

BUILDER  
FOR THE  
FUTURE

BUILDER  
FOR THE  
YOUNG  
ENGINEERS

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

**Małgorzata Mieszczał**  
Wydział Inżynierii Lądowej,  
Politechnika Krakowska

**OPIEKUN NAUKOWY**  
dr inż. Rafał Szydłowski  
Instytut Materiałów i Konstrukcji  
Budowlanych, Politechnika Krakowska

W roku 1978 w Kalifornii nad jeziorem New Melones powstał jeden z pierwszych mostów, w którym dla zmniejszenia ciężaru konstrukcji zastosowano beton lekki. Most zaprojektowano jako sprężony o przekroju skrzynkowym, a jego rozpiętość wynosi 195 m. Kolejny most z betonu lekkiego, o największym na świecie przęśle belkowym (301 m) [1], powstał w 1998 roku i łączy wyspy Stolmen i Seibjorn w Norwegii. Tak duża rozpiętość była możliwa dzięki zastosowaniu zmiennego przekroju skrzynkowego wykonanego z betonu lekkiego (rys. 1.).

W roku 2005 wykonano most New Benicia-Martinez. Podczas projektowania zastanawiano się nad wyborem odpowiedniego materiału. Wybranie betonu lekkiego przyczyniło się w sposób znaczący do obniżenia kosztów budowy mostu. Most ma całkowitą długość 2,4 km, 22 przęsła o rozpiętości od 127 do 201 m, z czego 16 przęseł zlokalizowanych jest nad wodą (rys. 2.) [2].

### Właściwości betonu lekkiego

Beton lekki stosowany jest w mostowych konstrukcjach sprężonych, gdyż znacznie obniża ciężar własny mostu, co powoduje zmniejszenie ilości materiału, a ponadto jest materiałem odporniejszym na obciążenia cykliczne [1]. W przeciwieństwie do betonów zwykłych właściwości mechaniczne betonów lekkich zależą zarówno od spoiwa, jak i od kru-

# BETONY LEKKIE W KONSTRUKCJACH SPRĘŻONYCH

Konstrukcje sprężone mają coraz szersze zastosowanie w budownictwie zarówno drogowym, jak i kubaturowym. Najszerze znalazły jednak w budownictwie mostowym, dzięki czemu konstrukcje osiągają znacznie większe rozpiętości. Ostatnie lata przyniosły również kilka realizacji z lekkiego betonu sprężonego, z którego wykonano już kilka mostów na świecie.

W betonach zwykłych zniszczenie następuje zazwyczaj w strefie stykowej (kruszywo – cement), natomiast w betonach lekkich – w matrycy (rys. 3.). Główną różnicą między materiałami jest gęstość, która w przypadku betonów lekkich wynosi od 800 do 2000 kg/m<sup>3</sup>. Ze względu na mniejszą gęstość beton lekki charakteryzuje się gorszymi właściwościami mechanicznymi niż beton zwykły. Wraz ze wzrostem wieku betonu różnice te są znacznie mniejsze, badania [3] wykazały, że wartość modułu Younga dla betonów lekkich z kruszywem popiołoporowatym o gęstości 1580 i 1710 kg/m<sup>3</sup> jest niższa o 30% w odniesieniu do betonów zwykłych wykonanych na tych samych zaprawach cementowych.

Khan L. oraz Lopez M. [4] dokonali analizy dla dźwigarów mostowych dwuteowych strunobetonowych z betonu lekkiego na kruszywie z łupka spiekanego. W pracy omówiono dźwigary dwuteowe sprężone kablami z przyczepnością dla dwóch rodzajów betonu 2HPLC i 3HPLC o wytrzymałości 55 MPa i 69 MPa. Moduł sprężystości dla omawianych betonów wyniósł po 56 dniach odpowiednio 27 GPa oraz 28,1 GPa, zbadany na próbkach cylindrycznych 150 x 300 mm. Badania skurczu i pelzania wykonane zostały na próbkach cylindrycznych 100 x 380 mm według modelu ASTM C512 [4]. Dla porównania wykonano badania próbek z betonu zwykłego o wytrzymałości równej 93,9 MPa. Wartość pelza-

nia dla betonu lekkiego była wyższa o około 4% po roku, a skurcz był większy o około 20% w tym samym okresie. Badania strat siły sprężającej wykonano również na belkach. W tabeli 1. znajdują się wartości poszczególnych strat dla danej belki.

Autorzy dokonali również porównania w formie diagramów strat pomierzonych na próbkach oraz na belkach w stosunku do strat obliczonych według wybranych norm. Wykres na rysunku 4. przedstawia stosunek wartości strat przewidywanych do pomierzonych na belkach, a wykres na rysunku 5. – do pomierzonych na próbkach normowych.

**Badania wykazują, że możliwe jest zastosowanie betonu lekkiego do konstrukcji sprężonych.**

Przedstawione badania pokazują, że właściwości mechaniczne i reologiczne oraz straty siły sprężającej dla betonu lekkiego nie różnią się znacznie od wartości dla betonu zwykłego. Porównanie wartości strat z wybranymi normami wskazuje, że wartości pomierzone znacznie różnią się od obliczonych, szczególnie w przypadku elementów wielkogabarytowych – efekt skali.

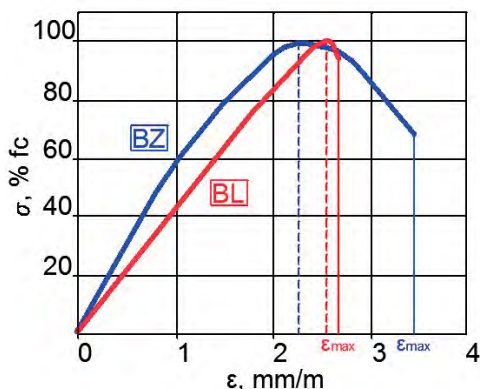
Kolejne badania betonu lekkiego przeprowadzono w Wielkiej Brytanii [8]. Użyto do nich 3 rodzajów kruszywa: granit, Liapor 8, Laytag.



Rys. 1. Most Stolmen i Sebjom w Norwegii



Rys. 2. Most New Benicia-Martinez



Rys. 3. Wykres zależności naprężenia od odkształcenia podczas próby ściskania betonu zwykłego BZ i betonu lekkiego BL

Skład mieszanki betonowej został przedstawiony w tabeli 2.

Dla każdego rodzaju betonu wykonano komplet badań (wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie, moduł sprężystości) na próbkach normowych. W tabeli 3. przedstawione są pomierzone wartości w zależności od czasu dojrzewania betonu.

Wyniki pokazują, że szybkość narastania wytrzymałości dla betonu lekkiego jest większa, a wytrzymałość końcowa jest mniejsza niż dla betonu zwykłego. Moduł sprężystości betonu zwykłego jest w każdej chwili większy dla betonu zwykłego niż dla betonu lekkiego, a wartości wytrzymałości na rozciąganie betonu lekkiego są nieco wyższe niż dla betonu zwykłego, co wskazuje na większy zakres pracy w stanie zarysowanym betonu lekkiego. W omawianych badaniach zastosowano kruszywo Laytag suche oraz wilgotne. Zabieg nawilżenia kruszywa stosu-

je się ze względu na dużą nasiąkliwość kruszywa. Również dlatego konieczne jest stosowanie plastyfikatorów zwiększających urabialność mieszanki. Część wody, którą pochłonie kruszywo, jest stopniowo wchłaniania przez zaczyn, przez co pielęgnacja betonu lekkiego jest łatwiejsza od pielęgnacji betonu zwykłego. Wyniki badań [8] pokazują, że kruszywo suche osiągnęło nieco wyższe wytrzymałości od nasączonego wodą, ale niższe wartości modułu sprężystości po 98 dniach. Spowodowane jest to mniejszą zawartością wody w mieszance.

### Kalobetonowe płyty sprężone

Płyty sprężone dużych rozpiętości znalazły zastosowanie jako stropy w budynkach kilka dekad temu w USA, Australii, Hong Kongu, a później w Europie. W Polsce stropy sprężone stosowane są jeszcze rzadko, ale ich liczba ciągle wzrasta. Pierwsza realizacja takiej konstrukcji miała miejsce w budynku Platinum Towers w Warszawie w 2008 roku [9].

W ciągu kilku dziesięcioleci w Europie wydano wiele wytycznych i zaleceń dotyczących projektowania i tworzenia takich konstrukcji [10–13].

Opublikowane wytyczne podają zalecane wartości stosunku rozpiętości do grubości płyty, uzależniając ją od typu konstrukcji, obciążenia i dopuszczalnego ugięcia. Przykładowo zgodnie z [10] dla pełnych płyt ciągłych przy dwóch lub więcej przęsłach w każdym kierunku stosunek ten nie powinien przekraczać 42 dla płyt stropowych i 48 dla stropodachów. Khan i Williams [14], wychodząc z warunku braku rys, na podstawie przeprowadzonych obliczeń podają wymagane smukłości dla różnych poziomów obciążenia (tab. 4).

Po przeprowadzeniu autorskich analiz obliczeniowych w latach 2014–2015 zaprojektowano i z powodzeniem zrealizowano płyty sprężone w Centrum Kulturalno-Artystycz-

Tabela 1. Straty siły sprężającej w belkach 2 HPLC i 3 HPLC [4]

	Grade 2 HPLC	Grade 3 HPLC
naprężenia w stali [MPa]	1400	1400
skrócenie sprężyste [MPa]	117	83
skurcz i pełzanie [MPa]	60	20
relaksacja stali [MPa]	79	101
całkowite [MPa]	257	204

Tabela 2. Skład mieszanki betonowej według opracowania EuroLightCon [8]

Material	Granit	Liapor 8	Lytag (suchy)	Laytag (wilgotny 7%)
Cement	370	450	640	645
Kruszywo	1184	730	621	626
Piasek	726	721	633	638
Woda	170	157	128	129
Plastyfikator	0	4.52	18	17
W/C	0,46	0,35	0,2	0,2

Tabela 3. Mechaniczne właściwości betonów opracowane wg EuroLightCon [8]

Wiek (dni)	Granit	Liapor 8	Lytag	Lytag 7%
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				
3	46,40	53,50	55,80	54,80
7	58,30	60,80	60,30	60,70
14	66,50	65,00	63,80	61,70
28	74,50	69,00	68,20	65,50
98	79,50	74,00	71,20	68,30
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]				
3	3,23	3,62	4,23	4,27
7	4,00	4,00	4,25	4,42
28	4,32	4,45	4,73	4,52
98	4,40	4,43	5,27	4,63
Moduł sprężystości [GPa]				
3	28,70	22,70	24,17	25,07
7	32,80	24,17	28,67	27,37
28	34,93	25,37	27,37	27,33
98	38,30	25,80	28,30	29,50

Tabela 4. Zalecane wartości stosunku rozpiętość/grubość płyty wg [14]

Typ płyty	rozpiętość/grubość
Pełna płyta jednokierunkowa	30÷45
Płyta uźebrowana	25÷35
Pełna płyta płaska	35÷45
Strop kasetonowy	20÷30

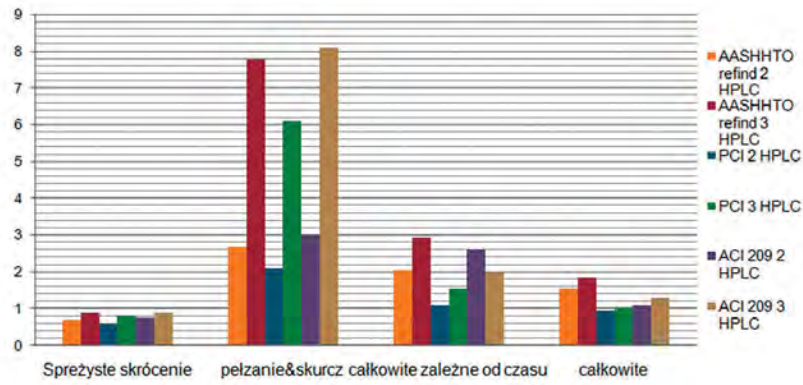
nym w Kozienicach o rozpiętościach i smukłościach znacznie przekraczających zalecane wartości [15].

Jednym z podstawowych obciążeń w takich stropach (zwłaszcza stropodachach) jest ciężar własny, który jest czasami redukowany przy użyciu lekkich wkładów odciążających. Rozwiązanie to powoduje jednak szereg problemów technologicznych i ekonomicznych. Dobrym rozwiązaniem może być użycie lżejszego betonu, o gęstości poniżej 2000 kg/m<sup>3</sup>. Rozwiązania takie były i są stosowane na świecie, lecz nie znalazły szerszego zastosowania. Beton lekki, pomimo iż wykonywany jest na bazie kruszyw stanowiących produkt odpadowy (w odróżnieniu od kruszyw naturalnych), jest jednak wciąż znacznie droższy i trudniejszy w produkcji oraz dostarczeniu na miejsce wbudowania w porównaniu z betonem zwykłym. W Polsce może być wykonywany na powszechnie dostępnym kruszywie keramzytowym lub mniej dostępnym i droższym kruszywie popiołoporytowym [1]. Tańsze kruszywa keramzytowe nie pozwalają jednak na uzyskanie odpowiednio wysokich parametrów mechanicznych (wytrzymałość na ściskanie do 16 MPa), a popiołoporytowe znacząco podnoszą koszt betonu. W płytach żelbetonowych czy płytach sprężonych o standardowych rozpiętościach i grubościach jego użycie nie jest ekonomicznie uzasadnione. W przypadku konstruowania płyt o ponadnormatywnych rozpiętościach i smukłościach zastosowanie betonu lekkiego znajduje znakomite uzasadnienie. Niższa wartość modułu sprężystości w stosunku do betonu zwykłego przy porównywalnej wytrzymałości na ściskanie jest rekompensowana mniejszym ciężarem.

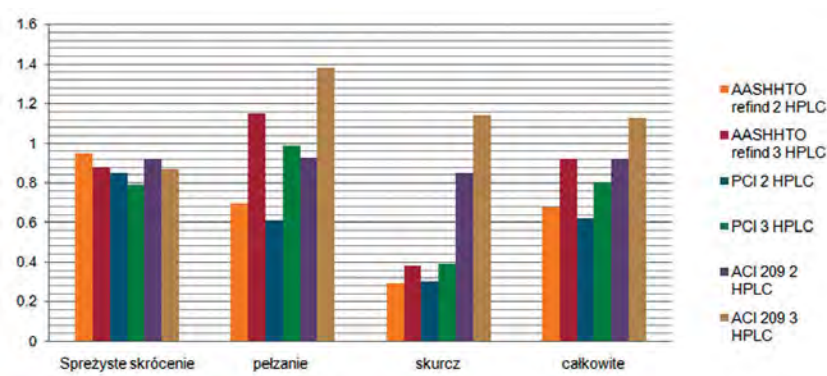
W Polsce obecnie produkowane jest kruszywo lekkie Certyd [16] z popiołów powstających w elektrowni węglowej w Białymstoku. W tabeli 5. zestawiono właściwości kruszyw lekkich produkowanych w Polsce (kruszywo Polytag zostało wycofane z produkcji w Polsce). Kruszywo Certyd w porównaniu z innymi kruszywami ma największą wytrzymałość, co sprawia, że najlepiej nadaje się do wykorzystania w konstrukcjach mocno obciążonych. Dodatkowo jest produktem ekologicznym i produkowanym przez krajowe wytwórnie.

### Analiza numeryczna sprężonej płyty kablobetonowej

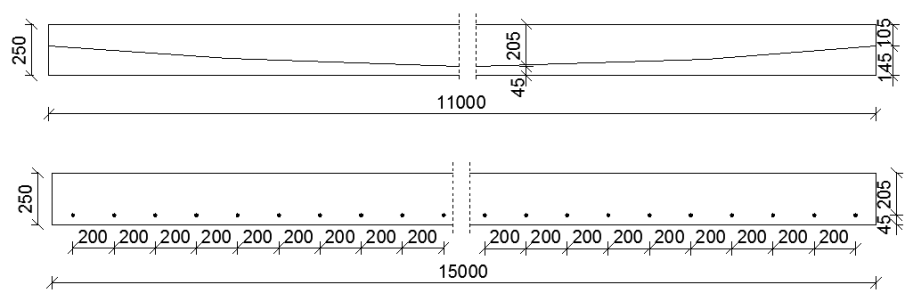
Dla lepszego przybliżenia problemu przeprowadzono analizę numeryczną płyty o rozpiętości 11 m i grubości 25 cm, sprężonej kablami poprowadzonymi parabolicznie w rozstawie co 20 cm (rysunek 5.). Płyty zamodelowane w programie RFEM Dlubal z dwóch rodzajów betonu: zwykłego klasy C40/50 oraz lekkiego LC40/44. Parametry mechaniczne betonu przyjęto według [17], jedynie moduł sprężystości przyjęto na podstawie badań [1] jako 30% niższy niż dla betonu zwykłego, tj. 24,5GPa, a ciężar betonu lekkiego 17,5 kg/m<sup>3</sup>.



Rys. 4 Wykres stosunku strat pomierzonych na belkach w stosunku do strat obliczonych według wybranych norm [4].



Rys. 5. Wykres stosunku strat pomierzonych na próbkach do strat obliczonych według wybranych norm [4]



Rys. 6 Geometria i schemat rozmieszczenia kabli w płycie

Tabela 5. Właściwości kruszyw lekkich produkowanych w Polsce [1,16]

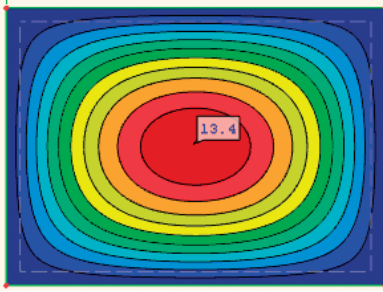
Właściwość \ Rodzaj	Leca Keramzyt (Gniew)	Keramzyt (Mszczonów)	Polytag (Gdańsk)	Certyd (Białystok)
Gęstość ziaren [kg/m <sup>3</sup> ]	500-900	950-1100	1300-1450	1350-1430
Gęstość nasykowa [kg/m <sup>3</sup> ]	250-650	400-900	650-850	600-900
Nasiąkliwość (max) [%]	30-40	20-30	20-25	16-17
Wytrzymałość [MPa]	0.75-4	2-6	6-10	6-10
Frakcje [mm]	0/2; 0/4; 0/5; 2/4; 4/10; 10/20	0/4; 3/10; 8/16; 16/31.5	0/4; 0.5/4; 2/5; 4/8; 6/12	0/2; 2/4; 4/8; 8/12; 4/16

Przyjęte obciążenia dla płyt: ciężar własny, obciążenie stałe 1 kN/m<sup>2</sup>, obciążenie zastępcze od sprężenia, obciążenie zmienne 2 kN/m<sup>2</sup>.

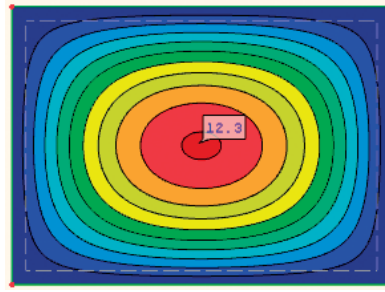
Na rysunkach 7–10. przedstawiono mapy ugięć płyt od ciężaru własnego oraz sprężenia. Na rysunkach 11. i 12. przedstawiono ugięcia z uwzględnieniem zarysowania i zbrojenia

prętami ze stali miękkiej  $\sigma 10$  co 15 cm na dolnej i górnej powierzchni dla kombinacji charakterystycznej.

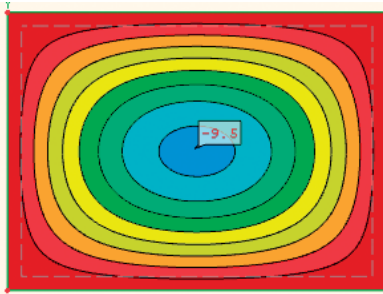
Wyniki pokazują, że zmiana materiału powoduje zwiększenie wpływu sprężenia, tzn. zwiększenie strzałki wygięcia stropu, zmniejszenie ugięcia od ciężaru własnego, co powoduje zmniejszenie całkowitego ugięcia stropu.



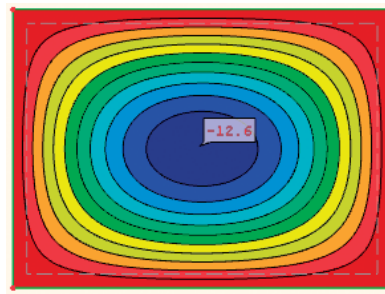
Rys. 7. Ugięcie stropu od ciężaru własnego dla betonu zwykłego



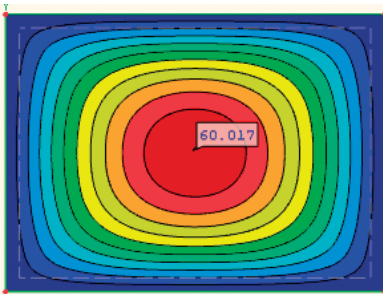
Rys. 8. Ugięcie stropu od ciężaru własnego dla betonu lekkiego



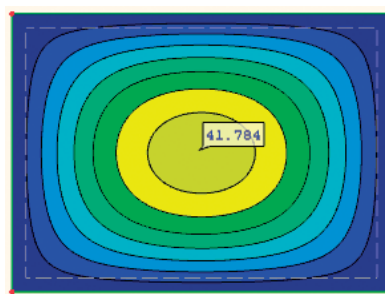
Rys. 9. Ugięcie stropu od sprężenia dla betonu zwykłego



Rys. 10. Ugięcie stropu od sprężenia dla betonu lekkiego



Rys. 11. Ugięcie stropu od kombinacji charakterystycznej dla betonu zwykłego



Rys. 12. Ugięcie stropu od kombinacji charakterystycznej dla betonu lekkiego

W Polsce obecnie produkowane jest kruszywo lekkie Certyd z popiołów powstałych w elektrowni węglowej w Białymstoku. Badania nad tym kruszywem i zastosowaniem w konstrukcjach sprężonych są częściowo wykonane, a część jest w trakcie realizacji.

Ugięcie płyty z betonu zwykłego po zarysowaniu przekracza wartość graniczną równą  $l/250 = 11 \text{ m}/250 = 44 \text{ mm}$ . Dzięki zastosowaniu betonu lekkiego zmniejszamy ugięcia, a także spełniamy stan graniczny użyteczności.

### Wnioski

W pracy omówiono właściwości betonów lekkich w porównaniu z betonami zwykłymi. Właściwości wytrzymałościowe betonów lekkich są gorsze niż dla betonów zwykłych, jednakże nie są one na tyle małe, by nie można było stosować betonów lekkich do konstrukcji poddanych ciągłym obciążeniom. Ponadto omówione badania wykazują, że zastosowanie betonu lekkiego dla badanych elementów nie wpływa znacznie na starty siły sprężającej,

a zatem możliwe jest zastosowanie tego materiału do konstrukcji sprężonych. Co więcej, na Polskim rynku dostępne jest kruszywo lekkie Certyd do konstrukcji sprężonych, ale przed jego szerszym zastosowaniem konieczne jest wykonanie szeregu badań pozwalających ocenić właściwości mechaniczne i reologiczne takiego betonu oraz wpływ zastosowania kruszywa Certyd na starty siły sprężającej. Badania nad tym kruszywem częściowo są już wykonane, a część z nich jest w trakcie realizacji.

Przeprowadzona analiza numeryczna pokazała, że zastosowanie kruszywa lekkiego zmniejsza ugięcia całkowite stropu, co może pozwolić na zmniejszenie ilości stali sprężającej i zwykłej, a także pozwolić na zmniejszenie grubości stropu. ■

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wybrane badania betonu lekkiego określające jego właściwości mechaniczne oraz ich wpływ na straty siły sprężającej w odniesieniu do podobnych badań betonu zwykłego. W celu zobrazowania problemu przedstawiono porównanie analizy numerycznej płyty sprężonej kablobetonowej z betonem lekkiego z taką samą z betonu zwykłego. Prosta analiza ugięć elementu pokazuje korzystny wpływ stosowania betonu lekkiego.

**Słowa kluczowe:** konstrukcje sprężone, beton lekki, płyta

**Abstract. USE OF LIGHTWEIGHT CONCRETE TO PRESTRESS.** The paper presents selected research lightweight concrete, defining the properties and the impact on the loss of compression. Presents numerical analysis of the prestress slab lightweight concrete and plain, which show that the use of lightweight concrete can reduce the slab deflection.

**Keywords:** Prestressed structures, lightweight concrete, slab

### Bibliografia

- [1] L. Domagała, Konstrukcyjne lekkie betony kruszywo- Politechnika Krakowska, Kraków 2014.
- [2] M. Ganapathy, Lightweight Concrete and the New Benicia-Martinez Bridge, Concr. Bridge Views (2008).
- [3] L. Domagała, Wpływ rodzaju kruszywa grubego na właściwości mechaniczne betonów konstrukcyjnych, Zesz. Nauk. Politech. Rzesz. Bud. Inż. Śr. (2011) 299–306.
- [4] M. Lopez, Khan, Lawrence F., Prestress losses in high performance lightweight concrete pretensioned bridge girders, PCI J. 50 (2005) 84–94.
- [5] American Association of State, Highway and Transportation Officials, AASHTO, LRFD Bridge Design Specifications, Second, Washington DC, 1998.
- [6] Precast/Prestressed Concrete Institute, PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete, 5th ed., Chicago 1998.
- [7] American, Concrete Institute, ACI Committee 209, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, Farmington Hills, MI, 1997.
- [8] Properties of lightweight concretes containing Lytag and Liapor (2000).
- [9] Solecki A., Andrzejewski J., Kandybowicz A, Platinum Towers w Warszawie. Pierwszy w Polsce budynek z płytowymi stropami sprężonymi, Inż. Bud. (n.d.) 186–187.
- [10] 2. Concrete Society, Post-tensioned concrete floors. Design Handbook, Cromwell Press, Wiltshire, UK 2005.
- [11] Fib-Bulletin No. 31. Post-tensioning in building, Lausanne 2005.
- [12] FIP Recommendation, FIP Recommendations: Design of post-tensioned slabs and foundations, Wexham Springs 1980.
- [13] FIP Recommendations for the Design of Flat Slabs in Post-tensioned Concrete. Cement & Concrete Association, Wexham Springs 1980.
- [14] Khan S., Williams M., Post-tensioned Concrete Floors, Bodmin-UK. Butterworth-Heinemann (1995).
- [15] Szydłowski R., Mieszczak M., Gdzie jest granica smukłości sprężonych płyt stropowych? O projekcie i badaniach stropów sprężonych w budynku CKA w Koźmicach., Aktual. Trendy W Teor. Prakt. Konstr. Sprężonych W Polsce (2015).
- [16] K. Łuczaj, P. Urbańska, Certyd – nowe, lekkie, wysokowytrzymałe kruszywo spiekane, Mater. Bud. (n.d.).
- [17] PN-EN-1992-1-1:2008 Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne dla budynków (n.d.).