



Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa
Rada Programowa Czasopism i Wydawnictw PZITB

DYPLOM

w konkursie autorskim artykułów wyróżniających się
ujęciem tematyki i przydatnością praktyczną, opublikowanych
na łamach miesięcznika „Inżynieria i Budownictwo” w roku 2022

Rada Programowa Czasopism i Wydawnictw PZITB

przyznała

III NAGRODĘ

za artykuł pt. „Wątpliwości dotyczące nośności stropu z płyt kanałowych
obciążonego siłą skupioną” (nr 5-6/2022).

Laureatami zostali

mgr inż. MIŁOSZ JEZIORSKI
dr hab. inż. WIT DERKOWSKI

SERDECZNIE GRATULUJEMY

W imieniu Kolegium Redakcyjnego

Barbara Goszczyńska

Prof. dr hab. inż. Barbara Goszczyńska
Redaktor naczelna

W imieniu Rady Programowej

Anna Halicka

Prof. dr hab. inż. Anna Halicka
Przewodnicząca Rady

Warszawa, czerwiec 2023 r.

Wątpliwości dotyczące nośności stropu z płyt kanałowych obciążonego siłą skupioną

Prefabrykowane, strunobetonowe płyty kanałowe projektowane są zwykle jako wolno podparte elementy poddane zginaniu oraz ścinaniu, co jest prawidłowe w przypadku obciążeń równomiernie rozłożonych, a w przypadku obciążeń liniowych i skupionych rozważana płyta może być analizowana jako wydzielony element wolno podparty. Dodatkowo, jeżeli obciążenie działa na mimośrodku względem osi płyty, oprócz zginania i ścinania należy uwzględnić także wpływ skręcania na jej nośność. Jednakże założenie to jest konserwatywne i może prowadzić do przewymiarowania płyty lub, w skrajnym przypadku, do konieczności zastosowania przekroju o zwiększonej wysokości.

W rzeczywistości, z uwagi na monolityczne złącza między prefabrykatami płytowymi oraz odpowiednią ich sztywność skrętną, stropy wykonane z płyt kanałowych wykazują zdolność do wzajemnej współpracy w przenoszeniu obciążeń pionowych. Powszechnie zakłada się [1÷4], że złącza te, z uwagi na zarysowanie wynikające między innymi ze skurczu betonu w złączu [5], pracują jako przeguby zdolne do przenoszenia jedynie sił pionowych. Siły ścinające powstające w złączu między płytami powodują ich jednocześnie skręcanie, ścinanie oraz zginanie. Dzięki takiej pracy złącza, obciążenie przyłożone na dany element jest redystrybuowane na płyty sąsiednie, co warto uwzględnić w projektowaniu tego typu konstrukcji stropowych.

Nośność na skręcanie i ścinanie pojedynczej płyty obciążonej siłą skupioną

Zgodnie z p. 4.3.3.2.2.4 normy EN 1168 EN 1168: 2005+A3:2011 Precast concrete products – Hollow core slabs [1] nośność płyty poddanej jednoczesnemu skręcaniu i ścinaniu określa się jako wartość nośności na ścinanie $V_{Rd,c}$, pomniejszonej o wpływ na siłę poprzeczną jednocześnie występującego momentu skręcającego V_{ETd}

$$V_{Rdn} = V_{Rd,c} - V_{ETd}, \quad (1)$$

w którym:

$$V_{ETd} = \frac{T_{Ed}}{2b_w} \frac{\sum b_w}{(b - b_w)},$$

T_{Ed} – obliczeniowy moment skręcający w rozpatrywanym przekroju,

b_w – szerokość skrajnego żebra płyty na wysokości środka ciężkości płyty,

$\sum b_w$ – suma szerokości wszystkich żeber płyty na wysokości środka ciężkości płyty,

b – całkowita szerokość płyty.

Wzór (1) jest uzależniony nie tylko od wartości samego momentu skręcającego, ale także częściowo od

geometrii płyty, tj. od szerokości skrajnego żebra oraz sumy szerokości wszystkich żeber płyty. Nośność na ścinanie $V_{Rd,c}$, zgodnie z zaleceniami normy [1], powinna być obliczona na podstawie normy EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings [6]. Problem z dokładnym określeniem nośności na ścinanie płyt kanałowych był już przedmiotem licznych publikacji, m.in. [7÷9]. W pracach tych wykazano, iż nośność na ścinanie elementów niezarysowanych przez zginanie obliczona zgodnie z [6] prowadzi do zawyżenia wyników w przypadku niektórych płyt HC. Fakt ten uwzględniono w [1], podając zmodyfikowane formuły. Wątpliwy jest zatem zapis odnoszący się do nośności na ścinanie obliczanej zgodnie z normą [6], a nie [1].

Zjawisku skręcania sprężonych prefabrykowanych płyt kanałowych oraz interakcji ścinania i skręcania poświęcono projekt Holcotors. W ramach projektu przeprowadzono serię badań doświadczalnych [10÷14]. W pracach tych wykazano, iż interakcja ścinania ze skręcaniem ma charakter nieliniowy, w odróżnieniu od przebiegu liniowego podanego w normie [1], a uzyskana nośność przewyższa nośność normowo oszacowaną. Wykazano również, że w przypadku czystego skręcania obliczeniowe wartości nośności mogą być wyższe od uzyskanych w badaniach. Różnica ta wynika z innego niż przyjęto w normie modelu zniszczenia, w którym dochodzi do zarysowania górnej powierzchni płyty zamiast zarysowania skrajnych żeber [15]. Dokładniejszy opis przeprowadzonych badań oraz ich podsumowanie można znaleźć w publikacji [16].

Nośność płyty poddanej jednoczesnemu skręcaniu, ścinaniu oraz zginaniu

Przypadek interakcji skręcania, ścinania oraz zginania nie został ujęty bezpośrednio w normach [6] i [1]. W p. 7.3.4 Model Code 2010 [17] podano, iż w przypadku jednoczesnego skręcania, zginania oraz ścinania, siły wewnętrzne należy zastąpić statycznie ekwiwalentnym zestawem sił normalnych oraz tnących, a następnie element zwymiarować ze względu na zginanie oraz ścinanie.

Zdaniem autorów, w odniesieniu do przypadku jednoczesnego skręcania, ścinania oraz zginania, w normowym wzorze na nośność należy stosować wartość $V_{Rd,c}$, obliczoną według wzorów 6.2.a oraz 6.2.b normy [6]. Tak wyznaczona nośność ścinania zakłada przekrój zarysowany, a zatem pośrednio uwzględnia działanie momentu zginającego. Należy zauważyć także, iż wpływ momentu zginającego na nośność ścinania uwzględnia również wzór podany w punkcie 4.3.3.2.2.2 normy [1], chociaż ma

on zastosowanie jedynie w stosunku do elementu niezarusowanego.

Zagadnieniu jednoczesnego skręcania, ścinania oraz zginania belek żelbetonowych poświęcono między innymi prace [18, 19], jednakże rozważano w nich jedynie elementy zbrojone na ścinanie. Zagadnienie to w odniesieniu do płyt kanałowych, niemających żadnego zbrojenia poprzecznego, zostało poruszone w pracy *Gabrielssona* [20], przedstawiającej model obliczeniowy oparty na zapisach normy kanadyjskiej CSA A23.3-94 [21], która jako jedyna wprost bierze pod uwagę interakcję ścinania, zginania i skręcania. W pracy tej opisano badania, w których uzyskano dobrą zgodność między obliczeniami a wynikami eksperymentalnymi, chociaż należy zwrócić uwagę, iż zbadano jedynie dwa elementy. Problem ten, w kontekście sztywności skrętnej pojedynczej płyty kanałowej, poruszano w pracach [22, 23].

Nośność płyty na przebicie oraz zginanie poprzeczne

Zgodnie z zaleceniami p. 4.3.3.2.4 normy [1], obciążenie skupione przyłożone do płyty nie może przekraczać nośności płyty na przebicie. Ponadto, jeżeli ponad 50% siły skupionej działa na żebro skrajne płyty i jest to wolna krawędź stropu, to obliczoną nośność można stosować jedynie wtedy, kiedy co najmniej jedno cięgno znajduje się w żebrze skrajnym, a w nadbetonie znajduje się w pełni zakotwione zbrojenie o długości co najmniej 1,20 m. Jeżeli te warunki nie są spełnione, nośność obliczeniową należy zmniejszyć o połowę.

Obciążenia skupione powodują momenty zginające płytę w dwóch kierunkach. Z uwagi na brak zbrojenia poprzecznego w płycie kanałowej, maksymalna wartość siły skupionej, określona w p. 4.3.3.2.5 normy [1], jest funkcją wskaźnika bezwładności płyty w kierunku poprzecznym oraz wytrzymałości betonu na rozciąganie.

Płyty HC200, obciążone na krawędzi, były przedmiotem badań niszczących prowadzonych przez *Aswada i Jacquesa* [24]. Płyty obciążone w jednej trzeciej oraz w połowie rozpiętości ulegały lokalnemu zniszczeniu na skutek przebicia lub zginania poprzecznego, w przeciwieństwie do płyt obciążonych bliżej podpory, w przypadku których mechanizm zniszczenia był efektem interakcji ścinania ze zginaniem. Nośność układu dwóch płyt obciążonych w środku przęsła nie odbiegała znacząco od nośności płyty pojedynczej. Badania te potwierdziły bardzo istotne ograniczenie nośności płyt kanałowych obciążonych na krawędzi, będące efektem lokalnego zniszczenia, zawarte w przytoczonych wcześniej zapisach normy [1]. Należy jednak zwrócić uwagę, iż badania te przeprowadzono jedynie na płytach niskich, o wysokości 200 mm, oraz nie zbadano wpływu większej liczby płyt w polu stropowym.

Nośność płyty kanałowej poddanej czystemu zginaniu poprzecznemu analizował *Pisanty* [25]. W próbie czteropunktowego zginania badano wycinki płyt kanałowych o wysokościach 200, 250 oraz 300 mm, długościach odpowiadających wysokości oraz pełnej szerokości płyty. Analizowano dwa schematy obciążenia: w pierwszym półka górna (niezawierająca strun) znajdowała się w strefie rozciąganej, a w drugim – w strefie ściskanej. Zaobserwowano, iż naprężenie rozciągające, które powoduje zniszczenie półki, maleje wraz ze zwiększeniem wysokości płyty. Stoi to w sprzeczności z zapisami normy [1], według których wskaźnik wytrzymałości rośnie przecież wraz ze

zwiększeniem całkowitej wysokości płyty. Stwierdzono także znaczną różnicę między wartościami naprężenia niszczącego w półce dolnej i górnej. Naprężenie to w półce dolnej, zawierającej struny, było większe niż naprężenie w półce górnej. Wartości dla półki dolnej mieściły się w przedziale od 75% do 100% średniej wytrzymałości betonu na rozciąganie f_{ctm} , natomiast w półce górnej – w przedziale od 60% do 80% f_{ctm} .

Współpraca płyt kanałowych w stropie przy przenoszeniu obciążeń skupionych

W załączniku C do normy [1] przedstawiono metodę graficzną pozwalającą na wyznaczenie współczynników dystrybucji obciążenia. Współczynniki te odczytuje się z jednego z czterech wykresów w zależności od rozpatrywanego przypadku (obciążenie liniowe/punktowe; obciążona płyta skrajna/środkowa). Wartość współczynnika dystrybucji dla danej płyty jest uzależniona od rozpiętości płyty. Podane wartości dotyczą siły skupionej przyłożonej w środku przęsła ($l/x = 2$). W przypadku obciążeń przyłożonych blisko podpory, tj. gdy $l/x \geq 20$, obciążenie w bezpośrednio obciążonej płycie należy przyjąć jako 100%, a w płytach sąsiednich jako 0%. W przypadkach pośrednich wartości można interpolować liniowo. Interpolację można stosować także w przypadku, gdy obciążenie znajduje się pomiędzy płytą skrajną a środkową. Metoda ta pozwala na dystrybucję obciążeń jedynie w polach stropowych składających się co najmniej z 5 płyt. Jeżeli płyty wykonano bez nadbetonu, to współczynnik dystrybucji na bezpośrednio obciążonej płycie należy zwiększyć o 25%. Podstawy teoretyczne metody przedstawionej w normie [1] można znaleźć w publikacji [2]. Warto zauważyć, że metoda ta nie uwzględnia geometrii płyty, chociaż w [2] wskazano, iż stosować ją należy do płyt o wysokości od 150 do 320 mm, a zdolność płyt do współpracy zależy w dużym stopniu od stosunku sztywności skrętnej i giętnej płyty.

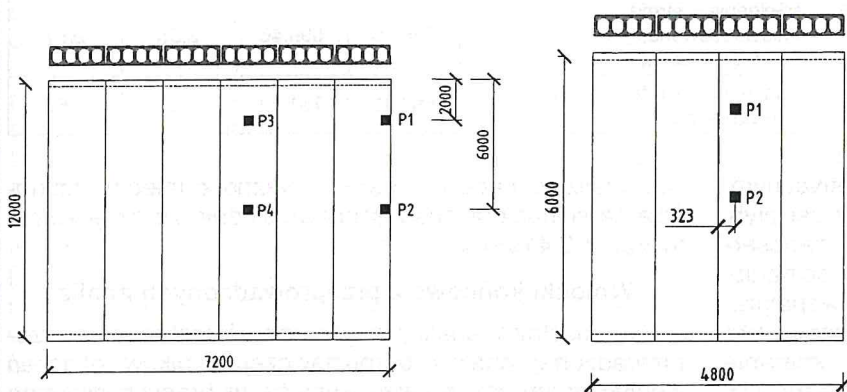
Stanton [4] zwraca uwagę, że zdolność stropu do przenoszenia obciążeń skupionych zależy od rozpatrywanego efektu obciążenia, podczas gdy norma [1] nie precyzuje, do jakiego efektu obciążenia (zginanie, ścinanie) należy stosować podane współczynniki. W [4], podobnie jak w wytycznych PCI [3], zamiast współczynników rozdziału są używane szerokości współpracujące zróżnicowane dla momentu zginającego, siły tnącej, momentu skręcającego oraz ugięcia.

W analizie współpracy prefabrykowanych płyt HC ważną rolę odgrywa również nośność złącza, która, zgodnie z normą [1], jest wyznaczana jako mniejsza z dwóch wartości: nośności półek prefabrykatu lub nośności samego złącza. W badaniach [26] wykazano, iż decydująca jest właśnie nośność na ścinanie półek płyty kanałowej. Załącznik C4 do normy [1] przedstawia rozkład sił ścinających w złączu, lecz nie wyjaśnia, w jaki sposób odnosi się to do nośności złącza określonej w punkcie 4.3.3.2.3. Stąd też nie jest jednoznaczne, w jaki sposób powinno się powiązać te zapisy, aby prawidłowo wyznaczyć nośność złącza podłużnego między prefabrykatami stropowymi.

Porównanie modelu analitycznego normy EN 1168 z wybranymi wynikami badań

W 1991 r. w Fińskim Instytucie Technicznym (VTT) przeprowadzono badania na stropie wykonanym z sześciu płyt HC400 o długości 12 m [27] oraz z czterech płyt

HC400 o długości 6 m [28]. Choć w obydwóch badaniach zastosowano płyty o tym samym przekroju poprzecznym, to różniły się one liczbą cięgien sprężających. Badano różne położenia siły skupionej na polu stropowym, które pokazano na rys. 1. W toku całego badania rejestrowano przemieszczenia pionowe. W pierwszym etapie badań płyty obciążano siłami, które nie wywoływały zarysowania – pracę płyt utrzymywano w zakresie sprężystym. W drugim etapie na stropie o długości 12 m obciążenie przyłożono w położeniu P4, zwiększając siłę aż do zniszczenia. Z uwagi na fakt, iż skrajne płyty nie zostały uszkodzone, wykorzystano je następnie w kolejnym badaniu niszczącym, w którym obciążenie znajdowało się w położeniu P2. W przypadku stropu 6-metrowego do zniszczenia zwiększano siłę w położeniu P2.



Rys. 1. Lokalizacja obciążenia skupionego w badaniach [27, 28]. Wymiary w [mm]

W tablicy 1 porównano nośność stropu 12-metrowego, obliczoną zgodnie z normą EN 1168, uwzględniającą redystrybucję obciążeń, z nośnością otrzymaną w badaniu. Nośność przedstawiono jako siłę P_{rd} , przyłożoną w środku przęsła belki wolno podpartej, która łącznie z ciężarem własnym płyty wywołała zniszczenie elementu. Następnie siła ta została podzielona przez współczynnik dystrybucji obciążenia α , odczytany z załącznika C normy [1], który dla danego przypadku wynosi 0,27. Obrazuje to siłę $P_{Rd,d}$, która teoretycznie doprowadzi do zniszczenia płyty z uwzględnie-

niem redystrybucji obciążeń na płyty sąsiednie. Z uwagi na rozrzut charakterystyk materiałowych oraz brak dokładnych danych co do straty siły sprężającej wyznaczono dolne oraz górne oszacowanie siły. Norma [1] w załączniku C.1 wymaga, aby w przypadku uwzględnienia redystrybucji obciążeń sprawdzać także nośność z uwagi na zginanie poprzeczne. Przepisy normy nie precyzują jednak, czy nośność należy porównać z siłą po redystrybucji, czy z siłą niepomniejszoną o współczynnik α – w tablicy 1, w celach porównawczych, przedstawiono także wartości uwzględniające redystrybucję. W przepisach normy nie wspomniano także wprost, czy w przypadku uwzględnienia współpracy prefabrykatów należy sprawdzać nośność na przebicie, jednakże z uwagi na fakt, iż przebicie jest zjawiskiem lokalnym, autorzy uważają, że należy je przeprowadzić. Ze względu na lokalny charakter zniszczenia, w obliczeniach nośności na przebicie nie stosowano współczynnika α .

Z uwagi na znacznie zaniżoną wartość nośności na przebicie, obliczoną zgodnie z zapisami normy [1], nośność tę obliczono także, modyfikując obwód kontrolny u , wynikający z rzeczywistego obszaru przyłożenia siły, z uwzględnieniem rozchodzenia się naprężeń na wysokości półki pod kątem $\theta = 45^\circ$. Jednakże i przy takim założeniu otrzymano znacznie niedoszacowaną wartość nośności na przebicie względem wyniku badania. Może to być efektem zarówno błędnego przyjęcia kąta θ (który dla niezbrojonego betonu półki górnej winien być bliższy 35°), jak i faktu, że w obrysie obwodu kontrolnego część naprężeń ścinających przejmowana jest przez żeberka, a nie tylko przez cienką płytę górną.

Równie zaniżona jest nośność na zginanie poprzeczne, jednakże po uwzględnieniu redystrybucji obciążenia między płytami wartość ta ulega znacznemu powiększeniu – wątpliwe jest jednak, czy takie podejście obliczeniowe powinno być stosowane.

Z przeprowadzonej analizy wynika, iż decydującym kryterium dla rozpatrywanego układu płyt i obciążeń,

Tablica 1

Porównanie obliczonej siły niszczącej dla płyty środkowej 12 m, obciążonej w połowie rozpiętości przęsła (P4), z siłą otrzymaną w badaniu [27]

Kryterium	Siła w badaniu	Teoretyczna siła niszcząca							
		bez uwzględnienia redystrybucji				z redystrybucją, $\alpha = 0,27$			
		$P_{Rd,min}$	$P_{Rd,max}$	$\frac{P_{Rd,min}}{P_{test}}$	$\frac{P_{Rd,max}}{P_{test}}$	$P_{Rd,min,d}$	$P_{Rd,max,d}$	$\frac{P_{Rd,min,d}}{P_{test}}$	$\frac{P_{Rd,max,d}}{P_{test}}$
		[kN]	[kN]			[kN]	[kN]		
Zginanie	392,0	142,29	142,33	0,36	0,36	527,00	527,15	1,34	1,34
Przebicie ^{*)}		119,93	123,30	0,31	0,31	nie podlega redystrybucji			
Przebicie ^{**)}		251,92	270,56	0,64	0,69				
Zginanie poprzeczne		173,57	184,46	0,44	0,47	642,85	683,19	1,64	1,74
Złącze		166,28	176,72	0,42	0,45	615,85	654,52	1,57	1,67
Ścinanie – strefa zarysowana		281,55	293,85	0,72	0,75	1042,78	1088,33	2,66	2,78
Ścinanie – strefa niezarysowana, metoda uproszczona		583,72	629,98	1,49	1,61	2161,93	2333,26	5,52	5,95
Ścinanie – strefa niezarysowana		726,76	780,25	1,85	1,99	2691,70	2889,81	6,87	7,37
Zarysowanie – siła rysująca	245,0	69,10	79,30	0,18	0,20	255,93	293,70	1,04	1,20

^{*)} Nośność na przebicie obliczona zgodnie z EN1168.

^{**)} Nośność na przebicie obliczona zgodnie z EN1168 z zastosowaniem obwodu kontrolnego wg normy [6].

pomijając wątpliwą wartość nośności na przebiecie, jest nośność płyty na zginanie. Nieuwzględnienie przestrzennej pracy stropu skutkuje znacznym niedoszacowaniem nośności, natomiast uwzględnienie redystrybucji prowadzi do przeszacowania nośności o około 34%.

W tablicy 2 zestawiono wyniki obliczeniowych nośności z wynikami eksperymentu na płytach 12-metrowych, dla przypadku P2 położenia siły skupionej. W przypadku tym nie uwzględniono redystrybucji z uwagi na fakt, iż obciążano układ dwóch płyt, a zasady przedstawione w [1] odnoszą się jedynie do pól stropowych składających się co najmniej z 5 płyt. Przeprowadzona analiza wykazała, że choć norma ta nie podaje sposobu postępowania w przypadku współpracy mniej niż pięciu płyt, to współpraca taka ma miejsce i wpływa na poprawę nośności. Można też zauważyć, że zapis normy wymagający dwukrotnego zmniejszenia nośności na przebiecie płyty obciążonej na wolnej krawędzi jest zapisem zbyt rygorystycznym. W porównaniu z badaniem siły przyłożonej w osi płyty środkowej w układzie 5 współpracujących płyt, zaobserwowano bardzo wyraźny spadek nośności na ścinanie. Wpływ na to ma, oprócz braku większej liczby współpracujących elementów, duży mimośród przyłożenia siły, dlatego wyznaczono także nośność na ścinanie z uwzględnieniem skręcania, wykorzystując wzór (1), w którym $T_{Ed} = V_{Rd,c} e_p$ (gdzie e_p jest mimośrodem przyłożenia siły względem środka ciężkości płyty). Otrzymana nośność na ścinanie z uwzględnieniem skręcania V_{Rdn} wynosi jedynie $0,0186 V_{Rd,c}$. Stanowi to drastyczną redukcję nośności, sugerującą, iż płyta tak obciążona nie jest w stanie przejąć praktycznie żadnego obciążenia na zadanym mimośrodku, co w świetle przytoczonych wyników badań jest ograniczeniem nieuzasadnionym.

Podobną analizę przeprowadzono dla stropu o rozpiętości 6 metrów. W tym przypadku nie uwzględniono redystrybucji obciążenia, z uwagi na to, iż badano pole stropowe składające się z 4 płyt. Wyniki zestawiono w tablicy 3.

Analiza uzyskanych wyników wykazuje, że najmniejsza nośność płyty wynika z warunku nośności samego złącza, jednakże wynik ten uzyskano dla przypadku bez uwzględnienia współpracy między płytami. Gdyby rozważany strop składał się z 5 płyt kanałowych, to przy uwzględnieniu redystrybucji obciążenia współczynnik α dla płyty bezpośrednio obciążonej wyniósłby 0,29. A zatem obliczeniowa nośność złącza, z uwzględnieniem niepewności parametrów materiałowych i sprzężenia, mieściłaby się w przedziale 328÷420 kN, co jest wartością bliską otrzymanej w badaniu. Biorąc pod uwagę fakt, iż współpracują tylko 4 płyty, współczynnik α powinien być zwiększony, przez co oszacowanie nośności będzie dawało wynik nieznacznie mniejszy. Mimośród przyłożenia siły ma również duży wpływ na nośność płyty na ścinanie; w odróżnieniu od płyty 12-metrowej, obciążonej na krawędzi, nośność ta jest o wiele większa.

Tablica 2

Porównanie obliczonej siły niszczącej dla płyty skrajnej 12 m obciążonej na krawędzi w połowie rozpiętości przęsła z siłą otrzymaną w badaniu [27]

Kryterium	Siła w badaniu P_{test} [kN]	Teoretyczna siła niszcząca bez uwzględniania redystrybucji			
		$P_{Rd,min}$	$P_{Rd,max}$	$\frac{P_{Rd,min}}{P_{test}}$	$\frac{P_{Rd,max}}{P_{test}}$
		[kN]	[kN]		
Zginanie	210,3	141,91	147,78	0,67	0,70
Przebiecie		112,46	122,48	0,53	0,58
Zginanie poprzeczne		161,27	174,28	0,77	0,83
Złącze		231,34	250,00	1,10	1,19
Ścinanie – strefa zarysowana		277,21	291,93	1,32	1,39
Ścinanie – strefa niezarysowana, metoda uproszczona		536,76	590,46	2,55	2,81
Ścinanie – strefa niezarysowana		693,42	761,12	3,30	3,62

Dla analizowanego przypadku zależność między nośnością na ścinanie a nośnością na ścinanie ze skręcaniem to $V_{Rdn} = 0,4153 V_{Rd,c}$.

Wnioski końcowe z przeprowadzonych analiz

Na podstawie analizy przytoczonej literatury oraz przeprowadzonej analizy porównawczej wyników obliczeń według normy [1], a także wyników wybranych eksperymentów w skali rzeczywistej, realizowanych na stropach z płyt HC400, sformułowano następujące wnioski.

Tablica 3

Porównanie obliczonej siły niszczącej dla płyty środkowej 6 m obciążonej mimośrodowo w połowie rozpiętości przęsła z siłą otrzymaną w badaniu [28]

Kryterium	Siła w badaniu P_{test} [kN]	Teoretyczna siła niszcząca bez uwzględniania redystrybucji			
		$P_{Rd,min}$	$P_{Rd,max}$	$\frac{P_{Rd,min}}{P_{test}}$	$\frac{P_{Rd,max}}{P_{test}}$
		[kN]	[kN]		
Zginanie	436,9	255,16	255,60	0,58	0,59
Przebiecie*)		94,52	118,56	0,22	0,27
Przebiecie**)		203,04	254,68	0,46	0,58
Zginanie poprzeczne		140,90	180,60	0,32	0,41
Złącze		94,99	121,76	0,22	0,28
Ścinanie – strefa zarysowana		260,92	276,84	0,60	0,63
Ścinanie – strefa niezarysowana, metoda uproszczona		484,23	636,94	1,11	1,46
Ścinanie – strefa niezarysowana		586,60	784,27	1,34	1,80
Ścinanie i skręcanie – strefa zarysowana		96,82	103,45	0,22	0,24
Ścinanie i skręcanie – strefa niezarysowana, m. uproszczona		192,71	256,22	0,44	0,59
Ścinanie i skręcanie – strefa niezarysowana		235,62	317,00	0,54	0,73
Zarysowanie – siła rysująca	224,0	141,37	169,87	0,32	0,39

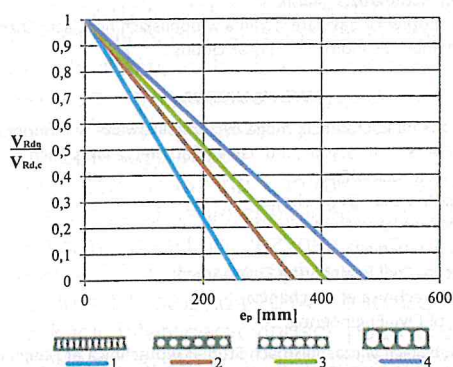
*) patrz tabl. 1.

**) patrz tabl. 1.

Sprężone płyty kanałowe wykazują dobrą zdolność do redystrybucji obciążeń punktowych, gdy rozpatrywany efektem obciążenia jest zginanie. Należy jednak zwrócić uwagę, że stosowanie metody podanej w normie EN 1168 może prowadzić do przeszacowania nośności w przypadku płyt o wysokości 400 mm. Jest to spowodowane tym, że nomogramy w załączniku C normy [1] opracowano jedynie dla stałej wartości stosunku sztywności giętej do skrętej, podczas gdy dla płyt wysokich z prostokątnymi kanałami stosunek ten jest znacząco wyższy niż w przypadku płyt niskich o kanałach owalnych.

Stosowanie metody analitycznej z załącznika C normy [1] do analizy nośności ścinania może prowadzić do znacznego jej przeszacowania. Wniosek ten pokrywa się z zaleceniami amerykańskimi [3], w których asekurowanie przyjmuje się, iż siła ścinająca nad podporą nie ulega redystrybucji. Podobne obserwacje, lecz prowadzące do mniej rygorystycznych zaleceń niż amerykańskie, można znaleźć w pracach [29], [3] i [30], w których podkreśla się, iż metoda uwzględniania przestrzennej pracy stropu przedstawiona w normie [1] nie powinna być stosowana do ścinania, choć norma tego jednoznacznie nie stwierdza.

Skręcanie ma istotny wpływ na nośność płyty kanałowej poddanej ścinaniu, jednakże przedstawiona w normie [2] metoda, pozwalająca na uwzględnienie interakcji ścinania ze skręcaniem, prowadzi do znacznie zaniżonych wyników. Dobrze obrazuje to rys. 2, na którym przedstawiono nośność płyty mimośrodowo obciążonej siłą skupioną w zależności od wielkości mimośrodu. Przedstawiono na nim wynik obliczeniowego uwzględnienia jednoczesnego działania siły poprzecznej i momentu skręcającego w typowych płytach HC o różnej geometrii. W niektórych przypadkach, już przy wielkości mimośrodu siły skupionej wynoszącej ok. 1/3 szerokości płyty, obliczeniowa nośność płyty jest zredukowana do zera. Jak wykazano w pracy [14], funkcja opisująca interakcję ścinania ze skręcaniem jest w rzeczywistości nieliniowa, a wykorzystanie jej do analizy pracy elementu prowadziłoby do znacznie lepszego oszacowania jego nośności.



Rys. 2. Stosunek nośności na ścinanie z uwzględnieniem skręcania do nośności na ścinanie, w funkcji mimośrodu przyłożenia siły, dla wybranych przekrojów płyty

W literaturze nie opisano dostatecznie obszernie zjawiska jednoczesnego skręcania, ścinania oraz zginania sprężonych prefabrykowanych płyt kanałowych – wymaga to dalszych badań eksperymentalnych pozwalających na weryfikację nowych modeli obliczeniowych.

Nośność na przebicie płyty kanałowej obliczona zgodnie z normą [1] jest znacznie zaniżona w stosunku do

wyników badań doświadczalnych. Lepszą aproksymację nośności na przebicie można uzyskać, przyjmując obwód kontrolny według normy [6], przy czym kąt rozchodzenia się naprężenia w betonie niezbrojonym należy przyjąć jako 35°.

Nośność na przebicie może być decydująca w przypadku obciążeń przyłożonych na wolnej krawędzi stropu. Obliczeniowe nośności na przebicie wg normy [2] są bardzo zaniżone, co może być uzasadniane nagłym i kruchym charakterem zniszczenia.

Ograniczenie dotyczące dopuszczalnej wartości siły skupionej z uwagi na zginanie poprzeczne w przypadku braku uwzględniania redystrybucji obciążenia na płyty sąsiednie, opisane w [1], jest wymaganiem bardzo rygorystycznym. Niejednoznaczne jest jednak, w jaki sposób należy uwzględnić przestrzenną pracę stropu w tym kontekście.

Podziękowania

Na przestrzeni lat pojawiły się liczne pytania i niejasności dotyczące współpracy prefabrykowanych sprężonych płyt kanałowych w przenoszeniu obciążeń skupionych. Z uwagi na fakt, iż wiele z nich pozostaje nadal nierozwiązanych, powołany został projekt „HOLCOLODIS” realizowany w latach 2022–2025 przez Międzynarodowe Stowarzyszenie Producentów Płyt Kanałowych IPHA z udziałem członków organizacji oraz autorów tej pracy. Celem projektu jest opracowanie nowych, dokładniejszych zasad uwzględniania współpracy płyt kanałowych w przenoszeniu obciążeń skupionych, podpartych nowymi badaniami eksperymentalnymi oraz analizami numerycznymi. Autorzy pragną podziękować za finansowanie oraz wsparcie projektu przez IPHA.

Autorzy pragną również podziękować Panu Alarowi Kaes, Consolis Development Centre, za cenne informacje dotyczące technologii produkcji płyt kanałowych w latach 90. w Finlandii.

PIŚMIENNICTWO

- [1] EN 1168:2005+A3:2011 Precast concrete products – Hollow core slabs, 2011.
- [2] Acker A.V.: Transversal distribution of linear loadings in prestressed hollow core floors, FIP Symposium, Calgary, 30 & 31 August, 1984.
- [3] PCI, Manual for the Design of Hollow Core Slabs and Walls – Third Edition, 2015.
- [4] Stanton J.F.: Response of Hollow-Core Slab Floors to Concentrated Loads, PCI Journal, tom 37, nr 4, pp. 98-113, 1992.
- [5] Elliot D. a. B.: Precast Floor Slab Diaphragms Without Structural Screeds, w Concrete 2000 – Economic and Durable Construction Through Excellence, Dundee, September 1993.
- [6] Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1992-1-1:2004, Brussels, 2004.
- [7] Pajari M.: Web shear failure in prestressed hollow core slabs, Journal of Structural Mechanics, tom 42, nr 4, pp. 297-217, 2009.
- [8] Pajari M.: Resistance of prestressed hollow core slabs against web shear failure, VTT, Espoo, 2005.
- [9] Emanuele B., Roberto N.: Evaluation of the shear capacity of precast-prestressed hollow core slabs: Numerical and experimental comparisons, Materials and Structures, tom 48, pp. 1503-1521, April 2015.
- [10] Pajari M.: Pure torsion tests on single hollow core slabs, VTT Research Notes 2273, Espoo, 2004.
- [11] Pajari M.: Shear-torsion interaction tests on single hollow core slabs, VTT Research Notes 2275, Espoo, 2004.
- [12] Pajari M.: Shear-torsion tests on 200 mm hollow core floor, VTT, Espoo, 2004.
- [13] Pajari M.: Shear-torsion tests on 400 mm hollow core floor, VTT, Espoo, 2004.
- [14] Broo H.: Shear and Torsion in Concrete Structures. Non-Linear

Finite Element Analysis in Design and Assessment, Göteborg: Chalmers University of Technology, 2008.

- [15] Derkowski W., Surma M.: Complex stress state in prestressed hollow core slabs, Monografia, tom 478, pp. 11-27, 2015.
- [16] Derkowski W., Surma M.: Torsion of precast hollow core slabs, Budownictwo, Tomy %1 z %23-B, pp. 32-43, 2015.
- [17] fib, Bulletin 65, Model Code for Concrete Structures 2010, Lausanne, Switzerland: fib, 2012.
- [18] Elfgrén L.: Reinforced Concrete Beams Loaded in Combined Torsion, Bending and Shear. A study of the ultimate load-carrying capacity, Göteborg: Chalmers University of Technology, 1972.
- [19] Hsu T., Mo Y.: Unified Theory of Concrete Structures, John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [20] Gabrielsson H.: Ductility in High Performance Concrete Structures. An Experimental Investigation and a Theoretical Study of Prestressed Hollow Core Slabs and Prestressed Cylindrical Pole Elements, Luleå University of Technology, 1999.
- [21] Canadian Standards Association, Design of concrete structures for buildings, Rexdale, Ontario, 1994.
- [22] Azizov T.: Effect of torsional rigidity of concrete elements with normal cracks onto spacial work of bridges and floorings, The Advanced Science Journal, tom Volume 2010, nr 3, 2010.

- [23] Azizov T., Derkowski W., Jurkowska N.: Consideration of the Torsional Stiffness in Hollow-Core Slabs' Design, Materials Science Forum, tom 968, pp. 330-341, 2019.
- [24] Aswad A., Jacques F.J.: Behavior of Hollow-Core Slabs Subjected to Edge Loads, PCI Journal, tom 37, nr 2, pp. 72-83, March-April 1992.
- [25] Pisanty A.: Transverse flexural and torsional strength of Prestressed Precast Hollow-Core Slabs, Tailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst, pp. 527-531, 2008.
- [26] den Uijl I.J.: Resistance against vertical shear loading of longitudinal joints between prestressed hollow core slabs, Delft University of Technology, Delft, 1992.
- [27] VTT Technical Research Center of Finland, „RAT12538/91 – The performance of point-loading tests on deck consisting of six Variax 4 slabs,” Espoo, 1991.
- [28] VTT Technical Research Center of Finland, „RAT12503/91 Variax 4-laataston pistekuormakokeet,” Espoo, 1991.
- [29] Parkkinen J.T.I.: Analysis of Hollow Core Slab Deck with a Point Load, w International Extruded Concrete Association 6th Annual Conference, Gibraltar, 26-28th of April 1991.
- [30] Bernardi P., Cerioni R., Leurini F., Michelini E.: A design method for the prediction of load distribution in hollow-core floors, Engineering Structures, tom 123, pp. 473-481, 2016.



KOMUNIKAT nr 1

Polski Komitet Geotechniki
Oddział Śląski Polskiego Komitetu Geotechniki
Katedra Geotechniki i Dróg Wydziału Budownictwa
Politechniki Śląskiej w Gliwicach

mają zaszczyt zaprosić na

XIX Krajową Konferencję
MECHANIKI GRUNTÓW I INŻYNIERII GEOTECHNICZNEJ

oraz

VIII Ogólnopolską Konferencję
MŁODYCH GEOTECHNIKÓW

Temat wiodący konferencji:

Aktualne zagadnienia geotechniki

Gliwice, 4–7 lipca 2023 r.



MIEJSCE KONFERENCJI

Centrum Edukacyjno-Kongresowe Politechniki Śląskiej

TEMATYKA

- Badania laboratoryjne i terenowe
- Zagadnienia teoretyczne i modelowanie w geotechnice
- Wzmacnianie podłoża gruntowego
- Geotechnika a kwestie środowiskowe
- Projektowanie geotechniczne
- Budownictwo komunikacyjne i podziemne
- Forum Nauka – Praktyka

WAŻNE TERMINY

- 15.07.2022** – Komunikat nr 2
- 30.10.2022** – Nadesłanie wstępnych zgłoszeń i streszczeń artykułów
- 15.11.2022** – Akceptacja streszczeń artykułów, wstępna kwalifikacja do czasopism i wysłanie szczegółowych wytycznych do autorów
- 15.01.2023** – Nadesłanie artykułów
- 28.02.2023** – Powiadomienie autorów o przyjęciu artykułów i uwagach recenzentów
- 31.03.2023** – Ostateczny termin nadesłania poprawionych artykułów oraz potwierdzenia uczestnictwa wraz z opłatą konferencyjną
- 15.06.2023** – Komunikat nr 3 ze szczegółowym programem konferencji

OPŁATA KONFERENCYJNA

Opłata konferencyjna obejmuje udział w obradach i imprezach towarzyszących, lunche oraz komplet materiałów konferencyjnych (bez noclegów). Dokładne wysokości opłat zostaną podane w komunikacie nr 2.

Orientacyjne wysokości opłat:

- opłata normalna: 2 000 zł
- opłata dla członków PKG: 1 850 zł
- opłata dla młodych geotechników (do 35 lat) i doktorantów: 1 500 zł

ZAKWATEROWANIE

Organizatorzy proponują zakwaterowanie w domu studenckim o podwyższonym standardzie „Karlik”. Będzie również możliwość zakwaterowania w pobliskich hotelach: Diament Plaza (****), Diament Economy (***), Qubus (***).

WYDAWNICTWA

Artykuły zgłoszone na konferencję mogą być opublikowane w monografii Wydawnictwa Politechniki Śląskiej lub następujących czasopismach punktowanych na listach MEiN:

- Inżynieria Morska i Geotechnika,
- Inżynieria i Budownictwo,
- Przegląd budowlany,
- Architecture Civil Engineering Environment
- Studia Geotechnica et Mechanica,
- Archives of Civil Engineering.

W przypadku publikacji w czasopismach Studia Geotechnica et Mechanica oraz Archives of Civil Engineering konieczna będzie dodatkowa opłata publikacyjna zgodna z obowiązującym cennikiem.

ADRES KORESPONDENCYJNY

Sekretariat Konferencji:
dr inż. Magdalena Kowalska
Katedra Geotechniki i Dróg Politechniki Śląskiej
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice
Wydział Budownictwa, pok. 213
tel.: 504-233-377
e-mail: magdalena.kowalska@polsl.pl