



Analiza parametrów mechaniki pęknięcia w warunkach I modelu obciążenia betonu

Anna Bernatowicz¹, Andrzej Kazberuk²

STRESZCZENIE:

Według najnowszych prognoz, fibrobetony jako jeden z kompozytów betonowych będą stale rozwijane. Kluczowa dla budownictwa idea zrównoważonego rozwoju zakłada bowiem tworzenie trwałych konstrukcji. Dodatek zbrojenia rozproszonego do betonu poprawia jego odporność na pęknięcie, a tym samym wydłuża okres eksploatacji. Znajomość parametrów mechaniki pęknięcia jest więc tu kluczowa. Celem niniejszej pracy było określenie wpływu dodatku włókien bazaltowych do betonu na wartości współczynnika intensywności naprężeń oraz wielkość rozwarcia szczeliny (tzw. *COD*). Badania przeprowadzone zostały przy użyciu betonowych dysków o średnicy 150 mm i grubości 50 mm ze wstępnie uformowanymi szczelinami o długości 15, 45 lub 75 mm. Próby były prowadzone w warunkach I modelu obciążenia z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z250. Otrzymane wyniki wskazują na zmianę charakteru pracy badanych elementów. Próbkę bez włókien wykazywały typowo quasi–kruche cechy betonu, natomiast wraz ze wzrostem ilości dodawanego zbrojenia rozproszonego nabierały one cech quasi–plastycznych. Zależność ta nie była jednak jednoznaczna dla wszystkich próbek, co wynikało z heterogenicznej struktury betonu oraz tendencji do zbrylania się włókien.

SŁOWA KLUCZOWE:

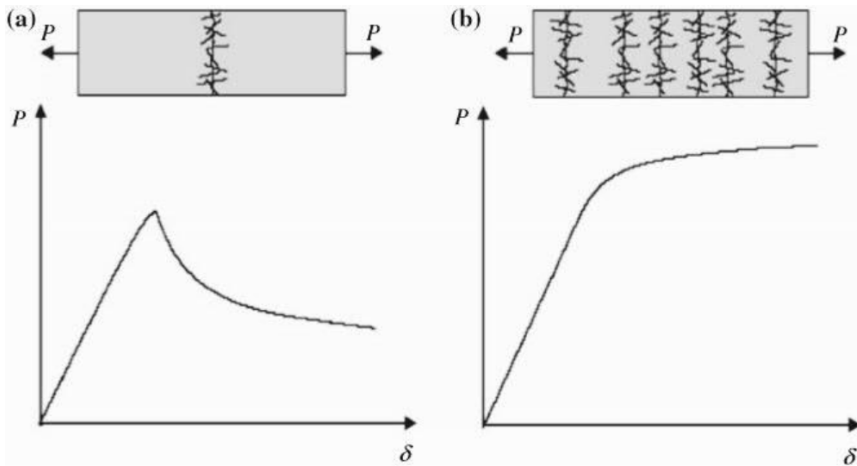
współczynnik intensywności naprężeń; *COD*; próba brazylijska

1. Wprowadzenie

Współczesna inżynieria materiałowa rozwija się w ramach idei zrównoważonego rozwoju. W kontekście budownictwa jej założenia skupiają się na zapewnieniu konstrukcjom odpowiedniej trwałości. Do jej obniżenia często przyczyniają się powstające pęknięcia. Znajomość wartości parametrów mechaniki pęknięcia jest więc niezwykle istotna. Ocena tych właściwości powinna dotyczyć również fibrobetonów, bowiem, według najnowszych prognoz, kompozyty betonowe będą ulegały stałemu rozwojowi [1]. Beton jako jeden z podstawowych materiałów konstrukcyjnych ma stosunkowo małą wytrzymałość na rozciąganie i zaliczany jest do materiałów quasi–kruchych. Dopiero za sprawą dodatku włókien nabiera on cech quasi–plastycznych. Materiał wzmacnia się i obserwujemy wzmożony efekt tzw. mięknięcia, co przedstawiono na rysunku 1 [2]. Poprawa cech wytrzymałościowych betonu uwidacznia się w szczególności po pojawieniu się pierwszej rysy [3]. Wówczas włókna ograniczają jej dalszą propagację oraz zapobiegają przedwczesnemu zniszczeniu elementu. Odporność materiału na pęknięcie może być wyrażona za pomocą współczynnika intensywności naprężeń. Zależność obciążenie – odkształcenie (*COD* – crack opening displacement) dostarcza natomiast cennych informacji o charakterze pracy badanego elementu.

¹ Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45E, 15–351 Białystok, e-mail: krajewskaanna0@gmail.com, orcid id: 0000-0001-8231-6997

² Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45E, 15–351 Białystok, e-mail: a.kazberuk@pb.edu.pl, orcid id: 0000-0003-4179-0312



Rys. 1. Zależność obciążenie – odkształcenie: a) dla zwykłego betonu; b) dla betonu zbrojonego włóknami [2]

2. Badania I modelu pęknięcia betonu

I model pęknięcia odpowiada czystemu rozciąganiu (opening mode). Naprężenia pojawiają się jedynie na kierunku przyłożonego obciążenia i powodują zgodną z nim propagację szczeliny [4]. Jest to stan najbardziej popularny w przypadku badań elementów betonowych. Analizę I modelu pęknięcia betonu przeprowadził w swojej pracy Karihaloo [5]. Wartość współczynnika intensywności naprężeń obliczał on według wzoru:

$$K_{Ic}^P = \left\{ 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{a}{R} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{a}{R} \right)^6 + \frac{3}{64} \left(\frac{a}{R} \right)^8 \right\} \sqrt{\frac{a}{R}} \cdot \frac{P_u}{t\sqrt{\pi R}} \quad (1)$$

gdzie: a – połowa długości wstępnie zainicjowanej szczeliny; R – promień dysku; P_u – siła niszcząca próbkę; t – grubość dysku.

Badanie, tzw. próba brazylijska, było przeprowadzane z wykorzystaniem betonowych dysków osłabionych szczelinami o różnej długości, aby zaobserwować wpływ efektu skali na otrzymywane wyniki. W analizie I modelu obciążenia popularne są również próbki o kształcie prostopadłościennym. Wówczas pierwotne szczeliny są inicjowane w środkowej części elementu. Analiza taka została przeprowadzona m.in. w pracy [6].

3. Badania własne

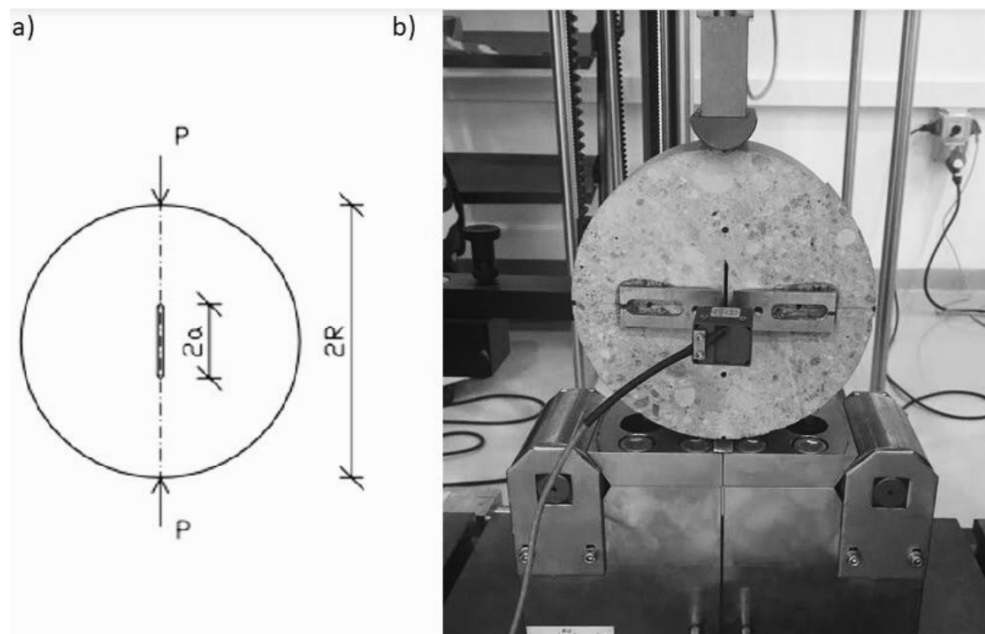
3.1. Materiał i przygotowanie próbek

W badaniu jako próbki wykorzystano dyski o średnicy 150 mm i grubości 50 mm, które osłabiono szczelinami o długościach: 15, 45 lub 75 mm. Otwory te zostały uformowane na etapie betonowania próbek za pomocą ostrza o grubości 2 mm. Mieszanki betonowe zostały przygotowane na bazie CEM I lub CEM II, zaś w/c było równe 0,4 lub 0,5. Receptury uwzględniały dodatek włókien bazaltowych o długości 50 mm w ilości 2, 4 lub 8 kg/m³. Seria porównawcza obejmowała betonowe próbki bez włókien. Dyski były wycinane z bloków walcowych o wysokości 450 mm.

3.2. Metoda badań

Badanie zostało przeprowadzone z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z250. Każdorazowo próbki ze szczelinami były umieszczane zgodnie z kierunkiem

działającego obciążenia (rys. 2). Prędkość przyrostu obciążenia dobrano tak, aby zniszczenie następowało po około 5 minutach, jak zakłada procedura RILEM [7]. Przed rozpoczęciem próby brazylijskiej dyski były mierzone z dokładnością do 0,01 mm za pomocą suwmiarki. Dokonywano pomiaru średnicy w dwóch miejscach, długości szczeliny oraz grubości w trzech punktach. Uśrednione wyniki tych pomiarów oraz wartości sił niszczących próbki wykorzystano w formule (1) do obliczenia wartości współczynników intensywności naprężeń w warunkach I modelu pęknięcia betonu.



Rys. 2. a) Schemat badanej próbki, gdzie a – długość połowy szczeliny, R – promień dysku, P – wartość przyłożonej siły ściskającej próbkę; b) widok badanej próbki z ekstensometrem

W każdej próbie uzyskiwano także wartość maksymalnego rozwarcia szczeliny, tzw. crack opening displacement, oraz wykres zależności obciążenie – odkształcenie (*COD*). Pomiaru dokonywano za pomocą ekstensometru skorelowanego z maszyną wytrzymałościową.

4. Wyniki i dyskusja

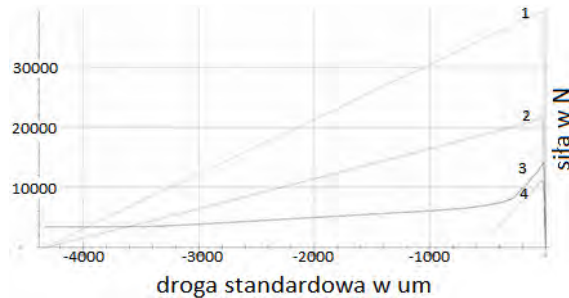
W tabeli 1 zestawiono wyniki wartości współczynnika intensywności naprężeń oraz wielkości *COD* w zależności od zawartości włókien bazaltowych. Jako otwór mały oznaczono szczelinę o długości ok. 15 mm, jako otwór średni – szczelinę o długości ok. 45 mm, zaś jako otwór duży – szczelinę o długości ok. 75 mm.

Otrzymane wyniki nie wskazują poprawy odporności betonu na pęknięcie po dodaniu włókien bazaltowych. Wartości współczynników intensywności naprężeń są bowiem nieco niższe niż w przypadku betonu bez włókien. Spowodowane to może być tendencją włókien bazaltowych do zbrylania się i tworzeniem się tzw. „jeży”. Wówczas nierównomiernie rozłożone zbrojenie rozproszone nie współpracuje właściwie z matrycą cementową i zaburza pracę elementu pod wpływem obciążenia. Zjawisko to zostało opisane m.in. w pracach [8] i [9]. Jedynie w przypadku dużego otworu przy zawartości włókien równej 2 i 4 kg/m³ obserwuje się nieznaczny wzrost wartości K_I , co może wskazywać na równomierne rozłożenie włókien w tych próbkach i właściwą ich pracę. Na ogół włókna bazaltowe poprawiają bowiem wartości parametrów mechaniki pęknięcia betonu, co wykazano m.in. w pracy [10].

Tabela 1Analiza wartości współczynnika intensywności naprężeń i *COD*

Lp.	Zawartość włókien bazaltowych [kg/m ³]	Wielkość otworu	K_{IC}^P [MPa·m ^{1/2}]	<i>COD</i> [mm]
1	0,00	mały	0,553 ± 0,144	0,01955 ± 0,01074
2	0,00	średni	0,706 ± 0,151	0,04176 ± 0,02792
3	0,00	duży	0,726 ± 0,083	0,03355 ± 0,02860
4	2,00	mały	0,457 ± 0,044	0,01747 ± 0,00805
5	2,00	średni	0,672 ± 0,116	0,03039 ± 0,00576
6	2,00	duży	0,753 ± 0,121	0,02411 ± 0,00429
7	4,00	mały	0,464 ± 0,087	0,01715 ± 0,00906
8	4,00	średni	0,644 ± 0,068	0,02827 ± 0,01584
9	4,00	duży	0,736 ± 0,273	0,02554 ± 0,00918
10	8,00	mały	0,446 ± 0,056	0,01769 ± 0,00719
11	8,00	średni	0,575 ± 0,132	0,01738 ± 0,01201
12	8,00	duży	0,632 ± 0,109	0,01916 ± 0,02093

Dodatek włókien bazaltowych korzystnie wpłynął natomiast na wartości *COD*. Wielkości szerokości rozwarcia szczeliny były mniejsze w przypadku próbek z włóknami. Oznacza to, że materiał nabierał cech quasi-plastycznych i pękał w bardziej kontrolowany sposób. Widoczne było także zjawisko tzw. „mięknienia”. Przykładowe wykresy zależności obciążenie – odkształcenie (*COD*) dla próbek o różnej zawartości włókien bazaltowych przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wykres zależności obciążenie – *COD* dla: 1 – próbki bez włókien; 2 – próbki z zawartością 2 kg/m³; 3 – próbki z zawartością 4 kg/m³ oraz 4 – próbki z zawartością 8 kg/m³ włókien bazaltowych

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że dodatek włókien bazaltowych korzystnie wpływa na wartości parametrów mechaniki pęknięcia, takie jak współczynnik intensywności naprężeń oraz *COD*. Wyniki cechuje jednak duża niejednorodność. To może być spowodowane heterogeniczną strukturą betonu oraz tendencją włókien do zbrzylenia się. Najbardziej widocznym efektem dodatku zbrojenia rozproszonego jest zmiana charakteru pracy betonu w warunkach I modelu obciążenia z quasi-kruchości na quasi-plastyczny.

Literatura

- [1] Czarniecki L., Deja J., Furtak K., Halicka A., Kapliński O., Kaszyńska M., Kruk M., Kuczyński K., Szczechowiak E., Śliwiński J., Idee kształtujące innowacyjne wyzwania techniki budowlanej. W poszukiwaniu paradygmatu rozwoju budownictwa, Materiały Budowlane 2017, 7, 28–33.
- [2] Prisco M. i in., Fibre reinforced concrete: new design perspectives, Materials and Structures 2009, 42, 1261–1281.

- [3] Kosior-Kazberuk M., Post – cracking behaviour and fracture energy of synthetic reinforced concrete, *Materials Science* 2016, 22, 4, 542–547.
- [4] Golewski G.L., Sadowski T., Model kruchych uszkodzeń betonu, *Materiały Budowlane* 2006, 2, 11–14.
- [5] Karihaloo B., *Comprehensive Structural Integrity, Failure of Concrete* 2003, 2, 477–548.
- [6] Kosior-Kazberuk M., Berkowski P., Fracture mechanics parameters of fine grained concrete with polypropylene fibres, *Procedia Engineering* 2016, 161, 157–162.
- [7] Shah S.P., Size – effect method for determining fracture Energy and process zone size of concrete, *RILEM TC 89-FMT, Materials and Structures* 1990, 23, 461–465.
- [8] Karwowska J., Łapko A., Przydatność stosowania nowoczesnych kompozytów fibrobetonowych w konstrukcjach budowlanych, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 2011, 2, 41–46.
- [9] Szwabowski J., Ponikiewski T., Analiza testów i czynników urabialności fibrobetonów, researchgate.net
- [10] Kosior-Kazberuk M., Właściwości mechaniczne betonu zbrojonego włóknem bazaltowym, *Materiały Budowlane* 2017, 5, 79–80.

The analysis of fracture mechanics parameters by concrete’s opening mode

ABSTRACT:

Nowadays fibre concrete, as one of the concrete’s composites, is still developing. The major idea of sustainable development deals with durability of constructions. Fibres in concrete improve resistant to cracks and by that increase durability. Taking this phenomenon into consideration, the knowledge of fracture mechanics parameters is really important. The aim of this paper was to determine the influence of basalt fibres addition to stress intensity factor and crack opening displacement (*COD*). Concrete discs 150 mm width and 50 mm thick with crack length’s 15, 45 or 75 mm were studied. Load was applied according to opening mode. Zwick/Roell Z250 machine was used in the experiment. Samples without fibres behave as quasi-brittle but these ones with fibres worked more like quasi-plastic material. Results were very diversified, because of heterogenic structure of concrete and the fibres tendency to fuse.

KEYWORDS:

stress intensity factor; *COD*; Brazilian test