

# Statyczna praca kanałowych płyt stropowych opartych na dźwigarach podatnych



Dr inż. Mateusz Surma, dr hab. inż. Wit Derkowski, Politechnika Krakowska

## 1. Wprowadzenie

W ostatnich latach w Polsce obserwuje się wzrost realizacji dużych inwestycji budowlanych, który związany jest przede wszystkim z narastającymi potrzebami rynku kapitałowego w obszarze usług oraz niedoborem odpowiedniej liczby mieszkań. Ta tendencja rynku wynika ze zwiększenia popytu na budowę obiektów zarówno produkcyjno-magazynowych, wielkopowierzchniowych obiektów usługowych z infrastrukturą transportową, budynków biurowo-administracyjnych, jak i wielorodzinnych budynków mieszkalnych. Najczęściej nowo wznoszone obiekty muszą spełniać kilka funkcji użytkowych jednocześnie.

Współczesne budynki powinny spełniać szereg wymagań na wszystkich etapach ich wznoszenia i użytkowania. Dotyczą one nie tylko odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa konstrukcji, ale także ergonomicznego i funkcjonalnego wykorzystania przestrzeni użytkowej, które może ulegać modyfikacjom w zależności od przeznaczenia w danym momencie. Ponadto inwestorzy wymagają coraz większej jakości wykonania i estetyki, jak również umiejętnego wpisania obiektu w architekturę otoczenia.

Zapewnienie i połączenie tych zróżnicowanych cech budynku stanowi wyzwanie dla zespołu architektów, projektantów i wykonawców zarówno na etapie projektowania, jak i realizacji. Należy też nadmienić, iż wiodącym czynnikiem w wyborze rozwiązania konstrukcyjnego pozostaje inwestorskie oczekiwanie maksymalnego skrócenia procesu budowlanego oraz globalna redukcja kosztów.

Odpowiedzią na to wieloaspektowe zapotrzebowanie rynku budowlanego jest dynamiczny rozwój prefabrykacji betonowej, która pod wieloma względami spełnia stawiane wymagania. Betonowe konstrukcje prefabrykowane przede wszystkim wznoszone są w czasie dużo krótszym niż typowe konstrukcje monolityczne. W procesie budowlanym, sprowadzonym niemal wyłącznie do montażu zrealizowanych w fabrykach elementów konstrukcyjnych, liczba tzw. brudnych robót związanych z betonowaniem jest maksymalnie ograniczona, a prace mogą być realizowane także w warunkach zimowych, co z uwagi na wymagający polski klimat jest bardzo pożądane. Redukcję kosztów uzyskuje się głównie dzięki znacznemu zmniejszeniu zakresu prac realizowanych na miejscu budowy, np. poprzez brak potrzeby stosowania szalunków, układania zbrojenia czy montażu

licznego stemplowania stropów. Elementy te produkowane są z bardzo dużą precyzją w zakładach prefabrykacji, co bardzo często pozwala na rezygnację z dodatkowych prac wykończeniowych oraz brak dodatkowych zabezpieczeń przeciwpożarowych czy też okresowych zabiegów konserwacyjnych, jakim podlegają chociażby budynki o konstrukcji stalowej, co czyni je tańszymi w eksploatacji.

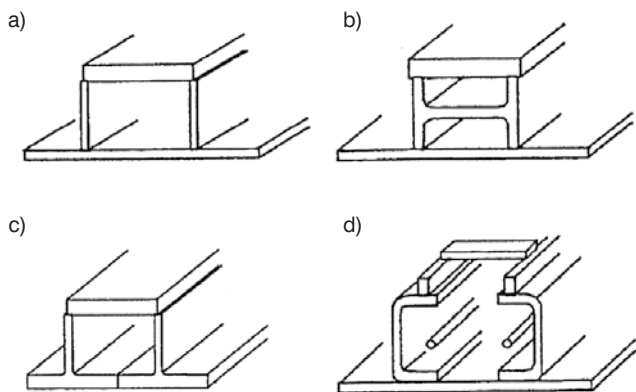
Zakres zalet prefabrykacji betonowej rośnie przy połączeniu jej z technologią sprężenia, która pozwala na przykład realizować stropy dużych rozpiętości (przekraczające nawet 20 m) przy stosunkowo małej wysokości przekroju poprzecznego. Jest to zaleta szczególnie istotna w warunkach ograniczonej powierzchni zabudowy i dopuszczalnej wysokości obiektu.

W obiektach użyteczności publicznej, w których wymagana jest płaska powierzchnia dolna stropu, która nie ogranicza przepływu światła oraz pozwala na swobodne podwieszanie wszelkich instalacji, chętnie wykorzystuje się strunobetonowe płyty kanałowe (najczęściej o rozpiętości 8–16 m) [1]. Rozwiązania, w których unika się stosowania belek, wysuniętych poniżej powierzchni stropu, a płyty opierają się na dźwigarach o nominalnej wysokości zbliżonej do wysokości płyt kanałowych nazywane są konstrukcjami typu Slim Floor.

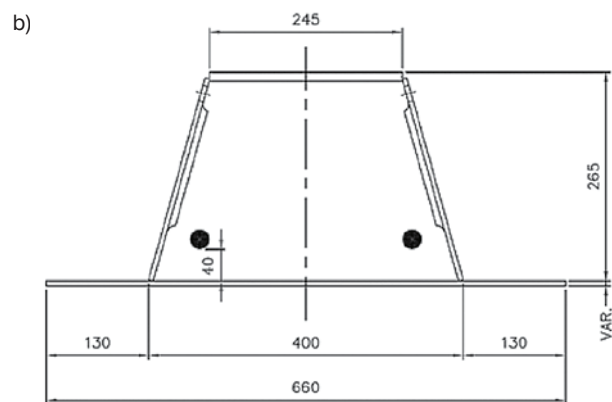
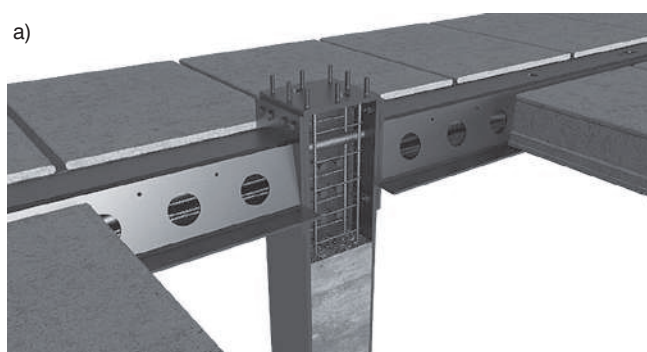
## 2. Konstrukcje Slim Floor

Początki realizacji konstrukcji typu Slim Floor sięgają przełomu lat 70. i 80. ubiegłego stulecia, kiedy to w Szwecji wykorzystano w budownictwie biurowym płyty kanałowe oparte na dolnych półkach stalowych dźwigarów o przekrojach typu HEB lub IPE. W niespełną dekadę rozwiązanie to stanowiło już ponad 50% wszystkich realizacji stropów w biurowcach Szwecji, a tendencja ta stała się widoczna także w pozostałych krajach Skandynawii, by w latach 90. rozprószyć się i utrwalić w Niemczech i innych krajach Europy Zachodniej.

Obecnie na rynku istnieje kilka systemowych rozwiązań stropowych klasyfikowanych jako Slim Floor, w których rozróżnia się przede wszystkim dźwigary stalowe, ale także betonowe i zespolone stalowo-betonowe. Cechą charakterystyczną, odróżniającą Slim Floor od innych systemów stropowych jest niemal płaska powierzchnia dolna stropu, w której dźwigar pełni funkcję ukrytego podciągu. Klasyczne wypełnienie pola stropowego stanowią strunobetonowe płyty kanałowe,

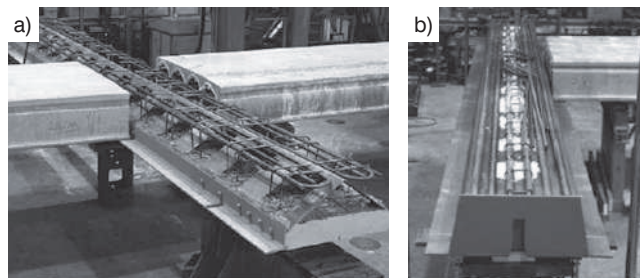


**Rys. 1.** Modyfikacje przekroju dźwigara kapeluszowego: a) THQ, b) NSQ, c) TBB, d) SFT [3]



**Rys. 2.** Widok (a) i przekrój poprzeczny (b) dźwigarów stalowych typu Delta [5]

ale może być ono realizowane również w formie monolitycznej płyty wykonywanej na stalowej blasze trapezowej lub na prefabrykowanych płytach szalunkowych typu filigran. Pierwsze komercyjne rozwiązania dźwigara stalowego dla konstrukcji Slim Floor wprowadziła szwedzka firma Granges Hedlung w połowie lat 70., w którym przekrój poprzeczny stanowiła blachownica zespawana z 4 blach, tworząca tzw. przekrój kapeluszowy THQ (rys. 1a) [2]. Ten kształt przekroju poprzecznego zapoczątkował wykorzystanie najłżejszych profili stalowych, stosowanych do dziś w tego typu konstrukcjach. Firmy szwedzkie w późniejszych latach wykonały różne modyfikacje tego przekroju w celu ograniczenia czasochłonności prac związanych z produkcją (przekroje NSQ



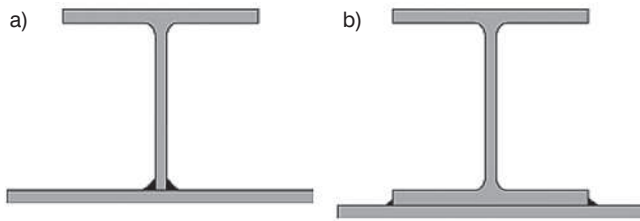
**Rys. 3.** Dźwigary – Super-Beam (a) oraz A-Beam (b) [6]

i TBB – rysunki 1 b, c). Za mankament wszystkich przedstawionych stalowych dźwigarów kapeluszowych uważano ich słabe parametry akustyczne, związane z możliwością propagowania się dźwięków w pustej przestrzeni środka. Skuteczną próbą rozwiązania tego problemu było wykonanie otworów w górnej powierzchni stalowego kapelusza, dzięki czemu powstała tzw. belka Fundia (SFT) (rys. 1d). W tym rozwiązaniu po raz pierwszy wykorzystano efekt zespolenia przez wypełnienie przekroju poprzecznego belki betonem z możliwością umieszczenia dodatkowego zbrojenia podłużnego, zapewniającego wymaganą ognioodporność konstrukcji [3].

Najnowszym rozwiązaniem, nawiązującym do belek kapeluszowych, są dźwigary zespolone stalowo-betonowe Delta o perforowanych środkach (rys. 2). Cechują się one dobrymi parametrami ogniochronnymi i niskim ciężarem własnym. Po ułożeniu płyt kanałowych następuje wypełnienie wnętrza stalowego profilu betonem uzupełniającym, którego zadaniem jest zespolenie i dosztywnienie całego dźwigara [4]. Inne modyfikacje zespolonych dźwigarów stalowo-betonowych, powstające z końcem lat 90. ub. wieku w Finlandii przedstawiono na rysunku 3.

Inny pomysł na kształtowanie stalowych dźwigarów dla konstrukcji Slim Floor zaproponowała firma British Steel i Steel Construction Institute, dzięki którym na rynek wprowadzono dźwigar SFB, składający się ze standardowego profilu dwuteowego np. typu HEB i dospawanej do dolnej półki szerokiej blachy, na której opierają się płyty stropowe (rys. 4a) [7]. Rozwiązanie podobnego typu wprowadziła w 1991 r. firma Arcelor Mittal, które jest powszechnie stosowane, zwłaszcza w Niemczech – dźwigar IFB (rys. 4b) wykonany jest poprzez spawane połączenie połowy przekroju IFB lub HEB z szeroką blachą podstawy [8].

W obu rozwiązaniach, po oparciu prefabrykowanych elementów stropowych, wymagane jest wypełnienie przestrzeni pomiędzy płytami i dźwigarem betonem uzupełniającym. Dzięki efektowi zespolenia drastycznie rośnie wartość momentu bezwładności przekroju zespolonego, co przekłada się na zmniejszenie ryzyka wystąpienia lokalnej niestateczności elementu. Pełne zespolenie między profilem stalowym a betonem skutkuje znaczącym zwiększeniem nośności oraz sztywności dźwigara stalowego, co w rezultacie przekłada się na duże oszczędności w ilości wbudowanej stali, jak i na redukcję wysokości przekroju. W przekrojach przęsłowych



Rys. 4. Dźwigary typu SFB (a) oraz IFB (b) [8]

belek, w których dominuje dodatni moment zginający, płyta betonowa odpowiada za przenoszenie naprężeń ściskających, zaś pas dolny przekroju stalowego jest rozciągany. Taki układ sił wewnętrznych w przekroju jest najkorzystniejszy z punktu widzenia wytrzymałości materiałów i jest jednym z największych atutów zastosowania konstrukcji zespolonej. Dźwigary stosowane w konstrukcjach tego typu są przykładem podpór płyt stropowych, które ze względu na mniejszą sztywność w porównaniu z wysokimi belkami żelbetowymi charakteryzują się większą strzałką ugięcia. W celu ograniczenia nadmiernych ugięć dźwigarów i optymalizacji kosztów konstrukcji zaleca się, aby stosunek rozpiętości płyt do rozpiętości dźwigarów znajdował się w granicach 1,0–1,5 [9]. Najczęściej spotyka się rozpiętości dźwigarów dochodzące do 8,0 m. Okazuje się, iż przyrost ugięć od obciążeń zaistniałych po zabetonowaniu styków płyt ma bardzo duże znaczenie w projektowaniu płyt kanałowych na ścinanie, zwłaszcza w przypadku płyt obciążonych dużymi siłami skupionymi lub liniowymi w obszarze strefy podparcia.

### 3. Wpływ podatności podpory na pracę strunobetonowych płyt kanałowych

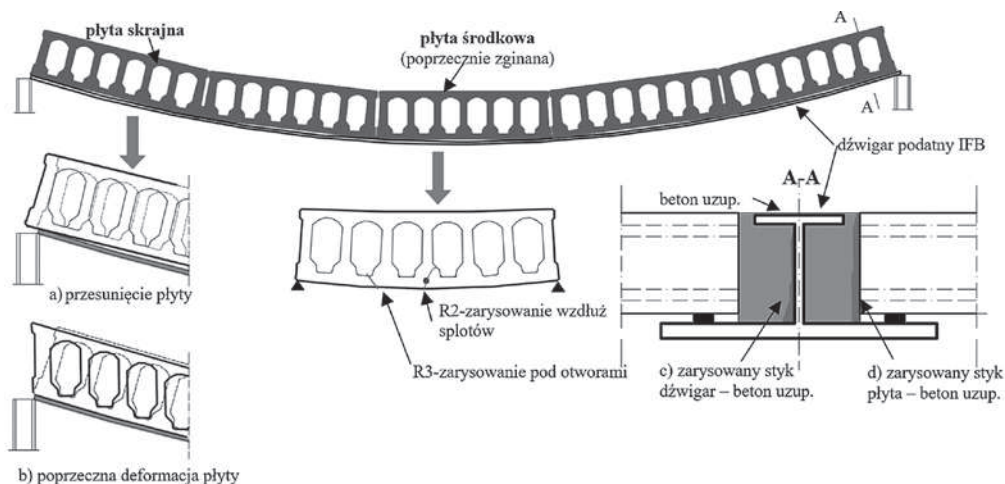
Projektując konstrukcję typu Slim Floor, należy uwzględnić fakt, że wraz ze wzrostem ugięcia belek następuje deformacja układu płyt stropowych, w konsekwencji czego w płycie powstaje złożony stan naprężeń – pojawiają się poprzeczne naprężenia normalne i styczne. W wyniku ugięcia podpory, elementy stropowe oparte na rozciąganej półce dźwigara

mają tendencję do przemieszczenia się w kierunku podłużnym dźwigara, czemu przeciwstawiają się adhezyjne siły przyczepności oraz siły tarcia w złączu płyta-dźwigar. Efektem takiego mechanizmu jest pojawienie się strumienia poziomych naprężeń stycznych w żeberku płyty, o przebiegu równoległym do osi dźwigara [10].

W dolnej części płyty, w strefie przy podporowej, może pojawić się zarysowanie, które będzie postępowało w betonowych żeberkach i nie zostanie ograniczone z powodu braku zbrojenia poprzecznego oraz niewielkiej wartości siły sprężającej w przekroju krytycznym zlokalizowanym na długości transmisji. Efektem tego mechanizmu może być zniszczenie zewnętrznych żeberek skrajnych płyt pola stropowego. Zmienna krzywizna dźwigara, w zależności od miejsca oparcia płyt kanałowych, jest przyczyną różnic w ich schemacie pracy. Płyty w środkowych polach stropowych są przede wszystkim zginane poprzecznie i poddane obciążeniu mniejszym sił niż w przypadku oparcia ich na podporach sztywnych. Przy odpowiednio dużym ugięciu podpory płyty te mogą opierać się na dźwigarze wyłącznie w obszarze swoich skrajnych żeberek. Zewnętrzne płyty układu stropowego poddane są przede wszystkim deformacji poprzecznej w wyniku ścinania poprzecznego, co stanowi główny powód redukcji ich nośności. Reakcje podporowe płyt nie są równomiernie rozkładane na dźwigarze, co oznacza, że zewnętrzne żeberka skrajnych płyt są obciążone większą siłą niż żeberka wewnętrzne, podczas gdy w sytuacji oparcia płyt na podporach sztywnych wszystkie żeberka obciążone są równomiernie.

Schemat pracy płyt stropowych, w zależności od lokalizacji na zdeformowanym dźwigarze, przedstawiono na rysunku 5. Badania doświadczalne prowadzone w Finlandii [6] oraz w Niemczech [11] wykazały, że zniszczenie płyt kanałowych następuje pod wpływem siły tnącej o wartości mniejszej nawet do 60% niż w przypadku płyt opartych na podporach sztywnych.

Badania doświadczalne prowadzone na Politechnice Krakowskiej, w latach 2013–2016, na 15 płytach kanałowych



Rys. 5. Zjawiska towarzyszące poprzecznej pracy płyty kanałowej na podporze podatnej



w różnych warunkach podparcia i obciążenia szczegółowo przedstawiono w pracy [12]. Pomiary odkształceń głównych w żeberkach wykazały, iż najsilniej obciążonym fragmentem płyty było żeberko skrajne, w obszarze którego uniemożliwiono poziome przemieszczenie elementu (z uwagi np. na obecność wieńca obwodowego). Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że żeberko to ulegało odkształceniu 2–5-krotnie większemu niż pozostałe. Tę znaczną dysproporcję odkształceń potwierdza także numeryczna analiza modeli symulujących badania doświadczalne. Udowodniona duża różnica w rozkładzie obciążenia na poszczególne żeberka płyty jest znaczącym wnioskiem inżynierskim, który potwierdza, iż nośność na ścinanie płyt kanałowych, opartych na podporach podatnych, nie jest sumą nośności poszczególnych żeberek. Miarą bezpieczeństwa płyty jest nośność najbardziej wyciężonego – skrajnego – żeberka. Badania i analizy obliczeniowe wykazały, że uproszczona metoda przyjmowania sumarycznej grubości żeberek jest dopuszczalna tylko w przypadku oparcia elementów stropowych na podporach sztywnych.

#### 4. Analiza obliczeniowa nośności ścinania strunobetonowych płyt kanałowych opartych na podporach podatnych

Pomimo coraz częstszych realizacji konstrukcji tego typu w obowiązującej normie dotyczącej strunobetonowych płyt kanałowych [13] można jedynie znaleźć następujący zapis: „w przypadku podpór podatnych, należy uwzględnić redukcję nośności w efekcie poprzecznych naprężeń ścinających”. W dokumencie tym nie podano jednak żadnej procedury obliczeniowej dla tego zagadnienia, podczas gdy np. wytyczne Deutsches Institut für Bautechnik [14] mówią o konieczności stosowania aż 50-procentowej redukcji nośności na ścinanie w porównaniu z przypadkiem oparcia na podporach sztywnych (wysokich belkach żelbetowych lub ścianach). Chociaż do chwili obecnej nie zarejestrowano żadnej katastrofy konstrukcji Slim Floor, to należy mieć świadomość, że zapas bezpieczeństwa uwzględniany na etapie projektowania może okazać się zawodny, zwłaszcza w przypadku krótkich płyt silnie obciążonych w strefie przypodporowej. Propozycję sposobu uwzględniania tego zjawiska w obliczeniach inżynierskich podano w rekomendacjach Międzynarodowej Federacji Betonu Konstruktoryjnego *fib* [15], gdzie przyjęto fiński model obliczeniowy autorstwa Pajari'ego i Leskelä. Określono go mianem modelu belki zespolonej, ponieważ zakłada on interakcję między elementami systemu stropowego, tj. płytą kanałową i dźwigarem podatnym. Współpraca pomiędzy nimi odbywa się dzięki zespoleniu zapewnianemu przez beton wypełniający styk pionowy płyta-dźwigar. Styki podłużne między sąsiednimi płytami także są wypełniane betonem, a zbrojenie układane prostopadłe do osi dźwigara w każdym styku ma zapewnić odpowiednie połączenie płyty z podporą.

Model zakłada zniszczenie płyty w wyniku ścinania, a jako kryterium zniszczenia przyjmuje osiągnięcie przez główne naprężenia rozciągające  $\sigma_1$  w żeberkach płyty wytrzymałości betonu na rozciąganie  $f_{ctd}$ . Warunek zniszczenia betonowych żeberek, w których występuje złożony stan naprężeń (dwie składowe naprężenia stycznych  $\tau_{xy}$  i  $\tau_{zx}$  oraz stałe naprężenie normalne  $\sigma_x$  od efektu sprężenia) przyjmuje następującą postać:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + t_{xy}^2 + [\beta_f (\tau_{zx,1} + \beta_{top} \times \tau_{zx,2})]^2} \leq f_{ctd}, \quad (1)$$

gdzie,

składowe naprężenia stycznych (pionowe  $\tau_{xy}$  i poziome równoległe do osi dźwigara  $\tau_{zx}$ ) wyznacza się z zależności:

$$\tau_{xy,1} = \frac{V_{hc1} \times S_{hc}}{I_{hc} \times b_w} \quad \text{oraz} \quad \tau_{xy,2} = \frac{V_{hc2} \times S_{hc+top}}{I_{hc+top} \times b_w} \quad (2) \text{ i } (3)$$

$$\tau_{zx} = \frac{3}{2} \times \frac{-2\Delta T_z}{b_w \times (2b_{cr})} = \frac{3}{2} \times \frac{v \times b_{hc}}{2 \times b_w \times x} = \frac{3}{4} \times \frac{v \times b_{hc}}{b_w \times b_{cr}} \quad (4)$$

w których:

$V_{hc1}$  – siła tnąca w przekroju krytycznym od ciężaru własnego płyty i obciążeń do chwili związania betonu wypełniającego styki podłużne pomiędzy płytami,

$S_{hc}$  – moment statyczny powierzchni płyty powyżej środka ciężkości, względem rozważanego przekroju,

$I_{hc}$  – moment bezwładności przekroju poprzecznego płyty,

$V_{hc2}$  – siła tnąca w przekroju krytycznym od obciążeń zewnętrznych w okresie normalnej pracy stropu, gdy przyłożone są wszystkie obciążenia użytkowe,

$S_{hc+top}$  – moment statyczny płyty i nadbetonu powyżej środka ciężkości układu zespolonego,

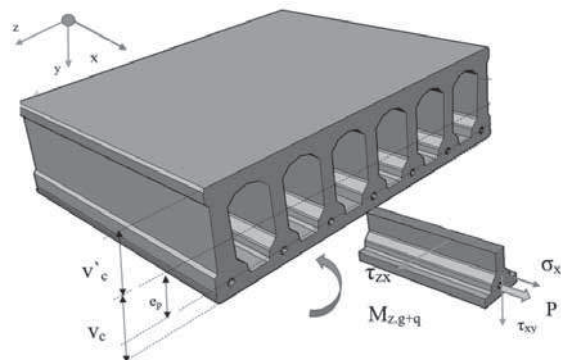
$I_{hc+top}$  – moment bezwładności przekroju poprzecznego belki zespolonej,

$b_w$  – suma szerokości wszystkich żeberek płyty,

$b_{hc}$  – nominalna szerokość płyty kanałowej,

$v \cdot b_{hc}$  – siła tnąca pochodząca od płyt opartych po obu stronach belki.

Konwencję znakowania składowych naprężeń w żeberku płyty kanałowej przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Rozkład naprężeń w betonowym żeberku płyty kanałowej [12]

W modelu uwzględniono także wartości współczynników redukujących niekorzystny wpływ naprężeń stycznych  $\tau_{zx}$  w żeberku płyty, w zależności od stosowanych zabiegów technologicznych na etapie montażu stropu. Rozważono efekt wypełnienia betonem kanałów płyty (współczynnik  $\beta_f$ ) oraz efekt ułożenia monolitycznej warstwy nadbetonu (współczynnik  $\beta_{top}$ ). Ponadto dla zwiększenia nośności na ścinanie można wykorzystać fakt uciąglenia sąsiednich dźwigarów, co realizuje się jednak rzadko z powodu trudności i czasochłonności rozwiązania.

Otwarcie i wypełnienie określonej liczby kanałów jest zabiegiem powszechnym, co dyktowane może być chęcią zwiększenia nośności na ścinanie w strefach przypodporowych, jak również lepszego powiązania płyt stropowych z belką lub wieńcem. Wpływ wypełnienia kanałów jest uwzględniany tylko dla głębokości wypełnienia większej niż 50 mm od czoła płyty. Najlepszy efekt podniesienia nośności uzyskuje się przy głębokości równej wysokości kanału. Współczynnik redukcyjny  $\beta_f$  zawiera się w przedziale 0,5–1,0. Dokładną wartość współczynnika  $\beta_f$  można odczytać z rekomendacji fib [15] lub wyznaczyć ze wzoru zawartego w wytycznych niemieckich [16]:

$$\beta_f = 1 - 0,3 \times \frac{l_f - 50 \text{ mm}}{h_{hol} - 50 \text{ mm}} \geq 0,8 \quad (5)$$

gdzie:

$l_f$  – głębokość wypełnienia kanałów (w milimetrach),  
 $h_{hol}$  – wysokość kanału (w milimetrach).

Wytyczne [16] zalecają ponadto, aby skrajne kanały płyt wypełnić betonem na długości minimum 80 cm i zazbroić strzemiętami poziomymi (np. U-kształtnymi) zakotwionymi w wieńcu.

W większości przypadków płyty kanałowe mogą pracować bez dodatkowej warstwy nadbetonu na górnej powierzchni. Jednak dla zwiększenia sztywności elementów, polepszenia efektu tarczowej pracy układu stropowego [4] i zwiększenia odporności ogniowej [17] stosuje się często zabieg monolityzacji przez nadbetonowanie. Jest on szczególnie powszechny w krajach, w których wpływy oddziaływań sejsmicznych stanowią szczególne zagrożenie dla obiektów budowlanych [18]. Zaleca się także stosowanie warstwy nadbetonu w przypadku występowania znacznych obciążeń skupionych lub liniowych [9]. Należy stosować beton uzupełniający o klasie wytrzymałości nie niższej niż C20/25 i minimalnej grubości 50 mm, co wynika ze względu na minimalne otulenie prętów siatki zbrojeniowej. W celu polepszenia warunków przyczepności nadbetonu do płyt kanałowych górna ich powierzchnia może zostać uszorstkowiona na etapie produkcji.

Wpływ warstwy nadbetonu jest uwzględniany poprzez współczynnik redukcyjny dany wzorem:

$$\beta_{top} = \frac{F_{web}}{F_{top} + F_{web}} \leq 1,0 \quad (6)$$

gdzie:

siły  $F_{top}$  i  $F_{web}$  oznaczają odpowiednio nośność na ścinanie podłużnie nadbetonu na jednostkę długości belki w pionowej płaszczyźnie zespolenia między belką i elementami stropowymi, czyli część naprężeń ścinających przejmowanych przez nadbeton oraz nośność na ścinanie poziome środnika na jednostkę długości belki.

Siły te można opisać formułami:

$$F_{web} = \frac{4}{3} \times L_e \frac{b_w}{b_{hc}} \times b_{cr} \times \sqrt{2} \times \frac{f_{ctm}}{\beta_f} \quad (7)$$

$$F_{top} = \max \left[ 2 \times L_e \frac{A_{sv} \times f_{yk}}{s_t} \times m; 0,2 \times f_{ck} \times h_{top} \times L_e \right] \quad (8)$$

gdzie:

$L_e$  – rozpiętość płyty w kierunku osi podłużnej dźwigara,  
 $f_{ctm}$  – średnia wytrzymałość betonu płyty kanałowej na rozciąganie,  
 $h_{top}$  – wysokość warstwy nadbetonu,  
 $f_{ck}$  – wartość charakterystyczna wytrzymałość nadbetonu na ściskanie,  
 $A_{sv}$  – pole przekroju poprzecznego prętów zbrojeniowych nadbetonu,  
 $f_{yk}$  – granica plastyczności stali zbrojeniowej prętów w nadbetonie,  
 $s_t$  – rozstaw prętów w nadbetonie równoległych do osi podłużnej płyty,  
 $\mu$  – współczynnik tarcia w styku płyta kanałowa – nadbeton,  $\mu=2,0$  [6].

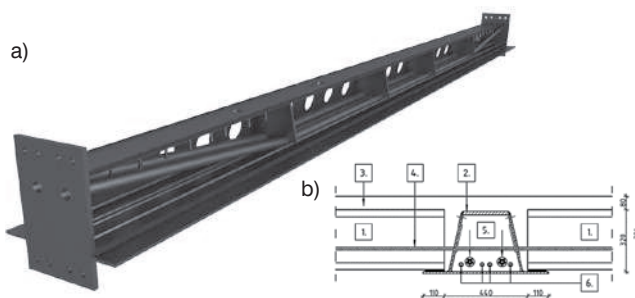
Własne badania doświadczalne [12] potwierdziły, że dodatkowa warstwa nadbetonu pozytywnie wpływa na wzrost nośności wszystkich nadbetonowanych płyt kanałowych. W elementach badawczych rejestrowano wyczerpanie nośności płyt z nadbetonem przy sile większej średnio o ok. 40% względem elementów o tej samej wysokości przekroju bez nadbetonu.

Przedstawiony model obliczeniowy będący wykładnią dla projektowania płyt kanałowych na podporach podatnych, według wytycznych fib oraz norm projektowych w Skandynawii, nie jest jedyną koncepcją obliczeniową, którą mogą posługiwać się konstruktorzy dla projektowania tego typu konstrukcji. Najnowsze wytyczne niemieckie [18], oparte na modelu obliczeniowym Hegger'a i Roggendorf'a [11], proponują inne podejście obliczeniowe. Wytyczne te doprecyzowują także definicję konstrukcji Slim Floor, definiując dźwigary podatne jako belki o minimalnej rozpiętości 2,4 m, tak aby mogły się na nich opierać minimum 2 płyty kanałowe. Płyty muszą być opierane na dźwigarach poprzez przekładki elastomerowe o grubości większej niż 10 mm, w celu zapewnienia równomiernego podparcia. Liczbowe porównanie fińskiej i niemieckiej koncepcji obliczeniowej opatrzone komentarzem zostało przedstawione w pracach [10, 12].

## 5. Granice podatności dźwigara dla konstrukcji Slim Floor

Jednoznaczne stwierdzenie, kiedy dźwigary należy traktować jako podpory podatne i uwzględnić to w wymiarowaniu płyt kanałowych, wydaje się kluczowe dla projektanta konstrukcji typu Slim Floor. O ile masywne dźwigary betonowe i sprężone intuicyjnie traktowane są jako podpory sztywne, a smukłe belki stalowe lub zespolone jako podpory podatne, o tyle ze względu na szereg innych rozwiązań (np. żelbetowe belki o przekroju poprzecznym odwróconej litery T) nie można mieć pewności, jaki model szacowania nośności na ścinanie płyt kanałowych przyjąć za właściwy. W modelu fińskim ani w będących jego pochodną wytycznych *fib* nie zdefiniowano granicznej wartości krzywizny, wskazując jedynie jej górną wartość  $\kappa=0,0027$  1/m, która nigdy nie może zostać przekroczona – np. dla dźwigara o rozpiętości  $L_b=6,2$  m odpowiada to strzałce ugięcia równej  $1/480 L_b$ . Niemieckie wytyczne [19], jako jedyny oficjalny dokument, wskazują graniczną wartość strzałki ugięcia dźwigara (powstającej od charakterystycznej wartości obciążeń zaistniałych po oparciu płyt kanałowych) równą  $1/2000 L_b$ , powyżej której dźwigar należy traktować jako podatny. Taki zapis powoduje, że dla niemal każdego dźwigara wymagane byłoby uwzględnienie redukcji nośności płyt na ścinanie. Dlatego wskazana wartość granicznej strzałki ugięcia wydaje się zbyt rygorystyczna w konstrukcjach stropowych. Obliczenia numeryczne pola stropowego, przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej [12], wykazały, iż za granicę podatności dźwigara można uznać strzałkę ugięcia równą  $1/1350$  rozpiętości.

Jednym ze sposobów polepszenia warunków pracy płyt kanałowych na dźwigarach podatnych, oprócz wymienionych już zabiegów wypełnienia kanałów i nadbetonowania, może być ograniczenie deformacji dźwigara, przy zachowaniu jego pierwotnej wysokości przekroju. Jednym z najbardziej efektywnych sposobów na ograniczenie ugięć konstrukcji jest stosowanie sprężenia. Warto wspomnieć tu o nowym, autorskim rozwiązaniu stropu, proponowanym w pracy [5], polegającym na wzbogaceniu pierwotnej koncepcji dźwigara typu Delta o wprowadzenie do belki kabli sprężających i jednoczesne uciągnięcie sąsiednich przęseł – rysunek 7. Przeprowadzone analizy obliczeniowe na przykładzie stropu Slim Floor wykonanego z płyt HC320 o osiowej rozpiętości 10,2 m, opartych na stalowo-betonowej belce o rozpiętości 7,2 m dowiodły, że nowe rozwiązanie konstrukcyjne przyniosło oczekiwany efekt. Pomimo zwiększenia rozpiętości projektowanego elementu o 25% wszystkie podstawowe warunki projektowe zostały spełnione. Zmiana schematu statycznego z belki wolnopodpartej na trójprzęsłową belkę ciągłą oraz zastosowanie sprężenia pozwoliło ostatecznie uzyskać strop o grubości 40 cm, oparty na słupach rozmieszczonych w siatce  $9,0 \times 10,2$  m. Optymalizację nośności ustroju udało się uzyskać, zachowując wszystkie



**Rys. 7.** Widok (a) i przekrój poprzeczny (b) przez sprężoną belkę typu Delta: 1 – płyta kanałowa, 2 – profil Delta, 3 – warstwa zbrojonego nadbetonu, 4 – zbrojenie uciążlające płyty kanałowe, 5 – kable sprężające w przekroju belki, 6 – pręty zbrojeniowe ze względu na warunki pożarowe

najważniejsze atuty konstrukcji Slim Floor – między innymi szybkość wznoszenia i płaską dolną powierzchnię stropu. Inne ostatnio stworzone rozwiązanie sprężonych belek pozwalające na zwiększenie zakresu stosowalności konstrukcji Slim Floor zostało zaprezentowane w pracy [20].

**Referat był wygłoszony na III Konferencji TECH-BUD'2017.**

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Derkowski W., Surma M., Stropy z elementów prefabrykowanych, Beton prefabrykowany, Wydanie specjalne Informatora Budowlanego – Murator, 2015
- [2] Baehre R., Pepin R., Flachdecken mit Stahlträgern in Skelettbauten, Bauingenieur 70, Springer Verlag, str. 65–71, 1995
- [3] Braun M., Slim-Floor Verbundträger für große Spannweiten-CoSFB, VDI-Bautechnik, 2014/2015
- [4] Cholewicki A., Elliot K.S., Diaphragm action of hollow cored floors, Betonwerk und Fertigteil-Technik International, tom 64, 12/1998
- [5] Derkowski W., Skalski P., New concept of slimfloor with prestressed composite beams, Procedia Engineering 193, str. 176–183, 2017
- [6] Pajari M., Prestressed hollow core slabs supported on beams. Finnish shear tests on floors in 1990–2006, 2010, VTT Working Papers 148, Espoo
- [7] Braun M., Die moderne Slim-Floor Bauweisen, Arcelor Mittal, Luxemburg, 2009
- [8] Arcelor Mittal, Slim floor an innovative concept for floors – IFB Träger, Luxembourg, 2014
- [9] Elliott K. S., Colin K. J., Multi-storey precast concrete framed structures, London, 2013
- [10] Surma M., Prestressed hollow core slabs on flexible support – design models and computational examples, 15th International Conference of Post-graduated Students Faculty of Civil Engineering JUNIORSTAV 2013, Brno University of Technology Czech Republic, Brno, str. 180, 9 III 2013
- [11] Roggendorf T., Zur Tragverhalten von Spannbeton-Fertigdecken bei biegeweicher Lagerung, Dissertation, RWTH Aachen, 2010
- [12] Surma M., Nośność na ścinanie strunobetonowych płyt kanałowych, z uwzględnieniem nadbetonu, opartych na podporach podatnych, Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, 2017
- [13] PN-EN 1168:2005+A3 2011 Prefabrykaty z betonu – płyty kanałowe, 2011
- [14] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-26.2-49, DELTA Verbundträger, DIBt, 2007
- [15] fib Bulletin 6, Special design considerations for precast prestressed hollow core floors, 2000
- [16] VMM Spannbetonplatten GbR, Technisches Merkblatt Biegegewiche Auflagerung, Bundesverband Spannbeton-Fertigdecken e.V., Berlin, 2016
- [17] Derkowski W., Kreska M., Odporność ogniowa stropów ze sprężonych płyt kanałowych z nadbetonem i bez, Monografia 511 Aktualne kierunki rozwoju teorii i praktyki konstrukcji sprężonych w Polsce, Politechnika Krakowska, str. 79–100, 2015
- [18] Menegotto M., Monti G., Diaphragm action of precast floors: behavior and modeling, 11th World Conference on Earthquake Engineering, nr 768, 1966
- [19] BSFV, Spannbeton-Fertigdecken, Industrierichtlinie, Berlin, 2017
- [20] Friedrich T., Klein-Holte R., Flexurally Rigid Support of Prestressed Hollow Core Slabs with Post-tensioned Beams, Proceedings of the fib Symposium, Maastricht, The Netherlands, str. 1137–1146, 2017