XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna awarie budowlane 2013

JACEK ŚLIWIŃSKI, *jsliwins@pk.edu.pl*
TOMASZ TRACZ, *ttracz@pk.edu.pl*
Politechnika Krakowska

WPŁYW SZLIFOWANIA POWIERZCHNI BETONU NA OCENĘ JEGO PRZEPUSZCZALNOŚCI OKREŚLANEJ METODĄ TORRENTA

THE EFFECT OF CONCRETE SURFACE POLISHING ON PERMEABILITY EVALUATED WITH TORRENT'S METHOD

Streszczenie Badaniami objęto betony wykonane z trzech rodzajów cementów szeroko stosowanych w praktyce budowlanej: CEM I 42,5; CEM II/A-V 42,5 i CEM III/A 42,5. Skład betonów wykonanych z danego cementu był ponadto zróżnicowany pod względem wskaźnika w/c oraz zawartości zaczynu cementowego. Przepuszczalność oceniano na powierzchniach płyt betonowych po 360 dniach dojrzewania. Pomiary przepuszczalności prowadzono na powierzchni w stanie naturalnym, a następnie po zeszlifowaniu przypowierzchniowej warstwy grubości ok. 2 mm. Prezentowane wyniki badań pokazują, jak duży wpływ na przepuszczalność otuliny betonowej ocenianą metodą Torrenta może mieć nawet pozornie delikatna ingerencja w stan jej przypowierzchniowej warstwy.

Abstract In this research the concretes made with three types of cements, widely used in practice: CEM I 42.5; CEMII/A-V42.5 and CEMIII/A 42.5, were tested. The mix composition of concrete made with each cement was also differentiated by w/c ratio and cement paste content. Permeability was evaluated on the surface of concrete slabs after 360 days of curing. Permeability measurements were performed on the surface in a natural state and after grinding approximately 2 mm of external layer. The presented results show how much the permeability of concrete cover assessed with Torrent's method may be influenced by the interference in the state of surface layer.

1. Wprowadzenie

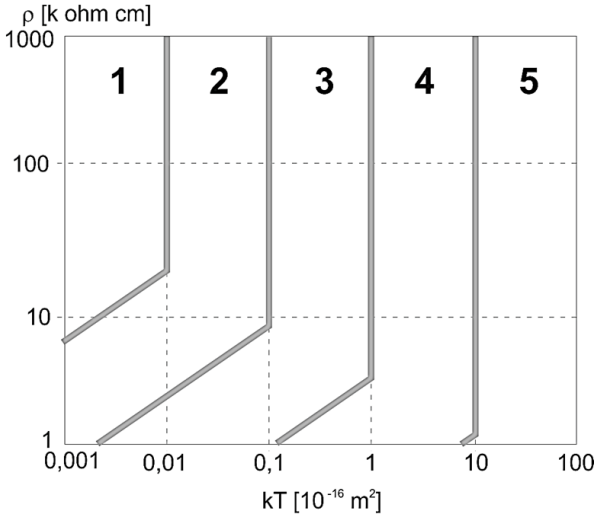
Jedną z powszechnych przyczyn występowania przedwczesnych uszkodzeń konstrukcji żelbetowych jest korozja stali zbrojeniowej wywołana obniżeniem zdolności ochronnej otuliny betonowej w wyniku procesu karbonatyzacji. Z tego powodu ważną cechą betonu otuliny jest jego przepuszczalność dla powietrza, w tym dla zawartego w nim CO_2. W celu oceny tej cechy stosuje się coraz częściej polową metodę Torrenta, której zasięg ogranicza się do kilkucentymetrowej przypowierzchniowej warstwy betonu, w której w czasie badania ma miejsce przepływ powietrza. Grubość warstwy betonu biorącego udział w pomiarze przepuszczalności jest generalnie tym większa, im jego przepuszczalność jest większa. W przypadku betonów, których wyniki badań przedstawiono w referacie, grubość ta wynosiła od ok. 10÷80 mm.

Pomiar przepuszczalności polega na lokalnym przyłożeniu do powierzchni badanego elementu betonowego, za pomocą wysokowydajnej pompy próżniowej, podciśnienia około 10÷50 mbar, które oddziałuje na powierzchni około 8 cm^2. Następnie, po uzyskaniu wymaganego podciśnienia i wyłączeniu pompy próżniowej, ma miejsce swobodne wyrównanie ciśnienia do ciśnienia atmosferycznego. Czas i intensywność wyrównywania ciśnienia

do atmosferycznego zależy od przepuszczalności badanego betonu. Elektroniczny układ, w który wyposażony jest aparat Torrenta, rejestruje przebieg wyrównywania się ciśnienia i na tej podstawie automatycznie wylicza i podaje wartość współczynnika przepuszczalności kT [m^2] oraz miąższość warstwy L [m] betonu biorącego udział w pomiarze. Ta ostatnia jest określana jako funkcja współczynnika przepuszczalności. Szczegółowe zależności stosowane w metodzie do określenia kT i L oraz drogę dojścia do nich znaleźć można w pracy [1].

Ponieważ przepuszczalność powietrza przez beton jest dosyć silnie skorelowana między innymi z jego podatnością na karbonatyzację, sorpcyjnością oraz ze zdolnością do transportu jonów chlorkowych, jej znajomość pozwala na prognozowanie trwałości [2].

Na przepuszczalność betonu mierzoną jakąkolwiek metodą, bardzo istotny wpływ ma jego stan wilgotnościowy [3-7]. W przypadku metody Torrenta problem ten został przez jej twórców rozwiązany na drodze doświadczalnego ustalenia tego wpływu i wyposażeniu aparatu w sondę Wennera do pośredniego pomiaru wilgotności betonu, której zastępczą miarą jest jego oporność właściwa. Według Torrenta i Frenzera [2] jakość betonu w otulinie i w konsekwencji jego ogólna zdolność ochronna wobec stali mierzona przepuszczalnością powietrza może być oceniana w pięciostopniowej skali na podstawie wykresu pokazanego na rys. 1.



Rys. 1. Ocena jakości betonu otuliny na podstawie współczynnika przepuszczalności powietrza kT określanego metodą Torrenta (opis w tekście) [2]

W przypadku betonu znajdującego się w umownym stanie powietrzno-suchym, Torrent i Frenzer [2] w zależności od pomierzonej wartości współczynnika przepuszczalności kT rozróżniają następujące stopnie jakości betonu w otulinie zbrojenia (kT wyrażone w m^2):

– bardzo dobra: $kT \leq 0{,}01\times10^{-16}$,
– dobra: $0{,}01\times10\text{-}16 < kT \leq 0{,}1\times10^{-16}$,
– przeciętna: $0{,}1\times10\text{-}16 < kT \leq 1\times10^{-16}$,
– zła: $1\times10\text{-}16 < kT \leq 10\times10^{-16}$,
– bardzo zła: $kT > 10\times10^{-16}$.

W przypadku oceny jakości betonu o podwyższonej wilgotności, należy ją odpowiednio uwzględnić klasyfikując jakość według wykresu na rys. 1.

Ze względu na wspomnianą wcześniej konieczność uzyskania odpowiedniego wyjściowego podciśnienia, oprócz wystarczającej szczelności betonu, wymagana jest także odpowiednia gładkość powierzchni betonu w miejscu dokonywanego pomiaru. Instrukcja stosowania aparatu Torrenta [8] nie podaje szczegółowych wymagań stawianych powierzchni betonu, na której dokonuje się pomiaru przepuszczalności. Wskazuje jedynie, iż powinna być ona

niezarysowana oraz wystarczająco płaska, aby możliwe było szczelne doleganie do niej uszczelek obydwu komór aparatu. Nie mówi także nic o ewentualnym jej wyrównywaniu i wpływie takiego zabiegu na wynik pomiaru przepuszczalności. W tej sytuacji, wykonujący pomiary może w dobrej wierze próbować przygotować powierzchnię na przykład przez jej szlifowanie.

Prezentowane w dalszym ciągu wyniki badań pokazują jak, w warunkach opisanych badań, duży wpływ na ocenę przepuszczalności może mieć ewentualna obróbka powierzchni betonu. W referacie pokazano także jak duży wpływ na przepuszczalność ma rodzaj cementu, z którego wykonany został beton.

2. Zakres i przebieg badań

Badania obejmowały pomiar współczynnika przepuszczalności kT trzech serii betonów zróżnicowanych rodzajem cementu (CEM I 42,5; CEM II/A-V 42,5 i CEM III/A 42,5). Każda z tych trzech serii składała się z 12 betonów zróżnicowanych pod względem wskaźnika *w*/*c* (0,3; 0,4; 0,5 i 0,6), zawartości zaczynu cementowego (V_z = 240, 300 i 360 dm^3/m^3) oraz rodzaju kruszywa grubego. Składy betonów przedstawiono w tabl. 1. Kruszywo do betonów komponowano z piasku rzecznego 0/2 mm oraz żwirów 2/8 i 8/16 mm lub grysów bazaltowych 2/8 i 8/16 mm. Jamistość uzyskanych stosów okruchowych wynosiła około 22% obj. W zależności od wskaźnika *w*/*c*, zawartości zaczynu cementowego i rodzaju kruszywa grubego, średnie 90 dniowe wytrzymałości na ściskanie badanych betonów wynosiły od 40÷90 MPa. Zarówno przyjęte rodzaje cementów jak i zakresy wartości wskaźnika w/c oraz zawartości zaczynu, wydają się pokrywać niemal cały obszar praktycznie wykonywanych betonów konstrukcyjnych dobrej jakości.

Badania prowadzono na próbkach w kształcie płyt o wymiarach 300×300×150 mm. We wszystkich przypadkach badania dotyczyły betonów po 360 dniach dojrzewania. W czasie pierwszych 28 dni próbki dojrzewały w warunkach wilgotności względnej powietrza > 90% w temperaturze 20°C, a następnie, do chwili badania, w warunkach laboratoryjnych (wilgotność względna powietrza 45÷60% i temperatura 18÷25°C).

Pomiar współczynnika przepuszczalności prowadzono na dennej powierzchni płyt wykonując na każdej z nich po 3 pomiary. Wszystkie próbki znajdowały się w umownym stanie powietrzno-suchym. Przed rozpoczęciem właściwych badań próbki wszystkich badanych betonów zostały skontrolowane pod względem zaawansowania procesu karbonatyzacji. W tym celu z dwóch płyt z każdego z trzech rodzajów betonu pobrano zwierciny z przypowierzchniowej warstwy grubości około 3 mm oraz z warstwy grubości około 3 mm położonej tuż niżej. Badanie odczynu wykonano przygotowując wyciągi wodne o stosunku: zmielony materiał/woda destylowana = 1:5. Pomiary odczynu (pH) wyciągu wodnego dokonywano pechametrem CP-411 Elmetron. Wyniki badania pH pobranego materiału podano w tabl. 2. Na podstawie wyników można wnosić, że karbonatyzacji w przypowierzchniowej warstwie uległy jedynie płyty z betonu wykonanego z cementu CEM I. Betony z pozostałych dwóch cementów temu procesowi nie uległy.

Badania rozpoczęto od dokonania pomiarów przepuszczalności na powierzchni betonu w stanie naturalnym. Następnie, przy użyciu freza diamentowego, zeszlifowano z powierzchni warstwę grubości około 2÷3 mm i ponownie przeprowadzono badania przepuszczalności.

Ogólny wygląd powierzchni betonu w obydwu stanach pokazano na rys. 2, zaś stanowisko do pomiaru współczynnika kT ilustruje rys. 3.

Tablica 1. Składy trzech analizowanych grup betonów z cementów CEM I 42,5; CEM II/A-V 42,5 i CEM III/A 42,5

w/c	**0,30**			**0,40**			**0,50**			**0,60**		
V_z	**240**	**300**	**360**	**240**	**300**	**360**	**240**	**300**	**360**	**240**	**300**	**360**
C	385	482	578	332	415	498	292	365	438	260	325	390
W	116	145	173	133	166	199	146	182	219	156	195	234
P	540	684	825	540	684	825	546	687	828	546	687	828
K_g	bazalt 2/8 + 8/16 mm						żwir 2/8 + 8/16 mm					
	1675	1332	992	1675	1332	992	1440	1146	852	1440	1146	852
DU	tak											nie

W tabl. 1 zastosowano następujące oznaczenia: V_z – zawartość zaczynu cementowego w betonie [dm^3/m^3]; *C* – cement CEM I 42,5 lub CEM II/A–V 42,5 lub CEM III/A 42,5 [kg/m^3]; *W*, *P*, K_g – odpowiednio woda, piasek, kruszywo grube [kg/m^3]; *DU* - domieszka upłynniająca.

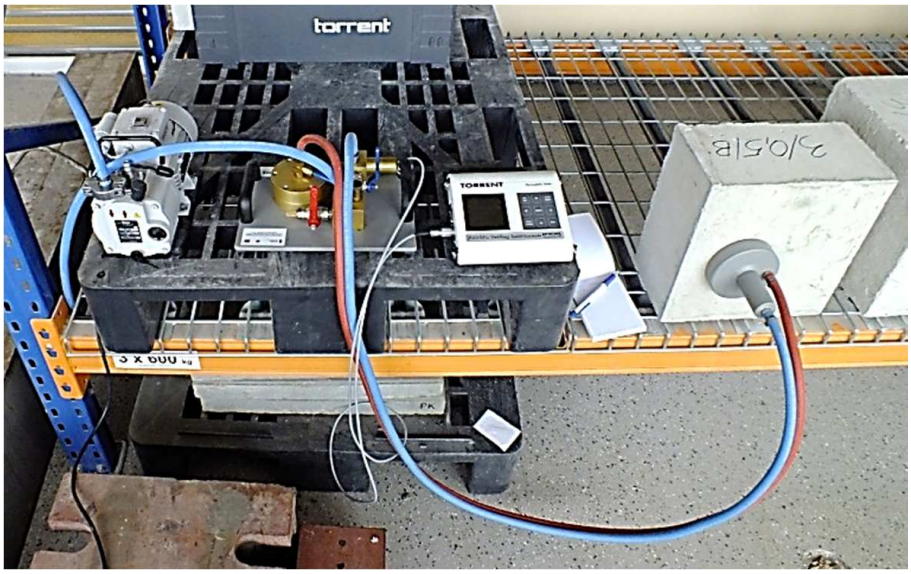
Tablica 2. Wyniki badania pH zwiercin pobranych z przypowierzchniowych warstw płyt

Grubość warstwy [mm]	**Beton z CEM I**	**Beton z CEM II**	**Beton z CEM III**
0÷3 mm	11,56	12,25	12,15
3÷6 mm	12,49	12,52	12,18

Badania rozpoczęto od dokonania pomiarów przepuszczalności na powierzchni betonu w stanie naturalnym. Następnie, przy użyciu freza diamentowego, zeszlifowano z powierzchni warstwę grubości około 2÷3 mm i ponownie przeprowadzono badania przepuszczalności.

Ogólny wygląd powierzchni betonu w obydwu stanach pokazano na rys. 2, zaś stanowisko do pomiaru współczynnika kT ilustruje rys. 3.

Rys. 2. Wygląd naturalnej (lita warstwa stwardniałego zaczynu) i szlifowanej (odsłonięte ziarna kruszywa i drobne przypowierzchniowe pory powietrzne) powierzchni badanych próbek



Rys. 3. Stanowisko do pomiaru współczynnika przepuszczalności powietrza kT określanego metodą Torrenta

3. Wyniki i ich analiza

Wyniki badań zostały przedstawione na rys. 4 w postaci zależności między współczynnikami przepuszczalności kT betonów wykonanych z różnych cementów, określanymi na powierzchni w stanie naturalnym i szlifowanej. Dla umożliwienia dokonywania porównań wszystkie wykresy przedstawiono w takiej samej skali. Na rysunkach podano także równania regresji opisujące te zależności oraz wartości współczynników determinacji. Dodatkowo w tabl. 3 podano zakresy pomierzonych współczynników przepuszczalności kT.

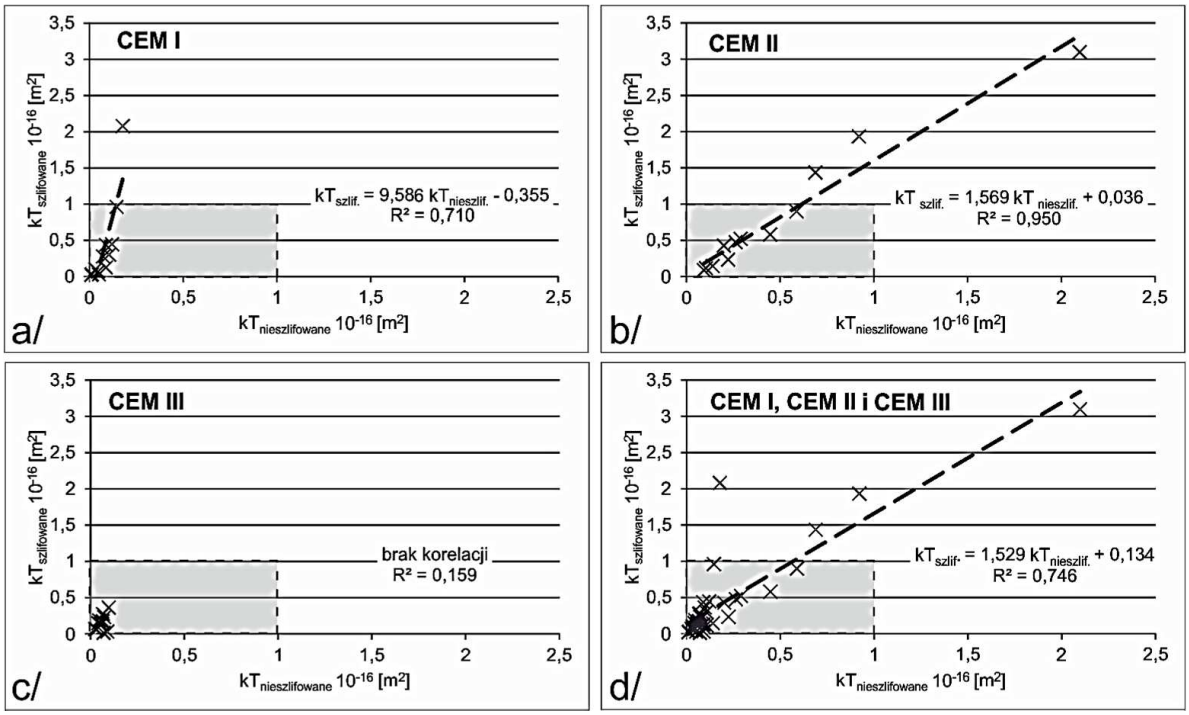
Tablica 3. Zakresy zarejestrowanych wartości współczynników przepuszczalności kT

Beton z cementu	**Pomiary na powierzchni w stanie naturalnym**	**Pomiary na powierzchni szlifowanej**
CEM I 42,5	$0{,}01 \div 0{,}18 \times 10^{-16}$ m^2	$0{,}02 \div 2{,}08 \times 10^{-16}$ m^2
CEM II/A-V 42,5	$0{,}09 \div 2{,}10 \times 10^{-16}$ m^2	$0{,}09 \div 3{,}10 \times 10^{-16}$ m^2
CEM III/A 42,5	$0{,}007 \div 0{,}10 \times 10^{-16}$ m^2	$0{,}001 \div 0{,}36 \times 10^{-16}$ m^2

Wyniki przedstawione w tabl. 3 i na rys. 4 wyraźnie wskazują na istotny wpływ stanu powierzchni elementu, na której prowadzony jest pomiar przepuszczalności oraz na wpływ rodzaju cementu, z którego wykonany został beton.

W przypadku pomiaru na powierzchni w stanie naturalnym przepuszczalność jest zawsze mniejsza, niż oceniana na powierzchni szlifowanej. Usunięcie cienkiej zewnętrznej warstwy zaczynu cementowego (rys. 2) powoduje bowiem odsłonięcie ziaren kruszywa oraz styku jego powierzchni z otaczającym zaczynem. Odkrywane są także drobne pory powietrzne.

Można więc uznać, iż badanie prowadzone na powierzchni w stanie naturalnym daje nam informację o przepuszczalności betonu otuliny. Gdy powierzchnia zostanie pozbawiona zewnętrznej warstewki stwardniałego zaczynu, określana przepuszczalność charakteryzuje beton „w masie” elementu. Warto dodać, że usunięcie zewnętrznej warstwy betonu badanego elementu sprawia, że warunki badania są zbliżone do warunków badania przepuszczalności metodą laboratoryjną RILEM-Cembureau, w której standardowo stosuje się próbki wycinane z walców [9, 11].



Rys. 4. Zależność między współczynnikami przepuszczalności kT określanymi metodą Torrenta na powierzchni w stanie naturalnym i po szlifowaniu a/ betony z CEM I, b/ betony z CEM II, c/ betony z CEM III, d/ wszystkie betony (szare pola oznaczają zakres poprawnych wartości kT ≤ 1×10^{-16} m^2 z punktu widzenia jakości betonu w otulinie wg kryteriów Torrenta i Frenzera [2])

Jeżeli chodzi o wpływ rodzaju cementu na przepuszczalność, to najmniejsze i zarazem ilościowo podobne do siebie wartości współczynników przepuszczalności kT, określanych na powierzchni w stanie naturalnym, zarejestrowano w przypadku betonów z cementów CEM I i CEM III. Betony wykonane z cementu CEM II okazały się wyraźnie bardziej przepuszczalne dla powietrza.

Gdy badanie przepuszczalności prowadzone było na powierzchni szlifowanej, podobna tendencja się utrzymuje, jednak oceniana przepuszczalność jest znacznie większa od tej, oznaczanej na powierzchni w stanie naturalnym. W przypadku betonów z cementu CEM I obróbka powierzchni powoduje blisko 10 krotny wzrost przepuszczalności. W przypadku betonów z cementu CEM II obróbka powierzchni powoduje znacznie mniejszy, bo tylko 1,5 krotny wzrost przepuszczalności.

Powodem tak dużego zróżnicowania wyników pomiaru przepuszczalności prowadzonych na powierzchni naturalnej i szlifowanej płyt z betonu z cementu CEM I jest wysoka szczelność usuniętej warstewki zaczynu cementowego, spowodowana jej karbonatyzacją.

W przypadku próbek z betonów z cementu CEM II, w których nie stwierdzono karbonatyzacji, zróżnicowanie przepuszczalności badanej na powierzchniach w dwóch różnych stanach jest, jak już wspomniano, znacznie mniejsze.

Stopień skorelowania wartości współczynników przepuszczalności kT ocenianych na obydwu rodzajach powierzchni jest wysoki. W przypadku betonów wykonanych z cementu CEM I współczynnik korelacji R = 0,843 zaś w przypadku betonów z CEM II R = 0,974.

Jak można się było spodziewać, betony z cementu CEM III wykazały największą szczelność wobec powietrza. W ich przypadku nie stwierdzono jednak istnienia ściślejszej korelacji między wartościami przepuszczalności określanej na powierzchni w stanie naturalnym

i po szlifowaniu. Niemniej, także i tu zauważyć można prawidłowość, iż szlifowanie powoduje wzrost mierzonej przepuszczalności.

Na wykresie na rys. 4d dokonano próby uogólnienia wyników badań w postaci zależności przepuszczalności ocenianej na dwóch rodzajach powierzchni, łącznie dla wszystkich betonów, bez względu na rodzaj stosowanego cementu. Mimo, że skorelowanie wartości współczynników przepuszczalności określanej na obydwu rodzajach powierzchni jest zadowalające (R = 0,864), wydaje się to dosyć ryzykowne, głównie z powodu niedocenienia wpływu obróbki powierzchni na mierzoną przepuszczalność w przypadku betonów z cementu CEM I.

4. Wnioski i spostrzeżenia

Wyniki przedstawionych badań pozwalają na sformułowanie kilku ważnych, głównie z technicznego punktu widzenia, wniosków i spostrzeżeń dotyczących oceny przepuszczalności betonu metodą Torrenta.

1) W przypadku stosowania metody Torrenta do oceny szczelności betonowej otuliny zbrojenia usunięcie zewnętrznej warstwy stwardniałego zaczynu cementowego powoduje, iż oceniana przepuszczalność otuliny będzie większa od rzeczywistej. Dotyczy to przede wszystkim przypadku, kiedy usunięta warstewka betonu otuliny uległa karbonatyzacji. Oceniana przepuszczalność może być w takim przypadku nawet 10 krotnie większa od rzeczywistej. Gdy proces karbonatyzacji nie nastąpił, rozbieżność jest znacznie mniejsza.
2) W przypadku usunięcia zewnętrznej warstwy betonu elementu wyniki pomiaru przepuszczalności należy odnosić nie do otuliny, lecz do betonu „w masie" elementu.
3) Rodzaj użytego cementu w sposób wyraźny i istotny wpływa na przepuszczalność betonu określaną polową metodą Torrenta. Potwierdza to podobne spostrzeżenie w odniesieniu do przepuszczalności ocenianej laboratoryjną metodą RILEM-Cembureu opisanej szczegółowo w [10, 12].

Biorąc pod uwagę zakres zróżnicowania składu analizowanych betonów wydaje się, że wnioski te odnieść można do licznej grupy elementów i konstrukcji betonowych. Należy jednak wyraźnie podkreślić, że warunki jakich dotyczyły badania (kształt i wymiary ciał próbnych oraz roczny okres dojrzewania w warunkach hali laboratoryjnej) nie pozwalają na uogólnienie wniosków pod względem ilościowym. Rzeczywiste lokalne warunki i dłuższy czas eksploatacji mogą bowiem powodować, iż np. głębokość karbonatyzacji będzie większa. W takim przypadku rozbieżności między rzeczywistą i pomierzoną przepuszczalnością betonu otuliny mogą być mniejsze od przedstawionych wyżej.

Badania prezentowane w referacie zostały zrealizowane w ramach projektu badawczego N N506 072138 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki

Literatura

1. Torrent R.J.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, 1992, 25, 358-365.
2. Torrent R.J., Frenzer G.: A method for the rapis determination of the coefficient of permeability of the "covercrete", Int. Symp. Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin, 1995, 985-992.
3. Romer M.: Effect of moisture and concrete composition on the Torrent permeability measurements, Materias and Structures, 2005, 38, 541-547.

4. Glinicki M.A., Nowowiejski G., Dąbrowski M., Gibas K.: Wpływ wilgotności betonu i dodatków popiołowych na gazoprzepuszczalność określaną metodą Torrenta, materiały Konferencji Dni Betonu 2010, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Wisła 2010, 711-720.
5. Tracz T., Śliwiński J.: The effect of moisture state on the permeability of concrete, Proc. of the 58th Annual Scientific Conference on Scientific Problems of Civil Engineering, Rzeszów-Krynica, 2012, 220-221.
6. Jacobs F., Basher M., Andrade C.: Chapter 6. Effect of moisture and temperature on non-destructive penetrability tests, Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover, RILEM TC 189-NEC: State-of-the-Art Report, may 2007, 113-131.
7. Misák O., Kucharczykova B., Vymazal T., Danek P. Schmidt P.: Determination of the quality of the surface layer of concrete using the TPT metod and specification of the impact of humidity on the value of the air permeability coefficient, Ceramics-Silikáty, 2010, 3(54), 290-294.
8. Permeability tester Torrent - Operating Instructions, Proceq.
9. Kollek J.J.: The determination of the permeability to oxygen by the Cembureau method – a recommendation, Materials and Structures, 1989, 22, 225-230.
10. Tracz T.: Wpływ rodzaju cementu na przepuszczalność betonów wysokowartościo-wych, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków, 2005.
11. Śliwiński J., Tracz T.: Metody badania przepuszczalności betonu dla cieczy i gazów, materiały II Sympozjum Naukowo-Technicznego „Trwałość betonu. Metody badań właściwości determinujących trwałość betonu w różnych warunkach eksploatacji, Górażdże Cement S.A., Politechnika Krakowska, 2008, 59-75.
12. Śliwiński J., Tracz T.: Przepuszczalność betonu określana przy przepływie gazu metodą laboratoryjną i polową - porównanie wyników i ich korelacja, materiały VII Konferencji Dni Betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Wisła, 2012,949-958.