

# Badania odporności na pękanie kompozytów betonowych w młodym wieku z dodatkiem popiołów lotnych

Dr inż. Grzegorz Ludwik Golewski, Politechnika Lubelska

## 1. Wprowadzenie

Ze względów ekonomicznych i ekologicznych aktywne pucolanowo popioły lotne (*pl*) są jednymi z najczęściej wykorzystywanych na świecie dodatków do betonu, o czym świadczy rozwijający się dynamicznie z każdym rokiem asortyment np. [1, 2, 3]. Dobrej jakości krzemionkowe *pl* stosuje się do produkcji zarówno betonów zwykłych [4, 5], jak również betonów: wysokowartościowych [6, 7, 8, 9] czy samozagęszczalnych [9, 10, 11, 12].

Wpływają na to liczne zalety jakie niesie ze sobą wykorzystanie *pl* w strukturze betonu, oraz możliwość redukcji składowisk tego odpadu przemysłowego. Zastosowanie *pl* jako aktywnego substytutu spoiwa jest ważne z racji możliwości ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>, który w dużych ilościach przedostaje się do atmosfery podczas produkcji cementu [5]. Szerokie spektrum zastosowania kompozytów modyfikowanych dodatkiem *pl* związane jest również z wysoką odpornością tego typu betonów na działanie wielu czynników korozyjnych. Korzystny dodatek tego mikrowypełniacza wykazały badania analizujące wpływ ekspozycji agresywnych zarówno na sam beton [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22], jak również zbrojenie w elementach żelbetonowych [23, 24, 25]. Potwierdzono również, że odporność ta wzrasta w przypadku zastosowania w betonie *pl* o mniejszym uziarnieniu i wyższej aktywności pucolanowej

[20, 21, 26], stąd coraz częściej stosowane są dodatki *pl* o bardzo małym uziarnieniu [27]. Powoduje to zmniejszenie w kompozycie zawartości faz podatnych na korozję i powstawanie szczelnych struktur C-S-H [21, 26].

W pracy [28] przedstawiono badania analizujące wpływ dodatku krzemionkowych *pl* w ilości 20 i 30% masy cementu, na procesy kruche pęknięcia przy ścinaniu, w betonach po 28 dniach dojrzewania. Wnioski z przeprowadzonych doświadczeń wskazywały na nieznaczny wzrost współczynnika intensywności naprężeń –  $K_{IIC}$  i jednostkowej pracy zniszczenia –  $J_{IIC}$  w kompozytach z 20% dodatkiem *pl* i wyraźny spadek analizowanych parametrów w przypadku zastosowania większej ilości mikrowypełniacza. Jednak ocena odporności na pękanie betonu z dodatkiem *pl* jest szczególnie istotna w okresie, kiedy nie osiągnął on jeszcze wieku dojrzałego. W szeregu badaniach zaobserwowano bowiem znaczne obniżenie parametrów wytrzymałościowych tego typu kompozytów poniżej 28 dnia dojrzewania [4, 5, 29], oraz ich niższą odporność na pękanie przy I modelu pęknięcia [29]. Według pracy [4], niskie wczesne parametry wytrzymałościowe betonów modyfikowanych dodatkiem krzemionkowych *pl* mogą być wynikiem powolnej hydratacji *pl*, a zwiększenie aktywności tego typu spoiw można uzyskać np.: poprzez dodatkowy przetwórcę, obróbkę cieplną lub aktywację chemiczną.

## 2. Znaczenie młodego betonu w konstrukcjach betonowych

W procesie tworzenia się struktury betonu wyróżnia się cztery główne fazy, tzn.:

- fazę formowania, która obejmuje okres od chwili zmieszania składników mieszanki do początku wiązania zaczynu; beton jest wtedy w postaci zagęszczonej mieszanki betonowej,
- fazę wiązania, w której zachodzi proces tężenia betonu, zaś beton jest w stanie świeżym,
- fazę twardnienia, która trwa od końca wiązania do 28 dni, zaś beton określa się jako młody,
- fazę użytkowania, w której wiek betonu przekracza 28 dni i znajduje się on już w stanie dojrzałym.

Na uformowanie struktury i ukształtowanie właściwości wytrzymałościowych dojrzałego betonu decydujący wpływ mają warunki zewnętrzne, którym poddany jest beton w okresie przejścia ze stanu płynnego w stały oraz właściwości i jakość składników mieszanki betonowej. Istotnym parametrem, który ma wpływ na cechy mechaniczno-wytrzymałościowe betonu jest stopień hydratacji cementu. Według prac [30, 31, 32, 33], możliwe jest szacowanie końcowych wskaźników wytrzymałościowych dla betonu dojrzałego na podstawie znajomości stopnia hydratacji cementu i parametrów młodego betonu.

Wpływ znajomości cech młodego betonu ma istotne znaczenie, gdyż jego właściwości działają bezpo-

średnio na parametry już dojrzałego kompozytu. Problem ten znajduje odzwierciedlenie w wielu obszarach budownictwa betonowego i dotyczy następujących konstrukcji:

- monolitycznych, gdzie podczas kolejnych etapów wznoszenia konstrukcji narastają obciążenia młodego betonu, w wyniku czego muszą być podejmowane liczne decyzje techniczne zależne od wytrzymałości chwilowej betonu lub innych jego właściwości, takie jak np.: decyzja o terminie rozdeskowania konstrukcji, decyzja o przemieszczeniu deskowań ślizgowych, decyzja o dopuszczeniu do obciążenia młodego betonu obciążeniami technologicznymi, montażowymi itp.,

- prefabrykowanych, gdzie istotna jest znajomość wytrzymałości międzyoperacyjnych, np. rozformowania, transportowej, składowania, wysyłkowej, montażowej,

- zespolonych, w których ważne są stadia montażowe prefabrykatów pracujących jeszcze bez nadbetonu,

- sprężonych, w których ważna jest znajomość ewentualnych strat doraźnych sił sprężających nie w pełni dojrzałego betonu [34].

Ze wszystkich przytoczonych powyżej grup szczególnie ważne jest zwrócenie uwagi na wykonawstwo monolitycznych konstrukcji maszynowych. W takich elementach występuje bowiem zjawisko powstawania niekorzystnych uszkodzeń w młodym betonie, z uwagi na oddziaływanie termiczne występujące w materiale w procesie hydratacji cementu [35, 36]. W takich elementach proces hydratacji, będący zjawiskiem egzotermicznym, powoduje znaczne różnice temperatury pomiędzy wnętrzem a powierzchnią konstrukcji i może być przyczyną pęknięcia elementów w dwojaki sposób:

- w wyniku rozciągania stref chłodniejszych na skutek rozszerzania stref gorących, gdy istnieje swoboda odkształceń,

- na skutek mechanizmu wewnętrznego klinowania struktury

betonu w sytuacjach, gdy struktura ta zostaje utworzona w innej temperaturze niż późniejsza temperatura pracy konstrukcji, w przypadku braku swobody odkształceń [37].

Jak wykazały jednak badania zamieszczone w pracy [38], możliwe jest częściowe ograniczenie ryzyka niebezpiecznych uszkodzeń termicznych w elementach betonowych w młodym wieku poprzez modyfikację spoiwa cementowego  $pl$ , które obniża (w procesie formowania się struktury betonu) wydzielanie się ciepła hydratacji i zmniejsza wczesny skurcz betonu.

### 3. Rozwój uszkodzeń w betonie przy II modelu pęknięcia

Destrukcja kompozytów betonowych jest procesem wieloetapowym i zależnym zarówno od wartości i rodzaju działających obciążeń zewnętrznych, jak i wewnętrznej struktury kompozytu. Według prac [39, 40, 41], w trakcie postępującego rozwoju uszkodzeń w próbce betonowej poddanej naprężeniom ściskającym można wyróżnić na wykresie  $\sigma_{22}-\varepsilon_{22}$  trzy charakterystyczne punkty, tzn.:

I poziom naprężeń –  $\sigma_{22(I)}$  gdy w materiale dochodzi do powstania uszkodzeń prostych,

II poziom naprężeń –  $\sigma_{22(II)}$  gdy w na końcach szczelin prostych zaczynają inicjować się skrzydełka,

III poziom naprężeń –  $\sigma_{22(III)}$  gdy dochodzi do defragmentacji i zniszczenia próbki wskutek gwałtownego rozwoju szczelin skrzydłowych. Zatem w końcowej fazie pracy elementu betonowego, tuż przed zniszczeniem, moment destrukcji materiału jest ściśle związany z rozwojem występujących w strukturze betonu szczelin skrzydłowych. Defekty tego typu powstają natomiast, gdy w materiale występuje złożony stan naprężeń i szczeliny zaczynają się rozwijać przy II [41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48] bądź mieszanym modelu pęknięcia [49, 50]. W odniesieniu do betonu sytuacja ta jest o tyle niekorzystna, że jest to materiał

o niskiej wytrzymałości na ścinanie i wysokiej czułości na tego typu naprężenia. Duży wpływ na wewnętrzne zarysowanie struktury kompozytów betonowych ma również występowanie inkluzji o dosyć znacznych rozmiarach [40, 41, 47, 51] oraz słabych warstw stykowych na granicy inkluzje – matryca cementowa [52, 53, 54, 55]. Badania [41, 56, 57, 58] wyraźnie potwierdziły zjawisko występowania w strukturze betonu szczelin skrzydłowych, natomiast autorzy pracy [59] wyodrębnili IX różnych ich przypadków. W pracy [60] pokazano przykład rzeczywistej szczeliny skrzydłowej zaobserwowanej pod mikroskopem skaningowym, której rozwój jest zazwyczaj skorelowany z napotkaniem przez szczelinę prostą bariery energetycznej, np. drugiego ziarna kruszywa lub tendencją rozwoju szczeliny w kierunku pionowym w niestabilnej fazie jej wzrostu.

Problem rozwoju defektów w różnego typu materiałach, np. [61], w sytuacjach, gdy decydujący wpływ na ich zniszczenie mógł mieć II model pęknięcia, skłonił wielu naukowców do wnikliwych badań tego zjawiska w kontekście sytuacji zachodzących w naturalnym środowisku. Np. autorzy w pracy [62] próbowali przeanalizować, w jaki sposób dochodzi do zejścia lawin śnieżnych. W tym celu wykonali badania doświadczalne i obliczenia numeryczne i ustalili, że w większości przypadków decydujący wpływ na gwałtowny ruchy mas śnieżnych mają słabe miejsca w strukturze zbitego śniegu, których przesunięcia rozpoczynają się przy występowaniu ścinania (II modelu pęknięcia), a odporność na pęknięcie takiego materiału homogenicznego jest czterzy razy mniejsza niż w przypadku I modelu.

### 4. Cel i zakres badań doświadczalnych

Celem badań było oszacowanie parametrów mechaniki pęknięcia przy II

modelu pęknięcia w betonach konstrukcyjnych z dodatkiem *pl* w młodym wieku. W tym celu przedmiotowe eksperymenty wykonywano po 3, 7, 14 i 21 dniach od wykonania zarobów. Składy mieszanek betonowych, sposób przygotowania próbek do badań, oraz metodyka prowadzonych doświadczeń była taka sama jak w przypadku eksperymentów opisanych w pracy [28]. Badania odporności na pęknięcie przeprowadzono zatem na trzech mieszankach betonowych: bez dodatku *pl* (P00), z 20% dodatkiem *pl* (P20) i z 30% dodatkiem *pl* (P30). Wyniki eksperymentów przedstawione poniżej porównano również z analizami odporności na pęknięcie kompozytów tego samego typu, które były badane w stanie dojrzałym [28].

W tabeli 1 zestawiono charakterystyki wytrzymałościowe betonów w analizowanych okresach czasowych.

### 5. Wyniki badań i ich analiza

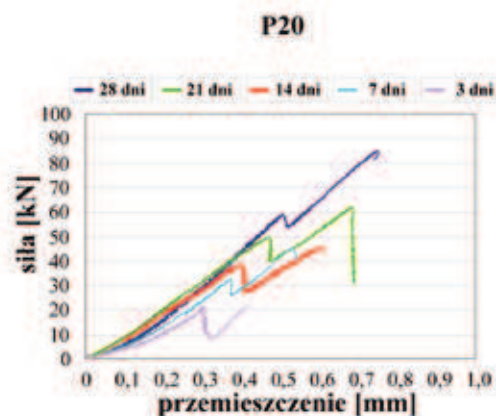
Na rysunku 1 zestawiono przykładowe wykresy siła – przemieszczenie (*P-f*) wykonane dla próbek z serii P20 w analizowanych okresach czasowych a więc po: 3, 7, 14, 21 i 28 dniach dojrzewania. Wykresy *P-f* uzyskano podczas badań próbek na prasie MTS wg metodyki przedstawionej w pracy [28]. Analizując wykresy można stwierdzić, że wraz z wcześniejszym okresem badań małały pochylenia uzyskanych krzywych zniszczenia w stosunku do osi odciętych. W największym stopniu było to zauważalne w przedziale czasowym do 14 dnia dojrzewania próbek. W tych okresach dosyć znacznie spadały również wartości sił krytycznych (powodujących rozwój szczelin pierwotnych)  $P_Q$ . Podobne tendencje zaobserwowano dla betonów z 30% dodatkiem *pl*.

W tabeli 2 zestawiono średnie wartości parametrów mechaniki pęknięcia uzyskane w badaniach. Z analizy uzyskanych wyników można wnioskować, że zarówno dodatek

**Tabela 1.** Charakterystyki stwardniałego betonu

| Seria betonu | Wiek [dni] | $f_{cm15}$ [MPa] | $f_{cm15/30}$ [MPa] | $f_{ctm}$ [MPa] | Kruchość $f_{ctm}/f_{cm15}$ [%] | $E_{cm}$ [GPa] |
|--------------|------------|------------------|---------------------|-----------------|---------------------------------|----------------|
| P00          | 3          | 24,23            | 22,34               | 2,05            | 8,4                             | 23,83          |
|              | 7          | 33,18            | 31,26               | 2,64            | 7,9                             | 30,51          |
|              | 14         | 41,33            | 33,68               | 3,22            | 7,8                             | 33,11          |
|              | 21         | 44,15            | 37,01               | 3,40            | 7,7                             | 36,20          |
|              | 28         | 47,51            | 39,18               | 3,58            | 7,5                             | 37,27          |
| P20          | 3          | 16,95            | 11,63               | 1,30            | 7,7                             | 13,90          |
|              | 7          | 30,12            | 21,42               | 2,29            | 7,6                             | 26,49          |
|              | 14         | 35,27            | 28,43               | 2,68            | 7,5                             | 29,70          |
|              | 21         | 42,11            | 33,88               | 3,03            | 7,2                             | 33,32          |
|              | 28         | 48,96            | 31,50               | 3,36            | 6,9                             | 36,24          |
| P30          | 3          | 14,23            | 9,83                | 1,03            | 7,3                             | 11,56          |
|              | 7          | 30,06            | 19,61               | 2,12            | 7,1                             | 24,30          |
|              | 14         | 35,12            | 23,08               | 2,49            | 7,1                             | 28,13          |
|              | 21         | 41,49            | 26,84               | 2,92            | 7,0                             | 32,38          |
|              | 28         | 45,10            | 29,19               | 3,27            | 7,2                             | 35,60          |

**Rys. 1.** Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla betonów serii P20 po: 3, 7, 14, 21 i 28 dniach dojrzewania



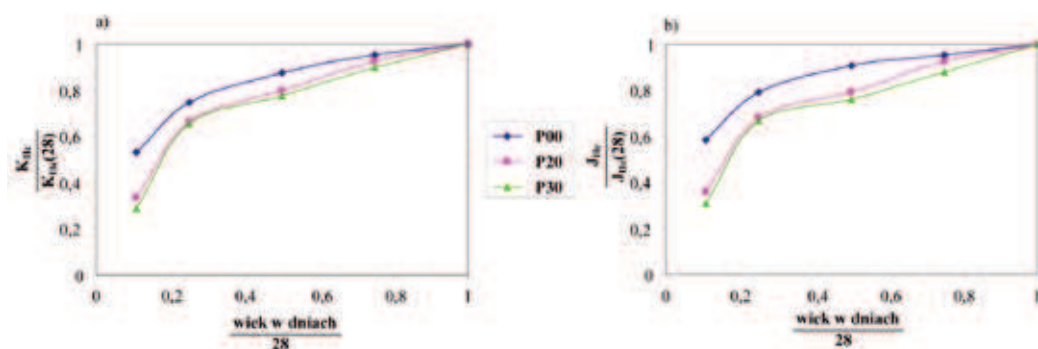
**Tabela 2.** Średnie wartości parametrów mechaniki pęknięcia

| Seria betonu | Wiek [dni] | $K_{IIC}$ [MN/m <sup>3/2</sup> ] | $J_{IIC}$ [N/m] |
|--------------|------------|----------------------------------|-----------------|
| P00          | 3          | 2,26                             | 303,7           |
|              | 7          | 3,18                             | 409,8           |
|              | 14         | 3,71                             | 470,7           |
|              | 21         | 4,05                             | 495,5           |
|              | 28         | 4,24                             | 518,3           |
| P20          | 3          | 1,48                             | 212,6           |
|              | 7          | 2,93                             | 401,0           |
|              | 14         | 3,50                             | 465,5           |
|              | 21         | 4,07                             | 543,6           |
|              | 28         | 4,39                             | 588,5           |
| P30          | 3          | 1,05                             | 143,2           |
|              | 7          | 2,40                             | 308,3           |
|              | 14         | 2,83                             | 351,0           |
|              | 21         | 3,28                             | 407,1           |
|              | 28         | 3,65                             | 462,4           |

20% jak i 30% *pl* spowodował obniżenie odporności na pęknięcie betonów do 14 dnia dojrzewania. Po tym okresie w kompozytach z 20%

*pl* zaobserwowano już nieznaczne wzrosty  $K_{IIC}$  i  $J_{IIC}$ , natomiast betony z większym dodatkiem *pl* nadal miały niższe parametry mechaniki





**Rys. 2.** Wzrosty parametrów mechaniki pęknięcia pomiędzy 3 a 28 dniem dojrzewania betonów w przypadku: a)  $K_{IIIc}^{(28)}$ , b)  $J_{IIIc}^{(28)}$ ;  $K_{IIIc}^{(28)}$ ,  $J_{IIIc}^{(28)}$  – parametry mechaniki pęknięcia po 28 dniach dojrzewania

pęknięcia. Po 28 dniach dojrzewania beton P20 miał wyższe wartości  $K_{IIIc}$  o 3,4% i  $J_{IIIc}$  o 13,5% w stosunku do betonów bez dodatku  $pl$  [28]. Na rysunku 2 pokazano jak zmieniały się analizowane parametry mechaniki pęknięcia w poszczególnych rodzajach betonów w okresie do 28 dnia dojrzewania. W przypadku betonów bez dodatku  $pl$ , wzrosty  $K_{IIIc}$  i  $J_{IIIc}$  pomiędzy 3 a 28 dniem są dosyć proporcjonalne, natomiast w kompozytach z dodatkami widać wyraźnie niższe parametry mechaniki pęknięcia pomiędzy 3 a 14, natomiast dosyć wyraźne ich wzrosty po 14 dniach dojrzewania. Tendencja ta jest wyraźniejsza w przypadku  $K_{IIIc}$  i betonów serii P20.

## 6. Podsumowanie

W pracy przeanalizowano, jaki wpływ ma modyfikacja struktury betonów zwykłych krzemionkowymi  $pl$  na ich odporność na pęknięcie przy ścinaniu. W badaniach zwrócono głównie uwagę na wartości parametrów mechaniki pęknięcia  $K_{IIIc}$  i  $J_{IIIc}$  w okresie pomiędzy 3 a 28 dniem dojrzewania próbek. Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że betony w młodym wieku, zarówno serii P20, jak i P30 miały niższą odporność na pęknięcie szczególnie w okresie do 14 dnia dojrzewania (tabela 2). Betony serii P20 pomiędzy 14 a 28 dniem dojrzewania wykazywały natomiast dosyć wyraźny wzrost odporności na pęknięcie – bliski wzrostom betonów bez dodatku  $pl$  (rys. 2). Na uwagę zasługuje również analiza charakterystyk wytrzymałościowych ba-

danych kompozytów, bowiem zaobserwowano, że w młodym wieku wszystkie parametry wytrzymałościowe wypadają korzystniej w przypadku betonów serii P00. Na podstawie badań ustalono również, że betony wszystkich serii poniżej 28 dnia dojrzewania charakteryzowały się wyższą kruchością (tab. 1), na co zwrócili uwagę również inni autorzy, np. [63]. Wykonane eksperymenty i ocena zmian podstawowych parametrów mechaniki pęknięcia betonu przy II modelu rozwoju uszkodzeń pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- betony z dodatkiem  $pl$  w ilości 20 i 30% charakteryzują się w młodym wieku niższą odpornością na pęknięcie,
- daje się zauważyć znaczący wzrost parametrów mechaniki pęknięcia pomiędzy 14 a 28 dniem dojrzewania, szczególnie w betonach serii P20 (rys. 2).
- krzywe zniszczenia  $P-f$  wykazują większe pochylenie do osi odciętych w przypadku betonów w młodym wieku, a tendencja ta jest większa dla kompozytów o najkrótszym okresie dojrzewania,
- wszystkie betony w młodym wieku charakteryzują się większą kruchością, przy czym efekt ten jest najmniej zauważalny w przypadku betonów serii P30.

### BIBLIOGRAFIA

[1] 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

- [2] Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji. Górażdże Cement, Opole 2002
- [3] Konkol J., Pokropski G., Właściwości wytrzymałościowe betonów bazaltowych z dodatkiem Flubetu. Przegląd Budowlany, 2010, 11, 25–29
- [4] Giergiczny Z., Pużak T., Popiół lotny jako składnik betonu z cementów żużlowych. Cement Wapno Beton, 2009, 2, 67–64
- [5] Yaprak H., Wykorzystanie odpadów przemysłowych w produkcji przyjaznego dla środowiska betonu. Cement Wapno Beton, 2010, 4, 210–216
- [6] Lindon K. A., Properties and use of coal fly ash. A valuable industrial by-product, Thomas Telford Ltd, 2001
- [7] 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
- [8] Bharat Kumar 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.
- [9] Raghun Prasad B. K., Eskandari H., Venkatarama Reddy B. V., Prediction of compressive strength of SCC and HPC with high volume fly ash using ANN. Construction and Building Materials, 2009, 23, 117–128
- [10] Chowdhury S., Basu P. C., New Methodology to proportion self-consolidating concrete with high-volume fly ash. ACI Materials Journal, 2010, 107, 222–230
- [11] Khatib J. M., Performance of self-compacting concrete containing fly ash. Construction and Building Materials, 2008, 22, 1963–1971
- [12] Sukumar B., Nagamani K., Srinivasa Raghavan R., Evaluation on strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash. Construction and Building Materials, 2008, 22, 1394–1401
- [13] 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
- [14] De Belie N., De Coster V., Van Nieuwenburg D., Use of fly ash or silica fume to increase the resistance of concrete to feed acids. Magazine of Concrete Research, 1997, 49, 337–344

- [15] Tikalsky P. J., Carrasquillo R. L., Fly ash evaluation and selection for use in sulfate-resistant concrete. *ACI Materials Journal*, 1993, 90, 545–551
- [16] Hussain S. E., Uzzafar R., Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete. *ACI Materials Journal*, 1994, 91, 264–272
- [17] Zhang W. M., Ba H. J., Chen S. J., Effect of fly ash and repeated loading on diffusion coefficient in chloride migration test. *Construction and Building Materials*, 2011, 25, 2269–2274
- [18] Chindaprasit P., Rukzon S., Sirivivatnanon V., Resistance to chloride penetration of blended portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*, 2008, 22, 932–938
- [19] Chindaprasit P., Kanchanda P., Sathonsaowaphak A., Cao H. T., Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 2007, 21, 1356–1361
- [20] Chindaprasit P., Chotihanom C., Cao H. T., Sirivivatnanon V., Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. *Construction and Building Materials*, 2007, 21, 356–361
- [21] Tkaczewska E., Małolepszy J., Wpływ uziarnienia krzemionkowych popiołów lotnych na odporność siarczanową cementu. *Cement Wapno Beton*, 2009, 1, 26–33
- [22] Kosior-Kazberuk M., Lelusz M., Podatność betonów z dodatkiem popiołu lotnego na wnikanie jonów chlorkowych. *Przegląd Budowlany*, 2006, 6, 27–31
- [23] Maslehuddin M., Saricimen H., Al-Mana A. I., Effect of fly ash addition on the corrosion resisting characteristics of concrete. *ACI Materials Journal*, 1987, 84, 42–50
- [24] Maslehuddin M., Al-Mana A. I., Shamim M., Saricimen H., Effect of sand replacement on the early-age strength gain and long-term corrosion-resisting characteristics of fly ash concrete. *ACI Materials Journal*, 1989, 86, 58–62
- [25] Malhotra V. M., Zhang M. H., Leaman G. H., Long-term performance of steel reinforcing bars in portland cement concrete and concrete incorporating moderate and volumes of ASTM class F fly ash. *ACI Materials Journal*, 2000, 97, 409–417
- [26] Giergiczyński E., Giergiczyński Z., Wpływ zmiennej jakości popiołów lotnych na właściwości kompozytów cementowo-popiołowych. *Cement Wapno Beton*, 2010, 3, 157–163
- [27] Obla K. H., Hill R. L., Thomas M. D. A., Shashiprakash S. G., Perebatova O., Properties of concrete containing ultra-fine fly ash. *ACI Materials Journal*, 2003, 100, 426–433
- [28] Golewski G. L., Wykorzystanie systemu Aramis do analizy propagacji rys pierwotnych w betonach z dodatkiem popiołów lotnych. *Przegląd Budowlany*, 2010, 11, 30–35
- [29] 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
- [30] De Schutter G., Taerwe L., Degree of hydration-based description of mechanical properties of early age concrete. *Materials and Structures*, 1996, 29, 335–344
- [31] De Schutter G., Degree of hydration based Kelvin model for the basic creep of early age concrete. *Materials and Structures*, 1999, 32, 260–265
- [32] De Schutter G., Taerwe L., Fictitious degree of hydration method for the basic creep of early age concrete. *Materials and Structures*, 2000, 33, 370–380
- [33] De Schutter G., Taerwe L., Towards a more fundamental non-linear basic creep model for early age concrete. *Magazine of Concrete Research*, 1997, 49, 195–200
- [34] Król M., Struktura i właściwości wytrzymałościowe młodego betonu. *Prace naukowe Politechniki Lubelskiej nr 205*. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej. Lublin 1990
- [35] De Schutter G., Taerwe L., Estimation of early-age thermal cracking tendency of massive concrete elements by mean of equivalent thickness. *ACI Materials Journal*, 1996, 93, 403–408
- [36] Ayotte E., Massicotte B., Houde J., Goceviski V., Modeling the thermal stresses at early ages in a concrete monolith. *ACI Materials Journal*, 1997, 94, 577–587
- [37] Witakowski P., Wewnętrzne klinowanie struktury dojrzewającego betonu. *Inżynieria i Budownictwo*, 1999, 8, 401–405
- [38] Riding K. A., Poole J. L., Schindler A. K., Juenger M. C. G., Folliard K. J., Quantification of effects of fly ash type on concrete early-age cracking. *ACI Materials Journal*, 2008, 105, 149–155
- [39] Golewski G., Sadowski T., Mechanizm zniszczenia kompozytów betonowych przy ścisłaniu w aspekcie teorii naprężeń krytycznych. *Przegląd Budowlany*, 2006, 5, 26–33
- [40] Sadowski T., Golewski G., Effect of aggregate kind and grading on modeling of plain concrete under compression. *Computational Materials Science*, 2008, 43, 119–126
- [41] Golewski G. L., Sadowski T. S., Rola kruszywa grubego w procesie destrukcji kompozytów betonowych poddanych obciążeniom doraźnym. *I.Z.T. Sp. z o.o., Lublin* 2008
- [42] 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
- [43] Reinhardt H. W., Xu S., A practical testing approach to determine mode II fracture energy G<sub>IIF</sub> for concrete. *International Journal of Fracture*, 2000, 105, 107–125
- [44] Brandt A. M., Prokopski G., Critical values of stress intensity factor in mode II fracture of cementitious composites. *Journal of Material Science*, 1990, 25, 3605–3610
- [45] Prokopski G., Influence of water-cement ratio on micro-cracking of ordinary concrete. *Journal of Material Science*, 1991, 26, 6352–6356
- [46] Prokopski G., Effect of coarse aggregate quantity on fracture toughness of concretes. *Journal of Material Science*, 1993, 28, 5717–5721
- [47] Golewski G., Sadowski T., Odporność na pęknięcie betonów z kruszywami naturalnymi i łamanymi. *Przegląd Budowlany*, 2005, 10, 31–37
- [48] Golewski G., Sadowski T., Ocena uszkodzeń betonu przy ścinaniu na podstawie badań kompozytów z kruszywami granitowymi. *Przegląd Budowlany*, 2007, 3, 20–25
- [49] Chao Y. J., Liu S., On the failure of cracks under mixed – mode loads. *International Journal of Fracture*, 1997, 87, 201–223
- [50] Di Prisco M., Ferrara L., Meftah F., Pamin J., De Borst R., Mazars J., Reynouard J. M., Mixed mode fracture in plain and reinforced concrete: some results on benchmark test. *International Journal of Fracture*, 2000, 103, 127–148
- [51] Janeiro R., Einstein H. H., Experimental study of the cracking behavior of specimens containing inclusions (under uniaxial compression). *International Journal of Fracture*, 2010, 164, 83–102
- [52] Elsharief A., Cohen M. D., Olek J., Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33, 1837–1849
- [53] Zheng J. J., Li C. Q., Zhou X. Z., Thickness of interfacial transition zone and cement content profiles around aggregates. *Magazine of Concrete Research*, 2005, 57, 397–406
- [54] Prokopski G., Halbiniak J., Interfacial transition zone in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30, 579–583
- [55] Golewski G. L., Analiza uszkodzeń w warstwie stykowej kruszywo-zaczyn kompozytów betonowych. *Przegląd Budowlany*, 2008, 3, 35–41
- [56] Golewski G., Sadowski T., Analiza uszkodzeń na mineralnych kruszywach naturalnych i łamanych z wykorzystaniem metod mikroskopii skaningowej. *Inżynieria Materiałowa*, 2007, 1, 33–38
- [57] Saimoto A., Toyota A., Imai Y., Compression induced shear damage in brittle solids by scattered microcracking. *International Journal of Fracture*, 2009, 157, 101–108
- [58] Janeiro R., Einstein H. H., Experimental study of the cracking behavior of specimens containing inclusions (under uniaxial compression). *International Journal of Fracture*, 2010, 164, 83–102
- [59] Yang S. Q., Jing H. W., Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression. *International Journal of Fracture*, 2011, 168, 227–250
- [60] Golewski G. L., Zastosowanie mikroskopu skaningowego do analizy uszkodzeń wewnątrzmaterialowych w betonach konstrukcyjnych. *Przegląd Budowlany*, 2009, 7–8, 64–68
- [61] Prokopski G., Investigation of wood fracture toughness using mode II fracture (shearing). *Journal of Materials Science*, 1995, 30, 4745–4750
- [62] Sigrist Ch., Schweizer J., Schindler H.-J., Dual J., The energy release rate of mode II fractures in layered snow samples. *International Journal of Fracture*, 2006, 139, 461–475
- [63] Zollinger D. G., Tang T., Yoo R. H., Fracture toughness of concrete at early ages. *ACI Materials Journal*, 1993, vol. 90, 463–471