

Lekkie betony konstrukcyjne

– projektowanie, wykonywanie, właściwości



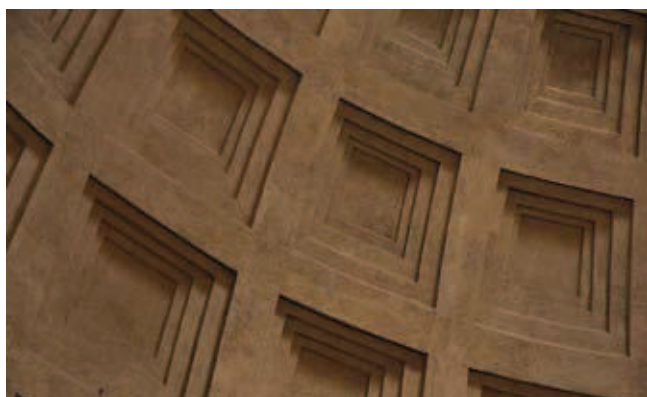
Dr hab. inż. Lucyna Domagała, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Beton z kruszywem lekkim stosowany był jako materiał konstrukcyjny już w starożytności. Do dnia dzisiejszego przetrwało wiele obiektów budowlanych z czasów Cesarstwa Rzymskiego, w których zastosowano konstrukcyjny beton lekki. Budowle takie jak rzymskie Koloseum czy Panteon (rys. 1) dobitnie dowodzą, że materiał ten mimo niskiej gęstości może charakteryzować się nie tylko odpowiednimi cechami mechanicznymi, ale i bardzo dobrą trwałością. Obecnie dzięki znaczącemu rozwojowi technologii produkcji kruszyw sztucznych jak również materiałów wiążących oraz dodatków i domieszek, możliwości zastosowania betonu lekkiego do celów konstrukcyjnych są zdecydowanie większe. Lekkie betony kruszywowe, oprócz powszechnego wykorzystania do produkcji prefabrykatów drobno- i wielko-wymiarowych, pełniących zarówno funkcję nośną, jak i nienośną w obiektach budowlanych, znajdują również szerokie zastosowanie w budownictwie monolitycznym. Do sztandarowych już przykładów spektakularnych współczesnych aplikacji konstrukcyjnych betonów lekkich należą: budynki wysokościowe Water Tower Plaza w Chicago, Yokohama Landmark Tower, Commerzbank Tower we Frankfurcie, Shard London Bridge (najwyższy budynek UE) czy monachijska siedziba BMW; stadiony Racecourse Grandstand w Doncaster czy Wellington Stadium w Nowej Zelandii; skocznia narciarska w Obersdorfie; norweskie mosty Stolma (o najdłuższym na świecie przęśle o konstrukcji belkowej) czy pontonowe Bergsoysundet i Nordhordlands;

platformy wiertnicze kanadyjska Hibernia czy norweskie Troll (najwyższa transportowana konstrukcja na świecie – rys. 2) i Heidrun (o konstrukcji pływającej). Konstrukcyjne betony lekkie, dzięki korzystnej relacji niskiej gęstości i odpowiednio wysokiej wytrzymałości, stosowane są również do renowacji obiektów zabytkowych, w których zastępują pierwotnie zastosowany materiał. Przykładami takich konstrukcji są chociażby dwa słynne mosty: Brookliński i Tower Bridge, których płyty mostu poddano restauracji.

Pomimo szerokiego spektrum zastosowań konstrukcyjnych betonów lekkich, liczba realizacji obiektów budowlanych z zastosowaniem tego materiału jest stosunkowo niewielka w porównaniu z betonami na kruszywach zwykłych. Przyczyn takiego stanu rzeczy jest kilka, a najważniejsze z nich to: brak uniwersalnych metod projektowania tych betonów, umożliwiających uwzględnienie różnych rodzajów kruszyw lekkich oraz nowoczesnych dodatków i domieszek; bardziej złożony, w stosunku do betonów zwykłych, sposób kształtowania właściwości; bardziej skomplikowana i czasochłonna technologia produkcji, obciążona większym ryzykiem błędu. Do stosowania konstrukcyjnych betonów lekkich zniechęca również projektantów szereg stereotypowych opinii dotyczących ich wielu mniej korzystnych właściwości fizycznych i mechanicznych. Tymczasem wiele wymienionych powyżej przyczyn można wyeliminować poprzez popularyzację odpowiednich wytycznych do projektowania i wykonywania betonów lekkich. Głównym powodem rezygnacji z zastosowania betonu lekkiego na rzecz betonu zwykłego powinien być przede



Rys. 1. Fragment kopuły Panteonu (129 r. n.e.) z ukształtowanymi w betonie lekkimi kasetonami



Rys. 2. Platforma Troll (wysokość 472 m) podczas transportu z fiordów na Morze Północne [1]

wszystkim wyższy koszt jednostki objętości betonu danej klasy wytrzymałości. Z tego względu zastosowanie betonu lekkiego wymaga każdorazowego rozważenia, czy jest opłacalne w przypadku przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego (np. z uwzględnieniem mniejszych wymiarów elementów konstrukcyjnych, ich większych rozpiętości, mniejszego ciężaru własnego, większej liczby kondygnacji itp.), przy założeniu niższych kosztów eksploatacji, związanych z możliwą większą trwałością obiektu i wyższą izolacyjnością termiczną.

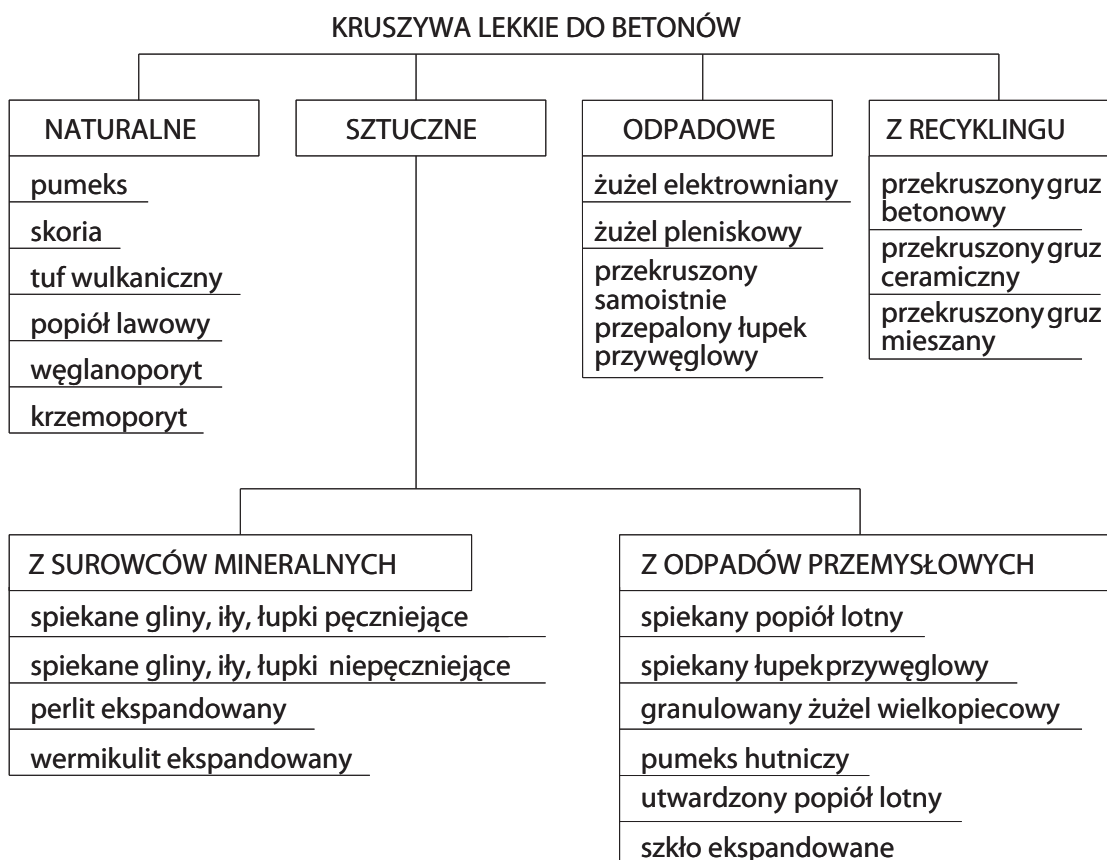
Celem tej publikacji jest przybliżenie zagadnień związanych ze specyfiką projektowania i wykonywania nowoczesnych betonów lekkich oraz możliwościami kształtowania ich rozmaitych właściwości w zależności od zastosowanych materiałów i technologii produkcji.

2. Kruszywa lekkie do betonów konstrukcyjnych

Jako kruszywa lekkie do betonów konstrukcyjnych stosowane są głównie kruszywa pochodzenia mineralnego o gęstości ziaren w stanie suchym nie większej niż 2000 kg/m³ lub gęstości nasypowej w stanie luźnym nie większej niż 1200 kg/m³. Klasyfikację takich kruszyw,

odpowiadającą podziałowi na cztery grupy według PN-EN 13055-1 [2], przedstawiono na rysunku 3. Należy zaznaczyć, że żadna z norm europejskich: PN-EN 13055-1 [2], PN-EN 206 [3], PN-EN 1992-1 [4] nie dopuszcza stosowania wypełniaczy organicznych (trocin, wiórów, granulatu styropianowego itp.) jako kruszywa do betonów konstrukcyjnych, chociaż w praktyce znane są przykłady takich zastosowań.

Ze względu na korzystne właściwości i powszechną dostępność kruszywa sztuczne spiekane z glin lub łupków pęczniejących oraz popiołów lotnych są obecnie najczęściej stosowane do konstrukcyjnych betonów lekkich. W Polsce obecnie rynek oferuje cztery asortymenty takich kruszyw: dwa ze spiekanych popiołów lotnych: Certyd (produkowany w Solanach k. Białegostoku od 2015 r.) i Pollytag (jeszcze dostępny, ale produkcję wstrzymano w 2015 r.), oraz dwa kruszywa ze spiekanych glin pęczniejących: importowany Liapor i krajowy keramzyt, produkowany w Gniewie. Warto zwrócić uwagę na fakt, że kruszywo Pollytag pomimo braku znaczących aplikacji konstrukcyjnych w kraju znalazło zastosowanie w betonach konstrukcyjnych wbudowanych w wiele obiektów wznoszonych w Europie, między



Rys. 3. Klasyfikacja kruszyw lekkich do betonów

Tabela 1. Charakterystyki kruszyw lekkich najczęściej stosowanych do betonów

Rodzaj kruszywa	Gęstość ziaren, ρ_p , kg/m ³	Gęstość nasypowa, ρ_b , kg/m ³	Max. $f_{cm, cube}$ MPa
Spiekane popioły lotne: Lytag, Pollytag, Certyd	1300–1500	650–850	90
Spiekane gliny pęczniejące:			
Leca 700	1250	700	70
Leca 750	1300	750	85
Leca 800	1450	800	90
Leca®keramzyt	500–900	250–650	25
Liapor 5	950	500	35
Liapor 6	1100	600	40
Liapor 7	1300	700	75
Liapor 8	1500	800	90
Solite	1400	700	75
Stalite	1400	750	90
Granulowany żużel wielkopiecowy	800–1100	650–900	50
Szkło ekspandowane	300–1850	150–1200	50
Utwardzony popiół lotny	1400–1700	800–900	45
Pumeks	550–1750	300–1100	35
Skoria (pumeks bazaltowy)	1300–2000	520–900	50

innymi we wspomnianych wcześniej Commerzbank Tower w Niemczech, Shard London Bridge czy Tower Bridge w Wielkiej Brytanii. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry najczęściej stosowanych do celów konstrukcyjnych kruszyw lekkich oraz możliwości kształtowania wytrzymałości betonu z tymi kruszywami.

Właściwości kruszyw lekkich stosowanych do betonów różnią się w bardzo znacznym zakresie, nieporównywalnie szerszym w odniesieniu do kruszyw zwykłych. Wysoka porowatość kruszyw lekkich rzędu 40 do 80% wpływa na istotne zróżnicowanie gęstości ich ziaren, wahającej się w zakresie 300 do 2000 kg/m³. W przypadku betonów konstrukcyjnych z reguły stosuje się jednak kruszywa o gęstości przekraczającej 900 kg/m³. To właśnie gęstość ziaren kruszyw lekkich jest jednym z podstawowych parametrów, traktowanych jako wyznacznik ich przydatności do betonów konstrukcyjnych. Tymczasem w wielu przypadkach równie istotna co porowatość kruszyw lekkich jest struktura tej porowatości. Kruszywa o podobnej gęstości ziaren mogą bowiem charakteryzować się znacząco różnymi pozostałymi właściwościami fizycznymi i mechanicznymi. Z reguły proces spiekania kruszyw sztucznych gwarantuje ograniczenie porowatości otwartej, w szczególności w zewnętrznej powłoce ziaren, sprzyjając wzrostowi ich wytrzymałości oraz ograniczeniu nasiąkliwości w stosunku do naturalnych łamanych kruszyw lekkich czy kruszyw nie poddanych spiekaniu. Zależnie jednak od zastosowanych surowców i technologii produkcji wśród kruszyw spiekanych dostępnych na rynku można wyróżnić takie, które charakteryzują się: w przeważającej większości drobnymi porami zamkniętymi; w przeważającej większości porami otwartymi znaczących rozmiarów; oraz takie, w których powłokach dominują pory zamknięte, a we wnętrzach pory otwarte.

W efekcie tak zróżnicowanej mikrostruktury stosowanych kruszyw lekkich ich nasiąkliwość waha się od 2 do ponad 45%. Wysoka nasiąkliwość kruszyw porowatych, niosąca ze sobą ryzyko utraty urabialności mieszanki, jest tą cechą, która w największym stopniu komplikuje proces wykonywania betonów lekkich w stosunku do betonów zwykłych. Istotna jest tu nie tyle jej wartość maksymalna, a dynamika absorpcyjności wody przez kruszywo w czasie. Szacuje się, że kruszywa lekkie w ciągu pierwszych kilku minut nasączenia są w stanie wchłoniąć ilość wody odpowiadającą około 50 do 95% ich nasiąkliwości po 1 godzinie. W zależności od dynamiki rozwoju nasiąkliwości w czasie, mieszanki z różnymi kruszywami lekkimi wymagają różnych procedur i różnego czasu mieszania oraz wykazują odmienną podatność na ryzyko utraty urabialności.

Zależnie od zastosowanych surowców i technologii produkcji wytrzymałość na miążdzenie kruszyw lekkich może się różnić w tak znaczącym zakresie jak 0,5 do 10 MPa. Niska wytrzymałość kruszyw lekkich wiąże się również z ich niskim modułem sprężystości, szacowanym na 5 do 20 GPa [5,6]. Jego wartość, kilkukrotnie, a nawet kilkunastokrotnie niższa niż dla kruszyw zwykłych, jest zatem zdecydowanie bardziej zbliżona do modułu sprężystości zaczynów cementowych stosowanych do betonów konstrukcyjnych (od 12 do 26 GPa [6,7]). Fakt ten ma kluczowe znaczenie w kształtowaniu większej jednorodności strukturalnej betonów lekkich, mającej wpływ zarówno na właściwości mechaniczne tych betonów jak i właściwości związane z ich trwałością. Rysunek 4 daje pewne wyobrażenie, w jak znacznym zakresie rodzaj zastosowanego kruszywa lekkiego może wpływać na odkształcalność betonu.

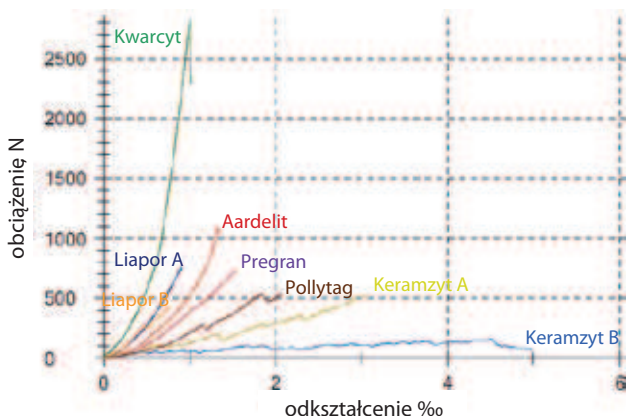
3. Projektowanie konstrukcyjnych betonów lekkich

Mechanizmy odpowiedzialne za kształtowanie właściwości lekkich betonów kruszywowych są bardziej złożone niż w przypadku betonów zwykłych. W rezultacie świadome projektowanie tych betonów wymaga uwzględnienia wpływu nie tylko większej liczby czynników materiałowych, ale i rozważenia wpływu technologii wykonania. Za taki stan rzeczy odpowiadają przede wszystkim: odmienne relacje materiałowe składników betonu oraz wysoka nasiąkliwość stosowanych kruszyw lekkich. W przypadku konstrukcyjnych betonów lekkich to kruszywo z reguły stanowi najniższy element, ograniczający wytrzymałość kompozytu betonowego. Dlatego też dobór kruszywa, odpowiedniego do założonych parametrów w stadium mieszanki betonowej oraz stadium betonu stwardniałego, powinien stanowić punkt startowy przy projektowaniu składu lekkich betonów kruszywowych.

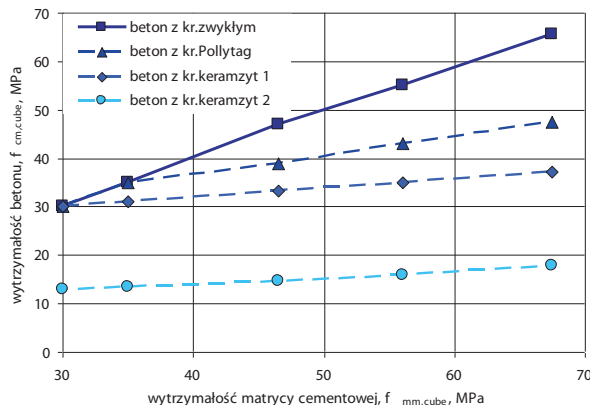
Strefa stykowa między kruszywem lekkim i matrycą cementową, będąca najniższym miejscem struktury betonów zwykłych, charakteryzuje się z reguły dużo mniejszą porowatością i zawartością niepożądanego portlandytu. W wielu przypadkach strefa stykowa okazuje się najmocniejszym elementem struktury betonów lekkich, ze względu na absorpcję nadmiaru wody w tych obszarach przez kruszywo oraz wnikanie zaczynu w pory powłoki zewnętrznej. Oprócz efektu fizycznego i mechanicznego, poprawa przyczepności zaczynu do kruszywa może wynikać również z reakcji pucolanej zachodzącej między tymi składnikami. Wytrzymałość strefy stykowej w betonach lekkich uzależniona jest nie tylko od rodzaju zastosowanego kruszywa i matrycy cementowej, ale i wstępnej wilgotności kruszywa i jej stanu (suchego, powierzchniowo-wilgotnego, powietrzno-suchego, nasączonego powierzchniowo-suchego, mokrego). Wpływ wytrzymałości matrycy cementowej na wytrzymałość betonów lekkich pod

względem jakościowym jest analogiczny jak w przypadku betonów zwykłych. Ze względu jednak na ograniczający wpływ słabego kruszywa lekkiego, przyrost wytrzymałości matrycy cementowej jest mniej efektywny w poprawie wytrzymałości kompozytu (rys. 5). W rezultacie w przypadku lekkich betonów kruszywowych zwiększanie wytrzymałości matrycy cementowej ma sens jedynie w ograniczonym zakresie, zależnym od rodzaju zastosowanego kruszywa. Ponadto, w przeciwieństwie do betonów zwykłych, z reguły wpływ wytrzymałości matrycy nie może być uwzględniony poprzez współczynnik wodno-cementowy. Rzeczywisty wskaźnik w/c , ze względu na możliwą absorpcję wody przez kruszywo porowate z mieszanki betonowej, różni się od nominalnego i jest niezwykle trudny do określenia. Oszacowania normowe [3], zakładające, że nasiąkliwość kruszywa lekkiego w rzeczywistym stanie zawilgocenia w mieszance betonowej odpowiada jego nasiąkliwości w wodzie po 1 godzinie, może dawać zaniżone jego wartości nawet o 33% [8], zależnie od stanu wilgotnościowego kruszywa, jego udziału objętościowego, właściwości reologicznych matrycy cementowej i nominalnego wskaźnika wodno-cementowego.

O ile przy projektowaniu betonów zwykłych dąży się do jak największej zawartości kruszywa w jednostce objętości betonu, o tyle w przypadku betonów lekkich takie kryterium doboru składu niekoniecznie jest właściwe. Porowate kruszywa sztuczne nie są bowiem ani najtańszym, ani najmocniejszym składnikiem betonu. Dlatego też ich zawartość w betonach stosowanych w praktyce waha w tak znacznym zakresie jak od 30 do 75% objętościowo. Ponadto, ze względu na lepszą przyczepność zaczynu cementowego do kruszyw lekkich, wpływ proporcji objętościowych obu tych składników na wytrzymałość betonu ma większe znaczenie niż w przypadku betonów zwykłych. Niestety wpływ ten nie jest tak oczywisty jak mogłoby się wydawać. Nie zawsze bowiem wzrostowi zawartości słabszego kruszywa towarzyszy spadek wytrzymałości betonu.



Rys. 4. Przykładowe zależności obciążenie – odkształcenie w próbie miążdżenia pojedynczych sferycznych ziaren ($d_{sr} = 8 \text{ mm}$) różnych kruszyw lekkich oraz kwarcytu



Rys. 5. Wpływ wytrzymałości matrycy cementowej (zaprawy) oraz rodzaju kruszywa grubego (4/8 mm) na wytrzymałość betonu

W przypadku gdy dochodzi do redukcji współczynnika wodno-cementowego w mieszance betonowej w wyniku absorpcji wody przez porowate kruszywo, wynikający z tego efekt wzmocnienia matrycy cementowej może zrekompensować zwiększony udział słabszego składnika, a nawet korzystnie wpłynąć na wytrzymałość całego kompozytu (rys. 6). Jedynie w przypadku stosowania kruszyw lekkich impregnowanych lub w pełni nasyconych wodą obowiązuje prosta zależność: wzrost udziału kruszywa porowatego wpływa na obniżenie wytrzymałości betonu.

Podsumowując, przy projektowaniu lekkich betonów kruszywowych konieczne jest uwzględnienie nie tylko wytrzymałości matrycy cementowej, ale przede wszystkim wytrzymałości kruszywa oraz jego udziału objętościowego, jak również wilgotności wstępnej i jej stanu. Natomiast wpływ strefy stykowej na kształtowanie wytrzymałości betonów lekkich w wielu przypadkach może zostać pominięty. W rezultacie tak złożonego sposobu kształtowania wytrzymałości betonów lekkich nie ma uniwersalnych metod analitycznego projektowania ich składu. Nawet bardzo złożone modele matematyczne, szczegółowo opisane w [9], nie są w stanie uwzględnić wszystkich czynników determinujących wytrzymałość betonów lekkich. Ponadto ustalenie parametrów takich modeli dla wszystkich dostępnych kruszyw lekkich oraz możliwych do wytworzenia matryc cementowych, nie jest realne. Zatem praktyczna ich przydatność przy projektowaniu składów betonów lekkich jest dosyć wątpliwa. Pozostaje zatem projektowanie metodą doświadczalną, w skrócie polegającą na doborze odpowiedniego rodzaju kruszywa lekkiego oraz iteracyjnym doborze składu matrycy cementowej i jej udziału w jednostce objętości betonu. Proces doświadczalnego projektowania betonów lekkich znacząco ułatwia znajomość właściwości i składów betonów wykonanych z takimi samymi czy podobnymi kruszywami.

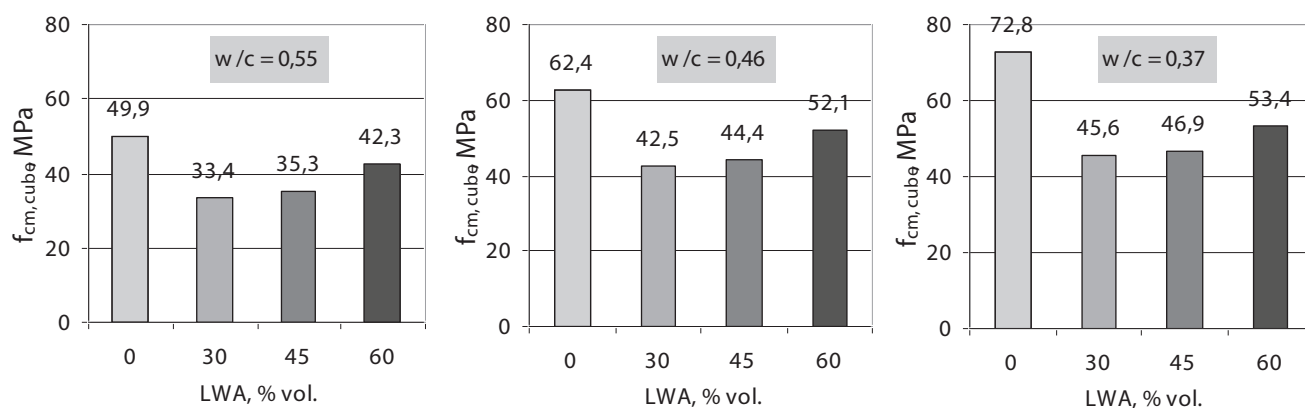
Ustalanie składu konstrukcyjnych betonów lekkich

dotąd dodatkowo komplikuje fakt, że w przeciwieństwie do betonów zwykłych pod uwagę powinny być brane równocześnie dwie cechy projektowe: wytrzymałość i gęstość betonu. Chociaż z reguły wzrostowi wytrzymałości betonów lekkich towarzyszy wzrost ich gęstości, nie jest prawdą, że są to cechy jednoznacznie ze sobą powiązane. Im kruszywo lekkie mocniejsze, tym dany poziom wytrzymałości betonu można osiągnąć przy niższej jego gęstości. Nawet nie zmieniając rodzaju zastosowanego kruszywa lekkiego, możliwe jest uzyskanie określonej wytrzymałości betonu, przy bardzo zróżnicowanych jego gęstościach. I na odwrót, określoną gęstość betonu można osiągnąć przy różnych poziomach jego wytrzymałości. Na przykład betony z kruszywem Pollytag mogą charakteryzować się gęstością 1700 kg/m^3 przy tak szerokim zakresie wytrzymałości jak od 45 do 65 MPa. Oczywiście, przy danej gęstości betonu, uzyskanie jego wyższej wytrzymałości wiąże się z zastosowaniem mocniejszej matrycy cementowej, użytej w mniejszej ilości.

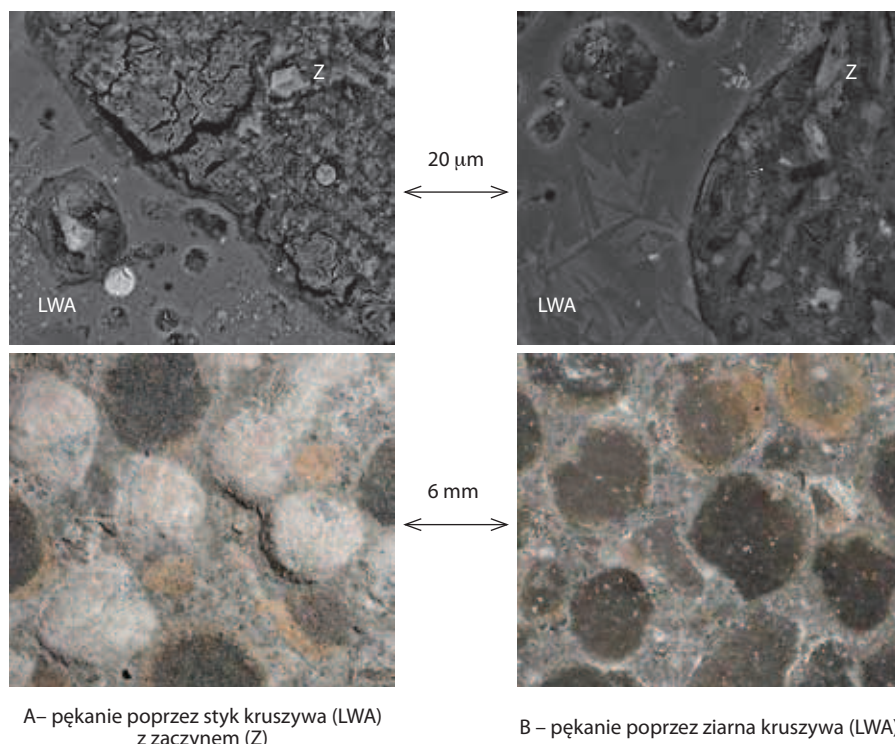
Szczegółowe zasady projektowania konstrukcyjnych betonów lekkich omówiono w monografii [9].

4. Technologia wykonywania konstrukcyjnych betonów lekkich

Bardziej złożona i czasochłonna technologia produkcji lekkich betonów kruszywowych wiąże się przede wszystkim z koniecznością podjęcia środków zapobiegających utracie urabialności mieszanki betonowej w wyniku absorpcji wody przez porowate kruszywo. W tym celu albo kruszywo lekkie poddaje się wstępnej impregnacji, albo, co częściej spotykane, wstępnie nawilża się go lub zwiększa ilość wody zarobowej o ilość wynikającą z nasiąkliwości kruszywa w wodzie po 1–48 h. Ta ostatnia z metod, zdecydowanie najłatwiejsza w realizacji, może jednak prowadzić do osłabienia strefy stykowej w betonach lekkich. Kruszywo



Rys. 6. Wpływ zawartości kruszywa LWA (Pollytag 6/12 mm, wstępna wilgotność $w = 17\%$, nasiąkliwość $W_{max} = 25\%$) na wytrzymałość betonu na ściskanie



A – pękanie poprzez styk kruszywa (LWA) z zaczynem (Z)

B – pękanie poprzez ziarna kruszywa (LWA)

Rys. 7. Wpływ wstępnej wilgotności kruszywa lekkiego i jej stanu na mikrostrukturę i sposób zniszczenia betonu: A: kruszywo wstępnie nasyczone lub nawilżone w stanie powierzchniowo-wilgotnym, B: kruszywo wstępnie suche lub nawilżone w stanie powietrzno-suchym

bowiem nie jest w stanie w krótkim czasie wykonywania mieszanki betonowej wchłonąć dodatkowej ilości wody, a jej nadmiar utrzymuje się w strefie stykowej. Zwiększona zawartość wody w dojrzewającym betonie, przy jego podwyższonej izolacyjności termicznej, dodatkowo sprzyja tworzeniu się wtórnego ettryngitu i towarzyszących mu mikrozarysowań (rys. 7). Ponadto w przypadku betonów z kruszywami lekkimi o dużej dynamice rozwoju nasiąkliwości w czasie do 2–3 h taka procedura może skutkować gromadzeniem się w strefie stykowej pęcherzyków powietrza wypartych z kruszywa przez zaabsorbowaną z mieszanki wodę. Oba mechanizmy w oczywisty sposób wpływają na osłabienie przyczepności zaczynu do kruszywa lekkiego, w wyniku czego pogorszeniu ulegają zarówno cechy mechaniczne betonu, jak i jego trwałość.

Odpowiedni proces wstępnego nawilżenia kruszywa lekkiego, chociaż bardziej kłopotliwy w realizacji, umożliwia uzyskanie stabilnej urabialności mieszanki betonowej i odpowiedniej szczelności strefy stykowej. Proces wstępnego nawilżenia kruszywa powinien być realizowany odpowiednio wcześniej, tak aby kruszywo było dozowane w stanie powietrzno-suchym i nienasyconym. W przypadku kruszyw o stosunkowo nieznacznej nasiąkliwości ($WA_{\max} < 10\%$) korzystne może być nawet ich stosowanie w stanie całkowicie suchym. Przy większych jednak nasiąkliwościach, charakteryzujących kruszywa lekkie produkowane w kraju, takie podejście jest technologicznie nieracjonalne, gdyż prowadziłoby do utraty

urabialności mieszanki lub wymuszałoby konieczność zastosowania znacząco większej ilości zaczynu i domieszek upłynniających. Należy zaznaczyć, że w przypadku betonów przewidzianych do transportu pompowego proces wstępnego nawilżenia prowadzony jest do pełnego nasycenia kruszywa, często w warunkach próżniowych, tak aby wyeliminować szczególnie duże w tym przypadku ryzyko spadku urabialności mieszanki czy niebezpieczeństwo zablokowania pompy.

Kolejność dozowania składników betonów lekkich też może mieć pewien wpływ na ich właściwości. Poprawie szczelności strefy stykowej sprzyja mieszanie w pierwszej kolejności nawilżonego kruszywa lekkiego wraz z cementem, a dopiero później dozowanie pozostałych składników: dodatków, piasku naturalnego i reszty wody zarobowej. Domieszki upłynniające powinny być stosowane z ostatnią partią wody zarobowej. W przeciwnym razie mogą być nieefektywnie absorbowane przez kruszywo, dodatkowo przyczyniając się do wzrostu absorpcji wody. Mieszanki wykonywane z kruszywami nie w pełni nasyconymi wymagają też dłuższego czasu mieszania i zagęszczania. W szczególności w przypadku mieszanek z kruszywami wykazującymi dużą dynamikę rozwoju nasiąkliwości w czasie po zmieszaniu składników konieczne może być wtórne mieszanie i/lub wtórne zagęszczanie. W przypadku kruszyw impregnowanych lub wstępnie nasyconych kolejność dozowania składników oraz procedura mieszania i zagęszczania nie ma większego znaczenia. Innym problemem technologicznym związanym

z wykonywaniem mieszanek betonów lekkich jest ich podatność na segregację składników, w szczególności podczas transportu i zagęszczania. Ryzyko takie przede wszystkim dotyczy mieszanek z lżejszymi odmianami kruszyw lekkich. Te jednak głównie stosowane są do produkcji prefabrykowanych elementów, których zagęszczanie z reguły prowadzi się z dociskiem aktywnym lub pasywnym zapobiegającym segregacji. Ponadto ograniczeniu segregacji sprzyja proces wstępnego nawilżenia kruszywa. W przypadku mieszanek, od których wymagana jest znaczna płynność, a które charakteryzują się dużą różnicą gęstości kruszywa i matrycy cementowej, dodatkowo można zastosować domieszki zwiększające lepkość. Stabilizacji mieszanek sprzyja również stosowanie dodatków mineralnych i domieszek napowietrzających. Wbrew pozorom uzyskanie samozagęszczalności betonów lekkich nie jest trudniejsze niż w przypadku betonów zwykłych. Samozagęszczalność betonów wyższej wytrzymałości, charakteryzujących się z założenia większą zawartością cementu, można osiągnąć zaledwie poprzez odpowiednio zwiększoną dawkę superplastyfikatora.

Należy zaznaczyć, że dzięki wodzie zakumulowanej w kruszywie porowatym, betony lekkie są mniej wrażliwe na pielęgnację zewnętrzną i w wielu przypadkach nie wymagają jej wcale. Natomiast proces wysychania betonów lekkich jest w związku z tym zdecydowanie dłuższy niż w przypadku betonów zwykłych i może mieć niekorzystny wpływ na ich właściwości użytkowe.

5. Właściwości konstrukcyjnych betonów lekkich

Lekkie betony kruszywowe, pomimo niskiej gęstości (do 2000 kg/m³), zależnie od rodzaju zastosowanego kruszywa mogą osiągać stosunkowo wysokie wytrzymałości na ściskanie (patrz tabela 1), odpowiednie do realizacji zarówno typowych, jak i bardzo odpowiedzialnych konstrukcji. Znane są przykłady realizacji obiektów budowlanych, w których zastosowano beton najwyższej przewidywanej normowo klasy wytrzymałości LC 80/88. Chociaż w praktyce rzadko kiedy uzasadniona jest konieczność stosowania wyższych wytrzymałości, dzięki zastosowaniu kruszyw lekkich nowej generacji oraz odpowiedniej modyfikacji składu betonów za pomocą dodatków i domieszek, istnieje możliwość podniesienia ich wytrzymałości nawet do 140 MPa.

Zastosowanie kruszywa porowatego powoduje, że w porównaniu do betonów z kruszywami zwykłymi tej samej klasy wytrzymałości, betony lekkie charakteryzują się: niższą gęstością (o 20–40%), niższym współczynnikiem przewodzenia ciepła, niższym współczynnikiem rozszerzalności termicznej, lepszą ognioodpornością i dźwiękochłonnością. Wykazują też niższy moduł sprężystości (o 15–60%) i większy skurcz wysychania (o 10–50%). Nie niesie on jednak zwiększonego ryzyka zarysowania

konstrukcji, co wiąże się z jego znacznym opóźnieniem oraz z większą jednorodnością strukturalną betonu. Natomiast należy zaznaczyć, że w przypadku betonów lekkich, ze względu na pielęgnację wewnętrzną, istnieje możliwość całkowitej eliminacji skurczu autogenicznego. Nierównomierne i wydłużone w czasie wysychanie elementów konstrukcyjnych z betonu lekkiego może być natomiast przyczyną niższej (o 5–20%) wytrzymałości na rozciąganie. Pod względem pękania betony lekkie zachowują się podobnie jak betony zwykłe. Jedynie przy ich bardzo niskich klasach (do LC 16/18) może istnieć konieczność przyjmowania przy projektowaniu większych wartości odkształceń od pękania.

Większa jednorodność strukturalna betonów lekkich jest przyczyną ich mniejszej podatności na zarysowania zarówno od obciążeń jak i oddziaływań zewnętrznych i wewnętrznych. W rezultacie betony te mogą pracować w konstrukcji w stanie niezarysowanym, co sprzyja ich większej odporności na obciążenia dynamiczne, cykliczne i długoterminowe, jak również podwyższonej trwałości w porównaniu z betonami zwykłymi. W szczególności betony lekkie mogą charakteryzować się wyższą mrozoodpornością oraz porównywalną przepuszczalnością dla cieczy i gazów, jednakże pod warunkiem odpowiednio ograniczonego poziomu wstępnej wilgotności kruszywa.

6. Podsumowanie

Szeroki asortyment kruszyw porowatych, zróżnicowane technologie wykonywania betonów oraz możliwość modyfikacji ich składu za pomocą dodatków i domieszek nowej generacji, czynią ze współczesnych konstrukcyjnych betonów lekkich grupę materiałów o bardzo zróżnicowanych właściwościach. Analiza aktualnego stanu wiedzy z zakresu lekkich betonów kruszywowych, oparta na wieloletnich badaniach laboratoryjnych prowadzonych w różnych ośrodkach badawczych na świecie, jak również długoterminowych badaniach realizowanych na istniejących konstrukcjach, wskazuje, że betony te mogą stanowić nowoczesny materiał konstrukcyjny, będący korzystną alternatywą dla betonów na kruszywach zwykłych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://www.oilandgas360.com>
- [2] PN-EN 13055-1. Kruszywa lekkie
- [3] PN-EN 206. Beton: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [4] PN-EN 1992-1. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu
- [5] Nielsen U., Monteiro P., GjØrv O., C&CR, 1995, tom 25, nr 2, str. 276–280
- [6] Yang C., C&CR, 1997, tom 27, nr 7, str. 1021–1030
- [7] Chandra S., Berntsson L., Lightweight aggregate concrete, Noyes Publications, New York, 2003
- [8] Domagała L., Konstrukcyjne lekkie betony kruszywowe, monografia, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2014
- [9] Domagała L., Procedia Engineering, 2015, tom 108, str. 206–213