

# Ocena parametrów mechaniki pęknięcia betonu cementowego

Dr inż. Marta Kosior-Kazberuk, Politechnika Białostocka

## 1. Wprowadzenie

Do oceny właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych coraz częściej stosuje się parametry mechaniki pęknięcia, przede wszystkim, ze względu na możliwość ich wykorzystania do opisu zachowania się materiałów i elementów w procesie zniszczenia. O zniszczeniu elementu z betonu pod wpływem obciążeń zewnętrznych decydują m.in. nieciągłości materiałowe oraz lokalne skokowe różnice właściwości mechanicznych materiału. W pobliżu defektów betonu, takich jak szczelina, pustka powietrzna, rysa, korozja wewnątrz materiału itp. występują lokalne spiętrzenia naprężeń wywołanych obciążeniami zewnętrznymi. Mogą one powodować rozwój uszkodzenia, a w efekcie doprowadzić do zniszczenia całego elementu. Najbardziej niebezpiecznymi miejscami koncentracji naprężeń są szczeliny, w których wierzchołkach występują największe wartości naprężeń [1, 2].

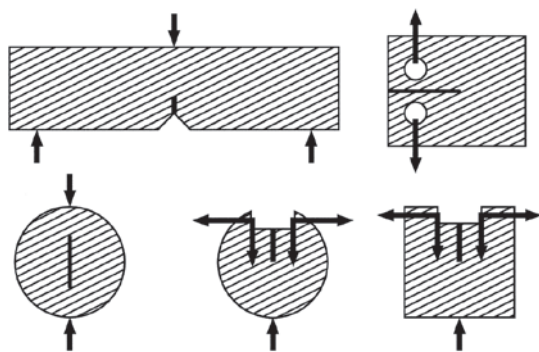
Rzeczywisty rozwój uszkodzeń przy rozciąganiu i ścinaniu może być opisany za pomocą liniowej (sprężystej) lub nieliniowej (sprężysto-plastycznej) mechaniki pęknięcia. Podstawowe właściwości betonu, takie jak wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości podłużnej, nie dają dostatecznej informacji pozwalającej określić próg obciążenia powodującego rozwój rysy. Natomiast, parametry mechaniki pęknięcia umożliwiają ocenę odporności betonu na pęknięcie.

Możliwości wykorzystania analizy właściwości betonu z uwzględnieniem parametrów mechaniki pęknięcia opisywanych, między innymi, Kasperkiewicz [3], Woliński [4], Prokopski [5], Sadowski i Golewski [2], którzy wskazują na przydatność stosowania mechaniki pęknięcia do opisu procesów zarysowania elementów betonowych i żelbetonowych pod wpływem różnorodnych obciążeń mechanicznych, a także do analizy rys powstających w zmiennych warunkach termiczno-wilgotnościowych. Innym kierunkiem stosowania mechaniki pęknięcia jest optymalizacja procesów projektowania betonów, w tym betonów wysokiej wytrzymałości w celu ograniczenia defektów początkowych mikrostruktury i uzyskania określonych właściwości mechanicznych. Potwierdzeniem uznania metod mechaniki pęknięcia w projektowaniu konstrukcji jest propozycja normalizacji parametrów pęknięcia w projekcie normy CEB-FIP Model Code 2010 [6].

Zachowanie się konstrukcji w warunkach obciążenia zależy, w głównej mierze, od materiału, z którego została wykonana. Na podstawie analizy zależności odkształceń wywołanych naprężeniami rozciągającymi, większość materiałów konstrukcyjnych można zaliczyć do kruchych, ciągliwych bądź quasi-kruchych. W odróżnieniu do materiałów idealnie kruchych, przy rozciąganiu których naprężenia gwałtownie spadają do zera, kiedy próbka pęka, materiały quasi-kruche charakteryzują się stopniowym obniżaniem się naprężeń po osiągnięciu krytycznego naprężenia wywołującego zarysowanie [7]. Ze względu na zróżnicowanie materiałów, do opisu ich zachowania się przy zniszczeniu opracowano różnorodne modele i kryteria (wytrzymałościowe, energetyczne) opisane między innymi w pracach [1, 5, 7, 8]. W ostatnich kilkudziesięciu latach nastąpił znaczący rozwój technologii betonu, którego efektem była radykalna poprawa wybranych właściwości materiału przy jednoczesnej zmianie innych. Np. ze względu na większą kruchość, zachowanie się betonu wysokiej wytrzymałości jest bliższe liniowej teorii pęknięcia niż betonu normalnej wytrzymałości. Jednakże, beton jest materiałem quasi-kruchym, więc klasyczna liniowa mechanika pęknięcia nie może być stosowana bezpośrednio nawet do betonu wysokiej wytrzymałości [9].

## 2. Wyznaczanie parametrów odporności betonu na pęknięcie

Powszechność występowania zjawiska pęknięcia w materiałach konstrukcyjnych powoduje potrzebę prowadzenia badań w celu ustalenia łatwej w realizacji metody określania jednoznacznych wartości parametrów mechaniki pęknięcia. Podstawowymi parametrami materiałowymi w mechanice pęknięcia są krytyczny współczynnik intensywności naprężeń  $K_{Ic}$ , energia pęknięcia  $G$  i rozwarcie wierzchołka szczeliny (*crack tip opening displacement*)  $CTOD$ . Parametry wyznacza się doświadczalnie przy wykorzystaniu próbek ze szczelinami. W przypadku metali, procedura określania tych parametrów jest znormalizowana i powszechnie stosowana, np. [10]. Proces pęknięcia zaczyna się od szczeliny inicjowanej zmęczeniowo w wierzchołku karbu.



**Rys. 1.** Próbkę z karbem lub szczeliną pierwotną stosowaną do wyznaczania parametrów mechaniki pęknięcia

Dla betonu i innych materiałów kruchych i quasi-kruchych, uzyskanie szczeliny początkowej o ściśle określonych parametrach (długość, orientacja) jest bardzo trudne. Przybliżone określenie długości szczeliny początkowej (a dokładnie wąskiego karbu typu U), także może być przyczyną niedokładności testu. Zazwyczaj, wytwarza się ją na etapie formowania próbki [2] albo poprzez wycięcie piłą diamentową [1]. Dotychczas podejmowano wiele prób opracowania metody wyznaczania parametrów mechaniki pęknięcia w przypadku betonu. Elementy próbne stosowane do wyznaczania parametrów mechaniki pęknięcia przedstawiono na rysunku 1. Najczęściej stosowana była próba przeprowadzana na elementach belkowych z karbem, oparta na zależności pomiędzy obciążeniem niszczącym a długością rysy początkowej.

Do najbardziej znanych procedur badawczych stosowanych do oceny odporności betonu na pęknięcie należą trzy projekty RILEM [11–13]. We wspomnianych procedurach elementy próbne w formie belek z karbem obciąża się pojedynczą siłą skupioną zgodnie z I modelem pęknięcia (rozciąganie przy zginaniu) [5]. Wymiary próbek zależą, między innymi, od maksymalnego wymiaru kruszywa.

Metoda opisana w [11] opiera się na modelu szczeliny fikcyjnej opracowanym przez Hillerborga i in. [7], na podstawie którego można określić wartość energii pęknięcia  $G_F$  i wytrzymałość na rozciąganie  $f_t$ . Długość nacięcia wykonanego w środku rozpiętości belki powinna sięgać połowy wysokości próbki, a jego szerokość nie powinna przekraczać 10 mm. Belkę obciąża się w sposób monotoniczny do zniszczenia. Energię pęknięcia określa się na podstawie wielkości pola powierzchni ograniczonej wykresem zależności obciążenie – przemieszczenie w miejscu przyłożenia siły, przy czym w obliczeniach uwzględnia się ciężar własny belki. Wadą metody jest brak określonego sposobu pomiaru przemieszczenia. Model pęknięcia uwzględniający efekt skali, opracowany przez Bazanta i in. [1, 7], wykorzystano w wytycznych RILEM [12] wyznaczania energii pęknięcia  $G_F$  i zasięgu strefy odkształceń plastycznych w pobliżu wierzchołka szczeliny  $c_p$ . Badania przeprowadza się przy wykorzystaniu zestawów belek o co najmniej trzech różnych roz-

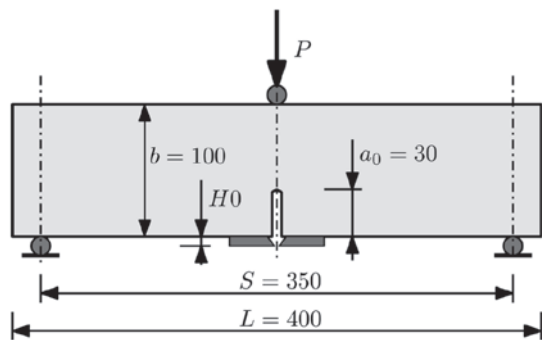
miarach. Przy czym, proporcje poszczególnych wymiarów muszą być takie same dla każdej wielkości belki. Stosunek długości belki do jej wysokości powinien być większy od 2,5, a stosunek głębokości karbu do wysokości belki powinien zawierać się w przedziale od 0,15 do 0,5. Szerokość wycięcia nie może przekraczać połowy maksymalnej średnicy kruszywa w betonie.

Poszczególne belki poddaje się monotonicznemu obciążeniu aż do zniszczenia. Wartość energii pęknięcia określa się, wykorzystując analizę regresji, na podstawie zmierzonych wartości maksymalnych obciążeń poszczególnych belek oraz modułu Younga betonu. Wadą metody jest konieczność przygotowania elementów belkowych o zróżnicowanych wymiarach, które powinny być badane na tym samym stanowisku badawczym.

Wiele badań doświadczalnych przeprowadzono przy zastosowaniu procedury opisanej w [13], opracowanej na podstawie dwuparametrowego modelu pęknięcia Jenqa i Shaha [14]. Metoda pozwala na wyznaczenie krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}$ , rozwarcia wierzchołka szczeliny  $CTOD_c$  oraz modułu Younga  $E$ . Zalecany stosunek rozpiętości elementu próbnego do jego wysokości wynosi 4. Głębokość szczeliny początkowej powinna sięgać 1/3 wysokości, a jego szerokość powinna być mniejsza od 5 mm. W trakcie badań rejestruje się wykres siły obciążającej w funkcji rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej (*crack mouth opening displacement*)  $CMOD$ . Szybkość obciążania powinna być tak dobrana, aby obciążenie maksymalne zostało osiągnięte w ciągu około 5 min. Następnie, obciążenie zmniejsza do 95% maksymalnego. W tym momencie, obciążenie redukuje się zera. Dalej, należy ponownie cyklicznie obciążać próbkę aż do zniszczenia. Do określenia parametrów pęknięcia niezbędne jest ustalenie, na podstawie wykresu zależności obciążenie (siła skupiona  $P$ ) –  $CMOD$ , podatności początkowej równej kotangensowi kąta nachylenia stycznej do pierwszej fazy wykresu oraz podatności określonej przy spadku siły maksymalnej o 5%. Szczegółowe wzory do obliczania parametrów mechaniki pęknięcia podano w [2, 13].

### 3. Opis badań doświadczalnych

Opierając się na trzeciej, z opisanych wyżej, procedurze RILEM [13] przeprowadzono praktyczną próbę oceny zmian parametrów mechaniki pęknięcia betonu w czasie. Wykorzystano popularne próbki pryzmatyczne o wymiarach  $100 \times 100 \times 400$  mm. Każda seria składała się z czterech elementów. Do wykonania betonów wykorzystano cement portlandzki CEM I 42,5N – HSR/NA. Zawartość cementu wynosiła  $350 \text{ kg/m}^3$ , a wartość wskaźnika  $w/c = 0,40$ . Jako kruszywo stosowano mieszaninę piasku rzeczno-płukanego o uziarnieniu do 2 mm oraz kruszywa grubego naturalnego o ziarnach do 8 mm. Frakcja 0/2 mm stanowiła 40%, frakcja 2/4 mm – 25%, a frakcja 4/8 mm – 35% stosu okruszowego. Po rozformowaniu, próbki przechowywano



**Rys. 2.** Wymiary i sposób obciążenia elementów próbnych

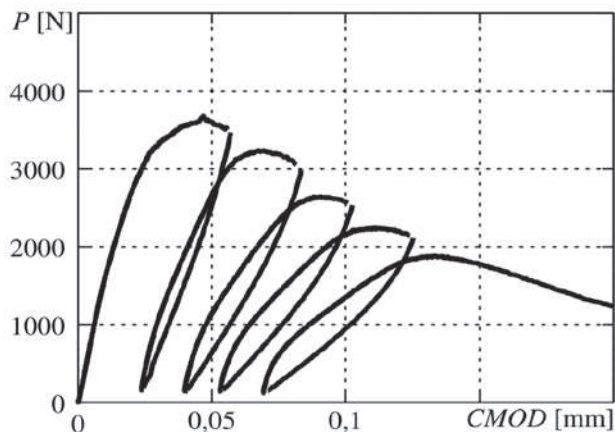
w wodzie w temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Szczelinę pierwotną o głębokości 30 mm i szerokości 3 mm wycinano na 1 dzień przed wykonaniem badania.

Badania prowadzono przy zastosowaniu uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej MTS 322 z automatyczną rejestracją wyników. Szerokość rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej mierzono w trakcie testu za pomocą ekstensometru blaszkowego (clip gauge). Wymiary elementu próbnego, sposób obciążenia i miejsce umieszczenia blaszek stalowych do mocowania ekstensometru pokazano na rysunku 2. Grubość elementów stalowych  $H_0$ , do mocowania ekstensometru, umieszczonych przy wylocie szczeliny pierwotnej, wynosiła 5 mm. Wartość  $CMOD$  mierzono pomiędzy ostrzami blaszek.

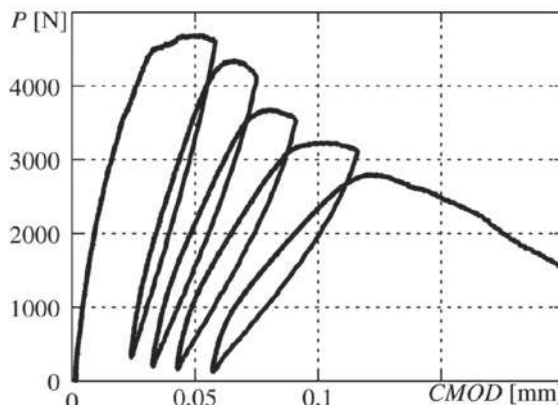
Dodatkowo, przeprowadzono badania wytrzymałości betonu na ściskanie  $f_{cm}$  stosując próbki kostkowe o wymiarach  $100 \times 100 \times 100$  mm.

#### 4. Wyniki oceny parametrów mechaniki pęknięcia betonu

Przykładowe wykresy zależności obciążenie –  $CMOD$  uzyskane w trakcie badań prowadzących do określe-



**Rys. 3.** Wykres zależności obciążenie –  $CMOD$  w próbie obciążenia cyklicznego elementu betonowego po 28 dniach dojrzewania



**Rys. 4.** Wykres zależności obciążenie –  $CMOD$  w próbie obciążenia cyklicznego elementu betonowego po 150 dniach dojrzewania

nia parametrów mechaniki pęknięcia betonu cementowego przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

Na podstawie analizy zależności obciążenie –  $CMOD$ , biorąc pod uwagę geometrię elementów próbnych, określono moduł Younga  $E$ , krytyczną długość efektywnej szczeliny  $a_c$ , krytyczną wartość współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^s$  i krytyczne rozwarście wierzchołka szczeliny  $CTOD_c$ .

Parametr  $a_c$ , którego wartość ustala się w procesie iteracji [7], jest to krytyczna długość efektywnej rysy, do jakiej propaguje szczelina pierwotna. Średnie wartości parametrów, a także wytrzymałości na ściskanie  $f_{cm}$  przedstawiono w tabeli 1. Ustalono, że wraz z wiekiem betonu wartość  $K_{Ic}^s$  zwiększała się, natomiast wartość  $CTOD_c$  zmniejszała się, przy czym, w rozpatrywanym okresie wzrost  $K_{Ic}^s$  wyniósł ponad 50%. Wraz ze wzrostem wartości  $K_{Ic}^s$ , pęknięcie następowało przy mniejszym rozwarciu szczeliny. Jednocześnie, krytyczna długość efektywnej rysy  $a_c$  nieznacznie zmniejszyła się. W przypadku materiałów quasi-kruchości, ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie, zniszczenie następuje przy mniejszej długości propagującej rysy.

**Tabela 1.** Wartości parametrów mechaniki pęknięcia i właściwości wytrzymałościowe betonu

Wiek betonu [dni]	$f_{cm}$ [MPa]	$E$ [MPa]	$a_c$ [m]	$K_{Ic}^s$ [ $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ ]	$CTOD_c$ [ $\text{m} \times 10^{-5}$ ]	$Q$ [mm]
28	48,5	23410	0,0430	0,730	1,580	256
56	50,9	24145	0,0412	0,883	1,464	160
90	53,4	28265	0,0423	1,003	1,403	156
120	56,0	30100	0,0413	1,146	1,433	142
150	59,8	31320	0,0410	1,160	1,370	137

Jenq i Shah [14] wprowadzili dodatkową wielkość  $Q$  [mm] charakteryzującą kruchość materiału (dla betonu jej wartość zawiera się w granicach od 100 do 350 mm i nie jest związana z wymiarami elementu próbnego),



którą można obliczyć na podstawie parametrów mechaniki pęknięcia, według wzoru:

$$Q = \left( \frac{E \cdot CTOD_c}{K_{Ic}^s} \right)^2$$

Wartość  $Q$  obliczono uwzględniając średnie wartości parametrów i modułu Younga. Im wartość parametru  $Q$  jest mniejsza, tym materiał jest bardziej kruchy. Wraz z wiekiem betonu, wartość  $Q$  malała, co potwierdza ogólną prawidłowość, że wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie betonu zwiększa się jego kruchość.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały przydatność projektu wytycznych RILEM [13] do wyznaczania parametrów charakteryzujących odporność betonu cementowego na pęknięcie w warunkach I modelu pęknięcia. Procedura badawcza pozwala uzyskać jednoznaczne wartości parametrów przy wykorzystaniu łatwych do wykonania elementów próbnych. Do oceny odporności betonu na pęknięcie należy stosować dwa parametry mechaniki pęknięcia, szczególnie w przypadku materiałów, do opisu których nie może być stosowana klasyczna liniowa mechanika pęknięcia. Obserwacja zmian co najmniej dwóch parametrów pozwoli prawidłowo ocenić odporność materiału na pęknięcie.

### BIBLIOGRAFIA

[1] Comprehensive Structural Integrity. I. Milne, R. O. Ritchie, B. Karihaloo eds., v. 2, Fundamental Theories and Mechanisms of Failure, Elsevier 2003

[2] Golewski G., Sadowski T., Parametry mechaniki pęknięcia betonów określone na podstawie badań doświadczalnych według I modelu pęknięcia. Przegląd Budowlany, nr 7–8/2005, s. 28–33

[3] Kasperkiewicz J., Wprowadzenie do zagadnień pęknięcia betonu i kompozytów betonopodobnych. W: Wybrane zagadnienia z mechaniki kompozytów. Wyd. Politechniki Białostockiej, 1982

[4] Woliński Sz., Właściwości betonu rozciąganego i ich zastosowanie w nieliniowej mechanice pęknięcia betonu. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Z. 15, 1991

[5] Prokopski G., Mechanika pęknięcia betonów cementowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009

[6] CEB-FIP Model Code 2010 Final draft

[7] Shah S. P., Swartz S. E., Ouyang Ch., Fracture mechanics of concrete: Applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995

[8] Kazberuk A., Kosior-Kazberuk M., Zastosowanie próbek cylindrycznych z korbami do wyznaczania parametrów odporności betonu na pęknięcie. Inżynieria i Budownictwo, nr 6/2011, s. 332–334

[9] Zhou F. P., Barr B. I. G., Lydon F. D., Fracture properties of high strength concrete with varying silica fume content and aggregates. Cement and Concrete Research, nr 3/1995

[10] ASTM E1820–11 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. American Society for Testing and Materials, 2011

[11] RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete – Test Methods: Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams. Materials and Structures, Vol. 18, 1985, s. 285–290

[12] RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete – Test Methods: Size-Effect Method for Determining Fracture Energy and Process Zone Size of Concrete. Materials and Structures, Vol. 23, 1990, s. 461–465

[13] RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete – Test Methods: Determination of the Fracture Parameters ( $K_{Ic}^c$  and  $CTOD_c$ ) of Plain Concrete Using Three-Point Bend Tests. Materials and Structures, Vol. 23, 1990, s. 457–460

[14] Jenq Y. S., Shah S. P., A two parameter fracture model for concrete. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 111, 1985, s. 1227–1241



RENOWACJE

Instytut Budownictwa Uniwersytetu Zielonogórskiego zaprasza do udziału w:

VII Konferencji Naukowo-Technicznej pod patronatem  
Ministra Infrastruktury, Komitetu Nauki PZiTb, Rektora Uniwersytetu Zielonogórskiego

### pt. „RENOWACJA BUDYNKÓW I MODERNIZACJA OBSZARÓW ZABUDOWANYCH”

Konferencja odbędzie się w dniach 21-22 marca 2013 roku w Budyńku Instytutu Budownictwa Uniwersytetu Zielonogórskiego. Do udziału w konferencji zapraszamy pracowników naukowych, producentów materiałów budowlanych, projektantów, wykonawców robót oraz pracowników administracji rządowej i samorządowej.

Celem konferencji jest wymiana doświadczeń i wyników badań w zakresie renowacji budynków i modernizacji obszarów zabudowanych. Obrady podzielone zostaną na sesje tematyczne, w tym jedna będzie sesją wyjazdową do budynków poddanych rewaloryzacji, odbudowie lub renowacji.

Wszystkie referaty pozytywnie zaopiniowane przez członków Komitetu Naukowego zostaną opublikowane w marcowym numerze Przeglądu Budowlanego.

Dane do korespondencji: Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Budownictwa, „Renowacje”  
ul. prof. Z. Szafrana 1, 65-516 Zielona Góra, tel. (068) 3282290; (068) 3282416, fax (068) 3284777  
e-mail: Renowacje@ib.uz.zgora.pl

Koszt uczestnictwa w konferencji wynosi: 600 zł – dla autorów referatów,  
300 zł – dla pozostałych uczestników.

Aktualne informacje znajdują się na stronie internetowej: [www.renowacje.uz.zgora.pl](http://www.renowacje.uz.zgora.pl)