

ZASTOSOWANIE BETONÓW LEKKICH DO KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH, W SZCZEGÓLNOŚCI DO SPRĘŻONYCH PŁYT STROPOWYCH

APPLICATION OF LIGHTWEIGHT CONCRETE TO CONSTRUCTION, ESPECIALLY FOR PRESTRESSED FLOR SLABS

Małgorzata Mieszczak

Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Lądowej
Pracownia Konstrukcji Sprężonych
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków
e-mail: gosia_mieszczak@wp.pl

Abstract: Today's race for innovation and new solutions require from engineers to create new design solutions. One of these innovate solutions could be the using of lightweight concrete for structures subjected to high loads. Lightweight concrete despite smaller and above all worse aggregates have very good mechanical properties. Much less dead weight could lead to significant savings in the amount of reinforcement or massiveness of supports and foundations. The work has shown the possibility of using lightweight concrete for prestressed structures, based on a review of studies of lightweight concrete and numerical calculations.

Keywords: lightweight concrete, elastic modulus, prestress.

Wprowadzenie

Betony lekkie obecnie znajdują coraz szersze zastosowanie w budownictwie. Znane są głównie z wykorzystania do elementów dekoracyjnych, ale coraz częściej możemy spotkać elementy konstrukcyjne z betonu lekkiego. Już w starożytności stosowano ten materiał, kiedy to

Rzymianie i Grecy wykonywali go głównie z pumeksu naturalnego i innych porowatych skał pochodzenia wulkanicznego. Do dziś możemy oglądać budowle tamtych czasów, między innymi rzymski Panteon (rys. 1) wykonany z betonu tufowego i pucolanowego, gdzie zarówno ściany jak sklepienie o rozpiętości 37,2 m wykonano z betonu zawierającego pumeks i pucolanę [7].



Rys. 1. Rzymski Panteon (129 r.n.e) z największą na świecie kopułą o rozpiętości 44m, wykonaną z betonu niezbrojonego [7].

Pierwsze zastosowanie betonu lekkiego jako materiału konstrukcyjnego miało miejsca w 1928 roku. Beton użyto do nadbudowy ośmiu dodatkowych pięter w wieżowcu Bell Telephone Company w Kansas City. W

następnym roku wybudowano 28-piętrowy wieżowiec Park Plaza Hotel w St. Louis, w którym cała konstrukcja została wykonana z lekkiego betonu kruszywowego.

Materiały, metody i wyniki

Właściwości betonów lekkich w stosunku do betonów zwykłych

Rozróżnia się czternaście klas betonów lekkich od LC8/9 do LC80/88 (o 2 klasy mniej niż betonów zwykłych). W przeciwieństwie do betonów zwykłych, właściwości mechaniczne betonów lekkich zależą zarówno od matrycy, jak i od kruszywa. W betonach zwykłych zniszczenie następuje zazwyczaj w strefie stykowej (kruszywo – cement), natomiast w betonach lekkich – w matrycy. Główną różnicą między mate-

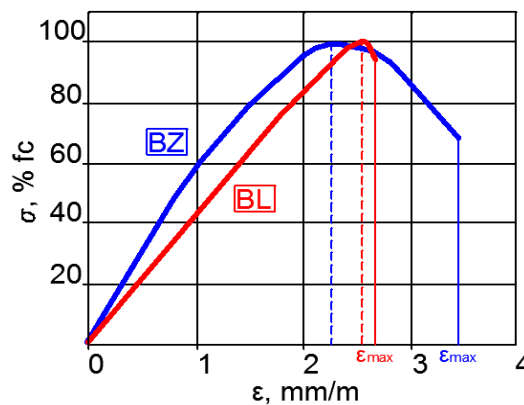
riałami jest gęstość, która w przypadku betonów lekkich wynosi od 800 do 2000 kg/m³. Ze względu na mniejszą gęstość, beton lekki charakteryzuje się gorszymi właściwościami mechanicznymi niż beton zwykły, a największe różnice występują w wartości modułu sprężystości i wytrzymałości na rozciąganie. Mniejsza gęstość powoduje jednak poprawę niektórych właściwości, takich jak przewodność cieplna czy wytrzymałość na działania dynamiczne. W tabeli 1 porównano właściwości betonów lekkich w stosunku do betonów zwykłych [3].

Tab. 1. Zestawienie porównawcze właściwości betonów lekkich w stosunku do betonu zwykłego ↑- wyższe ↓- niższe [3].

| Właściwość | ↑/↓ |
|--|-----|
| Wytrzymałość na ściskanie | ↓ |
| Wytrzymałość na rozciąganie | ↓ |
| Moduł sprężystości | ↓ |
| Praca w stanie niezarysowanym | ↑ |
| Skurcz | ↑ |
| Pełzanie | ↑ |
| Gęstość | ↓ |
| Współczynnik Poissona | - |
| Wytrzymałość na obciążenia cykliczne | ↑/↓ |
| Wytrzymałość na obciążenia długotrwałe | ↑/↓ |
| Wytrzymałość na obciążenia dynamiczne | ↑/↓ |
| Izolacyjność termiczna | ↑ |
| Izolacyjność akustyczna | ↓ |

Betony lekkie charakteryzują się też większym skurczem (nawet o 50%) niż betony zwykłe, co potwierdzają wyniki licznych badań [1, 3]. Ze względu na swoją jednorodną budowę dłużej pracują w stanie niezarysowanym. W betonie lekkim nie występują dwie fazy zarysowania, a pierwsze rysy pojawiają się dopiero przy wyczerpaniu elementu około 85-90% [4], czyli tuż przed zniszczeniem. Z tego powodu elementy z betonów

lekkih niszczą się szybciej i bardziej eksplozywnie, co przedstawia wykres na rys. 2 [4]. Dzięki większemu zakresowi pracy w stanie sprężystym, betony lekkie mogą charakteryzować się większą wytrzymałością zmęczeniową. Z tego powodu można się też spodziewać większej wytrzymałości na obciążenia długotrwałe.



Rys. 2. Wykres $\sigma - \epsilon$ podczas próby ściskania betonu zwykłego BZ i betonu lekkiego BL [4].

Mniejsza wartość modułu sprężystości powoduje większą odporność na uderzenia, co jest związane głównie z większą zdolnością do pochłaniania energii kinetycznej. Korzyścią zastosowania betonów lekkich jest koszt wykonania i materiałów, ze względu na mniejszy ciężar własny zmniejszamy ilość zastosowanej stali, a także ułatwiamy wykonanie konstrukcji.

Nie przeprowadzono dotąd wielu badań na temat porównania odporności na uderzenia BL i BZ. Naukowcy Saaba i Ravindrarajah [8] wykazali, że wzrost zawartości kruszywa poliestrowego w betonach konstrukcyjnych o gęstości 1 600-2 000 kg/m³ zwiększa ich odporność na uderzenia. Lepsza odporność wynika przede wszystkim z jednorodności materiału, dłuższej pracy w stanie niezarysowanym oraz niższego modułu sprężystości.

Przeprowadzone badania stropów z betonów lekkich

W roku 1970 K. Grabiec i Z. Witkowski wykonali badania ugięć stropów z betonu lekkiego z kruszywa keramzytowego, badali płyty o wymiarach: długość 5,96 m, szerokość 89 cm, wysokość 24 cm. Płyty zabrono podłużnie po dwa pręty $\varnothing 14$ i $\varnothing 16$ oraz poprzecznie strzemionami $\varnothing 4,5$ co 30cm. Ugięcia doraźne dla obciążenia w fazie I (maksymalne obciążenie 6,16 kN/m²) i II (maksymalne obciążenie 10,71 kN/m²) zostały przedstawione w tabeli 2, a ugięcia od obciążeń długotrwałych w tabeli 3. Wartość obciążenia długotrwałego wynosiła 75% obciążenia niszczącego [5]. Ugięcie długotrwałe spełnia warunek L/250.

Tab. 2 Maksymalne ugięcia pod obciążeniem doraźnym

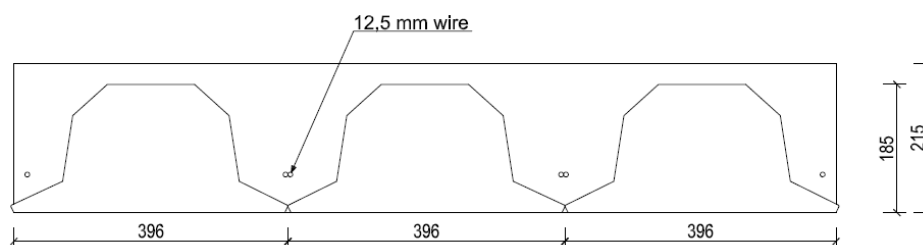
| Faza | Obciążenie q [kN/m ²] | Ugięcie pomierzone [cm] | |
|------|-----------------------------------|-------------------------|---------|
| | | płyta 1 | płyta 2 |
| I | 6,16 | 0,902 | 0,886 |
| II | 10,71 | 3,463 | 3,396 |

Tab. 3 Maksymalne ugięcia pod obciążeniem długotrwałym

| Dni | Ugięcie pomierzone [cm] | |
|-----|-------------------------|---------|
| | płyta 1 | płyta 2 |
| 150 | 2,432 | 2,517 |
| 360 | 2,724 | 2,914 |

Inne badania zostały wykonane na Uniwersytecie w Dani, gdzie badano kilka właściwości stropów struno-betonowych z betonów lekkich z nadbetonem [6].

Przedstawiony na rys. 3 strop o rozpiętości 4 m poddano kilku badaniom: ugięcia, wytrzymałości na ścinanie, odporności ogniowej i izolacyjności akustycznej (rys. 4).



Rys. 3. Przekrój stropu z betonów lekkich z nadbetonem [6].



Rys. 4. Badanie wytrzymałości na ścinanie stropu [6].

W rezultacie otrzymano wyniki:

- Ugięcia 200 mm przymomencie zginającym 271,9 kNm,
- Wytrzymałość na ścinanie 269 kN,
- Odporność ogniową 135 min dla obciążenia równego 17 kN/m²,
- Izolacyjność akustyczną równą 47-50 dB.

Wyniki dla stropu są bardzo dobre, zaskakująco wysoka jest wytrzymałość na ścinanie, pomimo braku poprzecznego zbrojenia.

Analiza numeryczna stropów z betonu lekkiego i zwykłego

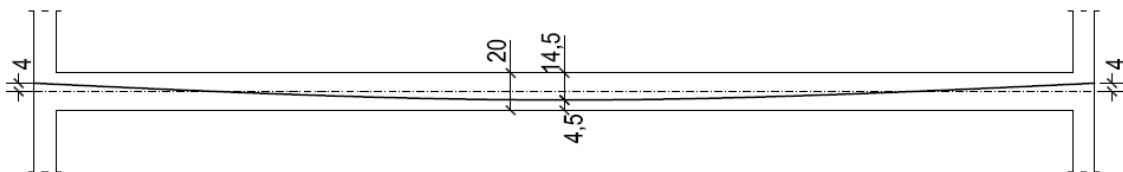
Przeprowadzono analizę numeryczną smukłego stropu jednokierunkowo sprężonego o wymiarach 16x12 m i grubości 20 cm, opartego na ścianach żelbetowych grubości 25 cm na wszystkich krawędziach. Smukłość stropu wynosi 12/0,2=60. Zarówno stosunek rozpiętości do grubości znacznie przekraczają wartości maksymalne rekomendowane w zagranicznych wytycznych do

projektowania płyt sprężonych. W pracy [9] wykazano jednak, że możliwe jest konstruowanie stropów znacznie większych i smuklejszych niż jest to zalecane. Analizowany strop sprężono kablami bez przyczepności o średnicy 15,7 mm i polu przekroju 150 mm². Zastosowano w celach porównawczych dwa betony o klasach C35/45 i L35/38. Kable rozłożono co 20 cm, na rys. 5 przedstawiono trasę kabla. Przyjęto siłę po stratach doraźnych równą 190 kN dla obu stropów, zwis kabla wynosi 9,5 cm. Obciążenie zastępcze zostało obliczone ze wzoru (1) i przyłożone jako równomierne liniowe na każdym kablu oraz w postaci momentu zginającego na krawędzi płyty (rys 6):

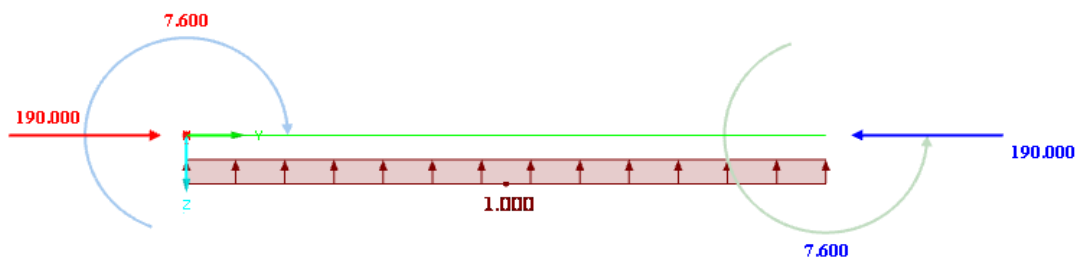
$$q = \frac{8P\delta}{L^2} \quad (1)$$

gdzie:

- P - siła naciągu;
- δ - strzałka ugięcia kabla;
- L - rozpiętość stropu.



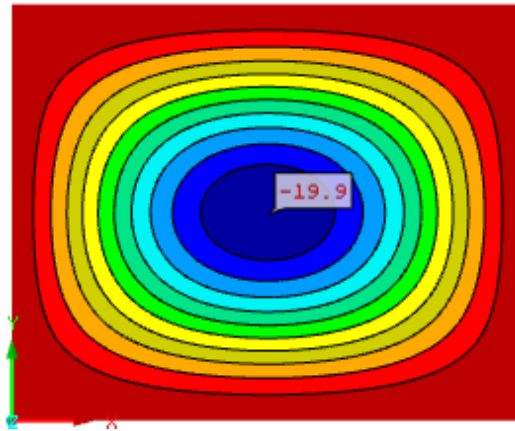
Rys. 5. Trasa kabla [źródło: opracowanie własne].



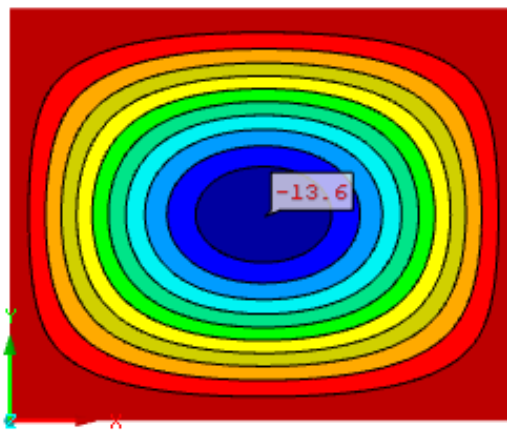
Rys. 6. Obciążenie zastępcze od sprężenia [źródło: opracowanie własne].

Na rysunkach 7-10 przedstawiono mapy ugięć od samego sprężenia (rys. 7 i 8) oraz od sprężenia z ciężarem

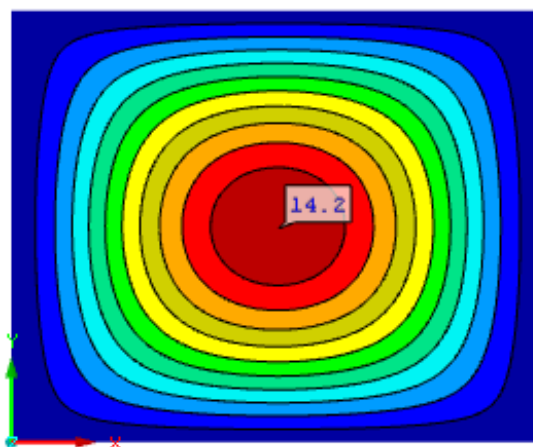
własnym i obciążeniem stałym równym 1 kN/m^2 i zmiennym 2 kN/m^2 (rys. 9 i 10).



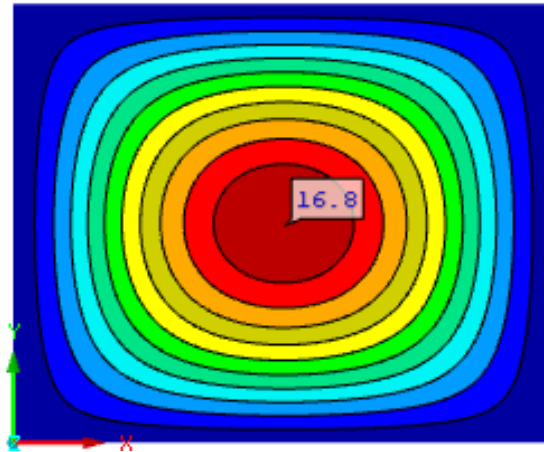
Rys. 7. Mapy ugięć od sprężenia dla BL [mm].



Rys. 8. Mapy ugięć od sprężenia dla BZ [mm].



Rys. 9. Mapy ugięć od sprężenia, ciężaru własnego i obciążenia zmiennego dla BL [mm].



Rys.10 Mapy ugięć od sprężenia, ciężaru własnego i obciążenia zmiennego dla BZ [mm].

Na podstawie wyników wykonanej analizy ugięć przedstawionych na rysunkach 7-10 zauważono, że wpływ sprężenia na ugięciem dła betonu lekkiego jest znacznie większy niż dla betonu zwykłego. Spowodowane jest to mniejszym modułem sprężystości, który dla betonu zwykłego został przyjęty jako 34 GPa a dla lekkiego 22 GPa (rys 7 i 8). Z tego samego powodu ugięcia od obciążeń dodatkowych dla betonów lekkich będą większe. Po uwzględnieniu ciężaru własnego i obciążeń dodatkowych otrzymano wyniki ugięć przedstawione na rysunkach 9 i 10. Ugięcia dla BL są o 2,6 mm mniejsze niż dla BZ, powodem różnicy jest przede wszystkim mniejszy ciężar własny konstrukcji. Pokazane wyniki obrazują sprężyste ugięcia doraźne, w celu uzyskania ugięcia długotrwałego przyjęto mnożniki równe 3 dla obciążeń stałych i sprężenia oraz 1,5 dla obciążeń zmiennych [2]. W rezultacie otrzymujemy dla betonów

lekkich ugięcie 24,9 mm, a dla betonów zwykłych 38,1 mm. Warunek ugięcia granicznego równego $L/250=12/250=48$ mm według PN-EN 1992-1-1 [10], został spełniony w obu przypadkach. Należy jednak zauważyć, że ugięcia prawie 4 cm mogą być widoczne dla oczu i powodować niekomfortowe użytkowanie pomieszczenia. W tabelicy 4 przedstawiono zestawienie sił sprężających, momentów zginających i naprężeń na dolnej (d) i górnej (g) warstwy płyty. Można zauważyć wysoki poziom wprowadzonych naprężeń ściskających na dolnej i górnej powierzchni w obu przypadkach. Dla stropów lekkich widoczny jest znacznie mniejszy wpływ momentów od obciążeń ciężarem własnym. Dla smukłych stropów sprężonych z uwagi na mniejszy ciężar własny beton lekki jest bardziej efektywnym materiałem, powoduje mniejsze ugięcia oraz naprężenia.

Tab. 4 Siła sprężająca, momenty zginające i naprężenia w poszczególnych sytuacjach.

| Rodzaj betonu | A_{cs} [m ²] | W_{cs} [m ³] | e [m] | Sytuacja obliczeniowa | | | | | |
|---------------|-------------------------------|-------------------------------|----------|-----------------------|--------------|-----------------------------------|-------------|--------------|-----------------------------------|
| | | | | po sprężeniu | | | użytkowa | | |
| | | | | P [kN/m] | M [kNm/m] | σ_g σ_d [MPa] | P [kN/m] | M [kNm/m] | σ_g σ_d [MPa] |
| Lekki | 0,2 | 0,007 | 0,045 | 1000 | -9,94 | 3,805 6,2 | 950 | 14,59 | 7,048 2,45 |
| Zwykły | 0,2 | 0,007 | 0,045 | 1000 | 2,66 | 5,6 4,39 | 950 | 26,92 | 8,81 0,69 |

Podsumowanie

Betony lekkie wykazują wiele pozytywnych cech i mogą być z powodzeniem stosowane w konstrukcjach z betonu sprężonego. Właściwości mechaniczne betonów lekkich nie odbiegają znacznie od właściwości betonów zwykłych, największe różnice można zauważyć w przypadku

modułu sprężystości i wytrzymałości na rozciąganie, które jak pokazała analiza numeryczna nie wpływają negatywnie na wyniki. W przypadku smukłych stropów najistotniejszym aspektem są ugięcia. Analiza numeryczna wykazała, że przy zastosowaniu betonów lekkiego ugięcia trwale są znacznie mniejsze niż w przypadku betonu zwykłego.

Ponadto większa jednorodność betonów lekkich powoduje dłuższą pracę w stanie niezarysowanym oraz lepszą odporność na działania dynamiczne. Jednocześnie do wad betonów lekkich trzeba zaliczyć większe pęczanie i skurcz, które w znaczny sposób wpływają na straty siły sprężającej. Te wady można w znacznym stopniu zmniejszyć w wyniku odpowiedniego doboru kruszywa i

pielęgnacji dojrzewającego betonu lekkiego. Podsumowując można stwierdzić, że zastosowanie betonów lekkich w przypadku konstrukcji sprężonych ma słuszość. Należałoby jeszcze wykonać badania pozwalające dokładniej określić wpływ reologii na straty siły sprężającej oraz wytrzymałość betonów lekkich na obciążenia długotrwałe.

Literatura

1. Chandra, S., Berntsson, L., *Lightweight aggregate concrete*. Noyes Publications, New York 2003.
2. Concrete Society, Technical raport No 43, *Post-tensioned concrete floors: Design handbook*, Wielka Brytania, 2005.
3. Domagała, L., Skurcz i pęcznienie lekkich betonów kruszywowych modyfikowanych fazą włóknistą, *Czasopismo Techniczne, Budownictwo*, 2008, R. 105, z. 1-B, s. 21-40.
4. Domagała, L., *Konstrukcyjne lekkie betony kruszywowe*. Seria: Inżynieria Lądowa, Politechnika Krakowska, Kraków, 2014.
5. Grabiec, K., Witkowski, Z., *Analiza nośności badanych płyt stropowych z betonu lekkiego w świetle dotychczasowych teorii obliczania ugięć*, Prace Komisji Budowy Maszyn - Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk: 1/7, Poznań, 1971.
6. Hertz, K.; Castberg, A.; Christensen, J., *Super-light concrete decks for building floor slabs*, *Structural Concrete*, 2014, Vol. 15, Issue 4, pp. 522-529.
7. http://krzys.net/praca_dyplomowa/02_historia.htm (dostęp 23.02.2016).
8. Sabaa, B., Ravindrarajah, R., *Impact resistance of polystyrene aggregate concrete without polypropylene fibers*. 2nd Int. Symp. on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Kristiansand, 2000.
9. Szydłowski, R., Mieszczak, M., *Gdzie jest granica smukłości sprężonych płyt stropowych? O projekcie i badaniach stropów sprężonych w budynku SKA w Kozienicach.*, KS2015.
10. PN-EN 1992-1-1, Eurokod 2, *Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynku*.