

## Analiza odporności na pękanie, przy trzecim modelu pękania betonów z dodatkiem popiołów lotnych

Grzegorz L. Golewski<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: g.golewski@pollub.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki badań odporności na pękanie, betonów z dodatkiem popiołów lotnych (pl), określane przy trzecim modelu pękania. Analizie poddano kompozyty betonowe wykonane z dodatkiem: 0, 20 i 30 % krzemionkowych pl. Badania odporności na pękanie przeprowadzono na maszynie osiowo skrętnej MTS 809 Axial/Torsional Test System, na próbkach walcowych o wymiarach 150/300 mm z obwodową szczeliną pierwotną wykonaną w połowie wysokości walców. W badaniach oceniano wpływ dodatku pl na wartość parametru  $K_{IIIc}$ . Analiza uzyskanych wyników badań wykazała, że 20% dodatek pl powoduje wzrost  $K_{IIIc}$ , natomiast dodatek 30% pl spadek odporności na pękanie.

**Słowa kluczowe:** beton, popiół lotny, odporność na pękanie, trzeci model pękania.

### 1. Wprowadzenie

Nowoczesne betony konstrukcyjne są kompozytami, których skład jest często modyfikowany dodatkami mineralnymi i domieszkami chemicznymi. Wynika to przede wszystkim z coraz większych wymagań stawianych temu materiałowi dotyczących głównie jego parametrów wytrzymałościowych, trwałości, oraz odporności na różnego rodzaju czynniki agresywne, np. [1].

Jednym z częściej stosowanych dodatków do betonu są krzemionkowe popioły lotne (pl) będące ubocznym produktem spalania pyłu węglowego z węgla kamiennego w elektrowniach i elektrociepłowniach [2, 3]. Te aktywne mikrowypełniacze o właściwościach pucolanowych wpływają bardzo korzystnie na wiele parametrów mieszanki betonowej i stwardniałego kompozytu i dzięki temu są stosowane jako dodatek do cementów wieloskładnikowych, oraz betonów zwykłych, wysokowartościowych i samozagęszczalnych. Znajdują one również zastosowanie w składzie kompozytów o szczególnym przeznaczeniu, np.: betonów wałowanych i podwodnych [4], oraz w innych branżach przemysłu budowlanego, np.: przy wytwarzaniu zeolitów [5].

W literaturze polskiej i zagranicznej można znaleźć dużą ilość publikacji z tego działu tematycznego. Mimo to niektóre właściwości betonów z dodatkiem pl były analizowane bardzo rzadko. Napotkano tylko na kilka rozpraw [6-8] opisujących badania tego typu kompozytów, w kontekście ich odporności na kruche pękanie. Ponadto dotyczą one głównie badań betonów wysokowartościowych [6, 7] uwzględniając przy tym tylko I model pękania. Jak pokazują jednak badania doświadczalne [9-12], prace analityczne [12-14] i analizy numeryczne [15] rzeczywiste materiały konstrukcyjne w trakcie obciążania ulegają mikrouszkodzeniom głównie przy mieszanym modelu pękania, gdzie nieodzowne jest uwzględnienie przypadku ścinania zarówno w kierunku podłużnym (II model pękania) jak i poprzecznym do krawędzi szczeliny (III model pękania). Występowanie w procesie destrukcji materiału II i III modelu pękania powoduje zazwyczaj pojawianie się strukturze betonu tzw. pęknięć skrzydłowych, będących głównymi katalizatorami procesów destrukcyjnych w materiale. Szczegółową analizę mikrostruktury uszkodzeń w kompozytach betonowych z osnowami cementowymi przedstawiono w pracy [16].

Opis procesów powstawania i propagacji uszkodzeń w materiale wymaga znajomości wszystkich parametrów mechaniki pękania tzn.:  $K_{Ic}$ ,  $K_{IIc}$  i  $K_{IIIc}$ . W pracy [17] przedstawiono wyniki badań odporności na pękanie przy II modelu pękania betonów zwykłych oraz modyfikowanych 20% i 30% dodatkiem krzemionkowych pl. Uzyskane wartości

współczynników intensywności naprężeń  $K_{IIC}$  na próbkach typu Compact Shear wykazały, że dodatek 20% pl powoduje wzrost  $K_{IIC}$  o 3,5%, natomiast zastąpienie części cementu 30% dodatkiem pl powoduje obniżenie odporności na pękanie betonów przy II modelu pękania o 13,9%. Wyniki uzyskane w badaniach doświadczalnych potwierdzono również w analizach numerycznych, w których procesy pękania badano na przestrzennym modelu 3-D wykonanym w programie ABAQUS wykorzystując w obliczeniach rozszerzoną metodę elementów skończonych - Extended Finite Element Method (XFEM) [15].

Badania odporności na pękanie przy III modelu pękania dla różnego typu materiałów są prowadzone od lat 80 XX. wieku. Przy tym schemacie zniszczenia analizowano np. odporność na pękanie materiałów ceramicznych [18] i drewnianych [19], a w pracy [20] przedstawiono badania okrągłych wałów stalowych poddanych skręcającym obciążeniom zmęczeniowym.

Pierwsze i jedyne dostępne w literaturze wyniki badań odporności na pękanie betonów przy III modelu pękania przedstawił Z. P. Bazant wraz ze współautorami w pracach [21, 22]. Na podstawie studiów literaturowych ustalono, że nie było do tej pory prowadzonych badań odporności na pękanie przy III modelu pękania dla betonów z dodatkiem pl. Brak pełnych danych literaturowych dotyczących oceny odporności na pękanie kompozytów betonowych modyfikowanych dodatkiem pl skłonił autora pracy do podjęcia badań oceniających procesy destrukcyjne tego typu betonów przy III modelu pękania. Znajomość odporności na pękanie przy antypląskim ścinaniu [22] jest szczególnie istotna w analizie konstrukcji takich jak np.: belki załamane w planie, skrajne belki stropów, rygle ram przestrzennych, belki podsuwnicowe i inne.

Niniejsza praca przedstawia analizę odporności na pękanie przy III modelu pękania betonów zwykłych, oraz modyfikowanych dodatkiem krzemionkowych pl w ilości 20 i 30% masy cementu.

## 2. Badania własne

### 2.1. Cel i zakres badań

Celem badań było oszacowanie jaki wpływ ma modyfikacja składu betonów konstrukcyjnych pl, na odporność betonów na pękanie przy III modelu rozwoju uszkodzeń [21, 22]. Badania odporności na pękanie oraz badania pomocnicze wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przeprowadzono na trzech rodzajach betonów różniących się między sobą ilością dodatku pl: bez dodatku pl (pl-00), z 20% dodatkiem pl (pl-20) i z 30% dodatkiem pl (pl-30). W betonach pl-20 i pl-30 stosowano metodę prostego zastępowania cementu pl. Ten sam sposób dozowania pl stosowano również w badaniach innych autorów, np.: analizie betonów podwodnych [4], ocenie mrozodporności betonów [23], czy badaniach karbonatyzacji [24].

### 2.2. Materiały i przygotowanie próbek do badań

#### 2.2.1. Materiały wykorzystane w badaniach

Do wykonania mieszanek zastosowano: cement portlandzki CEM I 32,5 R z cementowni Chełm o 28 dniowej wytrzymałości na ściskanie równej 50 MPa, kruszywo naturalne żwirowe o maksymalnym uziarnieniu do 8 mm ze złóż Las Suwałski, piasek kopalny ze złóż Markuszów, oraz krzemionkowy pl i plastyfikator (0,6% masy spoiwa). Wszystkie mieszanki miały taki sam wskaźnik wodno - spoiwowy w/s = 0,4. Szczegółowe ilości materiałów, które zastosowano do wykonania mieszanek podano w pracy [17].

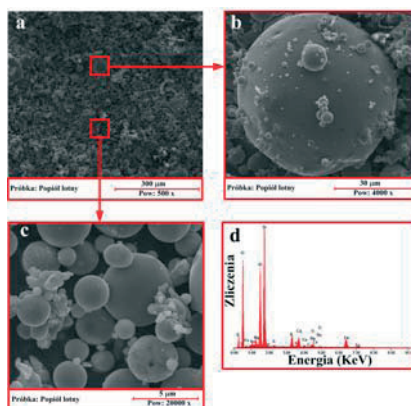
Tabela 1. Skład chemiczny popiołów lotnych

składnik	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI
zawartość [% mas.]	50,96	25,88	8,25	2,15	2,60	0,65	3,20

Do badań użyto pl pochodzących z Elektrociepłowni Puławy. W tabeli 1 zestawiono wagowy skład chemiczny pl, w których dominującymi związkami są krzemionka (SiO<sub>2</sub>), oraz tlenki glinu (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) i żelaza (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Suma tych tlenków, która wynosi 85,09% wskazuje jednoznacznie, iż zastosowany w badaniach pl zaliczany jest wg normy [25] do

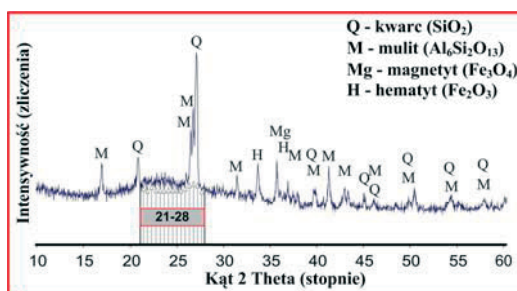
klasy F czyli popiołów krzemionkowych. Badania aktywności pucolanowej zastosowanych pl wykonane zgodnie z normą [26] wykazały, że aktywność ta wynosi: po 28 dniach - 92%, natomiast po 90 dniach - 111%.

O wysokiej aktywności zastosowanych pl świadczyć może również ich drobne uziarnienie [1, 2, 26], które zaobserwowano w badaniach SEM. Na rys. 1 pokazano charakterystyczną mikrostrukturę pl przy różnych powiększeniach wraz z analizą EDS. Przy poszczególnych powiększeniach widać ziarna popiołów o wielkości od kilku do około 50  $\mu\text{m}$ , oraz charakterystyczne cenosfery. Drobne uziarnienie pl, wpływa korzystnie na trwałość betonów z tymi dodatkami, a odporność cementu na korozję chemiczną jest tym większa, im mniejsze jest uziarnienie popiołów. W pracy [1] zaobserwowano, wyższą odporność na korozję siarczanową w przypadku betonów z dodatkiem pl o uziarnieniu poniżej 16  $\mu\text{m}$ , w porównaniu do kompozytów z dodatkiem większych frakcji tego wypełniacza.



Rys. 1. Mikrostruktura zastosowanych pl; a) ziarna (Pow: 500x), b) ziarna i cenosfery (Pow: 4000x), c) ziarna (Pow: 20000x), d) analiza EDS.

Analiza rentgenograficzna pl wykonana na dyfraktometrze X'Pert PRO MPD firmy PANalytical pokazuje, że w składzie fazowym pl obok szkła występują cztery składniki krystaliczne: kwarc, mulit, magnetyt i hematyt (rys. 2). Na dyfraktogramie można ponadto zaobserwować charakterystyczne podniesienie tła refleksów w zakresie kąta 21–28° [28] oraz relatywnie małą intensywność pików faz kwarcu i mulitu. Taki obraz składu fazowego pl świadczy również o ich drobnym uziarnieniu, oraz wysokiej aktywności pucolanowej [29].



Rys. 2. Dyfraktogram XRD zastosowanych pl.

### 2.2.2. Przygotowanie próbek do badań

Do badań pomocniczych i podstawowych z każdego rodzaju mieszanki wykonano po 6 próbek. Wszystkie próbki były rozformowywane po 2 dniach od ich wykonania. Następnie próbki przebywały przez 14 dni w kąpielii wodnej w temp. 20° C, natomiast

przez kolejne 14 dni w warunkach laboratoryjnych. Po 28 dniach dojrzewania przeprowadzono badania odporności na pęknięcie oraz badania pomocnicze. Charakterystyki wytrzymałościowe analizowanych betonów zestawiono w tabeli 2.

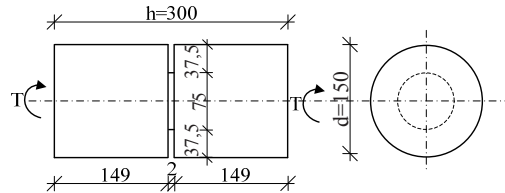
Tabela 2. Charakterystyki wytrzymałościowe betonów

Seria betonu	Ilość dodatku pl [%]	$f_{cm15}$ [MPa]	$f_{ctm}$ [MPa]
pl-00	0	47,51	3,58
pl-20	20	48,96	3,36
pl-30	30	45,10	3,27

### 2.3. Metodyka badań odporności na pęknięcie przy III modelu pęknięcia

#### 2.3.1. Wymiary próbek i ich przygotowanie

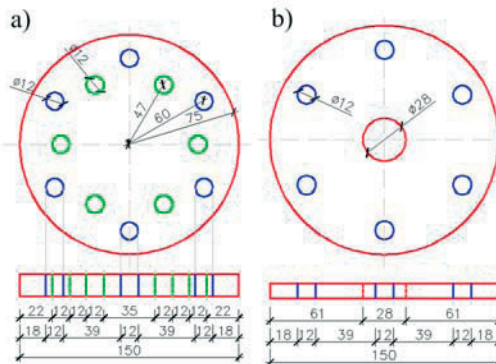
W celu określenia odporności na pęknięcie przy III modelu pęknięcia w betonach z dodatkiem pl przygotowano próbki walcowe o średnicy 150 i wysokości 300 mm z obwodową szczeliną pierwotną o gr. 2 mm wykonaną w połowie wysokości próbek [21, 22]. Głębokość szczeliny była równa  $\frac{1}{4}$  średnicy walców. Schemat próbki ze wszystkimi wymiarami pokazano na rys. 3. Szczeliny pierwotne w próbkach powstały w trakcie ich formowania poprzez zabetonowanie w nich dwóch półokrągłych wkładek stalowych.



Rys. 3. Schemat próbki wykorzystanej w badaniach.

#### 2.3.2. Projekt i wykonanie uchwytów do zamocowania próbek w prasie

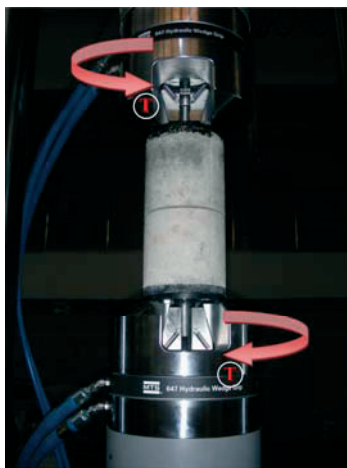
Do zamocowania próbek w uchwytach prasy zaprojektowano i wykonano dwa rodzaje okrągłych płyt stalowych z nawierconymi otworami o wymiarach pokazanych na rys. 4. Dolne płyty o gr. 15 mm były kotwione w próbkach na ich górze i spodzie podczas formownia za pomocą 6 śrub M12/65 (rys. 4a). Następnie do tych płyt były przykręcane płyty górne o gr. 10 mm (rys. 4b) za pomocą sześciu śrub M12/20. Płyty górne mocowały bezpośrednio próbkę w uchwytach prasy od góry i od dołu za pomocą śrub M28/70.



Rys. 4. Wymiary płyt stalowych służących do zamocowania próbek w prasie; a) płyta dolna, b) płyta górna.

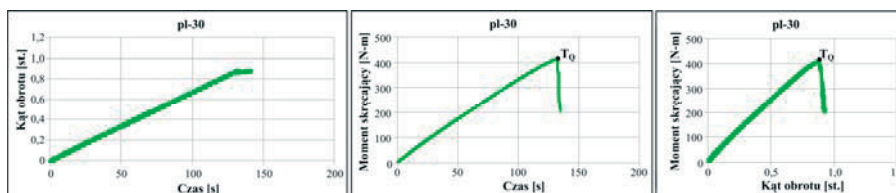
#### 2.3.3. Realizacja badań podstawowych

Próbki badano na maszynie wytrzymałościowej osiowo skrętnej MTS 809 Axial/Torsional Test System wg schematu obciążenia pokazanego na rys. 5.



Rys. 5. Widok próbki zamocowanej w prasie i schemat jej obciążenia.

Podczas eksperymentów sterowano kątem skręcenia ( $T$ ), przy zerowej sile osiowej. Założono mały przyrost  $T$  na poziomie  $0,5^\circ/\text{min}$  tak żeby moment krytyczny ( $T_Q$ ) osiągnąć po czasie ( $t$ ) kilku minut od momentu rozpoczęcia badania. W badaniach analizowano wartości  $T_Q$  oraz kąty obrotu ( $\theta$ ), przy których następowało uszkodzenie próbek. Na podstawie uzyskanych wyników z badań sporządzano wykresy zależności:  $\theta - t$ ,  $T - t$  i  $T - \theta$ , oraz obliczano odporności na pękanie. Przykładowe wykresy analizowanych zależności, dla jednej z próbek pokazano na rys. 6. Dodatkowo po wykonanych eksperymentach oceniano makroskopowo i mikroskopowo powierzchnie pękniętych próbek.



Rys. 6. Przykładowe wykresy uzyskane w badaniach dla próbki pl-30.

### 2.3.4. Wyznaczanie odporności na pękanie

Odporność na pękanie przy III modelu pęknięcia może być oceniana na podstawie znajomości następujących parametrów mechaniki pęknięcia: współczynnika intensywności naprężeń -  $K_{IIIc}$  [18, 20] lub energii pęknięcia -  $G_{IIIc}$  [19, 21, 22]. W poniższym artykule odporność na pękanie wyznaczano na podstawie parametru  $K_{IIIc}$  obliczanego z wzoru (1), bazując na wynikach badań eksperymentalnych.

$$K_{IIIc} = \frac{\tau_{\max} \cdot \sqrt{2\pi r}}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (1)$$

w którym:  $\tau_{\max}$  - maksymalne naprężenie,  $r$  - promień powierzchni skręcanej,  $\theta$  - kąt, przy którym nastąpiło uszkodzenie próbki.

## 3. Wyniki badań i ich analiza

W tabeli 3 zestawiono obliczone średnie wartości współczynników intensywności naprężeń  $K_{IIIc}$  wraz z rozrzutami wyników i parametrami statystycznymi (odchyleniami standardowymi -  $s$  i współczynnikami zmienności -  $\nu$ ).

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że dodatek pl do betonu zmienia jego odporność na pęknięcie przy III modelu pęknięcia. 20% dodatek pl powoduje wzrost parametru  $K_{IIIc}$  o 4,4%, natomiast zastąpienie cementu pl w ilości 30% obniża odporność betonu na pęknięcie o 14,1%. Podobne tendencje w uzyskiwanych wynikach zaobserwowano również w przypadku badań tych samych kompozytów przy I i II modelu pęknięcia [15, 17]. Średnie wartości  $K_{Ic}$  i  $K_{IIc}$  wraz z parametrami statystycznymi zestawiono w tabeli 4. Ponadto porównując wyniki badań dla I, II i III modelu pęknięcia zaobserwowano większą dokładność (mniejsze wsp. zmienności) wyników  $K_{IIIc}$  w porównaniu do  $K_{Ic}$  i  $K_{IIc}$ . Wpływ na to mogło mieć np.: precyzyjne przygotowanie próbek do badań dzięki wykonaniu specjalnych uchwytów, oraz wykorzystanie bardzo dokładnej prasy osiowo skrętniej MTS 809 z komputerowym zapisem wyników.

Tabela 3. Statystyczne wyniki odporności na pęknięcie  $K_{IIIc}$ 

Seria betonu	Analizowany parametr				
	$K_{IIIc,śr}$ [MN/m <sup>3/2</sup> ]	$s$ [MN/m <sup>3/2</sup> ]	$\nu$ [%]	$K_{IIIc,min}$ [MN/m <sup>3/2</sup> ]	$K_{IIIc,max}$ [MN/m <sup>3/2</sup> ]
pl-00	2,49	0,20	8,03	2,32	2,58
pl-20	2,60	0,24	9,23	2,49	2,76
pl-30	2,14	0,21	9,81	2,01	2,25

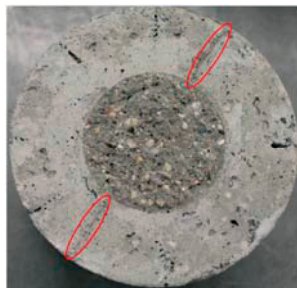
Tabela 4. Średnie wartości odporności na pęknięcie  $K_{Ic}$  i  $K_{IIc}$ 

Seria betonu	Analizowany parametr					
	$K_{Ic,śr}$ [MN/m <sup>3/2</sup> ]	$s$ [MN/m <sup>3/2</sup> ]	$\nu$ [%]	$K_{IIc,śr}$ [MN/m <sup>3/2</sup> ]	$s$ [MN/m <sup>3/2</sup> ]	$\nu$ [%]
pl-00	1,06	0,15	9,68	4,24	0,65	9,43
pl-20	1,09	0,22	10,38	4,39	0,81	11,63
pl-30	0,93	0,18	10,34	3,65	0,78	12,11

Wszystkie próbki podczas badań ulegały płaskim uszkodzeniom w miejscu zaformowania szczelin pierwotnych po kilku minutach od momentu przyłożenia obciążenia. Moment uszkodzenia charakteryzował się najczęściej:

- gwałtownym załamaniem na wykresie T -  $\theta$  (rys. 6),
- stałą wartością  $\theta$  utrzymującą się przez minimum kilkanaście sekund (rys. 6).

Na rys. 7 pokazano widok zbadanej próbki z zaznaczonymi miejscami połączenia zabetonowanych wkładek formujących szczeliny pierwotne. Widać na nim charakterystyczną płaską powierzchnię zniszczenia próbki. Taki sam sposób uszkodzenia zaprezentowano również w pracy [22].



Rys. 7. Widok pękniętej próbki po badaniu odporności na pęknięcie.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Modyfikacja struktury betonu aktywnymi dodatkami mineralnymi jakim są pl jest zasadna zarówno z punktu widzenia ekologicznego jak i ekonomicznego. W badaniach własnych wykazano również, że ten aktywny wypełniacz wpływa korzystnie na opóźnienie procesów destrukcyjnych w materiale i wzrost jego odporności na pęknięcie przy III modelu

pęknięcia. Zastąpienie 20% cementu dodatkiem aktywnych pucolanowo krzemionkowych pl spowodowało po 28 dniach dojrzewania wzrost w betonie parametru  $K_{IIIc}$ . Na uwagę zasługuje również analiza charakterystyk wytrzymałościowych badanych kompozytów. Zaobserwowano, że beton serii pl-20 posiadał większą wytrzymałość na ściskanie  $f_{cm15}$  niż beton bez dodatku pl. Podobne korzystne wyniki badań  $f_{cm15}$  dla betonów z 20% dodatkiem pl przedstawiono w pracy [2]. Kompozyty z dodatkiem 30% pl charakteryzowały się po 28 dniach dojrzewania, zarówno niższymi parametrami wytrzymałościowymi (tabela 2) jak i obniżoną odpornością na pękanie (tabela 3). Wyjaśnieniem spadku parametrów wytrzymałościowych w przypadku betonów pl-30, oraz niższej wytrzymałości  $f_{cm}$  w betonach pl-20 może być wolniejszy przyrost wytrzymałości w okresie do 28 dni w tych kompozytach, z uwagi na opóźnienie procesów wiązania i tężenia betonu z pl [2]. Mimo to przy dodatku 20% dobrej jakości pl, o wysokiej aktywności pucolanowej możliwe jest uzyskiwanie kompozytów o kilka procent wyższej odporności na pękanie w porównaniu do betonu referencyjnych już po okresie 28 dni. Potwierdzeniem przedstawionych w referacie wyników badań powinny być wnioski wynikające z planowanych eksperymentów tych samych kompozytów po okresie 90, 180 i 365 dni dojrzewania.

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych odporności na pękanie przy III modelu pęknięcia, studiów literaturowych i wcześniej przeprowadzonych eksperymentów można wysnuć następujące wnioski:

1. Dodatek pl do betonu zmienia jego odporność na pękanie  $K_{IIIc}$ .
2. Dodatek 20% pl powoduje wzrost  $K_{IIIc}$ , natomiast dodatek 30% pl spadek odporności na pękanie.
3. Proporcje wsp. intensywności naprężeń, które wynoszą:  $K_{IIIc}/K_{Ic}=2,3-2,4$  i  $K_{IIIc}/K_{IIc}=0,6$  świadczą, iż największą odporność na pękanie mają betony przy II modelu pęknięcia, natomiast najniższą przy I modelu.

## Literatura

- 1 Tkaczewska E., Małolepszy J. Wpływ uziarnienia krzemionkowych popiołów lotnych na odporność siarczanową cementu. Cement Wapno Beton 1 (2009) 26-33.
- 2 Giergiczny Z. Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. Seria: Inżyniera Łądowna. Monografia 325. Politechnika Krakowska, Kraków 2006.
- 3 Bastian S. Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym. Arkady. Warszawa 1980.
- 4 Freidenberg E., Freidenberg P. Wpływ popiołów lotnych na wybrane właściwości betonów podwodnych. Przegląd Budowlany 10 (2007) 32-36.
- 5 Franus W. Characterization of X-type zeolite prepared from coal fly-ash. Polish Journal of Environmental Studies 21 (2012) 337-343.
- 6 Vejmelkova E, Pavlikova M, Keepert M., Kersner Z., Rovnanikova P., Ondracek M., Sedlmajer M. Cerny R. Wpływ popiołu lotnego na właściwości BWW. Cement Wapno Beton 4 (2009) 189-204.
- 7 Bharatkumar B. H., Raghu Prasad B. K., Ramachandramurthy D. S., Narayanan R., Gopalakrishnan S. Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance . Materials and Structures 38 (2005) 63-72.
- 8 Tang W.C., Lo T. Y., Chan W. K. Fracture properties of normal and lightweight high-strength concrete. Magazine of Concrete Research 60 (2008) 237-244.
- 9 Reinhardt H. W., Ozbolt J., Xu S., Dinku A. Shear of structural concrete members and pure mode II testing. Advanced Cement Based Materials 5 (1997) 75-85.
- 10 Prokopski G. Mechanika pęknięcia betonów cementowych. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2007.
- 11 Brandt A. M., Pokropski G. Critical values of stress intensity factor in mode II fracture of cementitious composites. Journal of Materials Science 25 (1990) 3605-3610.
- 12 Golewski G. L., Sadowski T. S. Rola kruszywa grubego w procesie destrukcji kompozytów betonowych poddanych obciążeniom doraźnym. IZT Sp. z o.o., Lublin 2008.
- 13 Sadowski T., Golewski G. Effect of aggregate kind and graining on modeling of plain concrete under compression. Computational Materials Science 43 (2008) 119-126.

- 14 Van Mier J. G. M. Fracture processes of concrete. Assessment of material parameters for fracture models. CRC Press, Boca Raton, New York, London, Tokyo, Florida, 2000.
- 15 Golewski G. L., Golewski P., Sadowski T. Numerical modelling crack propagation under Mode II fracture in plain concretes containing siliceous fly-ash additive using XFEM method. *Computational Materials Science* 62 (2012) 75-78.
- 16 Golewski G. L. Mikrostruktura uszkodzeń w kompozytach betonowych z osnowami cementowymi. *Kompozyty (Composites)* 1 (2008) 93-98.
- 17 Golewski G. L., Sadowski T. Experimental investigation and numerical modelling fracture processes under Mode II in concrete composites containing fly-ash additive at early age. *Solid State Phenomena* 188 (2012) 158-163.
- 18 Suresh S., Tschegg E. K. Combined mode I - mode III fracture of fatigue-precracked alumina. *Journal of American Ceramic Society* 70 (1987) 726-733.
- 19 Ehart R. J. A., Stanzl-Tschegg S. E., Tschegg E. K. Crack face interaction and mixed-mode fracture of wood composites during mode III loading. *Engineering Fracture Mechanics* 61 (1988) 253-278.
- 20 Vaziri A., Nayeb-Hashemi H. The effect of crack surface interaction on the stress intensity factor in mode III crack growth in round shafts. *Engineering Fracture Mechanics* 72 (2005) 617-629.
- 21 Bazant Z. P., Prat P. C. Measurement of mode III fracture energy of concrete. *Nuclear Engineering and Design* 106 (1988) 1-8.
- 22 Bazant Z.P., Prat P.C., Tabbara M.R. Antiplane shear fracture tests (Mode III). *ACI Materials Journal* 87 (1990) 12-19.
- 23 Nowak-Michta A. Mrozoodporność betonów z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych. 55 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Kielce-Krynica 2009, 439-446.
- 24 Atis C. D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. *Construction and Building Materials* 17 (2003) 147-152.
- 25 ASTM C 618-03 Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.
- 26 PN-EN 450-1:2009 Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
- 27 Giergiczny E., Giergiczny Z. Wpływ zmiennej jakości popiołów lotnych na właściwości kompozytów cementowo-popiołowych. *Cement Wapno Beton* 3 (2010) 157-163.
- 28 Giergiczny Z. Popioły lotne z dużą zawartością związków wapnia. *Cement Wapno Beton* 5 (2005) 271-282.
- 29 Tkaczewska E. Metody badań aktywności pucolanowej dodatków mineralnych. *Materiały Ceramiczne (Ceramic Materials)* 63, 3 (2011) 536-541.

## An analysis of fracture toughness, at third mode fracture in concretes containing fly-ash additives

Grzegorz L. Golewski<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Civil Engineering Structures, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: g.golewski@pollub.pl*

**Abstract:** This paper presents the results of fracture toughness tests of concrete with fly ash (FA), specified at the third mode fracture. Concrete composites with the additives of 0%, 20% and 30% siliceous FA were analysed. Fracture toughness tests were performed on axial torsion machine MTS 809 Axial/Torsional Test System, using the cylindrical specimens with dimensions of 150/300 mm, with a circumferential notch made in the half-height of cylinders. The studies examined effect of FA additive on the parameter  $K_{IIIc}$ . The Analysis of the results revealed that a 20% FA additive causes increase in  $K_{IIIc}$ , while a 30% FA additive causes decrease in fracture toughness.

**Keywords:** concrete, fly ash, fracture toughness, third mode fracture.