

Wykorzystanie systemu Aramis do analizy propagacji rys pierwotnych w betonach z dodatkiem popiołów lotnych

Dr inż. Grzegorz Ludwik Golewski, Politechnika Lubelska

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, 2].

Jednym z najczęściej stosowanych dodatków do betonu są krzemionkowe popioły lotne (ρ/l) będące ubocznym produktem spalania węgla kamiennego w elektrowniach i elektrociepłowniach. Stanowią one cenny i pożądaný 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 ρ/l na podstawowe parametry betonów, szeroko opisano w licznych monografiach, np. [4, 5, 6, 7].

Niestety, pomimo znacznej ilości publikacji z tego działu tematycznego, niektóre właściwości betonu z dodatkiem ρ/l były analizowane bardzo rzadko. W literaturze napotkano tylko na kilka rozpraw [8, 9, 10] opisujących badania tego typu kompozytów, w kontekście ich odporności na kruche pęknięcie. Ponadto dotyczą one głównie badań betonów wysokowartościowych [8, 9] uwzględniając przy tym

tylko I model pęknięcia. Jak pokazują jednak badania doświadczalne [11, 12, 13] i prace analityczne [12, 14, 15], rzeczywiste materiały konstrukcyjne w trakcie obciążania ulegają mikrouszkodzeniom głównie przy mieszanym modelu pęknięcia, gdzie nieodzowne jest uwzględnienie przypadku ścinania w kierunku podłużnym do krawędzi szczeliny. Występowanie w procesie destrukcji materiału II modelu pęknięcia powoduje zazwyczaj pojawianie się w strukturze betonu tzw. pęknięć skrzydłowych będących głównymi katalizatorami procesów destrukcyjnych w materiale. Szczegółową analizę uszkodzeń betonu przy ścinaniu przedstawiono w pracy [16]. W artykule omówiono m.in. główne rodzaje defektów jakie mogą występować w kompozytach betonowych w procesie ich kruchego pęknięcia, podczas ścinania. Ponadto, w celu przeanalizowania kierunków rozwoju szczelin w procesie zniszczenia próbek wykonano analizę numeryczną za pomocą metody elementów skończonych korzystając z programu T-Flex. Symulacja komputerowa potwierdziła zbieżność sposobu zniszczenia kostek zaobserwowanego w badaniach i otrzymanego na podstawie analizy numerycznej.

2. Cel i zakres badań

Zasadniczym celem badań było oszacowanie jaki wpływ ma modyfikacja składu betonów konstrukcyj-

nych ρ/l , na podstawowe parametry mechaniki pęknięcia określane przy II modelu rozwoju uszkodzeń [11, 12, 16]. Do badań podstawowych wykonano 6 próbek sześciennych o krawędzi 15 cm z dwiema szczelinami pierwotnymi. Wymiary elementów badawczych, sposób formowania w nich szczelin, oraz schemat ich obciążania szczegółowo omówiono w pracy [11]. Badania wykonano przy wykorzystaniu: 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.

Makroskopową odporność na pęknięcie w II modelu pęknięcia wyznaczono wg zależności podanych w pracach [11, 16]. Istotnymi parametrami oszacowanymi w badaniach były:

- współczynnik intensywności naprężeń – K_{IIc} ,
- jednostkowa praca zniszczenia – J_{IIc} .

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 pęka-

Tabela 1. Skład wagowy mieszanek betonowych

| 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 |

nia bez wykonywania kolejnych badań niszczących próbki [17].

3. Charakterystyka materiałów stosowanych 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 [18,19]. 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.

Popiół lotny krzemionkowy użyty do badań pochodził z Elektrociepłowni Puławy i na podstawie wytycznych podanych w pracach [20, 21] charakteryzował się następującymi parametrami:

- strata prażenia: kategoria A, poniżej 5%,
- miąłkość: 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 (miąłkość kategorii S). *Pl* o takich parametrach, ze względu na znaczną redukcję wody zarobowej, są bardzo często stosowane jako składnik betonów wysokowartościowych [4, 7, 22]. Niskie stra-

Tabela 2. Charakterystyka stwardniałego betonu

| Seria betonu | f_{cm15} , MPa | $f_{cm15/30}$, MPa | f_{ctm} , 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 |

ty prażenia powodują, że w tego typu dodatkach występują głównie ziarna sferyczne poprawiające urabialność mieszanki, ograniczona jest natomiast ilość niekorzystnych ziaren koksiku [23]. Ponadto krzemionkowe *pl* o tak korzystnych parametrach wykazują się bardzo wysoką aktywnością pucolanową, co potwierdziły np. badania przytoczone w pracy [24].

Do badań oceniających właściwości mechaniczno-wytrzymałościowe badanych kompozytów 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 średnicy 15 cm i wysokości 30 cm do badań wytrzymałości na ściskanie i wyznaczenia

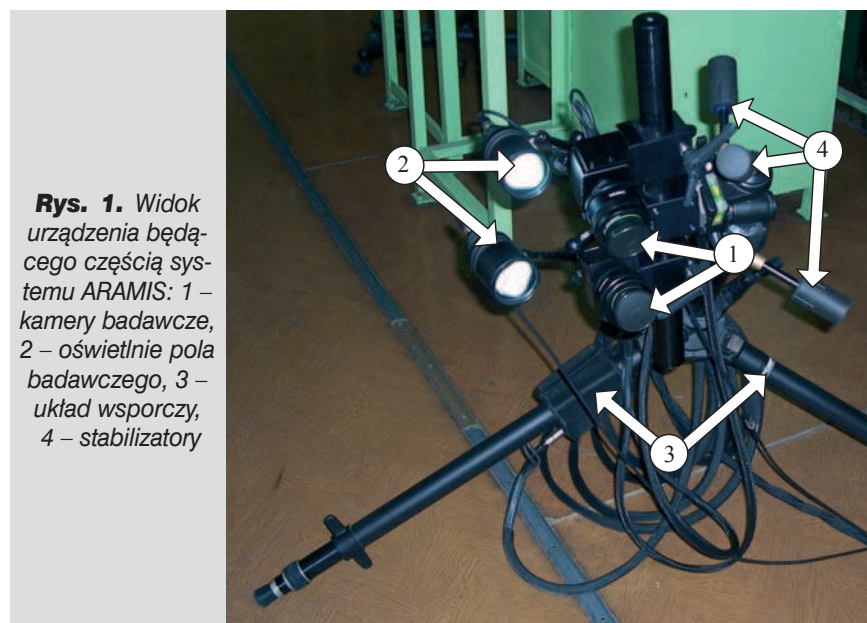
modułu sprężystości betonu (po 3 do każdego badania).

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 nacisku 2000 kN. Charakterystyki stwardniałego betonu zestawiono w tabeli 2.

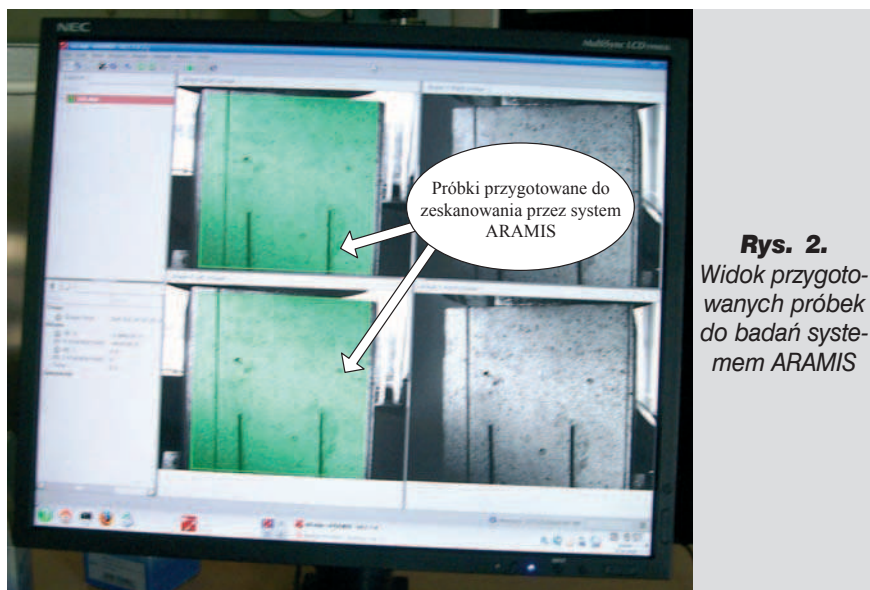
4. Metodyka prowadzonych badań

4.1. 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 przyłoże-



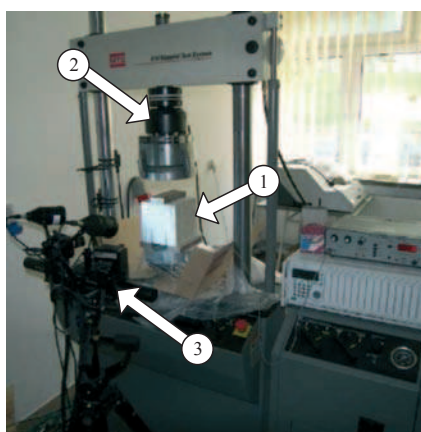
Rys. 1. Widok urządzenia będącego częścią systemu ARAMIS: 1 – kamery badawcze, 2 – oświetlenie pola badawczego, 3 – układ wsporczy, 4 – stabilizatory



Rys. 2.
Widok przygotowanych próbek do badań systemem ARAMIS

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 (rys. 6). Na rysunku 3 pokazano stanowisko badawcze, na którym widać próbkę (1) umieszczoną w prasie MTS (2) przed przyłożeniem obciążenia, oraz część systemu ARAMIS (3) służącą do wykonywania zdjęć próbki podczas testów wytrzymałościowych.

5. Wyniki badań i ich analiza



Rys. 3. Widok stanowiska badawczego: 1 – próbka przed badaniem, 2 – prasa MTS, 3 – urządzenie będące częścią systemu ARAMIS

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. Na rysunku 1 pokazano widok urządzenia wsporczego (3) wraz z kamerami (1) i lampami oświetlającymi (2) pole badawcze, podczas wykonywania eksperymentów.

Próbki wykorzystywane w badaniach muszą być wcześniej specjalnie przygotowane poprzez pomalowanie ich powierzchni badawczych farbą. Zakropkowana struktura próbki jest następnie skanowana przez system i na tej podstawie tworzony jest jej obraz w programie (rys. 2).

Dzięki temu użytkownik może sam zaplanować, które miejsca próbki są istotnymi dla badań, lub np. które przekroje mają być analizowane podczas testów wytrzymałościowych. W trakcie doświadczeń, system ARAMIS odczytuje siły z prasy, co umożliwia wykonanie takich samych wykresów zależnościowych jakie uzyskuje się w przypadku badań w prasie MTS. Ponadto system jest w stanie zapisać przebieg badania w postaci filmu, co umożliwia później

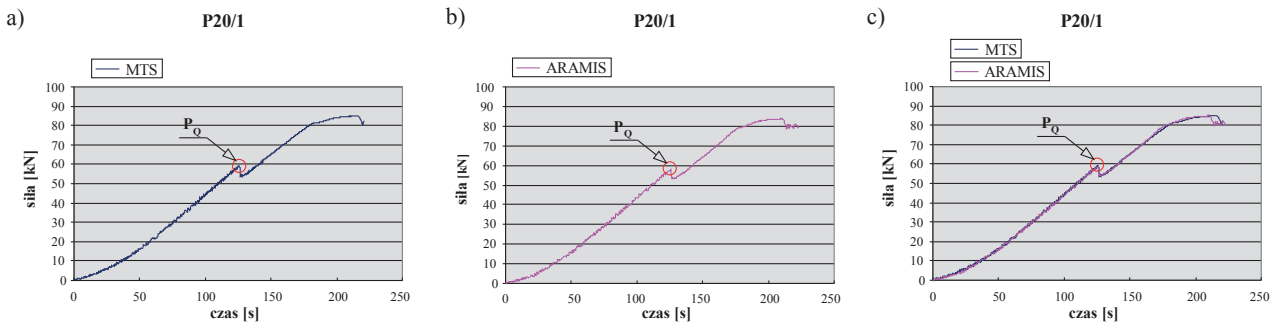
Na rysunkach 4 i 5 zestawiono przykładowe wykresy $P-t$ i $P-f$ wykonane dla jednej z próbek serii **P20**. Na rysunkach pokazano zarówno krzywe uzyskane w badaniach na prasie MTS (rys. 4a, 5a), jak i wynikające z obliczeń systemu ARAMIS (rys. 4b, 5b). Dla porównania uzyskanych wyników zestawiono również badane zależności z obu pomiarów razem (rys. 4c, 5c). Analizując wykresy $P-t$ można zauważyć, że odczyt przyrostu siły jest zgodny dla obu systemów pomiarowych, co potwierdza również (pokazane na rys. 4c) 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 $0,5P_0$, wykres uzyskany w systemie ARAMIS wyraźnie zaczął pochyłać 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

nia obciążenia do chwili wystąpienia w próbce siły krytycznej – P_0 (powodującej rozwój szczeliny pierwotnej) [11,16] 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:

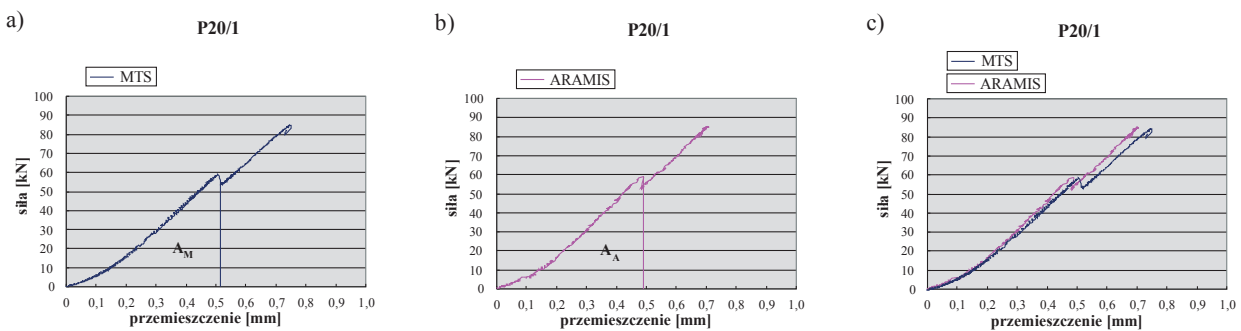
- siła (P) – czas (t),
 - siła (P) – przemieszczenie (f),
- oraz określenie wartości P_0 i parametrów mechaniki pęknięcia.

4.2. Badania za pomocą systemu ARAMIS

ARAMIS jest systemem służącym do optycznej analizy odkształceń, przemieszczeń i naprężeń



Rys. 4. Wykresy zależności siła – czas dla pomiarów uzyskanych: a) w prasie MTS, b) w systemie ARAMIS, c) w obu badaniach; dla jednej z próbek serii P20



Rys. 5. Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla pomiarów uzyskanych: a) w prasie MTS, b) w systemie ARAMIS, c) w obu badaniach; dla jednej z próbek serii P20

zaburzających prawidłowe odczyty ARAMISA w trakcie narastania obciążenia.

W tabeli 3 zestawiono średnie wartości parametrów mechaniki pęknięcia uzyskane w badaniach. Z uwagi na występujące różnice w pomiarach zależności $P-f$ ograniczono wyniki J_{IIc} , na wartości wyznaczone dla krzywych wynikających z pomiarów MTS. (J_{IIcM}) i ARAMIS. (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 wytrzyma-

łości 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.

Rysunek 6 przedstawia przykładowe klatki z filmu wygenerowanego na podstawie danych opracowanych za pomocą systemu ARAMIS. Na wykresach po prawej stronie znajduje się procentowa skala odkształceń głównych (*Major Strain*). Pokazuje ona różnice zeskanowanych pierwotnych odległości siatki punktów próbki, w trakcie narastającego obciążenia. Dwa małe schematy próbki w prawym dolnym rogu przedstawiają widok próbki (po lewej) i widok odkształceń na rzucie próbki (po prawej). W prawym

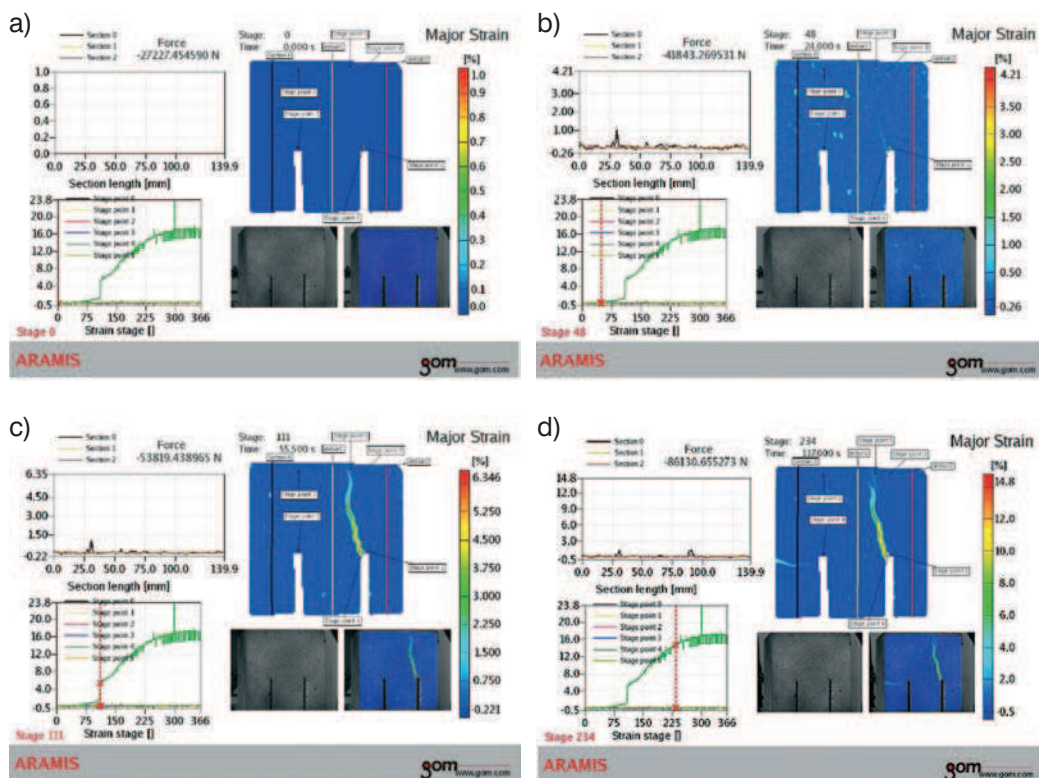
górnym rogu znajduje się widok modelu próbki ze zmieniającymi się odkształceniami i wyraźnie rozwijającą się rysą pierwotną. Na tym schemacie widać rozmieszczone punkty (*Stage Point*) ponumerowane od 0 do 5, wybrane w celu analizy zmian wymiarów próbki. Nad schematem podano etap pomiaru (*Stage*) oraz czas od momentu rozpoczęcia badania (*Time*). Na modelu widoczne są również 3 przekroje (*Section*), w których program obliczał zmianę wysokości próbki (wykres znajdujący się w lewym górnym rogu), oraz przemieszczenia wcześniej obranych punktów w kolejnych odczytach urządzenia (wykres znajdujący się w lewym dolnym rogu).

Analiza wykonanych zdjęć pozwala na ustalenie np.:

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

Tabela 3. Średnie wartości parametrów mechaniki pęknięcia

| 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 |



Rys. 6. Przykładowe klatki z filmu (poziomy obciążenia) badania próbek za pomocą systemu ARAMIS:

- poziom 0,
- poziom 48,
- poziom 111,
- poziom 234

Na zdjęciach można wyraźnie zaobserwować jak wygląda proces powstawania i propagacji zamodelowanych rys pierwotnych. Analiza całego filmu, tzn. od zerowego poziomu obciążenia (rys. 6a), poprzez wyraźne pojawienie się szczeliny na filmie (rys. 6b), aż do momentu przed zniszczeniem próbki (rys. 6d) pozwala w dokładny sposób opisać sposób pracy kompozytowych elementów betonowych przy II modelu pęknięcia.

6. Podsumowanie i wnioski z badań

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 pęknięcie. Zastąpienie 20% cementu dodatkami aktywnymi 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 pęknięcie (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, jak również analizy procesu powstawania i rozwoju zamodelowanych szczelin. Przegląd filmów zrobionych w czasie badań (rys. 6) potwierdził założenia przyjęte w pracy [17], 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_0 odczytanych w obu systemach pomiarowych wykazało idealną zgodność co do uzyskanych wartości (rys. 4c). Niewielkie różnice wystąpiły natomiast podczas zestawienia wykresów przemieszczeń próbek. Zależności $P-f$ pokazane na rysunku 5c pokazują, że odczyty dokonywane na prasie MTS charakteryzują się większym pochyleniem krzywej oraz większymi wartościami przemieszczeń próbki w momencie wystąpienia sił P_0 . 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 zarówno przy obciążeniach statycznych, jak i dynamicznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Zuguang 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] Giergiczyński Z., Pużak T., Popiół lotny jako składnik betonu z cementów żuźlowych. *Cement Wapno Beton*, 2009, 2, 67–64
- [4] Giergiczyński 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] Giergiczyński Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji. *Góraźdże Cement*, Opole 2002
- [6] Giergiczyński 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., Odporność na pęknięcie betonów z kruszywami naturalnymi i łamanymi. *Przegląd Budowlany*, 2005, 10, 31–37
- [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 grading 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., Sadowski T., Ocena uszkodzeń betonu przy ścinaniu na podstawie badań kompozytów z kruszywami granitowymi. *Przegląd Budowlany*, nr 3, 2007, 20–25
- [17] 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
- [18] Freidenberg P., Freidenberg E., Wpływ popiołów lotnych na wybrane właściwości betonów podwodnych. *Przegląd Budowlany*, 2007, 10, 32–36
- [19] Freidenberg E., Freidenberg P., Właściwości reologiczne mieszanek do betonowania podwodnego modyfikowanych popiołami lotnymi. *Inżynieria i Budownictwo*, 2009, 5, 278–280
- [20] PN-EN 450-1-2009: Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kategoria zgodności
- [21] Giergiczyński Z., Popiół lotny składnikiem betonu – normalizacja i praktyka. *Budownictwo Technologie Architektura*, 2009, 1–3, 40–43
- [22] Malhotra V. M., Ramezaniapour A.A., Fly ash in concrete. Minister of Supply and Services Canada, 1994
- [23] Giergiczyński Z., Dodatki do betonu w świetle wymagań normowych. *Materiały Budowlane*, 2007, 11, 10–13
- [24] Giergiczyński E., Giergiczyński Z., Wpływ zmiennej jakości popiołów lotnych na właściwości kompozytów cementowo-popiołowych. *Cement Wapno Beton*, 2010, 3, 157–163

Ocena wpływu zawartości popiołu lotnego na wytrzymałość zapraw cementowych

Dr inż. Małgorzata Lelusz, prof. dr hab. inż. Valeriy Ezerskiy, Politechnika Białostocka

1. Wprowadzenie

Popioły lotne, często stosowane przy wytwarzaniu kompozytów cementowych, są najbardziej pospolitą sztuczną pucolaną. Ten wytrącany elektrostatycznie surowiec wtórny, dzięki dużej miarkości i wspomnianej wcześniej aktywności puculanowej, pozwala uzyskać tworzywo cemento-

we o podwyższonych właściwościach oraz umożliwia ograniczenie zużycia coraz bardziej deficytowego klinkieru cementowego [1–3]. Wprowadzając popiół lotny do betonu należy liczyć się z możliwością wystąpienia niepożądanych skutków, takich jak: zwiększenie wodożądności mieszanki betonowej, obniżenie skuteczności

działania domieszek chemicznych, zmniejszenie odporności na działanie mrozu [4]. Najlepszą metodą poprawy mrozoodporności jest stosowanie domieszek uplastyczniających, które powodują zwiększenie szczelności poprzez obniżenie ilości wody, oraz stosowanie domieszek napowietrzających [1, 6, 7].