

**dr inż. Julita Krassowska<sup>1</sup>, dr inż. Paweł Wolka<sup>2</sup>, dr inż. Adam Kłak<sup>3</sup>, dr hab. inż. Marta Kosior-Kazberuk, prof. PB<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Politechnika Białostocka

<sup>2</sup>Astra Technologia Betonu sp. z o.o.

<sup>3</sup>Politechnika Świętokrzyska

## **Rozwój procesu pęknięcia i ocena właściwości mechanicznych betonów zbrojonych włóknami bazaltowymi, węglowymi i polimerowymi**

Fracture Process Zone Development and Mechanical Performance of Fiber-Reinforced Concrete with Basalt, Carbon, and Polymer Fibers

### **Streszczenie**

W pracy przeanalizowano proces pęknięcia oraz właściwości mechaniczne betonu zbrojonego włóknami bazaltowymi, węglowymi i polimerowymi, wykorzystując testy zginania trójpunktowego i technikę DIC. Badano wpływ rodzaju włókien (0,3% obj.) na propagację rys, redystrybucję naprężeń i zdolność pochłaniania energii. Analiza wyników badań wykazała istotne różnice w przebiegu wykresów obciążenie  $P$  vs rozwarście wylotu szczeliny pierwotnej CMOD i w zachowaniu po osiągnięciu obciążenia maksymalnego. Betony z włóknami bazaltowymi i węglowymi charakteryzowały się kruchym pękaniem, podczas gdy beton z włóknami polimerowymi wykazywał efekt quasi-umocnienia odkształceniowego oraz większą podatnością na deformacje (CMOD  $\sim 3,5$  mm wobec  $\sim 1,0$  mm dla betonów z włóknami bazaltowymi i  $\sim 0,8$  mm dla betonów z włóknami węglowymi). Przekładało się to na wyższą resztkową wytrzymałość na zginanie  $f_{RI}$  (0,9 MPa vs  $\sim 0,2$  MPa i  $\sim 0,4$  MPa). Mimo porównywalnego zasięgu strefy procesowej FPZ, intensywność odkształceń  $\varepsilon$  w tej strefie była największa w przypadku betonu z włóknami bazaltowymi, a najmniejsza w przypadku betonu z włóknami polimerowymi, co wskazuje na lepszą redystrybucję naprężeń i kontrolę uszkodzeń w przypadku tego ostatniego. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają znaczenie doboru włókien dla poprawy odporności na pęknięcie i trwałości betonu.

### **Abstract**

The paper analyses the fracture process and mechanical properties of concrete reinforced with basalt, carbon and polymer fibres using three-point bending tests and DIC technique. The influence of fibre type (0.3 vol.%) on crack propagation, stress redistribution and energy absorption capacity was investigated. Analysis of the test results showed significant differences in the load  $P$  vs crack mouth opening displacement CMOD curves and in the behaviour after reaching the maximum load. Concretes with basalt and carbon fibres were characterised by brittle fracture, while concrete with polymer fibres showed a quasi-strain hardening effect and greater susceptibility to deformation (CMOD  $\sim 3.5$  mm vs.  $\sim 1.0$  mm for concretes with basalt fibres and  $\sim 0.8$  mm for concretes with carbon fibres). This resulted in a higher residual flexural strength  $f_{RI}$  (0.9 MPa vs.  $\sim 0.2$  MPa and  $\sim 0.4$  MPa). Despite the comparable extent of the FPZ process zone, the strain intensity  $\varepsilon$  in this zone was the highest

for concrete with basalt fibers and the lowest for concrete with polymer fibers, which indicates better stress redistribution and damage control in the case of the latter. The results of the conducted tests confirm the importance of fiber selection for improving the crack resistance and durability of concrete.

## 1. Wprowadzenie

Wzrost wymagań stawianych nowoczesnym konstrukcjom betonowym w zastosowaniach takich jak infrastruktura transportowa, obiekty przemysłowe czy budownictwo na terenach sejsmicznych skłania do poszukiwania materiałów o podwyższonej odporności na pękanie oraz lepszych właściwościach energochłonnych. Klasyczne zbrojenie stalowe, choć efektywne, niesie ze sobą ryzyko korozji i ogranicza kształt elementów. Zatem, alternatywą stają się kompozyty betonowe wzmocniane włóknami - włóknobetony. Ich zaletą jest rozproszone wzmocnienie matrycy betonowej, co przekłada się na opóźnienie inicjacji rys i ograniczenie szybkości propagacji pęknięć.

W ostatnich dekadach szeroko badano wpływ włókien stalowych na wytrzymałość na zginanie, odporność na uderzenia czy odporność na zmęczenie betonu [1–3]. Jednakże rosnące wyzwania środowiskowe oraz konieczność redukcji zużycia stopów żelaza skłaniają do wprowadzenia włókien o różnym pochodzeniu i właściwościach mechanicznych. Włókna bazaltowe, wytwarzane z naturalnej skały wulkanicznej, charakteryzują się wysoką wytrzymałością na rozciąganie i dużą odpornością chemiczną, a przy tym są odporne na korozję i mają stosunkowo niską cenę [4–6]. Włókna węglowe znane są z wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, wysokiej wartości modułu Younga oraz doskonałej przewodności cieplnej i małej masy własnej, co wpływa na poprawę właściwości dynamicznych i sprężystości kompozytu [7,8]. Z kolei włókna polimerowe (np. aramidowe czy polipropylenowe) oferują dużą elastyczność i odporność na zmęczenie materiału, jednocześnie nie podlegając korozji [9–11].

Właściwością betonu, na którą dodatek włókien ma największy wpływ, jest wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. W prawidłowo wykonanym elemencie włóknobetonowym, poddanym zginaniu, pojawienie się rys następuje przy większych obciążeniach niż w przypadku elementu konstrukcyjnego z betonu zwykłego. Pojawienie się pierwszych mikrorys prowadzi, w kolejnym etapie, do równomiernego zarysowania elementu na długości. Związane jest to ze współpracą włókien i matrycy cementowej. Związek włókno-matryca jest możliwy dzięki wzajemnej przyczepności. Włókna równomiernie rozłożone w całej objętości betonu przekazują naprężenia powstające w miejscu pęknięcia na większy obszar, w ten sposób zmniejszając koncentrację naprężeń w wierzchołku pęknięcia. Zamiast skupionych rys o znacznej rozwartości uzyskujemy system mikrorys mniej szkodliwy dla konstrukcji ze względu na trwałość. Nawet po wystąpieniu rys o znacznej rozwartości, element nadal ma zdolność do przenoszenia obciążeń. Mechanika pękania w ujęciu liniowo-sprężystym nie może być stosowana do betonów zbrojonych włóknami z powodu występowania strefy procesowej FPZ (*fracture proces zone*), która wprowadza nieliniowość do mechanizmu zniszczenia [12–14]. To właśnie w obrębie strefy FPZ dochodzi do rozwoju mikropęknięć, ich koalescencji i przejścia w makropęknięcia, co bezpośrednio decyduje o nośności resztkowej, zdolności pochłaniania energii oraz trwałości elementu betonowego po zarysowaniu. Charakterystyka FPZ — jej długość, rozkład odkształceń i intensywność uszkodzeń — ma kluczowe znaczenie dla prawidłowego opisu i modelowania mechanizmu pękania betonu zbrojonego włóknami. Im bardziej rozproszony i kontrolowany jest proces rozwijania się FPZ, tym beton wykazuje większą ciągliwość i zdolność do przenoszenia obciążeń w fazie pokrytycznej, co jest istotne w konstrukcjach wymagających wysokiej odporności na pękanie i długotrwałej niezawodno-

ści. Dlatego badania nad rozwojem FPZ są kluczowe dla przewidywania zniszczenia betonów zbrojonych włóknami [15–18].

Przez ostatnie dekady technika cyfrowej korelacji obrazu (DIC) zyskała szerokie zastosowanie w eksperymentalnej mechanice materiałów [19,20]. W trakcie badań materiałów quasi-kruchych, takich jak beton czy ceramika, DIC pozwala na precyzyjne mapowanie przemieszczeń i odkształceń powierzchniowych, co ułatwia wykrywanie inicjacji pęknięć oraz analizę ich kinetyki [21–23]. W ostatnich latach wprowadzenie wysokorozdzielczych kamer cyfrowych oraz zaawansowanych algorytmów korelacji obrazu znacząco poprawiło dokładność i powtarzalność pomiarów, umożliwiając badania strefy FPZ z nieosiągalną wcześniej rozdzielczością zarówno w skali mikro-, jak i makrostrukturalnej. Dotychczas jednak porównawcze badania FPZ betonów z włóknami bazaltowymi, węglowymi i polimerowymi są nieliczne i często ograniczone do standardowych testów zginania.

W celu wypełnienia tej luki badawczej, w niniejszej pracy wykorzystano cyfrową korelację obrazu (Digital Image Correlation, DIC) do precyzyjnego pomiaru przemieszczeń i odkształceń powierzchni próbki podczas testu trójpunktowego zginania belek betonowych z karbem. Technika DIC umożliwia nieniszczącą, wysokorozdzielczą rejestrację map odkształceń oraz śledzenie zmian strefy FPZ w czasie rzeczywistym. Wyniki pozwolą nie tylko na ocenę efektywności poszczególnych rodzajów włókien w opóźnianiu propagacji rys, ale również na optymalizację właściwości kompozytów betonowych o wysokiej trwałości i odporności na uszkodzenia.

## 2. Założenia i metody badań

### 2.1. Materiały użyte do badań

Do badań zastosowano cement CEM III/A 42,5 N, wodę wodociągową, piasek naturalny o uziarnieniu do 2 mm, grys wapienny o uziarnieniu 2-8 mm oraz 8-16 mm, superplastyfikator polikarboksyłanowy (PCE) i trzy rodzaje włókien (Tab. 1) tj. bazaltowe, polimerowe i węglowe. Receptury zestawiono w Tabeli 2 i zaprojektowano w taki sposób, aby stosunek wodno-cementowy wynosił 0,49, a objętościowa zawartość włókien w 1 m<sup>3</sup> mieszanki betonowej wynosiła 0,3%. Ilość domieszki chemicznej ustalono tak, aby w każdej serii otrzymać zbliżoną konsystencję.

Tabela 1. Parametry zastosowanych włókien

| Rodzaj włókien                              | Bazaltowe 1250 tex | Polimerowe | Węglowe 3K |
|---------------------------------------------|--------------------|------------|------------|
| Długość włókien [mm]                        | 30                 | 24         | 30         |
| Średnica włókien w wiązce [ $\mu\text{m}$ ] | 15                 | 300        | 7          |
| Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]           | 1500               | 620        | 4400       |
| Moduł sprężystości [GPa]                    | 65                 | 6          | 232        |
| Gęstość [ $\text{kg/m}^3$ ]                 | 2600               | 910        | 1800       |

Tabela 2. Receptury mieszanek betonowych użytych do badań

| Składniki        | Gęstość [ $\text{kg/m}^3$ ] | Mieszanka B [ $\text{kg/m}^3$ ] | Mieszanka P [ $\text{kg/m}^3$ ] | Mieszanka W [ $\text{kg/m}^3$ ] |
|------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Cement           | 3000                        | 320                             | 320                             | 320                             |
| Woda efektywna   | 1000                        | 161                             | 161                             | 161                             |
| Kruszywo 0/2 mm  | 2650                        | 585                             | 585                             | 585                             |
| Kruszywo 2/8 mm  | 2690                        | 688                             | 688                             | 688                             |
| Kruszywo 8/16 mm | 2700                        | 633                             | 633                             | 633                             |

|                    |      |      |      |      |
|--------------------|------|------|------|------|
| Superplastyfikator | 1050 | 3,90 | 3,00 | 3,50 |
| Włókno bazaltowe   | 2600 | 7,80 | -    | -    |
| Włókno polimerowe  | 910  | -    | 2,70 | -    |
| Włókno węglowe     | 1800 | -    | -    | 5,40 |

## 2.2. Metodyka badań

### 2.2.1. Przygotowanie składników

Wszystkie składniki zważono na wadze laboratoryjnej o dokładności 1g. Zaroby w zależności od objętości wykonywano w mieszalniku laboratoryjnym o cyklu mieszania wymuszonym o pojemności wsadu do 100 dm<sup>3</sup>. Na wstępie wymieszano składniki stałe: wysuszone kruszywo grube, piasek oraz spoiwo. Składniki te mieszano około 60 sekund po czym dodawano włókna, a następnie część wody zarobowej. W trakcie mieszania dodawano superplastyfikator z pozostałą częścią wody. Wszystkie składniki mieszano ok. 90 sekund. Badania wykonano w laboratorium w temperaturze  $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Po odpowiedniej homogenizacji składników przeprowadzano badania konsystencji, zaformowano próbki kostkowe i pryzmowe w formach zabezpieczonych środkiem antyadhezyjnym. Po rozformowaniu próbki przechowywano w wodzie w temperaturze  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  aż do momentu osiągnięcia wieku badawczego.

### 2.2.2. Badanie konsystencji mieszanki betonowej

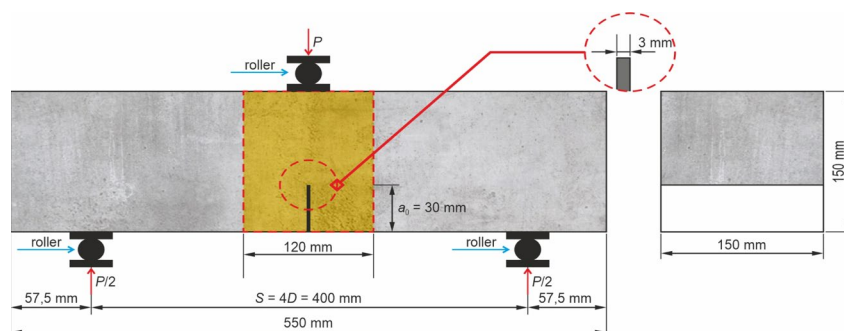
Badanie wykonano według metody opadu stożka zgodnie z normą [PN-EN 206:2014+A2:2021]. Ilość plastyfikatora dobierano w taki sposób aby uzyskać urabialność odpowiednią dla betonu posadzkowego. Dla każdej mieszanki mierzono opad stożka w mm uzyskując wartości dla klasy konsystencji S3 (ok. 100 mm).

### 2.2.3. Badanie wytrzymałości na ściskanie

Badania wytrzymałości na ściskanie betonowych próbek sześciennych o boku 150 mm wykonano przy zastosowaniu maszyny wytrzymałościowej o zakresie do 3000 kN. Ze względu na zastosowanie cementu CEM III/A 42,5 wytrzymałość określano po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania betonu. Każda seria składała się z trzech próbek. Przebieg i warunki badania były zgodne z PN-EN 12390-3 [24].

### 2.2.4. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Badanie wykonano zgodnie z procedurą EN 14651:2007 [25]. Wykorzystano elementy próbne o wymiarach 150×150×550 mm z karbem (rysunek 1). Karb typu „U” miał głębokość 30 mm, szerokość 3 mm, a promień zaokrąglenia wynosił około 1,5 mm (Rys. 1). Karby wykonano na 1 dzień przed badaniem, za pomocą piły diamentowej. Serie badawcze liczyły po 3 próbki.



Rys.1. Geometria próbki do badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (mm)

Próbki obciążano siłą skupioną w środku rozpiętości, monitorując rozwój pęknięć za pomocą techniki cyfrowej korelacji obrazu (DIC) oraz ekstensometru mierzącego rozwarcie wylotu szczeliny pierwotnej CMOD (*crack mouth opening displacement*). Procedura testowa obejmowała obciążenie do 95% obciążenia niszczonego, następnie cztery cykle odciążenia i ponownego obciążenia, a w końcowej fazie – obciążenie do całkowitego zniszczenia próbki. Obciążenie przykładano automatycznie, a kluczowym parametrem sterującym badaniem była wartość CMOD. Równocześnie ze zmianami szerokości wlotu szczeliny pierwotnej rejestrowano przemieszczenie  $\delta$  punktu przyłożenia siły do elementu próbnego.

Resztkową wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu  $f_{R,j}$  określono według wytycznych PN-EN 14651 [25] ze wzoru:

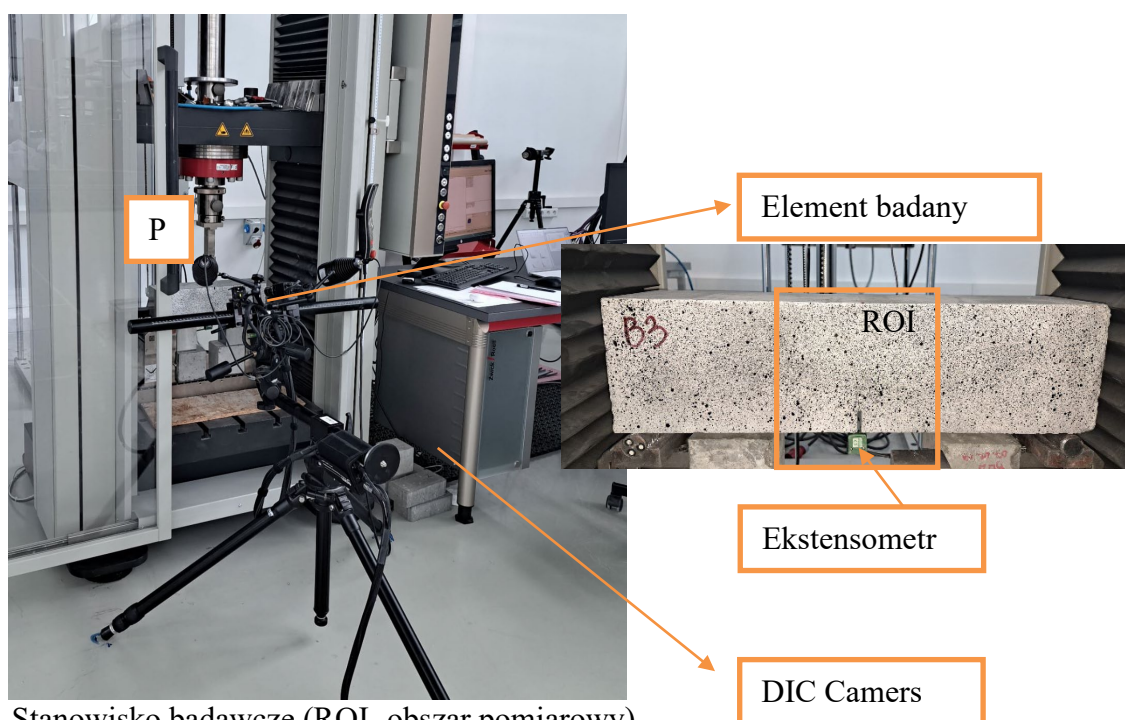
$$f_{R,j} = \frac{3P_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (1)$$

gdzie:

$P_j$ - obciążenie odpowiadające CMOD=CMOD<sub>j</sub> [N], przy czym: j = 1: CMOD<sub>1</sub>= 0,5 mm, j=2: CMOD<sub>2</sub>= 1,5 mm, j = 3: CMOD<sub>3</sub>= 2,5 mm, j = 4: CMOD<sub>4</sub>= 3,5 mm;  $l$ - rozpiętość belki;  $b$ - szerokość belki;  $h_{sp}$ - odległość między górnym końcem nacięcia a górną krawędzią belki.

### 2.2.5. Analiza przy wykorzystaniu cyfrowej korelacji obrazu

Aby monitorować proces pęknięcia i ocenić stopień uszkodzenia, zastosowano technikę cyfrowej korelacji obrazu (DIC). Zestaw pomiarowy składał się z dwóch współpracujących kamer oraz jednostki sterującej. Kamera rejestrowała obrazy obszaru pomiarowego (ROI) z częstotliwością 1 Hz, przy rozdzielczości 5520 × 3680 pikseli i współczynniku skali 5,78  $\mu\text{m}$ /piksel. W tym celu powierzchnia obszaru pomiarowego została pokryta białą farbą jako tło, a następnie losowo nakropiona czarną farbą akrylową. Do lepszego uwidocznienia wzoru speckle zastosowano dodatkowe oświetlenie. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Stanowisko badawcze (ROI- obszar pomiarowy)



### 3. Omówienie wyników badań

#### 3.1. Konsystencja mieszanki betonowej

Zauważono, że dodatek włókien niezależnie od rodzaju wpływa na pogorszenie urabialności mieszanki betonowej. Analizując wyniki badania konsystencji zanotowano istotne różnice w zapotrzebowaniu na domieszkę superplastyfikatora polikarboksyłanowego w celu zachowaniu tej samej klasy konsystencji mieszanek betonowych. Największej ilości superplastyfikatora wymagała mieszanka z włóknami bazaltowymi, najmniejszej mieszanka z włóknami polimerowymi.

#### 3.2. Wytrzymałość na ściskanie

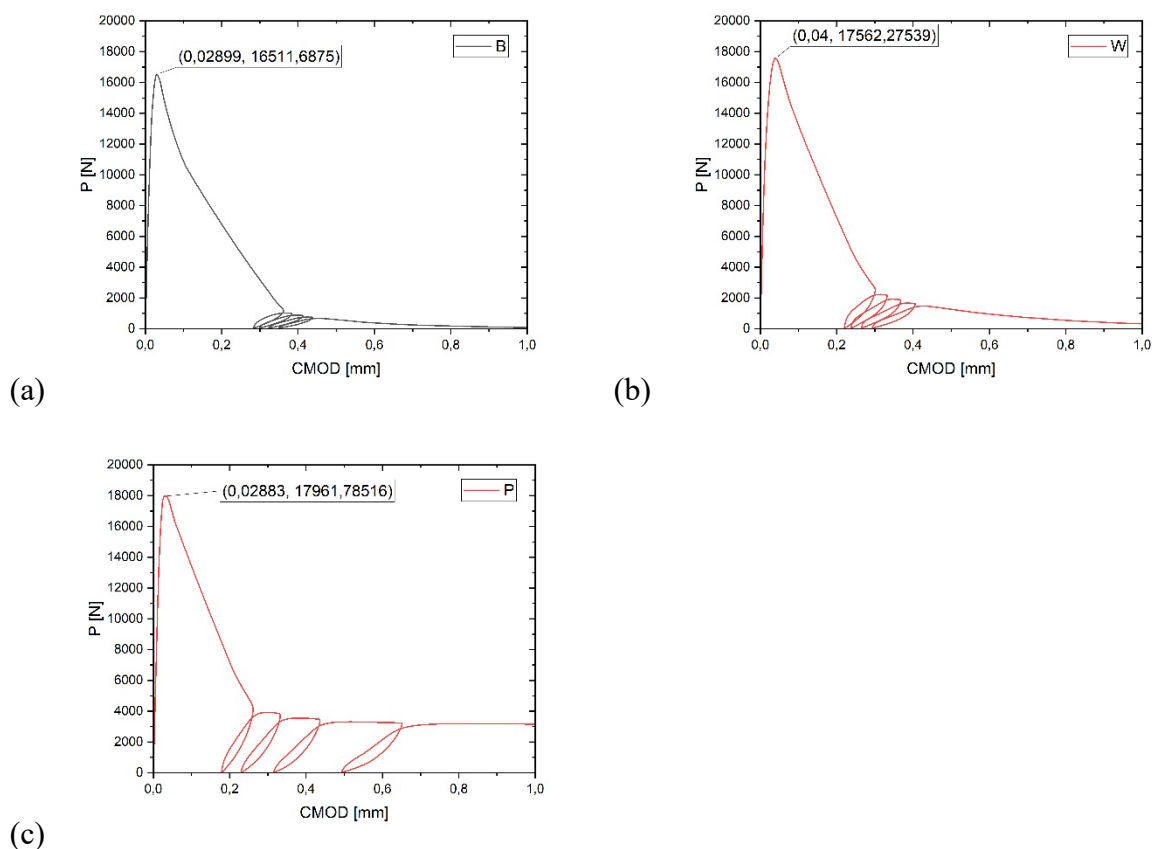
Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie przedstawiono w Tabeli 3. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach wszystkich betonów z dodatkiem włókien była zbliżona i mieściła się w granicach od 31,9 do 34 MPa, co klasyfikuje wszystkie betony w klasie C25/30. Najwyższą wytrzymałością na ściskanie wykazał się beton z dodatkiem włókien polimerowych a najniższą beton z włóknami bazaltowymi. Zależności te można zauważyć niezależnie od czasu dojrzewania betonu.

Tabela 3. Wartości wytrzymałości na ściskanie betonu zawierającego różne rodzaje włókien

| Seria betonu (rodzaj włókien) | Wytrzymałość na ściskanie betonu [MPa] |        |        |
|-------------------------------|----------------------------------------|--------|--------|
|                               | 28dni                                  | 56 dni | 90 dni |
| <b>Polimerowe</b>             | 34,0                                   | 47,1   | 80,8   |
| Rozrzut wyników               | 1,9                                    | 4,9    | 1,5    |
| Odchylenie standardowe        | 3,7                                    | 9,7    | 2,8    |
| <b>Bazaltowe</b>              | 31,9                                   | 38,9   | 67,6   |
| Rozrzut wyników               | 1,3                                    | 2,3    | 2,0    |
| Odchylenie standardowe        | 2,5                                    | 4,4    | 3,9    |
| <b>Węglowe</b>                | 32,7                                   | 44,8   | 72,7   |
| Rozrzut wyników               | 2,8                                    | 1,5    | 2,5    |
| Odchylenie standardowe        | 5,3                                    | 2,9    | 5      |

#### 3.3. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

Rysunek 3 przedstawia wykresy zależności obciążenia  $P$  w zależności od szerokości rozwarcia szczeliny pierwotnej CMOD dla próbek betonów poddanych zginaniu w układzie trójpunktowym. Na każdym z wykresów zaznaczono wartość maksymalnego obciążenia oraz odpowiadające im wartości rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej CMOD. Tabela 4 przedstawia szczegółowe wyniki badań wszystkich analizowanych betonów, w tym wartości maksymalnego obciążenia  $P_{max}$  oraz wartości siły  $P$  przy różnych szerokościach rozwarcia szczeliny pierwotnej CMOD (0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm, 3,5 mm), siłę odpowiadającą granicy proporcjonalności  $P_{Lk}$ , a także resztkowe wytrzymałości na zginanie  $f_{R1}$ ,  $f_{R2}$ ,  $f_{R3}$  i  $f_{R4}$  a także wartość granicy proporcjonalności  $f_{Lk}$ . Dane zestawiono osobno dla każdej serii.



Rys. 3. Wykresy zależności  $P$ -CMOD: (a) beton z włóknami bazaltowymi (B), (b) beton z włóknami węglowymi (W), (c) beton z włóknami polimerowymi (P). Dla maksymalnych wartości siły  $P$  podano odpowiednie wartości CMOD.

Tabela 4. Wartości sił  $P$  i wytrzymałości resztkowe na zginanie  $f_{Rj}$  badanych betonów

| Seria | $P_{max}$ | $P_{CMOD0,5}$ | $P_{CMOD1,5}$ | $P_{CMOD2,5}$ | $P_{CMOD3,5}$ | $P_{Lk}$ | $f_{R1}$ | $f_{R2}$ | $f_{R3}$ | $f_{R4}$ | $f_{Lk}$ |
|-------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|       | N         | N             | N             | N             | N             | N        | MPa      | MPa      | MPa      | MPa      | MPa      |
| B     | 16511,68  | 599,00        | -             | -             | -             | 13641    | 0,19     | -        | -        | -        | 4,37     |
| W     | 17562,27  | 1320,00       | -             | -             | -             | 9856     | 0,42     | -        | -        | -        | 3,15     |
| P     | 17961,78  | 2396,99       | 2167,00       | 1569,71       | 1513,54       | 15371    | 0,77     | 0,69     | 0,50     | 0,48     | 4,92     |

Rysunek 3, przedstawiający zależności obciążenie  $P$ -CMOD, prezentuje istotne różnice w zachowaniu badanych betonów w zależności od zastosowanego rodzaju włókien. W przypadku betonu z włóknami bazaltowymi i węglowymi krzywa rośnie niemal liniowo do osiągnięcia maksymalnego obciążenia, po czym następuje gwałtowny spadek siły, co świadczy o kruchej naturze materiału i ograniczonej zdolności absorpcji energii w fazie pokrytycznej. Beton z włóknami polimerowymi charakteryzuje się największymi wartościami CMOD dla danego obciążenia, co wskazuje na największą deformowalność i stabilne mostkowanie pęknięć, umożliwiające dłuższy i bardziej stabilny okres przenoszenia naprężeń w fazie pokrytycznej. Po osiągnięciu maksymalnego obciążenia, w przypadku betonu z włóknami polimerowymi część opadająca wykresu  $P$ -CMOD staje się mniej stroma a rozwarcie szczeliny zwiększa się. Wynika to z efektu mostkowania pęknięć przez włókna, co prowadzi do większej globalnej deformacji podczas zginania oraz znacznego wzrostu resztkowej wytrzymałości

na zginanie w fazie pokrywczącej [32]. Porównanie tych wykresów wskazuje, że wybór rodzaju włókien ma kluczowy wpływ na zachowanie próbki betonu w warunkach zginania.

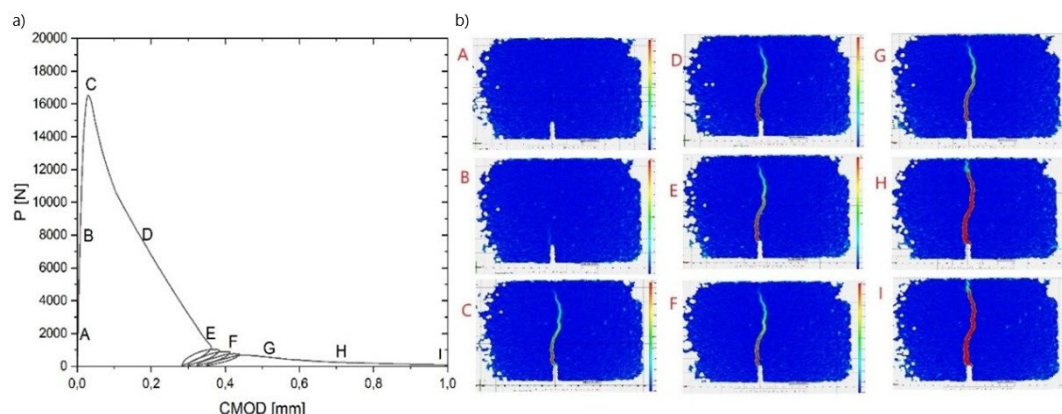
Analiza wykresów  $P$ -CMOD (Rys. 3) oraz danych przedstawionych w Tabeli 4 wskazuje na istotne zmiany parametrów opisujących proces pęknięcia betonu w zależności od rodzaju włókien. W przypadku betonu z włóknami bazaltowymi (B) granica proporcjonalności ( $f_{Lk}$ ) wyniosła średnio 4,37 MPa, a resztkowa wytrzymałość na zginanie ( $f_{Rt}$ ) jest stosunkowo niska (0,19 MPa), co sugeruje, że przy małej zawartości włókien bazaltowych uzyskuje się umiarkowane zwiększenie zdolności przenoszenia naprężeń, jednak ograniczona długość i sztywność tych włókien wpływa negatywnie na efektywność przenoszenia siły w fazie pokrywczącej. W przypadku betonu z włóknami węglowymi (W) obserwuje się nieco większe wartości  $P_{max}$  (17562,27 N) oraz znacząco większe wartości siły  $P_{CMOD_{0,5}}$  (1320,00 N), co wskazuje na bardziej sprężyste zachowanie materiału przed osiągnięciem maksymalnego obciążenia; resztkowa wytrzymałość na zginanie ( $f_{Rt}$ ) wyniosła 0,42 MPa, a  $f_{Lk}$  3,15 MPa. Wyższe wartości  $P_{CMOD_{0,5}}$  sugerują, że beton z włóknami węglowymi skuteczniej pochłania energię w porównaniu do betonu z włóknami bazaltowymi, umożliwiając większe odkształcenia w fazie przed pęknięciem próbki. Natomiast beton z włóknami polimerowymi (P) charakteryzuje się znacznie większą wartością siły 2396,99 N przy szerokości rozwarcia szczeliny pierwotnej równej CMOD = 0,5 mm, a kolejne etapy rozwarcia szczeliny pierwotnej (CMOD = 1,5 mm, 2,5 mm, 3,5 mm) wskazują na istotną deformację w fazie pokrywczącej. Pomimo porównywalnych wartości maksymalnych  $P_{max}$  (17961,78 N), beton z włóknami polimerowymi osiągnął większą resztkową wytrzymałość na zginanie ( $f_{Rt}$ : 0,77 MPa) oraz większą wartość granicy proporcjonalności  $f_{Lk}$  (4,92 MPa). Dane te sugerują, że włókna polimerowe skuteczniej zwiększają zdolność betonu do pochłaniania energii pęknięcia oraz umożliwiają lepsze mostkowanie pęknięć.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy stosunku resztkowych wytrzymałości na zginanie  $f_{R3}/f_{R1}$  wynoszącego w przypadku betonów z włóknami polimerowymi od 0,64, można zaklasyfikować ten materiał do klasy ciągliwości 2 (Class 2) zgodnie z kryteriami *fib* Model Code 2010 [26]. Taka klasyfikacja wskazuje, że beton z włóknami polimerowymi charakteryzuje się zdolnością do przenoszenia obciążeń w fazie pokrywczącej. Krzywa siła-CMOD po osiągnięciu maksimum łagodnie opada (*softening*) i utrzymuje istotny poziom resztkowych naprężeń na dłuższym odcinku rozwarcia szczeliny, ale bez pełnego efektu *strain-hardening*. Wiąże się to z wyraźnym efektem quasi-umocnienia odkształceniowego oraz istotnym wzrostem energii absorbowanej podczas procesu pęknięcia w porównaniu do betonu bez włókien. Beton z włóknami bazaltowymi oraz beton z włóknami węglowymi nie mogą zostać sklasyfikowane z uwagi na brak wartości resztkowej wytrzymałości na zginanie  $f_{R3}$ .

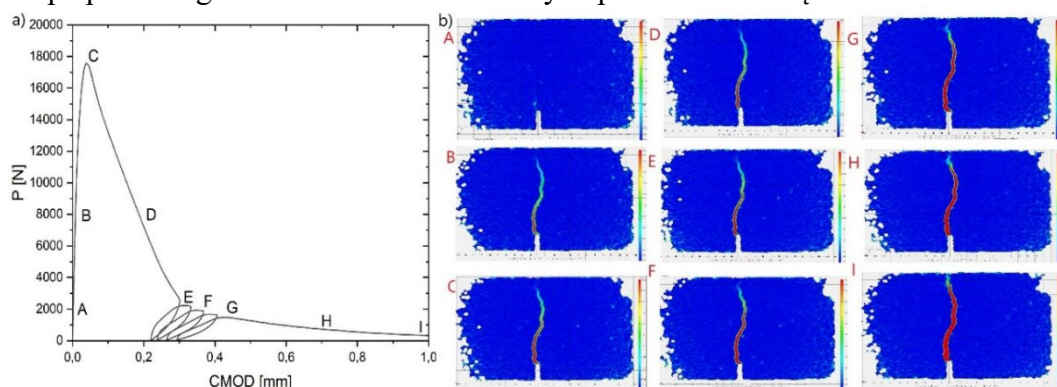
### 3.4. Charakterystyka procesu zniszczenia

Rysunki 4-6 przedstawiają rozwój strefy pęknięcia w betonach z włóknami bazaltowymi, węglowymi oraz polimerowymi. Zaprezentowano zależności  $P$ -CMOD (a) oraz wyniki analizy DIC (b), gdzie pozioma składowa odkształcenia  $\epsilon$  pozwala najlepiej zidentyfikować cechy procesu pęknięcia. Wykres  $P$ -CMOD oraz mapy składowej odkształcenia  $\epsilon$  przedstawiono dla różnych poziomów obciążenia, odpowiadających punktom A (10 %  $P_{max}$ ), B (50 %  $P_{max}$ ), C ( $P_{max}$ ), D (50 %  $P_{max}$ ), E (10%  $P_{max}$ ), F (5%  $P_{max}$ ), G (2%  $P_{max}$ ), H (1%  $P_{max}$ ) oraz I (zniszczenie).

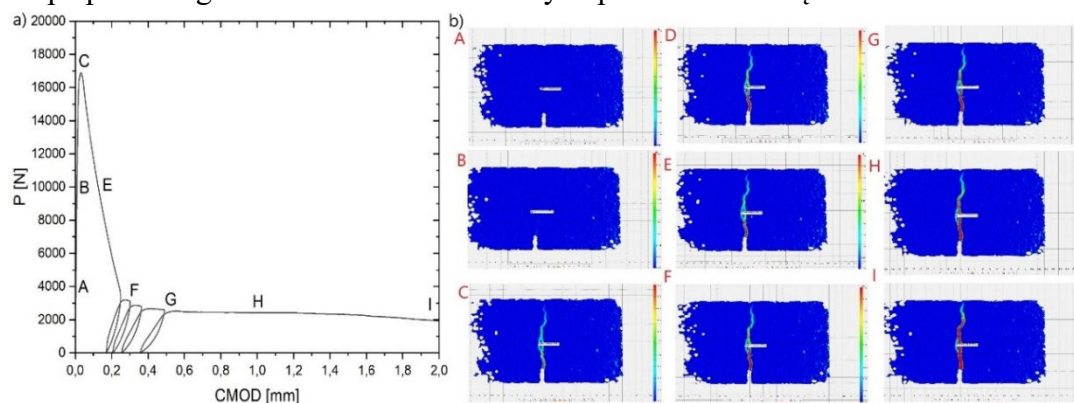




Rys. 4. Proces zarysowania betonu z włóknami bazaltowymi: (a) wykres  $P$ –CMOD oraz (b) mapa poziomego odkształcenia  $\varepsilon$  dla różnych poziomów obciążenia



Rys. 5. Proces zarysowania betonu z włóknami węglowymi: (a) wykres  $P$ –CMOD oraz (b) mapa poziomego odkształcenia  $\varepsilon$  dla różnych poziomów obciążenia



Rys. 6. Proces zarysowania betonu z włóknami polimerowymi: (a) wykres  $P$ –CMOD oraz (b) mapa poziomego odkształcenia  $\varepsilon$  dla różnych poziomów obciążenia

Przebieg procesu zniszczenia belki z betonu z włóknami bazaltowymi przedstawia Rysunek 4. W początkowej fazie (punkt A) w próbce nie obserwowano widocznych odkształceń ani zarysowań, a rozkład odkształceń głównych  $\varepsilon$  był równomierny. Wraz ze wzrostem obciążenia do około połowy wartości siły maksymalnej (punkt B) pojawiły się lokalne strefy zwiększonego rozciągania w pobliżu nacięcia, co sygnalizowało inicjację mikropęknięć. W punkcie C, odpowiadającym maksymalnemu obciążeniu, nastąpiło utworzenie głównej rysy, wyraźnie widocznej jako intensywnie czerwona strefa na mapie odkształceń. Dalsze zwiększanie rozwarcia szczeliny (punkty D–F) wiązało się z rozwojem i

propagacją rysy ku górnej krawędzi elementu. W kolejnych etapach (punkty G–I) obserwowano utrwalenie się i poszerzenie szczeliny na całej wysokości próbki, przy jednoczesnym znacznym obniżeniu obciążenia. Proces ten odzwierciedla typowe zachowanie betonu w warunkach zginania z kontrolowanym otwarciem rysy, zgodnie z metodologią badania opisaną w normie EN 14651 [25], pozwalając na ocenę zarówno zdolności do przenoszenia obciążeń po zarysowaniu, jak i lokalizacji odkształceń. Szczelina pierwotna osiągnęła rozwarcie maksymalne równe 1 mm (punkt I).

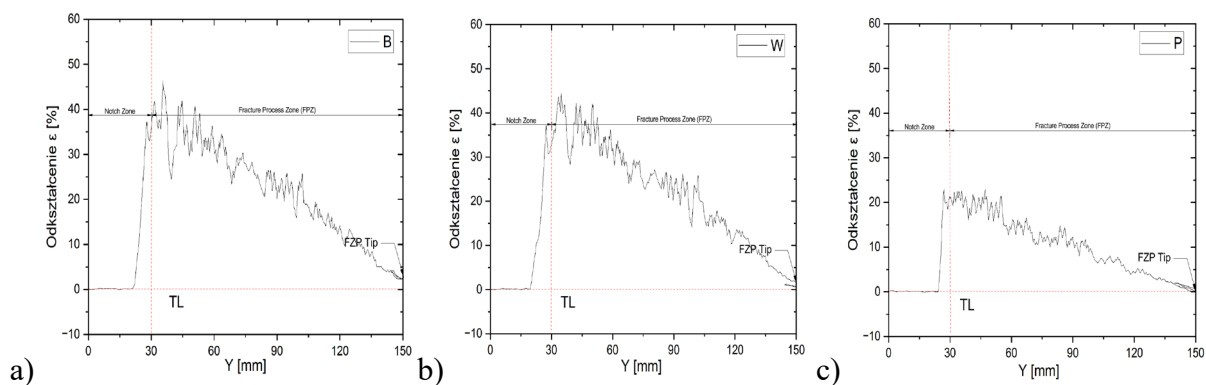
Przebieg procesu zniszczenia belki z betonu z włóknami węglowymi przedstawiono na Rysunku 5. W stanie początkowym (A) materiał pozostawał nienaruszony, a rozkład odkształceń był równomierny. W miarę wzrostu obciążenia do poziomu maksymalnego (punkt C) zaobserwowano lokalne strefy rozciągania w sąsiedztwie nacięcia, wskazujące na inicjację mikropęknięć (B), aż do utworzenia głównej rysy obejmującej całą wysokość elementu. Kolejne etapy (D–G) ukazywały rozwój i stopniową propagację szczeliny, czemu towarzyszyły charakterystyczne lokalne fluktuacje obciążenia widoczne na wykresie, świadczące o zamykaniu i ponownym otwieraniu mikropęknięć. W końcowej fazie (H–I) rozwarcie zwiększało się przy stosunkowo niskim obciążeniu, a maksymalne zarejestrowane rozwarcie szczeliny wyniosło 0,78 mm.

Rysunek 6 przedstawia wyniki badań belki z betonu z włóknami polimerowymi. W stanie początkowym (A–B) próbka pozostawała nienaruszona, a rozkład odkształceń był równomierny. Wraz z osiągnięciem obciążenia maksymalnego doszło do utworzenia głównej rysy (punkt C), po czym nastąpił znaczny spadek obciążenia. Na odcinku D–G widoczne było dalsze rozwijanie i poszerzanie szczeliny, z jednoczesnym występowaniem charakterystycznych wahań obciążenia na wykresie, które świadczyły o cyklicznym otwieraniu i zamykaniu mikropęknięć. W końcowej fazie (H–I) rysa osiągnęła stabilne rozwarcie, przy stosunkowo wysokim poziomie obciążenia, a maksymalne zarejestrowane rozwarcie szczeliny wyniosło 3,55 mm. Takie zachowanie odzwierciedla typową pracę próbki z betonu zbrojonego włóknami, który po zarysowaniu zachowuje zdolność do przenoszenia obciążeń przy znacznych deformacjach.

Można wyróżnić cztery etapy procesu obciążania i odciążania próbki aż do zniszczenia. Pierwszy z nich obejmuje propagację mikropęknięć. Na tym etapie (punkty A, B) odkształcenia  $\varepsilon$  są równomiernie rozłożone na całym obszarze pomiarowym (ROI), bez wyraźnych koncentracji naprężeń. Mikropęknięcia mogą powstawać w obrębie mikrowklęsłości i stref przejściowych. Niski poziom obciążenia oraz hamujący wpływ kruszywa uniemożliwiają ich łączenie się. W miarę wzrostu obciążenia próbka wkracza w fazę tworzenia pęknięcia, o czym świadczy niewielka strefa koncentracji odkształceń  $\varepsilon$  tuż nad wierzchołkiem karbu, zauważalna przy obciążeniu odpowiadającym punktowi C ( $P_{max}$ ). Można to interpretować jako początek makropęknięcia – poziom naprężeń jest już wystarczający do koalescencji mikropęknięć i inicjacji pęknięcia makroskopowego w otoczeniu karbu. Fazę gwałtownego rozwoju pęknięcia widać po przekroczeniu  $P_{max}$ , co ilustruje punkt E. Uszkodzenia kumulują się, a makropęknięcia rozszerzają się, prowadząc do zniszczenia próbki. Włókna, łączą brzoży szczeliny i przenoszą naprężenia przez pęknięcie, co obniża koncentrację naprężeń w wierzchołku rysy i spowalnia jej propagację. Efekt mostkowania włókien pozwala zachować relatywnie wysoką siłę przy wzroście CMOD, co prowadzi do zwiększenia odporności na pękanie.

### 3.5. Rozwój FPZ

W ramach prowadzonych badań, analizowano długość strefy procesowej FPZ (fracture proces zone) dla betonów zbrojonych włóknami bazaltowymi, węglowymi i polimerowymi, aż do momentu osiągnięcia obciążenia maksymalnego. Zgodnie z danymi literaturowymi [13,27,28], za punkt początkowy przyjęto wierzchołek karbu, natomiast koniec FPZ wyznaczano na podstawie danych uzyskanych techniką cyfrowej korelacji obrazu (DIC). Metoda określania FPZ, oparta jest na analizie skoków poziomego przemieszczenia wzdłuż szeregu linii referencyjnych rozmieszczonych wzdłuż wysokości próbki i umożliwia precyzyjne wskazanie lokalizacji gwałtownych zmian odpowiadających końcowi strefy pęknięcia [29,30]. Wyniki pomiarów przedstawiono na Rys. 7.



Rys.7. Wykres poziomej składowej odkształcenia głównego  $\varepsilon$  wzdłuż osi Y dla próbek z betonu a) z włóknami bazaltowymi b) z włóknami węglowymi oraz c) z włóknami polimerowymi, przy maksymalnym obciążeniu

Analiza wyników pomiarów wykazała, że długość FPZ w przypadku wszystkich badanych próbek była zbliżona i sięgała niemal całej wysokości elementu. Natomiast kluczowe różnice dotyczyły intensywności odkształceń głównych  $\varepsilon$  w obrębie FPZ, co wskazuje na odmienne mechanizmy redystrybucji naprężeń i propagacji uszkodzeń w zależności od rodzaju zbrojenia rozproszonego. Wartości maksymalnych odkształceń głównych  $\varepsilon$  w rejonie rozwiniętej rysy, uzyskane z analizy DIC odpowiada lokalnej koncentracji przemieszczeń w szczelinie i obrazuje intensywność procesu pęknięcia. Należy podkreślić, że są to odkształcenia rejestrowane w siatce obliczeniowej DIC i opisują rozwarcie szczeliny w stosunku do odległości między punktami pomiarowymi (virtual gauge length).

W przypadku betonu z włóknami bazaltowymi (Rys. 7a) zaobserwowano największe wartości odkształceń maksymalnych  $\varepsilon$ , co świadczy o silnej koncentracji uszkodzeń i szybkim postępie rozwoju szczeliny. Podobne zachowanie odnotowano dla betonu z włóknami węglowymi (Rys. 7b), przy czym rozkład deformacji był nieco bardziej rozproszony. Natomiast beton z włóknami polimerowymi (Rys. 7c) charakteryzował się wyraźnie mniejszymi odkształceniami maksymalnymi, co wskazuje na większą zdolność tych włókien do rozpraszania energii i ograniczania intensywności lokalnych deformacji.

Podobne wnioski sformułowali Zhang i inni. [31], którzy wykazali, że obecność włókien syntetycznych (PP i PVA) skutecznie wydłuża strefę FPZ i ogranicza intensywność lokalnych odkształceń w betonie pękającym pod obciążeniem zginającym. Również według Reis i inni [32], kompozyty z włóknami węglowymi i szklanymi wykazują silne oddziaływanie na lokalizację szczeliny, przy jednocześnie bardziej skoncentrowanym rozkładzie odkształceń w porównaniu do kompozytów z włóknami polimerowymi.

Uzyskane różnice w intensywności odkształceń w obszarze FPZ należy interpretować w kontekście mikromechanizmów takich jak przyczepność włókien do matrycy cementowej, mechanizm wyciągania włókien (pull-out) czy potencjalne pękanie włókien.

#### 4. Wnioski

Na podstawie analizy procesu zniszczenia betonów z włóknami bazaltowymi, węglowymi oraz polimerowymi w warunkach trójpunktowego zginania, przy zastosowaniu techniki cyfrowej korelacji obrazu (DIC), sformułowano następujące wnioski:

- Beton z włóknami bazaltowymi jak również beton z włóknami węglowymi wykazują właściwości materiału kruchego, z gwałtownym spadkiem siły po osiągnięciu jej maksymalnej wartości, podczas gdy beton z włóknami polimerowymi charakteryzuje się występowaniem efektu quasi-plastycznego odkształcenia i łagodniejszym przebiegiem opadającej części wykresu  $P$ -CMOD, co wskazuje na większą zdolność do pochłaniania energii i kontrolowaną propagację pęknięć.
- Największe wartości CMOD dla danego poziomu obciążenia odnotowano w przypadku próbek z betonu z włóknami polimerowymi, które osiągały rozwarcie szczeliny rzędu 3,5 mm, w porównaniu do ok. 1,0 mm w przypadku betonów z włóknami bazaltowymi i ok. 0,8 mm w przypadku betonów z włóknami węglowymi. Dzięki temu, beton z włóknami polimerowymi utrzymuje zdolność przenoszenia naprężeń przy znacznie większym rozwarcie szczeliny pierwotnej, co skutkuje wyraźnym wzrostem resztkowej wytrzymałości na zginanie — osiągając wartość  $f_{RI}$  w przedziale 0,8–1,0 MPa, podczas gdy beton z włóknami bazaltowymi osiągnął jedynie wartość  $\sim 0,2$  MPa, a beton z włóknami węglowymi  $\sim 0,4$  MPa. Przekłada się to na łagodniejszy przebieg zależności  $P$ -CMOD w fazie pokrytycznej i większą zdolnością do pochłaniania energii pękania.
- Proces pękania próbek betonów zbrojonych różnymi rodzajami włókien przebiegał w czterech etapach: od inicjacji mikropęknięć (przy ok. 90 %  $P_{max}$ ), poprzez formowanie i gwałtowny rozwój makropęknięcia, aż po niestabilną fazę pokrytyczną, w której główna rysa szybko rozszerzała się.
- Analiza FPZ wykazała, że jej długość była porównywalna we wszystkich badanych próbkach i obejmowała niemal całą wysokość elementu. Kluczowe różnice dotyczyły jednak intensywności odkształceń głównych  $\varepsilon$  w tej strefie, co wskazuje na odmienne mechanizmy redystrybucji naprężeń i rozwoju uszkodzeń w zależności od rodzaju zastosowanych włókien. Najwyższe odkształcenia odnotowano w betonie z włóknami bazaltowymi, nieco niższe w betonie z włóknami węglowymi, natomiast zdecydowanie mniejsze w przypadku betonu z włóknami polimerowymi, co świadczy o skuteczniejszym rozpraszaniu energii i ograniczaniu lokalnych koncentracji odkształceń przez włókna polimerowe.

Badania te zostały dofinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (numer projektu LIDER XIV Nr LIDER14/0206/2023).



## Literatura

- [1] H. Aoude, M. Belghiti, W.D. Cook, D. Mitchell, Response of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams with and without Stirrups, *SJ* 109 (2012) 359–368.  
<https://doi.org/10.14359/51683749>.
- [2] A.M. Jabbar, M.J. Hamood, D.H. Mohammed, The effect of using basalt fibers compared to steel fibers on the shear behavior of ultra-high performance concrete T-beam, *Case Studies in Construction Materials* 15 (2021) e00702.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00702>.
- [3] R.N. Swamy, R. Jones, A.T.P. Chiam, Influence of steel fibres on the shear resistance of lightweight concrete I-beams, *ACI Structural Journal* (1993) 103–114.
- [4] T.M. Borhan, Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre | Request PDF, *Materials and Design* (2012) 265–271.
- [5] D.P. Dias, C. Thaumaturgo, Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers, *Cem Concr Compos* (2005) 49–54.
- [6] M. Kosior-Kazberuk, J. Krassowska, Post-cracking behaviour of basalt fibre reinforced concrete, in: *Ponta Delgada (PT)*, 2015: pp. 673–682.  
[http://katalog.pb.edu.pl/F?func=full-set-set&set\\_number=006387&set\\_entry=000012&format=999](http://katalog.pb.edu.pl/F?func=full-set-set&set_number=006387&set_entry=000012&format=999) (accessed May 6, 2019).
- [7] F. Sayed Ahmad, G. Foret, R. Le Roy, Bond between carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) bars and ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): Experimental study, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 479–485.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.006>.
- [8] A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry, *Journal of Environmental Sciences-China* 136 (2023) 682–697.  
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.01.021>.
- [9] M.A. Glinicki, Badania właściwości fibrobetonu z makrowłóknami syntetycznymi, przeznaczonego na podłogi przemysłowe, *Cement Wapno Beton R.* 13/75, nr 4 (2008) 184–195.
- [10] J.M. Karwacki, *Betony zbrojone włóknami stalowymi i włóknami syntetycznymi*, Inżynier Budownictwa (1995) 80–83.
- [11] J. Qureshi, A Review of Fibre Reinforced Polymer Structures, *Fibers* 10 (2022) 27.  
<https://doi.org/10.3390/fib10030027>.
- [12] Y.S. Jenq, S.P. Shah, A Fracture toughness criterion for concrete, *Engineering Fracture Mechanics* 21 (1985) 1055–1069. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90009-8).
- [13] A. Hillerborg, M. Modéer, P.-E. Petersson, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research* 6 (1976) 773–781. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(76\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(76)90007-7).
- [14] S. Li, X. Fan, X. Chen, S. Liu, Y. Guo, Development of fracture process zone in full-graded dam concrete under three-point bending by DIC and acoustic emission, *Engineering Fracture Mechanics* 230 (2020) 106972.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.106972>.
- [15] A three-frame digital image correlation (DIC) method for the measurement of small displacements and strains, *Measurement Science and Technology* 23 (2012) 105406.  
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/10/105406>.
- [16] The Integrated Digital Image Correlation Technique Applied to Fracture Mechanics: An Improvement on Crack Detection and Localization, *SciSpace - Paper* (2023) 81–85.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-031-17467-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17467-4_11).



- [17] Deep DIC: Deep Learning-Based Digital Image Correlation for End-to-End Displacement and Strain Measurement, arXiv: Image and Video Processing (2021). <https://scispace.com/papers/deep-dic-deep-learning-based-digital-image-correlation-for-3dczr8qve5> (accessed May 6, 2025).
- [18] A strain mode spectral digital image correlation method for displacement field analysis, *Acta Mechanica Sinica* 39 (2023) 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10409-023-22430-x>.
- [19] M.A. Sutton, J.J. Orteu, H. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*, Springer Science & Business Media, 2009.
- [20] M.F. Funari, S. Verre, The Effectiveness of the DIC as a Measurement System in SRG Shear Strengthened Reinforced Concrete Beams, *Crystals* 11 (2021) 265. <https://doi.org/10.3390/cryst11030265>.
- [21] Z.L. Xie, H.F. Zhou, L.J. Lu, Z.A. Chen, An investigation into fracture behavior of geopolymer concrete with digital image correlation technique, *Construction and Building Materials* 155 (2017) 371–380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.041>.
- [22] M. Tekieli, S. De Santis, G. de Felice, A. Kwiecień, F. Roscini, Application of Digital Image Correlation to composite reinforcements testing, *Composite Structures* 160 (2017) 670–688. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.096>.
- [23] N. Gehri, J. Mata-Falcón, W. Kaufmann, Automated crack detection and measurement based on digital image correlation, *Construction and Building Materials* 256 (2020) 119383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119383>.
- [24] EN 12390-3:2009, *Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens*, 2009.
- [25] PN-EN 14651+A1:2007 *Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym -- Pomiary wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP)*, (n.d.).
- [26] fib Model Code, *Fib model code for concrete structures* 2010, 2013.
- [27] Y. Dai, D. Gruber, H. Harmuth, Observation and quantification of the fracture process zone for two magnesia refractories with different brittleness, *Journal of the European Ceramic Society* 37 (2017) 2521–2529. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.02.005>.
- [28] J. Wu, J. Gao, Z. Feng, S. Chen, T. Nie, Investigation of fracture process zone properties of mode I fracture in heat-treated granite through digital image correlation, *Engineering Fracture Mechanics* 235 (2020) 107192. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107192>.
- [29] S. Bhowmik, S. Ray, An experimental approach for characterization of fracture process zone in concrete, *Engineering Fracture Mechanics* 211 (2019) 401–419. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.02.026>.
- [30] W. Dong, X. Zhou, Z. Wu, On fracture process zone and crack extension resistance of concrete based on initial fracture toughness, *Construction and Building Materials* 49 (2013) 352–363. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.041>.
- [31] P. Zhang, Y. Yang, J. Wang, M. Jiao, Y. Ling, Fracture Models and Effect of Fibers on Fracture Properties of Cementitious Composites—A Review, *Materials (Basel)* 13 (2020) 5495. <https://doi.org/10.3390/ma13235495>.
- [32] J.M.L. Reis, A.J.M. Ferreira, Assessment of fracture properties of epoxy polymer concrete reinforced with short carbon and glass fibers, *Construction and Building Materials* 18 (2004) 523–528. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.010>.