

O możliwości zastosowania betonu lekkiego w stropach sprężonych dużych rozpiętości

Płyty stropowe kablobetonowe zostały zastosowane jako stropy w budynkach kilka dekad temu w USA, Australii, Hongkongu, a później w Europie (por. prace [4, 11, 13, 18]). Pierwsze w Polsce opracowanie zawierające wytyczne projektowania stropów sprężonych cięgnami bez przyczepności opublikowali A. Ajdukiewicz i K. Golonka w 2007 roku [2], a pierwsze tego rodzaju płyty stropowe zastosowano w budynku Platinum Towers w Warszawie w 2008 r. [22]. W następnych latach opublikowano kolejne prace [5, 14, 23, 25] dotyczące realizacji takich stropów.

Jednym z podstawowych parametrów decydujących z jednej strony o prawidłowej pracy stropu, a z drugiej o aspektach ekonomicznych i funkcjonalnych jest stosunek rozpiętości do grubości płyty (smukłość płyty). Przykładowo, zgodnie z [11], w przypadku pełnych płyt ciągłych o dwóch lub więcej przęsłach w każdym kierunku stosunek ten nie powinien przekraczać 42 w stropach i 48 – w stropodachach. Khan i Williams [18], wychodząc z warunku braku rys, podają wymagane

smukłości w zależności od obciążenia stropów (tabl. 1). Mniejsze wartości odpowiadają obciążeniu (ponad ciężar własny) równemu 15 kN/m^2 , większe – obciążeniu $2,5 \text{ kN/m}^2$.

Zalecane wartości stosunku rozpiętości do grubości płyty według [18]

Typ płyty	Rozpiętość/grubość
Pełna płyta jednokierunkowa	$30 \div 45$
Płyta uzębrowana	$25 \div 35$
Pełna płyta płaska	$35 \div 45$
Strop kasetonowy	$20 \div 30$

W pracy [11] podano maksymalne zalecane rozpiętości oraz minimalne grubości płyt. W przypadku płyt ciągłych, pracujących jednokierunkowo, podpartych na krawędziach, rozpiętość nie powinna przekraczać $12,6 \text{ m}$ przy grubości 300 mm i obciążeniu ponad ciężar własny równym $1,75 \text{ kN/m}^2$, a w przypadku ciągłych płyt pracujących dwukierunkowo największa

zalecana rozpiętość wynosi 13,3 m przy grubości 250 mm i obciążeniu ponad ciężar własny 1,75 kN/m². Przy obciążeniu 4,0 kN/m² i podobnych grubościach dopuszczalne rozpiętości wynoszą odpowiednio 11,4 i 12,0 m. W literaturze brakuje opracowań dotyczących realizacji monolitycznych płyt sprężonych o rozpiętości przekraczającej 12÷12,5 m. Rozpiętości przeseł większości stosowanych w świecie płyt kablobetonowych nie przekraczają 12,0 m.

W latach 2014–2015 w Polsce, po przeprowadzeniu analiz obliczeniowych przez autorów artykułu, zaprojektowano i zrealizowano płyty sprężone o rozpiętości i smukłości przekraczających zalecane wartości maksymalne. Najczęściej jednym z podstawowych obciążeń w takich stropach (zwłaszcza stropodachach) jest ciężar własny, który czasami jest redukowany przez użycie lekkich wkładów odciążających, choć wiąże się to z powstaniem problemów technologicznych i ekonomicznych. Dobrym rozwiązaniem może być użycie betonu o gęstości objętościowej poniżej 2000 kg/m³. W Polsce, oprócz zastosowań w mostownictwie, głównie w drugorzędnych elementach konstrukcyjnych, przy wzmacnianiu płyt bądź elementów wyposażenia [21], betony lekkie nie znalazły szerszego zastosowania jako materiał konstrukcyjny. Jest to związane głównie z dostępnością i wysoką ceną dobrej jakości kruszyw sztucznych. Beton lekki, pomimo że jest wykonywany na bazie kruszyw stanowiących produkt odpadowy zamiast kruszyw naturalnych, jest jednak wciąż znacznie droższy, a także trudniej go wyprodukować i dostarczać na miejsce wbudowania w porównaniu z betonem zwykłym.

Kilka lat temu zaprzestano w Polsce, trwającej od 1994 r., produkcji popiołoporytowego kruszywa Pollytag, umożliwiające uzyskanie wytrzymałości na ściskanie powyżej 50 MPa. Pojawienie się jednak w ostatnich latach nowego kruszywa pod nazwą handlową Certyd skłoniło autorów do podjęcia prób zastosowania betonu lekkiego w płytach sprężonych dużych rozpiętości. W płytach żelbetowych lub sprężonych o standardowych rozpiętościach i grubościach, ze względu na wyższy koszt betonów lekkich w stosunku do zwykłych, ich użycie nie jest jednak ekonomicznie uzasadnione. Dodatkowo, co wykazano w pracy [26], zmniejszony moduł sprężystości, pomimo znacznej redukcji ciężaru płyty, wpływa na powstanie większych ugięć niż w przypadku elementów z betonu zwykłego. W przypadku konstruowania płyt o dużych rozpiętościach i smukłościach zastosowanie betonu lekkiego staje się jednak uzasadnione. Mniejsza wartość modułu sprężystości betonu lekkiego niż betonu zwykłego o porównywalnej wytrzymałości ma znaczenie mniejsze, gdyż cały ciężar płyty, który jest obciążeniem dominującym, jest równoważony sprężeniem. Zmniejszenie ciężaru prowadzi więc do mniejszej liczby cięgien sprężających, a także umożliwia osiągnięcie większych rozpiętości i smukłości płyt niż przy zastosowaniu cięższego betonu zwykłego [24].

Cechy betonów lekkich i ich zastosowanie w budownictwie

Betony lekkie są znane głównie z wykorzystania w elementach dekoracyjnych i elementach wyposażenia, jednak coraz częściej są stosowane w elementach konstrukcyjnych. Pierwsze zastosowanie betonu lekkiego jako materiału konstrukcyjnego miało miejsce w 1928 r. Takiego betonu użyto w konstrukcji nadbudowy ośmiu dodatkowych kondygnacji w wieżowcu Bell Telephone Company w Kansas City. Rok później wybudowano 28-piętrowy wieżowiec Park Plaza Hotel w St. Louis, w którym cała konstrukcja została wykonana z lekkiego betonu kruszywowego.

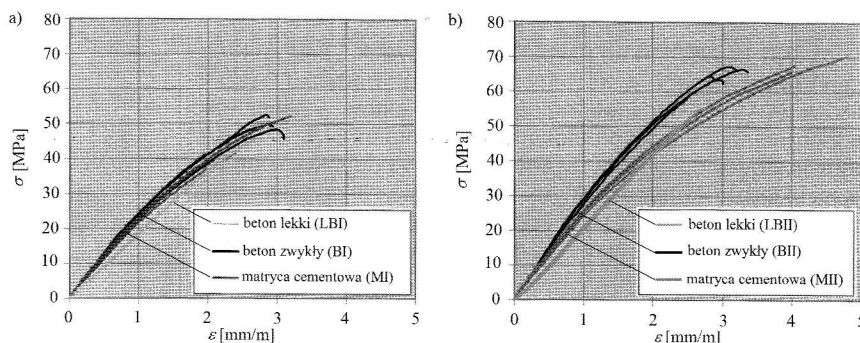
Rozróżnia się czternaście klas betonów lekkich – od LC8/9 do LC80/88 (o 2 klasy

mniej niż betonów zwykłych). W praktyce rzadko są spotykane betony wysokiej wytrzymałości, jednak są znane przykłady osiągnięcia wytrzymałości na ściskanie 140 MPa [9], ale nie znalazły one praktycznego zastosowania ze względu na dużą ilość dodatków zwiększającą koszt wykonania betonu.

Betony lekkie charakteryzują się większą jednorodnością strukturalną niż betony zwykłe. Wynika ona ze zbliżonych modułów sprężystości kruszywa i matrycy cementowej oraz lepszej ich wzajemnej przyczepności. Betony te cechuje szczególna budowa strefy stykowej matryca–kruszywo oraz regularny kształt ziaren kruszyw sztucznych. Dzięki odmiennej strukturze betony lekkie zachowują się w inny sposób pod wpływem obciążenia oraz wykazują inny mechanizm zniszczenia w porównaniu z betonami zwykłymi. W betonie lekkim nie występują trzy stadia rozwoju rys, jak w betonie zwykłym (I – powstanie rys stabilnych, II – stabilna propagacja rys, III – niestabilna propagacja rys). W tradycyjnych betonach z kruszywem skalnym stadium I przechodzi w II przy naprężeniu w granicach 30÷40% wytrzymałości betonu, a stadium II przechodzi w III przy naprężeniach wynoszących 70÷90% wytrzymałości. Tymczasem w betonach z kruszywem lekkim pierwsze rysy od obciążenia pojawiają się dopiero przy wyłączeniu elementu wynoszącym 85÷90% [3]. W wyniku pracy betonu w stanie niezarysowanym do znacznej wartości naprężeń, z pominięciem stadium II, wykres $\sigma - \varepsilon$ przy próbie jednoosiowego ściskania jest zbliżony do liniowego. Badania L. Domagały [8, 9] wykazały, że w przypadku betonów z kruszywem popiołoporytowym prostoliniowy przebieg zależności $\sigma - \varepsilon$ występuje aż do 90% wyłączenia (rys. 1). Zmagazynowana przez to duża energia sprężysta podczas obciążenia powoduje gwałtowną propagację rys, która nieodwracalnie prowadzi do nagłego zniszczenia materiału.

Odmienny charakter zniszczenia betonów z kruszywem lekkim wynika nie tylko z wyłączenia, podczas którego dochodzi do pojawienia się rys, ale również z lokalizacji tych rys. W przypadku betonów zwykłych zniszczenie następuje zazwyczaj w strefie stykowej (kruszywo – cement), która jest najsłabszym ogniwem struktury betonu i równocześnie najbardziej obciążonym ze względu na koncentrację naprężeń wynikającą ze znacznych różnic modułów sprężystości matrycy i kruszywa. Natomiast w betonach lekkich zniszczenie następuje w matrycy cementowej, ze względu na większą wytrzymałość strefy stykowej oraz większy moduł sprężystości matrycy niż kruszywa. W betonach zwykłych zniszczenie powstaje w większości przypadków przez odspojenie kruszywa od matrycy, a w betonach lekkich rysy tworzą się w wyniku przekroczenia naprężeń w matrycy zgodnie z kierunkiem obciążenia i w związku z tym zniszczenie następuje wskutek rozłupania ziaren kruszywa. Kruszywa betonów lekkich charakteryzują się mniejszą sztywnością i nie są w stanie zablokować propagacji rys tworzących się w matrycy, co wpływa na bardziej kruche zniszczenie.

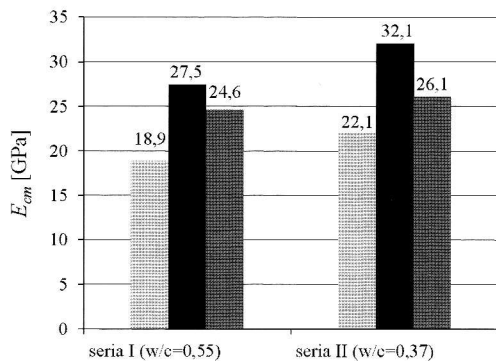
Z powodu mniejszego modułu sprężystości betony lekkie charakteryzują się zwiększonym skurczem (nawet o 50%), co



Rys. 1. Zależność $\sigma - \varepsilon$ przy ściskaniu próbek (kolejno) betonów lekkich, betonów zwykłych oraz wykorzystanych do ich wykonania zapraw cementowych przy [8, 9]: a) $w/c = 0,55$, b) $w/c = 0,37$

potwierdzają liczne badania [1, 7, 16]. Betony lekkie mają zdolność do wewnętrznej pielęgnacji i dzięki temu skurcz wykazuje mniejszą zależność od czasu i warunków pielęgnacji zewnętrznej oraz od warunków termiczno-wilgotnościowych. Czynnikiem, który najsilniej wpływa na skurcz betonu lekkiego, jest rodzaj kruszywa. Istotną jest zarówno jego gęstość, jak i struktura. Kruszywa spiekane w wysokich temperaturach wykazują mniejszy skurcz niż kruszywa produkowane z tych samych surowców w procesie utwardzania [3]. Stwierdzono również, że w betonach lekkich pęcznienie oraz dynamika rozwoju pęcznienia są większe niż w betonach zwykłych. Stwierdzenia te oparto jednak na starszych wynikach badań dotyczących betonów w niższych klasach. Powszechnie wiadomo, że im większa wytrzymałość, tym mniejsze pęcznienie; reguła ta dotyczy również betonów lekkich. Pęcznienie w przypadku wyższych klas betonu jest zbliżone, a niekiedy nawet mniejsze niż w betonach zwykłych [10, 17].

Ze względu na mniejszą gęstość objętościową beton lekki charakteryzuje się gorszymi właściwościami mechanicznymi niż beton zwykły. Wraz ze zwiększeniem wytrzymałości różnice te są znacznie mniejsze. Badania L. Domagaty [7, 8] wykazały, że wartość modułu Younga betonów lekkich z kruszywem popiołoporytowym o gęstości 1580 i 1710 kg/m³ jest mniejsza o 30% niż betonów zwykłych wykonanych na tych samych zaprawach cementowych o podobnej wytrzymałości (rys. 2).



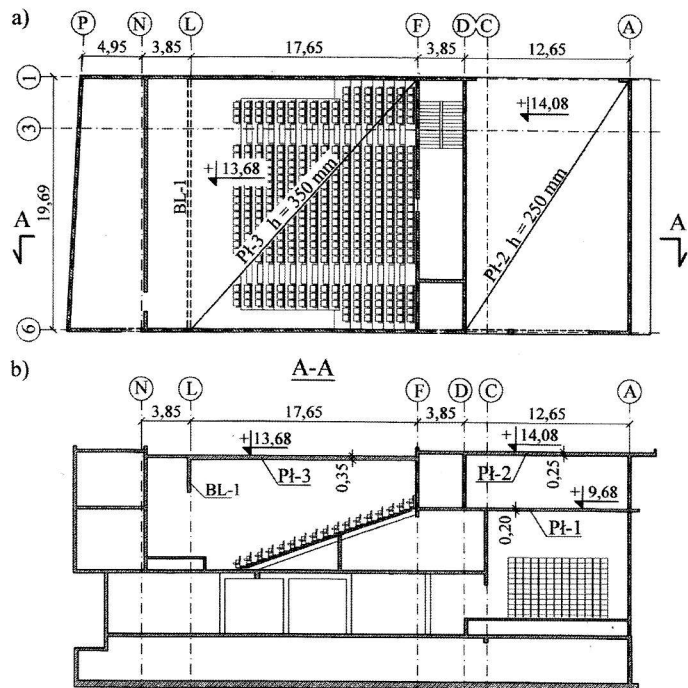
Rys. 2. Średni moduł sprężystości betonów lekkich, zwykłych oraz zapraw cementowych [8, 9]

Mniejsza gęstość objętościowa powoduje jednak poprawę niektórych właściwości, takich jak izolacyjność cieplna czy wytrzymałość na działania dynamiczne. Dzięki większemu zakresowi pracy w stanie sprężystym, betony lekkie mogą się charakteryzować większą wytrzymałością zmęczeniową. Ze względu na mniejszy ciężar konstrukcji betony te są często stosowane w budynkach narażonych na działanie sejsmiczne. Obciążenia działające na konstrukcję podczas wstrząsów są wprost proporcjonalne do ciężaru konstrukcji. Z wielu badań, np. [6, 15], wynika, że pod wpływem obciążeń dynamicznych beton lekki ma większe współczynniki tłumienia, co ma istotne znaczenie w przypadku drgań budowli.

Kablobetonowe stropy dużych rozpiętości

W 2015 r. oddano do użytkowania budynek Centrum Kulturowo-Artystycznego w Kozienicach. Projekt budynku wykonano w 2013 r. Budynek należy do obiektów użyteczności publicznej. Na rzucie prostokąta o wymiarach 61,5 × 42,5 m zaprojektowano 2 oddzielone segmenty budynku o odmiennym układzie konstrukcyjnym. Na rysunku 3 przedstawiono rzut (w poziomie najwyższej kondygnacji) oraz przekrój pionowy segmentu zlokalizowanego między osiami 1 i 6. W segmencie tym usytuowano salę kinową (między osiami F i N) oraz salę teatralną (między osiami A i C). Pomieszczenia te wymagają dużych, wolnych od podpór przestrzeni. Dodatkowo, ze względu na charakter zabudowy w okolicy, ograniczono całkowitą wysokość budynku. Czynniki te spowodowały konieczność

zastosowania cienkich i smukłych przegród poziomych. Dlatego autorzy artykułu zaprojektowali 3 przęsła płytowe sprężone cięgnami bez przyczepności, tj. płytę stropową nad salą teatralną na poziomie +9,68 m (Pł-1) oraz dwa przęsła stropodachu: nad salą teatralną na poziomie +14,08 m (Pł-2) i nad salą kinową na poziomie +13,68 m (Pł-3).

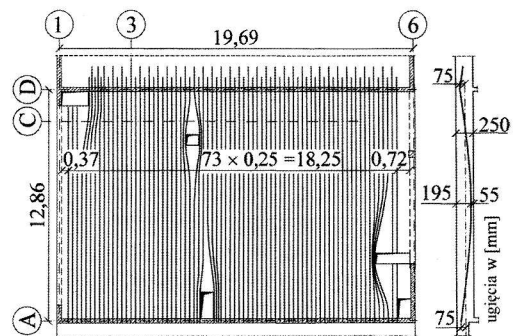


Rys. 3. Budynek z płytami sprężonymi: a) rzut segmentu, b) przekrój poprzeczny

Do wykonania płyt zastosowano beton klasy C35/45 na bazie cementu CEM I 52,5 N-HSA-NA w ilości 396 kg/m³ (w/c = 0,5). Zbrojenie zwykle wszystkich płyt sprężonych zaprojektowano w postaci dolnej i górnej siatki z prętów ϕ 10 mm co 150 mm. Do sprężenia płyt użyto cięgien bez przyczepności (monostrandów) Y1860S7 średnicy 15,7 mm (splot siedmiodrutowy 1×5,7+6×5 mm, przekrój splotu – 143 mm², wytrzymałość charakterystyczna f_{pk} = 1860 MPa).

Płyta Pł-1 jest jednokierunkowo sprężona, zlokalizowana między osiami 3 i 6 oraz A i C (rys. 3). Rozpiętość płyty w osiach ścian wynosi 11,15 m. Grubość płyty wynosi 200 mm, a grubość ścian – 240 mm. Stosunek rozpiętości do grubości płyty wynosi 55,8. Płytę sprężono cięgnami bez przyczepności 7 ϕ 5 o rozstawie 300 mm.

Płyta Pł-2 jest jednokierunkowo sprężona, o rozpiętości przęsła w osiach ścian wynoszącej 12,86 m i grubości 250 mm. Stosunek rozpiętości do grubości wynosi 51,4. Płytę sprężono cięgnami bez przyczepności 7 ϕ 5 o rozstawie 250 mm (rys. 4).



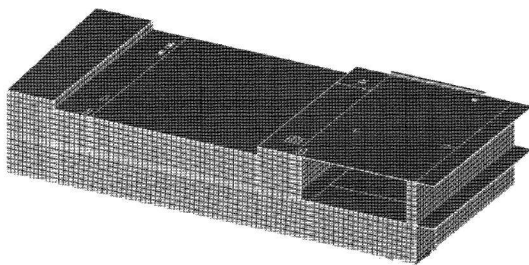
Rys. 4. Geometria i sprężenie płyty Pł-2

Płyta Pł-3 nad salą kinową ma przeszło o największej rozpiętości. W rzucie płyta ma wymiary w osiach ścian (oraz belki BL-1 w osi L) $17,65 \times 19,6$ m. Grubość płyty wynosi 350 mm, a stosunek rozpiętości do grubości (w przypadku krótszej rozpiętości) – 50,4. Płyta jest sprężona w dwóch kierunkach cięganiami bez przyczepności o rozstawie 220 mm.

Głównym obciążeniem płyty Pł-2 w czasie oddawania budynku do użytkowania był ciężar własny płyty ($6,25 \text{ kN/m}^2$ w stosunku do $8,35 \text{ kN/m}^2$). W czasie oddawania budynku do użytkowania (około roku po zabetonowaniu stropodachu) ugięcia przeszły liczone od stanu w chwili zabetonowania wynosiły 12 mm (płyta Pł-1), 14 mm (płyta Pł-2) i 31 mm (płyta Pł-3).

Analiza obliczeniowa

Wykonano analizę obliczeniową sprężonej płyty Pł-2. W tym celu zbudowano model fragmentu budynku z wykorzystaniem MES, wykorzystując czterowzłowe elementy powierzchniowe o wymiarach $0,50 \times 0,50$ m (rys. 5). Sprężenie modelowano obciążeniem zastępczym (powierzchniowym i momentem liniowym na krawędzi płyty). Analizę przeprowadzono w zakresie pracy liniowo-sprężystej.



Rys. 5. Model fragmentu budynku w programie RFEM

Do obliczeń przyjęto następujące parametry betonu:

- beton zwykły klasy C35/45: na podstawie przeprowadzonych badań próbek walcowych 150×300 mm przyjęto wytrzymałość betonu oraz moduł sprężystości równe $29,7 \text{ MPa}$ i $30,2 \text{ GPa}$ – w chwili sprężania (14 dni od zabetonowania) oraz $33,8 \text{ MPa}$ i 33 GPa – po 28 dniach;

- beton lekki na kruszywie popiołoporytowym o gęstości 1710 kg/m^3 : parametry betonu przyjęto zgodnie z [20] – wytrzymałość na ściskanie 30 MPa , moduł sprężystości $23,1 \text{ GPa}$.

W przypadku stropu z betonu zwykłego przyjęto obciążenie zastępcze od sprężenia na podstawie pomierzonych wydłużeń kabli sprężających w trakcie ich naciągu oraz geometrii sprężenia przedstawionej na rys. 4. Kable naciągano siłą 220 kN , a przy założonym module sprężystości splotów równym 190 GPa otrzymano średnią wartość siły sprężającej po naciągu równą $212,0 \text{ kN}$. Wartość zmniejszono o straty od sprężystych odkształceń betonu równe $0,9\%$. W przypadku takiej siły w ciągnie otrzymano obciążenia zastępcze skierowane w górę równe $5,96 \text{ kN/m}^2$ oraz moment krawędziowy na ścianie zewnętrznej wynoszący $63,6 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$. W odniesieniu do betonu lekkiego przyjęto siłę naciągu równą $212,0 \text{ kN}$, która została zredukowana o straty sprężyste oszacowane w przypadku betonu lekkiego na $1,2\%$.

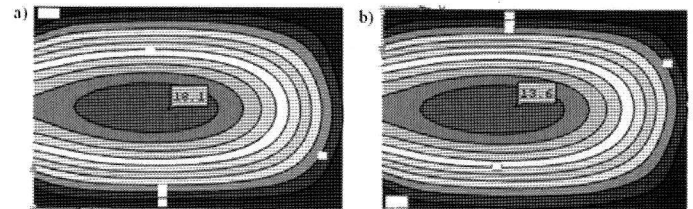
Rozpatrzono dwie sytuacje obliczeniowe:

- sytuację po sprężeniu, w której przyjęto obciążenie sprężeniem (zgodnie z opisem podanym wyżej) oraz obciążenie ciężarem własnym płyty; w przypadku betonu lekkiego założono podobne sprężenie oraz obciążenie ciężarem betonu płyty;

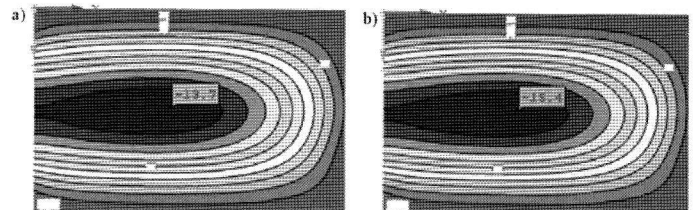
- sytuację istniejącą przy działaniu wszystkich obciążeń stałych; sprężenie zostało zmniejszone o straty reologiczne, obliczone po 6 miesiącach od zabetonowania; w przypadku betonu zwykłego siła sprężająca została zmniejszona o 4% , a w przypadku betonu lek-

kiego do obliczeń strat siły przyjęto skurcz betonu zwiększony o 50% w stosunku do skurczu betonu zwykłego oraz pełzanie o podobnej wartości. Otrzymano przy tych wartościach redukcję siły sprężającej o 6% .

Na rysunku 6 przedstawiono mapy ugięć stropów od ciężaru własnego, a na rys. 7 – od sprężenia dla betonu zwykłego i lekkiego. Można zauważyć, że ugięcie od ciężaru własnego betonu lekkiego jest mniejsze niż w przypadku zwykłego, a ponadto w betonie lekkim efekt działania sprężenia jest większy (mniejszy moduł sprężystości). Ugięcie po sprężeniu, wynikające z sumy ugięć od sprężenia i ciężaru własnego, wynosi $4,6 \text{ mm}$ (w dół) w płycie z betonu zwykłego oraz $-1,8 \text{ mm}$ (w górę) – z betonu lekkiego.

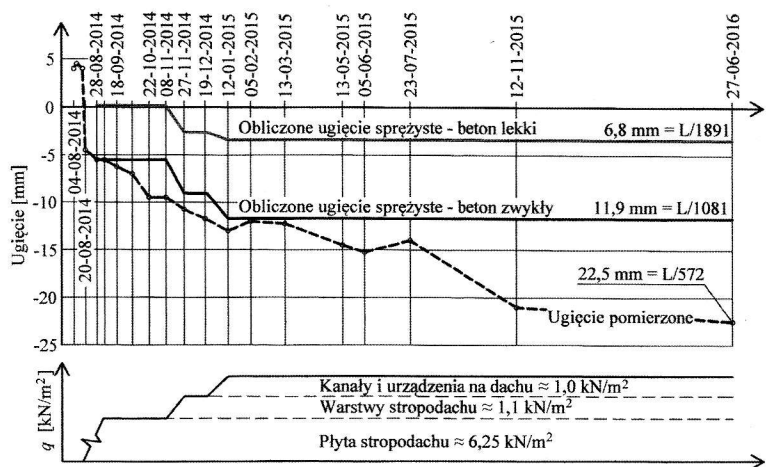


Rys. 6. Mapy ugięcia od ciężaru własnego w przypadku: a) betonu zwykłego, b) betonu lekkiego



Rys. 7. Mapy ugięcia od sprężenia w przypadku: a) betonu zwykłego, b) betonu lekkiego

Na rysunku 8 zilustrowano rozwój obliczonych ugięć sprężystych płyty z betonu lekkiego oraz wartości ugięć pomierzonych w trakcie realizacji obiektu. W przypadku betonu zwykłego ugięcie sprężyste pod całkowitym obciążeniem wynosiło $11,9 \text{ mm}$, a betonu lekkiego – $6,8 \text{ mm}$. Rozwój ugięcia wykonanej płyty był obserwowany przez 2 lata (por. rys. 8). Na wykresie można zauważyć dobrą zgodność ugięć pomierzonych z obliczonymi w początkowym okresie pracy płyty. Po sprężeniu otrzymano z obliczeń ugięcie $5,5 \text{ mm}$ oraz $4,5 \text{ mm}$ z pomiarów. Ze względu na zjawiska reologiczne w późniejszym okresie ugięcia pomierzone zaczynają się różnić od obliczonych według analizy sprężystej. O poprawnej pracy zaprojektowanego stropu decyduje ugięcie trwałe. Zgodnie z [4] ugięcie to może być oszacowane na podstawie wartości



Rys. 8. Ugięcia pomierzone i obliczone według analizy sprężystej

ugięć z analizy sprężystej, ze współczynnikiem zwiększającym wynoszącym 3,0 – do obciążeń statycznych i sprężenia oraz 1,5 – do obciążeń użytkowych. Przy założeniu, że w betonach o klasach wytrzymałości nie mniejszych niż 30 MPa pełzanie betonu lekkiego nie różni się od pełzania betonu zwykłego, współczynnik ten wydaje się być właściwy również w przypadku betonów lekkich o odpowiednio wysokiej wytrzymałości. Z tych względów spodziewane ugięcia, z uwzględnieniem obciążenia śniegiem równego 1,0 kN/m², wynosi 1 mm w przypadku betonu zwykłego i 25,2 mm – betonu lekkiego. Przedstawione wyniki pomiarów wskazują, że po dwóch latach od wykonania płyty maksymalne ugięcie (22,5 mm) jest znacząco mniejsze od wartości prognozowanej. Nie jest to wprawdzie jeszcze ugięcie końcowe, jednak tempo jego zwiększania w ostatnim okresie pozwala wnioskować, że ugięcie zbliża się do wartości trwałej. Biorąc pod uwagę to, że dobra jakość produkowanych obecnie kruszyw sztucznych do betonów lekkich gwarantuje wystąpienie pełzania nie większego niż w przypadku betonu zwykłego, można oszacować, że ugięcia rzeczywiste w przypadku betonu lekkiego będą również mniejsze niż prognozowane.

Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki analizy porównawczej ugięć płyty sprężonej o rozpiętości 12,86 m i grubości 250 mm wykonanej z betonu zwykłego oraz betonu lekkiego. Wykazano, że pomimo mniejszego modułu sprężystości betonu lekkiego można – dzięki zmniejszeniu ciężaru – uzyskać mniejsze ugięcia przy podobnej ilości sprężenia (prognozowane ugięcie trwałe wyniosło 25,2 zamiast 40,1 mm).

Przedstawione wyniki wykazują, że beton lekki może być z powodzeniem stosowany w kablobetonowych płytach dużej rozpiętości. Możliwe jest osiągnięcie większych rozpiętości i większych smukłości niż w przypadku stosowania betonu zwykłego.

Ważne jest również to, że częstotliwość drgań własnych konstrukcji z betonów lekkich jest większa, a amplitudy drgań – mniejsze. Pozytywnym aspektem jest też to, że współczynnik tłumienia drgań w przypadku betonów lekkich jest większy i dzięki temu drgająca konstrukcja szybciej zostaje wytlumiona.

PIŚMIENNICTWO

- [1] ACI 213 R-03 – Guide for structural lightweight aggregate concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2003.
- [2] Ajdukiewicz A., Golonka K.: Płaskie stropy sprężone kablami bez przyczepności – specyfika projektowania. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 6/2007.

- [3] Chandra S., Berentson L.: Lightweight aggregate concrete. “Noyes Publications”, New York, 2003.
- [4] Concrete Society Technical Report 43 Post-tensioned Concrete Floors-Design Handbook, Cromwell Press, Wiltshire, UK, 2005.
- [5] Derkowski W.: Monolityczny, lekki strop żebrowy, sprężony cięgnami bez przyczepności”, „Materiały Budowlane”, nr 5/2012.
- [6] Domagała L.: Elasticity of lightweight aggregate concrete modified with steel fibers”, „Cement Wapno Beton”, nr 3/2007.
- [7] Domagała L.: Skurcz i pęcznienie lekkich betonów kruszywowych modyfikowanych fazą włóknistą. „Czasopismo Techniczne”, Z1-B/2008.
- [8] Domagała L.: Wpływ rodzaju kruszywa grubego na właściwości mechaniczne betonów konstrukcyjnych”. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, z. 58/3/2011/III.
- [9] Domagała L.: Wpływ rodzaju kruszywa grubego na właściwości mechaniczne betonów konstrukcyjnych. „Magazyn Autostrady”, nr 11/2011.
- [10] Domagała L.: Konstrukcyjne lekkie betony kruszywowe. Monografia 462, Kraków, 2014.
- [11] FIB-Bulletin No 31: Post-tensioning in building. Lozanna, 2005.
- [12] fib CEB-FIP: Recommendations for the design of post-tensioned slabs and foundations raft. SETO, May 1998.
- [13] FIP: Recommendations for the Design of Flat Slabs in Post-tensioned Concrete. Cement & Concrete Association, Wexham Springs, 1980.
- [14] Górski K., Piętki M., Ślusarczyk J.: Systemy sprężenia monolitycznego i analiza ich efektywności na przykładzie stropu budynku biurowego. „Materiały Budowlane”, nr 5/2012.
- [15] How-Ji C., Chung-Ho H., Chao-Weit T.: Dynamic Properties of Lightweight Concrete Beams Made by Sedimentary Lightweight Aggregate. “Journal of Materials in Civil Engineering”, June 2010.
- [16] Kayali O., Haque M., Zhu B.: Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash. “Cement Concrete Research”, Vol. 29, 1999.
- [17] Khan L., Lopez M.: Prestress Losses in High Performance Lightweight Concrete Pretensioned Bridge Girders. “PCI Journal”, Vol. 50, 5/2005.
- [18] Khan S., Williams M.: Post-Tensioned Concrete Floors: Butterworth-Heinemann. Bodmin-UK, 1995.
- [19] Pawłowski A.Z., Cała I.: Monolityczne stropy kablobetonowe. „Materiały Budowlane”, nr 11/2008.
- [20] PN EN 1992-1-1 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguly ogólne i reguly dla budynków.
- [21] Siwowski T.: Przykłady zastosowań betonów niekonwencjonalnych w polskim mostownictwie. „Geoinżynieria Drogi Mosty Tunele”, nr 4/2005.
- [22] Solecki A., Andrzejewski J., Kandybowicz A.: Platinum Towers w Warszawie. Pierwszy w Polsce budynek z płytowymi stropami sprężonymi. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 4/2008.
- [23] Szydłowski R., Mieszczak M.: Gdzie jest granica smukłości sprężonych płyt stropowych? O projekcie i badaniach stropów sprężonych w budynku Centrum Kulturalno-Artystycznego w Koźlicach. Konferencja naukowo-techniczna „Konstrukcje sprężone KS2015”, Kraków 2015.
- [24] Szydłowski R., Mieszczak M.: Study of Application of Lightweight Aggregate Concrete to Construct Post-tensioned Long-span Slabs. Procedia Engineering, t. 172, January 2017.
- [25] Szydłowski R., Łabuzek B.: Post-tensioned long-span slabs in projects of modern building construction. IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 245 (2017) 022065.
- [26] Szydłowski R., Kurzyńiec K.: Wpływ gęstości lekkiego betonu kruszywowego na parametry wytrzymałościowe i użytkowe stropu płytowo-belkowego. „Inżynieria i Budownictwo” (w przygotowaniu do druku).