

dr inż. Tomasz Ponikiewski*

dr hab. inż. prof. nzw. w PŚI Jacek Gołaszewski*

Zastosowanie cyfrowej analizy obrazu w badaniach fibrobetonów samozagęszczalnych

Dotychczasowe badania przekrojów elementów belkowych, wykonanych z betonu samozagęszczalnego z włóknami stalowymi (WSBSZ) nie dostarczyły systematycznych, zweryfikowanych danych doświadczalnych umożliwiających ich projektowanie na podstawie zakładanych parametrów mechanicznych oraz rozmieszczenia i ukierunkowania zbrojenia rozproszonego. Konsekwencją tego jest rozbieżność w projektowanych i otrzymywanych parametrach mechanicznych tak modyfikowanych betonów [1]. Ważne jest określenie stopnia odchylenia w zakładanych parametrach mechanicznych WSBSZ ze względu na rozmieszczenie i ukierunkowanie zbrojenia rozproszonego. Prezentowana metoda badawcza stanowi podstawę do opracowania identyfikacji zachowania się włókien o różnych parametrach geometrycznych w matrycy betonów samozagęszczalnych z uwzględnieniem zakładanych zróżnicowanych stanów naprężenia [2]. Wyniki dotychczasowych badań fibrobetonów samozagęszczalnych wskazują, że o ich samozagęszczalności i właściwościach fizyko-mechanicznych decydują głównie parametry geometryczne włókien i ich udział objętościowy w mieszance betonowej [3][4], natomiast brak jest oceny wpływu metod formowania WSBSZ na ich właściwości fizyko-mechaniczne. Obecnie zbrojenie rozproszone jest traktowane jako dodatek do betonu poprawiający jego właściwości, ale nie jako zbrojenie konstrukcyjne (są już przykłady takich zrealizowanych konstrukcji). W takim podejściu rozmieszczenie równomierne zbrojenia może być uznane za bezpieczne, ale nie optymalne.

Zaprezentowane w artykule dwie metody badawcze: za pomocą autorskiego programu komputerowego (metoda niszcząca) oraz z zastosowaniem tomografii komputerowej (metoda nieniszcząca) pozwalają ustalić rozmieszczenie i ukierunkowanie zbrojenia rozproszonego w betonach WSBSZ. Umożliwi to projektowanie konstrukcji betonowych, uwzględniając przewidywane, prawdopodobne rozmieszczenie zbrojenia rozproszonego, specyficzne dla danego typu elementu i sposobu jego formowania. Istotą problemu jest ustalenie, jak w różnych konstrukcjach zmienia się rozmieszczenie zbrojenia rozproszonego w zależności od sposobu układania mieszanki, biorąc pod uwagę jej właściwości reologiczne, udział objętościowy i parametry geometryczne włókien stalowych. Uzyskane wyniki badawcze mogą być wykorzystane do zwiększenia dokładności modelowania właściwości mechanicznych wybranych elementów konstrukcji ze zbrojeniem rozproszonym. Umożliwi to większą optymalizację stosowania włókien w matrycy betonowej, bę-

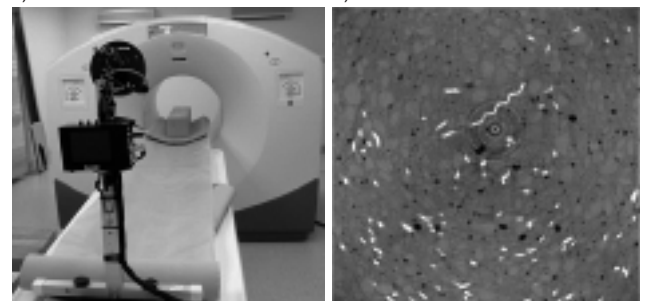
dących w niektórych przypadkach dobrą alternatywą dla zbrojenia tradycyjnego, dodatkowo identyfikując i redukując ograniczenia technologiczne.

Metoda badawcza

Jednorodność rozmieszczenia włókien stalowych badano w WSBSZ formowanym jako belki o wymiarach 600 x 150 x 150 mm. Badania wykonano cyfrową analizą obrazu (metoda niszcząca) oraz tomografią komputerową (metoda nieniszcząca). W celu sprawnego analizowania obrazu betonu zawierającego rozproszone włókna stalowe opracowano program, którego zadaniem jest odnalezienie przeciętych włókien oraz określenie ich pozycji względem badanej próbki. Opracowany program został wykorzystany do oceny jednorodności rozmieszczenia włókien stalowych w betonie samozagęszczalnym.

Przedstawiono również wyniki badań przeprowadzonych tomografem komputerowym (fotografia 1), wyposażonym w 64 rzędy detektorów, a rekonstruowana grubość warstwy serii natywnej badania tomograficznego wynosiła 0,625 mm (szerokość pojedynczego detektora). Czynnikiem prześwietlającym w badaniach była wiązka promieni Roentgena. Wymiar badanej powierzchni każdej warstwy betonu wynosił 150 x 150 mm. Dla każdej belki betonowej wynikiem badań była seria natywna zapisana w formacie DICOM składająca się z minimum 950 obrazów, seria rekonstruowana składająca się z minimum 1500 obrazów z uwzględnieniem interwału w zakresie 50 ÷ 80% grubości warstwy natywnej. Parametry akwizycji były nie mniejsze niż: napięcie lampy 140 kVp, 400 mAs.

Aby umożliwić wydajną analizę obrazu betonu zawierającego rozproszone włókna, opracowano specjalne oprogramowanie, którego dokładność zależy wyłącznie od rozdzielczości analizowanego zdjęcia. Zadaniem oprogramowania jest zlokalizowanie wszystkich włókien w przekroju poprzecznym i określenie ich położenia. Przygotowywane są zdjęcia próbek betonowych, które następnie poddaje się analizie kompute-



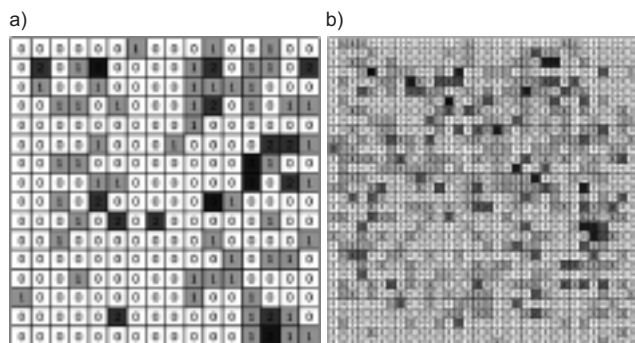
Fot. 1. Tomograf komputerowy wykonujący badania, wyposażony w 64 rzędy detektorów (a) oraz uzyskany obraz 2D (b)

* Politechnika Śląska

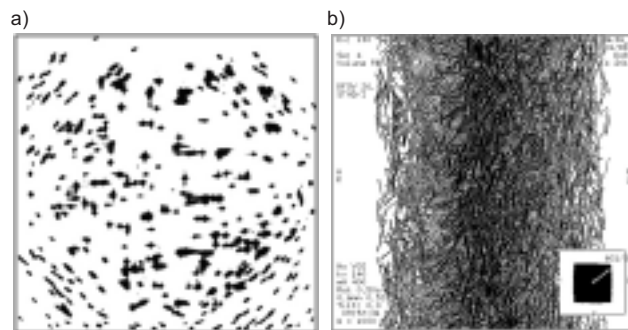
rowej. Oprogramowanie przetwarza matrycę, której wymiary są ustalane na podstawie rozdzielczości zdjęcia. Każda komórka matrycy zawiera informacje o kolorze zidentyfikowanym w tym punkcie na zdjęciu. Program krok po kroku generuje wirtualną matrycę, w której liczbom przyporządkowano określone kolory. Po zakończeniu tej procedury kolorowa matryca zamienia się w matrycę logiczną, w której wartości komórek wynoszą 0 lub 1 w zależności od tego, czy w danym punkcie program rozpoznał obecność włókien czy nie. W związku z tym, że zmiana kolorów rzeczywistych na odcienie szarości wiąże się nieuchronnie z utratą pewnej liczby danych, kolejnym etapem jest wypełnienie konturów włókien w celu otrzymania bardziej zaokrąglonych kształtów. Podczas tej fazy generowana jest nowa matryca, która opisuje liczbę włókien i dane o nich. W ramach kolejnej operacji program eliminuje elementy, których powierzchnia jest zbyt mała lub zbyt duża, aby rozpoznać je jako włókna. Następnie program pokazuje wszystkie zidentyfikowane włókna na tle oryginalnej grafiki, gdzie istnieje możliwość ręcznej korekty. Analiza lokalna pozwala wyświetlić wyniki dotyczące pojedynczego przekroju poprzecznego z podaniem liczby włókien w przekroju.

Wyniki badań

W związku z tym, że pełny raport generowany przez program jest bardzo obszerny, przedstawimy tzw. analizę lokalną jednego zglądu. Uzyskane obrazowe wyniki liczby włókien w wybranym przekroju betonu dla podziału powierzchni 16 x 16 kwadratów przedstawiono na rysunku a) oraz dla podziału boku 32 x 32 części na rysunku b). Na tej podstawie ustala się rzeczywiste rozmieszczenie włókien jednostkowych w przekroju próbki betonowej. Zastosowanie skali globalnej w znacznym stopniu zmniejsza przejrzystość wyników, ponieważ w zależności od stopnia podziału próbki liczba włókien w badanym polu waha się od 0 do 53 szt. Wyniki badań przeprowadzonych tomografem komputerowym przedstawiono na fotografii 2. Na podstawie przedstawionych wybranych przekrojów rozpatrywanych betonów stwierdza się generalnie równomierne rozłożenie włókien w objętości badanego betonu. Nie występują duże skupiska włókien w matrycy betonowej. Wizualnie stwierdza się równoległe ułożenie włókien do kierunku przemieszczania się mieszanki z ich dodatkiem w trakcie betonowania. Niewiele jest włókien ułożonych prostopadle do kierunku formowania mieszanki. Obraz 3D potwierdza tendencję do kierunkowego ułożenia włókien w matrycy betonowej. Włókna są generalnie równomiernie rozłożone w betonie, z wyjątkiem wybranych odcinków krawędzi betonu.



Liczba włókien stalowych dla podziału zglądu betonu 16 x 16 (a) oraz 32 x 32 (b)



Fot. 2. Obraz przekroju 2D belki betonowej (a) oraz 3D (b) wykonany metodą tomografii komputerowej

Wnioski

Na bazie przeprowadzonych badań własnych z zastosowaniem opracowanej metody i oprogramowania do analizy rozmieszczenia włókien w betonach oraz badań tomografii komputerowej uzyskano wyniki w rozpatrywanym zakresie badawczym. Opracowany program komputerowy pozwala na analizę rozmieszczenia pojedynczych włókien w układzie globalnym i lokalnym próbek. Pozwala również na określanie tendencji w rozmieszczeniu włókien w zależności od kierunku formowania mieszanki betonowej, bliskości ścian form oraz układu góra – dół formy. Tomografia komputerowa obrazuje wewnętrzną przestrzeń betonu z włóknami stalowymi w sposób nieograniczony w dowolnym formacie 2D oraz 3D. Liczba włókien ułożonych w większości przypadków równoległe do podłużnych ścian formy pozwala wnioskować, iż zachowanie takie wynika z kierunku betonowania i rozplywania się włókien w formie. Przedstawiona metoda i oprogramowanie stanowią wstęp do badań dotyczących zależności pomiędzy rozmieszczeniem włókien w elemencie betonowym a określeniem ich wpływu na parametry wytrzymałościowe. Potwierdzono orientację włókien zgodną z kierunkiem formowania się mieszanki WSBSZ. Wykazano również równomierne rozmieszczenie włókien w badanym betonie. Nie wykazano nadmiernego zbliżania się włókien do siebie i tworzenia się tzw. jeży.

Dzięki zaproponowanym metodom badawczym jest możliwość częściowego (metoda niszcząca) lub pełnego (metoda nieniszcząca) określenia rozmieszczenia włókien w badanym betonie.

Literatura

- [1] Torrijos M. C., Tobes J. M., Barragán B. E., Zerbino R. L.: Orientation and distribution of steel fibres in self-compacting concrete. 7th RILEM Symposium on Fibre – Reinforced Concretes (FRC) – BE-FIB 2008, Chennai, India, s. 729 – 738.
- [2] Yardimci M. Y., Baradan B., Taşdemir M. A.: Studies on the relation between fiber orientation and flexural performance of SFR-SCC. 7th RILEM Symposium on Fibre – Reinforced Concretes (FRC) – BE-FIB 2008, Chennai, India, s. 711 – 718.
- [3] Stroeven P. and Shah P., S. P., Use of radiography-image analysis for steel fibre reinforced concrete. In: „Testing and Test Methods of Fibre Reinforced Composites”, R. N. Swamy ed. Construction Press, Lancaster, 1978, 308 – 311.
- [4] Kaminski M., Bywalski Cz., Analysis of long steel fiber distribution in fiber reinforced concrete beams, In: The 10th International Conference „Modern building materials, structures and techniques, Vilnius, 19 – 21 May, 2010.