



Grzegorz L. Golewski

Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin
Corresponding author. E-mail: ggol@wp.pl

Otrzymano (Received) 12.07.2010

ZASTOSOWANIE SYSTEMU ARAMIS W BADANIACH ODPORNOŚCI NA PĘKANIE KOMPOZYTÓW BETONOWYCH MODYFIKOWANYCH DODATKIEM POPIOŁÓW LOTNYCH

Betony konstrukcyjne z dodatkiem popiołów lotnych są materiałami stosowanymi obecnie dość powszechnie w budownictwie. Wpływają na to głównie względy ekonomiczne związane z możliwością wykorzystania tego odpadu przemysłowego jako efektywnego substytutu cementu. W mechanice betonu istotną rolę odgrywa analiza uszkodzeń wewnątrz struktury kompozytów. Pomocnym narzędziem w badaniach nad procesami propagacji rys w elementach betonowych jest system ARAMIS, służący do optycznej analizy deformacji próbek i elementów konstrukcyjnych. Szerokie zalety systemu pozwalają np. na przeanalizowanie rozwoju szczelin pierwotnych w próbce, w trakcie przykładanego obciążenia i sukcesywne śledzenie ich propagacji wraz z możliwością zapisu tego procesu jako filmu do pliku wmp. W pracy przedstawiono badania odporności na pękanie betonów zawierających 0, 20 i 30% dodatku popiołów lotnych. Kompozyty zawierające 20% dodatek popiołów lotnych charakteryzowały się najlepszą odpornością na pękanie. Zaprezentowane wyniki badań pokazują praktyczne możliwości zastosowania systemu ARAMIS w analizach rozwoju defektów w strukturze betonów popiołowych. System ten może być pomocny zarówno do makroskopowego szacowania propagacji rys, jak i wyznaczania parametrów mechaniki pękania betonu, zbieżnych z wynikami uzyskiwanymi metodami tradycyjnymi na podstawie oceny przemieszczeń prasy.

Słowa kluczowe: popiół lotny, kompozyt betonowy, odporność na pękanie, rysa pierwotna, system ARAMIS

USE OF ARAMIS SYSTEM FOR TESTING FRACTURE TOUGHNESS OF CONCRETE COMPOSITES MODIFIED WITH FLY-ASH ADDITIVES

Nowadays, structural concretes containing additives of fly-ash are quite commonly used in the construction industry. This is mainly due to economic reasons connected with the possibility of utilizing this industrial waste (fly-ash) as an effective substitute for cement. The analysis of the defects occurring inside the composite structure plays a significant role in concrete mechanics. If we know the parameters of fracture mechanics or the levels of critical compressive stresses, we can estimate at what load level a defect will develop in an uncontrolled manner in the material. The ARAMIS system is a useful tool for research on the processes of crack propagation in concrete elements. The system is designed for the optical analysis of deformations occurring in test specimens and constructional elements. Significant advantages of the system make it possible, for example, to analyse the development of initial cracks in a specimen in the course of a load application as well as to observe the propagation of cracks in a successive manner. The system provides the possibility of recording the crack propagation process in the form of a film (wmp file). The study presents the research on the fracture toughness of concretes containing 0, 20 and 30% additives of fly-ash. The composites containing a 20% additive of fly-ash were characterized by the best fracture toughness. Initial cracks propagated in the specimen at the angles from 0 to 15°. The research results demonstrate the possibilities of the practical application of the ARAMIS system for analysing the development of defects in the structure of concretes containing fly-ash additives. This system can be useful for the macroscopic estimation of crack propagation as well as for determining concrete fracture mechanics that are convergent with the results obtained with the use of traditional methods based on the estimation of press displacement.

Keywords: fly-ash, concrete composite, fracture toughness, initial crack, ARAMIS system

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 [1, 2].

Jednym z najczęściej stosowanych dodatków do betonu są krzemionkowe popioły lotne (*p/l*), będące ubocznym produktem spalania węgla kamiennego w elektrowniach i elektrociepłowniach. Stanowią one

cenny i pożądaną surowiec przemysłu materiałów budowlanych [3]. Wiąże się to zarówno z obniżeniem kosztów produkcji betonu poprzez zmniejszenie ilości cementu w mieszance, jak również z poprawieniem wielu cech stwardniałego kompozytu. Jaki wpływ ma dodatek *pl* na podstawowe parametry betonów, szeroko opisano w licznych monografiach, np. [4-7].

Niestety, pomimo znacznej ilości publikacji z tego działu tematycznego, niektóre właściwości betonu z dodatkiem *pl* były analizowane bardzo rzadko. W literaturze napotkano tylko na kilka rozpraw [8-10], opisujących badania tego typu kompozytów w kontekście ich odporności na kruche pękanie. Ponadto dotyczą one głównie badań betonów wysokowartościowych [8, 9], uwzględniając przy tym tylko I model pękania. Jak pokazują jednak badania [11-13] i prace analityczne [12-15], rzeczywiste materiały konstrukcyjne w trakcie obciążania ulegają mikrouszkodzeniom głównie przy mieszanym modelu pękania, gdzie nieodzowne jest uwzględnienie przypadku ścinania w kierunku podłużnym do krawędzi szczeliny. Występowanie w procesie destrukcji materiału II modelu pękania powoduje zazwyczaj pojawianie się w 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].

MATERIAŁY WYKORZYSTANE W BADANIACH

Badania odporności na pękanie oraz analizy powstawania i rozwoju rys pierwotnych w próbkach przeprowadzono na trzech mieszankach betonowych: bez dodatku *pl* (**P00**), z 20% dodatkiem *pl* (**P20**) i z 30% dodatkiem *pl* (**P30**), a metodyka ustalania ich składu była podobna do zaprezentowanej w pracach [17, 18]. Do wykonania mieszanek zastosowano: cement portlandzki CEM I 32,5 R z cementowni Chełm, kruszywo naturalne żwirowe o maksymalnym uziarnieniu do 8 mm ze złóż Las Suwalski, piasek kopalny ze złóż Markuszów oraz *pl* i plastyfikator Stachement 2060 (0,6% masy spoiwa). Wszystkie mieszanki miały taki sam wskaźnik wodno-spoiwowy $w/s = 0,4$. Ich składy podano w tabeli 1.

TABELA 1. Skład mieszanek betonowych
TABLE 1. Composition of the concrete mixtures

Seria betonu	Cement kg/m ³	Popiół lotny kg/m ³	Woda kg/m ³	Piasek kg/m ³	Żwir kg/m ³	Plastyfikator kg/m ³
P00	352	0	141	676	1205	2
P20	282	70	141	676	1205	2
P30	246	106	141	676	1205	2

Popiół lotny krzemionkowy użyty do badań pochodził z EC Puławy i na podstawie wytycznych podanych

w pracach [19, 20] charakteryzował się następującymi parametrami:

- strata prażenia: kategoria A, poniżej 5%,
- mialkość: kategoria S, poniżej 12%,
- gęstość właściwa: 2,1 g/cm³.

Należy zwrócić uwagę na bardzo dobre parametry jakościowe zastosowanego *pl* dotyczące zarówno jego niskich strat prażenia (kategoria A), jak i małej pozostałości na sicie cząstek o wielkości 0,045 mm (mialkość kategorii S). *pl* o takich parametrach, ze względu na znaczną redukcję wody zarobowej, są bardzo często stosowane jako składnik betonów wysokowartościowych [4, 7, 21]. Niskie straty prażenia powodują, że w tego typu dodatkach występują głównie ziarna sferyczne poprawiające urabialność mieszanki, ograniczona jest natomiast ilość niekorzystnych ziaren koksiku [22]. Duże zalety tzw. mikrosfer, będących frakcją krzemionkowych *pl*, wykazali autorzy w pracy [23]. Szczególnie korzystny wpływ zaobserwowano we wzmocnieniu warstw stykowych w tego typu kompozytach oraz polepszeniu ich parametrów mechaniki zniszczenia.

Z każdej mieszanki wykonano 12 próbek sześciennych o krawędzi 15 cm do badań wytrzymałościowych na ściskanie i rozciąganie przez rozłupywanie (po 6 do każdego badania), 6 walców o średnicy 15 cm i wysokości 30 cm do badań wytrzymałości na ściskanie i wyznaczenia modułu sprężystości betonu (po 3 do każdego badania). Próbki dojrzewały przez 28 dni w laboratorium (pierwsze 14 dni w środowisku wilgotnym), a następnie zostały zbadane na maszynie wytrzymałościowej Advantest 9 o maksymalnej sile naciśku 2000 kN. Charakterystyki stwardniałego betonu zestawiono w tabeli 2.

TABELA 2. Charakterystyki stwardniałego betonu
TABLE 2. Characteristics of hardened concrete

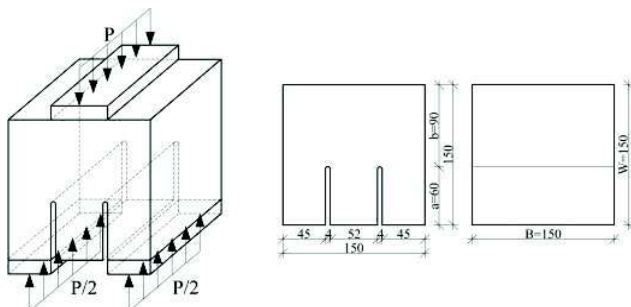
Seria betonu	f_{cm15} MPa	$f_{cm15/30}$ MPa	f_{cm} MPa	E_{cm} GPa
P00	47,51	39,18	3,58	37,27
P20	48,96	31,50	3,36	36,24
P30	45,10	29,19	3,27	35,60

ZAKRES I METODYKA PROWADZENIA BADAŃ

Cel i zakres badań

Zasadniczym celem badań było oszacowanie, jaki wpływ ma modyfikacja składu betonów konstrukcyjnych *pl* na podstawowe parametry mechaniki pękania określane przy II modelu rozwoju uszkodzeń [11, 12]. Do badań podstawowych wykonano 6 próbek sześciennych o krawędzi 15 cm z dwiema szczelinami pierwotnymi, uformowanymi poprzez zabetonowanie w kostkach dwóch stalowych zaokrąglonych płaskowników grubości 4 mm (rys. 1).

Badania wykonano z wykorzystaniem: prasy hydraulicznej z zapisem elektronicznym o maksymalnej sile nacisku 100 kN - MTS 810 oraz aparatury do optycznej analizy deformacji 3D wraz z systemem do zapisu i przetwarzania danych - ARAMIS.



Rys. 1. Wymiary oraz schemat obciążenia próbki

Fig. 1. Specimen dimensions and load diagram

Badania w prasie MTS

Badania polegały na obciążaniu próbek przez jednostajny przyrost siły, który był regulowany za pomocą szybkości przemieszczenia głowicy prasy w funkcji czasu. Wartość przemieszczenia założono na poziomie 0,25 mm/min tak, aby czas od momentu przyłożenia obciążenia do chwili wystąpienia w próbce siły krytycznej P_Q (powodującej rozwój szczeliny pierwotnej) wyniósł około kilku minut. MTS w trakcie badań dokonywał zapisu siły i przemieszczenia dolnej głowicy tłoka w czasie. Uzyskane w ten sposób dane pozwoliły na wykonanie wykresów zależności: siła (P) - czas (t) i P - przemieszczenie (f) oraz określenie wartości P_Q i parametrów mechaniki pękania.

Badania za pomocą systemu ARAMIS

ARAMIS jest systemem służącym do optycznej analizy odkształceń, przemieszczeń i naprężeń materiałów w trzech wymiarach. Charakteryzuje się wysoką rozdzielczością badawczą i dużą dokładnością pomiarów. Dane niezbędne do obliczeń powyższych parametrów system zbiera poprzez wykonywanie zdjęć powierzchni badanych próbek dwoma kamerami jednocześnie w równych założonych odstępach czasu. W trakcie doświadczeń system ARAMIS odczytuje siły z prasy, co umożliwia wykonanie takich samych wykresów zależnościowych, jakie uzyskuje się w przypadku badań na prasie MTS. Ponadto system jest w stanie zapisać przebieg badania w postaci filmu, co umożliwi później w prosty sposób przeanalizowanie całego procesu 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 (np. rys. 4). Ciekawe badania pozwalające na oszacowanie odporności na pękanie kompozytów ortotropowych przy wykorzystaniu systemu ARAMIS zaprezentowano w pracy [24].

Parametry mechaniki pękania określone w badaniach

Odporność na pękanie w badanych betonach wyznaczano na podstawie analizy współczynnika intensywności naprężeń K_{IIc} oraz jednostkowej pracy zniszczenia J_{IIc} .

K_{IIc} wyznaczono według zależności zaproponowanej przez J. Watkinsa [25]:

$$K_{IIc} = \frac{5,11P_Q}{2Bb} \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

w której: P_Q - wartość siły krytycznej, inicjującej rozwój szczeliny pierwotnej, identyfikowana na wykresach zniszczenia jako niewielkie załamanie lub ekstremum krzywej (rys. 2), b - wysokość próbki powyżej szczeliny pierwotnej, B - grubość próbki, a - długość szczeliny pierwotnej.

Uzyskane w badaniach krzywe obciążenia $P-f$ w funkcji przemieszczenia punktu przyłożenia siły obciążającej próbkę posłużyły do określenia pracy jednostkowej zniszczenia J_{IIc} , którą obliczono wg podanej w normie ASTM [26] zależności:

$$J_{IIc} = \frac{A}{2Bb} \quad (2)$$

w której: A - energia zgromadzona w próbce do momentu inicjacji szczeliny pierwotnej, obliczana jako całka pola pod wykresem $P-f$ do punktu siły krytycznej P_Q , B , b - ja we wzorze (1).

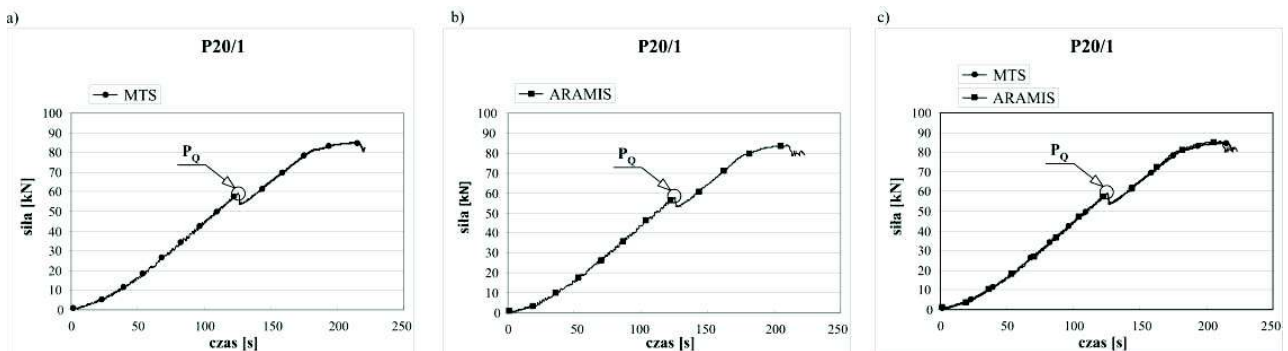
Ponadto, dzięki możliwości śledzenia rozwoju szczelin pierwotnych w próbkach systemem ARAMIS można było zaobserwować momenty ich inicjacji oraz istotne parametry geometryczne. Ważnym zagadnieniem implementowanym później do modeli numerycznych jest np. uchwycenie rzeczywistego kierunku propagacji rys oraz ich nachylenia do płaszczyzny szczeliny pierwotnej. Pozwala to na analityczne oszacowanie podstawowych parametrów mechaniki pękania bez wykonywania kolejnych badań niszczących próbki [27].

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na rysunkach 2 i 3 zestawiono przykładowe wykresy $P-t$ i $P-f$ wykonane dla jednej z próbek serii **P20**. Na rysunkach pokazano zarówno krzywe uzyskane w badaniach na prasie MTS (rys. 2a i rys. 3a), jak i wynikające z obliczeń systemu ARAMIS (rys. 2b i rys. 3b). Dla porównania uzyskanych wyników zestawiono również badane zależności z obu pomiarów razem (rys. 2c i rys. 3c). Analizując wykresy $P-t$, można zauważyć, że odczyt przyrostu siły jest zgodny dla obu

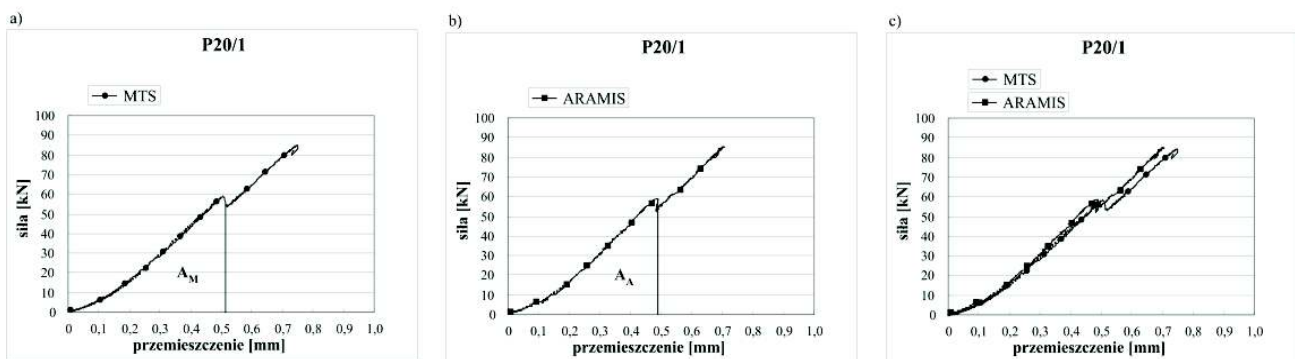
systemów pomiarowych, co potwierdza również (pokazane na rys. 2c) idealne pokrycie się wykresów z obu badań. Zależności $P - f$ nie pokazują już tak idealnych konwergencji w uzyskanych wynikach. Wykresy w całości są zbieżne jedynie w dolnych obszarach krzywych, gdy próbki pracowały jeszcze w obszarze sprężystym. Przy wzroście obciążeń wynoszących około $0,5P_Q$ wykres uzyskany w systemie ARAMIS wyraźnie zaczął pochylać się pod większym kątem do osi odciętych niż zależność $P - f$, wyznaczona na podstawie pomiarów MTS. Różnica wynikająca z porównania przemieszczeń w momencie uszkodzenia próbki wynosi około 10% i może być spowodowana np. odchyłkami w pionowości ścianek próbki, nierównościami występującymi na jej powierzchni bądź pojawianiem się mikrouszkodzeń zaburzających prawidłowe odczyty ARAMIS-a w trakcie narastania obciążenia.

W tabeli 3 zestawiono średnie wartości parametrów mechaniki pęknięcia uzyskane w badaniach. Z uwagi na występujące różnice w pomiarach zależności $P - f$ rozgraniczono wyniki J_{IIc} na wartości wyznaczone dla krzywych wynikających z pomiarów MTS-em (J_{IIcM}) i ARAMIS-em (J_{IIcA}). Z analizy uzyskanych wyników można wnioskować, że dodatek 20% pl spowodował nieznaczny wzrost K_{IIc} (o 3,4%), J_{IIcM} (o 13,5%) i J_{IIcA} (o 14,4%), natomiast zastąpienie części cementu 30% dodatkiem pl wpłynęło na obniżenie powyższych parametrów: K_{IIc} (o 13,9%), J_{IIcM} (o 12,1%) i J_{IIcA} (o 11,9%). Rezultaty te są zatem częściowo zbieżne z wynikami badań wytrzymałości betonów na ściskanie określanych na kostkach (tab. 2). Tam również dało się zaobserwować wzrosty f_{cm15} w przypadku kompozytów z 20% dodatkiem pl i spadki w przypadku dodatku 30% tego wypełniacza.



Rys. 2. Wykresy zależności siła - czas dla pomiarów uzyskanych: a) na prasie MTS, b) w systemie ARAMIS, c) w obu badaniach; dla jednej z próbek serii P20

Fig. 2. Diagrams of the force - time relationship for the measurement made: a) on MTS press, b) in ARAMIS system, c) in both tests; for one of the specimen from P20 batch



Rys. 3. Wykresy zależności siła - przemieszczenie dla pomiarów uzyskanych: a) na prasie MTS, b) w systemie ARAMIS, c) w obu badaniach; dla jednej z próbek serii P20

Fig. 3. Diagrams of the force - displacement relationship for the measurement made: a) on MTS press, b) in ARAMIS system, c) in both tests; for one of the specimen from P20 batch

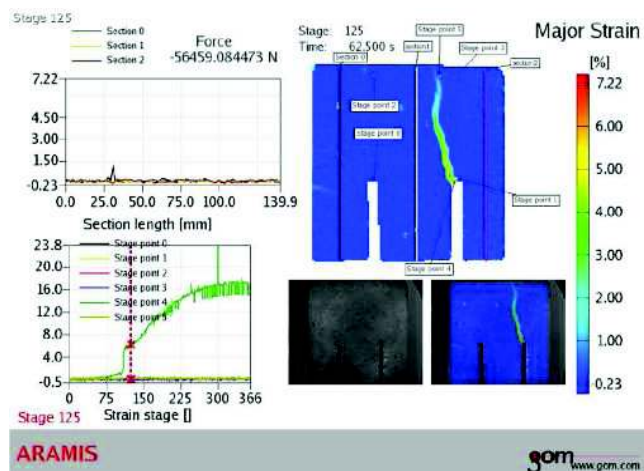
TABELA 3. Średnie wartości parametrów mechaniki pęknięcia

TABLE 3. Average values of the fracture mechanics parameters

Seria betonu	K_{IIc} MN/m ^{3/2}	J_{IIcM} N/m	J_{IIcA} N/m
P00	4,24	518,3	465,4
P20	4,39	588,5	532,6
P30	3,65	462,4	415,8

Rysunek 4 przedstawia przykładową klatkę (125 etap pomiarowy) z filmu wygenerowanego na podstawie danych opracowanych za pomocą systemu ARAMIS. Jej analiza pozwala na ustalenie np.:

- wartości odkształceń głównych występujących w próbce,
- zmian kształtu próbki w trakcie postępującego procesu jej obciążania,
- kształtu i kierunku propagacji zamodelowanej rysy pierwotnej.



Rys. 4. Klatka z filmu badania próbek za pomocą systemu ARAMIS

Fig. 4. A frame from the film that shows testing of the specimens by means of ARAMIS system

PODSUMOWANIE

Modyfikacja struktury betonu aktywnymi dodatkami mineralnymi, jakimi 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 pękanie. Zastąpienie 20% cementu dodatkiem aktywnych pucolanowo-krzemionkowych *pl* spowodowało po 28 dniach dojrzewania wzrost w betonie zarówno parametru K_{IIc} , jak i J_{IIc} . Na uwagę zasługuje również analiza charakterystyk wytrzymałościowych badanych kompozytów. Zaobserwowano, że beton serii **P20** posiadał większą wytrzymałość na ściskanie f_{cm15} niż beton bez dodatków, co wykazał w badaniach np. Z. Giergiczny [4]. Kompozyty z dodatkiem 30% *pl* charakteryzowały się, po 28 dniach dojrzewania, zarówno niższymi parametrami wytrzymałościowymi (tab. 2), jak również obniżoną odpornością na pękanie (tab. 3).

W pracy do szacowania parametrów mechaniki pęknięcia betonu oraz analizy rozwoju rys pierwotnych w próbkach wykorzystano system ARAMIS. Okazał się on pomocny szczególnie do oceny deformacji próbek, a także analizy procesu powstawania i rozwoju zamodelowanych szczelin. Przegląd filmów zrobionych w czasie badań (rys. 4) potwierdził założenia przyjęte w pra-

cy [27], że trajektorie propagacji rys odchylają się od płaszczyzny pionowej w przedziale od 0 do 15°. Dzięki zastosowaniu systemu ARAMIS można było również uchwycić moment pojawienia się sił krytycznych oraz wykonać szczególnie istotne w tego typu badaniach wykresy $P-t$ i $P-f$. Porównanie P_Q odczytanych w obu systemach pomiarowych wykazało idealną zgodność co do uzyskanych wartości (rys. 2c). Niewielkie różnice wystąpiły natomiast podczas zestawienia wykresów przemieszczeń próbek. Zależności $P-f$ z rysunku 3c pokazują, że odczyty dokonywane na prasie MTS charakteryzują się większym pochyleniem krzywej oraz większymi wartościami przemieszczeń próbki w momencie wystąpienia sił P_Q . Niewielka niezgodność w uzyskiwanych wartościach (tab. 3) może być związana np. z niemożnością wykonania próbek o idealnie prostopadłych ściankach bądź z nierównościami występującymi na powierzchniach zewnętrznych kostek.

System ARAMIS z uwagi na prostotę obsługi oraz łatwość przygotowania próbek do badań może znaleźć zastosowanie zarówno w badaniach elementów betonowych, jak i żelbetonowych, a jego najnowsza wersja pozwala prowadzić eksperymenty tak przy obciążeniach statycznych, jak i dynamicznych.

LITERATURA

- [1] Zuguan J., Wei S., Yunsheng Z., Jinyang J., Jianzhong L., Interaction between sulfate and chloride solution attack of concretes with and without fly ash, *Cement and Concrete Research* 2005, 37, 1223-1232.
- [2] Kosior-Kazberuk M., Lelusz M., Podatność betonów z dodatkiem popiołu lotnego na wnikanie jonów chlorkowych, *Przegląd Budowlany* 2006, 6, 27-31.
- [3] Giergiczny Z., Pużak T., Popiół lotny jako składnik betonu z cementów żużlowych, *Cement Wapno Beton* 2009, 2, 67-64.
- [4] Giergiczny Z., Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych, Seria: Inżynieria Lądowa, Monografia 325, Politechnika Krakowska, Kraków 2006.
- [5] Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji, *Góraźdże Cement*, Opole 2002.
- [6] Giergiczny Z., Popiół lotny aktywnym składnikiem cementu, IV Sympozjum Naukowo-Techniczne Reologia w Technologii Betonu, Gliwice 2002, 5-17.
- [7] Lindon K.A., Properties and use of coal fly ash, A valuable industrial by-product, Thomas Telford Ltd, 2001.
- [8] 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* 2009, 4, 189-204.
- [9] 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* 2005, 38, 63-72.
- [10] Tang W.C., Lo T.Y., Chan W.K., Fracture properties of normal and lightweight high-strength concrete, *Magazine of Concrete Research* 2008, 60, 237-244.

- [11] Golewski G., Sadowski T., Fracture toughness at shear (mode II) of concretes made of natural and broken aggregates, The Eight International Symposium on Brittle Matrix Composites, Warsaw 2006, 537-546.
- [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] Reinhardt H.W., Ozbolt J., Xu S., Dinku A., Shear of structural concrete members and pure mode II testing, *Advanced Cement Based Materials* 1997, 5, 75-85.
- [14] Sadowski T., Golewski G., Effect of aggregate kind and graining on modeling of plain concrete under compression, *Computational Materials Science* 2008, 43, 119-126.
- [15] 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.
- [16] Golewski G.L., Mikrostruktura uszkodzeń w kompozytach betonowych z osnowami cementowymi, *Kompozyty (Composites)* 2008, 1, 93-98.
- [17] Freidenberg P., Freidenberg E., Wpływ popiołów lotnych na wybrane właściwości betonów podwodnych, *Przegląd Budowlany* 2007, 10, 32-36.
- [18] Freidenberg E., Freidenberg P., Właściwości reologiczne mieszanek do betonowania podwodnego modyfikowanych popiołami lotnymi, *Inżynieria i Budownictwo* 2009, 5, 278-280.
- [19] PN-EN 450-1, Popiół lotny do betonu, Część 1: Definicje, specyfikacje i kategoria zgodności.
- [20] Giergiczny Z., Popiół lotny składnikiem betonu - normalizacja i praktyka, *Budownictwo Technologie Architektura* 2009, 1-3, 40-43.
- [21] Malhotra V.M., Ramezaniapour A.A., Fly ash in concrete, Minister of Supply and Services Canada 1994.
- [22] Giergiczny Z., Dodatki do betonu w świetle wymagań normowych, *Materiały Budowlane* 2007, 11, 10-13.
- [23] Pichór W., Petri M., Właściwości kompozytów cementowo-włóknistych z dodatkiem mikrosfer, *Kompozyty (Composites)* 2004, 4, 320-325.
- [24] Mogadpalli G.P., Parameswaran V., Determination of stress intensity factor for cracks in orthotropic composite materials Rusing Digital image correlation, *Strain* 2008, 44, 446-452.
- [25] Watkins J., Fracture toughness for soil-cement samples in mode II, *International Journal Fracture*, 1983, 23, 135-138.
- [26] ASTM E 1820-01: Test Method for Measurement for Fracture Testing, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1996.
- [27] Golewski G.L., Sadowski T., Marsavina L., Experimental investigation and numerical modeling of microcracking and fracture processes of plain concretes under CS, 20th International Workshop on Computational Mechanics of Materials, Loughborough 2010.