

Badania doświadczalne tarcz żelbetowych z betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien

Piotr Smarzewski, Justyna Poręba, Agata Rentflejsz

*Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury,
Politechnika Lubelska, e-mail: p.smarzewski@pollub.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań tarcz żelbetowych z betonu i fibrobetonu wysokowartościowego poddanych działaniu centralnie przyłożonej siły skupionej. Badania przeprowadzono dla trzech elementów tarczowych ze zbrojeniem głównym w postaci prętów dolnych, górnych, strzemion pionowych i poziomych w strefach przypodporowych, z alternatywnym zbrojeniem siatkami lub włóknami stalowymi i polipropylenowymi między punktami podparcia elementów. Analizy wyników dokonano na podstawie obrazów odkształceń głównych, zależności siły w funkcji czasu oraz zależności przemieszczeń pionowych w przekrojach podłużnych elementów.

Słowa kluczowe: elementy żelbetowe, fibrobeton wysokowartościowy, tarcze.

1. Wprowadzenie

Fibrobeton jest quasi plastycznym materiałem kompozytowym składającym się z kruchej matrycy betonowej i równomiernie rozłożonych włókien stalowych, z tworzyw sztucznych, węglowych, szklanych lub pochodzenia organicznego pełniących rolę zbrojenia rozproszonego. Obecność włókien w strukturze betonu, w zależności od ich rodzaju, może wpływać na redukcję zarysowań i polepszenie właściwości wytrzymałościowych kompozytu. Ze względu na złożoność jego struktury i cech, odmiennych od konwencjonalnego betonu, stosowanie fibrobetonu w znacznym stopniu oparte jest na wynikach badań eksperymentalnych i intuicji inżynierskiej. Zasady projektowania konstrukcji fibrobetonowych znormalizowano dotychczas w Norwegii, Stanach Zjednoczonych, Japonii, Kanadzie, Francji, Szwecji, czy też Australii. W pracach [1-7] przedstawiono charakterystyki tych kompozytów i wskazano kierunki ich przyszłego rozwoju. Ostatnio trochę uwagi poświęcono hybrydyzacji włókien w betonie, czyli optymalnemu połączeniu kilku ich rodzajów o odmiennych właściwościach w celu stworzenia nowoczesnych kompozytów o bardzo dużej odporności na pękanie w szerokim zakresie rozwarcia rys [8]. W literaturze napotkano na nieliczne wyniki badania belek, płyt i tarcz żelbetowych wzmocnianych włóknami stalowymi lub polipropylenowymi [9-13]. Badania doświadczalne tarcz żelbetowych wykonanych z betonów wysokowartościowych z dodatkiem włókien stalowych i polipropylenowych nie były przedmiotem żadnych publikacji.

Badania przedstawione w niniejszym artykule wykonano w celu określenia wpływu dodatku włókien stalowych i polipropylenowych do betonu wysokowartościowego na pękanie tarcz żelbetowych poddanych działaniu siły skupionej przyło-

żonej w środku rozpiętości. Badania przeprowadzono w prasie hydraulicznej przy wykorzystaniu systemu do trójwymiarowych pomiarów przemieszczeń i odkształceń.

2. Badania doświadczalne

2.1. Przygotowanie elementów tarczowych

Przedmiotem badań są trzy tarcze o wymiarach 1000 x 500 x 100 mm. Tarcze wykonano z mieszanki betonowej z grupy betonów bardzo wysokowartościowych z dodatkiem włókien stalowych i polipropylenowych. Wskaźnik woda/składniki wiążące wynosi 0,19. Każdy z elementów charakteryzuje zmienna ilość włókien dodanych do mieszanki i układ zbrojenia prętami stalowymi. Składy ilościowe mieszanek betonowych przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Składy ilościowe mieszanek betonowych.
Table 1. Quantitative composition of concrete mixes.

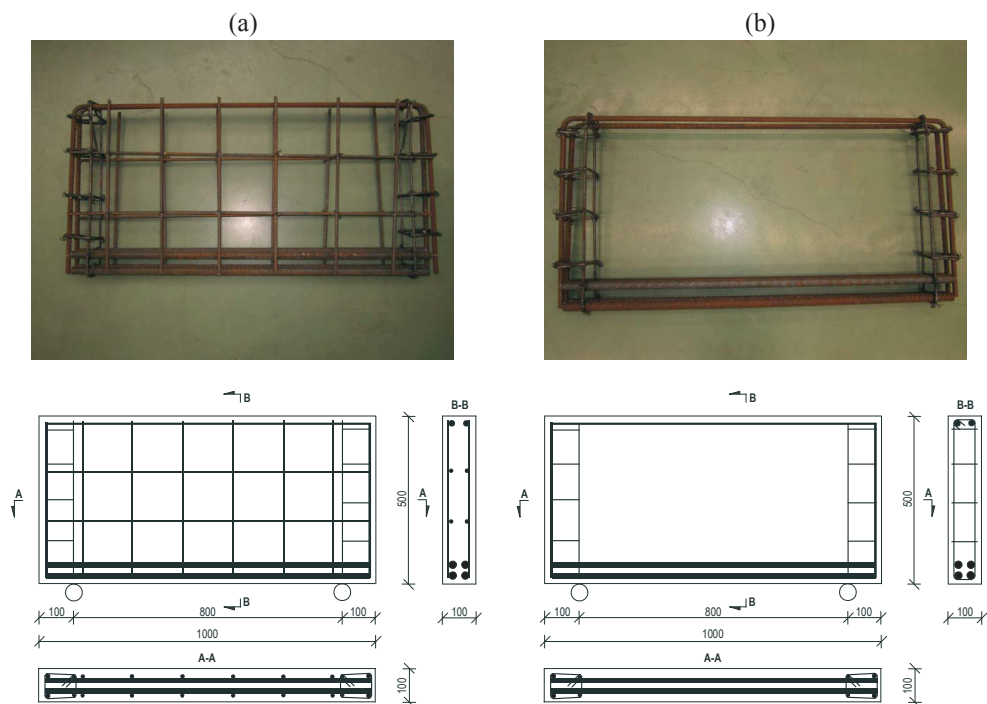
		TARCZA 1 receptura I	TARCZA 2 receptura II	TARCZA 3 receptura III
		1000 x 500 x 100 mm		
skład mieszanki		ilość [kg/m ³]		
matryca betonowa	cement CEM I 52,5R	596		
	mikrokrzemionka	149		
	granodioryt 2-8 mm	990		
	piasek kwarcowy	500		
	superplastyfikator	39		
	woda	139		
włókna	stalowe	–	78	156
	polipropylenowe	–	2,3	4,5

Tarczę 1 wykonano wg receptury I bez zbrojenia rozproszonego. W tarczy żelbetowej zbrojenie główne stanowią cztery pręty dolne o średnicy $\phi 22$ mm i dwa górne $\phi 12$ mm scalone strzemionami pionowymi i poziomymi z prętów gładkich $\phi 6$ mm w strefach przypodporowych, wzmocnione dodatkowo dwustronnie mocowanymi siatkami z prętów $\phi 8$ mm, Rys. 1a.

Tarcze 2 i 3 wykonano z fibrobetonu odpowiednio wg receptur II i III. Układ zbrojenia jest podobny do tarczy 1. W obu elementach pominięto zbrojenie dwiema siatkami z prętów żebrowanych $\phi 8$ mm na rzecz włókien stalowych i polipropylenowych, Rys. 1b.

Cement portlandzki CEM I 52,5R LAFARGE charakteryzuje się wysoką wytrzymałością początkową i dużą szybkością wydzielania ciepła w początkowym okresie twardnienia. Mikrokrzemionka zagęszczona, dodana do mieszanki betonowej pozytywnie wpływa na porowatość i wodoprzepuszczalność betonu. Jej ziarna redukują pęcznienie, wpływają na wzrost wytrzymałości betonu, zmiany mikrostruktury warstwy stykowej zaczynu cementowego i kruszywa oraz zwiększają szczelność i trwałość stwardniałej mieszanki betonowej. Na kruszywo składa się piasek kwarcowy oraz granodioryt o frakcji 2-8 mm. Zastosowany granodioryt jest kwaśną

skąłą magmową typu głębinowego o strukturze średniokrystalicznej wydobywaną na Ukrainie. Przed dodaniem kruszywa do mieszanki, wykonano oznaczenie składu ziarnowego metodą przesiewania na sucho. Na podstawie uzyskanych wyników i normowych krzywych granicznych stwierdzono, że materiał spełnia wymagania dotyczące składu uziarnienia kruszyw mineralnych do betonu. Superplastyfikator BASF wykazuje bardzo dobre zdolności upłynniające, powoduje wyraźnie lepszą dyspersję cząstek cementu i posiada wyjątkową zdolność do utrzymywania odpowiedniej konsystencji. W wyniku zastosowania powstaje jednolita mieszanka betonowa o niskich oporach tarcia wewnętrznego, co skutkuje znaczną poprawą urabialności betonu, bardzo istotną szczególnie w przypadku dodawania włókien. Dzięki swojej strukturze molekularnej, umożliwia bardzo dobre upłynnienie mieszanki, którą dodatkowo cechuje wysoka odporność na wahania temperatury. Włókna stalowe Baumix 50 o długości 50 mm i średnicy 1 mm wykonano ze stali niskowęglowej ciągniętej na zimno. Specjalistyczne wygięcie końcówek włókien wpływa na lepsze zakotwienie w betonie, co zwiększa jego odporność na pęknięcie przy zginaniu. Dodatkowo włókna cechuje wysoka odporność na zmęczenie, wysoka wytrzymałość na rozciąganie oraz eliminacja rys i spękań. Włókna polipropylenowe wytłaczane z granulatu polipropylenowego są połączone w wiązki i cięte na długość 12 mm. Dodawane są do mieszanki betonowej w celu zmniejszenia skurczu plastycznego i ograniczenia powstania rys skurczowych w stwardniałym betonie. Ponadto włókna wpływają na zwiększenie wodoszczelności, mrozoodporności, spowolnienie karbonatyzacji i podwyższenie wytrzymałości betonu.



Rys. 1. Wymiary i układ zbrojenia elementów: (a) tarcza 1, (b) tarcze 2 i 3.

Fig. 1. Dimensions and reinforcement arrangement in: (a) deep beam 1, (b) deep beams 2 and 3.

2.2. Badania pomocnicze

Zakres badań obejmuje określenie charakterystyk materiałowych betonu, fibrobetonu i prętów stalowych.

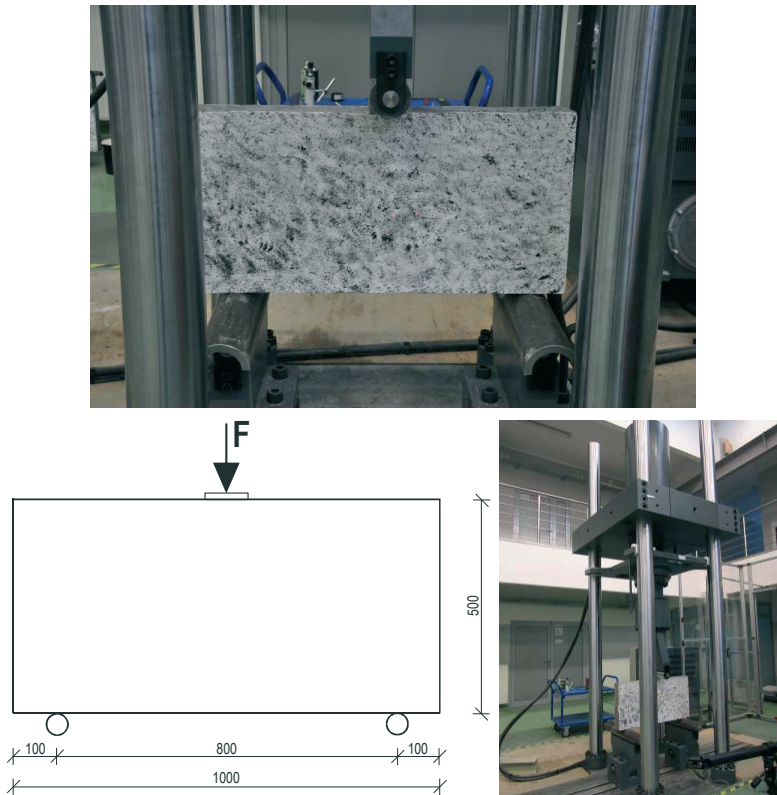
Próbki betonowe i fibrobetonowe przygotowano według receptur I, II i III w formach spełniających wymagania normowe. W szczególności dla materiałów wykonano badania wytrzymałościowe na ściskanie, na rozciąganie przez rozłupywanie, na rozciąganie przy zginaniu i moduły sprężystości. Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na kostkach o boku 150 mm, próbkach powstałych w wyniku złamania przy zginaniu beleczek i odwiertach rdzeniowych wykonanych w dużych elementach belkowych. Badania wytrzymałości na rozciąganie przez rozłupywanie przeprowadzono na próbkach sześciennych o boku 150 mm, a badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu na elementach belkowych o wymiarach 600 x 150 x 150 mm. Moduły sprężystości określono na walcach $\phi 150 \times 300$ mm. Badania przeprowadzono po 53 dniach dojrzewania betonu w prasach Walter-Bai AG i Zwick-Roell o maksymalnych siłach nacisku 3000 kN. Wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie, według I receptury, wynosiły odpowiednio $f_c = 106,7$ MPa i $f_{ct} = 4,9$ MPa.

Badania stalowych prętów o średnicach $\phi 6$, $\phi 8$, $\phi 12$ i $\phi 22$ mm i długości 300 mm przeprowadzono w hydraulicznej prasie MTS 810 o zakresie obciążenia 0-100 kN. Pręty mocowano przy pomocy specjalnych szczęk utrzymujących, nie pozwalających na ewentualny poślizg i błędy pomiarowe. Podczas badania mierzono aktualną siłę, wydłużenie pręta i przemieszczenie poprzeczne aż do zerwania próbki. Na podstawie otrzymanych wyników obliczono charakterystyczne granice plastyczności, charakterystyczne wytrzymałości na rozciąganie, moduły sprężystości i współczynniki Poissona prętów stalowych.

2.3. Badania tarcz żelbetowych wzmocnionych włóknami

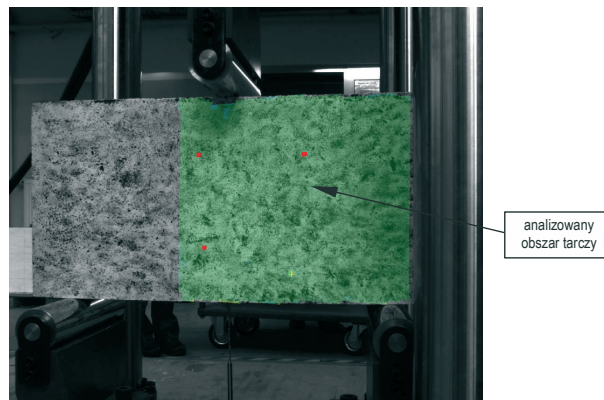
Badania tarcz żelbetowych wzmocnionych włóknami przeprowadzono w czterokolumnowej prasie hydraulicznej Zwick/Roell (Rys. 2) do badania elementów o maksymalnej wysokości 2000 mm, szerokości 900 mm i rozstawem podpór 3000 mm. Podczas badania wykonano pomiary trójwymiarowych odkształceń przy pomocy systemu Aramis. System służy do analiz, obliczenia i dokumentacji stanów deformacji. Na podstawie zdjęć wykonanych cyfrowymi kamerami może rozpoznać strukturę powierzchni mierzonego obiektu, a po ich nagraniu dokonać porównania i obliczenia przemieszczenia i odkształcenia w charakterystycznych punktach [14].

Przed rozpoczęciem badania tarcze dwustronnie pobielono i z tyłu każdej naniesiono siatkę o wymiarze oczka 200 mm x 200 mm. Na powierzchniach przednich od strony fotografowanej dwiema kamerami naniesiono losowe desenie wykonane czarną farbą. Taki zabieg jest konieczny w przypadku materiałów niejednorodnych mających zbyt małą ilość punktów charakterystycznych istotnych dla obliczeń systemu Aramis. Następnie tarcze ustawiano w prasie wg schematu statycznego zilustrowanego na Rys. 2. Kolejnym krokiem było odpowiednie kalibrowanie systemu Aramis. Znając kąt pomiędzy osiami kamer uzyskano współrzędne trójwymiarowe ze współrzędnych dwuwymiarowych odczytanych z obydwu kamer. W systemie ustawiono szybkość zapisu zdjęć i określono pole pomiarowe, na którym przeprowadzono obliczenia (Rys. 3).



Rys. 2. Schemat obciążenia tarczy i jej ustawienie w prasie Zwick/Roell.

Fig. 2. The scheme of loading a deep beam and its location in Zwick/Roell press.



Rys. 3. Obszar pomiarowy tarczy w systemie Aramis.

Fig. 3. The measurement area for the deep beam in Aramis system.

Tarcze 1, 2 i 3 obciążano przez płytkę stalową o wymiarach 100 mm x 100 mm x 25 mm ustawioną w miejscu przyłożenia siły. Podczas obciążania tarczy 1, na tylnej powierzchni zaznaczano rozwój zarysowania. W przypadku tarczy 1 badania przerwano w chwili nagłego spadku obciążenia, natomiast w przypadku tarcz 2 i 3, gdy przez dłuższy okres czasu nie zaobserwowano przyrostu obciążenia.

3. Analiza wyników

3.1. Zakres analizy

Wyniki z badań opracowano w programie Aramis, stanowiącym uzupełnienie systemu pomiarowego. Po wykonaniu obliczeń zdefiniowano globalny układ współrzędnych, interpolowano brakujące punkty, uwydatniano efekty lokalne dla odkształceń głównych i przemieszczeń oraz zdefiniowano przekroje do analiz. Wybrane obrazy pola pomiarowego, a także dane potrzebne do wykonania wykresów eksportowano z programu, systematyzowano i przedstawiono po obróbce graficznej w analizach wyników.

Analizę zachowania się tarcz pod obciążeniem statycznym przedstawiono w oparciu o:

- obrazy zarysowania dla obciążenia $P = 350$ kN w postaci map odkształceń głównych,
- obrazy zarysowania dla obciążenia P_{max} przedstawione w postaci map odkształceń głównych,
- zależności siły w funkcji czasu,
- zależności przemieszczeń pionowych tarczy 1 i 2 na długości zdefiniowanego przekroju poziomego 3,
- obserwacje z przeprowadzonych badań.

Obserwacja rozwoju rys oraz powierzchniowe pomiary odkształceń i przemieszczeń elementów tarczowych pozwoliły na uchwycenie różnic w ich pracy.

3.2. Propagacja rys

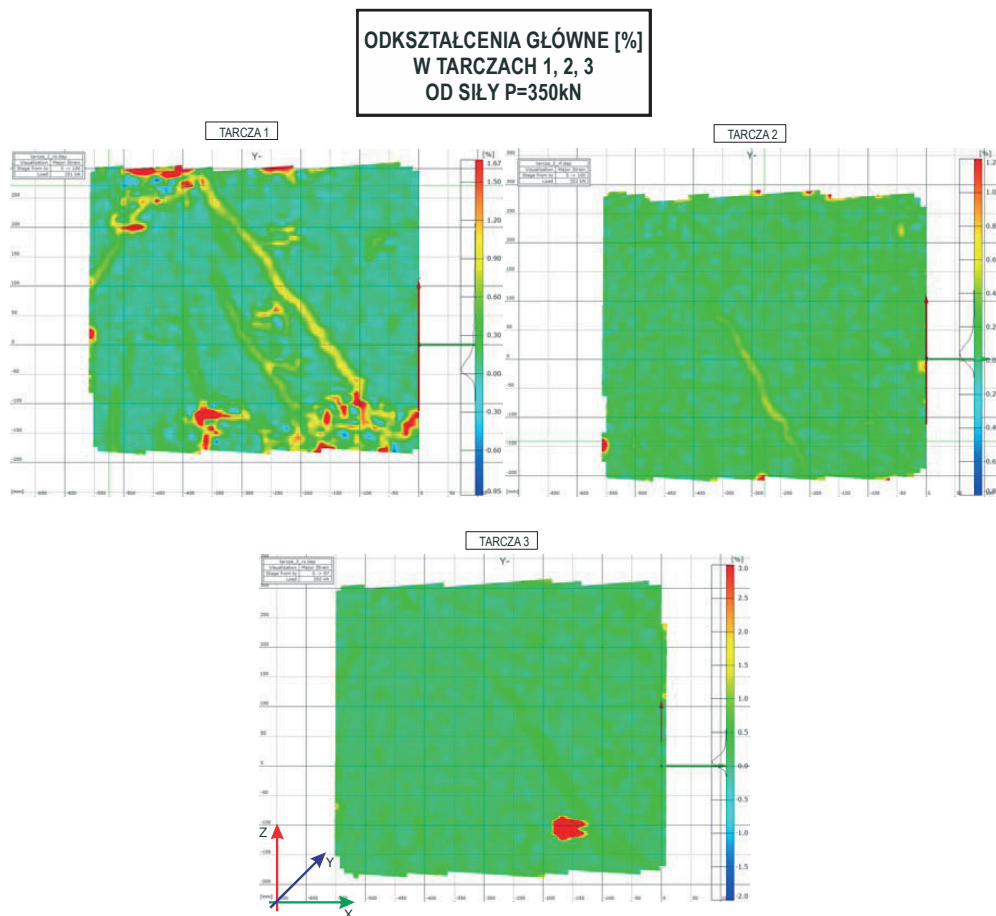
Moment powstania pierwszej rysy jest charakterystyczny dla każdej tarczy (tablica 2). W tarczy 1 pierwsze zarysowanie powstało przy wartości obciążenia wynoszącej 290 kN. W tarczy 2 moment pojawienia się rysy nastąpił dla siły 310 kN. Początek zarysowania tarczy 3 zaobserwowano przy sile wynoszącej 380 kN.

Tabela 2. Wartości sił przy pierwszym zarysowaniu i sił maksymalnych.

Table 2. The forces on the first cracking and maximum strength.

Element	Siła przy pierwszym zarysowaniu	Siła maksymalna	$(P_{cr}/P_{max})100$
	P_{cr}	P_{max}	
	[kN]	[kN]	[%]
Tarcza 1	290	915	32
Tarcza 2	310	527	59
Tarcza 3	380	571	67

Wpływ zbrojenia rozproszonego na zarysowanie elementów przedstawiono na Rys. 4 w postaci map odkształceń głównych dla obciążenia na poziomie 350 kN. Zaobserwowano że, wraz ze wzrostem zawartości włókien w matrycy betonowej, wyraźnie maleje stopień zarysowania elementów tarczowych.



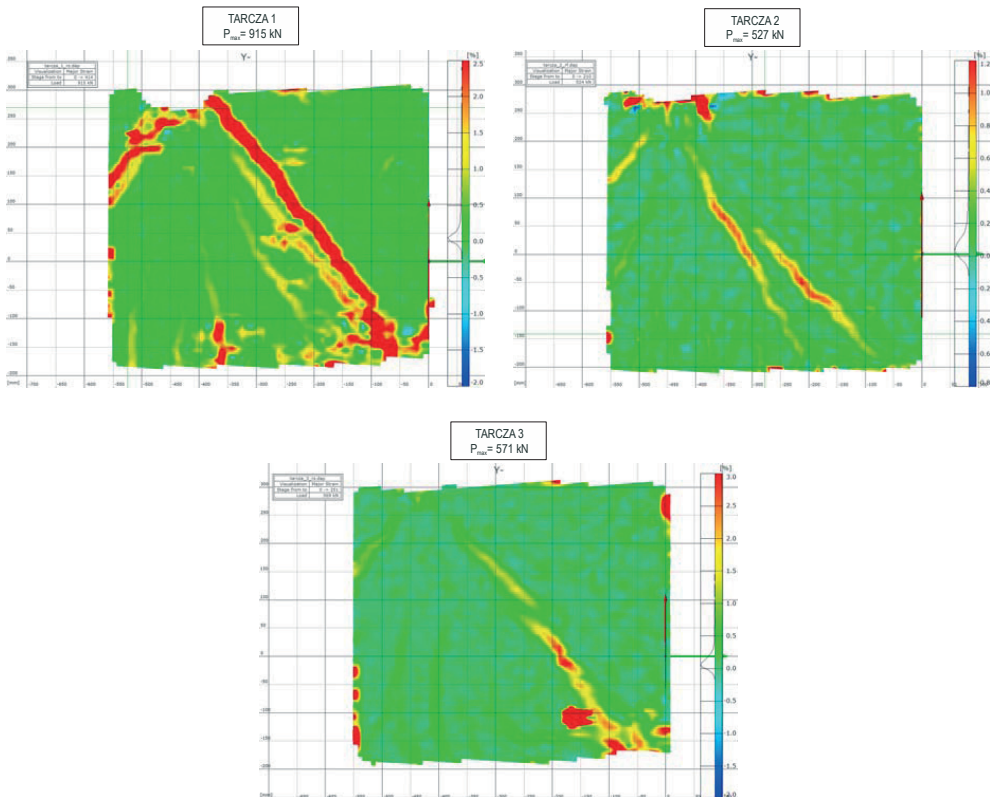
Rys. 4. Obrazy odkształceń głównych pod obciążeniem $P = 350 \text{ kN}$.
Fig. 4. Maps of major strains under load $P = 350 \text{ kN}$.

Ostateczny obraz zarysowania tarcz 1, 2 i 3 przedstawiono na Rys. 5 w formie map odkształceń głównych dla sił maksymalnych przeniesionych przez elementy.

Pierwsza rysa w tarczy 1 powstała na linii łączącej dolną podporę z miejscem przyłożenia siły. W następnej kolejności pojawiły się rysy ukośne równoległe do rysy pierwotnej, przesunięte do środka tarczy i rysy prostopadłe propagujące od dolnej krawędzi tarczy. W późniejszych etapach powstawały i pogłębiały się zarysowania ukośne, a także rysy w strefach podporowych od miążdżenia betonu. Zarówno w tarczy 2, jak i 3 nie pojawiły się rysy pionowe przy ich dolnych krawędziach. W tarczy 2 jako pierwsza powstała rysa ukośna przesunięta w kierunku środka, postępująca ku górze. Druga rysa ukośna powstała na linii połączenia podpory i miejsca przyłożenia siły i postępowała ku dolnej krawędzi. Obydwie rysy mieściły się w obszarze strefy środkowej tarczy. Zniszczenie tarcz 2 i 3 powstało w wyniku zmiążdżenia betonu w strefach przyłożenia obciążenia na ich górnych krawędziach.

W tarczy żelbetowej szerokość rys narastała proporcjonalnie, aż do chwili nagłego zniszczenia w strefie obciążenia. W tarczach żelbetowych z włóknami rysy

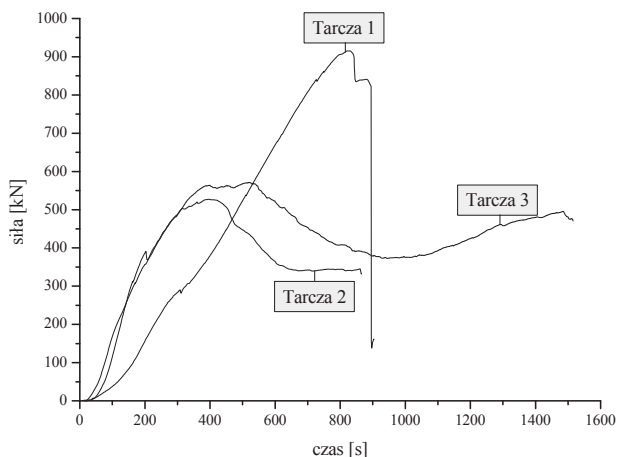
rozwickały się znacznie wolniej. W końcowych etapach badania strefy zniszczenia powstały w obszarach przyłożonej siły i w strefach podporowych. Zniszczenie na skutek miażdżenia matrycy nie miało charakteru nagłego. Obserwowano natomiast powolne i ciągłe rozchodzenie się struktury betonu wzmocnionego włóknami.



Rys. 5. Obrazy odkształceń głównych przy siłach maksymalnych.
Fig. 5. Maps of major strains under maximum load.

3.3. Stany deformacji elementów tarczowych

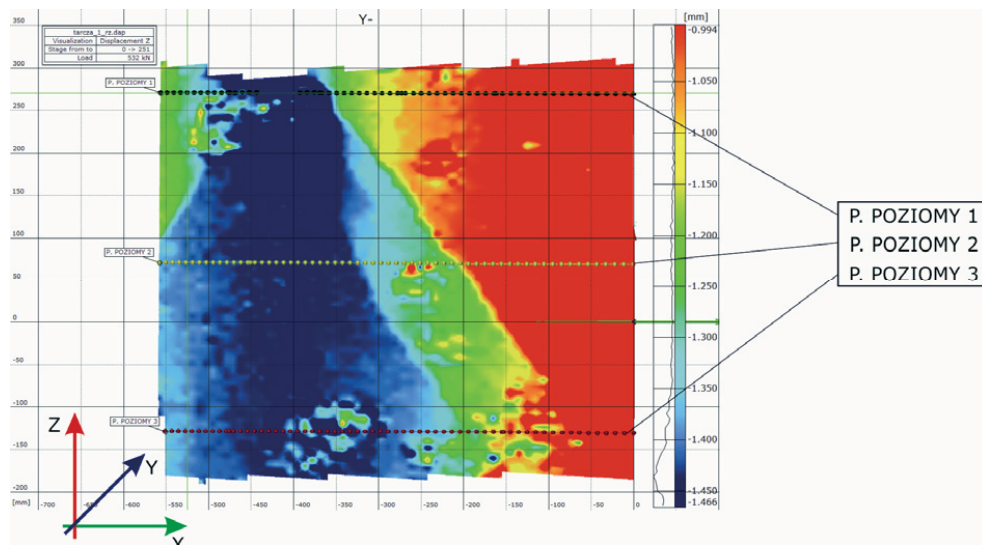
Na Rys. 6 przedstawiono zależności siły do czasu dla trzech badanych tarcz. Krzywa tarczy 1 wskazuje na kruchość betonu bez dodatku włókien. Po przekroczeniu wartości granicznej następuje gwałtowne i kruche miażdżenie materiału. Wykresy tarcz 2 i 3 wskazują na znaczną ciągliwość fibrobetonu. Porównując krzywe dla tarcz 2 i 3 można zauważyć, że zawartość użytych włókien wpływa na zdolność do przenoszenia obciążeń po osiągnięciu maksymalnych sił. Tarczę 3 z większą zawartością włókien charakteryzuje największa ciągliwość materiału. Maksymalna siła przeniesiona przez tarcze jest największa w przypadku tarczy 1 i wynosi 915 kN. Wynika ona z dużego stopnia zbrojenia tarczy 1 w strefie środkowej na całej wysokości. Tarcze 2 i 3 przeniosły maksymalne obciążenia znacznie niższe, odpowiednio równe 527 kN i 571 kN.



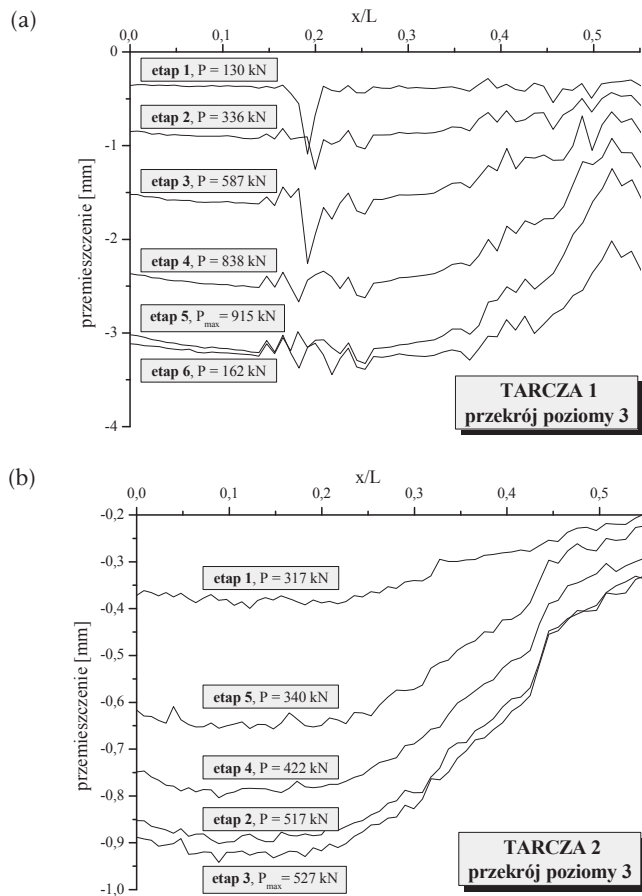
Rys. 6. Zależności siła-czas dla tarcz.
 Fig. 6. The force-time relation for deep beams.

Na Rys. 7 zilustrowano rozmieszczenie analizowanych przekrojów poziomych tarcz, a na Rys. 8 przedstawiono zmiany przemieszczeń pionowych na długości pola pomiarowego tarczy 1 i 2 w kolejnych etapach obciążania w przekroju poziomym 3.

Przemieszczenia pionowe przy granicznym obciążeniu w tarczy 1 są ponad trzykrotnie większe niż tarczy 2 zarówno w strefie przypodporowej jak i w środku rozpiętości elementu.



Rys. 7. Lokalizacja przekrojów poziomych tarcz na przykładzie tarczy 1.
 Fig. 7. Location of horizontal section deep beams on the example of the deep beam 1.



Rys. 8. Przemieszczenia na długości elementu w przekroju poziomym 3: a) tarcza 1, b) tarcza 2.
 Fig. 8. Displacements of the length of the element in the third horizontal section: a) deep beam 1, b) deep beam 2.

4. Podsumowanie

Badania doświadczalne potwierdziły skuteczność dodatku włókien stalowych i polipropylenowych w celu poprawy odporności betonu wysokowartościowego na pękanie w elementach tarczowych. Na podstawie analiz otrzymanych wyników stwierdzono, że:

- włókna stalowe negatywnie wpływają na urabialność mieszanki,
- obecność włókien w matrycy korzystnie wpływa na hamowanie propagacji rys,
- moment powstania pierwszej rysy w tarczach z włóknami następuje później niż w tarczy bez włókien; zarysowanie tarcz fibrobetonowych pojawiło się przy obciążeniach stanowiących około 60-70% maksymalnych sił, natomiast w tarczy bez włókien pierwsza rysa powstała przy 30% granicznej siły,
- rozwój rys w tarczach z włóknami postępuje wolno, a szerokości rys są mniejsze niż w tarczy bez dodatku włókien,

- ilość dodanych włókien ma wpływ na moment powstania pierwszych rys,
- zbrojenie włóknami zwiększa wytrzymałość betonu na rozciąganie,
- w tarczach ze zbrojeniem rozproszonym nie powstają rysy pionowe przy ich dolnych krawędziach,
- włókna korzystnie wpływają na pracę tarcz w obszarach niesprężystych po zarysowaniu betonu i uplastycznieniu prętów stalowych oraz na charakter zniszczenia,
- tarcza z 2% zawartością włókien stalowych wykazuje bardzo dużą ciągliwość materiału,
- przemieszczenia pionowe tarczy z włóknami są trzykrotnie mniejsze w porównaniu do przemieszczeń tarczy bez włókien.

W najbliższej przyszłości planowane są dalsze badania eksperymentalne oraz analizy numeryczne tarcz żelbetowych z betonów wysokowartościowych wzmocnionych dwiema rodzinami włókien.

Literatura

- [1] Brandt A.M., *Cement Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance*, Taylor and Francis. London and New York 2009.
- [2] Glinicki M.A., *Beton ze zbrojeniem strukturalnym*, XXV Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji, Szczyrk 2010.
- [3] Brandt A.M., *Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering*, *Composite Structures* 86 (2008) 3-9.
- [4] CNR-DT 204/2006, *Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures*, Rome-CNR, October 2007.
- [5] Foster S.J., *The application of steel-fibres as concrete reinforcement in Australia: from material to structure*, *Materials and Structures* 42 (2009) 1209-1220.
- [6] Walraven J.C., *High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes*, *Materials and Structures* 42 (2009) 1247-1260.
- [7] Prisco M., Plizzari G., Vandewalle L., *Fibre reinforced concrete: new design perspectives*, *Materials and Structures* 42 (2009) 1261-1281.
- [8] Banthia N., Gupta R., *Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices*, *Materials and Structures* 37 (2004) 707-716.
- [9] Ułańska D., *Charakterystyka betonu z włóknami polipropylenowymi w strefie rozciąganej zbrojonych belek*, XLVI Konferencja naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Wrocław- Krynica 2000.
- [10] Domański T., Czkwianianc A., *Wpływ zbrojenia rozproszonego na parametry mechaniczne betonu*, *Przegląd Budowlany* 6 (2006).
- [11] Chiaia B., Fantilli A.P., Vallini P., *Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings*, *Engineering Structures* 31 (2009) 1600-1606.
- [12] Vengatachalapathy V., Ilangovan R., *A Study on Steel Fibre Reinforced Concrete Deep Beams with and without Openings*, *International Journal of Civil Engineering* 1(3) (2010).
- [13] Fairbairn E.M.R., Toledo Filho R.D., Formagini S., Rosa J.I., Battista R.C., *Experimental analysis and modeling of ultra high performance fiber reinforced concrete plates*, 1-8 (in press).
- [14] ARAMIS v6: *Podręcznik użytkownika* – Oprogramowanie. Germany, 2007.

Experimental testing of high performance fibre reinforced concrete deep beams

Piotr Smarzewski, Justyna Poręba, Agata Rentflejsz

*Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture,
Lublin University of Technology, e-mail: p.smarzewski@pollub.pl*

Summary: The article presents the results of testing reinforced deep beams made of high performance concrete and fibre-concrete in the scheme of centrally placed load. The test was conducted for three deep beam elements of the of the main reinforcement bars in the form of lower, upper, horizontal and vertical stirrups in support areas of alternative reinforcement grids or steel and polypropylene fibers between the points of support elements. Analysis of results was based on the maps of major strains, the relations of force in the function of time and the relations of vertical displacements of the length of the members in the horizontal section.

Keywords: reinforced concrete elements, high performance fibre concrete, deep beams.