

Badania eksperymentalne niekonwencjonalnego zespolenia środnika stalowego z płytą betonową

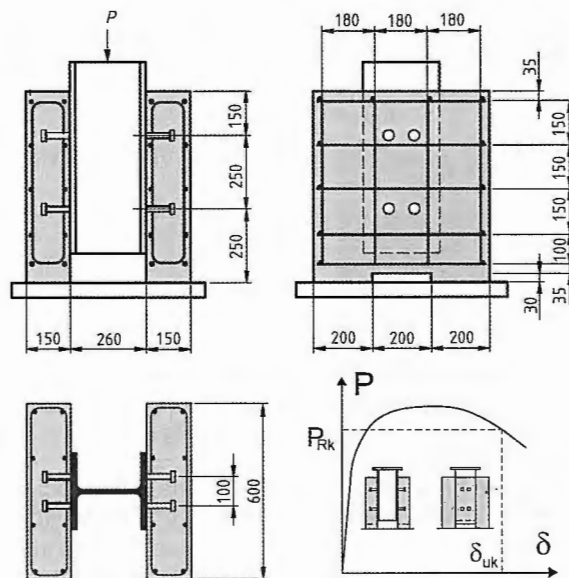
Niekonwencjonalne łączniki w konstrukcjach zespolonych i ich wymiarowanie według Eurokodu 4

Odmienne właściwości materiałowe, jakimi cechują się stal i beton skłaniają do zespalania obydwu tych materiałów w konstrukcji w taki sposób, aby wykorzystać ich zalety, a zniwelować ich wady. Klasycznym przykładem takiego rozumowania jest konstrukcja jednoprzęsłowej belki zespolonej, w której naprężenia rozciągające są przenoszone w głównej mierze przez dolną półkę dźwigara stalowego, a ściskające – przez płytę betonową zespoloną z półką górną tego dźwigara stalowego. Warunkiem koniecznym skutecznego zespolenia obydwu materiałów w konstrukcji jest zapewnienie przeniesienia naprężeń ścinających w płaszczyźnie zespolenia. Znanych jest wiele rodzajów łączników zespalających stal i beton. Można je ogólnie podzielić na trzy grupy: łączniki stalowe sztywne (zwane zapórkami lub opórkami), łączniki stalowe wiotkie (sworznie) i dyble betonowe formowane przez beton wypełniający wycięcia wykonane w środniku lub w tzw. łącznikach listwowych.

Norma konstrukcji zespolonych Eurokod 4 [1] opisuje szczegółowo wymiarowanie łączników sworzniowych, a więc należących do drugiej z wymienionych grup. W odniesieniu do pozostałych łączników pozostawia się projektantowi względną swobodę w wymiarowaniu. Oznacza to, że po spełnieniu podstawowych warunków konstrukcyjnych, jakim powinny odpowiadać łączniki w stalowo-betonowych konstrukcjach zespolonych, dopuszcza się wymiarowanie łączników niestandardowych na podstawie badań typu „push-out”. Sposób przeprowadzania tych badań oraz interpretowanie ich wyników opisuje szczegółowo załącznik B do Eurokodu 4. Ta interesująca metoda projektowania popartego badaniem stwarza możliwość wprowadzania do budownictwa innowacyjnych, niestosowanych dotychczas łączników zespalających elementy stalowe i betonowe w konstrukcji.

Do konieczności zastosowania alternatywnych łączników w dźwigarach zespolonych dochodzi na przykład w sytuacjach, gdy płyta betonowa jest zbyt cienka, aby tradycyjne sworznie dobrze spełniały swoją rolę. W takiej sytuacji jest możliwe zastosowanie łączników listwowych spawanych do półki górnej lub też – w wariancie lżejszym – środników pozbawionych półek, a zaopatrzonych na swojej krawędzi w wycięcia o różnym kształcie, wypełniane następnie betonem płyty. W ostatnich latach zrealizowano w Niemczech dwa obiekty mostowe o konstrukcji zespolonej, w których wprowadzono tego rodzaju niekonwencjonalne łączniki, a ich wymiarowanie poparto wynikami badań [2, 3].

Badania „push-out” weryfikujące nowe rodzaje łączników mają dwa podstawowe cele: sprawdzenie nośności i podatności połączenia w kierunku działania siły rozwarstwiającej oraz sprawdzenie podatności połączenia w kierunku działania siły odrywającej. Nazwa „push-out”, zaczerpnięta z języka angielskiego, oznacza po polsku tyle co „wypychanie” (rys. 1). Pomimo tego, że siła niszcząca jest przykładana w badaniach w kierunku pionowym, do istotnych przemieszczeń dochodzi



Rys. 1. Przykład elementu badawczego typu „push-out” wraz z przykładowym wykresem siła – przemieszczenie [1]

w obydwu kierunkach: pionowym i poziomym. Otóż efekt wzajemnego zbliżania bądź oddalania się płyt betonowych jest związany z konkretnym kształtem łączników. Kształt ten decyduje o tym, czy siła pionowa ze środnika przekazuje się na płytę betonową w przybliżeniu osiowo czy mimośrodowo. W zależności od tego, jaki jest kierunek mimośrodowo, można mieć do czynienia z przybliżaniem lub oddalaniem się płyt betonowych.

Te dwa kryteria zniszczenia: rozwarstwienie i odrywanie w płaszczyźnie zespolenia mają swoje odzwierciedlenie w przepisach wymiarowania Eurokodu 4:

- tzw. charakterystyczna wartość przesuwu δ_{uk} środnika stalowego względem płyty betonowej nie może przekraczać 6 mm (por. rys. 1),
- przemieszczenie płyty betonowej w kierunku prostopadłym do jej powierzchni w chwili osiągnięcia w badaniu 80% siły maksymalnej nie może przekraczać połowy przesuwu δ środnika stalowego względem płyty betonowej.

Łączniki listwowe z wycięciami o kształcie „puzzle” w wariancie bez półki dźwigara stalowego

Połączenie dźwigara stalowego z nadbetonowaną płytą za pomocą wycięć o kołowym kształcie zostało zaproponowane i dopuszczone do stosowania w budownictwie w Niemczech już w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku [4]. Przez kolejne lata pojawiały się różnorakie rozwiązania kształtu wycięć w środniku stalowym. Należały do nich m.in. kształty eliptyczne, półokrągłe, „puzzle”. Te ostatnie stworzyły możliwość zasadniczej redukcji zużycia stali konstrukcyjnej, gdyż w przypadku regularnego, tj. symetrycznego wycięcia, „puzzle” można wycinać z jednego arkusza blachy bez powstawania odpadów

materiałowych. Pierwszy obiekt mostowy zaprojektowany przy użyciu tych łączników powstał w niemieckiej miejscowości Pöcking w roku 2003 [2].

Jak wspomniano wyżej, wymiarowanie tych niekonwencjonalnych łączników nie zostało ściśle określone w Eurokodzie 4. Istnieje natomiast szereg prac badawczych, które podają propozycje wymiarowania. Do najważniejszych można zaliczyć pracę [5], opartą na m.in. wynikach badań *Wurzera* (1997) i *Zapfe* (2001) prowadzonych na Uniwersytecie Bundeswehry w Monachium. Zgodnie z [5] można wyróżnić cztery mechanizmy niszczenia listwowych połączeń zespolonych:

- 1) docisk krawędzi stalowej do betonu – nośność P_{Rk1} ,
- 2) wyciąganie środnika stalowego z betonu – nośność P_{Rk2} ,
- 3) przecinanie betonu – nośność P_{Rk3} ,
- 4) uplastycznienie stali środnika – nośność P_{Rk4} .

Wymienione mechanizmy zniszczenia określają zależności [5]:

$$P_{Rk1} = 72,7 \sqrt{f_{cm}} h_d t_w, \quad (1)$$

$$P_{Rk2} = 25,6 h_{tc}^2 f_{ctm} \rho_l, \quad (2)$$

$$P_{Rk3} = 23,4 A_d f_{ctm} \rho_l f_h, \quad (3)$$

w których:

$$f_h = \left(1,2 - \frac{h_d}{180} \right) \leq 1,00, \quad (4)$$

f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie,
 f_{ctm} – średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie,
 h_d – wysokość wycięcia w środniku stalowym,
 t_w – grubość środnika stalowego,
 h_{tc} – wysokość bryły odłamu betonu, równa odległości między środkami ciężkości wycięcia w środniku a dolną krawędzią płyty betonowej,

ρ_l – parametr stopnia zbrojenia dybla betonowego utworzonego przez wycięcie w środniku,

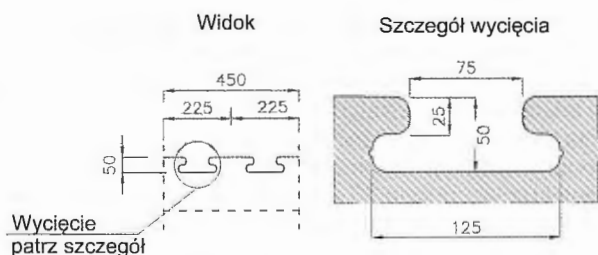
A_d – pole powierzchni pojedynczego wycięcia w środniku.

Pierwsze trzy wymienione wyżej mechanizmy niszczenia odnoszą się do betonu, czwarty zaś – do stali.

Badania „push-out” niekonwencjonalnych łączników listwowych z wycięciami o kształcie „puzzle”

• **Program badań eksperymentalnych.** W roku 2008 i 2010 na Uniwersytecie Kaiserslautern w Niemczech przeprowadzono dwie serie badań „push-out” z łącznikami listwowymi o kształcie „puzzle”. Tego rodzaju badania są standardowym sposobem sprawdzania niekonwencjonalnych łączników w konstrukcjach zespolonych, zalecanym w Eurokodzie 4 jako źródło pozyskania parametrów wytrzymałościowych połączenia przyjmowanych do wymiarowania. Pierwszą serię badań opisano w pracach [6, 7, 8]. W niniejszym artykule przytoczono najbardziej interesujące wyniki uzyskane w drugiej serii.

Na podstawie przytoczonych wyżej zależności zaprojektowano taki kształt wycięcia „puzzle” (rys. 2), przy którym wartości nośności $P_{Rk1} \div P_{Rk4}$ były stosunkowo bliskie jednej wspólnej wartości. Chodziło o to, aby połączenie było zaprojektowane optymalnie z punktu widzenia wycięcia stali i betonu.



Rys. 2. Połączenie środnika stalowego z płytą betonową przyjęte w badaniach

Do tej wstępnej analizy obliczeniowej założono następujące parametry konstrukcji jako realne we współczesnych konstrukcjach zespolonych:

- gatunek stali konstrukcyjnej: S355, charakterystyczna granica plastyczności $f_{yk} = 360$ MPa;
- klasa betonu C35/45 według Eurokodu 4, $f_{cm} = 43,0$ MPa, $f_{ctm} = 3,2$ MPa;
- grubość środnika $t_w = 8$ mm.

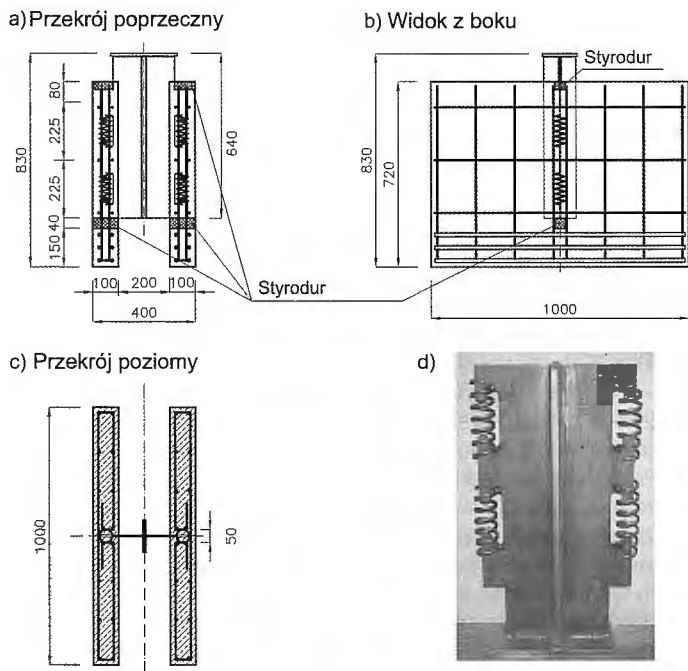
Do obliczenia nośności P_{Rk4} odpowiadającej kryterium uplastycznienia stali przyjęto, że krytyczny przekrój poziomy u podstawy stalowego łącznika jest obciążony jednocześnie momentem zginającym i siłą ścinającą; rozpatrzono złożony stan naprężenia według hipotezy *Hubera-Misesa-Hencky’ego*. W projektowaniu geometrii wycięć w środniku stalowym przyjęto ponadto, że pręty zbrojenia nie są umieszczane w wycięciach. Wartość parametru ρ_l założono tym samym równą 1,00. W zaprojektowanym połączeniu uzyskano $h_{tc} = 42,3$ mm oraz $A_d = 50,0$ cm². Wyznaczone we wstępnych obliczeniach nośności $P_{Rk1} \div P_{Rk4}$ zestawiono w tabl. 1. W dwóch ostatnich kolumnach tablicy zestawiono wartości nośności pojedynczego wycięcia oraz całego elementu badawczego zawierającego cztery wycięcia.

Tablica 1
Wyniki wstępnych obliczeń nośności połączeń zespolonych

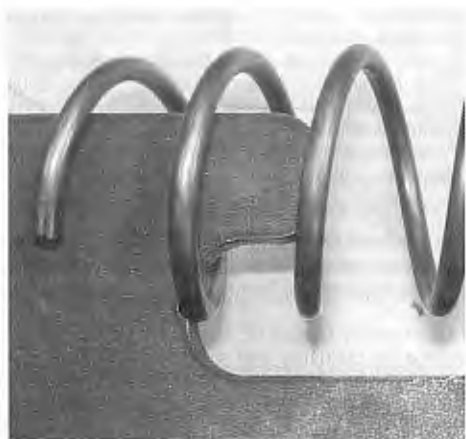
Kryterium nośności		Nośność [kN] wyznaczona obliczeniowo w przypadku:		
		wycięcia pojedynczego	całego elementu badawczego	
1	Beton	docisk krawędzi stalowej do betonu	190,7	762,8
2	Beton	wyciąganie środnika stalowego z betonu	146,6	586,3
3	Beton	przecinanie betonu	345,3	1381,1
4	Stal	uplastycznienie stali środnika	177,3	709,2
Minimalna, tj. miarodajna wartość nośności				586,3

Zaprojektowano cztery elementy badawcze (rys. 3), które miały po dwa wycięcia kształtu „puzzle” na każdej z dwóch krawędzi podłużnej środnika. Środniki stalowe wycinano metodą plazmową. W trzech elementach badawczych umieszczono w strefach wycięć dodatkowo zbrojenie uzwojające. Czwarty element badawczy (tzw. świadek) pozostawiono bez tego dodatkowego zbrojenia. Rolą uzwojenia było w zamysle autora tej koncepcji *Thomasa Friedricha* [7, 8] zwiększenie nośności na docisk krawędzi stalowej do betonu P_{Rk1} oraz na wyciąganie środnika stalowego z betonu P_{Rk2} . Zbrojenie uzwojające średnicy 5 mm wykonano ze stali zbrojeniowej BSt500 (charakterystyczna granica plastyczności $f_{yk} = 500$ MPa). Średnica uzwojenia wynosiła 50 mm, a skok uzwojenia – 25 mm. W celu ułatwienia montażu zbrojenia uzwojającego do środnika stalowego przy zasadniczych wycięciach środnika o kształcie „puzzle” wykonano dodatkowe półokrągłe wycięcia średnicy 5 mm (rys. 4).

• **Przebieg badań.** Proces obciążania próbek był zgodny z procedurą wymaganą przepisami Eurokodu 4 [1], opisaną szczegółowo w Załączniku B tego Eurokodu. Najpierw wykonano 25 cykli obciążenia i odciążenia w granicach od 5 do 40% nośności badanego elementu wyznaczonej obliczeniowo. Celem tego wstępnego obciążenia jest eliminacja naturalnej przyczepności stali i betonu. Przyczepność ta, zależna m.in. od stopnia czystości powierzchni stali i zmienna w dość szerokim zakresie, musiałaby bowiem zostać uwzględniona w interpretacji wyników eksperymentu jako dodatkowy parametr badań. Wzięcie pod uwagę wpływu przyczepności byłoby jednak w badaniu „push-out” zbędne, tak samo jak niecelowe byłoby



Rys. 3. Badane elementy stalowo-betonowe: a), b), c) szkice konstrukcji, d) widok średnika stalowego ze zbrojeniem uwzględniającym przed betonowaniem

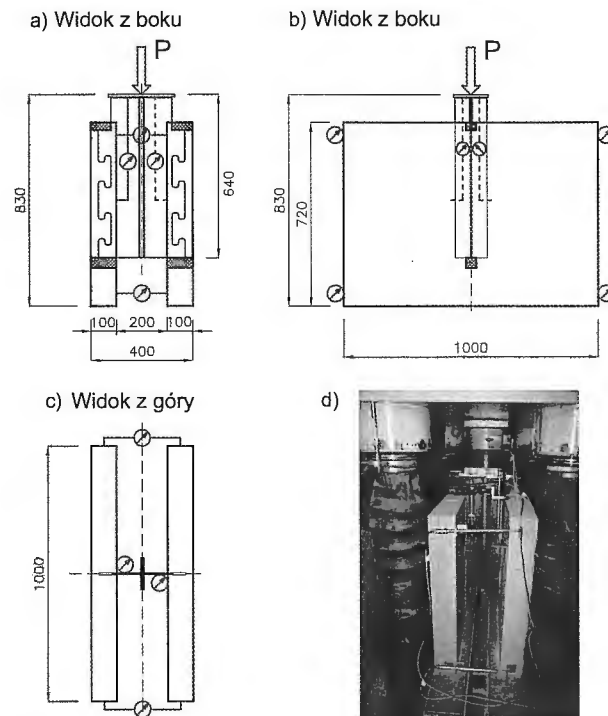


Rys. 4. Montaż zbrojenia uzwajającego na średnikach stalowych

uwzględnianie przyczepności stali i betonu w projektowaniu konstrukcji zespolonej. Po fazie wstępnego obciążania, sterowanego przemieszczeniem zwiększonym z prędkością poniżej 5 mm na minutę, następowało zasadnicze obciążenie, również sterowane przemieszczeniem. Czas trwania tej zasadniczej fazy eksperymentu wynosił co najmniej 15 min. Następnie, po osiągnięciu maksymalnej siły ściskającej, badanie było kontynuowane z tą samą prędkością wysuwu tłoka prasy do momentu, aż obciążenie zmniejszyło się o ponad 20%. Cały eksperyment trwał około dwóch godzin.

Podczas badania w sposób ciągły mierzono przesuw dociskanego średnika stalowego względem nieruchomych płyt betonowych. Pomiar ten wykonywano za pomocą dwóch pionowych indukcyjnych czujników przemieszczeń

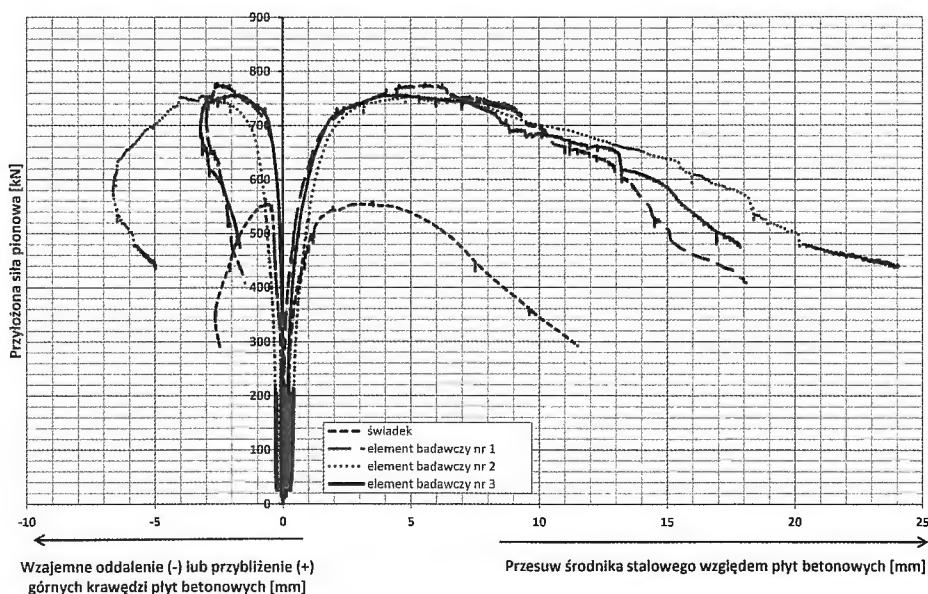
(rys. 5). Kolejne cztery indukcyjne czujniki przemieszczeń wskazywały wzajemne zbliżenie bądź oddalenie obydwu płyt betonowych. Na każdy z czterech narożników płyt przypadł jeden czujnik zainstalowany poziomo.



Rys. 5. Indukcyjne czujniki przemieszczeń zainstalowane na badanych elementach stalowo-betonowych: a), b), c) szkice rozmieszczenia czujników, d) element na stanowisku badawczym; widoczne dwa poziome i dwa pionowe czujniki

• **Wyniki badań.** Na rysunku 6 zilustrowano otrzymane w badaniach zależności pomiędzy przyłożoną siłą ściskającą oraz:

- przesuwem stalowego średnika względem betonowych płyt, obliczonym jako średnia arytmetyczna odczytów obydwu czujników przemieszczenia zainstalowanych pionowo (por. rys. 5);
- wzajemnym zbliżeniem bądź oddaleniem płyt betonowych, obliczonym jako średnia arytmetyczna odczytów obydwu



Rys. 6. Zależności siły pionowej od przemieszczeń uzyskane w badaniach

czujników przemieszczenia zainstalowanych poziomo w górnej części elementu badawczego (por. rys. 5).

Wskazania czujników, uwzględniane przy obliczaniu średniego przemieszczenia, były w przypadku obydwu par czujników zbliżone do siebie przez cały czas badania. Natomiast obydwa czujniki przemieszczenia zainstalowane poziomo w dolnej części badanego elementu wskazywały stałe wartości bliskie zera i nie przekraczające $\pm 0,8$ mm. Podczas badań dochodziło zatem do niewielkich przesuwów dolnych krawędzi płyt betonowych po podłożu.

Zestawienie pomierzonych maksymalnych sił osiągniętych w badaniach oraz odpowiadających tym siłom wartości przemieszczeń podano w tabl. 2. Osiągnięta średnia siła maksymal-

Tablica 2
Wybrane wyniki badań

Element badawczy	Maksymalna siła ściskająca P_{max}	Odpowiadający sile P_{max} przesuwy podłużny δ średnika względem płyt betonowych	Odpowiadające sile P_{max} wzajemne zbliżenie (+) lub oddalenie (-) krawędzi płyt betonowych	
			górných	dolnych
	kN	mm	mm	mm
Świadek	563,9	3,51	-0,68	-0,23
1	778,6	5,56	-2,47	-0,09
2	755,2	5,08	-3,13	0,38
3	763,1	4,47	-1,88	-0,10
Wartość średnia 1+3	765,6	5,04	-2,49	0,06

na P_{max} z badań trzech elementów ze zbrojeniem uzwajającym jest o ponad 35% większa od siły osiągniętej w elemencie świadku. Odpowiadający sile P_{max} średni z badań trzech elementów przesuwy podłużny δ średnika względem płyt betonowych jest o ponad 40% większy niż w przypadku elementu świadka i bliski 5 mm. Wymagana w Eurokodzie 4 [1] podatność złącza mierzona przesuwy δ_{uk} określonym na poziomie 6 mm (por. rys. 1) została osiągnięta we wszystkich trzech badanych elementach ze zbrojeniem uzwajającym. Spełnione zostało w tych elementach także ostatnie wymaganie Eurokodu 4, ograniczające przemieszczenie płyty betonowej w kierunku prostopadłym do jej powierzchni, pomierzone w chwili osiągnięcia w badaniu 80% siły maksymalnej, do maksimum połowy przesuwy δ średnika stalowego względem płyty betonowej.

Warto zaznaczyć, że do celów powyższego sprawdzenia należy odpowiednie wartości z krzywych narysowanych po lewej stronie osi rzędnych na rys. 6 podzielić przez dwa. Przemieszczenie prostopadłe do powierzchni płyty betonowej jest bowiem połową zmiany odległości pomiędzy dwoma oddalającymi się od siebie płytami.

Wnioski

Zastosowanie zbrojenia uzwajającego w połączeniu listwowym typu „puzzle” średnika stalowego z płytą betonową spowodowało w opisywanych badaniach korzystne efekty:

- zwiększenie siły niszczącej ścinającej płaszczyznę zespolenia o 35%,

- zwiększenie podatności złącza mierzony wartości podłużnego przesuwy średnika stalowego względem płyt betonowych w chwili osiągnięcia siły niszczącej o ponad 40%.

Spełnione zostały jednocześnie wymagania Eurokodu 4 dotyczące odrywania w płaszczyźnie zespolenia.

Stosunkowo prosty i niedrogi zabieg, jakim jest zastosowanie zbrojenia uzwajającego w zespolonym połączeniu listwowym typu „puzzle”, może więc zapewnić znaczne zwiększenie nośności i poprawić podatność połączenia.

Wyniki przeprowadzonych badań są potwierdzeniem wniosków postawionych w pracach [6, 7, 8].

PIŚMIENNICTWO

- [1] EN 1994-1-1:2004. Eurokod 4: Wymiarowanie stalowo-betonowych konstrukcji zespolonych. Część 1-1: Ogólne zasady wymiarowania i zasady szczegółowe dla budynków.
- [2] Schmitt V., Seidl G., Hever M., Zapfe C.: Verbundbrücke Pöcking – innovative VFT-Träger mit Betondübeln. „Stahlbau”, Heft 6, 2004.
- [3] Seidl G., Braun A.: VFT-WIB-Brücke bei Vigaun – Verbundbrücke mit externer Bewehrung. „Stahlbau”, Heft 2, 2009.
- [4] Andrä H.-P.: Neuartige Verbundmittel für den Anschluss von Ortbetonplatten an Stahlträger. „Beton- und Stahlbetonbau”, Heft 12, 1985.
- [5] Mangerig I., Zapfe C., Burger S.: Betondübel im Verbundbau. „Stahlbau Kalender”, 7, 2005.
- [6] Abramski M., Schnell J.: Experimental investigations of concrete dowels in composite floor system. Current Scientific Challenges in Concrete and Steel Structures and Material Technology. Technische Universität Kaiserslautern, 2008.
- [7] Abramski M., Friedrich T., Kurz W., Schnell J.: New prestressed composite slab system for buildings with multiple HVACR installations. Proceedings of VI International Engineering Conference „Composite Construction in Steel and Concrete”, July 20-25, 2008, Colorado, USA.
- [8] Abramski M., Friedrich T., Kurz W., Schnell J.: Tragwirkung von Betondübeln für Sandwich-Verbunddecken mit großen Stegöffnungen. „Stahlbau”, Heft 4, 2010.

PRASA TECHNICZNA • PRASA TECHNICZNA • PRASA TECHNICZNA • PRASA TECHNICZNA • PRASA TECHNICZNA • PRASA TECHNICZNA • PRASA TECHNICZNA

Wiadukt o lekkiej kratowej konstrukcji stalowej

Konstrukcję przęsła wiaduktu stanowią dwa stalowe dźwigary kratowe (rysunek). Rozpiętość ich pasa dolnego wynosi 80,82 m, a pasa górnego 101,77 m. Wysokość konstrukcji w miejscu połączenia z przyczółkami wynosi 5,80 m, a w środku rozpiętości 2,30 m. Dźwigary są sztywno połączone z przyczółkami i stanowią wraz z nimi ustrój ramowy. Ich elementy wykonano z rur stalowych średnicy 508 i 813 mm, o ściance grubości 50 mm. Pomost ma szerokość 10,50 m.

Na wykonanie konstrukcji wiaduktu zużyto 310 t stali gatunku S355. (ip).

Źródło: „Bauingenieur”, Oktober 2009.

Wiadukt o lekkiej kratowej konstrukcji stalowej

