

Strunobetonowe płyty kanałowe w stropie o nośności $q_k = 10$ i 15 kN/m^2 z równoczesnym ruchem dwóch wózków widłowych $Q_k = 20 \text{ kN}$ każdy

dr inż. Jarosław Michałek, dr inż. Aleksy Łodo, dr inż. Piotr Kozioł, Politechnika Wrocławska

1. Wprowadzenie

W budynku biurowo-produkcyjnym o wymiarach rzutu poziomego $90,0 \times 12,5 \text{ m}$ pierwotnie nad piwnicą był przewidziany strop żelbetowy typu Filigran o grubości 280 i 300 mm z betonu klasy C25/30. Strop zaprojektowano pod statyczne obciążenia zmienne $q_k = 10$ i 15 kN/m^2 w zależności od przewidywanego ciężaru magazynowanych surowców w danej strefie. Na etapie realizacji obiektu zmieniono strop żelbetowy na strunobetonowy z płyt kanałowych o wysokości 265 mm i modularnej szerokości 1,20 m z betonu klasy C40/50, różnicując sprężenie ($n = 4, 6, 8$ i 10 cięgien $\varnothing 12,5 \text{ mm}$ ze stali Y1860 S7) w zależności od rozpiętości płyt $L = 2,21$ – $6,97 \text{ m}$ i obciążenia stałego $g_k = 6,7 \text{ kN/m}^2$ oraz zmiennego $q_k = 10$ i 15 kN/m^2 .

Po ułożeniu płyt na ścianach piwnicy i wykonaniu wieńców i złączy podłużnych między płytami okazało się, że w projekcie stropu nie uwzględniono obciążeń od dwóch wózków widłowych o udźwigu $Q = 20 \text{ kN}$ każdy. Wstrzymało wykonanie nadbetonu na płytach w celu weryfikacji aktualnej nośności stropu bez i z nadbetonem [1]. Na tej podstawie podjęto decyzję o wzmocnieniu stropu na ścinanie i zginanie poprzez zespolenie płyt z nadbetonem o grubości maksymalnej 50 mm w przeszle do 80 mm przy podporach i dodatkowo na ścinanie przez częściowe zabetonowanie kanałów na długości obliczeniowej $l_{pt2} = 0,90 \text{ m}$ transmisji siły sprężającej z cięgien na beton.

2. Nośność stropu ze strunobetonowych płyt kanałowych

Nośność obliczeniową strunobetonowych płyt kanałowych na zginanie M_{Rd} i ścinanie $V_{Rd,c}$ oraz stany graniczne użytkowości na zarysowanie M_{cr} i ugięcie sprawdzono według norm [2, 3]. Graniczne obciążenia $q_{k,d}$ na zginanie w przeszle i $q_{k,c}$ na ścinanie w odległości $l_x = 0,27 \text{ m}$ od czoła płyty swobodnie opartej na ścianach (tab. 1 i 2) wyznaczono z uwzględnieniem obciążeń stałych $g_k = 3,7 + 2,0 + 1,0 = 6,7 \text{ kN/m}^2$ (kolejno: ciężar własny płyt z wypełnieniem złączy podłużnych, nadbeton o grubości 50–80 mm i instalacje podwieszane). Dla obliczeniowych ob-

ciążeń zmiennych $q_{Ed} = \gamma_Q \cdot q_{k,d}$ (zginanie) i $q_{Ed,c} = \gamma_Q \cdot q_{k,c}$ (ściananie) przyjęto współczynnik obciążenia $\gamma_Q = 1,5$. Dla obciążeń stałych $g_{Ed} = \gamma_G \cdot g_k = 9,045 \text{ kN/m}^2$ przyjęto $\gamma_G = 1,35$ [4]. Zarysowanie i ugięcie dopuszczalne sprawdzono dla współczynnika obciążeń $\gamma_f = 1,0$.

Wszystkie płyty kanałowe wbudowane w strop nad piwnicą są prawidłowo dobrane pod względem przenoszenia obciążeń zmiennych na zginanie $q_{k,d} > q_{k,r}$ zarysowanie od zginania $q_{k,cr} > q_k$ i ugięcie $q_{k,a} > q_k$ przy założeniu równomiernie rozłożonych obciążeń stałych $g_k = 6,7 \text{ kN/m}^2$ i użytkowych $q_k = 10$ lub 15 kN/m^2 . Płyty o długościach $L = 2,21$ – $5,38 \text{ m}$ ze sprężeniem $4\varnothing 12,5 \text{ mm}$ (tab. 1) i płyta $L = 5,45 \text{ m}$ ze sprężeniem $6\varnothing 12,5 \text{ mm}$ (tab. 2) spełniają także wymagania stanu granicznego nośności na ścinanie $q_{k,c1x}$ i $q_{k,c2x} > q_k$ według norm [2 i 3].

Płyty kanałowe ze sprężeniem 6 i 8 cięgien $\varnothing 12,5 \text{ mm}$ dobrane są prawidłowo, jeśli nośność obliczeniowa płyt na ścinanie $V_{Rd,c2x}$ liczona jest według normy [3] ze wzoru 6.4. Z warunku $V_{Rd,c2x} = V_{Ed}$ uzyskano obciążenia graniczne $q_{k,c2x} > q_k$ (tab. 2). Jeśli nośność obliczeniowa na ścinanie $V_{Rd,c1x}$ liczona jest według normy [2] ze wzoru podanego w rozdziale 4.3.3.2.2.3, to uzyskane wyniki są negatywne $q_{k,c1x} < q_k$ (tab. 2). Z powodu zaniżonej wartości obciążeń zmiennych na ścinanie ($q_{k,c1x} < q_k$) dla większości płyt ze sprężeniem 6, 8 i 10 cięgien $\varnothing 12,5 \text{ mm}$ (wyniki w tab. 2 zaznaczone gwiazdką), sprawdzono nośność tych płyt na ścinanie V_{Rdt} [2] po wypełnieniu strefy przypodporowej części kanałów betonem klasy C30/37.

Nośność płyt $h = 265 \text{ mm}$ na ścinanie $V_{Rd,c2x}$ i $V_{Rd,c2p}$ według normy [3] oraz $V_{Rd,c1x}$ i $V_{Rd,c1p}$ według normy [2] w odległościach odpowiednio $l_x = 0,27 \text{ m}$ i $l_{pt2} = 0,90 \text{ m}$ od czoła płyt zestawiono w tabeli 3. Nośność płyt na ścinanie $V_{Rd,c2x}$ bez wzmocnienia strefy przypodporowej wyznaczona według normy [3] jest 27–29% większa od nośności według normy [2]. Wzmocnienie płyt $V_{Rdt} = V_{Rd,c2x(1x)} + 2/3 \cdot n \cdot b_c \cdot d \cdot f_{ctd}$ (tab. 3) po częściowym wypełnieniu strefy przypodporowej 1. kanału o średnicy $b_c = 185 \text{ mm}$ betonem klasy C30/37 ($f_{ctd} = f_{ctk0,05} / \gamma_c = 2,0 / 1,4 = 1,43 \text{ MPa}$) tę różnicę zmniejsza do 18,6–19,9% (tab. 3). Należy zwrócić uwagę, że norma [2] zaleca do obliczeń V_{Rdt} używać nośność $V_{Rd,c2x}$ określoną według normy [3] w tabeli 3. Na podstawie pomiarów

Tabela 1. Obciążenia graniczne płyt kanałowych ze sprężeniem 4Ø12,5 mm

Opis oznaczeń	Płyty h = 265 mm ze sprężeniem 4Ø12,5 mm					
	10,0		15,0			
Obciążenie projektowe q_{kr} , kN/m ²	10,0		15,0			
Długość płyty L, m	4,96	5,38	2,21	3,31	3,57	4,12
Długość obliczeniowa L_{or} , m	4,88	5,30	2,13	3,23	3,49	4,04
$q_{k,d,r}$ kN/m ² z warunku $M_{Rd} = M_{Ed}$	13,91	10,87	98,59	39,47	32,99	23,06
$q_{k,c1,r}$ kN/m ² z warunku $V_{Rd,c1x} = V_{Ed}$ ($V_{Rd,c1x}$ wg PN-EN 1168+A3:2011 [2])	13,59	11,87	46,68	25,44	22,71	18,24
$q_{k,c2,r}$ kN/m ² z warunku $V_{Rd,c2x} = V_{Ed}$ ($V_{Rd,c2x}$ wg PN-EN 1992-1-1:2008 [3])	18,10	15,99	58,79	32,68	29,31	23,82
Zarysowanie $q_{k,cr}$ kN/m ²	20,73	16,58	136,76	55,76	46,82	33,27
Ugięcie dopuszczalne $q_{k,a,r}$ kN/m ²	37,01	28,11	449,88	132,10	104,82	67,22
$q_{k,max,r}$ kN/m²	13,59	10,87	46,68	25,44	22,71	18,24

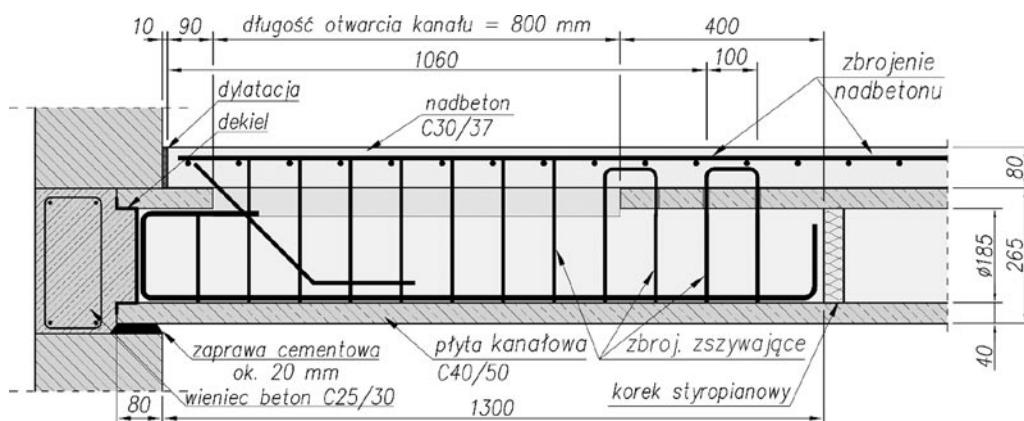
Tabela 2. Obciążenia graniczne płyt kanałowych ze sprężeniem 6, 8 i 10Ø12,5 mm

Opis oznaczeń	Płyty h = 265 mm ze sprężeniem					
	6Ø12,5 mm		8Ø12,5 mm		10Ø12,5 mm	
Obciążenie projektowe q_{kr} kN/m ²	10,0	15,0	10,0	15,0	10,0	15,0
Długość płyty L, m	5,45	5,38	5,40	6,97	5,95	6,97
Długość obliczeniowa L_{or} , m	5,37	5,30	5,32	6,89	5,87	6,89
$q_{k,d,r}$ kN/m ² z warunku $M_{Rd} = M_{Ed}$	18,18	18,82	18,63	12,93	20,09	17,24
$q_{k,c1,r}$ kN/m ² z warunku $V_{Rd,c1x} = V_{Ed}$ ($V_{Rd,c1x}$ wg PN-EN 1168+A3:2011 [2])	12,65	12,92*	12,84*	8,92*	11,75*	9,58*
$q_{k,c2,r}$ kN/m ² z warunku $V_{Rd,c2x} = V_{Ed}$ ($V_{Rd,c2x}$ wg PN-EN 1992-1-1:2008 [3])	16,83	17,16	17,06	12,19	15,64	12,93*
Zarysowanie $q_{k,cr}$ kN/m ²	22,09	22,85	22,63	14,14	21,93	17,50
Ugięcie dopuszczalne $q_{k,a,r}$ kN/m ²	30,68	32,02	31,63	14,52	25,36	16,53
$q_{k,max,r}$ kN/m²	12,65	12,92*	12,84*	8,92*	11,75*	9,58*

Tabela 3. Nośności obliczeniowe na ścinanie $V_{Rd,c}$ i V_{Rdt} dla płyt ze sprężeniem 6, 8 i 10Ø12,5 mm

Opis oznaczeń	Płyty h = 265 mm ze sprężeniem					
	6Ø12,5 mm		8Ø12,5 mm		10Ø12,5 mm	
Obciążenie projektowe q_{kr} kN/m ²	10,0	15,0	10,0	15,0	10,0	15,0
Długość płyty L, m	5,45	5,38	5,40	6,97	5,95	6,97
Rozpiętość w świetle ścian L_{sr} , m	5,29	5,22	5,24	6,81	5,79	6,81
Długość transmisji l_{pt2} , m	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90
$V_{Ed,kr}$ kN – reakcja na krawędzi podpory	76,3	98,8	99,2	98,2	110,0	128,9
$V_{Ed,cr}$ kN – siła poprzeczna w odległości $l_1 = 378$ mm od krawędzi oparcia płyty na ścianie	65,4	84,5	84,9	87,3	95,7	114,6
$V_{Ed,pt2}$ kN – siła poprzeczna w odległości $l_2 = 1,0$ m od krawędzi oparcia płyty na ścianie	52,6	67,8	68,2	74,5	79,0	97,9
Nośność $V_{Rd,c2x}$ [3] i ($V_{Rd,c1x}$) [2], kN w odległości $l_x = 0,27$ mm od czoła płyty bez nadbetonu	104,2 (81,9)	104,2 (81,9')	104,2 (81,9')	109,9 (86,0')	109,9 (86,0')	115,0 (89,8')
Nośność $V_{Rd,c2p}$ [3] i ($V_{Rd,c1p}$) [2], kN w odległości $l_{pt2} = 0,9$ m od czoła płyty bez nadbetonu	142,8 (110,4)	142,8 (110,4)	142,8 (110,4)	156,2 (120,4)	156,2 (120,4)	167,6 (128,9)
Nośność po zabetonowaniu n kanałów $V_{Rdt,2x(p)} = V_{Rd,c2x(p)} + n \cdot \Delta V_{Rdt}$ kN ($V_{Rdt,1x(p)} = V_{Rd,c1x(p)} + n \cdot \Delta V_{Rdt}$ kN) dla $l_x = 0,27$ m i $l_{pt2} = 0,90$ m	n=1	$V_{Rdt,2x} = 143,0$ $V_{Rdt,2p} = 181,6$ ($V_{Rdt,1x} = 120,6$) ($V_{Rdt,1p} = 149,2$)		147,4 193,7 (123,5) (157,9)		151,7 204,3 (126,5) (165,6)
		n=2	$V_{Rdt,2x} = 181,8$ $V_{Rdt,2p} = 220,4$ ($V_{Rdt,1x} = 159,4$) ($V_{Rdt,1p} = 188,0$)		184,9 231,2 (161,0) (195,4)	
ΔV_{Rdt} kN – przyrost nośności na ścinanie po zabetonowaniu 1 kanału	38,8		37,5		36,7	

Rys. 1. Zbrojenie zespala-
jące płytę z nadbetonem
w strefie otwartego kanału



w naturze założono, że beton wypełniający kanały sięga 40 mm w głąb oparcia płyty na ścianie. Zatem zbrojenie podłużne #10 mm odgięte w postaci pętli zabetonowanej w kanale ma zapewnione zakotwienie (rys. 1). W płytach kanałowych sprężonych czterema i sześcioma cięgnami $\varnothing 12,5$ mm wysokość użytecznej części przekroju wynosi $d = h - a_{p1} = 265 - 45 = 220$ mm, a dla 8 i 10 cięgien w dwóch warstwach odpowiednio $d = 212,5$ i 208 mm.

Na długości obliczeniowej l_{pt2} transmisji (przekazania) siły sprężającej z cięgien na beton nośność płyty na ścinanie $V_{Rd,c}$ zwiększa się od wartości 0 kN dla $l_x = 0$ m do wartości maksymalnej $V_{Rd,c}$ na końcu l_{pt2} . Dla $l_x > l_{pt2}$ przyjmuje się stałą wartość $V_{Rd,c}$ nośności na ścinanie. Nośność $V_{Rd,c2x}$ [3] i $V_{Rd,c1x}$ [2] przy podporze określono dla $l_x = 0,27$ m, przyjmując kąt zniszczenia na ścinanie $\beta = 35^\circ$ [2]. W obliczeniach nie uwzględniono niezamierzonego efektu częściowego zamocowania płyt kanałowych na podporach [5].

Wypełnienie betonem klasy C30/37 jednego z pięciu kanałów płyty o wysokości $h = 265$ mm wystarczająco podnosi nośność na ścinanie $V_{Rdt} > V_{Ed,c}$ (tab. 3) nawet bez współpracy płyty z nadbetonem. Po wzmocnieniu płyt na ścinanie strop przenosi przewidziane w pierwotnym projekcie obciążenia stałe $g_k = 6,7$ kN/m² i zmienne $q_k = 10$ i 15 kN/m² ze względu na zginanie ($q_k(M_{Rdt}) > q_k$), ścinanie ($q_k(V_{Rdt}) > q_k$), zarysowanie ($q_k(M_{cr}) > q_k$) i ugięcie ($q_k(a) > q_k$). Niezbędna okazała się jednak analiza oddziaływań na strop obciążeń równomiernie rozłożonych g_k i q_k łącznie z dwoma wózkami widłowymi o udźwigu $Q_k = 20$ kN każdy.

3. Nośność stropu obciążonego dodatkowo wózkami widłowymi

Na stropie nad piwnicą w budynku biurowo-produkcyjnym eksploatowane będą dwa wózki widłowe o parametrach jak w tabeli 4.

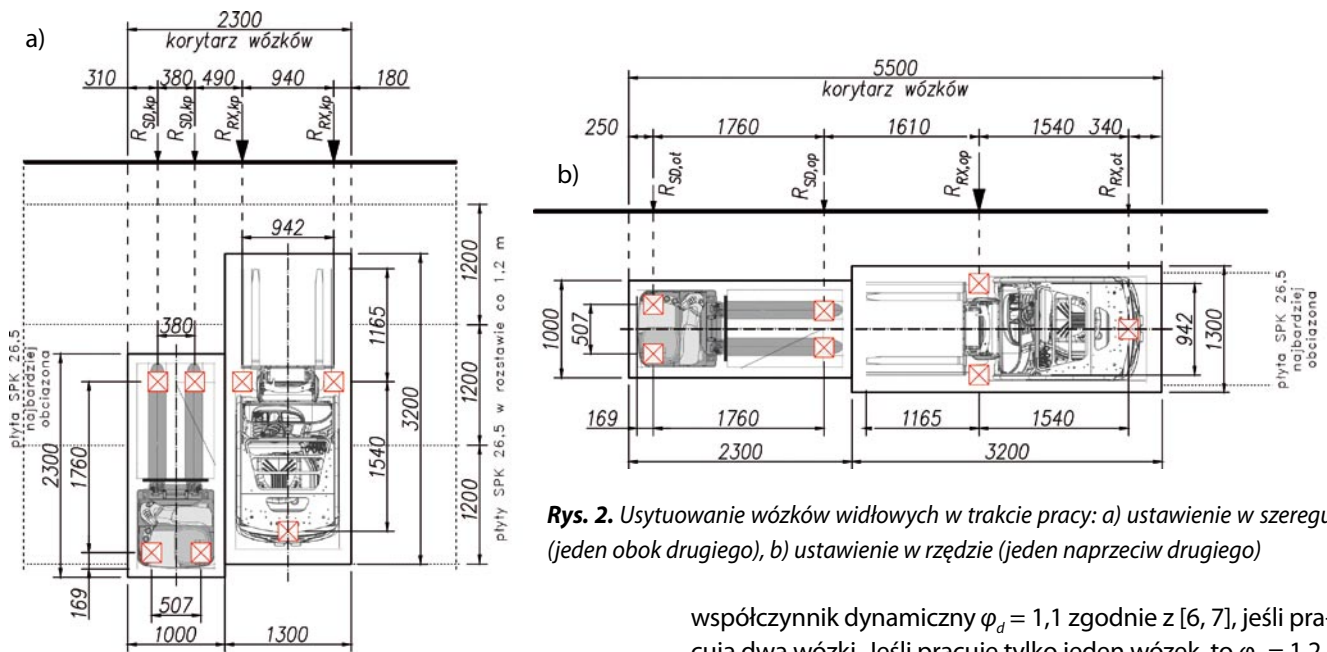
Na potrzeby analizy obciążeń rozpatrzono dwa reprezentatywne układy rozmieszczenia dwóch wózków w szeregu oraz w rzędzie (rys. 2). Dla każdego z przypadków założono jednostronne przyleganie powierzchni roboczych, co odpowiada możliwie małej odległości pomiędzy wózkami. W przypadku pracy wózków w szeregu przyjęto, że najbar-

Tabela 4. Parametry techniczne wózków widłowych

Parametr	Wózek STILL RX-20-20	Wózek STILL SD-20-20
Udźwig [kN]	20	20
Ciężar pojazdu [kN]	32,0	14,0
Obciążenie osi z ładunkiem przód/tył [kN]	46,7/5,5	19,7/14,3
Rozstaw kół przód/tył [mm]	942/168	380/507
Typ opon	pełne z gumy	pełne z gumy
Długość całkowita [mm]	2892	2130
Szerokość całkowita [mm]	1138	796

dziej obciążone osie przednie wózków usytuowane będą w osi podłużnej płyty (rys. 2a). W miejscu pracy wózków nie ma obciążenia użytkowego $q_k = 10$ kN/m² lub 15 kN/m². Szczegółowe obliczenia statyczne płyt kanałowych obciążonych dwoma wózkami widłowymi i obciążeniem równomiernie rozłożonym stałym $g_k = 6,7$ kN/m² i użytkowym $q_k = 10$ lub 15 kN/m² przedstawiono w opracowaniu [1]. Oddziaływania w płytach swobodnie podpartych wyznaczono dla obciążeń stałych g_k i zmiennych q_k oraz od dwóch wózków widłowych (rys. 2) z uwzględnieniem współpracy poprzecznej płyt kanałowych. Przyjęto, że złącza podłużne między płytami zostały prawidłowo wykonane i mają wystarczającą nośność na ścinanie podczas przekazywania części obciążeń na płyty sąsiednie.

Współpracę poprzeczną płyt w przenoszeniu obciążeń skupionych od nacisku kół wózków uwzględniono dla płyt o długości powyżej $L = 4,0$ m poprzez przemnożenie wartości sił skupionych przez współczynniki α_1 i α_2 rozdziału poprzecznego obciążeń. Wartość współczynnika rozdziału zależy m.in. od rozpiętości płyty oraz współrzędnej przyłożenia siły skupionej. Przyjęto asekuracyjnie, że jeżeli obciążenie działa w połowie rozpiętości płyty o długości powyżej $L = 4,0$ m, to współczynnik rozdziału dla płyty bezpośrednio obciążanej wynosi $\alpha_1 = 0,5$. Pozostała część siły skupionej przenoszona jest przez dwie sąsiednie płyty ($\alpha_2 = 0,25$). Współczynnik rozdziału poprzecznego α_1 rośnie w trakcie zbliżania się sił skupionych do podpory, osiągając



Rys. 2. Usytuowanie wózków widłowych w trakcie pracy: a) ustawienie w szeregu (jeden obok drugiego), b) ustawienie w rzędzie (jeden naprzeciw drugiego)

w odległości $0,1 L$ od podpory wartość $\alpha_1 = 1,0$ (płyty sąsiednie nie współpracują na kierunku poprzecznym z płytą bezpośrednio obciążoną). W obliczeniach uwzględniono

współczynnik dynamiczny $\varphi_d = 1,1$ zgodnie z [6, 7], jeśli pracują dwa wózki. Jeśli pracuje tylko jeden wózek, to $\varphi_d = 1,2$. Wyniki obliczeń stanów granicznych nośności na zginanie (M_{Rd} i $M_{Rd,2}$) i ścinanie ($V_{Rd,c}$ i V_{Rdt}) dla sprężonych płyt kanałowych $h = 265$ mm w stropie magazynowym zestawiono w tabelach 5 i 6. W obliczeniach nośności granicznej

Tabela 5. Nośność obliczeniowa na ścinanie i zginanie dla płyt ze sprężeniem $4\phi 12,5$ mm z uwzględnieniem współpracy z nadbetonem (obciążenia: g_r, q_k i 2 wózki widłowe)

Opis oznaczeń		Płyty $h = 265$ mm ze sprężeniem $4\phi 12,5$ mm					
		10,0		15,0			
Obciążenie projektowe q_{kr} , kN/m ²							
Długość płyty L , m		4,96	5,38	2,21	3,31	3,57	4,12
Długość obliczeniowa L_{or} , m dla V_{Ed} i M_{Ed}		4,88	5,30	2,13	3,23	3,49	4,04
Reakcja od obciążeń stałych, zmiennych i dwóch wózków widłowych $V_{Ed,r}$, kN		125,5	132,4	77,6	105,1	110,5	124,5
Siła poprzeczna $V_{Ed,p}$, kN w odległości $l_{pt2} = 0,9$ m		88,4	91,6	31,8	56,9	62,3	75,5
$V_{Rd,c2}$, kN wg [3] (bez nadbetonu i bez zabetonowanych kanałów)	w odległości $l_x = 0,27$ m	98,02	98,02	98,02	98,02	98,02	98,02
	w odległości $l_{pt2} = 0,9$ m	127,30	127,30	127,30	127,30	127,30	127,30
$V_{Rd,c2}$, kN wg [3] (z nadbetonem, ale bez zabetonowanych kanałów)	$V_{Rd,c2x}$ w odległości $l_x = 0,27$ m	116,97	116,97	116,97	116,97	116,97	116,97
	$V_{Rd,c2p}$ w odległości $l_{pt2} = 0,9$ m	143,39	143,39	143,39	143,39	143,39	143,39
Liczba zabetonowanych kanałów		2	3	2	2	2	2
$\Delta V_{Rdt,1}$, kN (przyrost nośności na ścinanie po zabetonowaniu 1 kanału)	bez nadbetonu	38,80	38,80	38,80	38,80	38,80	38,80
	z nadbetonem	52,91	52,91	52,91	52,91	52,91	52,91
$V_{Rdt} = V_{Rd,c2} + n \cdot \Delta V_{Rdt,1}$, kN wg [2] (bez nadbetonu i z zabetonowanymi kanałami)	w odległości $l_x = 0,27$ m	175,62	214,42	175,62	175,62	175,62	175,62
	w odległości $l_{pt2} = 0,9$ m	204,90	243,70	204,90	204,90	204,90	204,90
V_{Rdt} , kN wg [2] (z nadbetonem i z zabetonowanymi kanałami)	V_{Rdt2x} w odległości $l_x = 0,27$ m	222,79	275,70	222,79	222,79	222,79	222,79
	V_{Rdt2p} w odległości $l_{pt2} = 0,9$ m	249,21	302,12	249,21	249,21	249,21	249,21
Spełnienie warunku nośności na ścinanie		strefa podporowa: $V_{Rdt2x} > V_{Ed}$ strefa przęsłowa: $V_{Rd,c2p} > V_{Ed,p}$					
$M_{Ed,max}$, kNm		135,9	133,3	35,1	73,8	82,5	111,7
M_{Rd1} , kNm (płyty bez zespolenia z nadbetonem)		106,79	106,79	106,79	106,79	106,79	106,79
M_{Rd2} , kNm (płyty zespolone z nadbetonem 50 mm)		142,6	142,6	142,6	142,6	142,6	142,6
Spełnienie warunku nośności na zginanie		$M_{Rd2} > M_{Ed,max}$					

Tabela 6. Nośność obliczeniowa na ścinanie i zginanie dla płyt ze sprężeniem 6, 8 i 10Ø12,5 mm z uwzględnieniem współpracy z nadbetonem (obciążenia: g_k, q_k i 2 wózki widłowe)

Opis oznaczeń		Płyty $h = 265$ mm ze sprężeniem						
		6Ø12,5 mm		8Ø12,5 mm		10Ø12,5 mm		
Obciążenie projektowe q_k , kN/m ²		10,0	15,0	10,0	15,0	15,0		
Długość płyty L , m		5,45	5,38	5,40	6,97	5,95	6,97	
Długość obliczeniowa L_{or} , m dla V_{Ed} i M_{Ed}		5,37	5,30	5,32	6,89	5,87	6,89	
Reakcja od obciążeń stałych, zmiennych i dwóch wózków widłowych V_{Edr} , kN		134,5	151,8	152,2	157,8	151,4	171,5	
Siła poprzeczna $V_{Ed,p}$, kN w odległości $l_{pt2} = 0,9$ m od podparcia płyty		97,0	102,7	106,1	122,2	108,1	131,0	
$V_{Rd,c2}$, kN wg [3] (bez nadbetonu i bez zabetonowanych kanałów)		w odł. $l_x = 0,27$ m	104,22	104,22	104,22	109,87	109,87	115,00
		w odł. $l_{pt2} = 0,9$ m	142,82	142,82	142,82	156,16	156,16	167,59
$V_{Rd,c2}$, kN wg [3] (z nadbetonem, ale bez zabetonowanych kanałów)	$V_{Rd,c2x}$	w odł. $l_x = 0,27$ m	122,47	122,47	122,47	127,59	127,59	132,34
	$V_{Rd,c2p}$	w odł. $l_{pt2} = 0,9$ m	158,19	158,19	158,19	171,19	171,19	182,62
Liczba zabetonowanych kanałów		2	3	3	3	2	3	
$\Delta V_{Rdt,1}$, kN (przyrost nośności na ścinanie po zabetonowaniu 1 kanału)		bez nadbetonu	38,80	38,80	38,80	37,48	37,48	36,68
		z nadbetonem	52,91	52,91	52,91	51,59	51,59	50,79
$V_{Rdt} = V_{Rd,c2} + n \cdot \Delta V_{Rdt,1}$, kN wg [2] (bez nadbetonu i z zabetonowanymi kanałami)		w odł. $l_x = 0,27$ m	181,82	220,62	220,62	222,31	184,83	225,04
		w odł. $l_{pt2} = 0,9$ m	220,42	259,22	259,22	268,60	231,12	277,63
V_{Rdt} , kN wg [2] (z nadbetonem i z zabetonowanymi kanałami)	V_{Rdt2x}	w odł. $l_x = 0,27$ m	228,29	281,20	281,20	282,36	230,77	284,71
	V_{Rdt2p}	w odł. $l_{pt2} = 0,9$ m	264,01	316,92	316,92	325,96	274,37	334,99
Spełnienie warunku nośności na ścinanie		strefa podporowa: $V_{Rdt2x} > V_{Ed}$ strefa przęsłowa: $V_{Rd,c2p} > V_{Ed,p}$						
$M_{Ed,max}$, kNm		169,6	182,1	183,3	226,1	194,9	278,5	
M_{Rd1} , kNm (płyty bez zespolenia z nadbetonem)		157,02	157,02	157,02	202,48		248,48	
M_{Rd2} , kNm (płyty zespolone z nadbetonem 50 mm)		201,9	201,9	201,9	255,8	255,8	307,1	
Spełnienie warunku nośności na zginanie		$M_{Rd2} > M_{Ed,max}$						

na zginanie $M_{Rd,2}$ w przeszle uwzględniono zespolenie płyt z nadbetonem o grubości $h_n = 50$ mm. Wartości oddziaływań maksymalnych M_{Ed} i V_{Ed} wynikające z obciążeń stałych $g_k = 6,7$ kN/m² i zmiennych użytkowych $q_k = 10$ lub 15 kN/m² oraz obciążeń od wózków widłowych porównano z nośnościami granicznymi płyt M_{Rd1} , $V_{Rd,c}$ i V_{Rdt} (tab. 5 i 6).

Otwarcie i zabetonowanie kanałów na obliczeniowej długości transmisji $l_{pt2} = 0,90$ m oraz uwzględnienie zespolenia płyt strunobetonowych $h = 265$ mm z nadbetonem zwiększyło nośność V_{Rdt} płyt na ścinanie (tab. 5 i 6). Poza odcinkiem zabetonowanych kanałów nośność płyt na ścinanie wynosi $V_{Rd,c2p} > V_{Ed,p}$ (tab. 5 i 6). Nośność ta jest wystarczająca do bezpiecznego przenoszenia sił poprzecznych od obciążeń stałych g_k i zmiennych q_k oraz od dwóch wózków widłowych. Zespolenie nadbetonu o grubości $h_n = 80$ mm przy podporach z płytami kanałowymi o wysokości $h = 265$ mm podniosło nośność płyt na ścinanie 9–12%, a na zginanie 23–28% (tab. 6 i 7). Nośność płyt na zginanie wzrosła wsku-

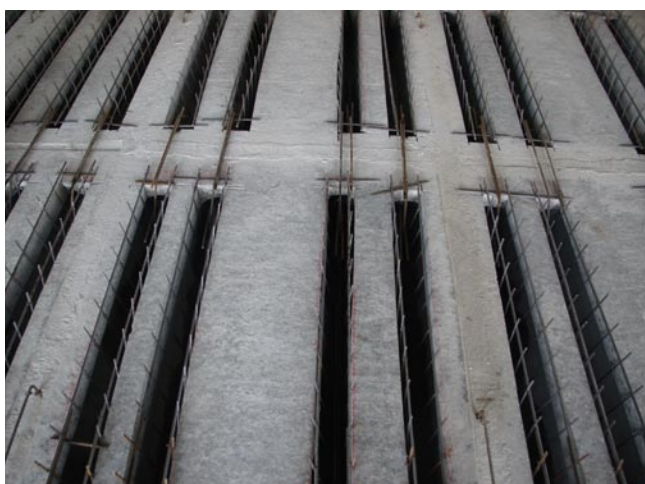
tek zwiększenia się wysokości użytecznej płyt o grubość nadbetonu (np. dla płyt z czterema i sześcioma cięgnami $d = 220$ mm zwiększyło się do wartości $d_z = 270$ mm).

4. Realizacja wzmocnień stropu

Cięcia podłużne sklepienia kanałów wykonano na szerokości 80–100 mm bez nacięć poprzecznych wiertnicą koronkową o średnicy 90–100 mm (rys. 3). Otwarte kanały wypełnione były częściowo szlaczem i gruzem betonowym. Górna powierzchnia płyt była gładka bez mechanicznych uszkodzeń. Czoła płyt przed betonowaniem wieńców były wyposażone w dekle z tworzywa sztucznego. Dekle te zlokalizowane są w odległości około 40 mm od krawędzi oparcia płyt na ścianach. Przestrzeń ta nie była wypełniona betonem. Wykorzystano ją do zakotwienia zbrojenia podłużnego (rys. 1) wsuwanego przez wycięte otwory podłużne w płytach (rys. 1 i 3).



Rys. 3. Zbrojenie wkładane do otwartych kanałów w płycie



Rys. 4. Zbrojenie zszywające ustabilizowane wewnątrz otwartych kanałów

Po usunięciu z kanałów szlamu i gruzu betonowego powierzchnię wewnętrzną oczyszczono z pyłu i umyto wodą. Do kanałów wsunięto korki styropianowe ograniczające rozptyw mieszanki betonowej podczas betonowania. W celu umożliwienia włożenia zbrojenia korki przesunięto w głąb kanału poza strefę kontaktu z wkładanym zbrojeniem. W otwartych kanałach umieszczono zbrojenie poprzeczne i zszywające (rys. 1). Po włożeniu szkieletu zbrojeniowego cofnięto korek i zabezpieczono go przed przesunięciem podczas betonowania. Otwarte kanały z umieszczonym zbrojeniem (rys. 4) najpierw wypełniono betonem do wysokości około 20 mm poniżej górnej powierzchni płyt (rys. 5). Świeżo ułożony beton klasy C30/37 zabezpieczono przed wysychaniem poprzez zraszanie jego powierzchni wodą przez 7 dni.

W czasie dojrzewania betonu wypełniającego kanały realizowano prace związane z mocowaniem zbrojenia zszywającego nadbeton z płytami w strefie przęsłowej. W tym celu w złączach podłużnych pomiędzy płytami poza zasięgiem otwartych kanałów nawiercono ślepe otwory pionowe $\varnothing 10$ i 12 mm na głębokość 200 mm w celu chemicznego zakotwienia w nich zbrojenia zszywającego z prętów

#6 i 8 mm w postaci litery „n” (rys. 1). Następnie na oczyszczoną powierzchnię stropu ułożono zgrzewane siatki zbrojeniowe nadbetonu z prętów #8 mm o $f_{yk} = 500$ MPa i oczkach co 100 mm (rys. 6).

Na zwilżoną wodą powierzchnię stropu z płyt kanałowych układano nadbeton niskoskurczowy klasy C30/37 o grubości 50–80 mm. Mieszankę betonową na płytach układano polami naprzemiennymi o wymiarach 12,5x12,5 m w dwóch etapach przesuniętych o kilka dni. Warstwę nadbetonu oddylałowano od ścian elastyczną przekładką o grubości 5 mm. Świeżo ułożony beton zabezpieczono przed wysychaniem poprzez zraszanie jego powierzchni wodą przez minimum 14 dni.

5. Podsumowanie

Strop magazynu surowców o wymiarach rzutu poziomego 90,0x12,5 m pierwotnie został zaprojektowany i wykonany przy użyciu strunobetonowych płyt kanałowych $h = 265$ mm z betonu klasy C40/50 na statyczne obciążenia stałe $g_k = 6,7$ kN/m² (ciężar własny płyt, nadbetonu i instalacji podwieszonych) i zmienne $q_k = 10$ lub 15 kN/m².



Rys. 5. Zabetonowane kanały do wysokości około 20 mm poniżej górnej powierzchni płyt



Rys. 6. Strop przygotowany do ułożenia nadbetonu

W obliczeniach nie uwzględniono obciążeń pochodzących od poruszających się po stropie dwóch wózków widłowych o udźwigu $Q = 20$ kN każdy, co zauważono przed wykonaniem warstwy wyrównującej o grubości 50–80 mm.

Płyty wbudowane w strop nad piwnicą są prawidłowo dobrane pod względem nośności na zginanie, zarysowanie i ugięcie przy założeniu statycznych obciążeń jak wyżej (tab. 1 i 2). Płyty o długościach $L = 2,21$ – $5,38$ m ze sprężeniem $4\emptyset 12,5$ mm (tab. 1) oraz płyty $L = 5,45$ m ze sprężeniem $6\emptyset 12,5$ mm (tab. 2) spełniały także wymagania dotyczące nośności na ścinanie. Natomiast płyty kanałowe ze sprężeniem 6, 8 i $10\emptyset 12,5$ mm nie spełniały wymagań normy [2] ze względu na ścinanie $q_{k,c} < q_k$ (tab. 2). Płyty $L = 5,38$ m i $5,40$ m oraz $5,95$ m dla obciążeń $q_k = 15$ kN/m² i płyta $L = 6,97$ m dla $q_k = 10$ kN/m² spełniały warunki normy [3] ze względu na ścinanie. Płyty $L = 6,97$ m dla obciążeń $q_k = 15$ kN/m² nie spełniały warunku nośności na ścinanie $V_{Rd,c} \geq V_{Ed}$ dla wymagań obu norm [2 i 3].

Wypełnienie w strefie przypodporowej jednego kanału betonem klasy C30/37 (tab. 3) zwiększyło wystarczająco nośność na ścinanie $V_{Rdt} > V_{Rd,c}$ wbudowanych płyt kanałowych (zaznaczono je w tabeli 2 gwiazdkami), nawet bez uwzględnienia współpracy płyty z nadbetonem. Przedmiotowy strop przenosiłby przewidziane w projekcie statyczne obciążenia użytkowe $q_k = 10$ i 15 kN/m² ze względu na zginanie, ścinanie, zarysowanie i ugięcie, ale bez obciążeń od dwóch wózków widłowych $Q_k = 20$ kN każdy.

Wyznaczając obciążenie pochodzące od poruszających się po stropie dwóch wózków widłowych, uwzględniono współpracę płyt na kierunku poprzecznym. Na podstawie oględzin przyjęto, że styki podłużne między płytami są dokładnie wypełnione betonem i mają wystarczającą nośność na ścinanie. Mają więc zdolność do przekazywania części obciążeń od wózków na płyty sąsiednie. W obliczeniach uwzględniono współczynniki dynamiczne.

Ze względu na dużą grubość nadbetonu ($h_n = 80$ mm przy podporach i $h_n = 50$ mm w przęśle) układanego na zmontowanym stropie z płyt kanałowych zdecydowano się na zastosowanie minimalnego zbrojenia w nadbetonie ze względu na naprężenia skurczowe w postaci siatek zgrzewanych z prętów #8 mm co 10 cm. Celem tego zbrojenia było zmniejszenie szerokości rozwarcia rys skurczowych w nadbetonie i zabezpieczenie przed przebicciem płyt przez koła dwóch wózków widłowych o udźwigu 20 kN każdy.

W celu zespolenia nadbetonu z płytami kanałowymi w otwartych kanałach umieszczono zbrojenie zszywające i poprzeczne w postaci gotowych kratownic (pręty #5 mm ze stali o $f_{yk} = 500$ MPa w rozstawie co 100 mm – rysunek 1) wykorzystywanych do produkcji belek stropów Teriva. Poza zasięgiem kratownic zastosowano pionowe zbrojenie o kształcie litery „n” z prętów #6 i 8 mm wklejane w nawiercone otwory w złączach podłużnych między płytami. W obliczeniach przyjęto naturalną szorstkość betonu w płaszczyźnie zespolenia z górną powierzchnią płyt (zrezygnowano z frezowania górnej powierzchni płyt). Przed ułożeniem nadbetonu górną powierzchnię płyt starannie odkurzono i zmyto wodą.

Strunobetonowe płyty kanałowe $h = 265$ mm pracują w stropie magazynowym jako elementy swobodnie podparte. Po wypełnieniu dwóch lub trzech kanałów w każdej płycie na długości minimum 1,0 m betonem klasy C30/37 i po zespoleniu płyt z nadbetonem klasy C30/37 strop spełnia wymagania stanów granicznych nośności i użyteczności dla obciążeń stałych $g_k = 6,7$ kN/m² i zmiennych $q_k = 10$ lub 15 kN/m² (w zależności od funkcji powierzchni magazynu) oraz obciążeń ruchomych od dwóch wózków widłowych o udźwigu 20 kN każdy. Po wykonaniu wszystkich zaleceń dotyczących wzmocnień stref przypodporowych płyt i zespolenia płyt z nadbetonem strop pracuje bezawaryjnie. Uratowano strop, ale kosztem znacznego nakładu robocizny na otwieranie około 790 kanałów w 147 płytach (w tym w 27 węższych od 1,20 m) i oczyszczenie ich powierzchni wewnętrznej oraz montaż zbrojenia na ścinanie i zszywającego nadbeton z płytami.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Michałek J., Łodo A., Kozioł P., Kubiak J., Weryfikacja nośności stropu z płyt sprężonych SPK 26.5 nad piwnicą w budynku biurowo-produkcyjnym, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, Raport serii SPR nr 8/2019, Wrocław, 2019
- [2] PN-EN 1168+A3:2011: Prefabrykaty z betonu. Płyty kanałowe
- [3] PN-EN 1992-1-1:2008: Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [4] PN-EN 1990:2004: Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji
- [5] Derkowski W., Surma M., Complex stress state in prestressed hollow core slabs, Recent advanced in Civil Engineering: Building Structures, Politechnika Krakowska, Monografia 478, Kraków 2015, str. 11–27
- [6] PN-82/B-02004: Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne technologiczne. Obciążenia pojazdami
- [7] Troszczyński G., Wytyczne projektowania stropów z płyt sprężonych HC. Poradnik dla projektantów, Steelco Grzegorz Troszczyński, Wrocław, 2012

Serdecznie zapraszamy autorów do publikowania
w „Przeglądzie Budowlanym”

Za publikację w naszym miesięczniku uzyskuje się **40** punktów