

# Wpływ gęstości objętościowej lekkiego betonu kruszywowego na parametry wytrzymałościowe i użytkowe stropu płytowo-belkowego

Obecnie lekkie betony kruszywowe, dzięki rozwojowi technologii wytwarzania wysokowytrzymałych kruszyw lekkich oraz nowej generacji domieszek i dodatków, są coraz częściej wykorzystywane jako materiał konstrukcyjny. Takie betony znajdują zastosowanie w elementach prefabrykowanych i w budownictwie monolitycznym.

Przykładem mogą być sprężone płyty stropowe dużych rozpiętości, w których główne obciążenia stanowi ciężar własny stropu, a podstawowym parametrem decydującym w projektowaniu jest ugięcie [1]. Ciężar własny w takich konstrukcjach jest w całości przenoszony przez ciągła sprężające.

Zalet zastosowania betonu lekkiego można również upatrywać w konstrukcjach żelbetowych. Zmniejszenie masy betonu umożliwia np. realizowanie nadbudowy istniejących budynków przy ograniczonych nośnościach podłoża gruntowego bądź fundamentów. Lekkie betony kruszywowe wykorzystuje się również w konstrukcjach mostowych belkowych bądź łukowych, a także w obudowach zewnętrznych płaszczy reaktorów atomowych.

Pomimo licznych przykładów realizacji obiektów budowlanych na świecie, których konstrukcje w całości lub w części są wykonane z betonów lekkich, stosowanie tych betonów wciąż nie jest popularne.

Istnieje kilka tego przyczyn, m.in.:

- brak aktualnych wytycznych projektowania i wykonywania betonów lekkich, uwzględniających zastosowanie nowoczesnych kruszyw lekkich, dodatków i domieszek;
- brak uniwersalnych metod projektowania;
- złożona technologia projektowania składu mieszanki betonowej i wykonywania.

Do wad zalicza się też [2]: obniżoną wytrzymałość betonu lekkiego na rozciąganie, zginanie i ścinanie, większy skurcz i pęcznienie, mniejszy moduł sprężystości.

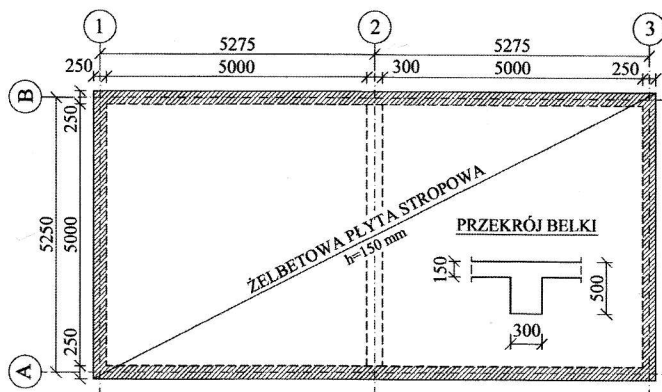
Trzeba zaznaczyć, że zarówno projektowanie, jak i wykonywanie konstrukcji z betonów lekkich jest inne niż z betonów zwykłych.

## Geometria i założenia projektowe analizowanego stropu

Analiza obliczeniowa dotyczy dwuprzęsłowej płyty stropowej podpartej przegubowo na całym obwodzie oraz w środku wzdłuż krótszego boku belką żelbetową (rys. 1). W obliczeniach przyjęto 3 warianty lekkiego betonu kruszywowego klasy LC20/22 o gęstości D1.4; D1.6, D2.0. Wyniki analizy zestawiono z wynikami dotyczącymi rozwiązania stropu z betonu zwykłego klasy C20/25.

## Założenia obliczeniowe

Obliczenia stropu wykonano zgodnie z zaleceniami i wytycznymi norm [3÷5]. W przypadku belki żelbetowej przyjęto przekrój o kształcie teowym, z płytą o szerokości współpracującej  $b_{eff} = 2,36$  m (por. rys. 1).



Rys. 1. Rzut stropu

W obliczeniach przyjęto obciążenia:

- zmienne użytkowe  $q = 2,00$  kN/m<sup>2</sup> (budynek mieszkalny – klasa obciążenia A);
- zmienne dodatkowe od ścian działowych  $\Delta q = 1,20$  kN/m<sup>2</sup> (w przypadku ciężaru ściany mniejszego niż 3 kN/m);
- stałe dodatkowe od warstw wykończeniowych  $\Delta g = 1,62$  kN/m<sup>2</sup>;
- stałe od ciężaru własnego konstrukcji zależne od gęstości objętościowej betonu wynoszącej 1550 kg/m<sup>3</sup> w przypadku betonu klasy LC20/25 D1.4, 1750 kg/m<sup>3</sup> – betonu klasy LC20/25 D1.6, 2150 kg/m<sup>3</sup> – betonu klasy LC20/25 D2.0 oraz 2500 kg/m<sup>3</sup> w przypadku betonu zwykłego klasy C20/25.

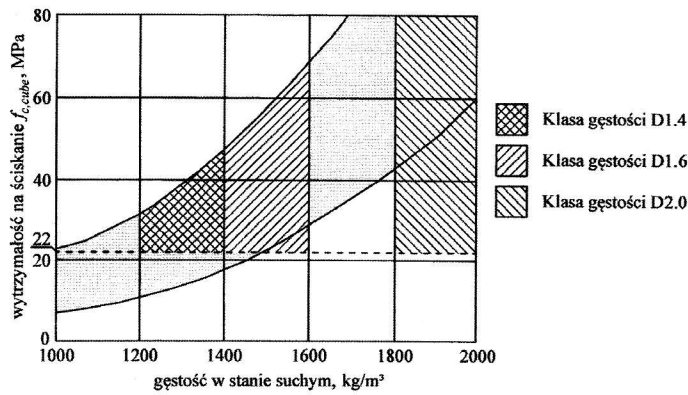
Strop zaprojektowano, uwzględniając klasę ekspozycji XC1 oraz wilgotność środowiska RH = 50%.

## Charakterystyki wytrzymałościowe betonu i stali zbrojeniowej

Ze względu na ogólne zależności wytrzymałości betonów lekkich od ich gęstości w stanie suchym należało sprawdzić możliwość uzyskania betonu lekkiego o wytrzymałości kostkowej na ściskanie  $f_{ck,cube} \geq 22,0$  MPa. Korzystając z zależności na rys. 2 [6], wyznaczono obszary, które odpowiadają oczekiwanej wytrzymałości  $f_{ck,cube} \geq 22,0$  MPa. Obszary te w przypadku wszystkich rozpatrywanych klas gęstości znajdują się nad prostą  $f_{ck,cube} = 22,0$  MPa, co świadczy o możliwości otrzymania lekkiego betonu kruszywowego o pożądanej wytrzymałości.

Wartości współczynników oraz charakterystycznych i obliczeniowych parametrów wytrzymałościowych niezbędne do sprawdzenia stanów granicznych nośności i stanów granicznych użytkowości dobrano na podstawie normy [5]. Najważniejsze parametry zamieszczono w tabl. 1.

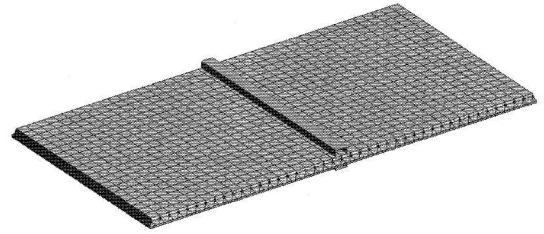
Założono zbrojenie zarówno płyty, jak i w belce ze stali gatunku B500SP. Średnicę prętów zbrojeniowych przyjęto: w płycie – 8 mm, w belce – 12 mm (pręty górne) i 16 mm (pręty dolne) oraz 6 mm – strzemiona dwuramienne.



Rys. 2. Ogólna zależność między wytrzymałością betonów lekkich a ich gęstością w stanie suchym [6]

$$a_{k+d} = a_{k+d} \frac{B_{spr}}{B_o}$$

w której:  $a_{k+d}$  – ugięcie według analizy sprężystej,  $B_{spr}$  – sztywność przekroju przyjęta w analizie sprężystej,  $B_o$  – sztywność przekroju zarysowanego przy efektywnym module sprężystości  $E_{c,eff}$ .



Rys. 3. Model obliczeniowy stropu

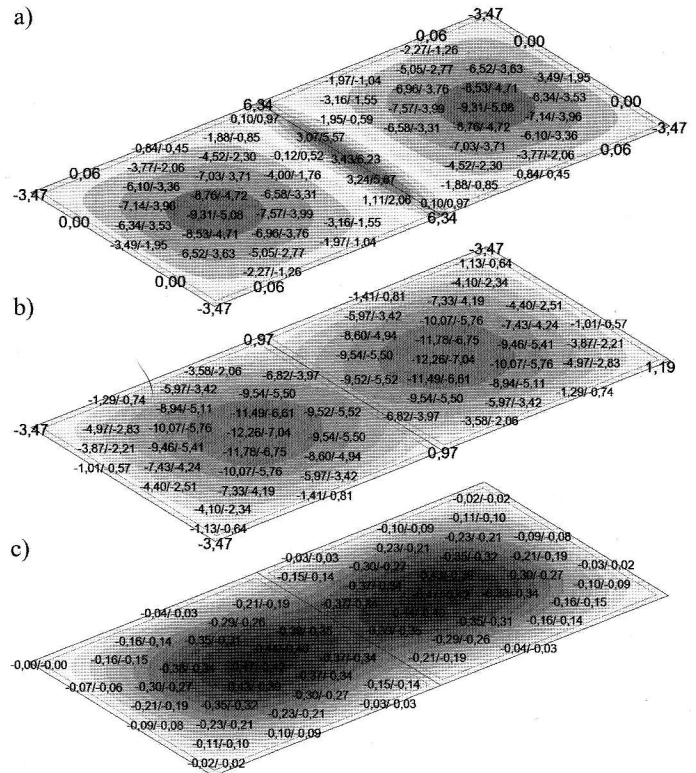
**Tabela 1**  
Zestawienie wybranych współczynników i parametrów wytrzymałościowych rozpatrywanych betonów

| Parametr  | LC20/22                        | LC20/22                        | LC20/22                        | C20/25               |
|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|
|   | D1.4<br>15,5 kN/m <sup>3</sup> | D1.6<br>17,5 kN/m <sup>3</sup> | D2.0<br>21,5 kN/m <sup>3</sup> | 25 kN/m <sup>3</sup> |
| Współczynnik materiałowy, $\gamma_c$  | 1,4                            | 1,4                            | 1,4                            | 1,4                  |
| Współczynnik $\alpha_{cc}$ ( $\alpha_{lcc}$ ) redukcji wytrzymałości przy ściskaniu | 0,85                           | 0,85                           | 0,85                           | 1,0                  |
| Wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie $f_{ck}$ ( $f_{lck}$ ), MPa             | 20                             | 20                             | 20                             | 20                   |
| Wytrzymałość obliczeniowa na ściskanie $f_{cd}$ ( $f_{lcd}$ ), MPa                  | 12,1                           | 12,1                           | 12,1                           | 14,3                 |
| Wytrzymałość charakterystyczna na rozciąganie $f_{ctk}$ ( $f_{lctk}$ ), MPa         | 1,23                           | 1,32                           | 1,48                           | 1,5                  |
| Wytrzymałość obliczeniowa na rozciąganie $f_{ctd}$ ( $f_{lctd}$ ), MPa              | 0,75                           | 0,80                           | 0,90                           | 1,07                 |
| Wytrzymałość średnia na ściskanie $f_{cm}$ ( $f_{lcm}$ ), MPa                       | 28                             | 28                             | 28                             | 28                   |
| Wytrzymałość średnia na rozciąganie $f_{ctm}$ ( $f_{lctm}$ ), MPa                   | 1,81                           | 1,93                           | 2,17                           | 2,2                  |
| Graniczne odkształcenie przy ściskaniu $\epsilon_{cu2}$ ( $\epsilon_{lcu2}$ ), ‰    | 2,88                           | 3,07                           | 3,45                           | 3,5                  |
| Moduł sprężystości $E_{cm}$ ( $E_{lcm}$ ), GPa                                      | 14,9                           | 19,0                           | 28,7                           | 30                   |

### Analiza statyczno-wytrzymałościowa stropu i jej wyniki

Obliczenia statyczne płyty i belki stropowej wykonano, stosując program Robot Structural Analysis Professional 2014. Zbudowany model pokazano na rys. 3. W przypadku płyty przyjęto czterowzłowe elementy skończone o wymiarach 0,5 × 0,5 m. Belkę tworzył element prętowy. Przesunięcie środka ciężkości płyty i belki uwzględniono w wymiarowaniu belki, zakładając jej przekrój teowy. Model posłużył do wyznaczenia sił przekrojowych w płycie i belce oraz ugięć płyty (rys. 4). Analizę statyczną prowadzono w zakresie pracy liniowo-sprężystej betonu.

Ugięcia trwałe płyty wyznaczono, korzystając z wartości ugięć sprężystych otrzymanych z modelu MES. Zmniejszenie sztywności związane z zarysowaniem i reologią betonu uwzględniono, przyjmując sztywność całej płyty zredukowaną do sztywności po zarysowaniu przekroju najbardziej wyjątkowego zgodnie z [7], według zależności



Rys. 4. Rozkłady: a) i b) momentów zginających, c) ugięć sprężystych

Ugięcia trwałe belki wyznaczono, przyjmując przekrój o kształcie teowym, z płytą współpracującą szerokości  $b_{eff} = 2,36$  m. Założono sztywność przekroju zarysowanego ze sprawdzonym modulem sprężystości  $E_{c,eff}$  o wartości podanej w tabl. 2.

Wyniki obliczeń zamieszczono w tabl. 2 i 3, odpowiednio dla płyty i belki. Z danych tych tablic wynika, że potrzebny rozstaw prętów  $\phi$  8 mm zbrojenia dolnego w płycie zmniejsza się wraz ze zwiększeniem ciężaru betonu – z 257 do 224 mm w kierunku prostopadłym do belki (kierunek x) oraz z 208 do 166 mm w kierunku równoległym do belki (kierunek y). W belce, ze zwiększeniem ciężaru betonu, wymagany przekrój zbrojenia dolnego zwiększa się z 6,23 cm<sup>2</sup> w przypadku betonu o gęstości 1550 kg/m<sup>3</sup> do 7,89 cm<sup>2</sup> przypadku betonu zwykłego.

Zmniejszenie ciężaru betonu powoduje zmniejszenie szerokości rys, co jest związane z mniejszym wyjątkowaniem zbrojenia. Szerokość rysy w płycie z betonu lekkiego D1.4 i D1.6 wyniosła 0,14 mm, natomiast z betonu D2.0 i betonu zwykłego – 0,16 mm. W belce z wymienionych betonów lekkich szerokość

rysy zwiększa się z 0,18 do 0,21 mm wraz ze zwiększeniem gęstości, a w przypadku belki z betonu zwykłego wynosi 0,20 mm. Nieznacznie mniejsza szerokość rysy w belce z betonu zwykłego jest związana z mniejszym rozstawem rys, który wynika z mniejszego otulenia prętów betonem.

**Tablica 2**  
Wyniki obliczeń statyczno-wytrzymałościowych płyty

| Wielkość/parametr   |   | LC20/22                        | LC20/22                        | LC20/22                        | C20/25               |
|---|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|
|   |   | D1.4<br>15,5 kN/m <sup>3</sup> | D1.6<br>17,5 kN/m <sup>3</sup> | D2.0<br>21,5 kN/m <sup>3</sup> | 25 kN/m <sup>3</sup> |
| Moment obliczeniowy $M_{Ed}$ , kN·m                                   | x | 12,26                          | 12,85                          | 14,01                          | 14,89                |
|   | y | 9,31                           | 9,73                           | 10,56                          | 11,18                |
| Moment charakterystyczny dla kombinacji prawie stałej $M_{Ed}$ , kN·m | x | 7,83                           | 8,26                           | 9,12                           | 9,77                 |
|   | y | 5,88                           | 6,18                           | 6,80                           | 7,26                 |
| Moment rysujący $M_{cr}$ , kN·m                                       |   | 6,79                           | 7,24                           | 8,14                           | 8,25                 |
| Wymagany rozstaw prętów $\phi 8$ $s_{req}$ , mm                       | x | 257                            | 246                            | 226                            | 224                  |
|   | y | 208                            | 198                            | 181                            | 166                  |
| Przyjęty rozstaw prętów $\phi 8$ $s_{prov}$ , mm                      | x | 150                            |                                |                                |                      |
|   | y | 150                            |                                |                                |                      |
| Współczynnik pełzania, $\phi$ ( $\infty, t_0$ )                       |   | 1,39                           | 1,77                           | 2,68                           | 2,80                 |
| Efektowny moduł sprężystości betonu $E_{c,eff}$ ( $E_{fc,eff}$ ), GPa |   | 6,23                           | 6,84                           | 7,79                           | 7,89                 |
| Naprężenia w zbrojeniu rozciągającym $\sigma_{s1}$ , MPa              |   | 201,2                          | 212,9                          | 235,8                          | 251,6                |
| Szerokość rys, $w_k$ , mm   |   | 0,14                           | 0,14                           | 0,16                           | 0,16                 |
| Sztywność przekroju, $B_{spr}$ , kN·m <sup>2</sup>                    |   | 1,75                           | 1,92                           | 2,19                           | 2,22                 |
|   |   | 0,68                           | 0,71                           | 0,75                           | 0,74                 |
| Ugięcie trwałe płyty, a, mm   |   | 12,1                           | 10,5                           | 8,2                            | 8,6                  |

W przypadku belki (por. tabl. 3) ugięcie trwałe zwiększa się z 7,2 do 8,7 mm wraz ze zwiększeniem ciężaru betonu. Odmienne zmniejszenie ciężaru betonu wpływa na ugięcia płyty (por. tabl. 2). W przypadku płyty z betonu zwykłego trwałe ugięcie wynosi 8,6 mm, a płyty z betonu lekkiego o gęstości 2150 kg/m<sup>3</sup> – 8,2 mm. Przy mniejszej gęstości betonu ugięcie jednak zwiększa się i przy gęstości 1550 kg/m<sup>3</sup> wynosi 12,5 mm. Jest to związane z równoczesną redukcją modułu sprężystości betonu, która ma w tym przypadku większe znaczenie niż redukcja ciężaru.

## Wnioski

Ograniczenie stosowania lekkich betonów konstrukcyjnych kruszywowych, oprócz trudności technologicznych, wynika z ich mniejszego modułu sprężystości w porównaniu z betonem zwykłym o podobnej wytrzymałości. W artykule [1] wykazano, że w przypadku płyt kablobetonowych, w których cały ciężar konstrukcji jest równoważony sprzężeniem, mniejszy moduł sprężystości ma mniejsze znaczenie niż redukcja ciężaru płyty. Zastosowanie lekkich betonów kruszywowych w płytach kablobetonowych może więc umożliwić zwiększenie ich rozpiętości i smukłości.

Na podstawie wyników obliczeniowej oceny wpływu zastosowania betonu lekkiego o różnych gęstościach na zachowanie

**Tablica 3**  
Wyniki obliczeń statyczno-wytrzymałościowych belki

| Parametr   | LC20/22                        | LC20/22                        | LC20/22                        | C20/25               |
|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|
|  | D1.4<br>15,5 kN/m <sup>3</sup> | D1.6<br>17,5 kN/m <sup>3</sup> | D2.0<br>21,5 kN/m <sup>3</sup> | 25 kN/m <sup>3</sup> |
| Obliczeniowy moment zginający, $M_{Ed}$ , kN·m                                   | 103,9                          | 109,1                          | 119,6                          | 127,4                |
| Charakterystyczny moment zginający dla kombinacji prawie stałej, $M_{Qp}$ , kN·m | 66,7                           | 70,5                           | 78,3                           | 84,1                 |
| Moment rysujący, $M_{cr}$ , kN·m   | 44,7                           | 46,4                           | 54,4                           | 55,4                 |
| Obliczeniowa siła poprzeczna, $V_{Ed}$ , kN                                      | 70,2                           | 73,8                           | 81,1                           | 86,6                 |
| Nośność przekroju betonowego na ścinanie, $V_{Rdc}$ , kN                         | 48,8                           | 53,0                           | 65,6                           | 66,8                 |
| Wymagane zbrojenie dolne, $A_{s1,req}$ , cm <sup>2</sup>                         | 5,29                           | 5,56                           | 6,10                           | 6,41                 |
| Przyjęte zbrojenie dolne, $A_{s1,prov}$ , cm <sup>2</sup>                        | 8,04 (4 $\phi$ 16)             |                                |                                |                      |
| Wymagany rozstaw strzemion dwuciętych, $s_{req}$ , mm                            | 230                            | 219                            | 199                            | 189                  |
| Obliczeniowe naprężenie w zbrojeniu dolnym, $\sigma_{s1}$ , MPa                  | 221,1                          | 232,7                          | 255,0                          | 270,3                |
| Szerokość rys, $w_k$ , mm  | 0,18                           | 0,19                           | 0,21                           | 0,20                 |
| Ugięcie trwałe, a, mm  | 7,2                            | 7,5                            | 8,2                            | 8,7                  |

się stropu żelbetowego można stwierdzić, że redukcja ciężaru betonu dzięki użyciu kruszyw lekkich wpływa w elementach belkowych na zmniejszenie ilości zbrojenia oraz powstanie rys o mniejszej szerokości i mniejszych ugięciach trwałych. W przypadku płyt redukcja gęstości betonu powoduje zmniejszenie ilości zbrojenia i szerokości rys, ale związane z tym zmniejszenie modułu sprężystości powoduje zwiększenie ugięć.

Należy podkreślić, że przy standardowych rozpiętościach płyt stropowych nieprzekraczających 6÷7 m i przy ich grubościach nie mniejszych niż 180÷200 mm zwiększone ugięcie nie stanowi przeszkody w zastosowaniu lekkich betonów kruszywowych.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Szydłowski R., Mieszczak M.: Study of Application of Lightweight Aggregate Concrete to Construct Post-tensioned Long-span Slabs. Procedia Engineering, t. 172, January 2017.
- [2] Domagała L.: Konstrukcyjne lekkie betony kruszywowe. Monografia 462, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2014.
- [3] PN-EN 1990 Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji.
- [4] PN-EN 1991-1-1 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-1: Oddziaływania ogólne – Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach.
- [5] PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [6] FIP Manual of Lightweight Aggregate Concrete. Surry University, Press, Glasgow and London 1983.
- [7] Starosolski W.: Konstrukcje żelbetowe według PN-B-03264: 2002 i Eurokodu 2. tom II, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.