



MICHAŁ A. GLINICKI ¹⁾
AGNIESZKA LITOROWICZ ²⁾

DIAGNOSTYKA RYS W KOMPOZYTACH O MATRYCY CEMENTOWEJ METODĄ KOMPUTEROWEJ ANALIZY OBRAZU

STRESZCZENIE. Powstawanie rys w betonowych konstrukcjach inżynierskich może powodować obniżenie sztywności i wytrzymałości elementów, zmniejszenie szczelności betonu i niebezpieczeństwo korozji zbrojenia. W pracy przedstawiono laboratoryjny sposób diagnostyki rys w betonie metodą mikroskopową przy wykorzystaniu komputerowego analizatora obrazu. Opracowanie metody wykrywania i analizy rys obejmowało m.in. utworzenie laboratoryjnej procedury przygotowania próbek do obserwacji mikroskopowych, zdefiniowanie parametrów charakteryzujących wymiary i rozmieszczenie rys, opracowanie automatycznych algorytmów identyfikacji rys przy uwzględnieniu przekształceń morfologicznych i współczynników kształtu, wyznaczania stopnia orientacji rys oraz określania rozkładu ich szerokości. Poprawność działania metody diagnostycznej została pozytywnie zweryfikowana na próbkach betonu konstrukcyjnego poddanych cyklicznemu zamrażaniu i odmrażaniu oraz na próbkach fibrobetonu obciążanych do określonego poziomu siły ściskającej.

1. WPROWADZENIE

Betonowe konstrukcje inżynierskie powinny być tak zaprojektowane i wykonane, aby w założonym okresie użytkowania i poziomie utrzymania zapewniona była ich trwałość rozumiana jako funkcjonalność użytkowa. Niedostateczna trwałość betonu

¹⁾ dr hab. inż. – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie oraz
Instytut Badawczy Dróg i Mostów

²⁾ dr inż. – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie

przejawia się powstawaniem uszkodzeń w postaci rys, odprysków powierzchniowych, wycieków i wykwitów, ubytków spoiwa i obnażaniem ziaren kruszywa, delaminacji warstw, odspojeniem otuliny betonowej od zbrojenia. Duże znaczenie ma powstawanie rys o znacznej rozwarłości, gdyż powoduje obniżenie sztywności i wytrzymałości, zmniejszenie szczelności i niebezpieczeństwo korozji zbrojenia oraz pogorszenie estetyki. W rozmaitych normach technicznych wprowadza się ograniczenia rozwarłości widocznych rys, dopuszczalnych w zależności od grubości otuliny zbrojenia, klasy środowiska, rodzaju konstrukcji, np. w środowisku wilgotnym rozwarłość rys jest ograniczona do 0,2 – 0,3 mm, natomiast w środowisku szczególnie agresywnym może wynosić jedynie 0,1 mm, [1 - 2]. Rysy występujące wewnątrz materiału nie są natomiast normowo ograniczane, nie ma standaryzowanych metod ich obserwacji i pomiaru.

Różne metody wykrywania rys w betonie są znane od lat, począwszy od metod mikroskopowych, akustycznych, radiograficznych, aż po penetroradary; metody znacząco różnią się rozdzielczością i przydatnością do obserwacji rozmieszczenia rys, [3 - 4]. Mikroskopię optyczną stosuje się w świetle przechodzącym do badań cienkich szlifów [5] lub w świetle odbitym na zgładach polerowanych [6]. Elektronowa mikroskopia skaningowa jest szczególnie przydatna z powodu wysokiej rozdzielczości i dużej głębi ostrości. Metoda radiograficzna wprowadzona przez Slate i Olsefski [7], polegająca na prześwietlaniu stosunkowo cienkich próbek betonu promieniami X, odznacza się słabą rozdzielczością, natomiast rozdzielczość radiografii neutronowej [8] jest znacznie wyższa. Li i Shah [9] stosowali metodę badania emisji akustycznej do lokalizacji mikrorys w próbkach betonowych. Ilościowa ocena rozmieszczenia i wymiarów rys jest trudna. Zastosowanie cyfrowych analizatorów obrazu pozwala na automatyzację pomiarów, jednak do tej pory nie opracowano standardowej metody postępowania przy cyfrowej analizie rys w betonie.

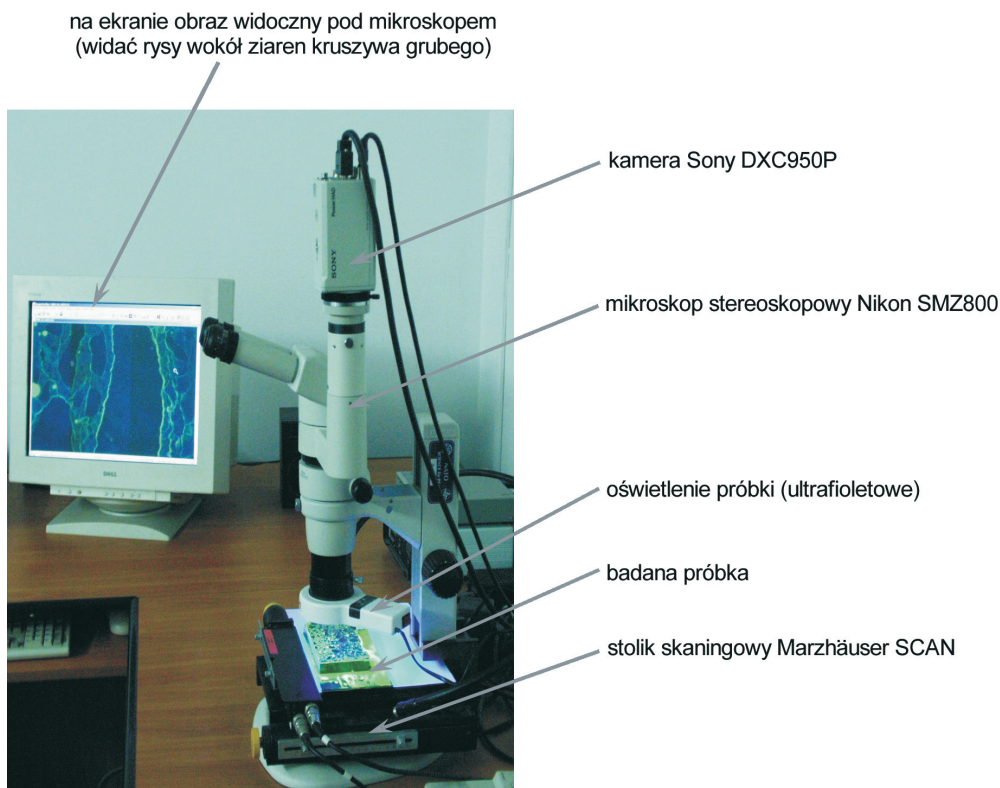
2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy jest przedstawienie metody wykrywania rys w betonie, umożliwiającej identyfikację ich cech geometrycznych i ilościowy opis rozmieszczenia rys w przekroju elementu betonowego. Zakres prac metodycznych obejmował opracowanie procedury przygotowania próbek oraz automatyzacji wykrywania rys przy użyciu mikroskopu stereoskopowego i analizatora obrazu, a także algorytmów wyznaczenia ilościowej charakterystyki rys. Sprawdzenie przydatności uzyskiwanych wyników przeprowadzono na próbkach betonu i fibrobetonu, poddanych niszcącemu oddziaływaniu różnych czynników zewnętrznych (cykliczne zamrażanie i odmrażanie, jednokierunkowe ściskanie).

3. METODA PRZYGOTOWANIA PRÓBEK I OBSERWACJI RYS

3.1. STANOWISKO BADAWCZE

Stanowisko badawcze zbudowane w laboratorium IPPT PAN, składa się z mikroskopu stereoskopowego Nikon SMZ800, współpracującego z zamontowaną na nim kamerą Sony DXC950P oraz ze stolikiem pozycjonującym Marzhäuser SCAN 150×150 (rys. 1) oraz analizatora obrazu Image Pro Plus 4.1. Za pomocą kamery 3CCD uzyskuje się 24-bitowy obraz kolorowy w układzie trzech kolorów RGB o rozdzielczości 768 × 576 pikseli w siatce prostokątnej. W tablicy 1 przedstawiono rzeczywisty wymiar punktu obrazu przy przykładowych powiększeniach. Całkowity zakres przesuwu stolika pozycjonującego wynosi 150 × 150 μm; możliwe jest ustalenie pozycji próbki z dokładnością do 0,1 μm.

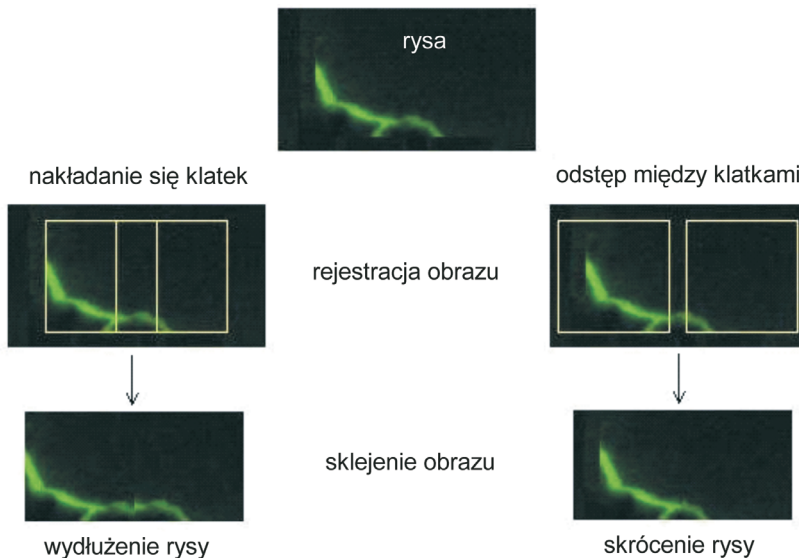


Rys.1. Stanowisko badawcze do identyfikacji i ilościowej analizy obrazu rys w betonie
Fig.1. Test set-up for crack detection in concrete and quantitative analysis of image of cracks

Tablica 1. Wymiar punktu obrazu
Table 1. The pixel size

Powiększenie	Wymiar piksela [μm]
10×	8,34
30×	2,76
63×	1,34

Przy każdym stosowanym powiększeniu obrazu wykonywano kalibrację systemu pomiarowego w celu zapewnienia dokładności pomiaru i jakości otrzymywanego obrazu. Każdy analizowany obraz uzyskiwany był przez sklejanie pojedynczych klatek obrazu, zbieranych podczas przesuwu stolika pozycjonującego względem kamery o odległość odpowiadającą rozmiarowi pojedynczej klatki obrazu. Niedokładna kalibracja może powodować nieodpowiedni przesuw stolika w kierunku poziomym i/lub pionowym, a przez to doprowadzić do zachodzenia klatek obrazu na siebie lub powstawania braków fragmentu powierzchni między klatkami obrazu (rys. 2).



Rys.2. Zniekształcenie obrazu obiektu przy zachodzeniu na siebie klatek obrazu lub występowaniu odstępu między nimi

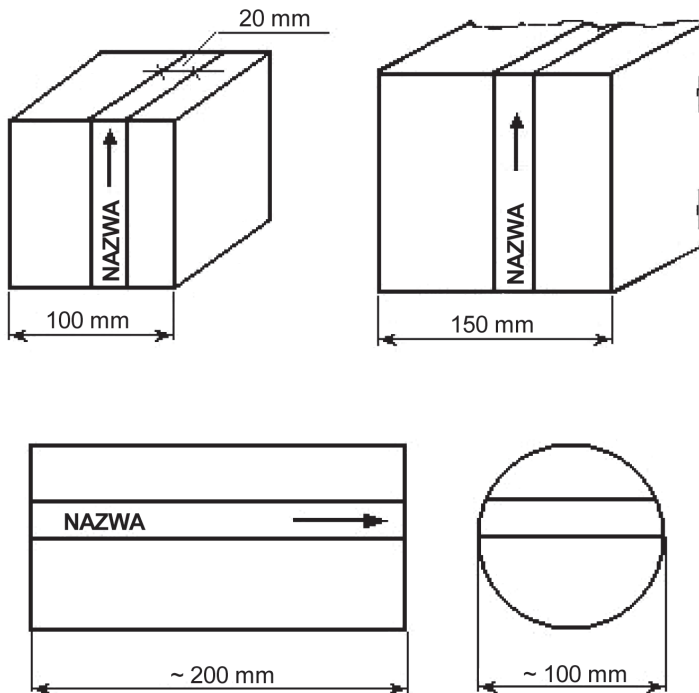
Fig.2. Deformation of an object due to overlapping of single images or separation of single images

3.2. PROCEDURA PRZYGOTOWYWANIA PRÓBEK BETONOWYCH

Przygotowanie próbek do ilościowej analizy układu rys w betonie polega na odpowiednim szlifowaniu i impregnacji; procedurę przygotowywania zgładów opracowano na podstawie technologii stosowanej w laboratorium Dansk Beton Teknik [10]. Czteroetapowa procedura zapewnia dokładne wypełnienie rys, uzyskanie dobrego kontrastu pomiędzy rysami a materiałem je otaczającym, zapewnienie gładkości powierzchni oraz uzyskanie jednakowej ostrości obrazu na całej próbce.

Etap I – wycinanie próbek

Próbki poddawane procesowi impregnacji mają zwykle postać prostopadłościanów. Plastry wycinane są ze środka większych elementów (próbki sześciennie albo próbki walcowe – odwierty z konstrukcji) wg schematu pokazanego na rysunku 3 (strzałką oznaczono kierunku betonowania lub powierzchnię zewnętrzną).



Rys.3. Sposób wycinania prostopadłościennych próbek z większych elementów betonowych
Fig.3. Cutting of prismatic specimens out of large concrete elements

Etap II – suszenie próbek

Wycięta próbka jest czyszczona pod wodą bieżącą z drobin pozostałych po procesie cięcia, a następnie suszona w temp. 35 °C (± 2 °C). Suszenie próbek w wyższych temperaturach podczas przygotowywania ich do analizy rys nie jest zalecane, gdyż może powodować powstawanie dodatkowych mikrouszkodzeń i wpływać na wyniki analizy rys [5].

Etap III – przygotowanie do impregnacji

Po wysuszeniu próbka jest przyklejana do metalowej płytki pełniącej funkcję elementu mocującego do stołu elektromagnetycznego szlifierki, a następnie szlifowana w celu uzyskania równoległości górnej powierzchni próbki w stosunku do powierzchni dolnej. Po szlifowaniu próbka jest czyszczona pod wodą bieżącą i w wannie ultradźwiękowej, aby drobny, zeszlifowany materiał usunąć z powierzchni próbki oraz z wnętrza rys. Po oczyszczeniu próbka poddawana jest ponownemu suszeniu w temperaturze 35 °C (± 2 °C) przez 24 godziny.

Etap IV – impregnacja próbek

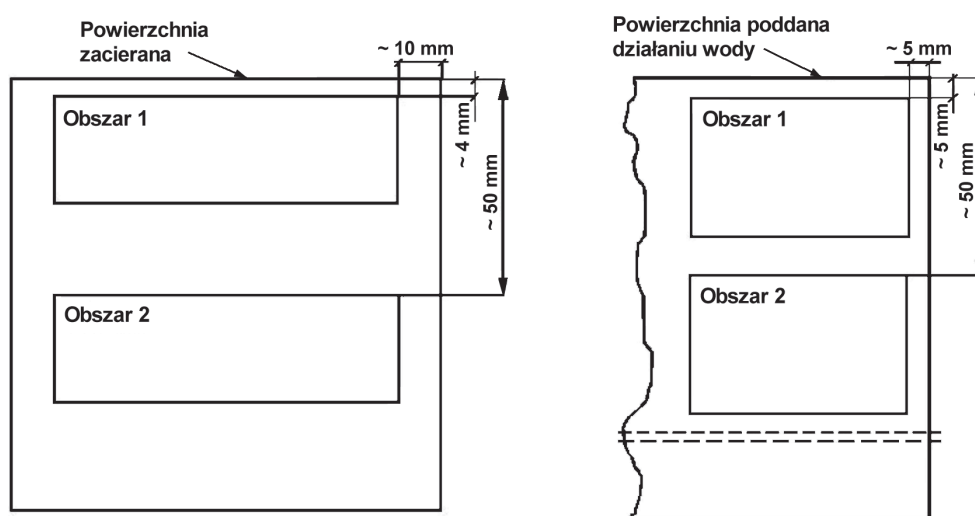
Do impregnacji próbek stosowana jest żywica epoksydowa wymieszana z żółtym barwnikiem fluorescencyjnym. Mieszanie wykonuje się przy użyciu mieszadła magnetycznego przez 24 godziny. Wysuszoną próbkę w grubej, szczelnej przezroczystej foliowej torbie, umieszcza się w komorze próżniowej; do torby wkłada się rurkę do przepływu żywicy z pojemnika znajdującego się poza komorą. W komorze przy pomocy pompy próżniowej wytwarzane jest ciśnienie -1 bar. W wyniku różnicy ciśnień panujących wewnątrz i na zewnątrz komory próżniowej, następuje przepływ żywicy epoksydowej wymieszanej z barwnikiem fluorescencyjnym i z utwardzaczem do torby z próbkami. Proces impregnacji trwa na tyle długo, aby umożliwić wniknięcie żywicy w strukturę betonu i wypełnienie wszelkich defektów, jednak na tyle krótko, aby nie doprowadzić do związania żywicy przed wyjęciem próbek z torby.

Po impregnacji próbka jest umieszczana w komorze klimatycznej. Po stwardnieniu żywicy próbka musi być szlifowana, aby usunąć nadmiar żywicy z powierzchni próbki, a następnie 1 lub 2 mm warstwy zaimpregnowanego betonu, w zależności od jakości materiału.

3.3. AKWIZYCJA CYFROWYCH OBRAZÓW POWIERZCHNI PRÓBEK

Powierzchnia zaimpregnowanej próbki poddawana jest obserwacji mikroskopowej w świetle ultrafioletowym. Źródłem światła jest żarówka UV zamontowana na obiektywie mikroskopu, czyli bezpośrednio nad próbką, z powierzchni której zbierane były obrazy. Próbkę umieszcza się pod mikroskopem nastawionym na odpowiednie powiększenie: obrazy do analizy pobiera się z dwóch obszarów na powierzchni próbki,

jak pokazano na rysunku 4 w przypadku plastra wyciętego z kostki o boku 100 mm lub z połowy kostki o boku 150 mm. Pierwszy obszar znajduje się w warstwie powierzchniowej próbki, natomiast drugi w odległości ok. 50 mm od powierzchni zewnętrznej próbki. Precyzyjną lokalizację obrazów na powierzchni próbki umożliwia sterowanie stolikiem pozycjonującym przy użyciu programu napisanego w środowisku programowania Image Pro Plus.



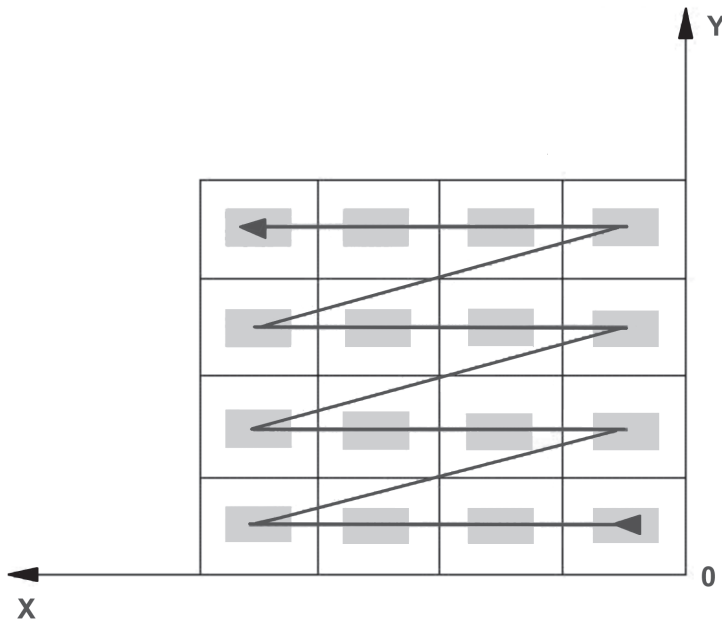
Rys.4. Wybór obszaru do analizy rys w przekroju próbek
Fig.4. Selection of area for crack analysis in cross section of specimens

Z każdego obszaru próbki (obszary 1 i 2) pobiera się 1, 2 lub 3 obrazy, odpowiednio przy powiększeniu 10, 30 lub 63 razy. Przy zwiększeniu powiększenia zmniejsza się pole obserwacji i aby przeprowadzić dokładną analizę i uniknąć wyników przypadkowych, konieczne jest zwiększenie liczby analizowanych obrazów. Typowe wymiary analizowanych obrazów próbek w zależności od powiększenia mikroskopu przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Wymiary analizowanych obrazów
Table 2. Dimensions of analyzed images

Powiększenie	Liczba obrazów w obszarze	Wymiary obrazu dla próbki o powierzchni		Wymiary jednej klatki
		100×100 mm	100×75 mm	
10×	1	25×61 mm	32×52 mm	6,325×4,692 mm
30×	2	8×20 mm	11×17 mm	2,108×1,564 mm
63×	2	4×10 mm	5×8 mm	1,054×0,782 mm

Po ustawieniu próbki na początku założonego układu współrzędnych stolik przemieszcza się wzdłuż osi X i Y o zadaną liczbę klatek obrazu, które były ze sobą sklejane. Każda następna klatka zbierana jest po przesunięciu stolika o rzeczywisty wymiar klatki już zebranej według schematu pokazanego na rysunku 5. Po sklejeniu wszystkich klatek stolik powraca do pozycji początkowej. Procesem przemieszczania stolika z próbką i sklejanego obrazów steruje się za pomocą programu napisanego w środowisku Image Pro Plus.



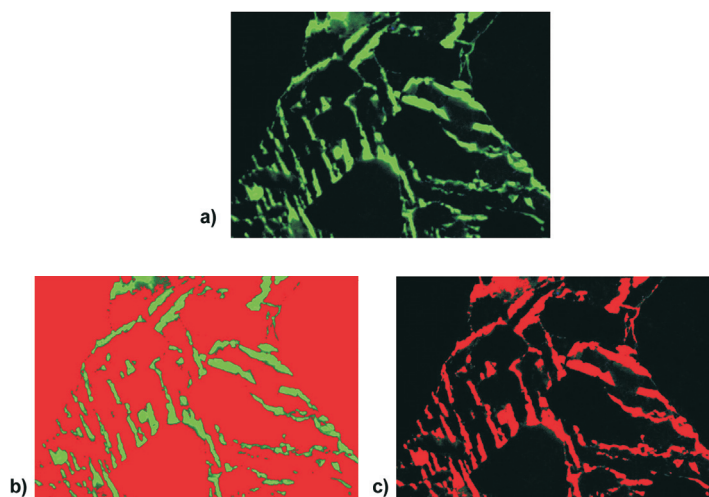
Rys.5. Sposób przemieszczania się stolika podczas zbierania kolejnych klatek obrazu z powierzchni próbki

Fig.5. Movement of scanning table during single image acquisition on specimen surface

4. PROCEDURA IDENTYFIKACJI GEOMETRYCZNYCH PARAMETRÓW RYS

Do identyfikacji rys na próbkach betonu wykorzystuje się koncepcje stereologii i komputerowej analizy obrazów. Aby informację zawartą w obrazie przetworzyć na formę opisu ilościowego struktury geometrycznej trzeba obraz przetworzyć. Pod pojęciem przetwarzania obrazu rozumie się wszystkie jego modyfikacje, zmieniające wartości poszczególnych punktów obrazu tak, aby został on oczyszczony z zakłóceń (szumów), artefaktów oraz aby wydobyć z niego cechy poszukiwane. Zapewnienie dokładności pomiarów parametrów opisujących strukturę rys w betonie wymaga przeprowadzenia badań mających na celu określenie efektów poziomego progowania podczas binaryzacji obrazu kolorowego oraz wpływu sposobu oświetlenia próbki podczas zbierania obrazu.

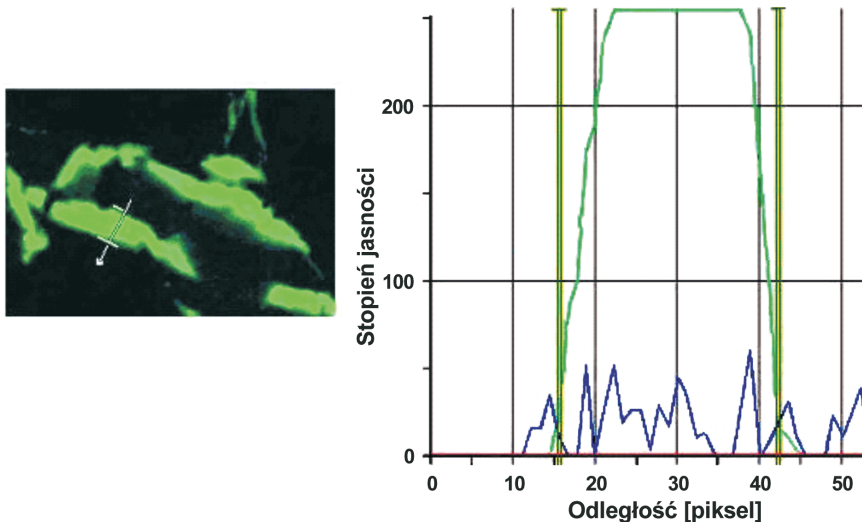
Operacją przekształcającą obraz kolorowy w binarny (czarno-biały) jest binaryzacja nazywana w systemie Image Pro Plus operacją segmentacji. Stanowi ona złożenie trzech operacji progowania (ang. *threshold*) wykonywanych oddzielnie na każdej składowej koloru (czerwona R, zielona G, niebieska B). Poziom progowania określa wyznaczenie wartości granicznych, będących liczbami całkowitymi z zakresu $0 \div 255$ dla każdej składowej, które pozwalają odróżnić rysy od pozostałych elementów struktury betonu. Określenie właściwych wartości granicznych progowania dla trzech składowych umożliwia wyodrębnienie z obrazu kolorowego obszarów spełniających pewne kryteria jednorodności, np. tło (kruszywo, zaczyn) – rysunek 6b lub zarysowania – rysunek 6c. Przyjętym kryterium jest kolor obszaru i stopień jasności pikseli. W ten sposób następuje oddzielenie poszczególnych obiektów (rys) wchodzących w skład obrazu i wyodrębnienie ich z tła, na którym są widoczne. Segmentacja jest bardzo ważnym elementem procedury analizy rys, gdyż stanowi etap przygotowawczy do rozpoznawania obiektów i detekcji ich cech, dlatego tak istotne jest określenie odpowiednich wartości progowania.



Rys.6. Wykrywanie różnych elementów obrazu przy różnych wartościach progowych;
 a) obraz wyjściowy (kolorowy),
 b) efekt segmentacji przy poziomie progowania dla barwy zielonej $0 \div 70$
 – wyodrębnienie kruszywa i zaczynu,
 c) efekt segmentacji przy poziomie progowania dla barwy zielonej $70 \div 255$
 – wyodrębnienie rys

Fig.6. Detection of various elements of image using various threshold levels;
 a) raw image (colour);
 b) segmentation effect for green threshold level 0-70
 – detection of aggregate and paste;
 c) segmentation effect for green threshold level 70-255 – detection of cracks

Stopień jasności każdego punktu obrazu porównuje się z wartością progową, po czym punkt ten jest przydzielony do jednej z dwóch kategorii: o przekroczonej wartości progowej lub nie przekroczonej. Wyboru wartości progowej dokonuje się na podstawie histogramu przedstawiającego liczbę punktów o jasności w zakresie od 0 do 255 dla barwy czerwonej, zielonej i niebieskiej, występujących na obrazie. W przypadku analizowanych obrazów piksele odpowiadające rysom (nieciągłościom w zaczynie) wykazują najwyższy stopień jasności dla barwy zielonej, a znikomy dla barwy niebieskiej i czerwonej. Natomiast w przypadku tła intensywność barwy zielonej jest minimalna. Widać to na rysunku 7, na którym przedstawiono linię (*Line Profile*) przechodzącą na obrazie przez rysę i tło (zaczyn cementowy) i obok wykres stopnia jasności pojedynczych pikseli wzdłuż tej linii dla każdej składowej koloru w zakresie jasności $0 \div 255$.



Rys.7. Stopień jasności pikseli wzdłuż linii przecinającej rysę dla trzech składowych koloru (czerwonej, zielonej, niebieskiej)

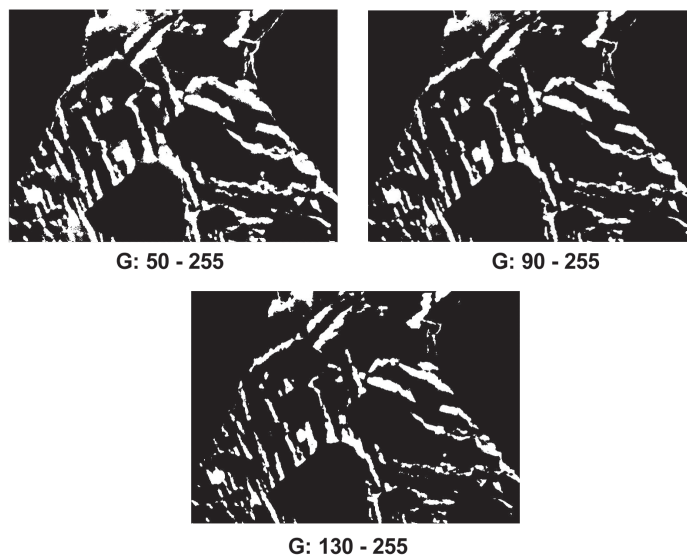
Fig.7. Distribution of pixel intensity along the line traversing a crack for three color components (red, green, blue)

Doświadczalnie ustalono, że wyodrębnienie zarysowań widocznych na obrazie kolorowym w postaci zielonych elementów (obiekty wypełnione żywicą epoksydową zawierającą żółty barwnik fluorescencyjny obserwowane w świetle ultrafioletowym) jest możliwe przy odpowiedniej regulacji progowania dla barwy zielonej w granicach $70-130 \div 255$ oraz przy stałym nastawieniu progowania w zakresie $0 \div 255$ dla barw zarówno czerwonej, jak i dla niebieskiej.

Stwierdzono, że kontrast obrazu rys wypełnionych żywicą fluorescencyjną i otaczającego zaczynu cementowego w dużym stopniu zależy od porowatości zaczynu.

W betonach o stosunkowo niskiej porowatości zaczynu kontrast obrazu rys jest wysoki, ponieważ występuje minimalne nasycenie zaczynu cementowego żywicą fluorescencyjną i wówczas łatwiej jest określić wartości progowania. W przypadku wysokiej porowatości zaczyn jest przesycony żywicą i intensywnie świeci w świetle ultrafioletowym. W związku z tym kontrast obrazu rys jest bardzo słaby i trudno jest wyodrębnić rysy spośród pozostałych defektów i obszarów świecącego zaczynu (obszarów o podwyższonej porowatości kapilarnej). W takich przypadkach prawdopodobne jest, że bardzo drobne rysy nie zostaną wykryte.

Na rysunku 8 przedstawiono przykład wyodrębnienia rys z obrazu przy różnym poziomie progowania dla zmiennego zakresu dla barwy zielonej (G) i stałego zakresu dla barw czerwonej i niebieskiej. Widać, że ze wzrostem wartości progowej zmniejsza się liczba i pole powierzchni wyodrębnionych elementów. Różne pole powierzchni rys przy różnych wartościach progowania będzie wpływało na wartości innych parametrów charakteryzujących strukturę rys, jak np.: długość czy szerokość.

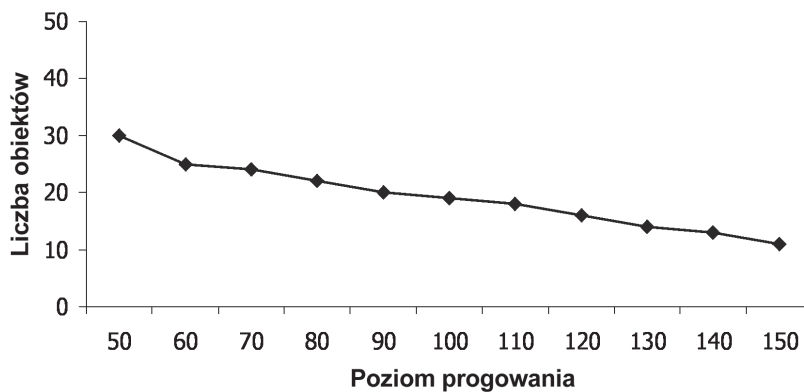


Rys.8. Efekt operacji segmentacji wykonanej przy różnym poziomie progowania w zakresie barwy zielonej

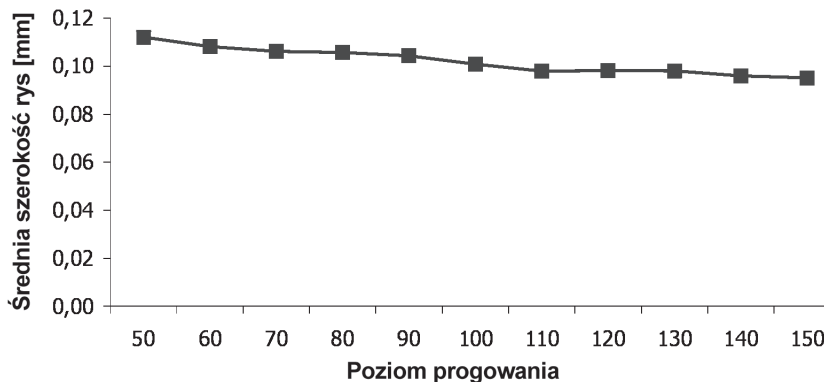
Fig.8. Effect of segmentation operation for various threshold levels for green colour

Badanie wpływu poziomu progowania na parametry charakteryzujące strukturę rys w betonie przeprowadza się na tym samym obrazie zebranym z jednej próbki. Na rysunku 9 widać, że zależność liczby rys od wartości progowej binaryzacji jest zbliżona do liniowej. Takich wyników można się było spodziewać, gdyż ze zmianą wartości progowej będzie związana zmiana wielkości obiektów pojawiających się na obrazie binarnym, na którym wykonywane są pomiary. Im wyższa wartość progowa tym mniejsza powierzchnia obiektów, a w związku z tym czasami utrata niektórych obiektów, czyli zmniejszenie ich liczby na obrazie binarnym. Jednak w przypadku rysy

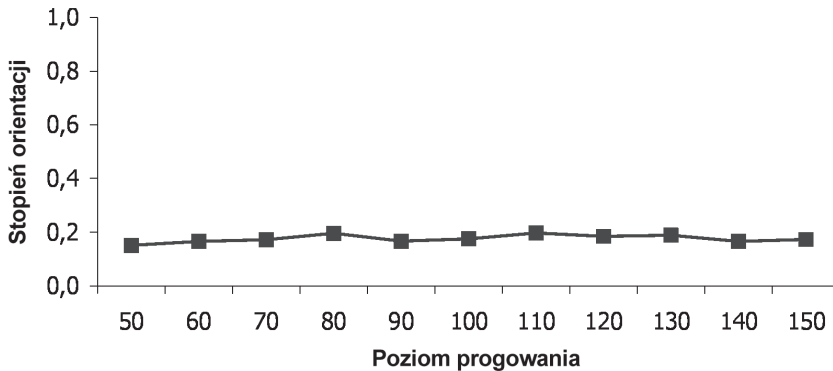
z wyraźnym przewężeniem, ze wzrostem wartości progowej nastąpi zanik najwęższego odcinka i przez to dojdzie do podziału rysy na dwa obiekty. Możliwy jest również przypadek, gdy na obrazie o gęstej sieci zarysowań przy zastosowaniu niskiej wartości progowej dochodzi do łączenia się licznych rys, które rozpoznawane są przez system analizy obrazu jako jeden obiekt. Nie jest możliwe rozdzielenie takiego obiektu na poszczególne rysy przez zastosowanie przekształceń morfologicznych i filtrów, w wyniku czego nie spełniając najczęściej kryteriów kształtu jest eliminowany z obrazu binarnego jako obiekt nie będący rysą. Ponadto stwierdzono, że ze zmianą poziomu progowania wiąże się zmniejszenie średniej szerokości rys (rys.10). Okazuje się, co widać na rysunku 11, że zmiana wartości progowej nie ma natomiast większego wpływu na stopień orientacji rys.



Rys.9. Zależność między poziomem progowania w zakresie barwy zielonej a liczbą rys
Fig.9. Relationship between the treshold level for green colour and the number of cracks



Rys.10. Zależność między poziomem progowania w zakresie barwy zielonej a średnią szerokością rys
Fig.10. Relationship between the treshold level for green colour and the average width of cracks



Rys.11. Zależność między poziomem progowania w zakresie barwy zielonej a stopniem orientacji rys

Fig.11. Relationship between the threshold level for green colour and the degree of crack orientation

W celu zapewnienia powtarzalności wyników i dokładności pomiarów ważne jest zachowanie stałych warunków oświetlenia. Dlatego dokonano sprawdzenia czy sposób oświetlenia próbki podczas zbierania obrazu w istotny sposób wpływa na wyniki pomiarów. Za warunek wyjściowy przyjęto zbieranie obrazów w świetle UV w pomieszczeniu całkowicie zaciemnionym bez dostępu światła białego. Dodatkowo zebrano obrazy w świetle UV w pomieszczeniu widnym z dostępem światła naturalnego oraz w pomieszczeniu zaciemnionym z dodatkowym źródłem światła białego w pobliżu stanowiska do zbierania obrazów (lampka boczna). Badania wykonano na trzech próbkach o różnej gęstości rys, z każdej próbki zbierane były trzy zdjęcia, każde w tym samym miejscu, ale przy innym oświetleniu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że powierzchnia rys w przypadku każdej próbki zmienia się nieznacznie przy różnych warunkach oświetlenia, a różnica w wynikach nie przekracza 4 %. Zatem można przyjąć, że źródło światła ultrafioletowego jest na tyle silne i w tak bliskiej odległości od obserwowanej powierzchni próbki, że jego intensywność nie jest znacząco zakłócana przez obecność w pobliżu światła białego.

5. ALGORYTM WYZNACZANIA GEOMETRYCZNEJ CHARAKTERYSTYKI RYS

5.1. WYZNACZANIE PARAMETRÓW UKŁADU RYS

Opracowany algorytm przetwarzania obrazu i wyznaczania parametrów geometrycznych rys w próbkach betonu jest napisany w języku programowania Auto-Pro [11] w środowisku programowania systemu Image Pro Plus. Zasada działania programu jest następująca. Obraz uzyskany ze sklejenia poszczególnych klatek obrazu poddany zostaje operacji segmentacji czyli progowania obrazu dla trzech składowych koloru

RGB, służącej do wyodrębnienia obiektów, które mają być poddane analizie (to najjaśniejsza faza obrazu odpowiadająca nieciągłościom wypełnionym żywicą fluorescencyjną) i otrzymania obrazu czarno-białego (binarnego), bez pośrednich odcieni szarości. Na obrazie binarnym jeden piksel definiujący defekt przyporządkowany jest wartości 1, a piksel tła przyjmuje wartość 0. Kolejnym etapem jest przeprowadzenie przekształceń morfologicznych na obiektach widocznych na obrazie. Przekształcenie „otwarcie” (open) ma na celu wygładzenie krawędzi przy jednoczesnym zachowaniu wielkości obiektów, rozdzielenie niektórych cząstek delikatnie się ze sobą stykających, a także usunięcie drobnych obiektów obrazu. Użycie filtra medianowego skutecznie usuwa zakłócenia (szumy) i nie niszczy przy tym obiektów

Elementy obrazu po przekształceniach morfologicznych są klasyfikowane według ich kształtu. Stanowi to ciąg dalszy eliminowania z obrazu zbędnych elementów. Identyfikacja rys odbywa się na podstawie współczynników kształtu dwuwymiarowych obiektów na obrazie, tj. współczynnika wydłużenia RR (*Radius Ratio*), określającego stosunek długości do szerokości, a także współczynnika kolistości Ro (*Roundness*). Objasnienie współczynników kształtu podano poniżej.

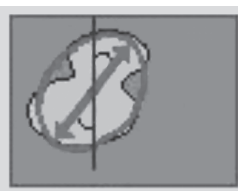


Radius Ratio – współczynnik opisujący stosunek maksymalnej odległości od środka ciężkości obiektu do jego granicy do minimalnej odległości od środka ciężkości obiektu do jego granicy.

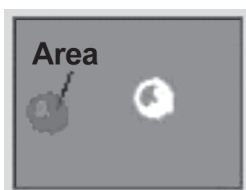


Roundness – współczynnik opisujący kolistość każdego obiektu zdefiniowany jako $(\text{obwód obiektu}^2 / 4 \cdot \pi \cdot \text{Area})$. Dla obiektów okrągłych współczynnik przyjmuje wartość 1, a dla obiektów o innym kształcie > 1 .

Doświadczalnie ustalono przybliżoną regułę, usuwająca z obrazu obiekty nie będące rysami - obiekty, charakteryzujące się współczynnikiem wydłużenia $RR < 3$ i współczynnikiem kolistości $Ro < 2$. Po odrzuceniu obiektów nie będących rysami, otrzymywany jest przetworzony obraz, na którym dokonuje się pomiaru następujących parametrów zidentyfikowanych obiektów obok wspomnianych wcześniej współczynników kształtu:



Angle – oznacza kąt, w zakresie od 0° do 180° , między osią pionową próbki i główną osią obiektu.

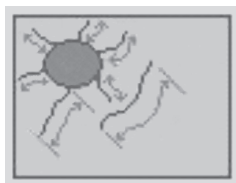


Area – określa pole powierzchni obiektu.



PerArea – współczynnik opisujący stosunek pola powierzchni obiektu do całkowitego pola powierzchni analizowanego obrazu.

Parametry te zostają określone dla każdego obiektu (rysy) widocznego na obrazie, a dane program przesyła do arkusza kalkulacyjnego. Następnie obrazy rys poddawane są szkieletyzacji. Punkty (piksele), których usunięcie nie powoduje zmiany ciągłości rys usuwane są z obrzeża obiektów przez przekształcenie w punkty tła. Proces jest powtarzany do momentu, aż wszystkie obiekty są zredukowane do ich szkieletu, czyli do szerokości jednego piksela. Szkielet obiektu jest zbiorem wszystkich jego punktów, które są jednakowo odległe od co najmniej dwóch różnych punktów na przeciwnych brzegach tego obiektu. Na podstawie szkieletu można określić orientację rys. Wykrywane są również punkty węzłowe, np. wynikające z przecięcia się rys lub ich rozgałęzienia. Następnie punkty te zostają usunięte w wyniku różnicy logicznej obrazu szkieletu rys i obrazu punktów węzłowych. Na otrzymanym szkielecie dokonywany jest pomiar kąta nachylenia oraz długości dendrytycznej każdego obiektu:



Dendritic length – określa długość dendrytyczną wszystkich obiektów o szerokości jednego piksela (suma długości boków pikseli budujących szkielet).

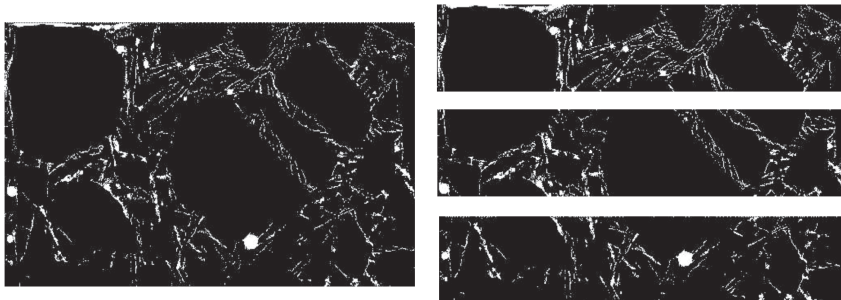
Te dane również zostają przesłane do arkusza kalkulacyjnego. Przy pomocy specjalnej procedury opracowanej w języku Visual Basic, w arkuszu kalkulacyjnym otrzymuje się zestaw parametrów charakteryzujących układ rys, podany w tabelicy 3. Taki opis układu rys umożliwi ilościową, a nie tylko jakościową ocenę stopnia zarysowania betonu i określenie orientacji rys.

Tablica 3. Zestaw parametrów geometrycznych charakteryzujących układ rys
 Table 3. The set of geometrical parameters characterizing the crack system

Lp.	Nazwa parametru, symbol, jednostki	Opis
1	Długość rys L [mm]	całkowita długość dendrytyczna rys zidentyfikowanych na obrazie
2	Średnia szerokość rys W [mm]	stosunek pola powierzchni wszystkich rys do całkowitej długości dendrytycznej.
3	Pole powierzchni rys A [mm ²]	pole powierzchni wszystkich rys na obrazie
4	Gęstość rys L_A [mm/mm ²]	stosunek całkowitej długości dendrytycznej rys do pola powierzchni analizowanego obrazu
5	Udział powierzchniowy A_A [mm ² /mm ²]	stosunek pola powierzchni wszystkich rys do całkowitego pola powierzchni obrazu.
6	Orientacja układu rys w postaci „różny kierunków rys”	rozkład długości rys nachylonych pod danym kątem (co 15°).

5.2. WYZNACZANIE PARAMETRÓW UKŁADU RYS Z PODZIAŁEM NA TRZY PODOBRAZY

W celu przeprowadzenia dokładniejszej analizy rys i sprawdzenia rozkładu gęstości rys na powierzchni analizowanego obrazu opracowano algorytm, pozwalający na automatyczny podział obrazu na 3 podobrazy (rys. 12) i wyznaczenia w każdym z nich parametrów opisujących stopień zarysowania betonu. W wyniku takiej analizy zamiast jednej wartości każdego parametru stanowiącej średnią dla całego obrazu, otrzymuje się trzy wartości każdego parametru (jedna dla każdego podobrazu), przez co opis układu rys w trzech obszarach obrazu staje się dokładniejszy. Program został napisany w języku programowania Auto-Pro [11] działającym w systemie Image Pro Plus.



Rys.12. Procedura podziału obrazu na trzy podobrazy
 Fig.12. Procedure of separation of image into three subimages

Na wyjściowym obrazie kolorowym wykonuje się operację segmentacji, przekształcenia morfologiczne, filtrację oraz analizę kształtu obiektów. Na analizowanym obrazie pozostają obiekty uznawane za rysy. Wówczas z obrazu zostaje wydzielony pierwszy podobraz, na którym dokonywany jest pomiar pierwszych pięciu parametrów podanych w tabelicy 3, a dane przesyłane są do arkusza kalkulacyjnego. Na obrazie wykonywana jest szkieletyzacja obiektów i pomiar kąta nachylenia i długości dendrytycznej szkieletu każdego obiektu, a dane również zostają przesłane do arkusza kalkulacyjnego. Następnie wydzielany jest drugi podobraz, na którym wykonuje się te same operacje jak w przypadku podobrazu pierwszego, a potem zostaje wydzielony obraz trzeci z powtórzeniem operacji wykonywanych na podobrazach poprzednich. Stosując makrokomentę w języku Visual Basic w arkuszu kalkulacyjnym otrzymuje się wyniki dla trzech podobrazów w postaci takich samych parametrów jak w tabelicy 3.

5.3. OKREŚLENIE STOPNIA ORIENTACJI METODĄ SIECZNYCH SKIEROWANYCH

Aby określić orientację układu rys na podstawie stereologicznej metody siecznych skierowanych, stosowanej do charakteryzowania gęstości i orientacji rys [12 - 14], opracowano algorytm programu działającego w sposób następujący. Na obrazie przedstawiającym szkielet rys wykonywana jest operacja logiczna „AND” (iloczyn logiczny) z obrazem szeregu wzajemnie równoległych i równoodległych linii (sieczne) o grubości jednego piksela, tworzących określony kąt Θ_i z osią orientacji (wyróżniony kierunek). Kąt nachylenia siecznych zmienia się o wartość 15° w zakresie od 0° do 180° . Obraz siecznych równy jest wielkości obrazu rys. W wyniku przeprowadzenia operacji logicznej powstaje nowy obraz (rys. 13) przedstawiający punkty przecięcia siecznych z rysami (punkty wspólne dwóch obrazów). Dla każdego kąta nachylenia siecznych zliczana jest liczba punktów wspólnych oraz sumaryczna długość siecznych, a otrzymane dane przekazywane są do arkusza kalkulacyjnego. Przy zastosowaniu opracowanej makrokomenty, otrzymywany jest wynik w postaci stopnia orientacji układu rys ω oraz orientacji analizowanych obiektów przedstawionej w postaci „róży liczby przecięć”. Stopień orientacji układu rys ω oblicza się według wzoru:

$$\omega = \frac{(P_{L \max} - P_{L \min})}{P_{L \max} + \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \cdot P_{L \min}}, \quad (0 \leq \omega \leq 1), \quad (1)$$

gdzie:

$P_{L \max}$ – maksymalna wartość $P_L(\Theta)$ przy zmieniającym się kącie nachylenia siecznych Θ ,

$P_{L \min}$ – minimalna wartość $P_L(\Theta)$ przy zmieniającym się kącie nachylenia siecznych Θ ,

przy czym:

P_L – względna liczba przecięć tj. na jednostkę długości siecznych, [mm^{-1}].

Wartość $\omega = 0$ uzyskuje się w przypadku izotropowego układu rys (brak orientacji), a wartość $\omega = 1$ w przypadku układu anizotropowego (wszystkie rysy mają jednakową orientację).

Róża przedstawiana jest w połowie swojego zakresu od 0° do 180° ze względu na symetrię układu. W przypadku układu izotropowego róża liczby przecięć ma kształt koła ze środkiem w początku układu współrzędnych biegunowych. W przypadku wystąpienia orientacji rys kształt róży liczby przecięć odchyła się od kształtu koła.



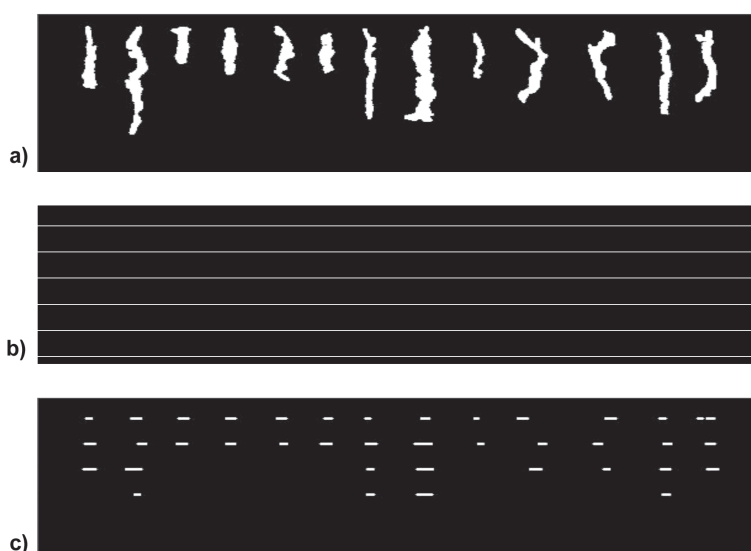
Rys.13. Procedura określania orientacji układu rys w wyniku przecięcia rys i układu siecznych:

- obraz rys o grubości 1 piksela,
 - obraz siecznych o kącie nachylenia 0° ,
 - obraz powstały w wyniku operacji iloczynu logicznego obrazów (a) i (b)
- Fig.13. Procedure of estimation of crack pattern orientation by means of the oriented secants method:
- image of cracks of 1 pixel width,
 - image of oriented secants at the inclination of 0° ,
 - image resulting from logical binary operations between two images

5.4. OKREŚLENIE ROZKŁADU SZEROKOŚCI RYS

Do analizy szerokości rys przygotowano algorytm programu, umożliwiający określenie rozkładu szerokości rys, działający w następujący sposób. Na obrazie binarnym przedstawiającym rysy wykonuje się operację sortowania obiektów, powodującą

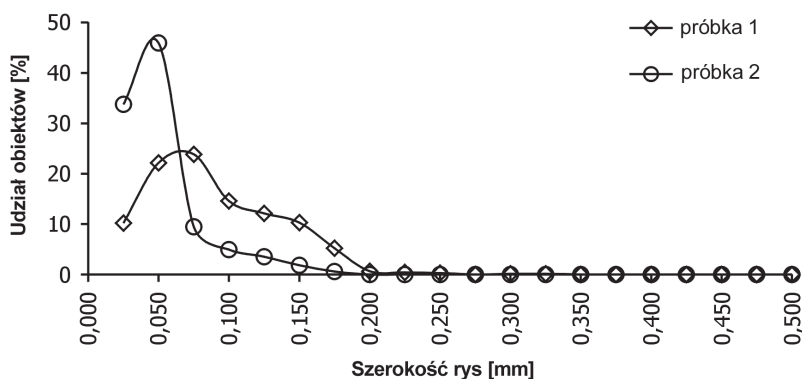
uszeregowanie pionowe obiektów względem ich głównej osi i ułożenie w rzędach. Nowy obraz poddawany jest operacji logicznej „AND” z obrazem przedstawiającym układ linii względem siebie równoległych i równoodległych; grubość każdej linii równa jest wielkości jednego piksela. Oba obrazy mają jednakowe wymiary. Po wykonaniu operacji iloczynu logicznego otrzymuje się trzeci obraz przedstawiający część wspólną obrazu rys i linii w postaci odcinków (rys. 14). Na tym obrazie wykonuje się pomiar liczby odcinków i ich długości, która w rzeczywistości stanowi szerokość rysy w miejscu jej przecięcia przez układ linii. Uzyskane dane przesyłane są do arkusza kalkulacyjnego i przy użyciu procedury w języku Visual Basic wyznacza się udział procentowy odcinków o określonej długości w przedziale zmieniającym się co 25 μm w zakresie do 0,5 mm i przedstawiony na wykresie.



Rys.14. Ilustracja sposobu określania rozkładu szerokości rys (c) w wyniku logicznego iloczynu obrazu uszeregowanych rys (a) i obrazu układu linii (b)

Fig.14. Illustration of estimation of crack width distribution (c) using logical operation of aligned cracks image (a) and image of parallel lines (b)

Przykłady rozkładów szerokości rys pokazano na rysunku 15. Taka ilościowa analiza rozkładu szerokości rys pozwala przypuszczać, że próbka 2 o mniejszym udziale szerszych rys będzie nieprzepuszczalna dla mediów ciekłych lub wykaże bardzo małą przepuszczalność w odróżnieniu od próbki 1 charakteryzującej się większym udziałem szerszych rys.



Rys.15. Przykłady rozkładów szerokości rys w przedziałach zmieniających się co 25 μm w zakresie do 0,5 mm

Fig.15. Examples of distribution of crack widths up to 0.5mm in 25 μm intervals

6. WERYFIKACJA PRZYDATNOŚCI METODY CHARAKTERYZOWANIA UKŁADU RYS

6.1. EFEKTY CYKLICZNEGO ZAMRAŻANIA I ODMRAŻANIA

Wstępne sprawdzenie poprawności opracowanej metody identyfikacji i analizy rys przeprowadzono na próbkach betonów poddanych oddziaływaniu różnych czynników zewnętrznych. Zastosowano dwie różne metody wywoływania uszkodzeń w betonach, intencjonalnie wybrane, aby spowodować zarysowania o diametralnie różnej orientacji:

- izotropowe cykliczne oddziaływanie termiczne na próbki betonu nasycone wodą (zamrażanie w powietrzu w temperaturze $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i odmrażanie w wodzie w temperaturze $20\text{ }^{\circ}\text{C}$),
- jednokierunkowe ściskanie próbek przy pomocy maszyny wytrzymałościowej do określonego poziomu obciążenia utrzymywanego przez zadany czas.

Opis próbek i przeprowadzonych badań doświadczalnych

Próbki betonu B30 i B40 zostały wykonane z mieszanki betonowej wyprodukowanej w wytwórni betonu towarowego według recept podanych w tablicy 4. Skład betonu B30 został zaprojektowany tak, aby uzyskać wysoką mrozoodporność, natomiast B40 odpowiadał powszechnie stosowanym betonom do konstrukcji żelbetowych budynków. Próbki sześciennie o boku 100 mm po 28 dniach dojrzewania w warunkach normowych poddano cyklicznemu zamrażaniu i odmrażaniu przerywając proces po 81 cyklach. Cykliczne zamrażanie i odmrażanie próbek betonowych przeprowadzono w komorze klimatycznej metodą odpowiadającą badaniu mrozoodporności według normy PN-88/B-06250. Równocześnie próbki – świadki przechowywano w wodzie w temperaturze $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tablica 4. Skład mieszanki betonu towarowego B30 i B40
 Table 4. The composition of ready mix concrete of strength class B30 and B40

Beton	Cement	Kruszywo drobne		Kruszywo grube		Woda	Domieszki
	kg/m ³	kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³	kg/m ³
B30	CEM III/A 32,5 Górażdże	piasek 0-2 mm	piasek kwarcowy 1,4-2 mm	żwir 2-8 mm	bazalt 4-8 mm	194	Betostat
	382	500	269	502	491		1,5
B40	CEM I 32,5 R Strzelce Opolskie	piasek 0-2 mm		żwir 2-16 mm		165	Skorbet
	356	659		1233			5,4

Wytrzymałość betonu na ściskanie oznaczono według PN-88/B-06250 na kostkach 100 mm po 28 dniach dojrzewania, a następnie po przeprowadzeniu 81 cykli zamrażania i odmrażania na próbkach cyklicznie zamrażanych i odmrażanych oraz na próbkach – świadkach.

Po zakończeniu 81 cykli zamrażania i odmrażania próbki wyjęto z komory klimatycznej i poddano dokładnej obserwacji powierzchni zewnętrznych. Gołym okiem nie stwierdzono żadnych rys na powierzchni próbek betonu B30, natomiast zauważono nieliczne rysy na powierzchni próbek betonu B40. Według wcześniej opisanej procedury z próbek cyklicznie zamrażanych i odmrażanych oraz próbek – świadków wycięto próbki do identyfikacji rys i poddano impregnacji. Następnie z każdej próbki zebrano jeden obraz rys w pobliżu powierzchni zewnętrznej próbki (powierzchni zacieranej) oraz wykonano analizę rys.

Wyniki badania wytrzymałości i analizy układu rys

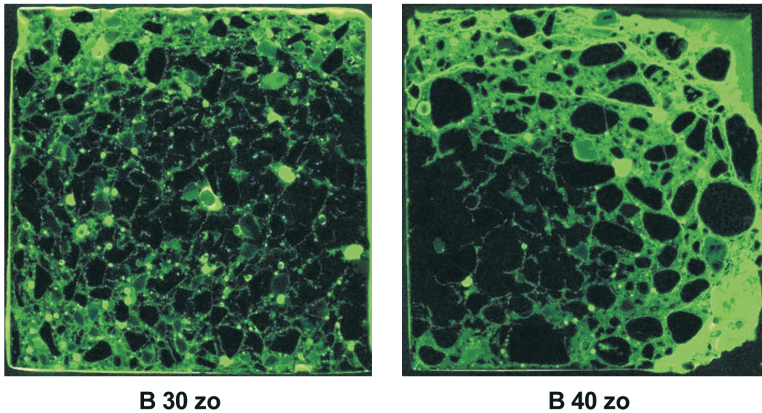
Wyniki wytrzymałości betonu na ściskanie podano w tablicy 5. Wytrzymałość betonu po 28 dniach wynosiła $53,5 \pm 1,7$ MPa w przypadku projektowanego betonu B30 oraz $49,4 \pm 0,3$ MPa w przypadku projektowanego betonu B40. Próbki betonu poddane cyklicznemu zamrażaniu i odmrażaniu, po 81 cyklach mrożenia wykazały mniejsze wytrzymałości w porównaniu z próbkami – świadkami. Spadek wytrzymałości w przypadku betonu B30 wynosił około 7 %, a w przypadku betonu B40 – około 33 %.

Makroskopowe obrazy zarysowań próbek betonów B30zo i B40zo w formie fotografii wykonanych w świetle ultrafioletowym po impregnacji żywicą epoksydową z barwnikiem fluorescencyjnym pokazane są na rysunku 16. Wyniki oznaczenia geometrycznych parametrów układu rys zestawiono w tablicy 6.

Tablica 5. Wytrzymałość na ściskanie próbek betonu towarowego B30 i B40 po 81 cyklach zamrażania i odmrażania oraz próbek – świadków
 Table 5. The compressive strength of concrete specimens B30 and B40 after 81 freezing and thawing cycles and the compressive strength of reference specimens

Klasa betonu	Oznaczenie serii	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Wartość średnia [MPa]	Odchylenie standardowe [MPa]
B30	B30s	54,04; 52,46; 54,65	53,7	1,1
	B30zo	53,74; 46,78; 48,73	49,8	3,6
B40	B40s	54,09; 41,47; 51,71	49,1	6,7
	B40zo	37,72; 24,11; 36,62	32,8	7,6

s – próbki świadki
 zo – próbki cyklicznie zamrażane w powietrzu w temperaturze -20°C i odmrażanie w wodzie w temperaturze 20°C



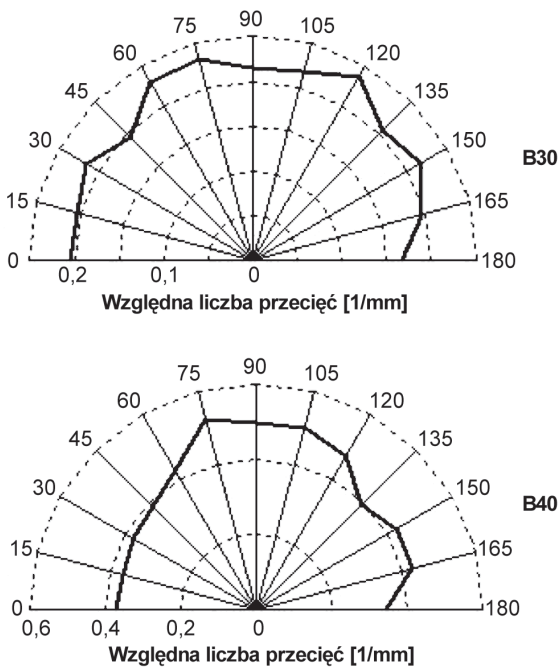
Rys.16. Widok powierzchni próbek betonów B30 i B40, które poddano cyklicznemu zamrażaniu i odmrażaniu
 Fig.16. Surface view of concrete specimens B30 and B40 subjected to cyclic freezing and thawing

Wyniki analizy wskazują, że gęstość rys w próbkach betonu B30 była blisko dwukrotnie mniejsza w porównaniu z próbkami betonu B40, który wykazały większy spadek wytrzymałości wskutek cyklicznego zamrażania i odmrażania. Również średnia szerokość rys i udział powierzchniowy wykazały większe wartości w przypadku próbek betonu B40 niż w przypadku betonu B30. Nie wykryto rys mierzalnych w próbkach świadkach.

Tablica 6. Wyniki oznaczenia geometrycznej charakterystyki układu rys w betonie B30 i B40
 Table 6. Results of determination of geometrical characteristics of crack system in B30 and B40 concrete

Oznaczenie serii	Długość dendrytyczna [mm]	Powierzchnia [mm ²]	Średnia szerokość [mm]	Gęstość [mm/mm ²]	Udział powierzchniowy	Stopień orientacji
B30 s	–	–	–	–	–	–
B30 zo	473,01	46,98	0,099	0,396	0,039	0,209
B40 s	–	–	–	–	–	–
B40 zo	867,69	123,83	0,143	0,691	0,099	0,254

Stopień orientacji rys przedstawiono na rysunku 17. W przypadku betonu B40 w pobliżu powierzchni zewnętrznej zaobserwowano większą liczbę rys zorientowanych równoległe lub w kierunkach zbliżonych do równoległych do zacieranej powierzchni próbki. Zostało to również odzwierciedlone na róży liczby przecięć. Wyraźnie widać, że w przypadku sieciowych skierowanych pod kątem od 75° do 120° do powierzchni zewnętrznej uzyskano największe liczby przecięć z siatką rys. W przypadku betonu B30 różnice w liczbie przecięć nie są znaczne i jest to skorelowane z większą odpornością na cykliczne zamrażanie i odmrażanie.



Rys.17. Róże liczby przecięć siatki rys w próbkach betonu B30zo i B40zo z układem sieciowych skierowanych w odstępach co 15° w zakresie 0-180°
 Fig.17. The rose of intercepts of crack system in concrete specimens B30zo and B40zo with the set of reference lines rotating from 0° to 180° by 15° steps

Wyniki dokładniejszej analizy rys z podziałem obrazu na 3 podobrazy przedstawiono w tabelicy 7. W podobrazach znajdujących się najbliżej powierzchni zewnętrznej mrożonej próbki zauważono największą gęstość rys zarówno w próbkach betonu B30, jak i betonu B40. Im dalej od powierzchni próbki, tym gęstość rys była mniejsza. W betonie B30 średnia szerokość rys dla trzech podobrazów była podobna i mieściła się w zakresie od 0,098 mm do 0,102 mm. Natomiast w betonie B40 średnia szerokość rys wykazywała pewną zmienność na poszczególnych podobrazach i osiągnęła największą wartość w strefie najbardziej uszkodzonej czyli najbliżej powierzchni zewnętrznej.

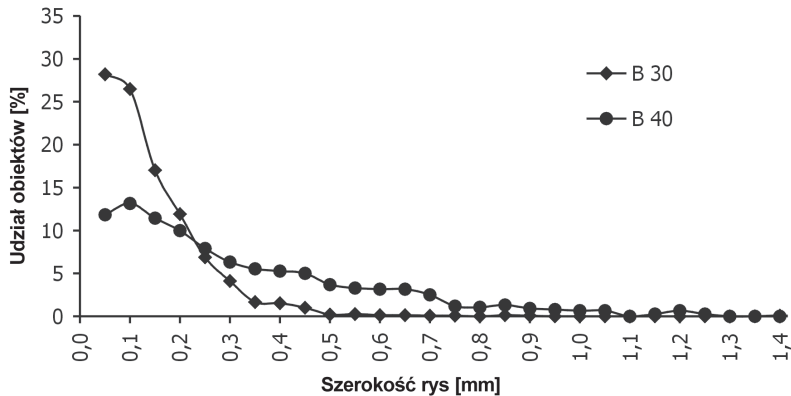
Tablica 7. Wyniki oznaczenia geometrycznej charakterystyki układu rys w próbkach betonu B30zo i B40zo przy zastosowaniu procedury podziału obrazu na 3 podobrazy

Table 7. Results of determination of geometrical characteristics of crack system in concrete specimens B30 and B40 using the procedure of image subdivision in 3 subimages

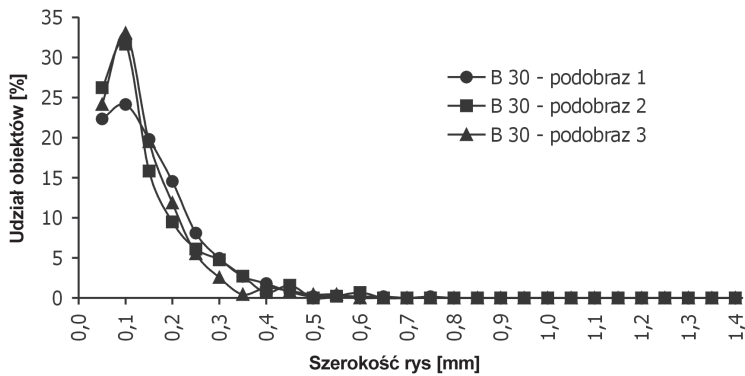
Oznaczenie próbki i podobrazu	Długość dendrytyczna [mm]	Powierzchnia [mm ²]	Średnia szerokość [mm]	Gęstość [mm/mm ²]	Udział powierzchniowy	
B30 zo	1	270,80	26,62	0,098	0,675	0,066
	2	133,77	13,58	0,102	0,333	0,034
	3	68,44	6,78	0,099	0,174	0,017
B40 zo	1	328,26	59,74	0,182	0,783	0,142
	2	271,64	35,56	0,131	0,648	0,085
	3	257,81	28,28	0,110	0,620	0,068

Określenia rozkładu szerokości rys w betonie przeprowadzono na jednym obrazie i jego trzech podobrazach, a wyniki przedstawiono w postaci procentowego udziału obiektów, których wymiary mieściły się w zakresie od 0 mm do 1,4 mm w przedziałach co 0,05 mm. Rozkłady szerokości rys na jednym obrazie w próbkach betonu B30zo i B40zo pokazano na rysunku 18, a w przypadku analizy podobrazów zestawiono na rysunkach 19 i 20.

Próbki betonu B30 charakteryzowały się największym udziałem rys, których wymiary mieszczą się w przedziale do 0,2 mm. Udział rys w zakresie większych szerokości był znacznie mniejszy, a powyżej 0,5 mm niemal równy zero. W przypadku betonu B40 udział rys o najmniejszych szerokościach był również największy, ale jednak o połowę mniejszy w porównaniu z betonem B30. Wyraźny był natomiast większy udział rys o szerokościach w przedziałach od 0,3 mm do 0,7 mm. Zaobserwowano również rysy o szerokościach nawet w granicach 1mm.

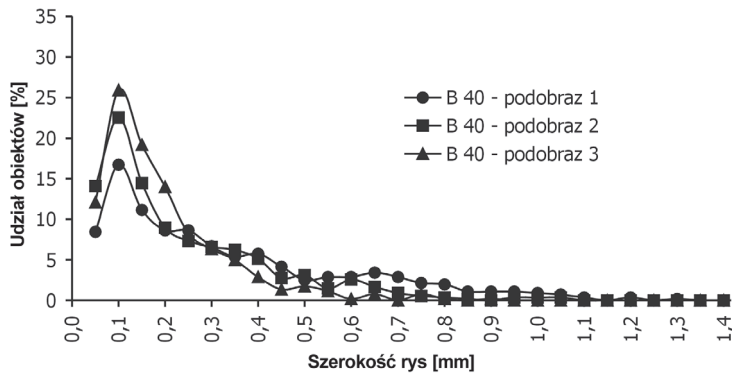


Rys.18. Rozkład szerokości rys w betonach cyklicznie zamrażanych i odmrażanych B30 i B40, wyniki z analizy jednego obrazu B40, wyniki z analizy jednego obrazu Fig.18. Distribution of crack widths in concrete specimens B30 and B40 exposed to cyclic freezing and thawing (results of single image analysis)



Rys.19. Rozkład szerokości rys w betonie cyklicznie zamrażanym i odmrażanym B30, wyniki z analizy trzech podobrazów Fig.19. Distribution of crack widths in concrete specimens B30 exposed to cyclic freezing and thawing (results of three subimages analysis)

Analiza rozkładu szerokości rys w betonie B30 wykonana na trzech podobrazach potwierdziła największy udział rys o najmniejszych szerokościach, a powyżej 0,6 mm udział obiektów jest prawie równy 0. W przypadku betonu B40 stwierdzono największy udział obiektów o najmniejszych szerokościach na podobrazach bardziej oddalonych od powierzchni zewnętrznej próbki. Im bliżej powierzchni zewnętrznej (podobraz 1), tym mniejszy był udział obiektów o mniejszych szerokościach, a większy – obiektów o większych szerokościach w porównaniu z podobrazami kolejnymi 2 i 3.



Rys.20. Rozkład szerokości rys w betonie cyklicznie zamrażanym i odmrażanym B40, wyniki z analizy trzech podobrazów

Fig.20. Distribution of crack widths in concrete specimens B40 exposed to cyclic freezing and thawing (results of analysis of three subimages)

6.2. EFEKTY JEDNOKIERUNKOWEGO OBCIĄŻENIA MECHANICZNEGO

Opis przeprowadzonych badań

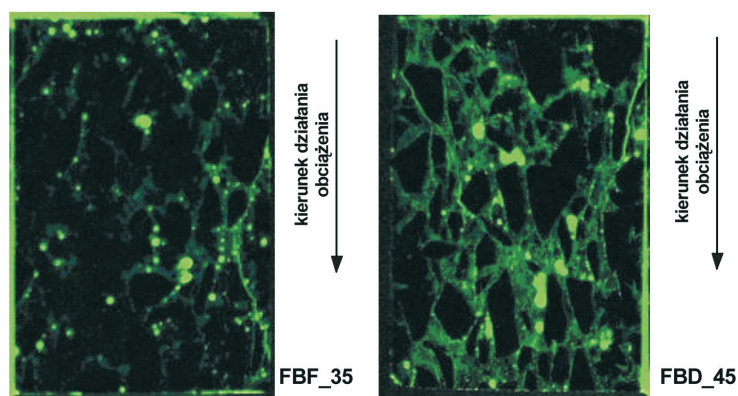
Do badania rys wywołanych w sposób mechaniczny wybrano próbki dwóch serii fibrobetonów wykonanych w laboratorium IPPT PAN w ramach innego programu badawczego [15]. Fibrobeton z kruszywem bazaltowym do 16 mm wykonano przy zawartości cementu CEM I 42.5 wynoszącej 450 kg/m^3 i zawartości wody 186-200 kg/m^3 , przy zastosowaniu następujących włókien:

- seria FBF_35 – włókna „Fibraflex” w ilości 35 kg/m^3 ,
- seria FBD_45 – włókna stalowe haczykowate (50/0,65) w ilości 45 kg/m^3 .

W wieku 90 dni wytrzymałość na osiowe rozciąganie betonu w przypadku obu serii wynosiła w przybliżeniu 4 MPa. Próbki o kształcie prostopadłościanu o wymiarach $30 \times 50 \times 70 \text{ mm}$ poddano obciążeniu ściskającemu w maszynie wytrzymałościowej FPZ 100. Po ustaleniu siły niszczącej dla każdej serii próbek, kolejne próbki obciążane były do poziomu 90 % siły niszczącej. Pod zadaniem obciążeniem przetrzymywano próbki przez 15-25 minut. Po odciążeniu, próbki poddano impregnacji żywicą fluorescencyjną, a następnie wykonano analizę struktury rys betonów w świetle ultrafioletowym na jednym obrazie pobranym wzdłuż dłuższej krawędzi próbki (kierunek działania siły).

Wyniki analizy rys

Obrazy rys na powierzchni próbek pokazano na rysunku 21, a wyniki analizy rys w próbkach przedstawiono w tablicy 8. Próbką betonu FBF_35 (z mikrozbrojeniem włóknami o wysokiej smukłości i dużej adhezji do zaczynu cementowego) charakteryzowała się mniejszą gęstością rys i ich mniejszą średnią szerokością niż próbka FBD_45, która była dłużej poddana obciążeniu ściskającemu. W obu przypadkach znaczna część zaobserwowanych rys wykazała orientację zbliżoną lub zgodną z kierunkiem działania siły ściskającej, co znalazło potwierdzenie w wyznaczonym stopniu orientacji i zostało również przedstawione w postaci róży liczby przecięć (rys. 22).



Rys.21. Widok powierzchni próbek poddanych działaniu obciążenia ściskającego (wymiary powierzchni 50 x 70 mm, widoczne liczne pory powietrzne)

Fig.21. Surface view of concrete specimens subjected to compressive loading (the size of surface 50 by 70 mm, multiple air voids visible)

Tablica 8. Wyniki oznaczenia geometrycznych parametrów rys w betonie FBF_35 i FBD_45

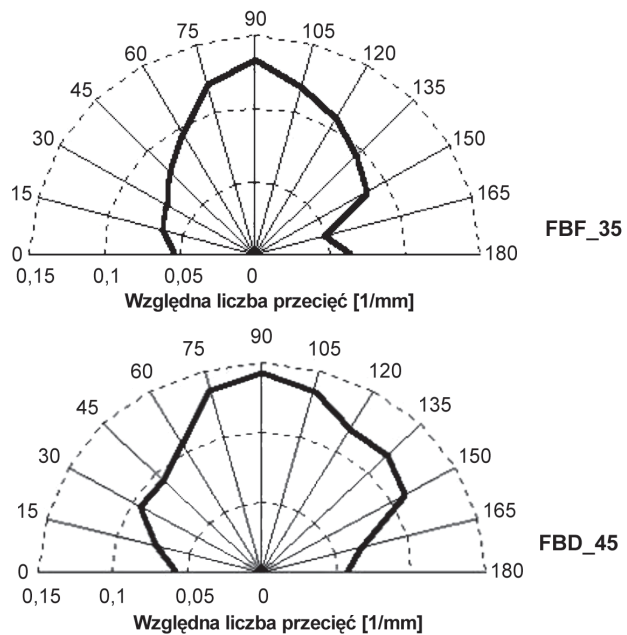
Table 8. Results of determination of geometrical characteristics of cracks in concrete FBF_35 and FBD_45

Seria	Obciążenie		Długość dendryt. [mm]	Powierzch. [mm ²]	Średnia szerokość [mm]	Gęstość [mm/mm ²]	Udział powierzch.	Stopień orientacji
	[% siły niszczącej]	czas działania [min]						
FBF_35	90 %	15	154,83	14,92	0,096	0,130	0,012	0,513
FBD_45	90 %	25	227,14	28,41	0,125	0,190	0,024	0,564

Widoczne jest, że w przypadku betonu mniej uszkodzonego (FBF_35) największą liczbę przecięć rys z układem siecznych uzyskano w przypadku siecznych ułożonych prostopadłe lub w kierunku zbliżonym do prostopadłego w odniesieniu do kierunku działania siły. W przypadku betonu wykazującego większe uszkodzenie (FBD_45) pojawiły się liczne dodatkowe rysy, łączące główne rysy ułożone zgodnie z kierunkiem działania obciążenia.

Rys.22. Różne liczby przecięć siatki rys betonów FBF_35 i FBD_45 z układem siecznych skierowanych w odstępach co 15 ° w zakresie 0-180 °

Fig.22. The rose of intercepts of crack system in concrete specimens FBF_35 and FBD_45 with the set of reference lines rotating from 0 ° to 180 ° by 15 ° steps



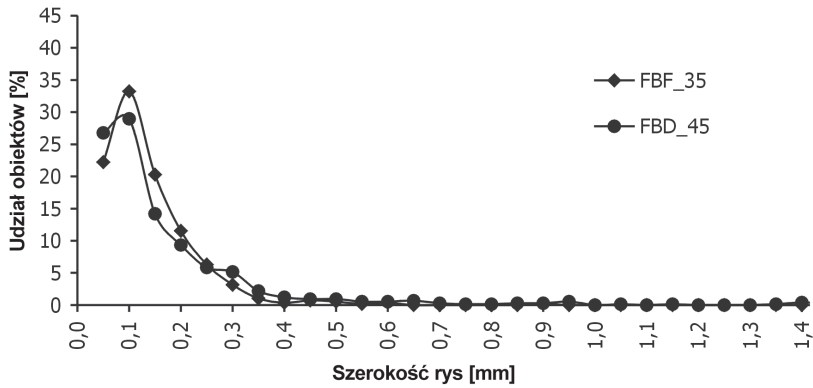
Stosując procedurę podziału obrazu na 3 podobrazy określono geometryczne parametry rys, uzyskując wyniki podane w tabelicy 9. Największe uszkodzenie próbek wystąpiło przy ich krawędzi, na co wskazuje większa gęstość rys na podobrazach 1 i 2 w porównaniu z podobrazem 3. Rysy znajdujące się bliżej krawędzi próbki wykazały większą średnią szerokość niż rysy występujące w pobliżu środka próbki.

Tablica 9. Wyniki oznaczenia geometrycznych parametrów rys w betonie FBF_35 i FBD_45 przy podziale obrazu na 3 podobrazy

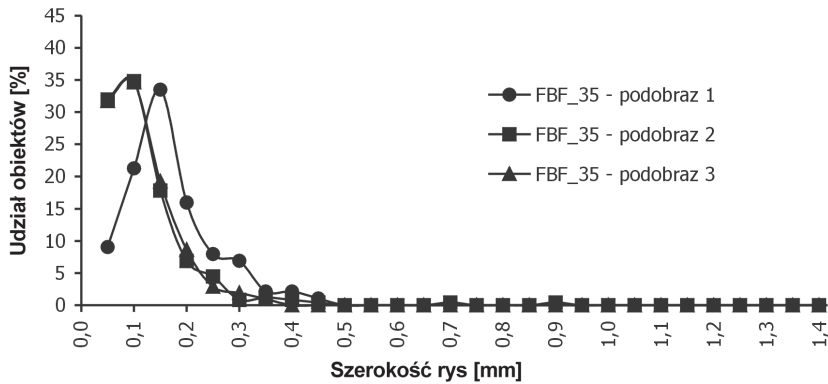
Table 9. Results of determination of geometrical characteristics of cracks in concrete FBF_35 and FBD_45 using the procedure of image subdivision in 3 subimages

Oznaczenie próbki i podobrazu	Długość dendrytyczna [mm]	Powierzchnia [mm ²]	Średnia szerokość [mm]	Gęstość [mm/mm ²]	Udział powierzchniowy	
B30 zo	1	65,24	7,65	0,117	0,163	0,019
	2	64,41	5,35	0,083	0,161	0,013
	3	25,18	1,92	0,076	0,064	0,005
B40 zo	1	154,40	21,98	0,143	0,385	0,054
	2	57,70	5,19	0,090	0,144	0,013
	3	15,03	1,24	0,083	0,038	0,003

Wyniki tej analizy rozkładu szerokości rys w próbkach przedstawiono na rysunkach 23 – 25.

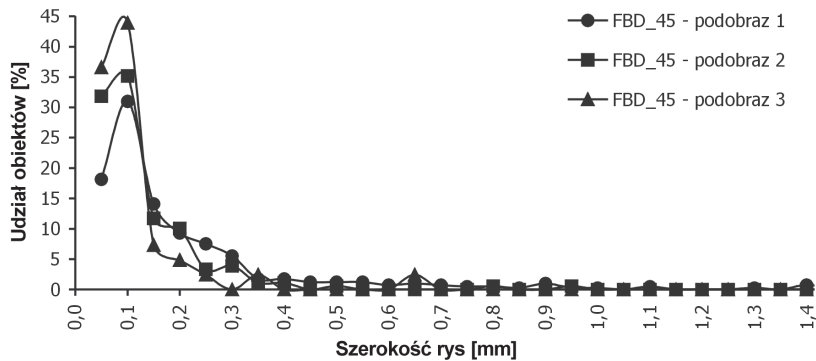


Rys.23. Rozkład szerokości rys w betonach poddanych działaniu przedłużonego obciążenia ściskającego, wyniki z analizy jednego obrazu
Fig.23. Distribution of crack width in concrete specimens exposed to sustained compressive loading (results of single image analysis)



Rys.24. Rozkład szerokości rys w betonie FBF_35 poddanych działaniu obciążenia ściskającego, wyniki z analizy trzech podobrazów
Fig.24. Distribution of crack width in concrete FBF_35 exposed to sustained compressive loading (results of analysis of three subimages)

W obu przypadkach próbek FBF_35 i FBD_45 stwierdzono największy udział obiektów o szerokościach do 0,1 mm. W kolejnych przedziałach szerokości udział obiektów systematycznie malał, a od szerokości 0,7 mm – udział był zbliżony do 0. W przypadku betonu FBD_45 zauważono nieznacznie większy udział obiektów o szerokości w przedziałach od 0,3 mm do 1,4 mm niż w przypadku betonu FBF_35.



Rys.25. Rozkład szerokości rys w betonie FBD_45 poddanym działaniu obciążenia ściskającego, wyniki z analizy trzech podobrazów
 Fig.25. Distribution of crack width in concrete FBF_45 exposed to sustained compressive loading (results of analysis of three subimages)

Na podobrazie 1 próbki betonu FBF_35 udział obiektów o mniejszych szerokościach do 0,15 mm był znacznie mniejszy, a udział obiektów o szerokościach od 0,15 mm do 0,45 mm był większy, w porównaniu z udziałem obiektów w danych przedziałach szerokości na podobrazach 2 i 3. Powyżej szerokości 0,5 mm udział obiektów był prawie równy 0. W przypadku betonu FBD_45 największy udział obiektów o najmniejszych szerokościach w przedziałach do 0,1 mm zanotowano dla podobrazu 3 najbardziej oddalonego od krawędzi próbki, a najmniejszy udział – dla podobrazu 1 znajdującego się najbliżej krawędzi próbki. Na podobrazie 1 uzyskano większe udziały obiektów niemal w całym zakresie szerokości od 0,15 mm do 1,4 mm w porównaniu z podobrazami 2 i 3.

Na podstawie uzyskanych ilościowych wyników analizy rys stwierdzić można większą efektywność zbrojenia włóknami Fibraflex niż włóknami stalowymi haczykowatymi. Znane są poglądy, że podczas monotonicznego ściskania mikrorysy istniejące w betonie powiększają się, aż do uformowania ciągłej siatki rys. Pokazano, że podczas długotrwałego działania obciążenia ściskającego rysy propagują głównie równoległe do kierunku obciążenia [16]. Zostało to potwierdzone przy wykorzystaniu opracowanej metody badawczej, a zatem uzyskano potwierdzenie przydatności metody w tym zakresie. Poszukiwanie zależności pomiędzy parametrami opisującymi rozmiary i rozmieszczenie rys w elementach betonowych i jego odpornością na przenikanie mediów ciekłych będzie przedmiotem kolejnego artykułu.

7. WNIOSKI

1. Opracowano metodę wykrywania rys w betonie przy zastosowaniu techniki impregnacji żywicą epoksydową z barwnikiem fluorescencyjnym, identyfikacji i opisu ilościowego ich rozmieszczenia na płaszczyźnie przy zastosowaniu mikroskopu stereoskopowego i analizatora obrazu cyfrowego.

2. Opracowane procedury pomiarowe umożliwiają określenie geometrycznej charakterystyki rys na podstawie następujących parametrów: długość dendrytyczna L , pole powierzchni A , średnia szerokość W , gęstość L_A , udział powierzchniowy A_A , stopień orientacji ω oraz rozkład szerokości.
3. Stwierdzono wpływ poziomu progowania (wartości progowej dla barwy zielonej) na liczbę i pole powierzchni wyodrębnionych elementów obrazu, ale nie stwierdzono wpływu na stopień orientacji rys.
4. Wyodrębnienie rys widocznych na kolorowym obrazie jest możliwe przy odpowiedniej regulacji poziomu progowania dla barwy zielonej w zakresie $70-130 \div 255$ oraz przy stałym nastawieniu progowania w zakresie $0 \div 255$ dla barwy czerwonej i niebieskiej. Stwierdzono, że kontrast pomiędzy zaimpregnowanymi rysami i otaczającym materiałem zależy od porowatości zaczynu cementowego.
Doświadczalnie ustalono, że do usuwania z obrazu obiektów nie będących rysami można przyjąć dwa współczynniki kształtu obiektów: współczynnik wydłużenia $RR < 3$ i współczynnik kolistości $Ro < 2$.
5. Technikę impregnacji próbek żywicą epoksydową z barwnikiem fluorescencyjnym i przygotowania płaskich przekrojów w połączeniu z cyfrową analizą obrazu otrzymywanego w świetle ultrafioletowym, skutecznie wykorzystano do wyznaczenia ilościowej charakterystyki rys w betonie, wywołanych cyklicznym zamrażaniem i odmrażaniem oraz statycznym ściskaniem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Śliwiński J.: Podstawowe właściwości betonu i jego trwałości. Sympozjum Naukowo – Techniczne „Trwałość betonu i jej uwarunkowania technologiczne, materiałowe i środowiskowe”, Kraków 2004, 41 – 51
- [2] Brandt A.M.: Cement – Based Composites. Materials, Mechanical Properties and Performance, E&FN Spon, London 1995, 470
- [3] Litorowicz A.: Identyfikacja mezostruktury rys i ich związki z przepuszczalnością betonu. Rozprawa doktorska, IPPT PAN, Warszawa 2005, 231
- [4] Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych, praca zbiorowa pod red. A.M.Brandta i J.Kasperkiewicza, IPPT PAN, Warszawa 2003, 218
- [5] Gran H.Ch.: Fluorescent liquid replacement technique. A means of crack detection and water:binder ratio determination in high strength concrete. Cement and Concrete Research, **25**, 5, 1995, 1063 – 1074
- [6] Ammouche A., Riss J., Breysse D., Marchand J.: Image analysis for the automated study of microcracks in concrete. Cement and Concrete Composites, Special Issue: Image Analysis, **23**, 2001, 267 – 278

- [7] *Slate F.O., Olsefski S.*: X-rays for study of internal structure and microcracking of concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, **60**, 5, 1963, 575 – 587
- [8] *Samaha H.R., Hover K.C.*: Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete. *ACI Materials Journal*, **89**, 4, 1992, 416 – 424
- [9] *Li Z., Shah S.P.*: Localization of microcracking in concrete under uniaxial tension. *ACI Materials Journal*, **91**, 4, 1994, 372 – 381
- [10] *Henrichsen A., Laugesen P.*: Monitoring of concrete quality in high performance civil engineering constructions. *Microstructure of Cement Based Systems/Bonding and Interfaces in Cementitious Materials*, S. Diamond et al. (ed), MRS Volume 370, 1994, 49 – 56
- [11] *Auto-Pro Guide for Windows*. Media Cybernetics, Silver Spring, USA 2001
- [12] *Nemati K.M., Monteiro P.J.M., Scrivener K.L.*: Analysis of compressive stress-induced cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, **95**, 5, 1998, 617 – 630
- [13] *Nemati K.M., Stroeven P.*: Stereological analysis of micromechanical behavior of concrete, *Materials and Structures*, **34**, 2001, 486 – 494
- [14] *Ringot E.*: Automatic quantification of microcracks network by stereological method of total projections in mortars and concretes. *Cement and Concrete Research*, **18**, 1988, 35 – 43
- [15] *Glinicki M.A., Wysokowski A., Zurawicka A.*: Mechanical properties of fibre-reinforced concrete for thin repairs of concrete pavements. *Brittle Matrix Composites BMC-6*, Warszawa 2000, 306 – 313
- [16] *Van Mier J.G.M.*: Influence of damage orientation distribution on the multiaxial stress-strain behavior of concrete. *Cement and Concrete Research*, **15**, 1985, 849 – 862

DIAGNOSTICS OF CRACKS IN CEMENT MATRIX COMPOSITES USING COMPUTER IMAGE ANALYSIS

Abstract

Crack formation in concrete engineering structures can produce both strength and stiffness reduction as well as an increase of permeability of concrete and a danger of corrosion of reinforcement. A laboratory method of crack system diagnostics is presented. The developed method for automated crack identification and quantification was set at a meso-level of observation by means of the image analysis system. A procedure of sample preparation for crack detection was elaborated, the quantitative parameters to characterize crack mesostructure were defined, the algorithms for the automated crack identification taking into account morphological operations and shape of objects were developed. The algorithms for determination of degree of crack orientation and distribution of crack width were developed as well. The applicability of the crack analysis method was verified on concrete specimens subjected to freeze/thaw cycles and sustained compressive loading.

PODZIĘKOWANIE

Stanowisko badawcze zbudowano w ramach Projektu NATO Science for Peace SfP 97.1888. Badania wykonano w ramach Projektu Badawczego, finansowanego ze środków budżetowych na naukę w latach 2006-2008 (nr 4 T07E 036 30).