

**SCIENTIFIC  
STUDIES**  
Monographs

**PRACE  
NAUKOWE**  
Monografie

Paweł Lewiński, Zbigniew Fedorczyk

**WŁAŚCIWOŚCI  
MECHANICZNE BETONU  
KONSTRUKCYJNEGO  
NA LEKKIM KRUSZYWIE SPIEKANYM**

MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL CONCRETE  
WITH LIGHTWEIGHT SINTERED AGGREGATE



Instytut Techniki Budowlanej

Warszawa 2025

## KOMITET REDAKCYJNY

Redaktor naczelny  
Zastępcy redaktora naczelnego

Sekretarz  
Członkowie

prof. dr hab. inż. LECH CZARNECKI, dr h.c.  
prof. dr inż. LESŁAW BRUNARSKI  
dr hab. inż. JADWIGA FANGRAT, prof. Instytutu  
dr MICHAŁ GAJOWNIK  
prof. dr hab. inż. JACEK NURZYŃSKI  
mgr inż. JAN SIECZKOWSKI  
dr inż. SEBASTIAN WALL

Recenzenci:

prof. zw. dr hab. inż. JAN BILISZCZUK  
prof. dr hab. inż. PAWEŁ ŁUKOWSKI

Redakcja  
dr MICHAŁ GAJOWNIK

Opracowanie komputerowe  
AnnGraf ANNA SZELĄG

© Copyright by Instytut Techniki Budowlanej  
Warszawa 2025

*Czteryśta siedemdziesiąta ósma pozycja*  
*„Prac Naukowych ITB”*

ISBN 978-83-249-8690-3, 978-83-249-8691-0 (PDF)

Wydawca i Autorzy dolożyli wszelkich starań, aby publikowane informacje pochodziły z rzetelnych źródeł. Wydawca nie ponosi odpowiedzialności ani też nie zaciąga zobowiązań w wyniku wykorzystania przez użytkowników treści niniejszej publikacji. W szczególności nie ponosi odpowiedzialności w stosunku do czytelników i/lub strony trzeciej za jakiegokolwiek poniesione straty, wydatki i szkody bezpośrednie i pośrednie, łącznie z utratą zysku i innych korzyści majątkowych, które mogły powstać lub być związane bezpośrednio lub pośrednio z treściami opublikowanymi, w tym ewentualnymi błędami lub pominięciami zawartymi w publikowanych materiałach.



**Instytut Techniki Budowlanej**

Dział Wydawnictw Naukowych  
00-611 Warszawa, ul. Filtrowa 1, tel.: 22 843 35 19  
e-mail: [wydawnictwa@itb.pl](mailto:wydawnictwa@itb.pl), [www.itb.pl](http://www.itb.pl)

# SPIS TREŚCI

<i>Streszczenie</i> .....	7
<i>Abstract</i> .....	8
1. Wstęp .....	9
1.1. Sformułowanie problemu w świetle literatury przedmiotu .....	9
1.2. Zagadnienia reologiczne betonu kruszywowego .....	14
2. Program badań .....	19
2.1. Ogólny cel i zakres badań .....	19
2.2. Charakterystyka kruszywa i mieszanek betonowych .....	19
2.3. Zakres badań laboratoryjnych .....	22
2.4. Rodzaje maszyn wytrzymałościowych .....	23
3. Wyniki badań wytrzymałościowych .....	27
3.1. Wyniki badań wytrzymałości betonu na ściskanie .....	27
3.2. Wyniki badań wytrzymałości betonu na rozciąganie .....	30
3.3. Wyniki badań modułu sprężystości betonu lekkiego w świetle modeli materiałowych .....	36
3.4. Wyniki badań mrozoodporności .....	41
3.5. Oszacowanie niepewności wyników badań wytrzymałościowych .....	41
4. Wyniki badań odkształceń reologicznych .....	45
4.1. Wyniki badań odkształceń skurczu .....	45
4.2. Harmonogram badań odkształceń pęczania betonu oraz częstość i wielkość zmian obciążenia dwóch rodzajów betonów lekkich .....	48
4.3. Wyniki badań odkształceń pęczania pod wpływem obciążeń cyklicznych .....	49
4.4. Oszacowanie niepewności wyników badań odkształceń reologicznych .....	52
5. Przegląd, analiza i adaptacje modeli reologicznych betonu .....	55
5.1. Modele rozwoju siecznego modułu sprężystości betonu na kruszywie lekkim .....	55
5.2. Modele rozwoju skurczu betonu na kruszywie lekkim .....	57
5.3. Modelowanie i parametryzacja właściwości reologicznych betonu na kruszywie lekkim .....	63
6. Implementacje modeli reologicznych i porównanie z wynikami badań .....	77
6.1. Naprężenia w próbkach w poszczególnych cyklach obciążeń .....	77
6.2. Ewaluacja modeli rozwoju modułu sprężystości betonu .....	78
6.3. Ewaluacja modeli rozwoju skurczu betonu na kruszywie lekkim .....	79
6.4. Ewaluacja modeli rozwoju odkształceń pęczania betonu na kruszywie lekkim .....	80
7. Podsumowanie wyników i wnioski końcowe .....	93
Bibliografia .....	99

Autorzy składają serdeczne podziękowania wszystkim, którzy przyczynili się do powstania monografii.

Dziękujemy Dyrekcji Instytutu Techniki Budowlanej za możliwość realizacji wyłonionego w drodze konkursu tematu naukowego NZK-100, będącego podstawą do tego opracowania.

Dziękujemy kierownictwu Zakładu Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki i Betonu za stworzenie warunków technicznych do realizacji badań doświadczalnych, będących naukową podstawą do opracowania monografii.

Szczególne podziękowania kierujemy do tych byłych i obecnych pracowników Zakładu Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki i Betonu, których pomoc w przygotowaniu badań i wykonaniu zdjęć przyczyniła się do powstania tej monografii. W tym zakresie istotne podziękowania należą się Pani mgr inż. Annie Rogowskiej i Panu inż. Łukaszowi Zacharskiemu.

Szanownym Recenzentom dziękujemy za inspirację, motywację i cenne wskazówki, które pomogły w napisaniu tej książki.

Również Komitetowi Redakcyjnemu *Prace Naukowe* i Działowi Wydawnictw Naukowych ITB dziękujemy za wsparcie i pomoc w procesie powstawania monografii. Jesteśmy wdzięczni za każdy cenny wkład i sugestie.

# **WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE BETONU KONSTRUKCYJNEGO NA LEKKIM KRUSZYWIE SPIEKANYM**

## *Streszczenie*

Celem pracy jest określenie doraźnych i reologicznych właściwości mechanicznych betonu lekkiego na wybranego typu kruszywie spiekany. Materiał do wytwarzania kruszywa pochodzi z recyklingu popiołów z elektrowni, po przetworzeniu których uzyskuje się granulaty, jest to więc produkt ekologiczny. Program badań parametrów wytrzymałościowych i właściwości reologicznych dotyczył betonu na kruszywie lekkim mającym dość wysoką odporność na miazdzenie, przekraczającą 6 MPa. Badania betonu przeprowadzono na dwóch mieszankach o zbliżonej recepturze, różniące się głównie wskaźnikiem W/C. Przedstawiono sposób badania pełzania i skurczu betonu lekkiego na kruszywie spiekany oraz przeanalizowano siedem modeli konstytutywnych tego zjawiska przy obciążeniach cyklicznych. W trakcie badań potwierdzono dość wysoką klasę wytrzymałości betonu lekkiego rozważanego typu. Średni współczynnik pełzania uzyskany z badań próbek betonu na lekkim kruszywie spiekany otrzymano o wielkości tego samego rzędu, co w przypadku betonu zwykłego. Dokonano oceny poszczególnych modeli konstytutywnych w świetle wyników badań odkształceń pełzania i skurczu obu betonów. Znajomość przebadanych parametrów jest niezbędna przy projektowaniu konstrukcji z betonu według normy EC2, a zwłaszcza przy projektowaniu konstrukcji sprężonych wykonanych z badanego betonu lekkiego na kruszywie spiekany.

# **MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL CONCRETE WITH LIGHTWEIGHT SINTERED AGGREGATE**

## *Abstract*

The aim of the work is to determine the short-term and rheological mechanical properties of lightweight concrete based on a selected type of sintered aggregate. The material for producing the aggregate comes from recycling of ashes from power plants, which is then processed into granulate, so it is an ecological product. The testing program for strength parameters and rheological properties concerned concrete based on lightweight sintered aggregate with a relatively high crushing resistance, exceeding 6 MPa. The concrete tests were carried out on two mixtures with a similar recipe, differing mainly in the W/C ratio. A method of testing the creep and shrinkage of lightweight concrete with sintered aggregate was presented and seven constitutive models of this phenomenon under cyclic loads are analyzed. The tests confirmed the increased strength class of the lightweight concrete under consideration. The average creep coefficient obtained from tests on concrete samples made with lightweight sintered aggregate was of the same order of magnitude as for plain concrete. Particular constitutive models were evaluated in light of the results of creep and shrinkage tests for both types of concrete. Knowledge of the tested parameters is necessary for the design of concrete structures according to the EC2 standard, especially prestressed structures made the tested lightweight concrete with sintered aggregate.

# 1. WSTĘP

## 1.1. Sformułowanie problemu w świetle literatury przedmiotu

Lekkie betony kruszywowe (LWAC) zwykle postrzegane są jako betony o niższych wytrzymałościach, a ich zakres zastosowań do celów konstrukcyjnych często uważa się za ograniczony. Tymczasem niższy ciężar własny konstrukcji, jak wynika z analiz statyczno-wytrzymałościowych, w wielu przypadkach z powodzeniem rekompensuje nieco niższą wytrzymałość mechaniczną. Z kolei nowe technologie wytwarzania pozwalają na produkcję kruszywa o podwyższonej odporności na miażdżenie. Wyniki wymiarowania konstrukcji z betonu na lekkim kruszywie spiekany zawarte w znanych z literatury przykładach obliczeniowych oraz analiza techniczno-ekonomiczna tego typu rozwiązań uzasadniają stosowanie omawianego typu betonu lekkiego zamiast betonu zwykłego. Warunkiem wytworzenia takiego betonu lekkiego jest dostępność kruszywa spiekane o odpowiedniej wytrzymałości. Drugim warunkiem stosowania lekkiego betonu kruszywowego w konstrukcjach jest wiarygodne określenie jego właściwości nie tylko doraźnych – głównie wytrzymałościowych, ale i reologicznych, przy czym zagadnienia te omawiane są w dalszej części pracy. Biorąc pod uwagę powyższe uwarunkowania przeanalizowano dostępność lekkiego kruszywa spiekane w Polsce.

Na rynku krajowym dostępne są różne rodzaje kruszyw, ale przyjęte kryterium doboru kruszywa lekkiego do betonu konstrukcyjnego o podwyższonej wytrzymałości zawęża wachlarz możliwych rozwiązań. Zestawienie charakterystyk najczęściej spotykanych w Polsce kruszyw lekkich podano w tablicach 1 i 2. W celach porównawczych poszczególne typy kruszyw ponumerowano od 1 do 5. Dotychczas na rynku krajowym dostępne były kruszywa sztuczne nr 4 i nr 5 ze spiekanych glin pęczniejących oraz kruszywa nr 1 i nr 2 ze spiekanych popiołów lotnych, z tym że produkcję kruszywa nr 2 wstrzymano w 2015 r. Kruszywo nr 3 również nie jest już produkowane. Z kolei popiołoporytowe kruszywo nr 1 produkowane jest od 2015 r. (por. [5, 51, 63, 64, 77, 91]) i zostało wdrożone do praktyki projektowej oraz wykonawstwa, m.in. w wyniku serii prac badawczych, które omówiono niżej, w tym implementacji norm [107] i [108], zastępujących normę [105]. Zgodne z normą [108] zostało

ono dopuszczone do stosowania na obszarze UE. Pomimo, że właściwości kruszyw nr 1 i nr 2 są porównywalne, to produkuje się je na podstawie odmiennych technologii, przy czym produkcja kruszywa nr 2 przestała być opłacalna. Kruszywo nr 1 produkowane jest przy wykorzystaniu technologii LSA (ang. *Lightweight Sintered Aggregate*).

Tablica 1. Charakterystyka kruszyw lekkich stosowanych do produkcji betonów

Rodzaj kruszywa	Gęstość ziaren [kg/m <sup>3</sup> ]	Gęstość nasypowa [kg/m <sup>3</sup> ]	Wytrzymałość średnia betonu $f_{cm,cube}$ [MPa]	Wytrzymałość maksymalna betonu $f_{cm,cube}$ [MPa]
Kruszywo nr 1	1300–1400	550–900	20–40	90
Kruszywo nr 2	1250–1450	650–900	20–40	90
Kruszywo nr 3	950–1100	400–900	15–25	40
Kruszywo nr 4	550–1000	250–550	10–20	25
Kruszywo nr 5	500–900	250–650	10–20	25

Tablica 2. Podstawowe właściwości kruszyw

Rodzaj kruszywa	Nasiąkliwość po 24 godzinach [%]	Odporność na miazdzenie [MPa]	Fracje [mm]
Kruszywo nr 1	15–20	4,0–7,0	0/2; 1/4; 4/10
Kruszywo nr 2	20–25	6,0–10,0	0/4; 0,5/4; 2/5; 4/8; 6/12
Kruszywo nr 3	20–30	2,0–6,0	0/4; 3/10; 8/16; 16/31,5
Kruszywo nr 4	30–40	0,75–4,0	0/2; 0/4; 0/5; 2/4; 4/10; 10/20
Kruszywo nr 5	10–20	1,0–4,0	0/2; 1/4; 4/8; 8/16

Ponieważ produkcja kruszywa nr 2 została wstrzymana, można stwierdzić, że jedynie kruszywo nr 1 jest osiągalnym w Polsce rodzajem kruszywa lekkiego do betonu konstrukcyjnego o podwyższonej wytrzymałości i z tego względu

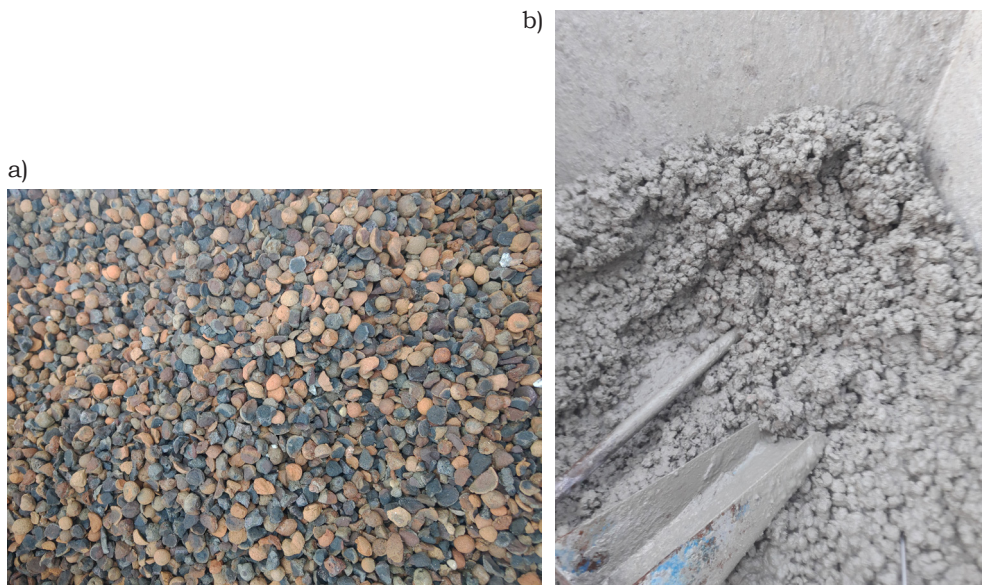
zostało ono wykorzystane w badaniach opisanych w monografii. Lekkie, wysokowytrzymałe kruszywo spiekane, które wykorzystano do betonu będącego przedmiotem badań, jest kruszywem ceramicznym, popiołoporytowym, wytwarzanym według krajowej technologii. Jest ono lekkie, porowate i ma wysoką wytrzymałość mechaniczną, gdyż jego odporność (wytrzymałość) na miazdzenie, podobnie jak kruszywa nr 2, może przekraczać 6,0 MPa (stosownie do jego frakcji). Kruszywo to powstaje według technologii LSA, w wyniku spiekania w piecu obrotowym w temperaturze 1000–1200°C odpowiednio przygotowanych minerałów antropogenicznych w kontrolowanych warunkach, a następnie rozfrakcjonowania i ewentualnie przekruszenia. Głównym surowcem wykorzystywanym do wytwarzania kruszywa jest popiół powstały ze spalania węgla kamiennego w kotłach mialowych [64]. Dzięki temu popiół jest recyklingowany i może zostać z powodzeniem użyty ponownie. Ponadto, proces spiekania powoduje, iż kruszywo jest mniej nasiąkliwe i mrozoodporne. Ponieważ jest to produkt z recyklingu, może być uznawany za ekologiczny. Wykorzystywanie takich materiałów to jeden z celów współczesnego budownictwa. Tego rodzaju kruszywo może być używane zarówno w budownictwie, jak też w drogownictwie i ogrodnictwie. Do tej pory opisano 28 jego zastosowań, m.in. jako kruszywo do betonu, składnik ceramiki budowlanej, wypełniacz do warstw bitumicznych, do podbudowy dróg, podłoże do upraw hydroponicznych lub do wykonania tzw. „zielonych dachów”.

Kruszywo spiekane (przekruszone) i mieszankę betonową na tym kruszywie pokazano na rysunku 1. Szczegółową charakterystykę kruszywa nr 1 o składzie wykorzystanym w badaniach betonu lekkiego wykonanego z udziałem tego kruszywa o frakcji 4/10, o gęstość ziaren 1417 kg/m<sup>3</sup>, zamieszczono w rozdziale 2.2.

Betony lekkie z racji swoich właściwości znalazły szerokie zastosowanie w budownictwie, m.in. w konstrukcjach wysokościowych, prefabrykowanych, mostach i platformach wiertniczych. Ponieważ betony lekkie stanowią grupę materiałów o zróżnicowanych właściwościach, potrzebna jest dokładna weryfikacja ich cech mechanicznych (por. [74, 121]). Betony lekkie charakteryzują się większą jednorodnością strukturalną w stosunku do betonów zwykłych, wynikającą ze szczelnej budowy strefy stykowej pomiędzy zaczynem a kruszywem. Wynika to z budowy ziaren kruszyw sztucznych.

Publikacje przeglądowe dotyczące betonu konstrukcyjnego wykonywanego z zastosowaniem lekkiego kruszywa spiekanego produkowanego z popiołów lotnych to m.in. prace [1] i [73]. Właściwości betonów wykonywanych na kruszwykach lekkich stosowanych w budownictwie opisano również w wielu opracowaniach krajowych, np. w monografii [31]. Publikacja [56] zawiera przegląd

prac w zakresie samozagęszczalnego betonu LWAC, przy czym zagadnienie to omawiano także w artykułach [20, 26, 56, 57, 65, 81, 99, 102]. Wpływ różnych właściwości kruszyw lekkich (fizycznych, chemicznych itd.) na cechy mechaniczne betonu wykonanego przy użyciu tych kruszyw opisano, na podstawie obszernych badań doświadczalnych, m.in. w pracach [36, 50, 75, 76, 90].



*Rys. 1. Kruszywo spiekane  
a) wygląd, b) mieszanka betonowa na tym kruszywie*

Betony lekkie ze względu na odmienną strukturę z reguły zachowują się w inny sposób pod wpływem obciążenia i 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 przypadku typowych betonów zwykłych na kruszywie łamanym stadium I przechodzi w II przy poziomie naprężeń wynoszącym około 30–40% wytrzymałości betonu na ściskanie, natomiast stadium II przechodzi w III przy naprężeniach wynoszących około 70–90% tej wytrzymałości. W betonach z kruszywem lekkim pierwsze rysy od obciążenia pojawiają się dopiero przy wyteżeniu wynoszącym około 85–90%. Z badań Domagały [31] wynika, że dla betonów z kruszywem wykonanym z popiołów prostoliniowy przebieg zależności  $\sigma$ – $\varepsilon$  sięga do 90% wyteżenia. Zmagazynowana przez to duża energia sprężysta podczas obciążenia

powoduje gwałtowną propagację rys, która nieodwracalnie prowadzi do nagłego zniszczenia materiału.

Z uwagi na charakter relacji naprężeniowo-odkształceniowych w przypadku betonu konstrukcyjnego na lekkim kruszywie spiekany, w niniejszej monografii nie są omawiane jego cechy sprężysto-plastyczne, ponieważ ich udział jest szczątkowy. Skupiono się na cechach sprężysto-kruchych oraz reologicznych.

W przypadku betonów zwykłych zniszczenie następuje zazwyczaj w strefie stykowej (kruszywo – zaczyn), która jest najsłabszym ogniwem struktury betonu, gdzie równocześnie występują największe wyężenia. W rezultacie w betonach zwykłych zniszczenie następuje poprzez odspojenie kruszywa. W betonach lekkich rysa niszcząca przebiega zazwyczaj poprzez kruszywo, ponieważ w betonach tych kruszywo stanowi najsłabszy element struktury kompozytu, w wyniku czego betony lekkie są bardziej kruche. Przy tych samych proporcjach składników mieszanki betonu zwykłego klasy C i lekkiego klasy LC w przypadku betonu lekkiego uzyskanie tej samej wytrzymałości kostkowej  $f_{ck}$  wymaga zwiększonej klasy wytrzymałości cementu. Wpływ na wytrzymałość betonów lekkich mają te same czynniki, co w przypadku betonów zwykłych, czyli: stosunek W/C, zawartość cementu oraz wiek betonu. Niemniej jednak ze względu na dużą absorpcję wody zarobowej przez kruszywo trudno jest oszacować całkowity wpływ wskaźnika W/C na wartość wytrzymałości betonu na ściskanie. Moduł Younga betonu, będącego dwuskładnikowym kompozytem, uzależniony jest od parametrów zarówno kruszywa, jak i zaczynu, ich udziałów objętościowych oraz wzajemnej przyczepności. Ze względu na mniejszą gęstość w stosunku do betonu zwykłego beton lekki charakteryzuje się również znacznie niższym siecznym modułem sprężystości  $E_{cm}$ .

Szereg analiz fizyko-chemicznych betonów typu LWAC z kruszywem produkowanym według technologii LSA (por. prace [63, 64, 77]) wraz z porównaniami w zakresie zastosowań innych lekkich kruszyw sztucznych, przeprowadzili badacze z Politechniki Białostockiej (zob. prace [24, 42–44, 79, 80]), Politechniki Wrocławskiej i Politechniki Warszawskiej w Płocku (por. [51]). Obszerne badania elementów stropowych wykonanych przy użyciu betonów typu LWAC z omawianym kruszywem przeprowadzili naukowcy z Politechniki Łódzkiej pod kierunkiem Urbana (zob. prace [38–41, 92, 97]).

Zasadnicze badania właściwości betonu lekkiego na kruszywie spiekany (nr 1) w laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej [31–35, 67–70, 86, 93–96] rozpoczęto w roku 2016. Celem tych badań było określenie parametrów mechanicznych betonu na próbkach, tj. wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie (w tym przy zginaniu), a także określenie rozwoju modułu sprężystości, skurczu i pęcznienia

betonu w czasie. Wyniki powyższych badań wskazują na to, że bez istotnych utrudnień można uzyskać odpowiednio wysokie wytrzymałości betonu lekkiego na ściskanie do zastosowań w konstrukcjach sprężonych kablobetonowych. Cytowane wyniki badań wskazywały ponadto na niski współczynnik pełzania, co ma duże znaczenie w elementach zginanych dużej rozpiętości i pozytywnie prognozuje zastosowanie badanego betonu w konstrukcjach i elementach sprężonych. Z analizy przeprowadzonej w niniejszej pracy wynika, że dane te wymagają dodatkowego potwierdzenia doświadczalnego, przy czym różnice wyników badań wykonanych w PK i w ITB wynikają z kilku przyczyn, m.in. z przyjęcia odmiennych metodologii (badania ITB wykonano ściśle według procedur normowych lub według instrukcji ITB).

Wyniki badań doraźnych i reologicznych, jakim poddawany był konstrukcyjny beton lekki na kruszywie spiekany w okresie do 60 dni wieku betonu (próbek oznaczonych jako LC1 i LC2), zostały opublikowane w pracach Rogowskiej i Lewińskiego [83–85], zaś wyniki badań tego betonu lekkiego w okresie do 722 dni czasu obciążenia, oznaczonego jako LC1 oraz w okresie do 716 dni czasu obciążenia, oznaczonego jako LC2, opublikowano w pracach Lewińskiego, Fedorczyka, Zacharskiego i Rogowskiej [58, 59]. Wymienione badania, wykonywane zgodnie z odpowiednimi normami i na odpowiednich urządzeniach, wskazywały na większe odkształcenia skurczu i pełzania niż badania w Politechnice Krakowskiej, jednak możliwości konstrukcyjnego zastosowania betonu lekkiego na kruszywie spiekany również oceniono pozytywnie.

## **1.2. Zagadnienia reologiczne betonu kruszywowego**

Na temat lekkich betonów kruszywowych powstało wiele obszernych publikacji, m.in. monografia [25]. Zostały w niej zaprezentowane właściwości kruszyw oraz betonów lekkich powstałych m.in. na bazie kruszyw wytwarzanych z popiołów. Na całym świecie materiały te są cenione zarówno przez naukowców, jak i projektantów. W monografii [31] szczegółowo opisano właściwości betonów lekkich, w tym betonów na podobnych kruszywach, jakie są przedmiotem badań (w chwili opublikowania monografii [31] kruszywo nr 1 nie było jeszcze produkowane). Badania reologiczne tych betonów prowadzone w Politechnice Krakowskiej omówiono w rozdziale 1.1. Przegląd charakterystyki pełzania betonu i jego ocenę w przypadku betonu lekkiego o wysokiej wytrzymałości zawarto w publikacji [49]. Część badań przeprowadzonych w Politechnice Krakowskiej miała na względzie wyraźne cele aplikacyjne dotyczące konstrukcji sprężonych, co opisano w wielu pracach realizowanych głównie pod kierunkiem Szydłowskiego [62, 69, 70, 82, 86, 93–96].

Długotrwałe odkształcenia niesprężyste betonu pod obciążeniem cyklicznym były przedmiotem badań wielu znanych autorów. W pracach Whaley'a i Neville'a [74, 100] wykazano, że obciążenia cykliczne przyspieszają narastanie odkształceń niesprężystych betonu w porównaniu z obciążeniami statycznymi. W pracy [48] teoretyczna zależność opisująca pełzanie statyczne została uogólniona i przekształcona tak, że pełzanie cykliczne można odnieść do pełzania statycznego w funkcji zakresu naprężeń oraz czasu. Bażant i Panula w serii wieloetapowych badań (np. [7, 11, 12]) zastosowali techniki optymalizacyjne, aby dopasować liczne dane doświadczalne dostępne w literaturze przedmiotu i zaproponowali praktyczny model, znany jako model BP, do przewidywania pełzania i skurczu betonu z uwzględnieniem składu mieszanki betonowej, wytrzymałości na ściskanie, wieku obciążenia, warunków środowiskowych, wielkości i kształtu próbek itp. Badania te dały wyniki dokładniejsze, niż np. obowiązujące wówczas formuły według ACI czy CEB-FIP, co przyczyniło się do powstania dokładniejszych modeli wykorzystanych w późniejszych normach projektowania. W pracy [21] badano wpływ częstotliwości cykli obciążenia na przebieg relaksacji naprężeń. Wzrost pełzania w wyniku cyklicznych zmian wilgotności jest formułowany m.in. na podstawie założeń teorii dyfuzji, co znalazło swoje zastosowanie w pracy [25]. W pracy [53] przedstawiono procedurę obliczeniową prognozowania ugięć belek żelbetowych poddanych wielokrotnemu obciążeniu. Przyjęto półempiryczny model konstytutywny typu BP w celu uwzględnienia skutków pełzania (podstawowego, wysychania i cyklicznego) oraz skurczu. W artykule [54] przedstawiono program doświadczalny i jego wyniki dotyczące przyczepności zwykłych prętów zbrojeniowych do betonu na kruszywie lekkim przy obciążeniu cyklicznym. Teoria cyklicznego pełzania betonu oparta jest na prawie, które sformułowali Paris i Erdogan [78], a które dotyczy konstrukcji poddanych powtarzalnym obciążeniom zmiennym w dłuższych odstępach czasu, które z kolei prowadzą do wzrostu mikropeknięć zmęczeniowych przy obciążeniach podkrytycznych [8]. Badania pełzania dojrzewającego betonu poddanego naprężeniom ścisakającym i rozciągającym przedstawiono w pracy [87]. Z analizy porównawczej zachowania się betonu pod wpływem pełzania przy ścisakaniu i przy obciążeniach cyklicznych [13, 26, 52] wynika, że odkształcenia od obciążeń cyklicznych są znacznie większe niż odkształcenia pełzania, pomimo podobnych średnich poziomów naprężeń, a ponadto cytowana publikacja [26] dotyczy również obciążeń o wysokiej częstotliwości.

Zjawiska skurczu betonu typu LWAC, w tym rysy skurczowe, analizowano w wielu pracach, m.in. [4, 14, 28, 55], a zjawisko wczesnych naprężeń termiczno-skurczowych, powstających wskutek wydzielania się ciepła hydratacji podczas procesu wiązania betonów typu LWAC, analizowano w publikacjach [72, 88, 89,

98]. Zjawiska skurczu i pełzania betonu typu LWAC były też przedmiotem prac [29, 30, 45, 47, 61, 75, 76, 99, 104]. Wpływ efektu skali na wartości wytrzymałości na ściskanie próbek rdzeniowych betonu na kruszywie lekkim opisano w artykule [35]. Badano także zjawisko pełzania lekkiego betonu kruszywowego zbrojonego włóknem stalowym przy rozciąganiu, np. w publikacji [103].

W monografii Wojewódzkiego i in. [101] podano propozycje modelowe w zakresie funkcji relaksacji i opisu trójosiowego stanu naprężenia w warunkach pełzania, co ostatnio podaje także *fib* MC 2020 [126]. Wpływ różnych czynników na reologiczne właściwości betonu został szczegółowo opisany w wielu wydawnictwach, w tym monograficznych Biliszczuka (zob. m.in. [15–19]), o czym wspomina się w dalszych rozdziałach monografii. Obszerne i dość szczegółowe przeglądy modeli konstytutywnych w zakresie reologii betonu wraz z ich analizą zawierają monografie Mitzela [71] i nowsza Brunarskiego [23].

W Instytucie Techniki Budowlanej (zob. prace [58, 59, 83–85]) opracowano program badań parametrów wytrzymałościowych i właściwości mechanicznych betonu lekkiego na kruszywie spiekany (nr 1), który jest porowatym kruszywem ceramicznym o wysokiej wytrzymałości mechanicznej, a jego odporność na miazdzenie może (zależnie od jego frakcji) przekraczać 6,0 MPa. Przeprowadzenie badań zaplanowano na dwóch mieszankach betonowych, gdyż w okresie rozpoczęcia badań autorzy monografii mieli do dyspozycji tylko dwie pelzarki, na których można było badać próbki jedynie z dwóch mieszanek. Z tego względu przeprowadzono analizę literaturową w celu doboru takich dwóch mieszanek betonowych, aby badania miały charakter reprezentatywny, zarówno w zakresie samych badań betonu lekkiego, jak i jego zastosowań w konstrukcjach sprężonych. W wyniku przeglądu literaturowego przyjęto składy mieszanek betonowych (zgodne z technologią LSA) jako receptury już zoptymalizowane, takie same, jakie wykorzystano w badaniach prowadzonych w Politechnice Krakowskiej (zob. [67–70, 93–96]). Sposób doboru mieszanek betonowych oraz istotne ograniczenia w tym zakresie omówiono szczegółowo w rozdziale 2.2.

Przedstawiony w niniejszej monografii program badań i proces badawczy właściwości reologicznych betonu lekkiego na kruszywie spiekany dotyczył zachowania się tego betonu przy obciążeniach cyklicznych o bardzo niskiej częstotliwości, toteż podczas badań nie występowały efekty dynamiczne. Badania betonu lekkiego kruszywowego na rozciąganie, z racji braku norm i trudności w ich prowadzeniu, wykonuje się dosyć rzadko i dotychczas brakuje miarodajnych wyników w tym zakresie [64]. Z tego względu w celu realizacji programu badań wykorzystano m.in. Instrukcję ITB nr 194/98 [22].

Znajomość badanych parametrów jest niezbędna przy projektowaniu skomplikowanych konstrukcji inżynierskich wykonanych z lekkiego betonu

kruszywowego, w tym elementów i konstrukcji sprężonych. Ponadto przy projektowaniu tego rodzaju konstrukcji, zwłaszcza sprężonych, ważne jest przyjmowanie sprawdzonych danych, więc bardzo istotne jest, aby procedury badawcze były oparte na właściwych i aktualnych dokumentach, co nie zawsze ma miejsce. Badania laboratoryjne w ITB (z przyczyn sprzętowych) przeprowadzono w odniesieniu do dwóch mieszanek betonu lekkiego, ponieważ jednak tylko dwie receptury takich mieszanek betonowych okazały się właściwe z uwagi na wymogi technologii LSA, toteż należy je uznać za reprezentatywne. Uzyskane wyniki doświadczalne można uznać za miarodajne w przypadku projektowania konstrukcji elementów sprężonych wykonanych z betonu na lekkim kruszywie produkowanym w Polsce, zaś w świetle danych literaturowych obie mieszanki odpowiednio przygotowane z punktu widzenia technologii LSA zastosowano w praktyce (zob. [93–96]), gdyż tak zaprojektowane betony zostały wykorzystane przy projektowaniu konstrukcji sprężonych stropów kablobetonowych.

## **2. PROGRAM BADAŃ**

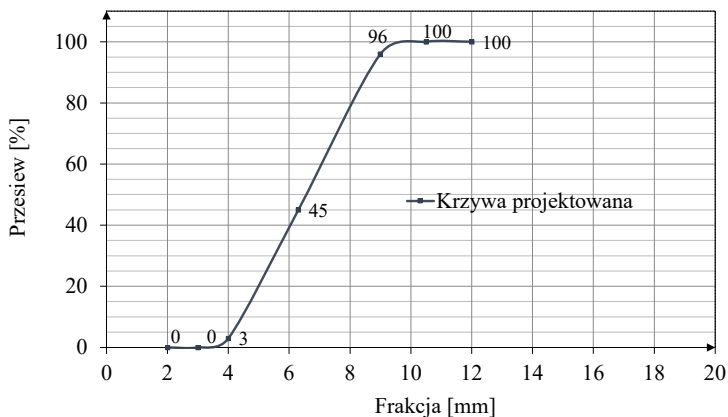
### **2.1. Ogólny cel i zakres badań**

Podstawowym celem pracy badawczej było określenie długotrwałych właściwości mechanicznych betonu lekkiego na specjalnym kruszywie ceramicznym spiekany, co przeprowadzono dla dwóch ściśle określonych mieszanek takiego betonu, jak wyjaśniono we wstępie. Celem badań na etapie początkowym było określenie doraźnych właściwości mechanicznych betonu w zakresie jego wytrzymałości i sprężystości, zaś celem badań długotrwałych – określenie właściwości reologicznych w zakresie zmian cech sprężystych, odkształceń pełzania i skurczu. Tak sformułowane cele pracy zdeterminowały program badań, który objął zatem oznaczenie właściwości doraźnych i reologicznych betonu. W ramach badań doraźnych oznaczono wytrzymałość na ściskanie kostek betonowych, a za pomocą próbek walcowych: wytrzymałość słupową, sieczny moduł sprężystości betonu oraz wytrzymałość na rozciąganie osiowe, a ponadto wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu kostek betonowych i wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu beleczek próbnych – na podstawie norm zharmonizowanych serii PN-EN 12390 [112–119]. W zakresie badań reologicznych (cech rozwijających się w czasie) oznaczono zmienne w czasie wartości siecznego modułu sprężystości betonu, skurcz betonu określony dwiema metodami (metodą Amslera [111] i metodą według aktualnej normy zharmonizowanej [125]) oraz odkształcenia pełzania mierzone według instrukcji ITB [22]. Badania te prowadzono przy stałych obciążeniach przez około 420 dni, a po tym okresie odkształcenia pełzania badano przy obciążeniach cyklicznych obejmujących kolejne odciążenia (do poziomu 10%) i ponowne obciążenia (do poziomu 100%).

### **2.2. Charakterystyka kruszywa i mieszanek betonowych**

Zastosowane kruszywo popiołoporytowe to rodzaj kruszywa lekkiego (nr 1) o frakcji 4/10. Producent określił skład procentowy frakcji kruszywa metodą przesiewową przed przekazaniem mieszanek do badań. Tego rodzaju frakcję zawiera tablica 2, ale w starszych publikacjach, np. w pracy [64], podawane są inne frakcje rozpatrywanego kruszywa, natomiast w pracach [67–70, 93–96] wykorzystano frakcję 4/12 mm (również inną niż podana

w pracy [64] i w tabl. 2), co wynika ze zmian w asortymencie omawianego kruszywa. Krzywą przesiewu kruszywa 4/10 zaprojektowanego betonu podano na rysunku 2.



Rys. 2. Krzywa przesiewu kruszywa 4/10

W kruszywie tym 96% stanowi frakcja mniejsza niż 9 mm, 45% obejmuje frakcję mniejszą niż 6,3 mm, a frakcja mniejsza niż 4 mm to 3%. Zawartość pyłu wynosiła 0,6%. Dodatkowo producent podał następujące dane dotyczące kruszywa przygotowanego do badań: gęstość nasypowa  $654,9 \text{ kg/m}^3$ , odporność na miazdzenie 6,5 MPa, nasiąkliwość 18,4% po 24 godzinach, gęstość ziaren  $1417 \text{ kg/m}^3$ . Zastosowano dwa składy mieszanek betonowych (zgodne z technologią LSA), jako receptury już zoptymalizowane, analogiczne jak w pracach [67–70] i [93–96], opisane w tabelicy 3.

Tablica 3. Składy mieszanek betonowych

Składnik		Mieszanka LC1 [ $\text{kg/m}^3$ ]	Mieszanka LC2 [ $\text{kg/m}^3$ ]
Cement CEM I 42,5 N		409	419
Lekkie kruszywo spiekane (4/10 mm)		775	802
Piasek		682	703
Woda		164	209
Domieszki	plastyfikator	3,7	3,8
	superplastyfikator	3,7	3,8

Sposób doboru mieszanek betonowych wynikał z pewnych ograniczeń w tym zakresie. Wykonano dwie mieszanki betonowe oznaczone jako LC1 i LC2 o wskaźnikach wodno-cementowych (W/C) odpowiednio 0,4 i 0,5 przy wykorzystaniu składników przyjętych zgodnie z tablicą 3. Mieszanki przygotowano w podobny sposób, jak w pracy [70]. Autorzy tej pracy stwierdzili jednak, że „w trakcie wykonywania mieszanek betonowych pojawiły się problemy z utrzymaniem odpowiedniej urabialności”. A zatem nie można było przyjąć niższego wskaźnika W/C, np. równego 0,3. Nie można było przyjąć także wyższego wskaźnika W/C, np. 0,6, gdyż groziłoby to obniżeniem wytrzymałości betonu. Dlatego możliwe było przyjęcie jedynie dwóch powyższych wskaźników. Z kolei ilość przyjętego cementu wynikała z założeń dotyczących osiągnięcia planowanych klas betonu. Jak wynika z badań doświadczalnych [63], wykorzystując na przykład próbki sześciennie wykonane z lekkiego betonu na kruszywie nr 1 i stosując cement CEM I 42,5 R w ilości 300–320 kg/m<sup>3</sup>, można uzyskać klasę wytrzymałości LC30/33. Chcąc uzyskać po 28 dniach klasę LC 45/50 według [110], jak dla produkcji początkowej z klasą gęstości D1,8, konieczne było (przy powyższych wskaźnikach W/C) przyjęcie cementu w ilości około 410–420 kg/m<sup>3</sup>, z czego wynikała ilość wody zarobowej. Powyższe uwarunkowania są podstawą do ustalenia podanych niżej receptur betonu (zgodnych z technologią LSA).

Zgodnie z technologią LSA jako domieszek uplastyczniających użyto plastyfikatora BV oraz superplastyfikatora SKY 686. W celu zapewnienia wymaganej jakości i jednorodności betonu wykonanie mieszanek miało miejsce w przedsiębiorstwie produkcji betonu towarowego przy wykorzystaniu specjalistycznego mieszalnika, zapewniającego jednorodność mieszanki. Cechy mieszanek betonowych określonych po transporcie przedstawiono w tablicy 4. Po 28 dniach dojrzewania określono gęstość betonu wysuszonego na 1766 kg/m<sup>3</sup> w przypadku betonu oznaczonego jako LC1 i 1777 kg/m<sup>3</sup> w przypadku betonu oznaczonego jako LC2 według normy [118], uzyskując wartości podobne, jak w pracy [68].

Tablica 4. Cechy mieszanek betonowych po transporcie

Badana cecha	Mieszanka LC1	Mieszanka LC2
Konsystencja metodą opadu stożka (średni wynik z próbek i uzyskana klasa)	145 mm	105 mm
	klasa S3 według [110]	klasa S3 według [110]
Zawartość powietrza (średni wynik z próbek)	4,35%	4,20%
Gęstość mieszanki betonowej (średni wynik z próbek)	1960 kg/m <sup>3</sup>	1980 kg/m <sup>3</sup>

### 2.3. Zakres badań laboratoryjnych

Przeprowadzono serię badań w Laboratorium Zakładu Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki i Betonu Instytutu Techniki Budowlanej. Czas dojrzewania betonu jest elementem kluczowym dla jego parametrów wytrzymałościowych. Badania doświadczalne zaczynały się od momentu wymieszania betonu. Beton, jak wspomniano wyżej, został wytworzony w betoniarni za pomocą specjalistycznego mieszalnika. Po zalaniu przygotowanych form i odpowiedniej pielęgnacji w warunkach laboratoryjnych, po upływie 28 dni próbki zostały rozformowane lub pobrane z bloku betonowego w postaci odwiertów rdzeniowych. Badania zostały wykonane zgodnie z postanowieniami odpowiednich norm [105–120] oraz Instrukcji ITB nr 194/98 [22]:

- wytrzymałość na ściskanie zgodnie z [114],
- wytrzymałość na rozciąganie osiowe według [22],
- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu zgodnie z [117],
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu zgodnie z [116],
- odporność betonu na działanie mrozu zgodnie z [105],
- sieczny moduł sprężystości betonu według [119],
- skurcz zgodnie z [111] oraz [120] (na potrzeby oznaczenia odkształceń pełzania według [22]).
- odkształcenia pełzania według [22].

Należy mieć na uwadze, że badania laboratoryjne zostały rozpoczęte w 2019 r., toteż najnowsze wersje norm wykorzystanych w monografii pochodzą z lat 2019–2020.

Do badań siecznego modułu sprężystości, wytrzymałości na rozciąganie osiowe i ściskanie, wykorzystano próbki (odwiercone z bloku betonu lekkiego) o średnicy nominalnej  $d = 94$  mm i o wysokości 190 mm, a do badań skurczu według normy [120] i pełzania według instrukcji ITB [22] wykorzystano próbki o tej samej średnicy i o wysokości  $h = 3d = 282$  mm. Próbki walcowe do badań pełzania i skurczu są więc wyższe od pozostałych. Próbki kostkowe lub beleczki próbne do pozostałych badań przygotowano zgodnie z wyżej wymienionymi normami. Zgodnie z harmonogramem badania wytrzymałościowe zostały wykonane po 7 i 14 dniach, a kolejne po 28, 60, 120 i po 300 dniach. Badania skurczu metodą Amslera [111] zaplanowano w okresie 1–7 dni – co 2 dni, 7–28 dni – co 7 dni oraz 28–325 dni – co 30 dni. Badania zrealizowano zgodnie z planem, co pozwoliło na określenie wymienionych wyżej parametrów wytrzymałościowych betonów na lekkim kruszywie spiekany.