

# Badania laboratoryjne wzmacnianych belek stalowych cienkościennych typu sigma za pomocą tkanin CFRP z zastosowaniem bezdotykowych metod optycznych

Laboratory tests of reinforced thin-walled sigma-type steel beams with CFRP fabrics using non-contact optical methods

mgr inż. Maciej Adam Dybizbański (ORCID: 0000-0001-9861-119X), dr hab. inż. Katarzyna Rzeszut, prof. PP (ORCID: 0000-0002-7134-608X), Politechnika Poznańska

DOI 10.5604/01.3001.0053.8501

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych dotyczących skuteczności wzmocnienia belek TWCFStypu sigma matami CFRP. Oryginalność zaproponowanej metody wzmocnienia polega na tym, że maty przyklejane są w poprzek przekroju poprzecznego, tworząc odcinkowo przekrój zamknięty. Pełnoskalowe testy laboratoryjne przeprowadzono na trzech belkach typu  $\Sigma 200 \times 70 \times 2$  poddanych czteropunktowemu zginaniu. Do wzmocnienia belek wykorzystano maty CFRP SikaWrap 230 C oraz klej SikaDur 330. Maty zostały naklejone na zagięciach brzegowych belek na szerokości 300 mm. Stwierdzono, że zaproponowane wzmocnienie pozwala na ograniczenie przemieszczeń poziomych belki.

**Słowa kluczowe:** belki stalowe cienkościenne, maty CFRP, połączenia klejone, bezdotykowe metody pomiarowe.

**Abstract:** This paper presents the results of laboratory tests on the effectiveness of reinforcing TWCFStigma beams with bonded unidirectional CFRP fabrics. The originality of the proposed strengthening method lies in the fact that the mats are glued across the cross-section to form a fragmentarily closed section. Full-scale laboratory tests were carried out on three  $\Sigma 200 \times 70 \times 2$  beams subjected to four-point bending using, among others, ARAMIS system and a 3D laser scanner. SikaWrap 230 C CFRP mats bonded with SikaDur 330 adhesive were used to reinforce the beams. The mats were bonded at the edge bends of the beams over a width of 300 mm. The proposed reinforcement was found to reduce horizontal displacements of the beam.

**Keywords:** thin-walled steel beams, CFRP mats, glued joints, non-contact measurement methods.

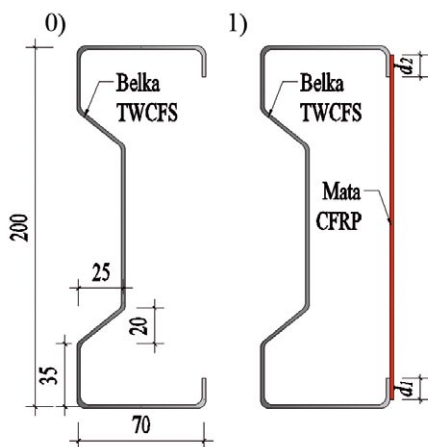
## 1. Wprowadzenie

Projektanci konstrukcji stalowych dążą do uzyskania rozwiązań spełniających wymagania bezpieczeństwa przy równoczesnej minimalizacji kosztów. Wiąże się to między innymi z redukcją zużycia materiału oraz typizacją elementów konstrukcyjnych. Cienkościenne elementy stalowe formowane na zimno (TWCFSt) spełniają te wymagania, przez co znajdują coraz szersze zastosowanie [1]. Należy podkreślić, że użytkowanie takich konstrukcji, w przypadku uszkodzenia lub przeciążenia, może wymagać ich wzmocnienia. Niestety tradycyjne metody wykorzystujące połączenia spawane lub łączniki mechaniczne mogą prowadzić do osłabienia przekroju poprzecznego elementów TWCFSt. Prowadzone w ostatnich latach badania wykazały, że bardzo korzystną, ze względu na swoją prostotę i nieniszczący charakter, może być metoda wzmacniania elementów TWCFSt za pomocą kompozytów CFRP [2–11] łączonych za pomocą połączeń klejonych [12, 13].

## 2. Sformułowanie problemu badawczego

Celem badań przedstawionych w niniejszej pracy było sprawdzenie efektywności wzmocnienia cienkościennych profilowanych na zimno stalowych belek typu sigma poprzez odcinkowe zamknięcie ich przekroju poprzecznego za pomocą naklejanym tkanin jednokierunkowych CFRP, nazywanych dalej matami CFRP. Badania przeprowadzono na belkach TWCFStypu sigma o przekroju  $\Sigma 200 \times 70 \times 2$ . Gatunek stali, z jakiej wykonano elementy, to S350GD+Z. Rozpiętość belek wynosiła 2700 mm. Maty CFRP zostały naklejone na długości zagięcia brzegowego przekroju poprzecznego, co przedstawiono na rysunku 1. Zdefiniowano długość połączenia  $d$ , rozumianą jako sumę długości zakładów połączenia klejonego stal-CFRP na poszczególnych krawędziach przekroju poprzecznego i opisaną wzorem:

$$d = \sum_{i=1}^n d_i \quad (1)$$

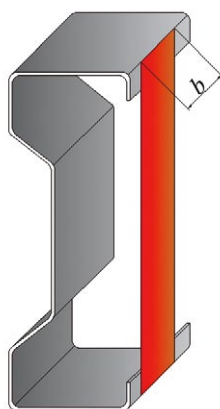


Rys. 1. Geometria badanych elementów: 0 – belka referencyjna, 1 – wzmocnienie naklejone na zagięciach brzegowych

gdzie:

$n$  – liczba płaszczyzn połączenia,  $d_i$  – długość  $i$ -tego zakładu płaszczyzny połączenia klejonego stal-CFRP na poszczególnych krawędziach przekroju poprzecznego, przedstawiona dla badanego przypadku na rysunku 1.

Zdefiniowano również szerokość wzmocnienia  $b$ , równą w rozważanym przypadku 300 mm (rys. 2). Sprawdzenie efektywności wzmocnienia polegało na przeprowadzeniu analizy porównawczej przemieszczeń uzyskanych dla belek wzmocnionych i belki referencyjnej (niewzmocnionej).



Rys. 2. Szerokość wzmocnienia  $b$

### 3. Badania laboratoryjne

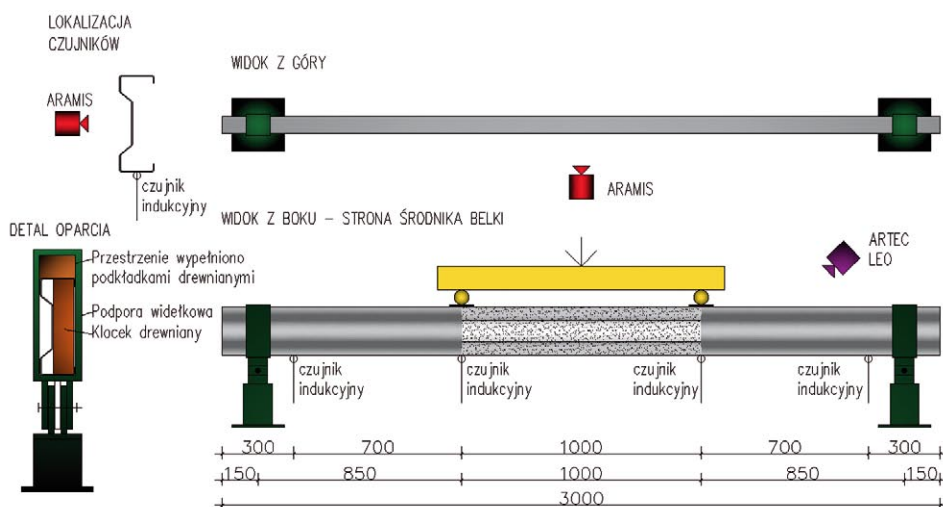
#### 3.1. Zakres badań i zastosowana aparatura

Wzmocnienie wykonano z tkaniny SikaWrap 230 C przyklejonej do belki stalowej z wykorzystaniem kleju SikaDur 330.

Belki badane były w układzie czteropunktowego zginania. Schemat stanowiska laboratoryjnego oraz rzeczywiste stanowisko badawcze przedstawiono odpowiednio na rysunkach 3 i 4. Podpory zostały zaprojektowane jako widełkowe. Wstawiono również przeponę usztywniającą przekrój poprzeczny belki nad podporami w postaci drewnianego klocka. Wszystkie wolne przestrzenie pomiędzy podporą a belką wypełniono za pomocą drewnianych podkładek. W miejscach przyłożenia sił, między belką a trawersem, wstawiono podkładki z ceowników o szerokościach 200 mm. Badania przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 8505 o zdolności wymuszenia sił do 1000 kN. Maszyna ta pozwala na rejestrację siły działającej na trawers oraz przemieszczenia tłoka. Prędkość przemieszczenia tłoka maszyny wytrzymałościowej wynosiła 1 mm/min. W miejscach przyłożenia sił oraz w odległości 15 cm od podpór ustawiono czujniki przemieszczeń z zakresem pomiaru odpowiednio 20 mm i 10 mm. Od strony środka ustawiono system do optycznego pomiaru odkształceń ARAMIS 6M, który umożliwia zsynchronizowanie odczytów deformacji z przyrostem obciążenia na prasie maszyny testującej i ich prezentację w formie filmów wideo i wykresów. Dokładność uzyskanych wyników zależy od liczby zdjęć wykonanych przez system podczas badania. Przed każdym pomiarem system był kalibrowany za pomocą krzyża pomiarowego. Rejestracja obrazu wykonywana była z częstotliwością 2 Hz przez cały czas badania. Analiza uzyskanych pomiarów przeprowadzona została za pomocą programu GOM Correlate umożliwiającego stworzenie modelu przestrzennego belki. W niniejszej pracy analizowano przemieszczenia pionowe i poziome belek w wybranych punktach pomiarowych. W celach kontrolnych przemieszczeń oraz inwentaryzacji geometrii belek zastosowano również skaner 3D Artec Leo (rys. 5) pozwalający wykonać skan 3D całego elementu z dokładnością do 0,1 mm oraz prędkością pomiaru do 35 mln pkt/s. Wszystkie urządzenia pomiarowe były zerowane w chwili ustawienia trawersu oraz przyłożenia siły równej

0,7 kN. W trakcie badań dokonywano pomiaru siły działającej na trawers, przemieszczeń pionowych i poziomych powierzchni belki od strony środka pomiędzy miejscami przyłożenia sił oraz geometrii belki w chwili ustawienia jej na stanowisku, zniszczenia i po odciążeniu.

Rys. 3. Schemat stanowiska laboratoryjnego





Rys. 4. Stanowisko badawcze

Każdej z belek nadano indywidualne oznaczenie, na które składał się ciąg znaków, których znaczenie zostało przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Oznaczenia stosowane przy nazewnictwie próbek

Oznaczenie	Opis
RB	Belka referencyjna
SB	Belka wzmocniona
H	Przekrój $\Sigma 200 \times 70 \times 2$
T	Szerokość naklejenia równa 300 mm
1	Wzmocnienie naklejone na zagięciach brzegowych, zgodnie z rysunkiem 1

Przykładowo, belka opisana jako „SBHT1”, to belka wzmocniona o przekroju  $\Sigma 200 \times 70 \times 2$  z szerokością naklejenia równą 300 mm i wzmocnieniem naklejonym na zagięciach brzegowych. Badania przeprowadzono na trzech belkach, z których jedna była niewzmocniona (RBH) oraz dwie były wzmocnione (SBHT11 i SBHT12).



Rys. 5. Pomiar geometrii belki z pomocą skanera 3D Artec Leo

### 3.2. Postaci zniszczenia belek

W przypadku wszystkich badanych belek zniszczenie nastąpiło poprzez utratę stateczności belki stalowej. W żadnym z badanych przypadków zniszczeniu nie uległo połączenie klejone stal-CFRP oraz mata CFRP. W przypadku belek o przekroju  $\Sigma 200 \times 70 \times 2$  dla wszystkich próbek zniszczenie nastąpiło poprzez zwichrzenie belki (rys. 6) poprzedzone



Rys. 6. Widok zniszczonej belki  $\Sigma 200 \times 70 \times 2$  od strony środka



Rys. 7. Widok zniszczonej belki  $\Sigma 200 \times 70 \times 2$  od strony wzmocnienia – deformacja przekroju w formie dystorsji

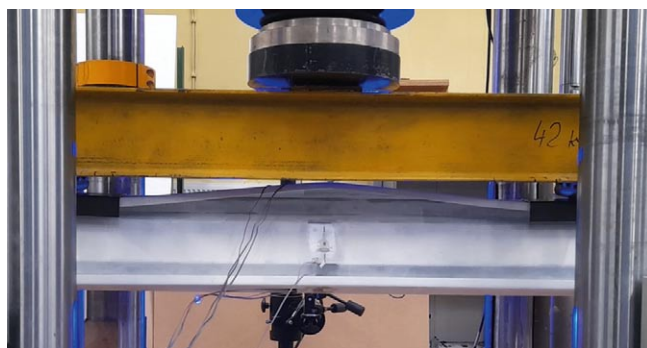


Rys. 8. Widok zniszczonej belki  $\Sigma 200 \times 70 \times 2$  od strony wzmocnienia – lokalna deformacja w miejscach przyłożenia sił



deformacją w formie dystorsji przekroju (rys. 7). Dodatkowo w miejscach przyłożenia sił nastąpiła lokalna deformacja półki górnej, przedstawiona na rysunku 8.

Zaobserwowano duże wzajemne podobieństwo postaci zniszczenia belek wzmocnionych i niewzmocnionych (rys. 9–10), należy jednak podkreślić, że wzmocnienie w postaci maty CFRP pozwoliło na odcinkowe ograniczenie otwarcia przekroju poprzecznego belek wzmocnionych w porównaniu do belki referencyjnej.



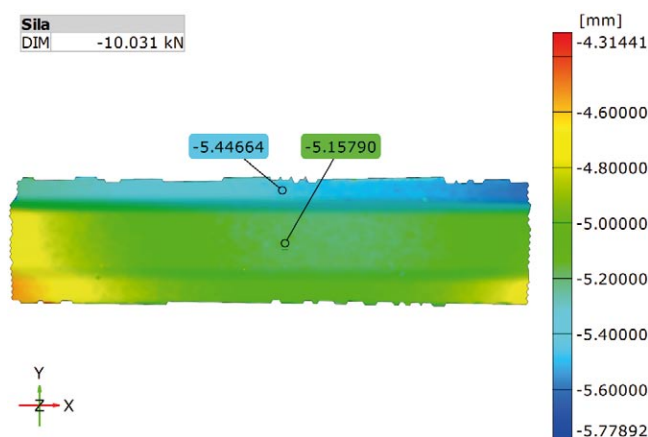
**Rys. 9.** Widok zniszczonej belki referencyjnej (niewzmocnionej)  $\Sigma 200 \times 70 \times 2$



**Rys. 10.** Widok zniszczonej belki wzmocnionej  $\Sigma 200 \times 70 \times 2$

### 3.3. Mapy przemieszczeń

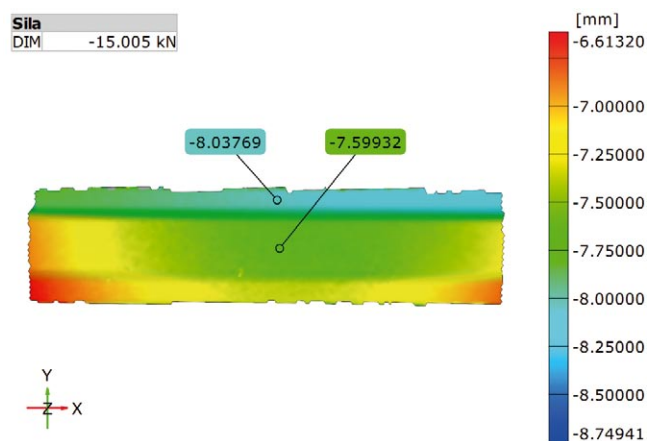
Mapy przemieszczeń pionowych i poziomych dla próbek SBHT11 wraz z wartościami przemieszczeń w dwóch



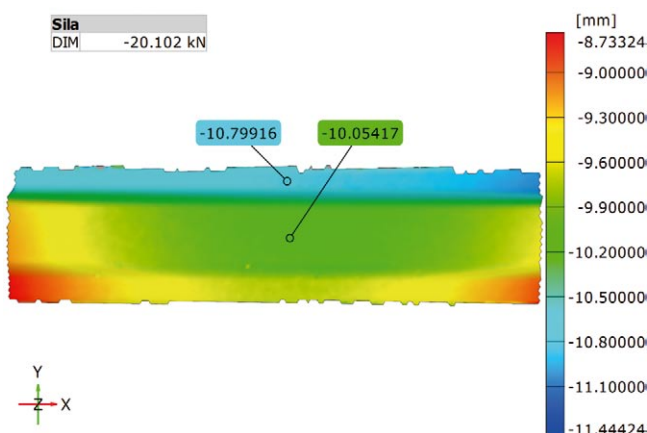
**Rys. 11.** Mapa przemieszczeń pionowych od strony środnika dla belki SBHT11 – siła równa 10 kN

wybranych punktach zostały przedstawione odpowiednio na rysunkach 11–16.

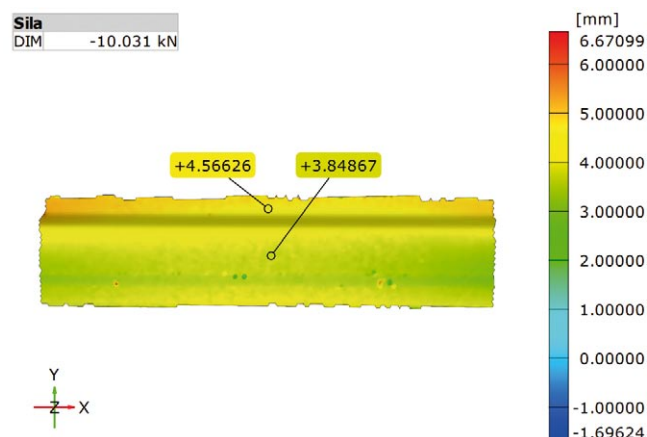
Mapy przemieszczeń zostały wykonane dla wartości obciążenia 10, 15 i 20 kN. Analizowane punkty przyjęto w środku rozpiętości belek dla dwóch lokalizacji: przy półce górnej i na środku środnika.



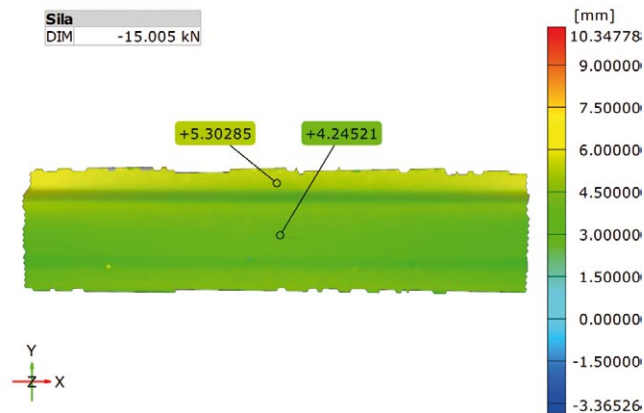
**Rys. 12.** Mapa przemieszczeń pionowych od strony środnika dla belki SBHT11 – siła równa 15 kN



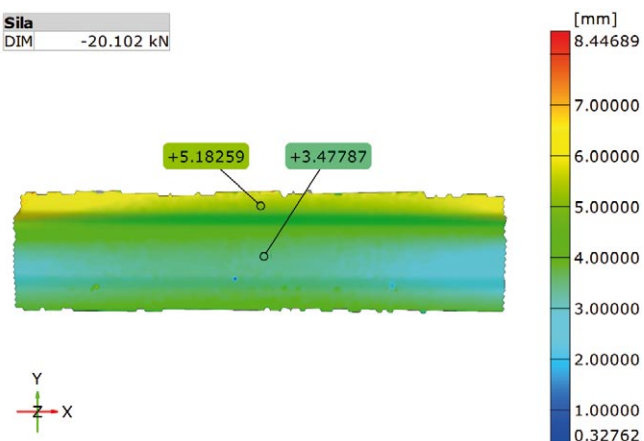
**Rys. 13.** Mapa przemieszczeń pionowych od strony środnika dla belki SBHT11 – siła równa 20 kN



**Rys. 14.** Mapa przemieszczeń poziomych (z płaszczyzny) od strony środnika dla belki SBHT11 – siła równa 10 kN



**Rys. 15.** Mapa przemieszczeń poziomych (z płaszczyzny) od strony środka dla belki SBHT11 – siła równa 15 kN



**Rys. 16.** Mapa przemieszczeń poziomych (z płaszczyzny) od strony środka dla belki SBHT11 – siła równa 20 kN

Rysunki 17–20 przedstawiają zależności siła-przemieszczenie wybranych punktów dla serii belek wzmocnionych i referencyjnych. Na rysunku 17 opisano wykresy siła-przemieszczenie pionowe dla punktów zlokalizowanych na środku przy półce górnej (ściskanej) dla poszczególnych badanych belek.

Wykresy siła-przemieszczenie pionowe dla punktów zlokalizowanych na środku, w środku wysokości przekroju, dla poszczególnych badanych belek opisano na rysunku 18.

Wykresy siła-przemieszczenie poziome dla punktów zlokalizowanych na środku przy półce górnej (ściskanej) dla poszczególnych badanych belek opisano na rysunku 19.

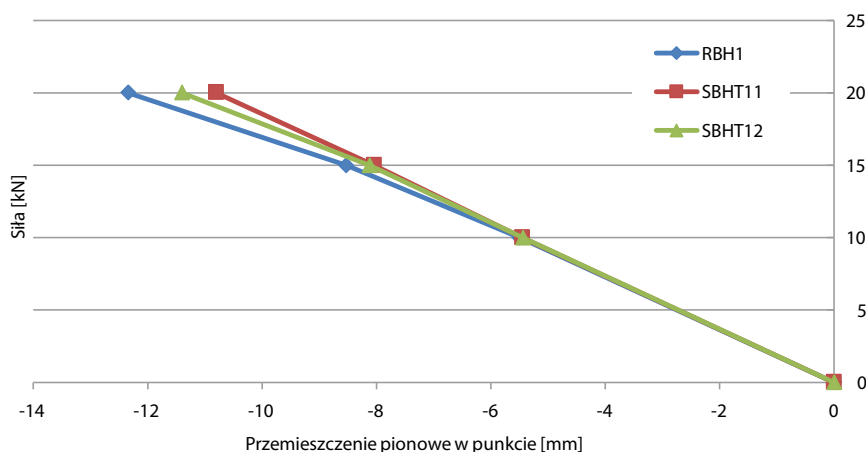
Wykresy siła-przemieszczenie poziome dla punktów zlokalizowanych na środku, w środku wysokości przekroju, dla poszczególnych badanych belek opisano na rysunku 20.

Porównując przemieszczenia pionowe dla belek wzmocnionych i belki referencyjnej, można zauważyć, że wzmocnienie belki nie ma istotnego wpływu na przemieszczenia pionowe. Różnicę natomiast można zaobserwować w zakresie przemieszczeń poziomych, gdzie wzmocnienie może spowodować nawet dwukrotną redukcję tych przemieszczeń.

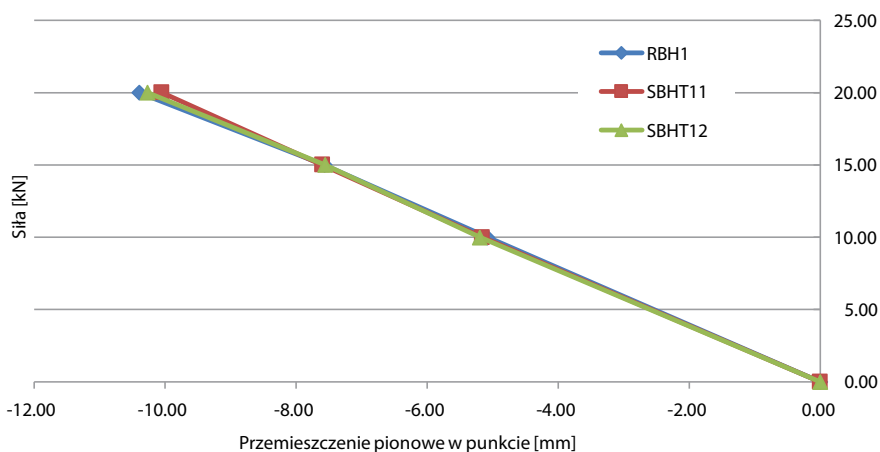
#### 4. Podsumowanie

Celem niniejszej pracy była analiza skuteczności wzmocnienia belek TWCFs typu sigma przy użyciu naklejonych jednokierunkowych tkanin CFRP. W tym celu przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych na trzech belkach typu  $\Sigma 200 \times 70 \times 2$  poddanych czteropunktowemu zginaniu. Belki zostały wzmocnione przy użyciu tkaniny jednokierunkowej CFRP SikaWrap 230 C przyklejonej bezpośrednio na warstwę ocynku za pomocą kleju na bazie żywic epoksydowych SikaDur 330 w taki sposób, że tkanina przyklejana była w poprzek przekroju poprzecznego w środku rozpiętości belki tworząc odcinkowo przekrój zamknięty. Wzmocnienie zostało naklejone na zagięciach brzegowych belek na szerokości 300 mm. Pełnoskalowe testy laboratoryjne przeprowadzono z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej INSTRON 8505, systemu ARAMIS 6M oraz skanera 3D Artec Leo. Sprawdzenie skuteczności wzmocnienia polegało na przeprowadzeniu analiz porównawczej przemieszczeń wypadkowych uzyskanych dla belek wzmocnionych i belki referencyjnej (niewzmocnionej). Na podstawie przeprowadzonych analiz sformuowano następujące wnioski:

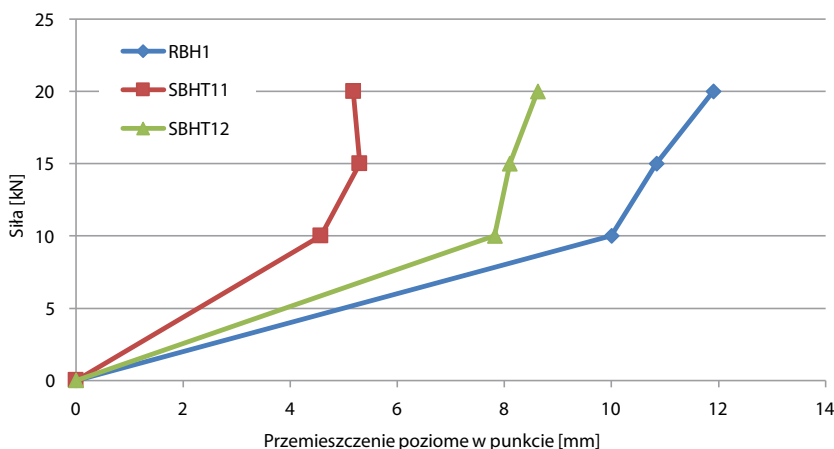
- zaproponowany sposób wzmocnienia nie ma znaczącego wpływu na przemieszczenia pionowe analizowanych belek typu sigma,
- zaproponowany sposób wzmocnienia może mieć korzystny wpływ na redukcję przemieszczeń poziomych w poziomie pasa górnego oraz środka,
- zastosowanie bezdotykowych metod optycznych pozwala na dokonanie pomiaru przemieszczeń pionowych



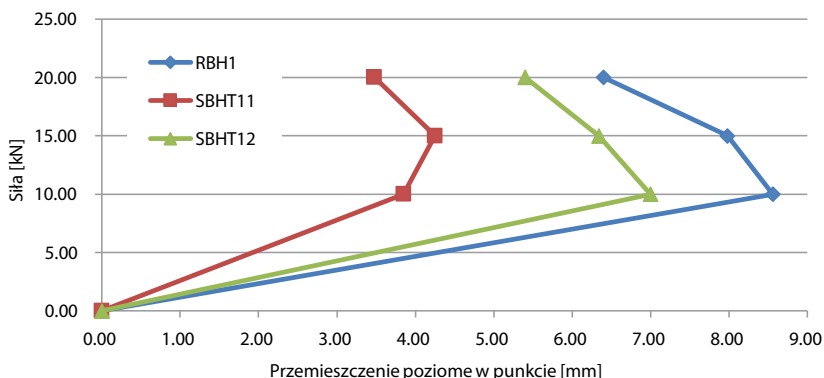
**Rys. 17.** Porównanie przemieszczeń pionowych punktów przy półce górnej



Rys. 18. Porównanie przemieszczeń pionowych punktów na środniku



Rys. 19. Porównanie przemieszczeń poziomych punktów przy półce górnej



Rys. 20. Porównanie przemieszczeń poziomych punktów na środniku

i poziomych z bardzo dużą dokładnością dla belek stalowych cienkościennych typu sigma poddanych zginaniu ze skręcaniem,

- w celu przeprowadzenia analizy ilościowej konieczne jest zwiększenie liczby badanych belek wzmocnionych oraz referencyjnych,
- zaproponowany sposób wzmocnienia pozwala na ograniczenie otwarcia przekroju poprzecznego zginanej belki,
- połączenie klejone oraz mata CFRP nie uległy zniszczeniu w żadnym z badanych elementów.

## Finansowanie

Praca została wsparta finansowo przez Politechnikę Poznańską: 0412/SBAD/0070, 0412/SBAD/0071.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Hancock G.J. Cold-formed steel structures, *Journal of Constructional Steel Research* 59, 2003; str. 473–87, doi:10.1016/s0143-974x(02)00103-7
- [2] Bastani A., Das S., Kenno S., Rehabilitation of thin walled steel beams using CFRP Fabric, *Thin-Walled Structures*, 143, 2019, str. 106215, doi:10.1016/j.tws.2019.106215
- [3] Bambach M. R., Jama H. H., Elchalakani M., Axial capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP, *Thin-Walled Structures* 47, 2009, str. 1112–1121, doi:10.1016/j.tws.2008.10.006
- [4] Chakravarthy N., Naganathan S., Kalavagunta S., Mustapha K. N., Structural performance of experimentally investigated CFRP-strengthened cold-formed steel built-up columns, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 46(2)2021, str. 917–924, doi:10.1007/s40996-021-00706-8
- [5] Haedir J., Zhao X-L., Design of short CFRP-reinforced steel tubular columns, *Journal of Constructional Steel Research* 67(3)2011, str. 497–509, doi:10.1016/j.jcsr.2010.09.005
- [6] Hu L., Feng P., Gao W., Wang Y., Flexural behavior of light steel purlins reinforced by prestressed CFRP laminates, *Thin-Walled Structures* 174, 2022, str. 109125, doi:10.1016/j.tws.2022.109125
- [7] Kalavagunta S., Naganathan S., Bin Mustapha K. N., Proposal for design rules of axially loaded CFRP strengthened cold formed Lipped channel steel sections, *Thin-Walled Structures* 72, 2013, str. 14–9, doi:10.1016/j.tws.2013.06.006
- [8] Naganathan S., Chakravarthy H. G., Anuar N. A., Kalavagunta S., Mustapha K. N., Behaviour of cold formed steel built-up channel columns strengthened using CFRP, *International Journal of Steel Structures* 20, 2019, str. 415–424, doi:10.1007/s13296-019-00293-5
- [9] Szewczak I., Rozyło P., Rzeszut K., Influence of mechanical properties of steel and CFRP tapes on the effectiveness of strengthening thin-walled beams, *Materials* 14, 2021, str. 2388, doi:10.3390/ma14092388
- [10] Silvestre N., Camotim D., Young B., On the use of the EC3 and AISI specifications to estimate the ultimate load of CFRP-strengthened cold-formed steel lipped channel columns, *Thin-Walled Structures*, 47(10)2009, 1102–1111, doi:10.1016/j.tws.2008.10.013
- [11] Sun Y., Li P., Qin G., Study on calculation of bearing capacity of axially loaded CFRP-strengthened cold-formed thin-walled lipped channel steel columns, *Advances in Civil Engineering* 2020, str. 1–16, doi:10.1155/2020/9682929
- [12] Pasternak H., Kubieniec G., Piekarczyk M., Adhesives in strengthening of steel structures, *Statybinės Konstrukcijos ir Technologijos* 2(2)2010, str. 45–50
- [13] Piekarczyk M., Zastosowanie połączeń klejonych w konstrukcjach metalowych, *Technical Transactions*, zeszyt 1-B, 2002, str. 99–137