

dr hab. inż. Grzegorz Ludwik Golewski¹⁾

Makroskopowa ocena procesów pęknięcia w betonach z popiołami lotnymi

Macroscopic evaluation fracture processes in fly ash concretes

DOI: 10.15199/33.2015.11.66

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań odporności na pęknięcie betonów z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych (*pl*), określane wg pierwszego modelu pęknięcia. Analizie poddano kompozyty betonowe z dodatkiem: 0, 20 i 30% *pl*. Badania odporności na pęknięcie przeprowadzono na prasie MTS 810. Oceniano wpływ dodatku *pl* na wartość parametru K_{Ic}^S . Analiza uzyskanych wyników badań wykazała, że 20% dodatek *pl* powoduje wzrost K_{Ic}^S natomiast dodatek 30% *pl* spadek odporności na pęknięcie. Dodatkowo przedstawiono praktyczne możliwości wykorzystania systemu ARAMIS do makroskopowej oceny propagacji pęknięć w betonach.

Słowa kluczowe: kompozyt betonowy, popiół lotny, kształt rysy, mechanika pęknięcia, system ARAMIS.

Abstract. This paper presents the results of fracture toughness tests of concrete with siliceous fly ash (FA), specified at the Mode I fracture. Concrete composites with the additives of 0%, 20% and 30% siliceous FA were analysed. Fracture toughness tests were performed on MTS 810 testing machine. The studies examined effect of FA additive on the parameter K_{Ic}^S . The Analysis of the results revealed that a 20% FA additive causes increase in K_{Ic}^S while a 30% FA additive causes decrease in fracture toughness. Additionally the research results demonstrate the possibilities of practical application of ARAMIS system for analysing the development of defects in the structure of concretes containing FA additives. This system can be useful for macroscopic estimation of crack propagation.

Keywords: concrete composite, fly ash, shape of crack, fracture mechanics, ARAMIS System.

Zmiany, wynikające z coraz częstszego stosowania w technologii betonów cementów hybrydowych, wykorzystujących dodatki mineralne, będące ubocznymi produktami procesów przemysłowych [1, 2], wpływają na ograniczenie emisji CO₂ oraz rozwój tzw. zielonego betonu [3, 4]. Konstrukcje z „zielonego betonu” to konstrukcje zrównoważone środowiskowo, których wpływ na środowisko podczas pełnego cyklu życia jest zredukowany do minimum. Do tej grupy betonów można zaliczyć kompozyty z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych (*pl*) [5]. O właściwościach tworzyw betonowych, m.in. o ich trwałości, decydują głównie czynniki strukturalne oraz wzajemne relacje pomiędzy mikro- a makrostrukturą materiału. Dokładna analiza procesów pęknięcia i trajektorii przebiegu pęknięć w kompozytach betonowych powinna być poddawana ocenie mikroskopowej, makroskopowej i numerycznej. Opis powstawania i propagacji pęknięć wymaga znajomości wszystkich parametrów mechaniki pęknięcia K_{Ic} , K_{IIc} i K_{IIIc} [6]. Wyniki badań odporności na pęknięcie betonów modyfikowanych dodatkiem *pl* wg II modelu pęknięcia przedstawiono w [7], analizy numeryczne procesów pęknięcia w programie ABAQUS w [8], a charakterystykę mikropęknięć w strukturze kompozytów w [9].

Dotychczas ukazało się niewiele publikacji [10 – 15] opisujących badania odporności na pęknięcie kompozytów, z dodatkiem *pl*, wg I modelu pęknięcia. Odnoszą się one najczęściej do badań betonów wysokowartościowych [11 – 13] lub betonów z dodatkiem popiołów innych niż krzemionkowe, tzn. lotnych wapniowych [14] oraz fluidalnych [15]. Niejednoznaczność wyników badań eksperymentalnych kompozytów z bardzo różną procentowo zawartością *pl* oraz brak

kompletnych informacji o wielkości i kształcie makrozarysowań występujących w tego typu betonach, skłoniły mnie do zrealizowania własnej pracy badawczej.

W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i odporności na pęknięcie betonów z dodatkiem *pl* wg I modelu pęknięcia. Do dokładnej analizy trajektorii makrorys wykorzystano system cyfrowej korelacji obrazu – ARAMIS. Badania przeprowadzono na tych samych betonach, na których wcześniej oceniano odporność na pęknięcie wg II modelu pęknięcia, tzn. betonach zwykłych (P-00) oraz modyfikowanych 20% (P-20) i 30% (P-30) dodatkiem *pl* [7]. Wyniki badań wytrzymałości i odporności na pęknięcie po 28 dniach dojrzewania określono jako średnią z sześciu pomiarów dla każdej serii betonu.

Badanie odporności na pęknięcie wg I modelu pęknięcia

Badania odporności na pęknięcie wg I modelu pęknięcia (rozciąganie przy zginaniu) przeprowadzono zgodnie z zaleceniami RILEM [16] oraz wskazówkami przedstawionymi w [17]. W badaniach własnych ustalano odporność na pęknięcie kompozytów z dodatkiem *pl* na podstawie wyników doświadczalnych krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic}^S . Wykorzystując ten wskaźnik, opisano wpływ innych dodatków mineralnych, m.in. mikrokrzemionki [18], metakaolinitu [15] i popiołów fluidalnych [15], na parametry pęknięcia betonu. Ustalono, że aktywne dodatki mineralne powodują wzmocnienie warstwy stykowej pomiędzy kruszywem a zaczynem cementowym i w efekcie te miejsca są bardziej zwarte i mają mniejszą ilość mikrouszkodzeń. Kompozyty z aktywnymi dodatkami mineralnymi charakteryzują się większą odpornością na pęknięcie w porównaniu z betonem zwykłym. Korzystny efekt wzrostu odporności na pęknięcie przy zginaniu zaobserwowano również w badaniach betonów ze zbrojeniem rozproszonym [19].

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury; e-mail: glgol@wp.pl

Stanowisko do badań eksperymentalnych

Do oceny odporności betonów na pęknięcie, wg I modelu pęknięcia, użyto belek o wymiarach 700 x 150 x 80 mm z jedną szczeliną pierwotną, obciążonych siłą skupioną w środku rozpiętości. Belki formowano w rozbielanych skręcanych formach drewnianych. Założony wymiar szczeliny pierwotnej w belkach uzyskano przez zabetonowanie stalowych płaskowników o grubości 3 mm. W trakcie formownia belek umieszczono po obu stronach szczeliny pierwotnej po 2 kołki rozporowe, do których przykręcono wkrętami uchwyty sprawdzianu zaciskowego grubości 5 mm wraz z podkładkami. Na uchwytach zawieszono blaszkowy ekstensometr osiowy. Wszystkie niezbędne wyniki potrzebne do ustalenia krytycznych współczynników intensywności naprężeń betonów uzyskano na podstawie eksperymentów przeprowadzonych na maszynie wytrzymałościowej o dużej sztywności, ze sprzężeniem zwrotnym i komputerową rejestracją wyników – MTS 810.

Szerokość rozwarcia szczeliny pierwotnej mierzono w trakcie badań za pomocą czujnika rozwarcia pęknięcia – blaszkowego ekstensometru osiowego MTS. Proces propagacji szczelin od momentu ich inicjacji aż do zniszczenia belek śledzono dzięki systemowi cyfrowej korelacji obrazu – ARAMIS. Z uwagi na konieczność specjalnego przygotowania próbek oraz potrzebę uzyskania przez czujnik systemu niezakłóconego dostępu w obszarze szczeliny pierwotnej, bazę do zamocowania kamer w systemie ARAMIS umieszczono po przeciwnej stronie belki.

Proces propagacji szczelin od momentu ich inicjacji aż do zniszczenia belek śledzono dzięki systemowi cyfrowej korelacji obrazu – ARAMIS. Z uwagi na konieczność specjalnego przygotowania próbek oraz potrzebę uzyskania przez czujnik systemu niezakłóconego dostępu w obszarze szczeliny pierwotnej, bazę do zamocowania kamer w systemie ARAMIS umieszczono po przeciwnej stronie belki.

Badanie w prasie MTS 810

Obciążanie belek miało charakter statyczny. Wzrost siły stopniowano przemieszczeniem tłoka prasy z prędkością, którą dobrano w taki sposób, aby siłę maksymalną osiągnąć w czasie ok. 5 min. Następnie odciążono element, a po zmniejszeniu obciążenia do 0 kN, ponownie obciążano próbkę i stosując tę samą zasadę powtarzano cykle aż do zniszczenia belek. W przypadku każdej próbki rejestrowano dwie zależności, które następnie przedstawiano w formie wykresów:

- obciążenie (F) – przemieszczenie rozwarcia wylotu szczeliny (CMOD);

- obciążenie – przemieszczenie punktu przyłożenia siły (f).

Na podstawie wyników badań w prasie MTS wyznaczano odporność na pęknięcie K_{Ic}^S , korzystając z wzorów podanych w [16].

Ocena procesów pęknięcia za pomocą systemu ARAMIS

ARAMIS to system do optycznej analizy odkształceń, przemieszczeń i naprężeń materiałów w trzech wymiarach. Charakteryzuje się dużą rozdzielczością i dokładnością pomiarów. Dane niezbędne do obliczenia parametrów system zbiera przez wykonywanie zdjęć powierzchni badanych próbek dwoma kamerami jednocześnie w równych założonych odstępach czasu.

Próbki wykorzystywane w badaniach powinny być specjalnie przygotowane przez pomalowanie ich powierzchni badawczych farbą. Struktura próbki jest skanowana przez sys-

tem i na tej podstawie powstaje jej obraz w programie. W efekcie użytkownik może sam zaplanować, które miejsca próbki są istotne podczas badań lub np. które przekroje mają być analizowane w testach wytrzymałościowych. System ARAMIS odczytuje siły z prasy, co umożliwi wykonanie takich samych zależności, jakie uzyskuje się w przypadku badań w prasie MTS. Ponadto może zapisać przebieg badania w postaci filmu i przeanalizować proces destrukcji próbki od początku jej obciążania aż do zniszczenia. Na filmie można np. zaobserwować, jak wygląda proces rozwoju rys pierwotnych w próbkach i w jakich kierunkach następuje ich propagacja (fotografia). Możliwość śledzenia strefy pęknięcia z wykorzystaniem



Przykładowe kształty rys zaobserwowane w badaniach systemem ARAMIS przy I modelu pęknięcia (opis w artykule)

Examples of crack shapes observed in the studies using ARAMIS System and in the Mode I fracture (described in the text)

systemów cyfrowej korelacji obrazu pozwala na dokładne przeanalizowanie procesu wzrostu szczeliny na kolejnych poziomach obciążenia. Procedura taka wymaga pomiarów rozwarcia pęknięcia na całej jego wysokości. W efekcie możliwe jest stworzenie cyfrowego obrazu kształtu szczeliny, który zazwyczaj wykazuje dużą zbieżność z trajektoriami pęknięć zaobserwowanymi podczas badań doświadczalnych [20] bądź obliczeń numerycznych [21]. W celu dokładniejszego przeanalizowania procesów pęknięcia w betonach czasami łączy się metody badawcze bazujące na systemach cyfrowych korelacji obrazu z innymi metodami detekcji pęknięć w betonie, np. metodą emisji akustycznej [22].

Analiza wyników badań

Na podstawie badań zestawiono średnie wartości wytrzymałości na ściskanie i odporności na pęknięcie K_{Ic}^S wraz ze współczynnikami zmienności – v (tabela). Dokładna analiza do wpływu dodatku *pl* na wartość K_{Ic}^S prowadzi do wniosku, że wyraźnie zmienia on odporność betonu na pęknięcie wg I modelu pęknięcia i wpływa na układ oraz kształt makrorys w strukturze materiału. 20% dodatek *pl* zwiększa o 2,8% odporność betonu na pęknięcie, natomiast zastąpienie części cementu 30% dodatkiem *pl* zmniejsza K_{Ic}^S o 12,3% w porównaniu z betonem zwykłym. Prezentowane wyniki są zbieżne z badaniami odporności na pęknięcie wg II modelu pęknięcia [7]. Zaobserwowano, że beton serii P-20 wykazuje o 3,1% większą wytrzymałość na ściskanie f_{cm15} niż beton bez dodatku, natomiast kompozyt z dodatkiem 30% *pl* charakteryzował się po 28 dniach dojrzewania o 5,1% mniejszą wytrzymałością na ściskanie (tabela). Zarówno w przypadku badań wytrzymałościowych betonów modyfikowanych, jak i ich odporności na pęknięcie wyraźnie zaznaczają się większe rozrzuty wyników (zwiększone wartości współczynników zmienności). W przypadku K_{Ic}^S przekraczają one 10%.

Dzięki wykorzystaniu systemu ARAMIS, w badaniach odporności na pęknięcie, możliwe było dokładne prześledzenie

Wytrzymałość na ściskanie f_{cm15} i odporność na pękanie analizowanych betonów

Average values of the compressive strengths and the fracture toughness

Seria betonu	f_{cm15} [MPa]	v [%]	K_{Ic}^S [MN/m ^{3/2}]	v [%]
P-00	47,51 – 100	4,58	1,06 – 100	9,43
P-20	48,96 – 103,1	6,17	1,09 – 102,8	10,09
P-30	45,10 – 94,9	7,87	0,93 – 87,7	10,75

etapów rozwoju szczelin pierwotnych w belkach. Analiza procesów propagacji pęknięć polegała na wygenerowaniu zdjęć, w trakcie obciążania próbek, a następnie porównaniu zmian, jakie występowały w ścieżkach pękania na kolejnych etapach obciążenia. Pozwoliło to m.in. na ustalenie, czy propagacja rys przebiegała jednopłaszczyznowo, czy z zakrzywieniem trajektorii pęknięć. Na fotografii widać, czy kształt rysy był jednorodny, czy z rozgałęzieniami, a więc w postaci tzw. branches cracks, a także rodzaje ścieżek pękania, tzn. wygląd zewnętrznych zarysowań belek w obszarze szczelin pierwotnych w końcowych etapach ich obciążania. Można wyróżnić następujące typy rys:

- quasi-proste, występujące głównie w najbardziej kruchych betonach P-00 (fotografia a);
- zakrzywione bez rozgałęzień lub z niewielkimi rozgałęzieniami, występujące głównie w betonach P-20 (fotografia b);
- zakrzywione z licznymi rozgałęzieniami, występujące jedynie w betonach P-30 (fotografia c).

W większości przypadków o zniszczeniu belek decydowała jedna rysa biegnąca od wierzchołka szczeliny pierwotnej w kierunku miejsca przyłożenia siły (fotografia a i b). Pęknięcia wykazywały niewielkie rozgałęzienia i lekko zakrzywioną trajektorię propagacji rysy. Taki kształt pęknięć makroskopowych prawdopodobnie był spowodowany inkluzjami w strukturze betonu występującymi na drodze bądź w sąsiedztwie ścieżek pękania. Podobny sposób rozwoju uszkodzeń wg I modelu pękania zaobserwowano również w badaniach SEM przedstawionych w [23]. W przypadku betonów serii P-30 wyraźne zakrzywienie ścieżek pękania i duża liczba rozgałęzień miały bezpośredni związek ze znaczną heterogenicznością kompozytów, co potwierdziły wcześniejsze badania mikrostrukturalne [9].

Wnioski z badań są następujące:

- dodatek pl zmienia odporność betonu na pękanie K_{Ic}^S ;
- beton z 20% dodatkiem pl charakteryzuje się o kilka procent większą odpornością na pękanie niż beton zwykły;
- odporność na pękanie betonu z 30% dodatkiem pl jest o kilkanaście procent mniejsza w porównaniu z K_{Ic}^S betonu niemodyfikowanego;
- dodatek pl zmienia kształt i strukturę ścieżek pękania ocenianych makroskopowo (fotografia);
- istnieje wyraźna korelacja pomiędzy wynikami badania odporności na pękanie betonów z dodatkiem pl ocenianymi wg I i II modelu pękania.

Literatura

[1] Meyer C.: The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31, 2009, 601 – 605.
 [2] Haustein E., Quant B.: Wpływ mikrosfer – frakcji odpadów paleńskich – na mikrostrukturę i wybrane właściwości betonu. *Materiały Budowlane*, 1/2014, 50 – 53.

[3] Ajdukiewicz A.: „Zielony beton” w konstrukcjach – aspekty materiałowe i technologiczne. *Materiały Budowlane*, 12/2012, 2 – 6.
 [4] Ajdukiewicz A.: „Zielony beton” w konstrukcjach – aspekty projektowe i przykłady. *Materiały Budowlane*, 1/2013, 76 – 79.
 [5] Giergiczyński Z.: Dodatki mineralne – niezastąpione składniki współczesnego cementu i betonu. *Materiały Budowlane*, 3/2009, 46 – 50.
 [6] Sadowski T., Golewski G. L., Effect of aggregate kind and grading on modeling of plain concrete under compression. *Computational Materials Science*, 43, 2008, 119 – 126.
 [7] Golewski G. L.: Analiza procesów pękania w kompozytach betonowych z dodatkiem popiołów lotnych. *Materiały Budowlane* 11/2011, 39 – 42.
 [8] Golewski G. L., Golewski P., Sadowski T.: Numerical modeling crack propagation under Mode II fracture in plain concretes containing siliceous fly ash additive using XFEM method. *Computational Materials Science*, 62, 2012, 75 – 78.
 [9] Golewski G. L.: Odporność na pękanie a mikrostruktura w betonach z dodatkiem popiołów lotnych. *Materiały Budowlane*, 10/2013, 28 – 30.
 [10] Lam L., Wong Y. L., Poon C. S.: Effect of fly ash and silica fume on compressive and fracture behaviors of concrete. *Cement and Concrete Research*, 28, 1998, 271 – 283.
 [11] Bharatkumar B. H., Raghuprasad B. K., Ramachandramurthy D. S., Narayanan R., Gopalakrishnan S.: Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance concrete. *Materials and Structures*, 38, 2005, 63 – 72.
 [12] 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.
 [13] Vejmelkova E., Pavlikova M., Keepert M., Kersner Z., Rovnanikova P., Ondracel M., Sendmajer M., Cerny R.: Wpływ popiołu lotnego na właściwości BWW. *Cement Wapno Beton*, 4, 2009, 189 – 204.
 [14] Roesler J., Paulino G. H., Park K., Gaedicke C.: Concrete fracture prediction using bilinear softening. *Cement and Concrete Composites*, 29, 2007, 300 – 312.
 [15] Konkol J., Pokropski G.: Wpływ wieku betonów z dodatkiem popiołu fluidalnego lub metakaolinitu na ich właściwości wytrzymałościowe. *Drogi i Mosty*, 13, 2014, 49 – 67.
 [16] Determination of fracture parameters (K_{Ic} and $CTODc$) of plain concrete using three-point bend tests. RILEM Draft Recommendations, TC 89-FMT Fracture Mechanics of Concrete Test Methods. *Materials and Structures*, 23, 1990, 457 – 460.
 [17] Guinea G. V., Planas J., Elices M.: Measurement of the fracture energy using three point bend tests: Part 1–Influence of experimental procedures. *Materials and Structures*, 25, 1992, 212 – 218.
 [18] Prokopski G., Langier B.: Effect of water/cement ratio and silica fume addition on the fracture toughness and morphology of fractured surfaces of gravel concretes. *Cement and Concrete Research*, 30, 2000, 1427-1433.
 [19] Glinicki M. A., Litorowicz A., Zieliński M.: Badanie fibrobetonów na pękanie przy zginaniu. *Materiały Budowlane*, 3/2002, 74 – 76.
 [20] Wu Z., Rong H., Zheng J., Xu F., Dong W.: An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique. *Engineering Fracture Mechanics*, 78, 2011, 2978 – 2990.
 [21] Skarżyński Ł., Syroka E., Tejchman J.: Measurements and calculations of the width of the fracture process zones on the surface of notched concrete beams. *Strain*, 47, 2011, e319 – e332.
 [22] Alam S. Y., Saliba J., Loukili A.: Fracture examination in concrete through combined digital image correlation and acoustic emission techniques. *Construction and Building Materials*, 69, 2014, 232 – 242.
 [23] Bascoul A., Turatsinze A.: Microstructural characterization of mode I crack opening in mortar. *Materials and Structures*, 27, 1994, 71 – 78.

Przyjęto do druku: 29.09.2015 r.