

# Mrozoodporność betonów z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych

Dr inż. Aneta Nowak-Michta, Politechnika Krakowska

## 1. Wprowadzenie

Popiół lotny jest od ponad półwiecza najpowszechniej stosowanym dodatkiem do betonów masywnych oraz konstrukcyjnych o niskich wytrzymałościach. Jak wiadomo, aspekt zapewnienia trwałości tego typu betonów jest bardzo istotny i stwarza wiele problemów w realizacji. Powszechnie stosowane napowietrzenie betonów w celu zapewnienia mrozoodporności w przypadku stosowania dodatku popiołu lotnego powoduje wiele kontrowersji opisanych zarówno w literaturze krajowej, jak i zagranicznej [1÷8]. Zagraniczne prace dowodzą, iż prawidłowo napowietrzony beton z dodatkiem dobrej jakości popiołu lotnego wykazuje odporność na cykliczne zamrażanie i odmrażanie [2, 4, 7], podczas gdy krajowe wyniki [8, 9] wskazują na znaczny spadek trwałości betonu z dodatkiem popiołu w wyniku działania mrozu.

Jako główny parametr jakościowy popiołu determinujący mrozoodporność betonu wykonanego z jego dodatkiem wskazywana jest wielkość strat prażenia. Luehr [10] badał wpływ wielkości strat prażenia (2,2÷20,5%) i zawartości popiołu (0÷20%) na spadki wytrzymałości po cyklicznym zamrażaniu – rozmrażaniu. Uzyskane wyniki badań ewidentnie potwierdzają negatywny wpływ wielkości strat prażenia w popiołach na mrozoodporność betonów z ich dodatkiem. Odnosząc się do dopuszczalnego 20% kryterium spadku wytrzymałości wg PN-88/B 06250, wymogu tego nie spełniają jedynie zapra-

wy z dodatkiem popiołów o stratach prażenia powyżej 10% [10]. Znowelizowana w 2006 roku norma PN-EN 450-1 „Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności”. wprowadziła trzy kategorie strat prażenia: A: LOI (LOI – loss of ignition (strata prażenia))  $\leq 5\%$ , B: LOI=2÷7% i C: LOI=4÷9%. Ponadto w normie przy kategoriach strat prażenia znajduje się uwaga, iż wielkość strat prażenia może wpływać na skuteczność działania domieszek napowietrzających stosowanych do wytwarzania betonu mrozoodpornego. Zdefiniowane trzy kategorie strat prażenia popiołu umożliwiają użytkownikowi uwzględnić ten fakt poprzez wybór odpowiedniej kategorii do danego zastosowania i klasy ekspozycji.

Uwzględniając dotychczasowy stan wiedzy w tym zakresie oraz zalecenia normy PN-EN 450-1, w niniejszym artykule podjęto próbę ustalenia wpływu ilości i jakości (wielkości strat prażenia) popiołu na mrozoodporność betonów z ich dodatkiem.

## 2. Badania własne

### 2.1. Cel i zakres badań

Przeprowadzone badania miały na celu ocenę wpływu ilości i jakości dodawanego popiołu lotnego na mrozoodporność betonów z jego dodatkiem. Receptury mieszanek zaprojektowano przy następujących założeniach:

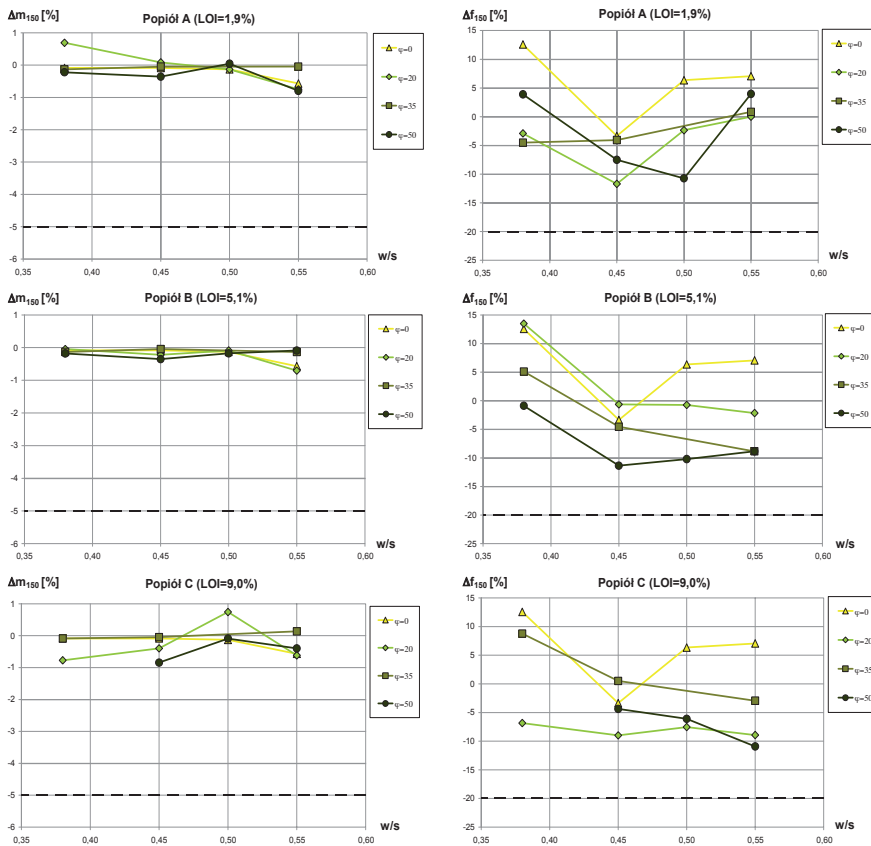
- cztery poziomy dozowania popiołu lotnego:  $\phi=0, 20, 35, 50\%$  masy cementu (stosowano metodę prostego zastępowania cementu popiołem),

- trzy poziomy współczynnika wodno-spoiwowego (spoiwo = cement + popiół):  $w/s=0,55; 0,45; 0,38$ ,
- trzy popioły lotne krzemionkowe zgodne z PN-EN 450-1: 2006, w kategoriach strat prażenia A (1,9%), B (5,1%) i C (9,0%),
- dwa poziomy napowietrzenia 0 i 4,5% (domieszka napowietrzająca na bazie modyfikowanych żywic drzewnych),
- stała konsystencja mieszanki betonowej S3 (100÷150 mm opadu stożka) regulowana superlastyfikatorem na bazie polikarboksylianów. Mieszanki wykonano z cementu CEM I 32,5R i kruszywa naturalnego o punkcie piaskowym 35% i maksymalnym ziarnie  $D=16$  mm. W ramach badań wykonano 56 serii mieszanek betonowych (4 mieszanki kontrolne nienapowietrzone, 4 mieszanki kontrolne napowietrzone i 48 mieszanek napowietrzonych i nienapowietrzonych z 20, 35 oraz 50% dodatkiem trzech popiołów lotnych). Składy betonów oraz właściwości zastosowanych materiałów szczegółowo opisano w [11].

### 2.2. Wykonanie próbek

Betony wykonywano w laboratorium w temperaturze 20°C i względnej wilgotności powyżej 60%. Ilości domieszek, zarówno napowietrzającej jak i upłynniającej, regulowano do uzyskania konsystencji w klasie S3 (100÷150 mm opadu stożka) oraz wymaganego poziomu napowietrzenia. Dozowane ilości domieszek mieściły się w zalecanych przez producenta zakresach [11].

Z każdej serii betonów napowietrzonych zaformowano 18, a nie-



**Rys. 1.** Zależność ubytków masy i zmiany wytrzymałości betonów napowietrzonych z dodatkiem popiołów A, B i C od w/s i  $\phi$  po 150 cyklach zamrażania

napowietrzonych 12 kostek sześciennych o boku 10 cm, które zagęszczano na stole wibracyjnym. Po 24 godzinach próbki rozformowywano i do czasu badania próbki dojrzewały w komorze o temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  oraz wilgotności  $95 \pm 5\%$ , zgodnie z normą PN-EN 12390-3.

### 2.3. Metodyka badania mrozoodporności betonów

Cykliczne zamrażanie i rozmrażanie przeprowadzono zgodnie z PN-88/B-06250, za pomocą automatycznej zamrażarki.

Każdą z serii betonów (sześć próbek sześciennych o boku 10 cm) poddano 150 cyklom zamrażania i odmrażania, kontrolując zmiany masy próbek co 50 cykli. Dla betonów napowietrzonych stosowano podwójne próbki świadkowe – 12 sztuk, z których sześć ścisano rozpoczynając cykle mrozoodporności, a pozostałe sześć, zgodnie z procedurą normo-

wą, po zakończeniu cykli zamrażania i odmrażania. Dla serii betonów nienapowietrzonych stosowano normową procedurę w zakresie próbek świadkowych. W seriach napowietrzonych zastosowano podwójne próbki świadkowe ze względu na sygnalizowane w kraju kontrowersje w ocenie mrozoodporności wynikające z przyrostów wytrzymałości próbek świadkowych w okresie realizowanych cykli mrozoodporności. Czas realizacji 150 cykli wynosił 50 dni.

Próbki przeznaczone do badania mrozoodporności, zarówno poddawane zamrażaniu, jak i świadkowe, po 28 dniach dojrzewania w komorze klimatycznej w temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  i wilgotności względnej powyżej 95% umieszczano w wodzie i tak przechowywano do czasu badania. Badania mrozoodporności dla poszczególnych serii betonów rozpoczynano po 90 dniach dojrzewania.

### 3. Wyniki badań mrozoodporności

Wyniki badań mrozoodporności po 150 cyklach ilustrują wykresy zależności średnich zmian wytrzymałości i masy od w/s (współczynnika wodno-spoiwowego) i  $\phi$  (procentu zastąpienia cementu popiołem).

Dla betonów napowietrzonych zależności te przedstawiono na rysunku 1, natomiast dla betonów nienapowietrzonych na rysunku 2. Zmiany wytrzymałości wszystkich zbadanych betonów napowietrzonych w stosunku do świadkowych mieszczą się w przedziale  $-11,7 \div +13,5\%$ , natomiast zmiany mas w przedziale  $-0,8 \div +0,7\%$ .

Wszystkie zbadane betony napowietrzone na poziomie minimum 4%, z dodatkiem wszystkich trzech popiołów A, B i C w zakresie wskaźnika wodno-spoiwowego  $0,38 \div 0,55$  uzyskały zgodnie z PN-88/B 06250 stopień mrozoodporności F150.

W betonach nienapowietrzonych, które nie uległy zniszczeniu podczas badania zmiany wytrzymałości, zawierają się w przedziale  $-90 \div +8,9\%$ , natomiast masy w przedziale  $-50 \div +1,9\%$ .

Spośród przebadanych 27 serii betonów nienapowietrzonych stopień mrozoodporności F150 uzyskało 11 serii betonów: betony z dodatkiem popiołów A i B o współczynniku w/s=0,38 oraz betony o w/s=0,45 i 0,55 z 50% dodatkiem popiołów B i C.

Spośród 16 serii, które nie spełniły kryteriów mrozoodporności F150, w 10 seriach próbki uległy zniszczeniu w trakcie cykli zamrażania i odmrażania. Wszystkie próbki uległy zniszczeniu w seriach z dodatkiem popiołu C o w/s=0,55 i  $\phi=20\%$  oraz w/s=0,45 i  $\phi=35\%$ . Pozostałe 8 serii, w których próbki uległy zniszczeniu, to betony z 20 lub 35% dodatkiem popiołów A i C. Betony z dodatkiem popiołu B uległy zniszczeniu w seriach o  $\phi=35\%$  i w/s=0,55 i 0,45. Pierwsze uszkodzenia próbek zaobserwowano po

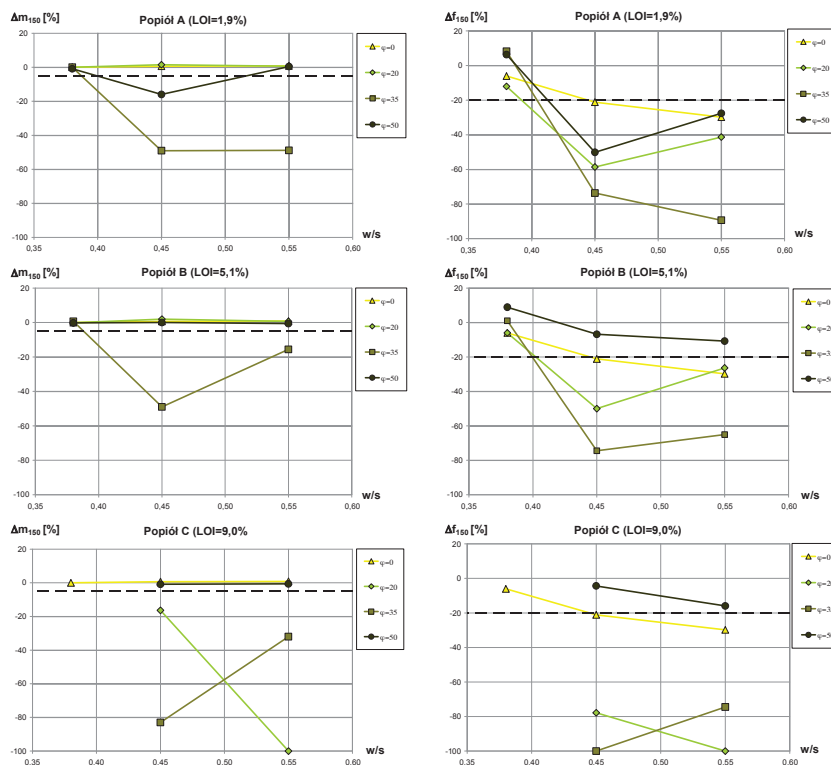
100 cyklach, przy czym większość próbek ulegała zniszczeniu pomiędzy 130. a 150. cyklem. Próbki, które uległy zniszczeniu, bądź też nie spełniły kryterium wytrzymałości po 150 cyklach, wykazywały przyrosty mas już przy kontroli po 50 cyklach na poziomie  $0,6 \div 0,9\%$ . W trakcie badań nie zaobserwowano ubytków mas próbek na skutek złuszczeń bądź odprysków.

Przedstawione na rysunku 2 zmiany wytrzymałości betonów po 150 cyklach mrozoodporności w świetle omówionych powyżej zmian masy w trakcie badania, stanowią dominujące kryterium. Do betonów, które nie spełniły kryterium w zakresie dopuszczalnego ubytku masy na poziomie 5%, dołączają prawie wszystkie nienapowietrzane betony o wskaźniku  $w/s = 0,55$  i  $0,45$ . Wyjątek stanowią serie z 50% dodatkiem popiołów B i C. Na rysunku 2 obserwujemy, iż największe spadki wytrzymałości dla wszystkich popiołów wykazują serie z 35% dodatkiem, mniejsze z 20%, kolejno betony bez popiołów, a najmniejsze spadki wykazują betony z dodatkiem 50% (wyjątek stanowi seria z 35% dodatkiem popiołu A o  $w/s = 0,45$ ). Ponadto, pomijając serie, w których próbki uległy całkowitemu zniszczeniu w trakcie badania znacznie większe spadki wytrzymałości obserwujemy w seriach o  $w/s = 0,45$  niż  $0,55$ .

W betonach napowietrzonych, dla których zastosowano podwójne próbki świadkowe, ścisane w dniu rozpoczęcia i po zakończeniu badania mrozoodporności, nie zaobserwowano wpływu przyrostu wytrzymałości próbek świadkowych w czasie badania. Przyrosty wytrzymałości próbek świadkowych były porównywalne z przyrostami wytrzymałości próbek zamrażanych i rozmrażanych.

#### 4. Analiza wyników badań mrozoodporności

##### 4.1. Wpływ napowietrzenia na mrozoodporność betonów



**Rys. 2.** Zależność ubytków masy i zmiany wytrzymałości betonów nienapowietrzonych z dodatkiem popiołów A, B i C od  $w/s$  i  $\phi$  po 150 cyklach zamrażania ( $\Delta m_{150}$  i  $\Delta f_{150} = -100$  oznacza całkowite rozsypanie próbek)

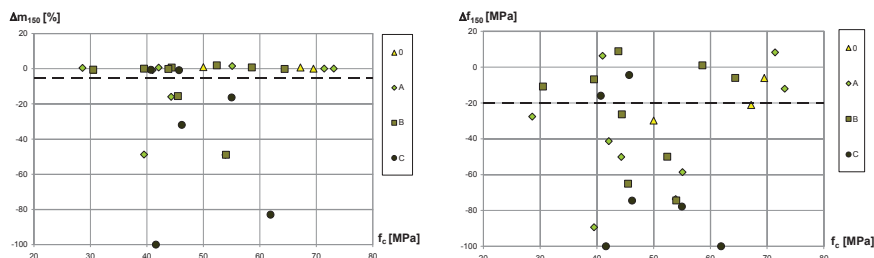
Z przedstawionych w punkcie 3 wyników badań mrozoodporności jednoznacznie wynika, iż napowietrzenie mieszanki betonowej na poziomie minimum 4% stanowi gwarancję mrozoodporności betonu F150. Wszystkie zbadane betony, które w ten sposób napowietrzono, spełniły wymagania stopnia mrozoodporności F150. Zgodnie z wynikami badań, bez względu na ilość oraz rodzaj stosowanego popiołu spełniającego wymagania PN-EN 450-1, jako dodatku do betonu, jeżeli możliwe jest napowietrzenie, to w rezultacie uzyskuje się w warunkach laboratoryjnych wymaganą mrozoodporność betonu.

##### 4.2. Wpływ wskaźnika wodno-spoiowego

W betonach napowietrzonych nie zaobserwowano wpływu wielkości współczynnika wodno-spoiowego ani na uzyskane różnice w ubytkach mas, ani na zmiany wytrzymałości. W betonach tych

napowietrzenie stanowi czynnik dominujący, odpowiedzialny za ukształtowanie mrozoodpornej struktury porowatości.

W przeciwieństwie do betonów napowietrzonych w betonach nienapowietrzonych wartość współczynnika  $w/s$  wywiera bardzo istotny wpływ zarówno na wielkość spadku wytrzymałości, jak również masy próbek poddanych cykлом zamrażania i odmrażania. Wszystkie betony nienapowietrzane o  $w/s = 0,38$ , bez względu na rodzaj (kategoria strat prażenia A i B) i zawartość popiołu w spoiwie, spełniły kryteria mrozoodporności F150. Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, iż betony te charakteryzuje bardzo szczelna struktura gwarantująca ich mrozoodporność. Należy jednak zwrócić uwagę, iż w programie badawczym zastosowano metodę prostego zastępowania cementu popiołem, czyli przy poszczególnych poziomach dozowania dodatku popiołu



**Rys. 3.** Zależność zmian masy i wytrzymałości po badaniu mrozoodporności od wytrzymałości betonu ( $\Delta m_{150}$  i  $\Delta f_{150} = -100$  oznacza całkowite rozsypanie próbek)

bezpośrednio zamieniano odpowiednią część cementu na popiół. Zatem betony o  $w/s=0,38$  z 50% dodatkiem popiołu, posiadały w sumie  $450 \text{ kg/m}^3$  spoiwa, które stanowiła suma 225 kg cementu i 225 kg popiołu i współczynnik wodno-cementowy 0,76.

Rusin [5] jest zdania, iż betony o  $w/c < 0,37$  przy zapewnieniu poprawnej pielęgnacji betonu bez napowietrzania, osiągają mrozoodporność. Przestrzega przy tym przed utożsamianiem współczynnika wodno-cementowego  $w/c$  ze współczynnikiem wodno-spoiwowym  $w/s$  w przypadku stosowania dodatków mineralnych. Niniejsza teza w świetle uzyskanych wyników badań nie znajduje potwierdzenia. W zbadanych betonach z dodatkiem popiołu lotnego spełniającego wymagania normowe, graniczną wielkość, przy której beton był mrozoodporny stanowi wielkość współczynnika wodno-spoiwowego  $= 0,38$ .

Betony nienapowietrzane o  $w/s = 0,45$  i  $0,55$  (z wyjątkiem betonów z 50% dodatkiem popiołów B i C) były niemrozoodporne, przy czym betony te w przeważającej większości nie spełniają dopuszczalnego kryterium spadku wytrzymałości.

### 4.3. Wpływ rodzaju i zawartości popiołu

W betonach napowietrzonych w ogólnej ocenie mrozoodporności wpływ rodzaju i zawartości popiołu podobnie jak współczynnik  $w/s$  nie zaznaczają się.

W betonach nienapowietrzonych zauważamy wpływ zarówno rodza-

ju, jak i zawartości popiołu na wielkość ubytku masy i spadki wytrzymałości. Największe ubytki masy obserwujemy przy  $\phi=35\%$ , trochę mniejsze przy  $\phi=20\%$ , natomiast najmniejsze przy  $\phi=50\%$ , które w przypadku popiołu B i C były mniejsze niż dla betonu bez dodatku. Podobne jak w przypadku ubytków masy, zaznaczają się tendencje w zakresie spadków wytrzymałości. Największe spadki wytrzymałości obserwujemy dla betonów o  $\phi=35\%$ , trochę mniejsze przy  $\phi=20\%$ , natomiast najmniejsze, przy  $\phi=50\%$ , które w przypadku popiołu B i C były mniejsze niż dla betonu bez dodatku. Zmienność ubytków mas, jak również spadków wytrzymałości w zależności od procentu zastąpienia cementu popiołem i rodzaju popiołu na skutek działania mrozu, zapewne jest efektem struktury poszczególnych betonów. Największe ubytki mas i spadki wytrzymałości przy 35% dodatku popiołu świadczą o najszczelniejszej strukturze tych betonów, co zapewne związane jest z osiągnięciem punktu upakowania [6], charakterystycznego dla betonów z dodatkiem popiołu lotnego.

Oceniając wpływ rodzaju popiołu w zakresie ubytków mas i spadków wytrzymałości, betony z dodatkiem popiołów A i B przy poszczególnych  $w/s$  i  $\phi$  zachowują się podobnie, natomiast betony z dodatkiem popiołu C wykazują znacznie większe spadki zarówno wytrzymałości, jak i masy. Zatem betony z dodatkiem popiołu o najwyższych stratach prażenia 9,0% wykazały się

najmniejszą odpornością na działanie mrozu.

### 4.4. Mrozoodporność a wytrzymałość betonu

Ze względu na brak możliwości jednoznacznej oceny wpływu współczynników  $w/s$  i  $\phi$  na mrozoodporność na rysunku 3 przedstawiono odpowiednio zależności zmiany masy i wytrzymałości nienapowietrzonych betonów po badaniu mrozoodporności i wytrzymałości betonów w momencie rozpoczęcia badania. Z zaprezentowanych zależności wynika, iż betony o tej samej wytrzymałości wykazują zmienną odporność na działanie mrozu, zarówno w odniesieniu do kryterium ubytku mas jak i wytrzymałości, co potwierdza tezę, iż za odporność betonu na działanie mrozu odpowiada jego porowatość. Wielkość wytrzymałości nie miała istotnego wpływu na ilość serii z dodatkiem danego popiołu niespełniających poszczególnych kryteriów. Wszystkie betony o wytrzymałości powyżej 61,9 MPa spełniły wymagania stopnia mrozoodporności F150. Zatem, podobnie jak w przypadku granicznej wielkości współczynnika  $w/s$ , przy której bez względu na rodzaj i ilość zastosowanego popiołu uzyskano wymaganą mrozoodporność betonu, istnieje graniczna wartość wytrzymałości, powyżej której badane betony uzyskały stopień mrozoodporności F150.

### 5. Wnioski

Na podstawie wyników opisanych badań i ich analizy można sformułować następujące wnioski:

– Napowietrzane betony na poziomie  $V_{pmin} \geq 4\%$  z dodatkiem popiołu lotnego spełniającego wymagania normowe wykazały się odpornością na działanie mrozu na poziomie F150.

– Głównym czynnikiem determinującym mrozoodporność betonów nienapowietrzonych z dodatkiem popiołu lotnego okazała się wielkość współczynnika  $w/s$ . Betony



o  $w/s \leq 0,38$ , bez względu na rodzaj i ilość dodatku popiołu spełniają kryteria mrozoodporności na poziomie F150.

– Wpływ wielkości strat prażenia zaznacza się w nienapowietrzonych betonach z dodatkiem popiołu C, które wykazały najmniejszą odporność na działanie mrozu.

#### BIBLIOGRAFIA

[1] Bastian S., Dobrowolski S., „Wpływ domieszek i dodatków na mrozoodporność betonów”, *Cement Wapno Beton* 5/2000, s. 203–207  
 [2] Bouzouba N., Fournier B., Malhotra V. M., Golden D. M., „Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cement produced in cement plant”, *ACI Materials Journal*, No. 6, 2002, pp. 560–567

[3] Fagerlund G., „Trwałość konstrukcji betonowych”, Arkady, Warszawa 1997  
 [4] Nasser K. W., Lai P. S. H., „Resistance of Fly Ash Concrete to Freezing and Thawing”, SP 132-12, Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Turkey – May 1992, pp. 205–226  
 [5] Rusin Z., „Technologia betonów mrozoodpornych”, Wydawnictwo Polski Cement 2002  
 [6] Wesche K., „Fly Ash in concrete, Properties and Performance”, E&FN SPON, RILEM 1991  
 [7] Sturup V. R., Hooton R. D., Clendenning T. G., „Durability of fly ash concrete”, SP 79, First International Conference on the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-Products in Concrete, Montebello, Canada – August 1983, pp. 71–86  
 [8] Szwabowski J., Łażniewska B., „Mrozoodporność a jakość napowietżenia samozagęszczalnego betonu”, V Konferencja

Naukowo-Techniczna „Zagadnienia Materiałowe w Inżynierii Lądowej MATBUD”, Kraków 2007, s. 503–510

[9] Giergiczny Z., Sokołowski M., „Mrozoodporność betonu na cementach z dodatkami mineralnymi”, VIII Sympozjum naukowo-techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice 2006, s. 19–30  
 [10] Luehr H. P., „Zur Verwendung von Steinkohlenflugasche (Elektrofilterstaub) als Betonzusatzstoff”, *Betonwerk und Fertigteil-Technik*, No. 7, 1972, pp. 511–517  
 [11] Nowak-Michta A., „Kompatybilność popiołu lotnego z domieszkami” – Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Budownictwo z. 112, Gliwice 2007  
 [12] Nowak-Michta A., „Struktura porowatości betonów napowietrzonych z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego”, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2008

# Odkształcalność konstrukcyjnych betonów lekkich z dodatkiem włókien stalowych poddanych jednoosiowemu ściskaniu

Dr inż. Lucyna Domagała, Politechnika Krakowska

## 1. Wprowadzenie

W porównaniu do betonów konstrukcyjnych o normalnej gęstości, konstrukcyjne betony lekkie ( $D \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ ) tej samej klasy wytrzymałości charakteryzują się obniżonymi parametrami mechanicznymi. Do najistotniejszych charakterystyk mechanicznych betonów, które ulegają obniżeniu w wyniku zastąpienia kruszywa naturalnego wypełniaczem o strukturze silnie porowatej, należy zaliczyć: wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu i zginaniu, wytrzymałość na ścinanie, moduł sprężystości

oraz parametry mechaniki pęknięcia. Z uwagi na zdecydowanie niższy moduł sprężystości samego kruszywa lekkiego, odkształcalność tych betonów, wynikająca zarówno ze zmian wilgotnościowych, termicznych, jak również obciążenia, jest zdecydowanie wyższa. Stąd istotnej zmianie w stosunku do betonów zwykłych ulega również zależność naprężenie – odkształcenie. Niższy moduł sprężystości kruszyw lekkich, w sposób oczywisty przyczynia się do obniżenia modułu sprężystości całego kompozytu (nawet do 50%), w rezultacie

czego odkształcalność betonu przy danym poziomie naprężeń wzrasta. Porównywalne moduły sprężystości obu faz (matrycy cementowej i kruszywa lekkiego), ich doskonała przyczepność oraz większa jednorodność kształtu i rozmiaru ziaren kruszywa, wpływają na większą jednorodność strukturalną betonu. W rezultacie, w strefie stykowej będącej najmocniejszym ogniwem wytrzymałościowym betonu lekkiego, nie dochodzi do koncentracji naprężeń, która powodowałaby ich wczesne zarysowanie. To właśnie zdecydowanie bardziej równo-