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. Autorzy pragną podziękować firmom S&P Polska Sp. z o.o. oraz Mota-Engil Central Europe S.A. za nieodpłatne udostępnienie materiałów do badań. Badania laboratoryjne przeprowadzono w ramach środków statutowych Katedry Dróg i Mostów Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej (S-50/B/2012).

6. Badania laboratoryjne

6.1. Materiały

Do badań wykorzystano płaskowniki stalowe 1000 x 100 x 12 mm ze stali klasy S235JR+AR, taśmy S&P CFK-Lamellen 200/2000, 60x1,4 mm oraz systemowego kleju S&P Resin 220.

6.2. Przygotowanie próbek

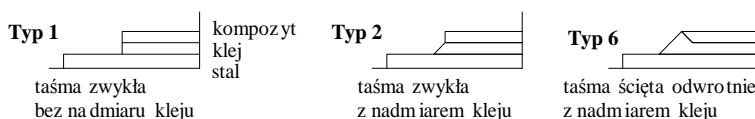
Przygotowano 19 próbek i poddano trzypunktowemu zginaniu. Każda próbka składała się z płaskownika stalowego (1000 x 100 x 12 mm) wzmocnionego za pomocą przyklejonej do spodniej płaszczyzny na żywicę epoksydową nakładki z taśmy węglowej (600 x 60 x 1,4) z różnymi typami ukształtowania geometrii końca taśmy zgodnie z Rys.1.

6.3. Oprzyrządowanie próbek

Po dwie próbki z każdego typu poddano badaniom z użyciem tensometrów. Jedna z próbek każdego typu, oklejona została symetrycznie względem środka rozpiętości tensometrami w liczbie 17 sztuk, a druga z próbek 10 sztukami tensometrów z jednej strony.

7. Program badawczy

Użyto uniwersalnej maszyny badawczej (Zwick&Roel). Badania przeprowadzono kontrolując przyrost siły przy stałym wzroście 100N/s, aż do zniszczenia złącza. Głównym celem badania było określenie jak dostępne metody projektowe mają odzwierciedlenie w rzeczywistości na obliczanie wzmocnienia taśmą CFRP płaskiego elementu stalowego przy zginaniu [1, 4].



Rys. 1. Schematy kształtów zakończenia spiny
Fig. 1. Bond end geometry schemes

4. Wyniki badań i ich omówienie

4.1. Założenia

Badanie miało na celu określenie, czy znane dostępne metody projektowe mogą być użyte do projektowania wzmocnienia płaskiego elementu stalowego podczas zginania.

Jako próbkę odniesienia traktowano płaskownik stalowy o wymiarach 1000x100x12 mm. Ograniczenie naprężeń w płaskowniku porównywano w środku rozpiętości próbki (punkt 1) oraz w pobliżu końca wzmocnienia (punkt 5). Naprężenie teoretyczne i pomierzone sprawdzano na dolnej powierzchni płaskownika oraz taśmy wzmacniającej.

W analizach teoretycznych założono, że wzmocniony przyklejoną taśmą CFRP płaskownik stalowy będzie zachowywał się jak przekrój zespolony stal-kompozyt o idealnym zespoleniu.

4.2. Wyniki

Opracowując wyniki 6 oprzyrządowanych wzmocnionych próbek zauważono, że w zależności od typu próbki zmieniały

2. Laboratory tests

2.1. Materials

Steel (S235JR+AR) plates with 1000 x 100 x 12 mm dimensions, CFRP plates S&P CFK-Lamellen 200/2000) with 60 x 50 x 1,4 mm dimensions, and S&P Resin 220 were used in specimens preparation.

2.2. Specimens preparation

19 specimens were prepared and tested under three point bending. Each specimen consisted of flat steel bars (1000 x 100 x 12 mm) reinforced by bonded with epoxy resin to the bottom plane of the plate carbon ribbon (600 x 60 x 1.4) with the different geometry of the CFRP plate end, shown in Fig.1.

2.3. Instrumentation

Two specimens of each type were tested using strain gauges. One of the specimen of each type instrumented symmetrically relative to the center by 17 strain gauges and the other with 10 strain gauges on one side.

3. Research program

Universal laboratory test machine (Zwick&Roel) was used in specimens testing. The study was conducted by controlling the strength increase with 100N/s growth, until the destruction of the joint. Aim of these study was to determine how the available methods of design are reflected in the flexural CFRP strengthening of flat steel element [1, 4]

4. A experimental results and discussion

4.1. Assumptions

The research was conducted to determine whether the known available design methods can be used to designing of CFRP strengthening of the flat steel elements under bending.

A flat steel bar with dimensions 1000x100x12 mm was treated as a reference specimen. Reducing the stresses in the steel bar in the middle of the span compared to the sample (point 1) and near the end of the reinforcement (point 5). The theoretical and measured stress was checked on the lower surface flat and the strengthening tape.

The theoretical analyzes assumed that the CFRP reinforced steel bar behaved as composite steel-CFRP cross-section with the perfect fusion.

4.2. Results

Developing the results of six specimens with strain gauges noted that the gain levels varied depending on the type of the specimen. Least results fared reinforcing Type 1 and Type 6

się poziomy wzmocnienia. Najślabiej wypadły wyniki wzmocnienia Typ 1, a najlepiej Typ 6, zresztą zgodnie z założeniami.

Zauważono odchylenia poszczególnych wyników od średnich wyników próbek danego typu. Wynosiły one -12,7÷12,7 %, -31,3÷31,37% oraz -3,1÷3,1% odpowiednio Typ 2.1, 2.2 i 2.6. Z powodu niewielkiej ilości oprzyrządowanych próbek (która pozwala tylko na delikatne szacowanie wyników), do opracowania wyników próbek zakwalifikowano wszystkie wyniki badań laboratoryjnych. Jako główną przyczynę rozbieżności przyjęto wpływ złożoności składu materiałowego wzmocnionej próbki (stal, klej i kompozyt CFRP). Wyniki pokazały, że ilość przebadanych próbek z oprzyrządowaniem jest za mała, aby możliwe było jednoznaczne stwierdzenie wpływu wzmocnienia na ograniczenie naprężeń w zginanej próbce.

Naprężenia wyznaczone na podstawie pomiarów odkształceń postaciowych mierzonych za pomocą tensometrów, różniły się od założeń. W stosunku do zakładanego poziomu wzmocnienia taśmą CFRP okazało się, że pomierzone naprężenia różniły się od zakładanych o -51,0÷+54,6%, a średnio były większe o 13,4 % w stosunku do próbki porównawczej, chociaż przy tak dużych rozrzutach wyników nie powinno się brać pod uwagę średniej, a jedynie stwierdzić duże rozbieżności tychże wyników. Zatem ograniczenie naprężeń po zastosowaniu wzmocnienia było w większości przypadków pomiarów w punktach 1 i 5 było mniejsze od zakładanego.

Analizując uzyskane w badaniach naprężenia wzmocnianych próbek w stosunku do uzyskanych teoretycznie naprężeń próbki porównawczej, dało się zaobserwować wpływ wzmocnienia taśmą CFRP na ograniczenie naprężeń. Najślabsze wyniki uzyskano w przypadku wzmocnienia Typ1, gdzie nie uzyskano wzmocnienia a osłabienie. Może być jednak spowodowane słabym przygotowaniem oprzyrządowania. W przypadku wzmocnienia Typ 2, uzyskano ograniczenia naprężeń na poziomie 0,3÷6,7%, jednakże wynik nadal nie jest zadowalający w odniesieniu do zakładanego, który jest niższy o 27,3÷36,1%. Najlepsze, chociaż nie dość satysfakcjonujące wyniki uzyskano w przypadku wzmocnienia Typ 6. Ograniczenie naprężeń osiągnęło w tym przypadku poziom 7,3÷13,6%. Jest to jednak o 18,0÷26,5% mniej od wyznaczonego teoretycznie. Wyniki zestawiono w Tabeli 1.

was the best, anyway according to assumptions.

It has been observed deviations from the average of the individual sample results given type. They amounted to -12.7 ÷ 12.7% -31.3 ÷ 31.37% and -3.1 ÷ 3.1% respectively, Type 2.1, 2.2 and 2.6. Because of the small amount of instrumented specimens, all sample results were qualified to elaboration of the laboratory results. The main reason for discrepancies assumed impact of complexity of the material composition of the sample (steel, adhesive and CFRP). The results showed that the number of tested with instrumentation specimens insufficient. It was impossible to unambiguously determine the effect of strengthening on the reduction of stress in the specimen under three point bending.

The strains results measured by the strain gauges, differ from the assumptions. In relation to the assumed level of CFRP strengthening turned out that the measured strain differed from assumptions about -51,0 ÷ 54,6%. On average experimental results were higher by 13,4% compared to the reference specimen, although with such a large differences of results, average should not be taken into account. It can be only conclude that there were large discrepancies in those results. Thus, the restrain of the stresses after strengthening was lower than expected in most measured cases at points 1 and 5.

Compared the results of strains, obtained in the experimental studies on the observed reinforced specimen tension surface to those obtained theoretically, the effect of CFRP steel strengthening stress reducing was lower than expected. The lowest strengthening effects were obtained with reinforcement Type1, where not obtained the strengthening but the weakening. It may be caused by poor preparation of the strain gauges. For the Type 2 strengthening, obtained stress limit at 0,3 ÷ 6,7%, but the result was still not satisfactory with respect to the assumptions, which is lower about 27,3 ÷ 36,1%. The best, though not quite satisfactory results have been obtained with reinforcement Type 6. The stress limitation reached in this case, the level of 7,3 ÷ 13,6%. However, this was about 18.0 ÷ 26.5% less than expected. The results are summarized in Table 1.

Tabela1. Zestawienie wyników ograniczeń naprężeń normalnych w zależności od typu wzmocnienia.

Table 1 Summary of normal stress reducing results depending on the strengthening type.

Punkt	Ograniczenie teoretyczne			Ograniczenie uzyskane					
	Nakładka		(2.0-2.1) 2.0	Próbki 2.1		Próbki 2.2		Próbki 2.6	
	CFRP	Stal		(NK-2.1) NK	(2.0-2.2) 2.0	(NK-2.2) NK	(2.0-2.6) 2.0	(NK-2.6) NK	
1	26,70%	37,10%	-24,30%	-69,70%	0,30%	-36,10%	13,60%	-18,00%	
5	26,70%	37,10%	-2,80%	-40,30%	6,70%	-27,30%	7,30%	-26,50%	

5. Wnioski z uzyskanych wyników

Rozważając wyniki badania wpływu zastosowania wzmocnienia taśmą CFRP płaskiego elementu stalowego na ograniczenie naprężeń normalnych w tymże elemencie stalowym oraz możliwości zastosowania dostępnych analitycznych metod obliczeniowych w celu prawidłowego określenia poziomu wzmocnienia można wyciągnąć następujące wnioski:

- Niewielka ilość wyników wpływa na brak możliwości

5. Conclusions of the experimental results

Considering the results of the application of CFRP strip to flat steel element on the strengthening effect to reduce the normal stresses in that steel element and the applicability of analytical calculation methods in order to proper determination of strengthening level the following conclusions can be drawn:

- Limited number of results affects the inability to determine the actual impact of the strengthening on the reduction of stress.

stwierdzenia rzeczywistego wpływu wzmocnienia na ograniczenie naprężeń.

- Uzyskane wyniki wzmocnienia różniły się od zakładanych wstępnie teoretycznie poziomów.
- Wykonane badania pokazały, że wzmocnienie próbki z wykonanym ścięciem odwrotnym końca kompozytu z wpływem kleju (Typ 6) podnosi nośność złącza stal-CFRP.
- Wykonanie ścięcia odwrotnego końca kompozytu z wpływem kleju dało najlepsze z uzyskanych wyników ograniczenia naprężeń w stali.
- W stosunku do wyników próbek, których wyniki okazały się odwrotne od zakładanych (Typ 2.1) należy podchodzić ze świadomością małej ilości zbadanych próbek oraz wpływu na wyniki możliwości złego wykonania oprzyrządowania próbek.
- Próba wdrożenia istniejących metod obliczeniowych stosowanych do obliczania przekrojów idealnie zespolonych nie dała satysfakcjonujących wyników, które mimo osiągnięcia wzmocnienia (Typ 2.2 i Typ 2.6) nie osiągnęły wyznaczonych teoretycznie poziomów.

6. Podsumowanie

6.1. Wnioski

Analizując przeprowadzone badania można wysnuć następujące wnioski:

- Istniejące metody analityczne stosowane do obliczania przekrojów zespolonych nie dają satysfakcjonujących poziomów pewności projektowania wzmocnienia stal-CFRP przy obliczaniu ograniczania naprężeń płaskich elementów stalowych wzmocnionych przyklejoną taśmą CFRP.
- Ścinanie końca kompozytu z nadmiarem kleju, można zaproponować w celu podniesienia nośności w złączu klejowym.

6.2. Przyszłe prace

Niezbędnym będzie wykonanie obliczeń numerycznych opisanych typów wzmocnienia płaskich elementów na zginanie. Należy określić czy metoda elementów skończonych pozwoli na uzyskanie zbliżonych do otrzymanych w badaniach wyników wzmocnienia.

Należy określić rozkłady naprężeń w skleinie w zależności od geometrii skleiny, przydatne do celów projektowych, porównując analityczne i numeryczne rozwiązania tego problemu.

- Obtained strengthening results differed from the assumed pre-theoretical levels.
- Studies have shown that the strengthening with reverse tapered tape end with adhesive fillet (Type 6) increases the load capacity of steel-CFRP.
- CFRP plate end reverse tapering with adhesive fillet gave the best results in reducing the stress in the steel.
- In relation to the specimens results which proved to be opposite than expected (Type 2.1) should be approached with the awareness of a small amount of analyzed specimens and the impact of the possibility of poor performance instrumentation on the results
- Attempt to implement the existing calculation methods used to calculate the ideal composite sections did not give satisfactory results, though reaching capacity enhancement (Type 2.2 and Type 2.6) did not achieve their theoretical levels..

6. Summary

6.1. Conclusion

Analyzing experimental studies the following conclusions may be drawn:

- Existing analytical methods used to calculate the composite sections do not provide satisfactory confidence levels of steel-CFRP strengthening design in calculating the limiting stress of flat steel elements reinforced by CFRP plate.
- Revers tapering of CFRP plate with adhesive fillet could be suggested for load capacity enhancing of bonded joints. use. Plate taper and adhesive fillet angle were limited

6.2. Further works

It is necessary to carrying out the numerical calculation of the described flat steel elements strengthening types under flexural load. It is necessary to specify whether the finite element method allows to obtain similar results to obtained in the experimental study.

It is necessary to specify the stress distribution in adhesive joint depending on the geometry of the adhesive layer, useful for design purposes, comparing the analytical and numerical solutions of the problem.

Literatura • References

- [1] Karlikowski J., Madaj A. Wołowicki W.: Mostowe konstrukcje zespolone stalowo-betonowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. ISBN 978-83-206-1652-1. Warszawa 2003, 2007.
- [2] Łągoda M., Kowal M.: Wpływ kształtu zakończenia skleiny na wytrzymałość złącza stal-kompozyt FRP. Budownictwo i Architektura 2013 vol.12(2) 39-46
- [3] Łągoda M.: Wzmacnianie mostów przez doklejanie elementów. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. ISSN 0860-097X. Kraków 2005.
- [4] Łągoda M.: Wzmacnianie konstrukcji mostowych kompozytami polimerowymi. Wydawnictwo Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. ISSN 0137-5393. Warszawa 2012.