

*Danuta Kowalska
Daria Józwiak-Niedźwiedzka
Marek Chalimoniuk
Mariusz Dąbrowski*

Zastosowanie metody tomografii komputerowej CT do oceny napowietrzenia betonu

APPLICATION OF COMPUTED TOMOGRAPHY CT TO EVALUATE THE AIR-ENTRAINMENT IN CONCRETE

Streszczenie

Tematem referatu jest ocena charakterystyki porów powietrznych w betonie przeprowadzona przy zastosowaniu dwóch metod: mikroskopowej analizy obrazu i tomografii komputerowej. Zamieszczono opis przygotowywania próbek do badań i zastosowanych metod badawczych oraz przedstawiono wyniki analizy mikrostruktury porów powietrznych. Scharakteryzowano podstawowe parametry napowietrzenia betonu: całkowitą zawartość powietrza, powierzchnię właściwą systemu porów powietrznych, wskaźnik rozmieszczenia porów i zawartość mikroporów. Przedstawiono na płaszczyźnie oraz w przestrzeni przykładowe obrazy rozmieszczenia i wielkości porów powietrznych w próbkach z betonu uzyskane z wykorzystaniem obu metod badawczych.

Porównano wyniki badań wykonanych metodą tomografii komputerowej oraz mikroskopowej analizy obrazu, betonów o różnym składzie. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych stwierdzono, że betony charakteryzują się właściwą mikrostrukturą porów z uwagi na mrozoodporność betonów. Ponadto, stwierdzono, że wyniki dotyczące całkowitej zawartości powietrza otrzymane metodą tomografii komputerowej różnią się od uzyskanych metodą mikroskopowej analizy obrazu (różnica wynosi ok. 0,5% – 1%), ale można je uznać za bliższe wartościom rzeczywistym, a metodę tomografii komputerowej za dokładniejszą. Różnica ta wynika z poziomu obserwacji wielkości porów w napowietrzonym betonie.

Metoda tomografii komputerowej może być wykorzystywana do oceny mikrostruktury napowietrzenia porów powietrznych w betonie. Przewiduje się, że wprowadzenie tej metody do praktyki laboratoryjnej skróciłoby czas oczekiwania na ocenę jakości

mgr inż. Danuta Kowalska – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

dr inż. Daria Józwiak-Niedźwiedzka – Instytut Podstawowych Problemów Techniki

mgr inż. Marek Chalimoniuk – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

mgr inż. Mariusz Dąbrowski – Instytut Podstawowych Problemów Techniki

napowietrzenia betonu, co z kolei pozwoliłoby na szybsze podejmowanie decyzji dotyczących ewentualnych korekt składu betonu oraz określenia właściwej technologii jego wytwarzania i zabudowy.

Abstract

The paper presents the results of the evaluation of air-voids microstructure in concrete conducted with the application of two methods: microscope image analysis and computed tomography. Descriptions of specimen preparation for the studies and the applied test methods as well as results of the microstructure of air-voids are presented. Basic parameters of air entrainment in concrete have been characterized and they are: total content of the air, specific surface area of the air-voids system, spacing factor and content of micropores. Exemplary images of distribution and size of air-voids in concrete specimens obtained as a result of both test methods have been presented on 2D and 3D.

Results of tests performed with the use of both computed tomography and microscope image analysis concretes of various compositions have been compared. On the basis of the conducted laboratory tests it was stated that concretes are characterized by the appropriate microstructure of air-voids due to their frost resistance. Moreover, it was stated that the results concerning the total air content obtained with the use of computed tomography are differ from those received with the use of microscope image analysis (the difference amounts to ca. 0.5% - 1%), but it can be concluded that the results obtained with the application of the first method are closer to the real values and CT may be considered as more accurate. This difference results from the level of observation of the pores size in the air-entrained concrete.

Computed tomography may be used for the evaluation of the air-voids microstructure in concrete. It is predicted that the implementation of the above method into laboratory practice would shorten the waiting time needed to receive the assessment of the quality of air-entrainment in concrete, which in turn would allow to make decisions concerning possible corrections of the concrete composition and define the appropriate technology of its production and development in a faster way.

1. Wstęp

Podczas pracy konstrukcji z betonu cementowego zachodzą procesy destrukcyjne spowodowane nie tylko obciążeniami eksploatacyjnymi, ale również czynnikami środowiskowymi. Najbardziej szkodliwe odnośnie do betonu oddziaływanie środowiska w naszym regionie klimatycznym to przede wszystkim cykliczne zamrażanie-odmrażanie oraz, w przypadku betonów nawierzchniowych – dodatkowo działanie chemicznych środków odladzających. W celu zapewnienia odporności konstrukcji na działanie mrozu i środków odladzających, do ich budowy stosuje się betony napowietrzone.

Istotnym składnikiem struktury betonu są pory powietrzne, wytworzone przez napowietrzenie oraz pustki powietrzne powstałe podczas mieszania i układania betonu. Zgodnie z definicją podaną w normie PN-EN 480-11 [1] por powietrzny to przestrzeń otoczona zaczynem cementowym, wypełniona powietrzem lub innym gazem wprowadzonym przed związaniem zaczynu. Nie odnosi się to do porów o wymiarach submikroskopowych, charakterystycznych dla uwodnionego zaczynu cementowego (pory żelowe). Ocena rozkładu, rozmiaru i kształtu porów ma decydujący wpływ m.in. na wnioskowanie o trwałości betonu. Przykłady klasyfikacji porów w betonie podano w pracach [2, 3]. W wyniku działania środka napowietrzającego powstają pory powietrzne o rozmiarach od 10 do 1250 μm (optymalnie $< 300 \mu\text{m}$). Poza wymienionymi w strukturze betonu występują pory (duże pory $> 500 \mu\text{m}$), powstałe z przyczyn technologicznych (np. nadmiar wody zarobowej) oraz pory kapilarne i żelowe. Pory powstałe przypadkowo w wyniku nieodpowiedniego doboru składników lub niewłaściwej technologii mieszania i układania mieszanki betonowej są szkodliwe z uwagi na wytrzymałość i szczelność betonu oraz jego mrozoodporność.

Analiza systemu porów powietrznych w stwardniałym betonie pozwala określić przewidywaną mrozoodporność materiału. Ocena skuteczności zabiegu napowietrzenia dokonywana jest na podstawie wyników badań diagnostycznych. Uważa się, że struktura powstałych porów stanowi skuteczne zabezpieczenie przed szkodliwym działaniem mrozu jeżeli całkowita zawartość powietrza w betonie zawarta jest między 4%, a 7%, średnia odległość do najbliższego pora powietrznego (spacing factor) \bar{L} poniżej 0,20 mm lub 0,22 mm, powierzchnia właściwa systemu porów α w przedziale 16-24 mm^{-1} , a minimalna zawartość powietrza w porach mniejszych niż 0,3 mm (A_{300}) co najmniej 1,5 % [2].

Podstawową metodą badania struktury betonu jest jakościowa analiza obrazu jego struktury, a następnie komputerowa analiza obrazu, prowadząca do wyników ilościowych [2]. Korzystając z praw stereologii można uzyskać informacje o budowie przestrzennej na podstawie płaskich obrazów, uzyskanych na odpowiednio przygotowanych powierzchniach próbek. Obrazy płaskie otrzymane na różnych głębokościach, pozwalają ocenić przestrzenny rozkład badanych obiektów. Powszechnie stosowaną metodą badania struktury napowietrzenia dojrzałego betonu jest metoda opisana w normie europejskiej PN-EN 480-11:2008 [1] oraz amerykańskiej ASTM C457/C457M-12 [4]. Badanie struktury porów powietrznych odbywa się za pomocą tzw. metody trawersowej, gdzie obserwacje prowadzi się wzdłuż linii pomiarowych przebiegających równolegle do pierwotnej, odsłoniętej górnej powierzchni. Rejestruje się liczbę porów powietrznych przeciętych tymi liniami pomiarowymi oraz długość każdej cięciwy poru. Analiza matematyczna zarejestrowanych danych umożliwia opisanie systemu porów powietrznych za pomocą wymaganych parametrów. Norma amerykańska przewiduje ponadto stosowanie metody punktowej.

Podejmowano już próby wykorzystania do oceny mikrostruktury porów powietrznych w betonie metody mikrotomografii komputerowej [5, 6, 7]. Zmniejszenie efektów

zniekształceń uzyskanych obrazów uzyskano m.in. stosując małe próbki, jednak stanowi to wadę wymienionej metody, np. J. T. de Assis et al. [6] dokonali oceny porowatości matrycy cementowej w betonie na podstawie badań betonowych próbek cylindrycznych o średnicy 25 mm i wysokości 50 mm.

Możliwość zastosowania metody rentgenowskiej tomografii komputerowej (X-ray CT) do wyznaczenia wskaźnika rozmieszczenia porów powietrznych w próbkach zapraw o różnej zawartości powietrza badali Yun TS et al. [8]. Zastosowali próbki cylindryczne o średnicy 12 mm i wysokości 10 mm. Na podstawie obrazów przestrzennych porów powietrznych (3D) wskazywali przydatność do oceny odporności materiałów o matrycy cementowej na cykliczne zamrażanie i odmrażanie.

W referacie przedstawiono wyniki badania mikrostruktury porów powietrznych w betonie dwoma metodami na dużych próbkach prostopadłościennych o boku 100 mm.

2. Metoda tomografii komputerowej (CT)

Tomografia komputerowa (ang. Computed Tomography – CT) jest rodzajem spektroskopii rentgenowskiej pozwalającej na uzyskanie obrazów tomograficznych (przekrojów) badanego obiektu, a następnie przedstawieniu jego obrazu przestrzennego (3D) z wielu ujęć płaskich (2D) wykonanych w różnych położeniach [9]. Obrazy tomograficzne zawierają informacje o położeniu i cechach absorbujących w obiekcie i są dalej wykorzystywane do rekonstrukcji danych przestrzennych. Dowolną różnicę w materiale wewnątrz obiektu, zmianę jego gęstości lub pory można zobrazować i zmierzyć.

Badanie polega na skierowaniu na badany obiekt wiązki promieniowania X i rejestracji jego natężenia po drugiej stronie na detektorze. Promieniowanie rentgenowskie, podobnie jak promieniowanie z innych zakresów widma elektromagnetycznego, może być absorbowane i rozpraszane przez materię [10]. W wyniku tych procesów wiązka promieniowania ulega osłabieniu, które jest funkcją energii promieniowania, rodzaju i grubości badanego materiału. Zmiana natężenia promieniowania równoległej wiązki promieniowania o jednakowej energii, przy przejściu przez obiekt opisana jest zależnością:

$$I = I_0 e^{-\mu g}$$

gdzie:

I – natężenie promieniowania po przejściu przez obiekt

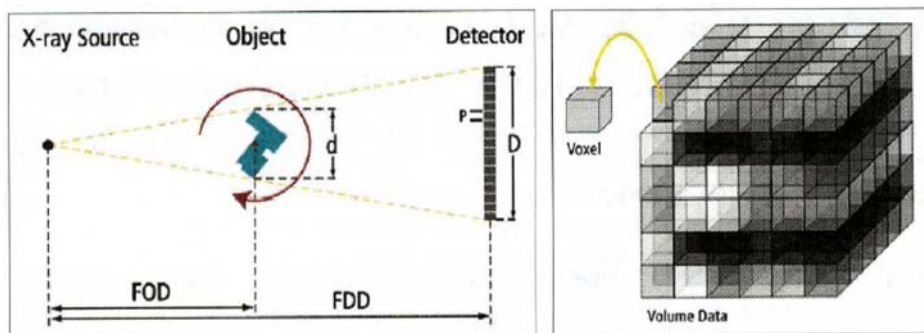
I_0 – początkowe natężenie promieniowania

μ – liniowy współczynnik osłabienia (absorpcji) promieniowania charakterystyczny dla danego materiału i określonej długości fali promieniowania X (współczynnik określający osłabienie równoległej wiązki promieniowania o przekroju 1 cm² przy przejściu przez warstwę grubości g),

g – grubość badanego materiału.

Tworzenie obrazu tomograficznego [9], polega na pomiarze pochłaniania promieniowania przechodzącego przez obiekt. Objętość obiektu podzielona jest na małe komórki, zwane voksalami, w których liniowy współczynnik pochłaniania promieniowania jest taki sam. Obliczenie rozkładu współczynników pochłaniania promieniowania dokonywana jest przez komputer.

Zrekonstruowany obraz przekrojowy jest ilościową mapą liniowego współczynnika pochłaniania promieniowania w woksłach, wchodzących w skład skanowanej warstwy. Woksel jest jednostką obrazu przestrzennego 3D (odpowiednik piksela dla obrazu 2D), któremu odpowiada średnica przedmiotu d podzielona przez liczbę pikseli N ($V=d/N$). Rozmiar woksela można scharakteryzować w nawiązaniu do piksela P i powiększenia M jako iloraz $V=P/M$, gdzie $M=FDD/FOD$ (rys. 1).



Rys. 1. Niektóre parametry charakteryzujące tomografię CT [9]

Główne zespoły tomografu to [11]: lampa rentgenowska i jej zasilacz, układ pozycjonujący mierzony element składający się zwykle z obrotowego stołu pomiarowego i prowadnicy liniowej oraz system detektorów często w postaci matrycy (panelu, tablicy). System detekcji może składać się z pojedynczego elementu skanującego, liniowego układu elementów lub powierzchniowego układu elementów skanujących. Lampa rentgenowska stanowi źródło promieniowania rentgenowskiego, które przechodząc przez obiekt i docierając do detektorów, niesie ze sobą informację o strukturze tego obiektu. Informacja otrzymywana jest w postaci serii rzutów, zwanych projekcjami.

Jakość pomiarów osiąganych przez różne detektory promieniowania rentgenowskiego można opisać poprzez parametry: wydajność detekcji, energetyczną zdolność rozdzielczą, stabilność pomiarów w czasie, bezwładność, rozdzielczość przestrzenną detekcji, kontrastowość obrazu, odporność na zniszczenie przez napromieniowanie i szумы własne.

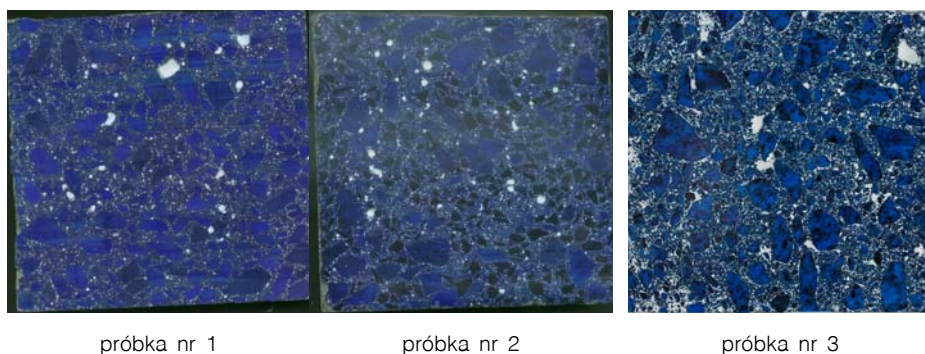
Elementami głównymi wchodzącymi w skład tomografu komputerowego jest również system akwizycji danych wykonujący projekcje przy użyciu promieni rentgenowskich oraz komputer realizujący zadanie rekonstrukcji obrazów z dokonanych projekcji oraz wspomagający analizę zrekonstruowanych obrazów CT. Tomografy różnych producentów i przykłady ich zastosowań przedstawiono w pracach [11, 12]. Natomiast informacje nt. oprogramowania oraz metod wyznaczania parametrów dokładności podano w pracy [13].

3. Opis przeprowadzonych badań

3.1. Próbkki do badań

Próbki do badań stanowiły zglądy, przygotowane z trzech betonów, na których wcześniej określono parametry struktury napowietrzenia zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 480-11 [1].

Próbki do badania parametrów charakteryzujących układ porów powietrznych w stwardniałym zaczynie przygotowano zgodnie z procedurą [3, 14]. Z badanych betonów wycięto próbki o wymiarach 100×100×25 mm. Po usunięciu niepożądanych cząstek, pochodzących od cięcia i po wysuszeniu próbki poddawano wielokrotnemu szlifowaniu coraz drobniejszymi proszkami szlifierskimi (SiC), o różnych gradacjach. Po zakończeniu etapu szlifowania próbki podlegały kontroli jakości wykonania. Kolejnym etapem obróbki było kontrastowanie powierzchni zglądu w celu wyodrębnienia porów z badanej powierzchni, tak aby mogły być łatwo rozpoznane przez system analizy obrazu. Po tej operacji zgląd betonowy z porami wypełnionymi kontrastującym z pozostałą częścią próbki białym pigmentem był badany przy pomocy systemu automatycznej analizy obrazu. W celu zachowania jednakowych warunków przeprowadzanych testów, pomiary wykonywano w czasie nieprzekraczającym 2 godzin od zakończenia obróbki. Widok przygotowanych do badań próbek przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Zglądy betonowe zawierające pory powietrzne wypełnione środkiem kontrastującym

Do oznaczenia parametrów charakteryzujących układ porów w stwardniałym betonie posłużył system automatycznej analizy obrazu, (opisany szczegółowo w pracy [3]).

Parametry charakteryzujące układ porów w stwardniałym betonie wyznaczono wg zaleceń ww. normy PN-EN 480-11:2008 [1], przyjmując obliczenia metodą linii trawersowej wykonane automatycznie. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

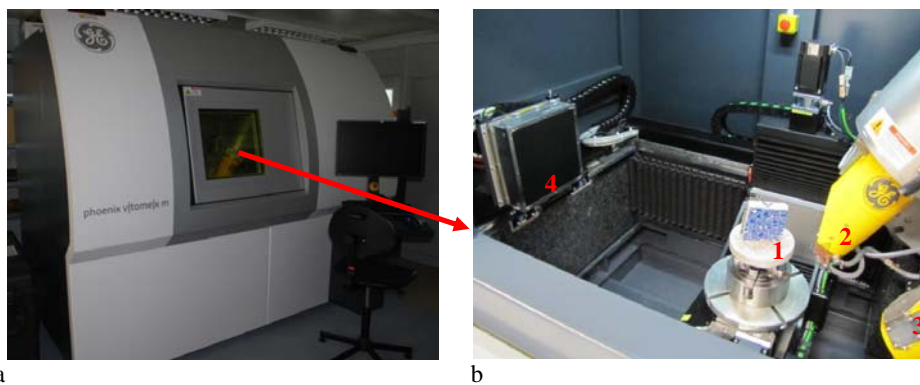
Tabela 1. Parametry struktury napowietrzenia badanych betonów

Nr próbki	Całkowita zawartość powietrza A [%]	Wskaźnik rozmięszczenia porów \bar{L} [mm]	Powierzchnia właściwa porów α [mm ⁻¹]	Zawartość mikroporów A_{300} [%]
1	5,56	0,15	30,49	2,63
2	6,48	0,16	26,28	3,04
3	12,25	0,06	36,82	5,73

3.2. Badania tomograficzne

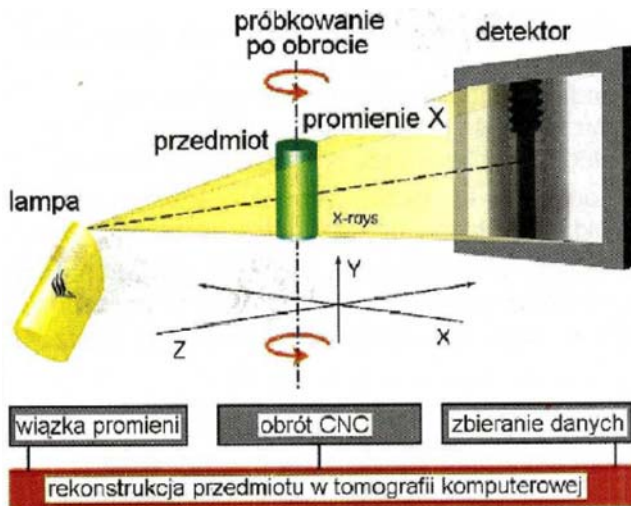
Badania próbek betonowych obejmowały badania tomograficzne, cyfrową analizę obrazu i oznaczenie całkowitej zawartości powietrza w próbkach betonowych A oraz zawartość mikroporów A_{300} . Badania próbek wykonano z użyciem tomografu komputerowego V/Tome/x m firmy GE (rys. 3) wyposażonego w detektor panelowy oraz układ projekcji wykorzystujący wiązkę promieniowania rentgenowskiego uformowaną w stożek (rys. 4).

Tomograf wyposażony jest w lampę o mocy 300 kV oraz drugą lampę do nanotomografii o mocy 180 kV i rozdzielczości $0,5 \mu\text{m}$. W przeprowadzonym badaniu badany obiekt znajdował się na stole obracającym się względem nieruchomych: lampy i detektora. Stosując przestrzenną wiązkę rentgenowską i detektor panelowy, po wykonaniu przez obiekt pełnego obrotu o 360° , otrzymano pełny obraz całego przedmiotu. Dokładność końcowego odwzorowania zależy od liczby projekcji wykonanych dla pełnego obrotu. Rekonstrukcję obrazu na stacji graficznej wykonano z wykorzystaniem programu datosx firmy GE.



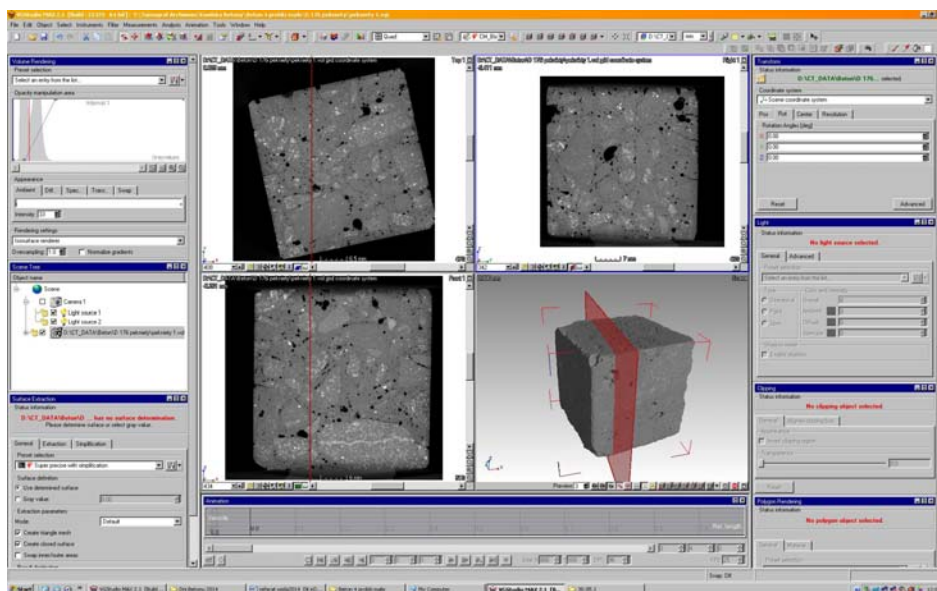
Rys. 3. Widok tomografu komputerowego V/Tome/x firmy GE a) widok ogólny b) widok w środku, 1 – stolik z próbką, 2, 3 – lampy rentgenowskie, 4 – detektor

Przedmiotowe próbki badano stosując następujące parametry tomografu: napięcie prądu – 200 kV, natężenie prądu – $200 \mu\text{A}$, projekcje na $360 - 1440$, filtry: $0,5 \text{ mm Cu} + 0,5 \text{ mm Sn}$, detektor panelowy $2048 \times 2048 \text{ px}$.



Rys. 4. Schemat układu z wiązką stożkową [9]

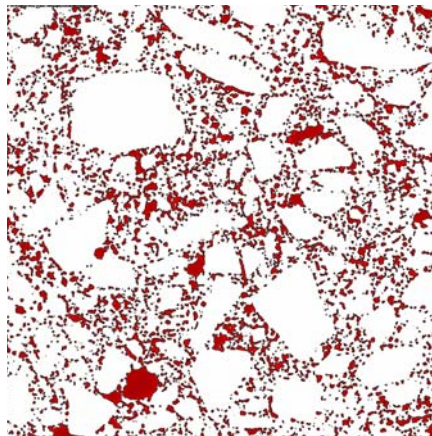
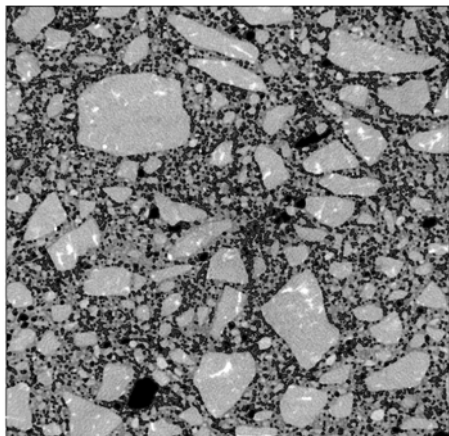
Dzięki przejściu promieniowania przez cały obiekt, tomografia rentgenowska pozwala na pomiary nawet bardzo złożonych obiektów z powierzchniami trudno dostępnymi oraz niewidocznymi wewnętrznymi inkluzjami i pustkami. Na rysunku 5 przedstawiono obraz próbki betonowej i widok jej przekrojów, uzyskane z wykorzystaniem metody tomografii komputerowej.



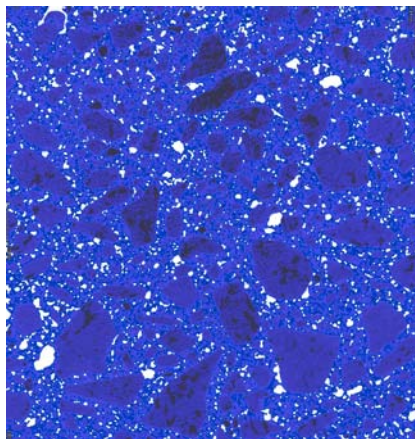
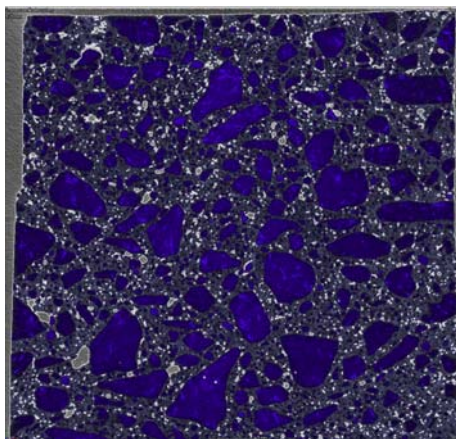
Rys. 5. Obraz próbki betonowej uzyskany metodą tomografii komputerowej oraz jej przekrojów; możliwe rozróżnienie pęknięć, porów i pustek powietrznych

4. Wyniki badań

Na rysunku 6 przedstawiono możliwość uzyskania metodą tomografii komputerowej różnych obrazów badanych próbek, a na rysunku 7 – przykład wyznaczenia obszaru do analizy z wnętrza próbki.

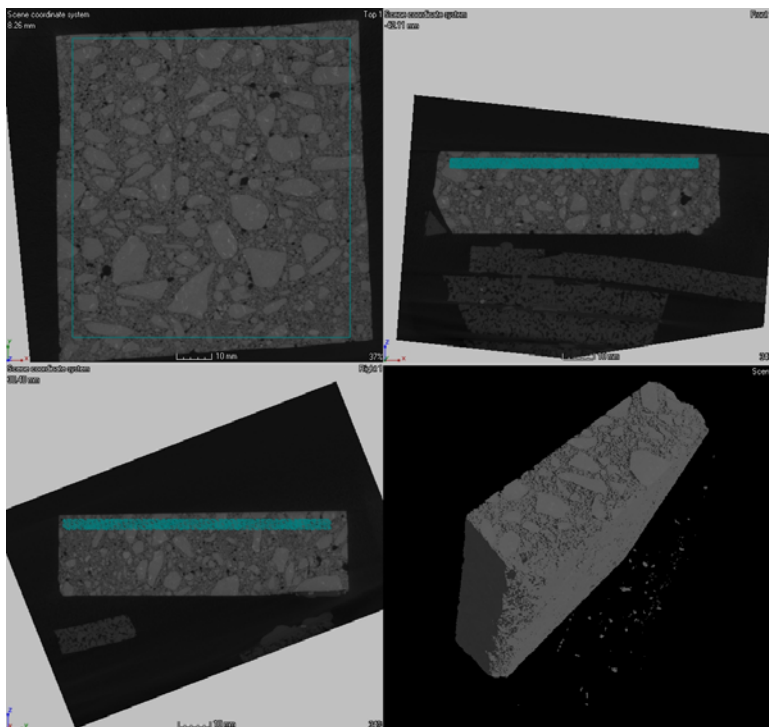


próbka nr 3



próbka nr 2

Rys. 6. Różne obrazy badanych zglądów betonowych uzyskane metodą tomografii komputerowej (próbki 10x10 cm)



Rys. 7. Przykład wyznaczenia obszaru do analizy z wnętrza próbki

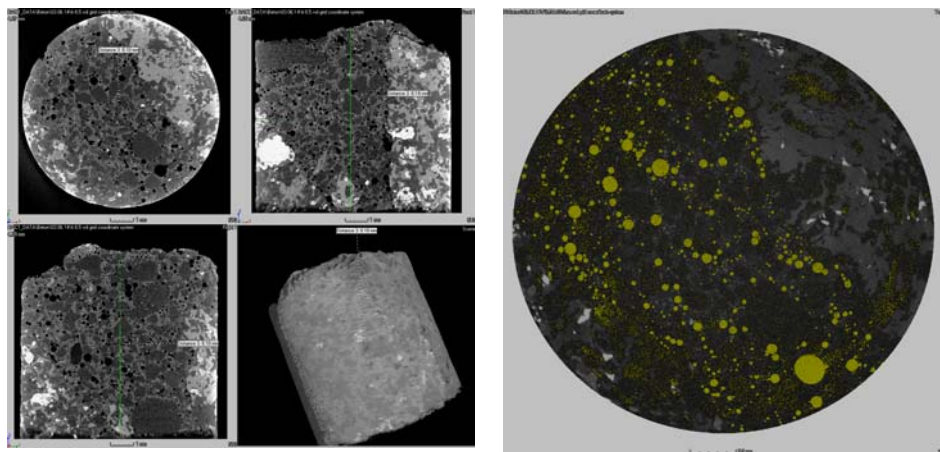
Na podstawie uzyskanych obrazów w 3D obliczono całkowitą zawartość powietrza w badanych betonach. Podjęto również próbę określenia zawartości mikroporów A_{300} , jednak uzyskane wyniki badań były znacznie niższe od otrzymanych z zastosowaniem metody mikroskopowej (różnica wynosiła ok. 100% wartości przyjętej za wzorcową). Wyniki badań zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry struktury napowietrzenia badanych betonów uzyskane dwiema metodami

Nr próbki	Całkowita zawartość powietrza A [%]		Zawartość mikroporów A_{300} [%]	
	Metoda wg PN-EN 480-11	Metoda tomogra- fii komputerowej (CT)	Metoda wg PN-EN 480-11	Metoda tomogra- fii komputerowej (CT)
1	5,56	5,24	2,63	1,95
2	6,48	6,72	3,04	1,62
3	12,25	13,07	5,73	2,80

Ocenia się, że różnica w wartościach parametru A_{300} wynikała z zastosowania do analizy oryginalnego oprogramowania VGStudio MAX 2.2 oraz z faktu badania próbek o wymiarach 10x10 cm, co nie zapewniało odpowiedniej rozdzielczości. Oprogramowanie

„łączy” pojedyncze mikropory w grupy i przy ograniczeniu wielkości woksela zliczana jest tylko część z zawartej liczby mikroporów. Ze względu na brak dostatecznej możliwości analizowania mikroporów z zastosowaniem ww. oprogramowania, opracowano metodykę przygotowania próbek do badań mającą na celu zwiększenie uzyskanej rozdzielczości (rys. 8) oraz autorski program do analizy danych z tomografu pod kątem określenia parametrów napowietrzenia betonu wg wymagań normy PN-EN 480-11.



Rys. 8. Próbką walcową badana z rozdzielczością 5 μm

Aktualnie prowadzone są prace mające na celu skorelowanie otrzymywanych wyników badań tomograficznych z badaniami mikroskopowymi.

5. Wnioski

Stosując procedurę normową, uzyskanie prawidłowo przygotowanego zglądu betonowego o wysokiej jakości, w którym pory powietrzne charakteryzują się wyraźnymi krawędziami i kulistym kształtem, jest niezbędnym warunkiem otrzymania poprawnych wyników pomiaru. Ocena jakości wykonania zglądu przez wykonawcę badań wymaga dużego doświadczenia, zwłaszcza że brak jest jednoznacznego kryterium tej oceny.

Badanie tomograficzne pozwala przeprowadzić analizy w przekrojach na różnych głębokościach badanej próbki bez konieczności wykonywania zglądów, co w znacznym stopniu skraca czas od pobrania próbki do uzyskania wyników. Wartości całkowitej zawartości powietrza w próbkach różnią się max. o 1%. Uzyskana różnica może wynikać z faktu, że metoda tomografii komputerowej obejmowała analizę 3D w porównaniu do analizy wykonanej na płaszczyźnie, w związku z czym można uznać, że uzyskane parametry stanowią lepsze przybliżenie rzeczywistej mikrostruktury betonu, gdyż zostały obliczone na podstawie pomiaru rzeczywistych średnic pustek powietrznych. Natomiast wyniki uzyskane na podstawie pomiarów cięciw pustek powietrznych obserwowanych na zglądzie betonu z badaniem normowym mogą zawierać błędy wynikające z samych założeń metody pomiarowej.

Tomografia komputerowa stanowi obiecujące narzędzie do oceny parametrów napowietrzenia betonu po dostosowaniu metodyki badania odnośnie do przygotowania i wielkości próbek i po opracowaniu programu komputerowego umożliwiającego analizę uzyskanych obrazów i wyznaczenie parametrów charakteryzujących układ porów, określonych w normie PN-EN 480-11.

Literatura

- [1] PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań Cz.11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie.
- [2] A.M. Brandt, Diagnostyka betonu na podstawie badań struktury. 56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB. Kielce-Krynica 19-24 września 2010
- [3] Praca zbiorowa pod red. A. M. Brandta i J. Kasperkiewicza: Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2003
- [4] ASTM C457/C457M-12 Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete
- [5] U. Rattanasak, K.Kendall. Pore structure of cement/pozzolan composites by X-ray microtomography, *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 637-640
- [6] J.T.Assis, I. Lima, G. Carvalho, R. Einsfeld, J.R.C. Pessôa, R.T. lopes, R.L.B. Breder, Concrete matrix porosity study by microtomography images. 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference Lisbon, Portugal, September 7-11, 2009
- [7] E. Gallucci, K. Scrivener, A. Groso, M.Stampanoni G. Margaritondo: 3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography (μ CT), *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 360-368
- [8] T. S. Yun, K. Y. Kim, J. Choo, D.H. Kang: Quantifying the distribution of paste-void sparing of hardened cement paste using X-ray computed tomography, 2012, www.elsevier.com/locate/matchar.
- [9] E. Ratajczyk Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych. Cz. I Idea pomiarów, główne zespoły i ich funkcje. *Mechanik* nr 2/2011.
- [10] A. Cygański, *Metody spektroskopowe w chemii analitycznej*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1997
- [11] R. Cierniak, Tomografia komputerowa. Budowa urządzeń CT. Algorytmy rekonstrukcyjne, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.
- [12] E. Ratajczyk Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych. Cz. II Tomografy i ich parametry, przykłady zastosowań. *Mechanik* nr 3/2011.
- [13] E. Ratajczyk Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych. Cz. III Tomografy i ich parametry, przykłady zastosowań. *Mechanik* nr 4/2011.
- [14] D. Józwiak-Niedźwiedzka, D. Kowalska: Ocena parametrów struktury napowietrzenia betonów w nawierzchniach lotniskowych, Międzynarodowa Konferencja „Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność”, Wisła 2008.