

Grzegorz GOLEWSKI*
Politechnika Lubelska

MIKROMECHANIKA USZKODZEŃ BETONÓW W ASPEKCIE BADAŃ ODPORNOŚCI NA PĘKANIE

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące wpływu rodzaju zastosowanego kruszywa na parametry mechaniki pęknięcia betonów konstrukcyjnych. Badaniom poddano betony wykonane z dwóch rodzajów kruszywa: łamanego wapiennego (W) i otoczkowego żwirowego (Ż). Badania odporności na pęknięcie przeprowadzono z zastosowaniem I modelu pęknięcia (rozciąganie przy zginaniu) oraz według II modelu pęknięcia (ściananie).

MICROMECHANIC OF DAMAGES OF CONCRETES IN FRACTURE TOUGHNESS TESTS

Summary. The article presents the results of studies on the effect of aggregate on the fracture parameters of constructional concretes. Subjected to testing were concretes made of two different types of coarse aggregate: broken limestone aggregate (W) and cobble gravel aggregate (Z). Fracture toughness tests were carried out using Mode I of fracture (tension with bending) and Mode II of fracture (shearing).

1. Wstęp

Beton jako materiał budowlany powstaje w wyniku celowego połączenia kruszywa spojonego zaczynem cementowym oraz ewentualnych dodatków mineralnych i domieszek chemicznych. W tego typu kompozytach z kruchą matrycą o zniszczeniu konstrukcji decydować mogą nieciągłości struktury w materiale konstrukcyjnym oraz lokalne różnice właściwości mechanicznych betonu. Zniszczenie konstrukcji betonowych następuje wskutek propagacji rys najpierw pojedynczych, a później zbiorczych, które powodują narastające

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Tomasz Sadowski, prof. Politechniki Lubelskiej

obniżenie nośności obiektu budowlanego. Rozwój mikrorys oznacza, że zmagazynowana energia odkształceń ulega przekształceniu w energię powierzchniową nowo tworzonej powierzchni rys. Konsekwencją rozwoju zarysowania jest redukcja pola powierzchni przenoszenia obciążenia, tak że naprężenia lokalne stają się większe od naprężeń nominalnych [1]. Podstawowe parametry charakteryzujące beton nie dają dostatecznych informacji, mogących określić naprężenia wywołujące propagację rys. Analizowanie zachowania się betonów z uwzględnieniem metod mechaniki pęknięcia umożliwia opis powstawania i rozwoju uszkodzeń, co niemożliwe jest w przypadku posługiwania się globalnymi charakterystykami wytrzymałościowymi kompozytu.

Głównym zadaniem nowoczesnej inżynierii jest projektowanie i realizacja obiektów budowlanych w taki sposób, aby osiągnąć możliwie największe bezpieczeństwo konstrukcji przy jak najmniejszych nakładach finansowych. Stąd istotna jest dla inżyniera wiedza o procesach rozwoju uszkodzenia i pęknięcia w materiałach konstrukcyjnych, co pozwoli na optymalne projektowanie z punktu widzenia kosztów i bezpieczeństwa [2].

2. Cel i zakres badań

Jednym z podstawowych czynników, który ma znaczący wpływ na właściwości mechaniczne betonu i parametry mechaniki pęknięcia, jest rodzaj zastosowanego wypełniacza [1,3]. W betonie objętość kruszywa stanowi przeciętnie około 80%. Jako kruszywo grube do betonu stosuje się zazwyczaj kruszywa mineralne. Wśród nich największy procent stanowią żwiry oraz kruszywa łamane pozyskiwane głównie ze skał węglanowych (m. in. wapień i dolomity) [3]. Powyższe dane skłaniają, aby podjąć badania analizujące mikromechanikę uszkodzeń betonów żwirowych i wapiennych. W Polsce jako jeden z pierwszych zagadnienie to badał A. M. Brandt [4].

W artykule przedstawiono wyniki doświadczeń dotyczące określenia makroskopowej odporności na pęknięcie według I (rozciąganie przy zginaniu) i II (ściananie) modelu pęknięcia.

W trakcie przeprowadzonych eksperymentów określono podstawowe parametry mechaniki pęknięcia. Badaniom poddano dwie partie betonów konstrukcyjnych wykonane z kruszywa żwirowego (beton Ż) i wapiennego (beton W). Skład wagowy mieszanek betonowych podano w tablicy 1.

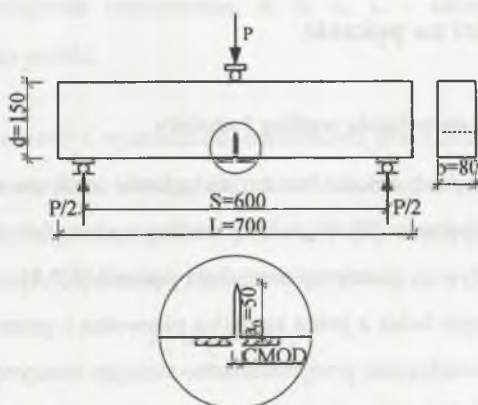
Tablica 1

Skład wagowy mieszanek betonowych

Składnik mieszanki betonowej	Ilość
cement portlandzki CEM I klasy 42,5R z cementowni w Ożarowie	352 kg/m ³
piasek kopalny frakcja 0 – 2 mm z kopalni piasku w Markuszowie	676 kg/m ³
Żwir frakcja 2 – 8 mm 1207 kg/m ³ ze złóż w Sobolewie (tylko beton Ż)	1207 kg/m ³
grys wapienny frakcja 2 – 8 mm ze złóż w Truskawicy (tylko beton W),	1207 kg/m ³
woda z wodociągu miejskiego	141 kg/m ³
superplastyfikator Arpoment P (1,5% masy cementu)	5,28 kg/m ³

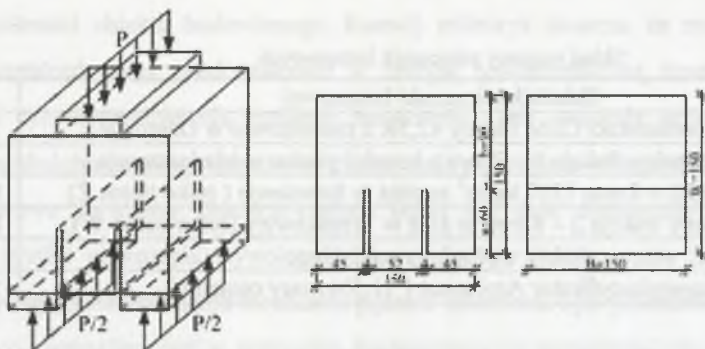
Mieszanki wykonano o konsystencji V2 (Ve-Be 19s) i wskaźniku $w/c = 0,40$ przy punktach piaskowych: PP = 40,7% (beton Ż) i PP = 40,3% (beton W). Elementy poddawane były zagęszczeniu na stole wibracyjnym.

Z każdej mieszanki zaformowano próbki do badań pomocniczych i podstawowych. W badaniach właściwości betonów wykorzystano: 12 próbek sześciennych o krawędzi 0,15 m do oceny wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przez rozłupywanie (po 6 dla każdego typu badań), 9 walców o średnicy 0,15 m i wysokości 0,30 m do badań wytrzymałości na ściskanie (3 walce), oraz do wyznaczenia modułu Younga przy ściskaniu (6 walców). Do eksperymentów zasadniczych zaformowano: 6 belek o wymiarach 0,08 x 0,15 x 0,70 m oraz 8 kostek sześciennych o krawędzi 0,15 m do badań określających makroskopową odporność na pękanie przy zginaniu i ścinaniu poprzecznym. Schematy próbek użytych w badaniach przedstawiono na rys. 1 i 2.



Rys. 1. Schemat próbki użytej do badań odporności na pękanie przy zastosowaniu I modelu pękania, CMOD – przemieszczenie rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej

Fig. 1. A schematic drawing of specimen for tests according to Mode I, CMOD – crack mouth opening displacement



Rys. 2. Próbką użyta do badań odporności na pęknięcie przy zastosowaniu II modelu pęknięcia
Fig. 2. Test sample used in Mode II fracture toughness investigation.

Wszystkie próbki rozformowywane były po upływie 2 dni od zabetonowania, a następnie dojrzewały do czasu badań przez pierwszych 14 dni w warunkach silnie wilgotnych, a przez kolejnych 14 w warunkach laboratoryjnych. Charakterystyki wytrzymałościowe betonu określano na prasie hydraulicznej typu ZD100. Uzyskane wartości zestawiono w tabelicy 2.

Tablica 2

Uzyskane wartości średnie wyników w badaniach właściwości betonów

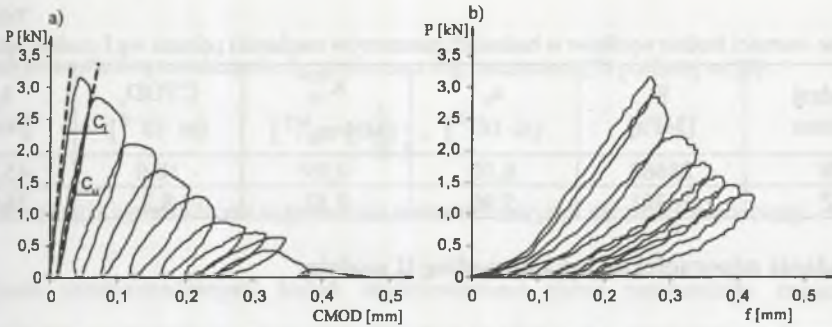
Rodzaj betonu	$f_{cm \#15}$ [MPa]	$f_{cm \varnothing 15/30}$ [MPa]	f_{ct} [MPa]	E_{cm} [MPa]
W	39,2	35,7	2,57	31325
Ż	35,2	32,7	2,44	30169

3. Badania odporności na pęknięcie

3.1. Badania odporności na pęknięcie według I modelu

W badaniach do oceny odporności betonu na pęknięcie zastosowano metodę obciążania próbek według I modelu pęknięcia [5]. Wcześniej według tych wytycznych badano rolę wielu czynników, mających wpływ na parametry mechaniki pęknięcia [6,7,8].

Do eksperymentów użyto belek z jedną szczeliną pierwotną o geometrii przedstawionej na rys. 1. Prezentowane doświadczenia przeprowadzono stosując maszynę wytrzymałościową ze sprzężeniem zwrotnym MTS 858. W toku przeprowadzonych badań dla każdej próbki rejestrowano dwie zależności: obciążenie-przemieszczenie rozwarcia wylotu szczeliny CMOD oraz obciążenie-przemieszczenie punktu przyłożenia siły f . Przykładowe wykresy funkcji P-CMOD i P- f dla betonu serii W pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Przykładowe krzywe zniszczenia betonu wapiennego – seria W: a) zależność obciążenie – rozwarcie wylotu szczeliny (P-CMOD), b) zależność obciążenie – przemieszczenie punktu przyłożenia siły (P-f)

Fig. 3. An example diagram curves of destruction o limestone concrete – W series: a) CMOD vs. load (P-CMOD), b) dislocation vs. load (P-f)

Na podstawie wzorów podanych w [5] określono: moduł Younga E , krytyczną długość efektywnej szczeliny a_c , oraz krytyczne przemieszczenie rozwarcia wierzchołka szczeliny $CTOD_c$ (crack tip opening displacement). Ze wzoru (1) obliczono odporność na pęknięcie K_{Ic}^S :

$$K_{Ic}^S = 3 \cdot (P_{max} + 0.5 \cdot W) \cdot \frac{S \cdot (\pi \cdot a_c)^{1/2} \cdot F(\alpha)}{2 \cdot d^2 \cdot b}, \quad (1)$$

gdzie:
$$F(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot (2.15 - 3.93 \cdot \alpha + 2.7 \cdot \alpha^2)}{\sqrt{\pi^{1/2} \cdot (1 + 2 \cdot \alpha) \cdot (1 - \alpha)^{3/2}}}; \quad \alpha = \frac{a_c}{d}, \quad (2)$$

P_{max} – zmierzone obciążenie maksymalne, d , b , S , L – określone zgodnie z rys. 1
 $W = \frac{W_0 \cdot S}{L}$, W_0 – masa próbki.

Na podstawie wykresów P-f wyznaczono jednostkową pracę zniszczenia J_{Ic} . Wartość całki J_{Ic} daną wzorem (3) uzyskano korzystając z zależności podanej w [9]. W tabelicy 3 przedstawione zostały obliczone wartości średnie podstawowych parametrów mechaniki pęknięcia betonów uzyskane w badaniach wg I modelu pęknięcia.

$$J_{Ic} = \frac{A}{2 \cdot b \cdot b_1}, \quad (3)$$

gdzie:

A – energia zgromadzona w próbce do momentu inicjacji szczeliny pierwotnej,

b_1 – wysokość próbki powyżej szczeliny pierwotnej.

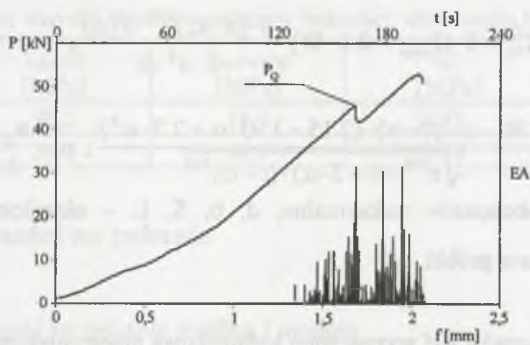
Tablica 3

Uzyskane wartości średnie wyników w badaniach parametrów mechaniki pęknięcia wg I modelu pęknięcia

Rodzaj betonu	E [MPa]	a_c [$m \cdot 10^{-2}$]	K_{Ic}^S [$MN/m^{3/2}$]	CTOD _c [$m \cdot 10^{-6}$]	J_{Ic} [N/m]
W	28668	6,10	0,99	10,0	45,06
Z	26301	5,96	0,82	8,3	36,03

3.2. Badania odporności na pęknięcie według II modelu

W badaniach według II modelu pęknięcia użyto sześcianów z dwiema szczelinami pierwotnymi pokazanych na rys. 2. Wielkość szczelin dobrano, aby spełnić warunek podany w [10]. Badania przeprowadzono stosując maszynę wytrzymałościową ZWICK Z100. W trakcie eksperymentów rejestrowano zależność obciążenie-przemieszczenie punktu przyłożenia siły: P-f i sygnały emisji akustycznej (EA). Pomiaru EA dokonano za pomocą jednokanałowego analizatora emisji akustycznej EA-IFTR. Na podstawie wykresów wyznaczono wartości siły krytycznej P_Q . Przykładową krzywą zniszczenia dla betonów serii W pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Przykładowa krzywa zniszczenia oraz sygnały EA betonu wapiennego – seria W
Fig. 4. Example curves of destruction and signal EA of limestone concrete – W series

Odporność na pęknięcie według II modelu wyznaczono ze wzoru (4) podanego w [11].

$$K_{IIc} = \frac{5,11 \cdot P_Q}{2 \cdot B \cdot b} \sqrt{\pi \cdot a}, \quad (4)$$

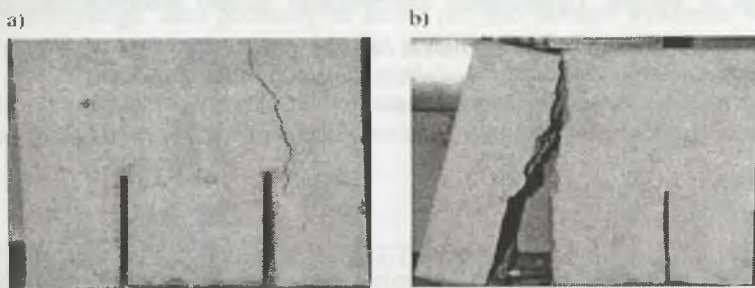
gdzie: P_Q - wartość siły krytycznej, inicjującej rozwój szczeliny pierwotnej (rys. 4),
b, B, a - określone zgodnie z rys. 2.

Pracę jednostkową zniszczenia J_{IIc} obliczono wg zależności (5) podanej w [9]:

$$J_{IIc} = \frac{A}{2 \cdot B \cdot b}, \quad (5)$$

gdzie: A - energia zgromadzona w próbce do momentu inicjacji szczeliny pierwotnej.

Podczas przeprowadzanych badań zaobserwowano różne mechanizmy zniszczenia: propagacja rysy w momencie pęknięcia próbki (rys 5a.) lub całkowite ścięcie w płaszczyźnie szczeliny pierwotnej (rys 5b.) W tabelicy 4 zestawiono obliczone wartości średnie parametrów dla II modelu pękania.



Rys. 5. Sposoby pękania próbek zaobserwowane w badaniach: a) pęknięcie pod kątem do szczeliny pierwotnej, b) gwałtowne zniszczenie na przedłużeniu szczeliny pierwotnej

Fig. 5. Cracking of the specimens observed in investigations: a) crack under angle to initial crack, b) violent destruction on prolongation of initial crack

Tablica 4

Uzyskane wartości średnie wyników w badaniach parametrów mechaniki pękania wg II modelu pękania

Rodzaj betonu	K_{IIc} [MN/m ^{3/2}]	J_{IIc} [N/m]
W	4,12	1463,5
Ż	3,71	1029,5

4. Uwagi końcowe

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, iż rodzaj zastosowanego kruszywa ma bezpośredni wpływ na zachowanie się kompozytu betonowego w procesie kruchego pękania.

Analizując tablice 3 i 4 widać, iż wszystkie badane parametry miały większe wartości w przypadku betonu wykonanego na kruszywie wapiennym. Największe różnice wystąpiły w przypadku J_{Ic} i J_{IIc} . Wzrost tych charakterystyk odniesionych do betonów serii Z na korzyść betonów serii W wyniósł odpowiednio 25,1% i 42,2%. Główny wpływ na uzyskanie tak korzystnych wyników betonu serii W mają cechy wytrzymałościowe warstw stykowych kruszywo – zaprawa, chropowatość ziaren oraz ich skład fizyczny i chemiczny [1].

Analizując krzywe zniszczenia (rys. 4), można zaobserwować, że posiadały one znamiona odkształceń quasi-plastycznych. W badaniach do ustalenia siły krytycznej pomocne było zastosowanie analizatora EA, co pozwoliło na precyzyjne określenie sił P_Q .

Uzyskane wyniki w niniejszej pracy posłużą do opisu teoretycznego rozwoju mikropęknięć w betonie. Opracowanie teoretycznego modelu mikromechanicznego opisu zachowania się betonów będzie przedmiotem dalszych prac.

LITERATURA

1. Neville A.: Właściwości betonu. Wydanie czwarte. Polski Cement, Kraków 2000.
2. Neimitz A.: Mechanika pękania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
3. Piasta J., Piasta W.: Rodzaje i znaczenie kruszywa w betonie. XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń 2002, s. 279-327.
4. Brandt A. M.: Zastosowanie doświadczalnej mechaniki zniszczenia do kompozytów o matrycach cementowych, w: Mechanika Kompozytów Betonopodobnych, PAN-Ossolineum, 1983, 449-501.
5. Determination of fracture parameters (K_{Ic} and $CTOD_c$) of plan 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.
6. Prokopski G., Halbiniak J.: Interfacial transition zone in cementations materials. Cement and Concrete Research, Vol.30 No. 4, 2000, 579-583.
7. Propopski G., Langier B.: Effect of water/cement ratio and silica fume addition on the fracture toughness and morphology of fractured surfaces of Ravel concretes. Cement and Concrete Research, Vol.30 No. 10, 2000, 1427-1433.
8. Halbiniak J., Langier B., Prokopski G.: Badania odporności betonów na pęknięcie (według projektu zaleceń RILEM). XLIV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN Komitetu Nauki PZITB, Poznań-Krynica 1998, 43-50.
9. ASTM E 1820-01: Test Method for Measurement for Fracture Testing. American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1996.
10. Nixon J. R., Strannigan J. S.: Determination of energy release rates and stress-intensity factors by the finite element method. Journal of Strain Analysis t. 7, 1972.
11. Watkins J.: Fracture toughness test for soil-cement samples in mode II. International Journal of Fracture, 23, 1983.