

Wpływ rodzaju zbrojenia poprzecznego o niepełnym zakotwieniu na nośność płyty żelbetowej przy przebicium

Tadeusz Urban¹, Michał Goldyn², Łukasz Krawczyk³

Katedra Budownictwa Betonowego, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska,
Politechnika Łódzka, e-mail:¹tadeusz.urban@p.lodz.pl ²michal.goldyn@p.lodz.pl
³lukasz.krawczyk@p.lodz.pl

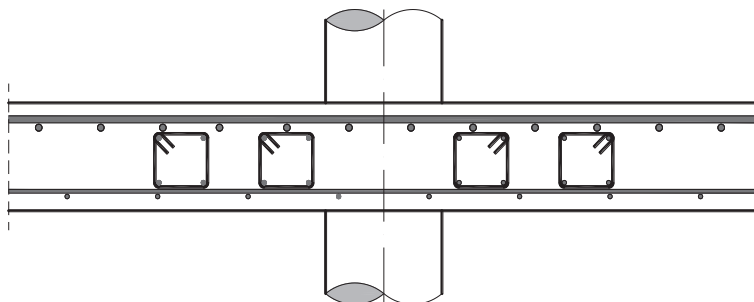
Streszczenie: W referacie omówiono sposoby zbrojenia płyt żelbetowych za pomocą wkładek stalowych umieszczanych pomiędzy siatkami prętów głównych. Takie rozwiązania zapewniają łatwość montażu, ale nie gwarantują skutecznego zakotwienia zbrojenia poprzecznego, które charakteryzuje strzemiona obejmujące zbrojenie podłużne strefy ściskanej i rozciąganej. Nieuzasadnione jest zatem w takich przypadkach stosowanie obliczeniowych procedur normowych.

Prezentowano kilka systemów zbrojenia poprzecznego w formie koszy bądź drabinek. Zaprezentowano dostępne w literaturze wyniki badań eksperymentalnych modeli zbrojonych za pomocą omawianych akcesoriów. Przeprowadzona analiza porównawcza efektywności zbrojenia o niepełnym zakotwieniu wykazała, iż można za jego pomocą znacząco podnieść nośność płyty na przebicie. Otrzymane wartości były jednak na ogół mniejsze od uzyskanych za pomocą procedury normowej – Eurokodu 2.

Słowa kluczowe: przebicie, zbrojenie poprzeczne, zakotwienie, kosze zbrojenia

1. Wprowadzenie

Asumpt do podjęcia rozważań na temat efektywności różnych typów zbrojenia poprzecznego na przebicie stanowiła praktyka projektowa i wykonawcza. W wielu realizowanych współcześnie monolitycznych budynkach szkieletowych typu płyta – słup stosowane jest zbrojenie strzemionami, które nie obejmują prętów głównych płyty zarówno strefy ściskanej jak i rozciąganej (patrz rys. 1). Takie podejście jest podyktowane względami technologicznymi. Montaż strzemion obejmujących główne zbrojenie płyty, zgodnie z zaleceniami normowymi, w warunkach budowy jest bardzo kłopotliwy.

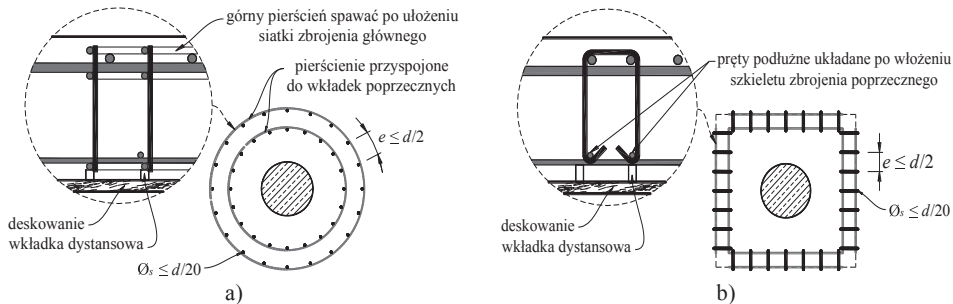


Rys. 1. Zbrojenie poprzeczne strefy podporowej za pomocą wkładek poprzecznych o niepełnym zakotwieniu

Stosowanie wspomnianego, bardziej technologicznego rozwiązania wymaga jednak odpowiedzi na podstawowe pytanie: czy można dla takich przypadków stosować normowe procedury obliczeniowe, np. wg Eurokodu 2. Celem referatu jest próba odpowiedzi na to pytanie na podstawie dostępnych w literaturze wyników badań.

2. Przegląd systemów zbrojenia na przebiecie o niepełnym zakotwieniu

Jedną z pierwszych prób poprawy technologiczności zbrojenia na przebiecie stanowią wytyczne *Leonharda* z 1974 roku zawarte w pracy [1]. Zaproponowano w nich zbrojenie poprzeczne w formie gotowych wkładów, które składały się z prętów poprzecznych przyspojonych do pierścieni w sposób pokazany na rys. 2a. Zbrojenie tego typu układane było na prętach siatki dolnej po czym zalecało się wstawianie pierścienia stanowiącego podparcie dla siatki prętów zbrojenia górnego. Aby zapewnić należyte zakotwienie w strefie rozciąganej, konieczne było dospawanie kolejnego, wieńczącego pierścienia. Rozwiązanie to jest jednak kłopotliwe z punktu widzenia wykonawstwa, ponieważ wymaga precyzyjnego spawania pierścieni w warunkach budowy. Z tego względu w przytoczonej pracy proponowano również stosowanie wkładów w formie strzemion nanizanych na pręty sytuowane na zbrojeniu głównym – patrz rys. 2b. Wymagano jednak, aby wewnątrz haków umieszczać dodatkowe pręty podłużne, co miało gwarantować właściwe zakotwienie w strefie ściskanej. Należy zatem zauważyć, iż autor wspomnianej pracy zwracał szczególną uwagę na kształtowanie zakotwienia zapewniającego obejmowanie zarówno prętów strefy ściskanej jak i rozciąganej. Zbrojenie to jest jednakże kłopotliwe ze względów technologicznych, dlatego też podejmowano kolejne próby znalezienia rozwiązania uwzględniającego aspekty ekonomiczne i wykonawcze.



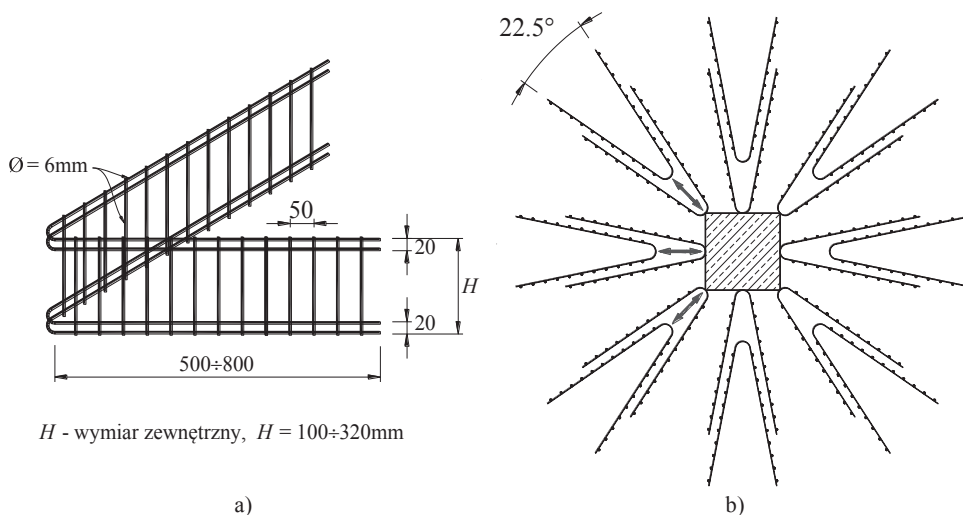
Rys. 2 Zbrojenie poprzeczne stref podporowych za pomocą gotowych wkładów w postaci: a) pierścieni, b) strzemion nanizanych na pręty, zaproponowanych w [1]

Eurokod 2 wymaga, aby zbrojenie poprzeczne było odpowiednio zakotwione w strefie ściskanej i rozciąganej betonu. Wskazuje, iż może się ono składać z kombinacji:

- strzemion otaczających zbrojenie podłużne i strefę ściskaną betonu,
- prętów odgiętych,
- klatek, drabinek,

itp., pod warunkiem wykazania dostatecznego ich zakotwienia w strefach ściskanej i rozciąganej elementu.

Dopuszcza się zatem do stosowania wkłady będące przedmiotem badań *Regana* i *Samadiana* [2], które znane są w literaturze pod nazwą systemu „Riss Star”. Składają się one z kształtek złożonych z prętów poprzecznych o niewielkiej średnicy ($\phi = 6$ lub 8 mm) przyspojonych do prętów podłużnych wygiętych w kształcie litery V – patrz rys. 3a. Rozstaw prętów poprzecznych jest niewielki i w przypadku dostępnych w sprzedaży wkładów systemu AVI-DE-Durchstanzelement [3] wynosi 50 mm. Z tego względu można mówić o rozmytym zbrojeniu poprzecznym. Elementy te umieszcza się bezpośrednio na siatce zbrojenia dolnego, po czym przykrywa zbrojeniem górnym. Kształtki rozmieszcza się symetrycznie wokół podpory, natomiast zasięg strefy zbrojonej reguluje się za pomocą ich liczby i wzajemnego przesunięcia, co pokazano na rys. 3b. Wysokość wkładów jest zależna od grubości płyty i powinna umożliwiać zachowanie wymaganej otuliny po ułożeniu zbrojenia podłużnego. Minimalna liczba wkładów, którą należy zastosować wynosi 8 sztuk.



H - wymiar zewnętrzny, $H = 100+320\text{mm}$

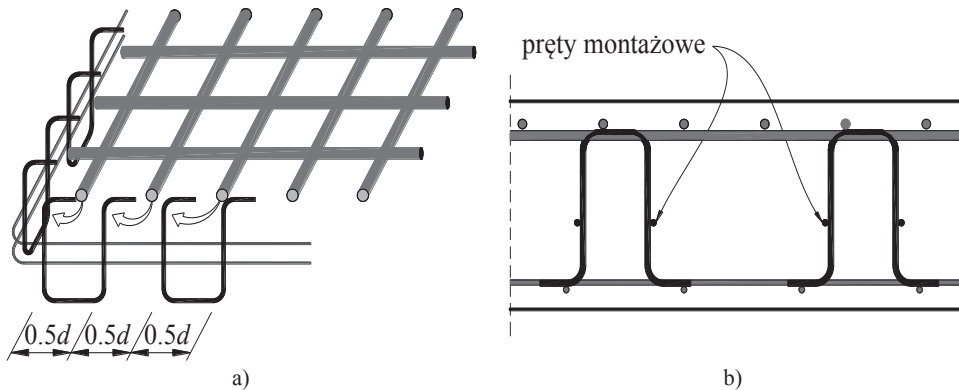
Rys. 3 Elementy zbrojenia na przebiecie systemu AVI-DE-Durchstanzelement [4] : a) geometria pojedynczej wkładki, b) schemat rozmieszczenia wokół podpory

Zakotwienie tego rodzaju zbrojenia poprzecznego realizuje się za pomocą dwóch prętów przyspojonych, umieszczonych na obu końcach prętów poprzecznych. Jego nośność można oszacować korzystając z zapisów Eurokodu 2 dotyczących kotwienia za pomocą prętów przyspojonych, dotyczących prętów o średnicy mniejszej od 12 mm. Wówczas nośność zakotwienia zależy głównie od obliczeniowej wytrzymałości złącza (spoiny). Obliczenia własne dla danych materiałowych podanych przez producenta pokazały, iż w przypadku zastosowania betonu klasy C20/25 możliwe jest pełne wykorzystanie granicy plastyczności zbrojenia. Wniosek ten znajduje potwierdzenie w wynikach analizy numerycznej prowadzonej przez *Beutela* [4], który rozpatrywał przestrzenną pracę zakotwienia. Zauważa on, iż dwa pręty przyspojone stanowią niemal tak samo efektywny element kotwiący, jak spęczona główka trzpienia dwugłówkowego o średnicy stanowiącej trzykrotność średnicy kotwionego pręta. Powierzchnia współpracująca wynosi w przypadku trzpieni $A_{anch} = (3d_s)^2 \cdot \pi/4 = 7d_s^2$, wobec $A_{anch} = 2 \cdot 5d_s^2 \cdot 0,6 = 6d_s^2$ (gdzie $5d_s$ stanowi ustaloną na drodze obliczeń szerokość współpracującą prętów poprzecznych, natomiast 0,6 jest współczynnikiem redukcyjnym uwzględniającym interakcję prętów przyspojonych) w przypadku dwóch prętów przyspojonych. Ponadto, w przeciwieństwie do prętów odgiętych, obserwuje się niewielki poślizg w betonie, który nie wzrasta znacząco nawet po zarysowaniu, czego dowodzą wyniki badań cytowanych w [4].

Znaczną grupę rozwiązań stanowią systemy zbrojenia poprzecznego bazujące na kotwieniu za pomocą odgięć o długości wynikającej z warunku przeniesienia sił na styku stali i betonu. Przykład tego typu zbrojenia stanowią wkłady systemu Shear-Hoop zaproponowanego przez *Chanę* [5]. Mają one formę koszy złożonych z U-kształtnych wkładek połączonych za pomocą prętów podłużnych. Umieszcza się je bezpośrednio na zbrojeniu dolnym po czym pod odgięcia prętów wsuwa się gotową siatkę zbrojenia głównego. Ideę montażu pokazano schematycznie na rys. 4a. Z uwagi na swój kształt zbrojenie to obejmuje jedynie pręty strefy rozciąganej, co budzi zastrzeżenia co do efektywności tego rozwiązania. Badania przeprowadzone przez autora pokazały co prawda, iż osiąga się efekt zbliżony do obserwowanego dla tradycyjnych strzemion obejmujących pręty zbrojenia strefy ściskanej i rozciąganej, jednak nie można wykluczyć możliwości przedwczesnego zniszczenia na skutek rozwarstwienia płyty. Ponadto specyfika tego rodzaju wkładów, które trafiają na budowę w formie gotowych elementów, wymaga, aby były one dostosowane do geometrii konkretnej podpory.

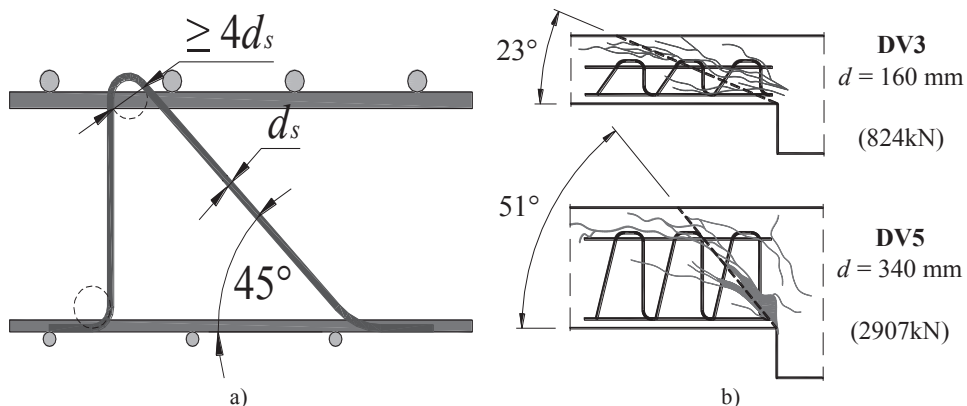
Koncepcja kotwienia za pomocą odgięć znalazła również odzwierciedlenie w systemie zbrojeniowym Shear-Hat autorstwa *Yamady* [6]. Tworzą go wkłady składające się z prętów o kapeluszowej formie, połączonych wzajemnie przyspojonymi prętami podłużnymi – patrz rys. 4b. Zniszczenie płyt zbrojonych za ich pomocą cechowało

odspajanie otuliny w strefie rozciąganej płyty. Maksymalny obserwowany przyrost nośności względem płyt bez zbrojenia poprzecznego wynosił około 32%, a średnio nie przekraczał 20%. Badania prowadzone przez Yamadę obejmowały również modele porównawcze ze zbrojeniem poprzecznym, zakotwionym poprawnie za pomocą haków obejmujących pręty podłużne strefy ściskanej i rozciąganej. W zależności od mocy zbrojenia poprzecznego obserwowano 2÷2,5-krotny wzrost nośności w stosunku do elementów Shear-Hat.



Rys. 4 Gotowe wkłady w formie prętów z odgięciem: a) system Shear-Hoop, b) system Shear-Hat

Kolejny ze sposobów zbrojenia na przebicie stanowią wkłady kratownicowe systemu FILIGRAN pokazane na rys. 5a., które w nieco zmodyfikowanej formie były przedmiotem badań Häuslera przedstawionych w pracy [7]. W przypadku płyt o niewielkiej grubości (DV2 i DV3) rysa zniszczenia przebiegała pomiędzy pierwszymi dwoma obwodami zbrojenia poprzecznego, co wynikać mogło z przyjętego rozstawu obwodów, równego około $1,0d$. Rysa ukośna widoczna na przekroju przez model DV5 była nachylona pod znacznie większym kątem wynoszącym $\sim 50^\circ$ (patrz rys. 5b). Na podstawie obrazu zarysowania można było stwierdzić, iż przekrój poprzeczny wkładki był wystarczający, aby skutecznie ograniczyć rozwarcie i dalszy rozwój rysy. O zniszczeniu zdecydowały rysy biegnące pod znacznie ostrzejszym kątem, co skutkowało uzyskaniem większego obciążenia granicznego V_u . Odkształcenia zbrojenia poprzecznego pokazały, iż jego efektywność rosła wraz ze zwiększaniem się grubości płyty. Podczas badania elementu DV5 (płyta grubości 400 mm) rejestrowano w zbrojeniu poprzecznym naprężenia równe granicy plastyczności, czego nie obserwowano w przypadku pozostałych modeli.



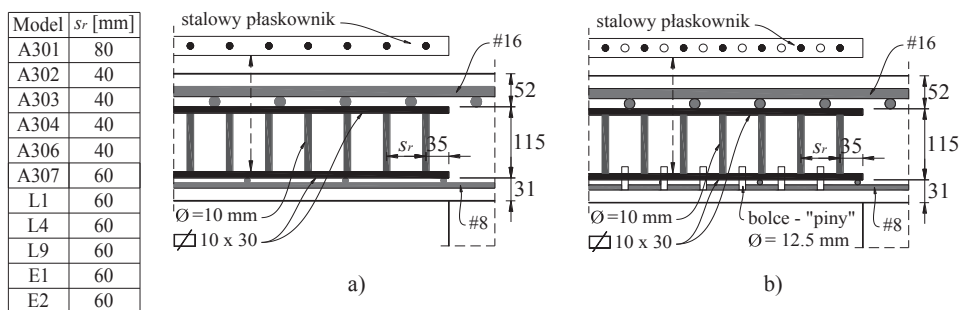
Rys. 5 Zbrojenie poprzeczne w formie wkładów kratownicowych: a) geometria zbrojenia, b) przebieg rys ukośnych w badaniach Häuslera w zależności od grubości rozpatrywanej płyty

Na podstawie rezultatów przytoczonych badań stwierdzono, iż:

- przyspojone pręty podłużne umożliwiły uzyskanie podobnego zakotwienia jak w przypadku tradycyjnych strzemion mimo, iż wkładki te nie obejmowały zbrojenia podłużnego
- efektywność zakotwienia za pomocą prętów przyspojonych wzrasta wraz ze zwiększaniem się grubości płyty,
- duży wpływ na nośność ma sposób rozmieszczenia wkładów (obserwuje się odmienne zachowanie w przypadku wkładek umieszczonych prostopadłe oraz równoległe do krawędzi podpory),
- możliwe jest znaczne zwiększenie efektywności tego typu zbrojenia w przypadku doprowadzania wierzchołków kratownicy elementu do poziomu zbrojenia podłużnego.

Innego rodzaju zbrojenie poprzeczne zostało zaprezentowane przez *Trautweina* [8] i *Andrade* [9]. Badali oni efektywność akcesoriów składających się z prętów pionowych przyspawanych do dwóch płaskowników grubości 10 mm. Elementy te przewidziano do montażu pomiędzy zbrojeniem górnym i dolnym płyty. Zestawy zostały pokazane na rys. 6a i 6b. Na przekrojach płyt badanych przez *Andrade* obserwowano rysy poziome – świadczące o działaniu znacznych sił rozwarstwiających. Z uwagi na ten fakt, modele *Trautweina* zbrojone były wkładkami zaopatrzonymi w „piny” – fragmenty prętów dospawane do dolnego płaskownika. Dzięki takiemu rozbudowaniu akcesorium problem rozwarstwiania został wyeliminowany. Płyty E1 i E2 zniszczyły się poprzez przebicie. Rysa przebiegała poniżej zbrojenia dolnego, przecinając płytę skośnie poza strefą zbrojenia poprzecznego. Taka forma zniszczenia została wymuszona przez autorów poprzez zastosowanie zbrojenia poprzecznego o dużej mocy. Autorzy przeprowadzili również badania na płytach o mniejszej intensywności zbrojenia, jednak z uwagi na nietechnologiczność przyjętego rozwiązania nie przytoczono ich wyników.

Rysa zniszczenia w modelach A301 i A305 miała przebieg pionowy i omijała zbrojenie poprzeczne. W przypadku modeli A302 i A303 można było zauważyć poziome rysy, których wystąpienie świadczyło o rozwarstwieniu (delaminacji płyty). Przekroje przez płyty A304 i A306 ujawniły występowanie licznych rys ukośnych a także rysy poziomych równoległych do zbrojenia głównego.



Rys. 5 Zbrojenie poprzeczne w postaci prętów dospawanych do stalowych płaskowników stosowane w badaniach: a) *Andrade* : A301, A302, A303, A304, A306, A307, b) *Trautweina* : E1, E2, L1, L4, L9

3. Porównanie wyników badań

W celu porównania skuteczności różnego rodzaju systemów zbrojenia na przebicie wykonano obliczenia zgodnie z Eurokodem 2. Do porównania przyjęto wyniki badań *Regana* i *Samadiana* [2], *Trautweina* [8] oraz *Andrade* [9]. Modele rozpatrywane w przytoczonych badaniach miały wymiary 3000 x 3000 x 200 mm. Elementy przytwierdzone były do stanowisk za pomocą ściąągów wykonanych z prętów stalowych. Rozpiętość płyt względem punktów podparcia wynosiła 2700 mm. Taki rozstaw odpowiada rzeczywistemu systemowi stropowemu o siatce podpór co 6,75 m w obu kierunkach. Siłę przykładano poprzez stalową płytę o wymiarach 200 x 200 x 50 mm za pomocą siłownika

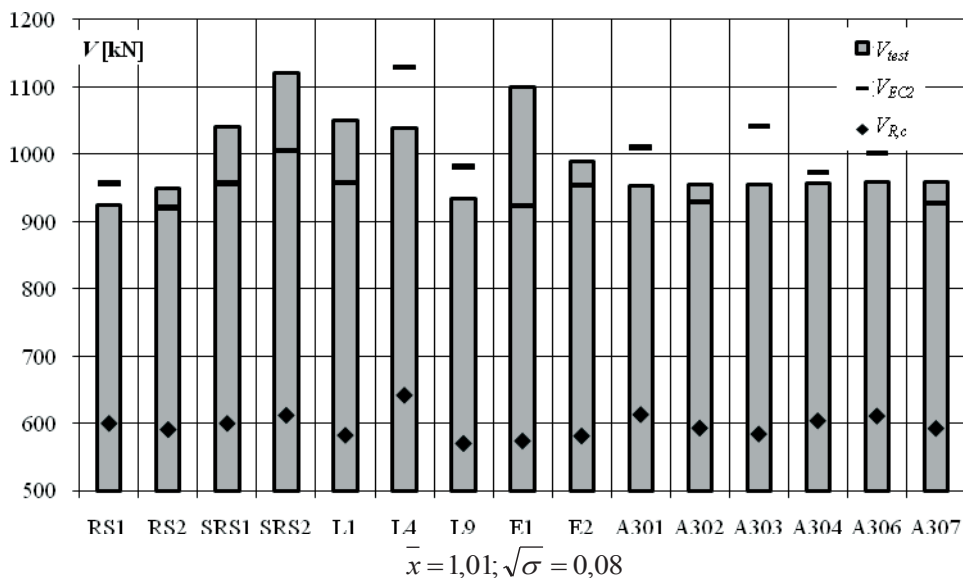
hydraulicznego. Zbrojenie główne płyt było wykonane z prętów #16 w rozstawie co 100 mm w obu kierunkach (stopień zbrojenia wynosił $\rho \approx 1,30\%$). Modele zostały dodatkowo wzmocnione zbrojeniem poprzecznym, omówionym wcześniej.

Zgodnie z zasadami Eurokodu 2 obliczono nośność betonu płyty ($V_{R,c}$), nośność płyty z uwzględnieniem zbrojenia poprzecznego ($V_{R,cs}$), nośność krzyżulca ściskanego ($V_{R,max}$) a także nośność poza strefą zbrojenia poprzecznego (V_{out}). Jako nośność teoretyczną (V_{EC2}) wybrano minimum z trzech przytoczonych wielkości. Należy zaznaczyć, iż nośność poza strefą zbrojenia poprzecznego (V_{out}) w żadnym z rozpatrywanych modeli nie okazała się miarodajna. We wszystkich przypadkach nośność teoretyczna była determinowana nośnością krzyżulca ściskanego ($V_{R,max}$). Oznacza to, iż wspomniane modele charakteryzowały się zbyt wysokim stopniem zbrojenia poprzecznego. W siedmiu z piętnastu modeli nośność ta nie została osiągnięta, co może oznaczać brak pełnej skuteczności zbrojenia poprzecznego.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki analizy w formie graficznej.

Tabela 1. Porównanie nośności eksperymentalnych z teoretycznymi według Eurokodu 2

Model	Autor	d	f_c	$V_{R,c}$	$V_{R,max}$	$V_{R,cs}$	$V_{R,out}$	V_{EC2}	V_{test}	$\frac{V_{test}}{V_{R,c}}$	$\frac{V_{test}}{V_{R,cs}}$	$\frac{V_{test}}{V_{EC2}}$
		[mm]	[MPa]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]			
RS1	Regan i Samadani	164	35,4	600	957	1097	1510	957	925	1,54	0,84	0,97
RS2		164	33,8	591	920	1594	1552	920	950	1,61	0,60	1,03
SRS1		164	35,4	600	957	1097	1510	957	1040	1,73	0,95	1,09
SRS2		164	37,6	612	1006	1610	1608	1006	1120	1,83	0,70	1,11
L1	Trautwein	159	36,8	582	958	1567	1273	958	1050	1,80	0,67	1,10
L4		164	43,4	642	1129	2400	1384	1129	1038	1,62	0,43	0,92
L9		154	39,4	570	981	1125	1265	981	933	1,64	0,83	0,95
E1		159	35,2	574	923	1515	1254	923	1100	1,92	0,73	1,19
E2		159	36,6	581	954	1521	1271	954	990	1,70	0,65	1,04
A301	Andrade	164	37,8	613	1010	1022	1052	1010	953	1,55	0,93	0,94
A302		164	34,2	593	930	1569	1070	930	954	1,61	0,61	1,03
A303		154	42,4	584	1041	1485	1404	1041	955	1,63	0,64	0,92
A304		164	36,1	604	973	1577	1514	973	956	1,58	0,61	0,98
A306		164	37,4	611	1001	1582	1209	1001	958	1,57	0,61	0,96
A307		164	34,1	593	927	1615	1043	927	959	1,62	0,59	1,03



Rys. 5. Wartości teoretycznej nośności na przebicie według EC2 z uwzględnieniem zbrojenia (V_{EC2}) oraz dla elementu niezbrojonego (V_{Rc}) w odniesieniu do wyników badań eksperymentalnych (V_{test}) na podstawie badań Regana i Samadiana [2], Trautweina [8], Andrade [9].

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza porównawcza pokazała, iż stosowanie pewnych typów zbrojenia poprzecznego o niepełnym zakotwieniu (opisanych w [2], [8], [9]) pozwala zwiększyć nośność płyt na przebicie w stosunku do płyt niezbrojonych poprzecznie. W przypadku procedury Eurokodu 2 średni stosunek nośności eksperymentalnej do teoretycznej wynosi 1,01. Należy jednak mieć na uwadze, że analogiczna wielkość dla płyt ze zbrojeniem w pełni zakotwionym jest z reguły równa około 1,20. Oznacza to, iż brak pełnego zakotwienia zbrojenia poprzecznego ma wpływ na nośność na przebicie.

Z uwagi na łatwość stosowania w praktyce rozwiązań, które charakteryzują brak pełnego zakotwienia, należałoby dopracować procedury obliczeniowe, które pozwoliłyby na ich bezpieczne stosowanie. Wydaje się, iż w szczególności sposób zbrojenia pokazany na rys. 1 i zaprezentowany w pracy [10], powinien być sprawdzony eksperymentalnie w celu stworzenia stosownej procedury obliczeniowej.

Literatura

- Leonhardt F., Mönnig, E.: Vorlesung über Massivbau. Teil 3: Grundlagen zum Bewehren im Stahlbetonbau, Springer Verlag, New York 1974, s. 112-114.
- Regan P.E., Samadian F.: Shear Reinforcement Against Punching in Reinforced Concrete Flat Slabs. The Structural Engineering, London 2001, V. 79, N. 10, s. 24-31.
- Technische Richtlinie für AVI-DE-Durchstanzelemente, Alpenländische Veredelungs-Industrie GmbH, Raaba, November 2012.
- Beutel R.: Durchstanzen schubbewehrter Flachdecken im Bereich von Innenstützen, Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Aachen 2002.
- Chana P.S.: A prefabricated shear reinforcement system for flat slabs, Proceedings of the ICE - Structures and Buildings, August 1993, V. 99, I. 3, s. 345-358.
- Yamada T, Nanni A., Endo K.: Punching shear resistance of flat slabs: Influence of reinforcement type and ratio, ACI - Structural Journal, September 1992, V. 89, N. 5, s. 555-563.

- 7 Häusler F.: Zum maximalen Durchstanzwiderstand von Flachdecken mit und ohne Vorspannung, Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Aachen 2009.
- 8 Trautwein M. L.: Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado: Análise Experimental e Numérica, Dissertação, Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- 9 Andrade M.A.S. Punção em Lajes Cogumelo – Estudo do Posicionamento da Armadura de Cisalhamento em Relação a Armadura de Flexão, Dissertação, Escola de Engenharia Civil / Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.
- 10 Zybura A. i inni: Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2. Atlas rysunków z CD-ROM, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.

The analysis of the effectiveness of different types of punching shear reinforcement not fully anchored

Tadeusz Urban¹, Michał Goldyn², Łukasz Krawczyk³

*Department of Concrete Structures, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, Łódź University of Technology, e-mail: ¹tadeusz.urban@p.lodz.pl
²michal.goldyn@p.lodz.pl ³lukasz.krawczyk@p.lodz.pl*

Abstract: The paper discusses the issue of load capacity of flat plates with transverse reinforcement situated between the longitudinal reinforcement. Using this types of reinforcement is much more convenient from the installation point of view, however, it does not guarantee complete embedment, as efficient as traditional stirrups that comprise longitudinal reinforcement in compression and the tension zone. The transverse rods do not comprise the main reinforcement, so their slide out of the concrete slabs or cracks parallel to the plane of the longitudinal reinforcement and delamination of the slab can occur.

The different types of transverse reinforcement were presented: system consisting of ready-made bolts, reinforcement baskets or ladders. Experimental results of plates with these types of reinforcement are presented. The analysis of effectiveness of reinforcement anchorage indicates that transverse bolts can be used to increase the punching shear load capacity of the plates. The resulting capacity was only of about 20% lower than result elements with complete embedment. Experimental results were similar to the theoretical capacity resulting from the consideration by Eurocode 2.

Keywords: punching shear, transverse reinforcement, anchorage, ready-made inserts