

Arkadiusz SITARSKI^{*}
Politechnika Gdańska

NOŚNOŚĆ BETONOWYCH DŹWIGARÓW WZMOCNIONYCH TAŚMAMI STALOWYMI W ŚWIETLE BADAŃ MODELOWYCH I NUMERYCZNYCH

Streszczenie. Zbrojenie belek żelbetowych zazwyczaj wykonywane jest prętami zbrojeniowymi z odpowiednio grubą otuliną. W pracy analizuje się betonowy dźwigar mostowy, którego zbrojeniem głównym jest płaskownik stalowy ułożony zewnętrznie. Kształt ułożenia płaskownika, wg krzywej łańcuchowej, nadaje belce zmienny charakter pracy, dlatego dźwigar nie może być analizowany jak zwykły przekrój żelbetowy. W artykule przedstawiono wyniki badań modeli dźwigarów omówionego typu oraz podjęto próbę zweryfikowania otrzymanych wyników w ramach analizy numerycznej metodą elementów skończonych.

CARRYING CAPACITY OF CONCRETE GIRDERS REINFORCED WITH STEEL BAND UPON REAL MODELS AND NUMERICAL ANALYSIS

Summary. The paper deals with the experimental investigations on bridge band girders. A method for the estimation of the loading capacity of the band beams and their deformations is proposed. Several different models of the steel-concrete interaction were considered. The crack distribution obtained in experiments is in a very good agreement with the results of additional FEM analysis.

1. Charakterystyka analizowanego dźwigara taśmowego

Na terenie Warmii, Mazur oraz Pomorza Środkowego istnieje kilka historycznych obiektów mostowych, których prototypem były dźwigary taśmowe pomysłu prof. Maxa Möllera z Braunschweigu [1,2]. Obiekty te (rys. 1) powstały w okresie międzywojennym i wymagają wzmocnienia lub rozbiórki. Obecnie nie stosuje się już tego typu dźwigarów, dlatego brak dokumentacji spowodował podjęcie prac w celu poszukiwania modelu pozwalającego opracować ewentualny sposób wzmocnienia i określić rzeczywistą nośność dźwigara omawianego

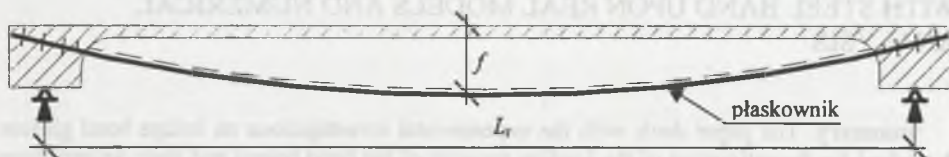
^{*} Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Jacek Chróścielewski, prof. Pol. Gdańskiej

typu. Zabytkowy charakter tego typu mostów wymaga opracowania sposobu wzmocnienia z zachowaniem kształtu oraz dotychczasowej koncepcji pracy konstrukcji złożonej z takich dźwigarów.



Rys. 1. Przykłady mostów z dźwigarami taśmowymi
Fig. 1. Bridge examples with steel band girders

Idea układu konstrukcyjnego polegała na zapewnieniu współpracy pomiędzy wiotkim ciągnem (płaskownik kotwiony w bloku podporowym - rys. 2) a uźebrowaną płytą pomostową. W takim ustroju konstrukcyjnym występujące obciążenie pionowe wywołuje pionowe reakcje. Dzięki temu stosowane podpory mostów tego typu są stosunkowo smukłe.



Rys. 2. Schemat statyczny betonowej belki wzmocnionej taśmą stalową
Fig. 2. Static system of concrete girder with steel band

Kształt dźwigara wzmocnionego taśmami stalowymi opisuje równanie krzywej łańcuchowej.

$$y_{(x)} = f - \frac{H}{q} \cdot \left[\cosh \left(\frac{q}{H} \cdot x \right) - 1 \right], \quad (1)$$

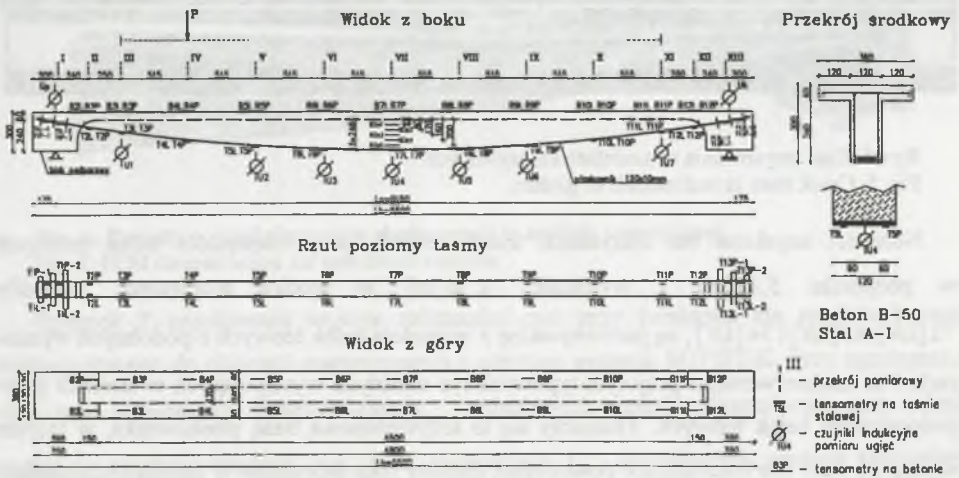
gdzie: H - siła w ściągu,

q - uśrednione obciążenie od ciężaru własnego belki.

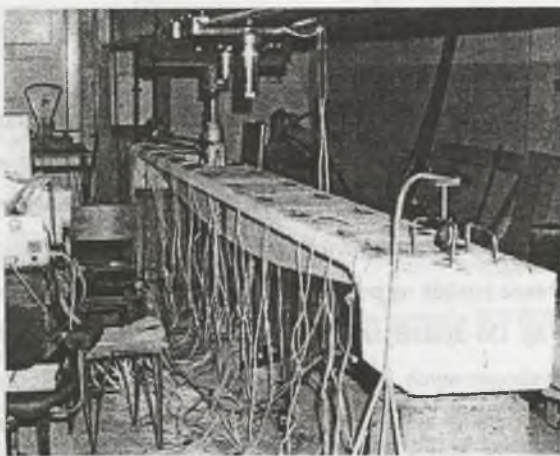
Parametry w równaniu (1) dobiera się tak, aby zgodnie z zaprojektowanym kształtem przejąć moment zginający od ciężaru własnego dźwigara.

2. Badania modelowe

Poza potrzebą określenia wytrzymałości eksploatacyjnej belek Möllera interesujący jest problem ich odkształcalności i nośności granicznej. W tym celu przeprowadzono badania eksperymentalne trzech belek w skali technicznej. Na rys. 3 przedstawiono wymiary dźwigarów testowych zastosowanych w eksperymencie, natomiast na rys. 4 - stanowisko pomiaru odkształceń oraz ugięć w laboratorium badawczym.



Rys. 3. Geometria belek próbnych BL-1, BL-2 i BL-3 z rozmieszczeniem pkt. pomiarowych
 Fig. 3. Geometry of experimental concrete beam BL-1, BL-2 and BL-3



Rys. 4. Stanowisko badań eksperymentalnych dźwigara z płaskownikiem stalowym
 Fig. 4. Examination stand of the concrete girders with steel band

Rezultaty badań modelowych szczegółowo opisane są w pracach [2, 3]. Na rys. 5 przedstawiono morfologię rys. Udokumentowany stan zarysowania oraz ugięć stanowi podstawę do przeprowadzenia porównania z wynikami otrzymanymi w testach numerycznych.



Rys. 5. Stan zarysowania w modelach rzeczywistych
Fig. 5. Crack state in real models of girders

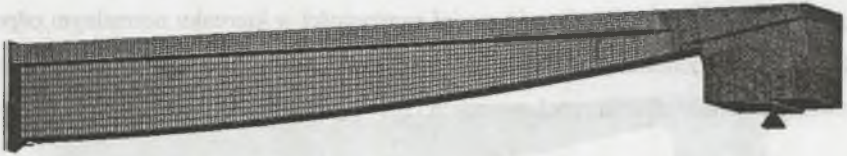
Nośności uzyskane we wszystkich trzech testach, przy rozpiętości belek próbnych w podparciu 5,15 [m] i wysokości 0,36 [m] w środku rozpiętości, wynosiły 72 [kN], 85 [kN] i 74 [kN], są porównywalne z nośnością belek teowych o podobnych wymiarach. Nie zaobserwowano przy tym typowych rys ukośnych występujących w strefach przypodporowych belek teowych. Tłumaczy się to krzywoliniową trasą płaskownika, w którym występują duże siły rozciągające powodujące złożony stan naprężenia w betonowych strefach przypodporowych.

3. Analiza numeryczna

W pracy porównuje się wyniki badań eksperymentalnych z testami numerycznymi jednego z badanych dźwigarów, oznaczonego symbolem BL-2. Analizę numeryczną przeprowadzono wykorzystując oprogramowanie systemu SOFiSTiK. Charakterystyki materiałowe przyjęto na podstawie testów laboratoryjnych, wykonanych dla modeli rzeczywistych.

Dyskretyzacja dobrana została na podstawie badań zbieżności ze względu na gęstość siatki podziału MES (typu h). Do dyskretyzacji zastosowano 4-węzłowe niedostosowane elementy typu Lagrange'a o wzbogaconych polach odkształceń w PSN. Wykorzystano standardowe modele materiałów zawarte w systemie SOFiSTiK, nawiązując do charakterystyk otrzymanych w badaniach laboratoryjnych. Przyjęto trzy siatki podziału: „rzadki” – 2364 elementy, „gęsty” – 32230 elementów oraz „roboczy” – 6218 elementów (rys. 6).

Na podstawie analizy zbieżności siatek elementów przyjęto do dalszych badań tzw. siatkę „roboczą”, czyli 6218 elementów. Podział ten wykazał dobrą zbieżność z modelem rzeczywistym oraz rozwiązaniem dla podziału (2) „gęstego”. Za kryterium zbieżności rozwiązania przyjęto obliczone ugięcia oraz zaobserwowane rysy rozmyte w modelu numerycznym w stosunku do pomiarów i obserwacji laboratoryjnych. W rozwiązaniu sterowano parametrem obciążenia. Przyrost siły w teście numerycznym wynosił $\Delta P = 2 [kN]$, wartość ta pozwoliła na uzyskanie porównywalnej propagacji zarysowania.



Rys. 6. Przyjęty podział elementów skończonych w analizie numerycznej
Fig. 6. FEM discretization for numerical analysis

Rysunek 7 przedstawia wykres zależności σ - ϵ przy ściskaniu dla modelu betonu wykorzystanego do obliczeń numerycznych z użyciem systemu SOFiSTiK. Przy rozciąganiu sterowano parametrami materiałowymi ϵ_{pg} - opisującymi wartość odkształcenia, przy której następuje opadanie krzywej σ - ϵ , oraz parametrem T_{fe} - określającym wartość całkowitej energii przy rozciąganiu.

— krzywa obliczona

$$\frac{\sigma}{f_c} = \frac{k \cdot n - n^2}{1 + (k - 2) \cdot n} \quad (2)$$

gdzie:

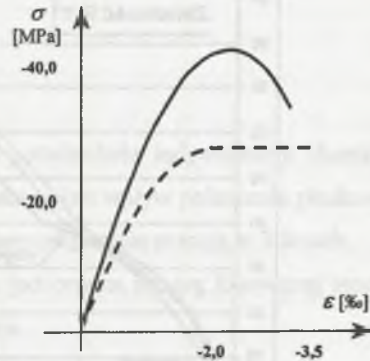
$$n = \epsilon / \epsilon_{c1} ;$$

$$k = (1.1 \cdot E_c) \cdot \epsilon_{c1} / f_c$$

ϵ_{c1} - odkształcenie początkowe

f_c - \varnothing wytrzymałość na ściskanie

- - - krzywa generowana automatycznie dla projektowania



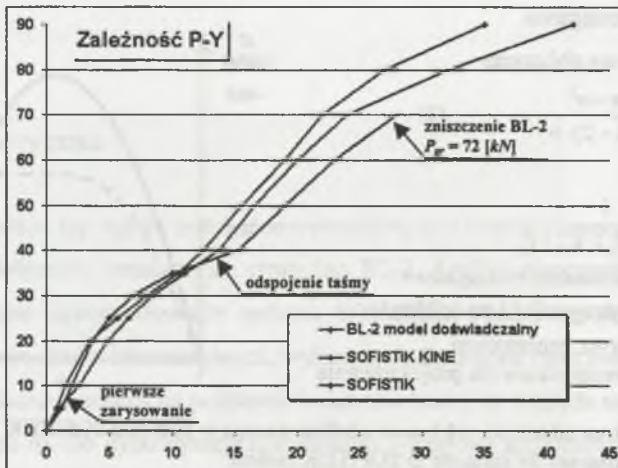
Rys. 7. Wykres zależności σ/ϵ betonu zdefiniowanego w systemie SOFiSTiK
Fig. 7. σ/ϵ diagram for concrete in SOFiSTiK system

W badaniach eksperymentalnych obserwowano sposób odpajania się płaskownika od betonu oraz całkowite zerwanie jej przyczepności przy wartości bliskiej połowie siły niszczącej P_{gr} . Dlatego w testach numerycznych rozważano trzy sposoby modelowania połączenia pła-

skownika z betonem. W pierwszym wariantcie połączenie zrealizowano przez zapewnienie całkowitej zgodności przemieszczeń wspólnych węzłów. W drugim wariantcie połączenia sprzężono ze sobą tylko przemieszczenia pionowe w sąsiednich („wspólnych”) węzłach elementów płaskownika stalowego i betonu (zgodnie z nazewnictwem oprogramowania – kine). Analizowano również trzeci rodzaj połączenia - na styku stal-beton zastosowano dodatkową warstwę elementów z materiału anizotropowego. Zastosowanie tego materiału miało na celu uzyskanie jednakowych przemieszczeń normalnych do krzywoliniowego brzegu płaskownika na styku z betonem. Miało to również spowodować uzyskanie w stali płaskownika jedynie naprężeń rozciągających. Przyjęto, iż moduł sprężystości w kierunku normalnym odpowiadał modelowi betonu, natomiast na kierunku stycznym był około 2000 razy mniejszy. Ograniczono również przenoszenie naprężeń stycznych i rozciągających.

4. Porównanie wyników

Pilotujące wyniki numeryczne są w zaskakująco dobrej zgodności z wynikami z doświadczeń laboratoryjnych. Zastosowane jednak standardowe modelowanie numeryczne, przy przyjęciu porównywalnych charakterystyk wytrzymałościowych materiału, prowadziło do uzyskania wyższej siły niszczonej belkę w stosunku do badań doświadczalnych.



Rys. 8. Porównanie zależności P-Y modelu doświadczalnego BL-2 oraz modeli (MES)

Fig. 8. Force - displacement diagram for real model and FEM beam BL-2

Na rys. 8 przedstawiono ścieżki równowagi (obciążenie – przemieszczenie) w środku rozpiętości belki, uzyskane z badań doświadczalnych BL-2 oraz obliczeń numerycznych. Oznaczono charakterystyczne punkty odpowiadające powstaniu istotnych rys oraz odspojeniu płaskownika uzyskane w doświadczeniu oraz zaobserwowane w testach numerycznych.

Ważną informacją na temat określenia nośności oraz możliwości naprawy dźwigarów betonowych jest rozpoznanie stanu zarysowania przekroju betonowego. Na rys. 9 przedstawiono końcowy stan wyęteżenia i zarysowania, uzyskany w jednym z testów obliczeń numerycznym (por. z rys. 5).



Rys. 9. Zarysowanie w teście numerycznym przy pełnej zgodności przemieszczeń
Fig. 9. Crack in FEM model BL-2 for full displacement compatibility

We wszystkich modelach komputerowych fazy zarysowania były w dobrej zgodności z doświadczeniem. Różnice odnotowanych ugięć przy zarysowaniu dla odpowiednich wartości siły obciążającej nie przekraczały 15 %.

5. Wnioski

Badania doświadczalne oraz analiza MES potwierdziła indywidualny charakter pracy dźwigara omawianego typu. W szczególności istotny jest wpływ połączenia płaskownika stalowego z betonem. Ustalono, że dźwigary o podanym kształcie pracują w 3 fazach.

- 1) Przed utratą przyczepności (faza 1) – belka jednorodna ma wg klasycznej teorii żelbetu pełne zespolenie oraz początkowe zarysowanie.
- 2) Po utracie przyczepności płaskownika stalowego z betonem (faza 2) – obserwowana jest głęboka penetracja rys pionowych i znaczne rozwarście rys pierwotnych (głównych) oraz szybka utrata sztywności i wzrost ugięć.
- 3) Zniszczenie (faza 3) – zaobserwowany mechanizm zniszczenia polegał na uplastycznieniu płaskownika przy głębokiej penetracji rysy w środku rozpiętości dźwigara aż do całkowitego zmiążdżenia półki górnej.

Analiza połączenia stali i betonu w dźwigarze omawianego typu wskazuje na inny charakter pracy stali płaskownika niż klasycznego zbrojenia w belkach żelbetowych.

Dźwigary rozpatrywanego systemu są interesującym problemem w sensie rozwiązania pewnego zadania numerycznego. Istnieje potrzeba dostosowania odpowiednich elementów skończonych oraz zastosowania dość skomplikowanych praw materiałowych do przeprowadzania badań numerycznych zapewniających dobrą zbieżność z wynikami uzyskanymi w laboratorium. Do poprawnego i pełnego określenia nośności zachodzi potrzeba zastosowania kontaktowych elementów skończonych, uwzględniających sprzężenie pionowych stopni swobody i przyczepności na styku, a po utracie przyczepności uwzględniających tarcie pomiędzy płaskownikiem stalowym i betonem.

Wyniki testów numerycznych oraz badań eksperymentalnych prowadzą do wniosku, że wzmocnienie dźwigarów omawianego typu powinno prowadzić do ponownego zespolenia płaskownika stalowego z betonem.

Obecnie prowadzone są prace nad własnymi elementami skończonymi o wzbogaconym polu odkształcenia. Ponadto, zamierza się rozbudować program autorski MES o prawa konstytutywne betonu oraz prawa uwzględniającego kontakt pomiędzy odpajającym się płaskownikiem stalowym przy pewnej wartości naprężeń rozwarstwiających.

LITERATURA

1. Möller M.: Zum Brückenbau über die Elbumflut bei Heyrothsberge. Ersatz des hölzernen Ueberbaues durch Eisenbeton-Gurträger. Beton u. Eisen, H. XI, 1922.
2. Cichocki M., Sitarski A.: Odształcalność i nośność betonowych dźwigarów taśmowych systemu Möllera. Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Opole-Krynica 2001, t. 3, s. 27-34.
3. Cichocki M., Sitarski A.: Wpływ sposobu zespolenia na sztywność belek taśmowych systemu Möllera. VI Konferencja Konstrukcje Zespolone, Zielona Góra 2002.
4. Taylor R.L., Wilson E.L., Brederford P.J.: A non-conforming elements for stress analysis. Int. J. Num. Meth. Engng, 10, 1976, 1211-1219.
5. SOFiSTiK Manual Book, AQUA – General Material and Cross Sections V 11.40, ASE – General Static Analysis of Finite Element Structures V 10.47, Oberschleissheim 2002.