

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.



Piotr Skupień
ORCID: 0000-0002-2049-527X
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Krakowska



Opiekun naukowy:
dr hab. inż.
Wit Derkowski, prof. PK
Katedra Konstrukcji Sprężonych
Politechnika Krakowska

Rozwój technologii na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat spowodował wzrost znaczenia konstrukcji prefabrykowanych w stosunku do konstrukcji monolitycznych. Inwestorzy, projektanci i wykonawcy coraz częściej dostrzegają szereg zalet, jakie niesie ze sobą zastosowanie prefabrykacji betonowej. Rozwój w budownictwie uwarunkowany jest głównie przez konieczność sprostania rosnącym wymaganiom społeczeństwa w zakresie skrócenia czasu oraz obniżenia kosztów realizacji obiektów przy jednocześnie wysokim standardzie użytkowania. Przegrody poziome w budownictwie kubaturowym w dalszym ciągu są obszarem, gdzie następuje próba zaimplementowania nowych rozwiązań satysfakcjonujących każdą z zainteresowanych stron. Dodatkowo w architekturze współczesnej wciąż można zaobserwować trend polegający na kształtowaniu dużych, wolnych od podpór przestrzeni, który wymusza na projektantach konstrukcji kształtowanie stropów nieznacznej grubości konstrukcyjnej oraz dużej rozpiętości, jednocześnie spełniając wszelkie wymogi użytkowe. Konstrukcje sprężone umożliwiają spełnienie tych wymagań – w tym zakresie ulepsza się dotychczasowe rozwiązania zarówno w technologii kłobetonu [7,8], jak i strunobetonowych rozwiązań prefabrykowanych [1,2].

Obecnie na rynku budowlanym dostępnych jest wiele rozwiązań, z których każde posiada określone wady i zalety, lepiej nadając się do jednych rozwiązań, a mniej do innych. Wśród prefabrykowanych lub półprefabrykowanych stropów moż-

STROPY ZESPOLONE

Z desek strunobetonowych

Producenci prefabrykatów betonowych oferują wiele rozwiązań częściowo lub w pełni prefabrykowanych stropów, z których każde lepiej spełnia swoje funkcje w jednych warunkach użytkowania obiektu, a gorzej pracuje w innych zastosowaniach.

na wydzielić dwie grupy produktów: stropy gęstożebrowe oraz stropy z elementów wielkowymiarowych.

Rozwiązaniem hybrydowym, łączącym zalety obydwu typów i minimalizującym poszczególne wady, może być płyta w postaci lekkich strunobetonowych desek oraz warstwy nadbetonu w wersji lekkiej. W Polsce podjęto w ostatnich latach próbę optymalizacji zaproponowanego kilka dekad temu rozwiązania zastosowania niewielkich strunobetonowych prefabrykatów jako szalunku traconego oraz dolnego zbrojenia rozciąganego i nadbetonu w postaci betonu zwykłego [9,10] czy betonu lekkiego [6].

Deski strunobetonowe to określenie znane w literaturze. Pierwszy raz zostało użyte w latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia przez Wiktora Grzegorzewskiego [4], który opracował element przypominający kształtem deskę, służący jako szalunek tracony oraz dolne zbrojenie. Po przeprowadzeniu badań i obliczeń wykonano kilkanaście obiektów mostowych o rozpiętości do 10 m oraz zbiorniki na ciecze, stropy i mury oporowe. W zakresie stropów najbardziej zbliżonym rozwiązaniem jest wersja płyty w postaci desek strunobetonowych odgrywających rolę zbrojenia głównego oraz listew strunobetonowych pełniących funkcję zbrojenia rozdzielczego. Niestety w tamtych czasach zarówno technologia produkcji materiałów, jak i samych elementów nie była wystarczająco rozwinięta, a ponadto występowała niedokładność modeli obliczeniowych, wobec czego produkcję elementów bezpowrotnie wstrzymano.

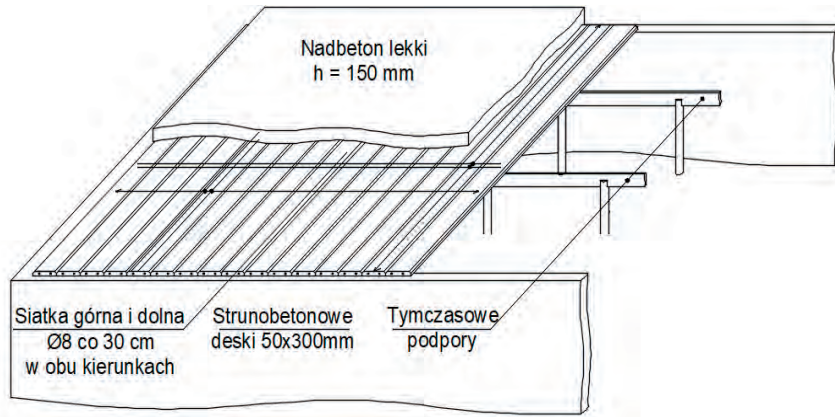
Proponowane rozwiązanie

Strop będący przedmiotem niniejszej analizy pracuje w najprostszym znanym schemacie statycznym – belki wolnopodpartej. Fakt ten podkreśla dodatkową zaletę takiego rozwiązania: prostotę obliczeń analitycznych bez konieczności wykorzystania zaawansowanych programów obliczeniowych. Prefabrykaty spełniają podwójną rolę: stanowią szalunek tracony dla warstwy nadbetonu wylewanej bezpośrednio na placu budowy, oraz zbrojenie dolne w tymczasowej i trwałej sytuacji obliczeniowej. W przeprowadzonej analizie obliczeniowej przyjęto następujące założenia:

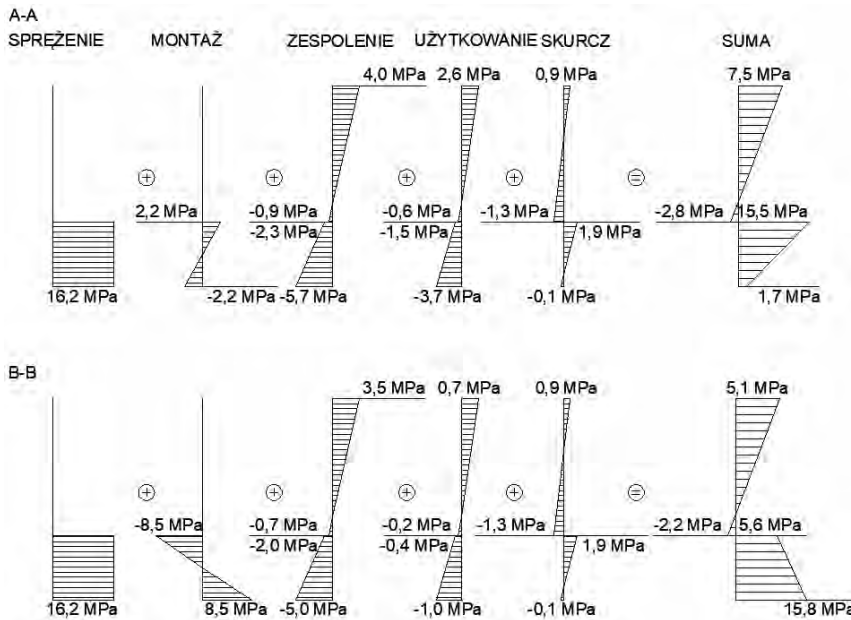
- rozpiętość w osiach podpór: 8,00 m;
- geometria deski: $h = 0,05$ m, $b = 0,30$ m;
- beton prefabrykatu: klasa C50/60 na kruszywie bazaltowym o uziarnieniu 4/8 mm, cement szybkowiązący CEM I 42,5R;
- beton warstwy wylewanej na budowie: $h = 0,15$ m beton lekki o klasie LC30/33 na bazie kruszywa Polytag i cementu 32,5N, wilgotność kruszywa na poziomie 18%, uziarnienie kruszywa 6/12 mm, klasa gęstości nadbetonu – 1,8;
- sprężenie dwoma splotami 7φ4 klasy Y1860;
- odporność ogniowa stropu: REI60;
- kategoria użytkowania: budownictwo mieszkaniowe – $q_k = 2,0$ kN/m².

Na rysunku 1. przedstawiono koncepcję projektowanego stropu. Zaproponowano deski o szerokości równej 300 mm przy sprężeniu dwoma splotami. Rozsądne wydaje się, iż na potrzeby stosunkowo szybkiego montażu oraz nieznacznego ciężar-





Rys. 1. Koncepcja stropu zespolonego



Rys. 2. Naprężenia normalne w przekroju w kolejnych sytuacjach obliczeniowych (przekroje A-A oraz B-B)

ru elementów jest to szerokość optymalna. Niemniej jednak wykonanie elementów o szerokości mniejszej (150 mm) lub większej (450 mm) można uznać za rozwiązanie wariantowe w zależności od niezbędnej do przekroczenia powierzchni oraz możliwości mobilizacji sprzętu realizującego transport pionowy. Wysokość prefabrykatu, po przeprowadzeniu analizy obliczeniowej dotyczącej odporności ogniowej, zdecydowano przyjąć jako 50 mm, sprężając element osiowo.

Korzyści betonu lekkiego

W typowych rozważaniach projektowych zwykle nie bierze się pod uwagę betonu innego rodzaju niż zwykły, o klasach wytrzymałości od C12/15 do C50/60. Rozwój technologii spowodował, iż na świecie coraz częściej wykorzystywane są betony alterna-

tywne. Norma [5] dopuszcza do zastosowań konstrukcyjnych lekki beton kruszywo- wy, który parametrami wytrzymałościowymi dorównuje odpowiednikowi na kruszywie zwykłym [3].

W analizie przyjęto beton o klasie gęstości 1,8, co odpowiada ciężarowi 18 kN/m³. Zredukowano zatem ciężar własny nadbetonu o 30% w porównaniu do betonu zwykłego. Kluczowymi parametrami w prowadzonej analizie są wytrzymałość na rozciąganie, która dla przyjętej klasy LC30/33 wynosi 3,6 MPa, oraz moduł sprężystości równy 21,4 MPa. Wykazano obliczeniowo, że nie dojdzie do zarysowania na styku betonów układanych w różnym czasie oraz ugięcie nie zostanie przekroczone w żadnej fazie użytkowania konstrukcji, co ostatecznie potwierdza słuszność zastosowania lekkich betonów konstrukcyjnych jako alternatywy dla betonów zwykłych.

Stan graniczny naprężeń

Strop poddany analizie obliczeniowej zaprojektowano, uwzględniając 4 fazy pracy konstrukcji:

- przekazanie siły sprężającej,
- sytuację montażową,
- chwilę zespolenia,
- sytuację eksploatacyjną.

Początkowa siła sprężająca wprowadzona do deski strunobetonowej wynosi $P_0 = 275$ kN. Straty doraźne i reologiczne wynoszą odpowiednio 11,2% ($P_{m0} = 244,2$ kN) oraz 16% ($P_{mt} = 200,1$ kN). W wyniku sprężenia w desce początkowo powstają naprężenia na poziomie 16,2 MPa. W sytuacji montażowej przyjęto obciążenie ciężarem deski (0,40 kN/m) spoczywającej na podporach montażowych rozstawionych w 1/3 oraz 2/3 rozpiętości stropu oraz ciężarem mokrego betonu (0,80 kN/m). Chwila zespolenia związana jest z usunięciem podpór tymczasowych i pracą konstrukcji w schemacie wolnego podparcia. W trakcie eksploatacji obiektu dochodzą dodatkowe obciążenia pochodzące od ciężaru warstw wykończeniowych (0,20 kN/m) oraz obciążenia użytkowego (0,60 kN/m). Wartości podano jako charakterystyczne oraz przypadające na szerokość jednej deski (300 mm).

Rysunek 2. przedstawia przyrosty naprężeń w desce w kolejnych fazach życia konstrukcji w najbardziej miarodajnych przekrojach z uwagi na niebezpieczeństwo zarysowania (A-A oraz B-B). W obliczeniach uwzględniono również spadek naprężeń w stali sprężającej w wyniku strat opóźnionych. Powoduje on średni spadek naprężeń w desce na poziomie 2,8 MPa w pięćdziesięcioletnim okresie użytkowania.

W wyniku różnicy skurczu betonów układanych w różnych okresach uzyskano następujące wartości odkształceń skurczowych:

- deska w momencie zespolenia (po 30 dniach): 0,026%,
- deska w chwili końcowej (po 50 latach): 0,062%,
- nadbeton w chwili końcowej (po 50 latach): 0,064%.

Stan graniczny ugięć

W tego typu, stosunkowo smukłej, konstrukcji zespolonej drugim ważnym stanem granicznym mogącym budzić obawy jest ugięcie. Jako granicę przyjęto normową wartość $L/250$, co dopuszcza ugięcie stropu równe 32 mm. Ugięcie zostało obliczone dla następujących założeń:

- przekrój niezarysowany,
- moduł sprężystości deski $E_{cm} = 42$ GPa oraz nadbetonu $E_{cm,n} = 21,4$ GPa,
- sprowadzone wartości charakterystyk geometrycznych,
- współczynnik pełzania deski $\phi = 2,2$ oraz nadbetonu $\phi = 2,5$,

- etapowanie pracy konstrukcji z podziałem na ugięcie sprężyste oraz ugięcie pełzania dla quasi-stałej kombinacji oddziaływań i efektywnego modułu sprężystości.

Po przeprowadzeniu dokładnej analizy obliczeniowej z uwzględnieniem etapowania konstrukcji całkowite ugięcie długotrwałe dla przedstawionej sytuacji wynosi 31 mm i jest to wartość mniejsza niż $L/250$, zatem uznaje się stan graniczny za spełniony.

Stan graniczny zespolenia nadbetonu z prefabrykatami

Kluczowym założeniem zwiększającym opłacalność wykonania desek w stosunku do innych rodzajów konstrukcji jest brak zastosowania zbrojenia zespalającego płaszczyny betonów układanych w różnych okresach. Do obliczeń przyjęto zgodnie z normą [5] najbardziej niekorzystną sytuację z powierzchnią wykończoną na gładko oraz zgodnie ze wzorem 6.24 ww. normy określono maksymalne naprężenie styczne w płaszczynie styku.

Na nośność styku bez zbrojenia zszywanego ma wpływ jedynie rodzaj powierzchni oraz wytrzymałość betonu na rozciąganie wynoszące odpowiednio 0,2 dla powierzchni gładkiej oraz 1,5 MPa dla nadbetonu. Dla przyjętych założeń obliczono zgodnie z normą [5] nośność styku równą 0,30 MPa. Maksymalne naprężenie styczne nad podporą wynosi 0,24 MPa, generując wyężenie na poziomie 80%, tym samym potwierdzając poprawność przyjętych założeń – brak konieczności stosowania zbrojenia zespalającego.

Podsumowanie

W pracy, jako odpowiedź na potrzebę opracowywania wciąż nowych rozwiązań zwiększających konkurencyjność wobec istniejących, przedstawiono koncepcję półprefabrykowanego lekkiego stropu. Przeprowadzona analiza obliczeniowa pozwala stwierdzić, iż istnieje możliwość wykonania takiego typu konstrukcji. Należy zwrócić szczególną uwagę, że jest to rozwiązanie nowatorskie i wymaga znacznego dopracowania, a wszelkie korzyści dla każdego z uczestników procesu budowlanego są możliwe do osiągnięcia poprzez sprawne i optymalne zarządzanie na każdym etapie projektu. Warty podkreślenia jest fakt spełnienia wszelkich stanów granicznych, w szczególności stanu granicznego ugięć, z którym problem mieli autorzy pracy [9], stosując jako nadbeton beton zwykły, w przeciwieństwie do zaproponowanego w niniejszej pracy betonu lekkiego. Znaczna redukcja ciężaru własnego pozwoliła spełnić stan graniczny ugięć. ■

DOI: 10.5604/01.3001.0013.4521

Bibliografia

- [1] Derkowski W., Skalski P., New Concept of Slimfloor with Prestressed Composite Beams, *Procedia Engineering* 193 pp. 176-183.
- [2] Derkowski W., Surma M., Influence of concrete topping on the work of prestressed hollow core slabs on flexible supports, *Proceedings of 4th International fib Congress 2014: Improving Performance of Concrete Structures (Mumbai, India, 10-14 February 2014)* pp. 339-341.
- [3] Domagała L., *Konstrukcyjne lekkie betony kruszywowe*, Politechnika Krakowska, Kraków 2014.
- [4] Grzegorzewski W., *Deski strunobetonowe w budownictwie*, Arkady, 1965.
- [5] PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, wrzesień 2008.
- [6] Skupień P., Projekt zespolonego stropu złożonego z prefabrykowanych desek strunobetonowych oraz górnej warstwy betonu lekkiego wykonanej na mokro, praca dyplomowa magisterska, wrzesień 2016.
- [7] Szydłowski R., Labuzek B., Post-tensioned Concrete Long-Span Slabs in Project of Modern Building Construction, "IOP Conference Series: Material Science and Engineering", 245 (2017) 02206.
- [8] Szydłowski R., Mieszczak M., Study of application of lightweight aggregate concrete to construct post-tensioned long-span slabs, "Procedia Engineering, Elsevier", Vol. 172 (2017), pp. 1077-1085.
- [9] Szydłowski R., Szreniawa M., New Concept of Semi-precast Concrete Slab on Pre-tensioned Boards, "IOP Conference Series: Material Science and Engineering", 245 (2017) 022090.
- [10] Szydłowski R., Szreniawa M., Koncepcja półprefabrykowanego stropu na deskach strunobetonowych. „Inżynieria i Budownictwo” [w przygotowaniu do druku].

Streszczenie: Producenci prefabrykatów betonowych oferują wiele rozwiązań częściowo lub w pełni prefabrykowanych stropów, z których każde lepiej spełnia swoje funkcje w różnych warunkach użytkowania obiektu, a gorzej pracuje w innych zastosowaniach. Zalety, jakie niesie ze sobą prefabrykacja, są coraz częściej dostrzegane przez wszystkich uczestników procesu budowlanego, w tym również przez producentów chcących zaspokoić nacisk ze strony rynku budowlanego na opracowanie nowszych, lepszych i bardziej hybrydowych rozwiązań, tak aby możliwa była konkurencja z technologią tradycyjną wznoszenia obiektów, czyli betonem monolitycznym. Na Politechnice Krakowskiej zaproponowano wykonanie stropu ze strunobetonowych elementów nieznacznej grubości do zastosowania jako szalunku traconego dla zbrojonego nadbetonu [9, 10] wykonanego z betonu lekkiego. Powstały strop zespolony byłby stosunkowo tani w transporcie i montażu, co czyni go konkurencyjnym dla popularnych w budownictwie mieszkaniowym stropów gęstożebrowych, jednocześnie posiadając zalety stropów pełnych – dobre właściwości mechaniczne i akustyczne. W pracy przedstawiono zmodyfikowaną koncepcję takiego stropu, wykorzystującą jako nadbeton lekki beton kruszywowy, wraz z wybranymi wynikami analizy obliczeniowej.

Słowa kluczowe: prefabrykacja, deski strunobetonowe, strop zespolony

Abstract: COMPOSITE SLAB MADE OF PRECAST PRE-TENSIONED CONCRETE PLANKS. Precast concrete manufacturers offer many solutions of partially or fully

KOMENTARZ



dr hab. inż. Wit Derkowski

prof. PK

Artykuł jest efektem analiz prowadzonych przez Autora w ramach pracy magisterskiej napisanej pod kierunkiem dr. inż. Rafała Szydłowskiego. Prezentuje on modyfikację koncepcji desek strunobetonowych, opracowanej już ponad 50 lat temu. Aktualnie wiodącym czynnikiem w wyborze rozwiązania konstrukcyjnego stropu pozostaje oczekiwanie maksymalnego skrócenia procesu budowlanego oraz globalna redukcja kosztów. Ponadto chęć odciążenia konstrukcji jest motorem poszukiwań możliwości wykorzystywania kruszywowych betonów lekkich w konstrukcjach stropowych. Z tych powodów prezentowana koncepcja może budzić zainteresowanie.

precast slabs, each of which performs better in one site usage conditions, and works worse in other situations. The advantages of precast structures are increasingly noticed by all participants of the construction process, including producers who want to satisfy the pressure from the construction market to develop newer, better and more hybrid solutions, so that competition with traditional concrete technology is possible. On Cracow University of Technology Scientists proposes making a slab made of pre-tensioned concrete elements of low thickness for use as shuttering for reinforced concrete made of lightweight concrete [9, 10], which is lighter than conventional traditional concrete by about 30%. The resulting composite slab of precast elements would be relatively cheap in transport and assembly, which makes them competitive for popular ribbed floor structures usually used in houses, at the same time having the advantages of solid slabs, such as good mechanical and acoustic properties. The work presents the modified concept of such slab and an example of analysis.

Keywords: precast structures, pre-tensioned concrete planks, composite slab