

Podstawowe właściwości betonu i jego trwałość

Basic properties of concrete and its durability

1. Wprowadzenie

Trwałość tworzyw cementowych nie jest w kraju problemem nowym. Już przed ponad 100 laty w polskiej literaturze technicznej zwracano na niego uwagę, o czym świadczy artykuł opublikowany w roku 1903 w czasopiśmie Architektura (1). Stwierdzona w ostatnim stuleciu uniwersalność tych kompozytów i ich intensywny rozwój oraz związany z tym ogromny wzrost zastosowań spowodował, iż współcześnie trwałość tworzyw cementowych eksploatowanych w bardzo zróżnicowanych warunkach stała się jedną z najważniejszych i pożądanych właściwości. O wadze problemu trwałości betonu świadczyć może fakt, iż corocznie na świecie wbudowuje się go w ilości około 3,5 mld m³. Jak podaje Mehta (2), według prognoz z końca XX wieku, w samych USA koszt koniecznych do przeprowadzenia prac związanych z niezbędną renowacją tylko betonowych obiektów mostowych szacowano na około 100 mld. USD.

W artykule przedstawiono w jaki sposób poszczególne wybrane podstawowe cechy betonu cementowego - wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość i porowatość oraz przepuszczalność dla mediów ciekłych i gazowych - wpływać mogą na jego trwałość. Zagadnienie to przeanalizowano w kontekście wymagań stawianych betonowi i jego trwałości przez normę betonową PN-EN 206-1:2003 (3), normę PN-S-10040:1999 (4) oraz odpowiednie rozporządzenia ministerialne (5) związane z betonowymi obiektami mostowymi.

2. Tradycyjne i nowoczesne podejście do trwałości betonu

Tradycyjne podejście do problemu trwałości betonu wyrażało się przyjęciem podstawowego założenia, iż cecha ta jest wprost i niemal wyłącznie zależna od wytrzymałości na ściskanie. Uważano, że im wytrzymałość betonu jest wyższa, tym większa będzie równocześnie jego trwałość. Podejście takie miało swoje logiczne uzasadnienie w tym, że większość czynników umożliwiających uzyskanie wzrostu wytrzymałości rzeczywiście sprzyja także podwyższeniu trwałości. Bez wątpliwości bowiem, zarówno na

1. Introduction

The problem of concrete durability is a classic, old issue in our country. Already in 1903, over a hundred years ago, in the Polish technical literature, in the journal "Architektura" a paper dealing with this problem was published (1). Discovered in the last century the universality of these composites and enormous increase of their application brought about that at present the durability of concrete used in differentiated conditions became one of the most important and desired property. The importance of concrete durability is based on the fact that its applications in the world reach about 3.5 billion m³ yearly. As Mehta (2) stated the forecast of the end of XX century in the USA, the cost of indispensable renovation works of concrete bridges only is estimated to be about 100 billions USD.

In the paper the problem of influence of basic concrete properties, such as compressive strength, water absorption, porosity and permeability for liquids and gases on concrete durability is presented. This problem is analysed in the context of the requirements of the PN-EN 206-1:2003 (3) and PN-S-10040:1999 (4) standards and government regulations for bridges (5).

2. Traditional and modern approach to concrete durability

The traditional approach to the problem of concrete durability was based on the assumption that this property is almost exclusively linked with compressive strength. It was the conviction that the durability would increase parallelly with the strength of concrete. This approach has its logic justification in the fact that major factors enabling the strength increase really favour also the durability development. Without doubt strength and durability are influenced by quality and quantity characteristics of porosity the basic parameter determining the concrete texture, and also other building materials (6). However, the traditional approach did not take into account the complexity of the material as well as the processes occurring in the concrete in the different complex environmental influence.

The contemporary approach, presented, among others, by Mehta (2), is "holistic" thus it should be based on the assumption that

wytrzymałość jak i trwałość wpływa jakościowa i ilościowa charakterystyka porowatości, podstawowego parametru charakteryzującego teksturę betonu, a także i innych materiałów budowlanych (6). Podejście tradycyjne nie uwzględniało jednak złożoności samego materiału, jak i procesów w nim zachodzących w warunkach różnych, i także złożonych, oddziaływań środowiskowych.

Podejście współczesne, prezentowane między innymi przez Mehtę (2) ma charakter holistyczny, a więc oparte powinno być na założeniu, iż beton należy rozpatrywać jako wieloskładnikowy układ podlegający takim prawidłowościom, których nie da się wywnioskować na podstawie znanych prawidłowości rządzących poszczególnymi składnikami. Nie jest także możliwe przewidywanie trwałości betonu na podstawie tylko jednej jego cechy.

Autorzy takiego podejścia zwracają równocześnie uwagę, iż warunkami niezbędnymi dla opracowania bardziej precyzyjnych metod prognozowania trwałości, a więc i metod projektowania składu betonu „na zadaną trwałość”, koniecznymi są między innymi:

- opracowanie jednolitych metod zbierania danych dotyczących obserwacji aktualnego stanu użytkowanych obiektów i monitorowania warunków ich eksploatacji,
- wzbogacanie stopnia poznania procesów i mechanizmów degradacji betonu,
- opracowanie nowych, bardziej efektywnych metod oraz sprzętu umożliwiających obiektywną ilościową ocenę destrukcji,
- pełniejsze niż dotychczas uwzględnienie oddziaływań synergicznych poszczególnych czynników powodujących różne rodzaje destrukcji,
- opracowanie kompleksowych modeli zachowania się materiału w określonym środowisku.

Reasumując, przy nowoczesnym podejściu do zagadnienia trwałości betonu, nadal zasadne są poszukiwania zależności między pojedynczymi cechami technicznymi betonu i jego trwałością. Końcowa analiza i ewentualne przewidywanie trwałości muszą być jednak oparte na kompleksowym wnioskowaniu uwzględniającym równocześnie wpływ wszystkich cech materiału istotnych w danych, konkretnych warunkach jego eksploatacji.

3. Wpływ podstawowych właściwości betonu na jego trwałość i normowe ujęcie tego problemu

3.1. Wytrzymałość na ściskanie

Wytrzymałość betonu na ściskanie jest bezsprzecznie jedną z cech odgrywających pierwszorzędą rolę w procesie przewidywania jego trwałości. Rzecz w tym, że nie może ona być traktowana jako jedyny jej wyznacznik. Konieczność równoczesnego uwzględniania i innych czynników wynika z doświadczalnie potwierdzonego faktu, iż betony posiadające taką samą wytrzymałość, nie zawsze są równie trwałe. Ilustracją tego mogą być pokazane na rysunku 1 wyniki badań zależności przepuszczalności jonów chlorkowych od wytrzymałości betonu na ściskanie.

concrete must be regarded as a multicomponent system governed by the rules which cannot be foreseen on the basis of known relationships governing individual components. The forecast of concrete durability is also not possible on the basis of its single property.

The authors of this approach point out also the fact that the indispensable conditions for more adequate methods of forecasting durability, thus also the methods of concrete composition designing “for given durability” are as follows:

- elaboration of standardized procedures of collecting data concerning the condition of constructions and monitoring the conditions of their exploitation,
- development of the knowledge of processes and mechanisms of concrete destruction,
- elaboration of new, more effective methods and equipment giving the quantitative assessment of destruction degree,
- more complete than before taking into consideration the synergic influence of individual factors causing different kinds of destruction,
- elaboration of complex models of the material behaviour in different environments.

Summing up; the modern approach to the problem of concrete durability is applied, further studies of dependence between individual technical properties of concrete and its durability are still valid. However, the final analysis and alternative forecast of durability must be based on complex conclusions, taking into account simultaneously the influence of all material properties, important for the known conditions of exploitation.

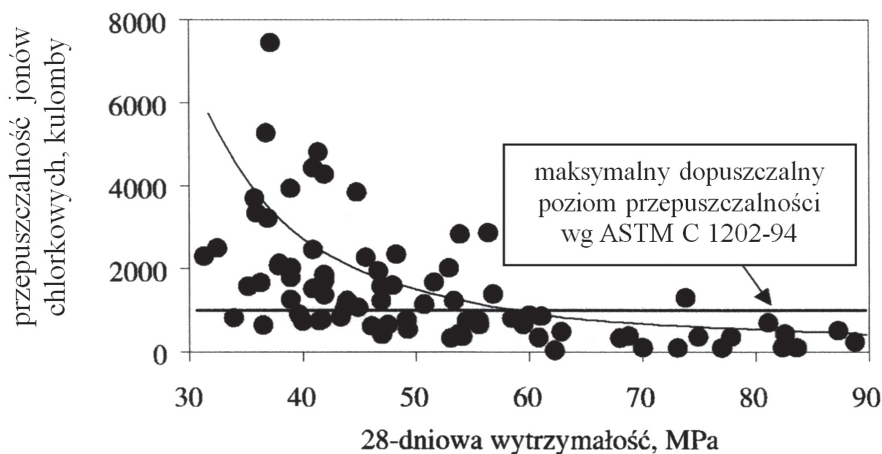
3. The influence of basic concrete properties on durability and its standard approach

3.1. Compressive strength

The strength of concrete is without doubt one of the features which has superior importance in the forecasting of its durability. However, it cannot be considered as its only determinant. The necessity to consider other factors simultaneously is due to the experimentally confirmed fact that the concretes of the same strength have not always equal durability.

It can be illustrated by the data presented in Fig. 1 of permeability of chloride ions dependence upon concrete compressive strength.

On the one hand from the results shown on Fig. 1 it is evident that there is a tendency of permeability decrease with the increase of strength. However, on the other hand, it can be seen that in the range from 30 to about 60 MPa the strength does not assure the decrease of chloride ions migration in concrete. The concrete of strength in this range can have lower or higher permeability for chloride ions than the standard threshold value given in ASTM C1202-94.



Rys. 1. Przepuszczalność jonów chlorkowych Cl^- i wytrzymałość betonu na ściskanie (7)

Fig. 1. Permeability of chloride ions and compressive strength of concrete (7)

Na rysunku 1 wyraźnie widoczna jest z jednej strony ogólna tendencja do obniżania się przepuszczalności wraz ze wzrostem wytrzymałości. Z drugiej zaś, przedstawione wyniki badań świadczą jednak, że w zakresie od 30 do około 60 MPa wzrost wytrzymałości nie zapewnia w sposób jednoznaczny spadku migracji jonów chlorkowych w betonie. Betony o wytrzymałości mieszczącej się w tym przedziale mogą bowiem wykazywać przepuszczalność zarówno niższą, jak i znacznie wyższą od dopuszczalnej według normy ASTM C1202-94.

Opisane wyżej złożone podejście do wytrzymałości jako cechy determinującej trwałość betonu prezentuje norma PN-EN 206-1:2003 (3). Uznaje ona wprawdzie wytrzymałość za właściwość mocno związaną z trwałością, bowiem jako pierwsze wymaganie mające zapewnić pięćdziesięcioletni okres bezawaryjnej eksploatacji betonu w danych warunkach podaje wymaganą minimalną wartość wytrzymałości na ściskanie. W przypadku najłagodniejszych warunków obciążenia betonu czynnikami środowiskowymi (klasa ekspozycji XC1: najłagodniejsze zagrożenie karbonatyzacją) wymagana jest minimalna klasa C20/25, zaś w przypadku warunków najcięższych (klasa ekspozycji XA3: środowisko chemicznie silnie agresywne) klasa C35/45. Dodać jednak trzeba, że norma ta podaje równocześnie dodatkowe wymagania, przy których wytrzymałość ta ma być osiągnięta. Minimalna klasa betonu musi być bowiem uzyskana przy stosowaniu co najmniej minimalnej zawartości cementu i przy co najwyżej maksymalnej wartości wskaźnika w/c . Dla skrajnych warunków eksploatacji (XC1 i XA3) minimalne zawartości cementu wynoszą odpowiednio 260 i 360 kg/m^3 , a maksymalne wartości w/c odpowiednio 0,65 i 0,45. Warto zwrócić uwagę na to, iż z ograniczeń tych (rysunek 2) - opisanych granicznymi wartościami C_{min} i $(w/c)_{max}$ - wynika wprost minimalna zawartość zaczynu w betonie o najgorszej, lecz dopuszczalnej jakości. Wynosi ona odpowiednio 253 dm^3/m^3 dla klasy ekspozycji XC1 i 278 dm^3/m^3 dla klasy XA3.

Podkreślić też należy, że w przypadku oddziaływań czynników o silnej agresywności chemicznej norma stawia dodatkowe wymagania dotyczące stosowania odpornych cementów specjalnych. W przypadku zagrożenia destrukcją mrozową (klasy ekspozycji

The complex approach to the strength as a property assuring the durability of concrete as mentioned earlier, is presented in standard PN-EN 206-1: 2003 (3). It recognizes strength as a property strongly linked with durability, because as the first requirement which should assure the fifty years of good condition of concrete it gives the required threshold compressive strength. In the case of the easiest conditions of loading of concrete by environmental factors [exposition class XCI: the lowest possibility of carbonation] the required lowest class is C20/25, but in the case of the worst conditions [exposition class XA3: the chemically aggressive environments] it is class C35/45. It must be, however, added, that this standard gives simultaneously additional requirements in which this strength should be obtained. The lowest concrete class must be

obtained in the case of at least the lowest cement content and at most the highest w/c ratio. For extreme exploitation terms (XCI and XA3) the lowest cement contents are 260 and 360 kg/m^3 , respectively, and the highest w/c ratio 0.65 and 0.45, respectively. It is worth mentioning that from these requirements (Fig. 2) defined by the values C_{min} and $(w/c)_{max}$ the lowest share of the paste in concrete of the worst but permissible quality results directly. It is equal 253 dm^3/m^3 for the exposition class XCI and 278 dm^3/m^3 for class XA3 respectively.

It should be also stressed that in the case of the influence of strong chemically aggressive agents the standard introduces additional requirements concerning the use of resistant special cements. In the case of the freeze-thaw attack threat (exposition class of group XF) additional special requirements concerning the aggregate quality and air entrainment of concrete mix must be added. The last requirement influences directly the pore structure of material.

3.2. Water absorbance and porosity

Water absorbance, similarly as strength, is a property strongly influenced by the quantity of pores and their structure in concrete. This structure determines the rate of ingress of gases (for example CO_2) and liquids (chiefly water solutions of different substances) into concrete.

The majority of standards concerning concrete destined for the production of different elements and constructions – just in order to assure their durability – give the requirements concerning absorbance. For example, standard PN – S – 10040: 1999 giving detailed requirements for concretes destined for bridge constructions states that the mass absorbance of water should not exceed 5%. The Government regulation (5) adds that the concretes exposed to the agents causing the freeze-thaw destruction should have absorbance lower than 4%. The following question should be put: to which degree does this requirement ($n_m \leq 4\%$) influence the limitation of concrete composition and are these limitations

grupy XF) dochodzą jeszcze specjalne wymagania odnośnie do jakości kruszywa oraz do napowietżenia mieszanki betonowej. To ostatnie wymaganie w sposób jawny dotyczy odpowiedniego kształtowania porowatej struktury materiału.

3.2. Nasiąkliwość wodą i porowatość

Nasiąkliwość wodą, podobnie jak wytrzymałość, jest cechą mocno zależną od ilości porów i ich struktury w betonie. Struktura ta determinuje bowiem szybkość wnikania gazów (na przykład CO₂) i cieczy (przede wszystkim wodne roztwory różnych substancji) do wnętrza betonu.

Większość norm dotyczących betonów przeznaczonych do wykonywania różnych elementów i konstrukcji - właśnie w dbałości o ich trwałość - podaje wymagania odnośnie do nasiąkliwości. Na przykład norma (4), podająca szczegółowe wymagania dla betonów do konstrukcji mostowych, wymaga aby masowa nasiąkliwość wodą była nie większa niż 5%. Rozporządzenie (5) dodaje, iż betony narażone na czynniki powodujące destrukcję mrozową powinny wykazywać nasiąkliwość $\leq 4\%$ m.

Należy postawić pytanie, w jakim stopniu to wymaganie ($n_m \leq 4\%$) koresponduje z ograniczeniami dotyczącymi składu betonu oraz czy ograniczenia składu podane w normie PN-EN 206-1:2003 korespondują z wymaganiem dotyczącym nasiąkliwości?

Przyjęcie jako granicznej wartości nasiąkliwości masowej $n_m = 4\%$ oznacza, że przy przeciętnej gęstości pozornej betonu wynoszącej $\rho_b = 2300 \text{ kg/m}^3$ nasiąkliwość objętościowa nie może przekroczyć $n_o = 0,04 \times 2300 = 92 \text{ kg(dm}^3\text{)/m}^3 = 9,2\%$ obj. To z kolei oznacza, że zawartość dostępnych dla wody porów otwartych nie powinna przekraczać około $\rho_o = 10,5\%$ objętości betonu, czyli około $105 \text{ dm}^3\text{/m}^3$. Szacunek ten wynika z faktu, że zawarte w betonie pory otwarte w warunkach normalnych nie w pełni ulegają wypełnieniu wodą. Najczęściej przyjmuje się, że około 15% porów pozostaje niewypełniona wodą.

Uprościmy dalszy ciąg rozumowania zakładając, że porowatość otwarta większości kruszyw kamiennych jest pomijalnie mała oraz, że cała porowatość otwarta betonu, a więc i jego nasiąkliwość, jest związana jedynie z porowatością zawartego w nim zaczynu cementowego. Oprócz porów w kruszywie pomija się tu więc także pory związane z napowietzeniem zaczynu w trakcie mieszania oraz ewentualne pory mogące wystąpić w strefie przejściowej zaczynu z kruszywem. Jeżeli przyjąć, że przeciętna zawartość zaczynu w betonie wynosi około $300 \text{ dm}^3\text{/m}^3$, porowatość otwarta zaczynu cementowego nie może więc przekroczyć $105/300 = 35\%$ jego objętości. Spróbujmy w dalszym ciągu oszacować w jakim stopniu wymaganie to koresponduje z podanym w załączniku F do normy PN-EN 206-1:2003 (3) ograniczeniem wartości współczynnika w/c charakteryzującego zączyn.

Przyjmijmy w tym celu kolejne założenia, iż:

given in standard PN-EN 206-1: 2003 in relation with requirement concerning absorbance?

The assumption of the border mass absorbance $n_m = 4\%$ means that at the average bulk density of concrete equal $\rho_b = 2300 \text{ kg/m}^3$ volume absorbance can not exceed $n_o = 0.04 \times 2300 = 92 \text{ kg (dm}^3\text{)/m}^3 = 9.2\%$ vol. This in turn means that the content of accessible for water open pores should not exceed about $\rho_o = 10.5\%$ of concrete volume, i. e. about $105 \text{ dm}^3\text{/m}^3$. This estimation results from the fact that the open pores in concrete are not totally filled with water in normal conditions. It is assumed, the most frequently that about 15% of pores remain empty.

Let us simplify the sequence of reasoning by the assumption that the open porosity of crushed aggregates is so low that it can be neglected and that the total open porosity of concrete, thus its absorbance, can be linked with the porosity of cement paste. Besides the porosity of aggregate also the pores formed in the paste due to air entrainment during mixing are also omitted as well as the pores which can appear in the interfacial transition zone. If we assume that the average content of the paste in concrete is about $300 \text{ dm}^3\text{/m}^3$, then the open porosity of the paste cannot exceed $105/300 = 35\%$ of its volume. Let us try to estimate to which degree this requirement is related with the limitation of w/c ratio of the paste, given in the enclosure F to standard PN-EN 206-1: 2003. Let us assume the following for this purpose:

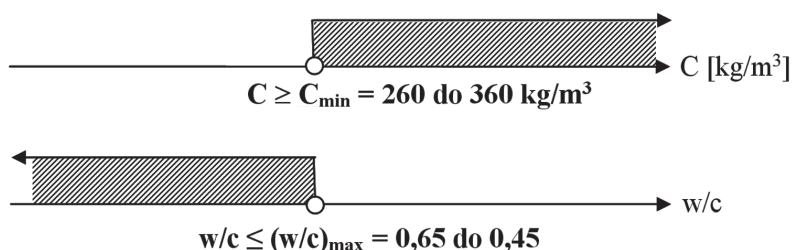
- the degree of cement hydration in mature concrete is 75%,
- the volume of mature paste V_z is equal its starting volume (the shrinkage is not taken into consideration), thus the sum of absolute volumes of cement and water:

$$V_z = \frac{C}{\rho_c} + c \frac{W}{C};$$

where ρ_c cement density equal 3.1 kg/dm^3

minimalna wytrzymałość na ściskanie

lecz uzyskana przy stosowaniu zaczynu cementowego spełniającego wymagania:



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie oraz warunki jej uzyskania związane ze składem ilościowym, jako czynnik zapewniający trwałość betonu (3)

Fig. 2. Compressive strength and the conditions of its getting linked with composition as a factor assuring the concrete durability (3)

Minimal compressive strength yet obtained by the application of cement paste fulfilling the requirement:

$$C \geq C_{\min} = 260 \text{ to } 360$$

$$w/c \leq (w/c)_{\max} = 0.65 \text{ to } 0.45$$

- stopień hydratacji cementu w dojrzałym betonie osiąga 75%,
- objętość dojrzałego zaczynu V_z jest równa jego objętości wyjściowej (nie uwzględnia się jego skurczu), czyli sumie objętości absolutnych cementu i wody:

$$V_z = \frac{c}{\rho_c} + c \frac{W}{c};$$

gdzie ρ_c to gęstość cementu równa 3,1 kg/dm³,

- za Rösslerem i Odlerem (8) można przyjąć, że dla osiągnięcia pełnej hydratacji potrzebna jest woda w ilości stanowiącej około 0,22 masy cementu, czyli w/c niezbędne dla pełnej hydratacji jest równe $(w/c)_H = 0,22$,
- porowatość otwarta zaczynu dojrzałego wynika z nadmiaru dodanej wody w stosunku do wody niezbędnej do hydratacji.

Przy takich założeniach porowatość zaczynu dojrzałego $p_{zaczynu}$ określić można następująco:

$$p_{zaczynu} = \frac{\text{nadmiar wody}}{V_{zaczynu}} = \frac{c \left[\frac{W}{c} - 0,75 \left(\frac{W}{c} \right)_H \right]}{\frac{c}{\rho_c} + c \frac{W}{c}} = \frac{c \left[\frac{W}{c} - 0,75 \times 0,22 \right]}{c \left(\frac{1}{3,1} + \frac{W}{c} \right)} = \frac{\frac{W}{c} - 0,165}{0,322 + \frac{W}{c}}$$

Ponieważ porowatość dojrzałego zaczynu $p_{zaczynu}$ powinna być mniejsza od 35 % objętości, mamy:

$$\frac{\frac{W}{c} - 0,165}{0,322 + \frac{W}{c}} \leq 0,35$$

a stąd:

$$\frac{W}{c} \leq 0,43$$

Ilustrację do przeprowadzonej analizy stanowi rysunek 3.

Oszacowana wyżej, przy daleko posuniętych założeniach upraszczających, graniczna wartość wskaźnika $w/c = 0,43$ odpowiada średniej 28 dniowej kostkowej wytrzymałości betonu zwykłego na poziomie około 40 MPa, czyli w przybliżeniu klasie C30/37.

Porównując otrzymaną wartość graniczną wskaźnika $(w/c)_{max}$ umożliwiającego uzyskanie betonu o nasiąkliwości masowej $\leq 4\%$ oraz przewidywaną jego klasę wytrzymałości z wymaganiami podanymi w załączniku F normy PN-EN 206-1:2003 (3) widać, że obydwie wartości są niemal identyczne z podawanymi tam wartościami granicznymi zalecanymi w przypadkach ostrzejszych oddziaływań środowiskowych (klasy ekspozycji XS2, XS3, XD3, XF4 i XA3). Można stąd wysnuć wniosek, że stosowane przez powyższą normę (3) wymaganie $(w/c)_{max} = 0,45$ zapewnia, iż jedynie takie betony spełnią wymaganie odnośnie do nasiąkliwości masowej $\leq 4\%$.

- after Rössler and Odler (8) we can assume that the w/c ratio should be 0.22, to achieve full hydration,
- open porosity of mature paste is the result of excess water in relation to the quantity indispensable for hydration.

According to these assumptions the porosity of mature paste p_z can be defined as follows:

$$p_{paste} = \frac{\text{water excess}}{V_{paste}} = \frac{c \left[\frac{W}{c} - 0,75 \left(\frac{W}{c} \right)_H \right]}{\frac{c}{\rho_c} + c \frac{W}{c}} = \frac{c \left[\frac{W}{c} - 0,75 \times 0,22 \right]}{c \left(\frac{1}{3,1} + \frac{W}{c} \right)} = \frac{\frac{W}{c} - 0,165}{0,322 + \frac{W}{c}}$$

Because the porosity of mature paste P_z should be lower than 35% of volume, we have:

$$\frac{\frac{W}{c} - 0,165}{0,322 + \frac{W}{c}} \leq 0,35$$

and thus:

$$\frac{W}{c} \leq 0,43$$

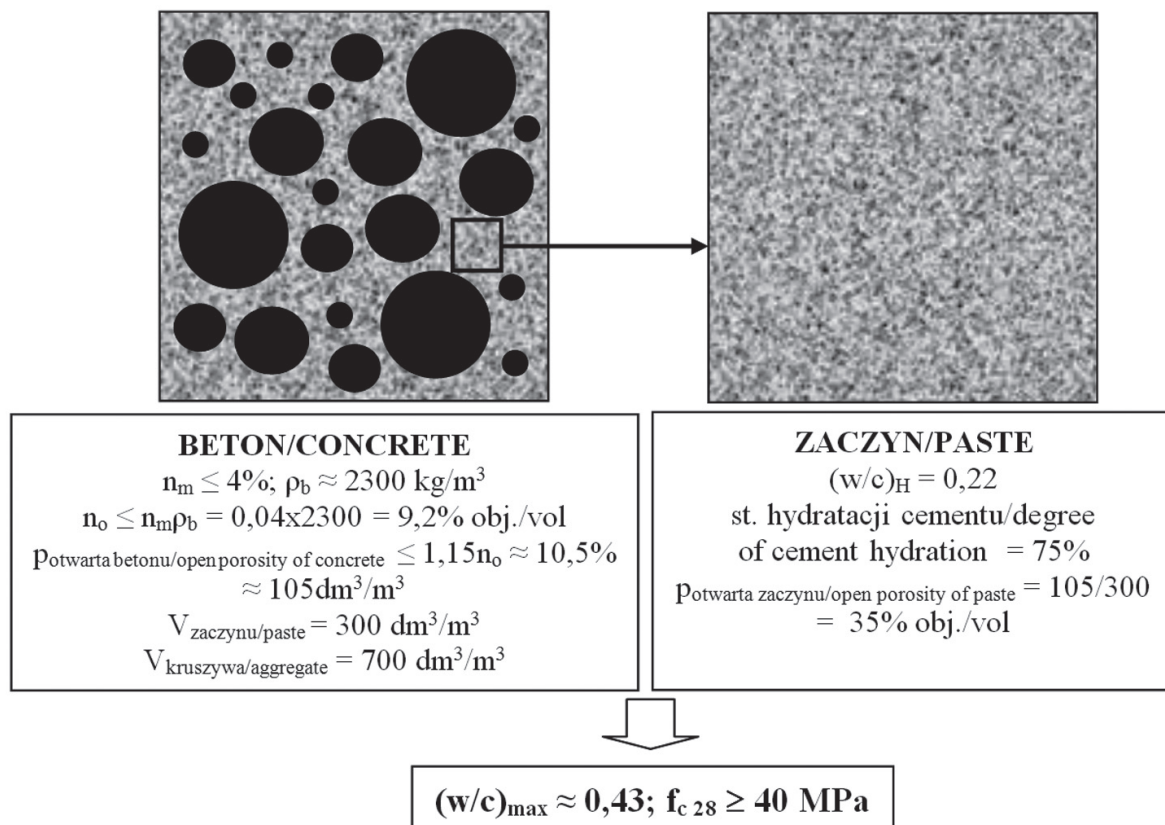
Figure 3 illustrates the performed analysis.

Estimated, under extensive simplifications, the threshold value of w/c ratio = 0.43 corresponds to the cube strength of classic concrete on the level of about 40 MPa, thus, in approximation, to the class C30/37.

Comparing the obtained threshold value of $(w/c)_{max}$ ratio assuring the production of concrete having the mass absorbance $\leq 4\%$ and forecast strength class with the requirements given in the enclosure F to standard PN-EN 206-1: 2003 it is obvious that both values are almost identical with the requirements in the case of sharp environmental influences (exposition classes XS2, XS3, XD3, XF4 and XA3). The conclusion can be drawn that the applied in the above standard (3) requirements for $(w/c)_{max} = 0.45$ assure that only such concretes will have the absorbance $\leq 4\%$ mass.

In the similar manner the analysis made in opposite direction permits to estimate that in the case of $(w/c)_{max}$ equal 0.50; 0.55 and 0.60 the mass absorbance of concrete will attain, respectively, about 4.5, 4.8 and 5.0. It must be mentioned that the adoption of constant content of the paste in concrete on the level of 300 dm³/m³ causes that the analysis concerns the concretes of cement content of about 390 kg/m³, in the case of $w/c = 0.45$, and about 320 kg/m³ at $w/c = 0.60$.

It must be added that the estimated border ratio $w/c = 0.43$ is chosen to the values of w/c stated in Flaga paper (9), who was analysing the possibilities of assuring the absorbance $\leq 4\%$ in the case of different class concretes.



Rys. 3. Powiązanie dopuszczalnej nasiąkliwości betonu (5) z maksymalną wartością wskaźnika w/c i minimalną klasą betonu (3)

Fig. 3. Relation of permissible concrete absorbance (5) with the highest w/c ratio and lowest concrete class (3)

W podobny sposób, prowadząc analizę w odwrotnym kierunku, oszacować można, iż przy wartościach $(w/c)_{\max} = 0,50$; $0,55$ i $0,60$ nasiąkliwość masowa betonów będzie wynosić odpowiednio około 4,5; 4,8 i 5,0. Należy tu zaznaczyć, że przyjęcie stałej zawartości zaczynu w betonie w ilości $300 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ powoduje, iż przeprowadzona analiza dotyczy betonów o zawartości cementu od około 390 kg/m^3 (przy $w/c = 0,45$) do około 320 kg/m^3 (przy $w/c = 0,60$).

Dodać należy, że oszacowana wyżej graniczna wartość wskaźnika $w/c = 0,43$ jest bliska wartościom w/c podanym w pracy Flagi (9), który analizował możliwość spełnienia wymagania uzyskania nasiąkliwości $\leq 4\%$ przez betony różnych klas.

3.3. Przepuszczalność mediów ciekłych i gazowych

Przepuszczalność rozumiana jest jako cecha charakteryzująca opór, jaki beton stawia migracji mediów ciekłych lub gazowych znajdujących się pod ciśnieniem. Zdaniem licznych autorów, na przykład Barona i Olliviera (6), Aitcina (10) oraz Torrenta (11), cecha ta najlepiej określa stopień dostępności porowatego materiału dla różnych mediów. Im przepuszczalność jest mniejsza, tym potencjalna trwałość materiału powinna być większa, gdyż tym mniej potencjalnie szkodliwego medium może wniknąć do materiału. Podobnie jak nasiąkliwość i wytrzymałość, zależy ona mocno od ilości i struktury porowatości betonu. Z tego powodu przepuszczalność jest powiązana także i z innymi cechami materiału zależnymi od jego porowatej struktury.

3.3. Permeability of gaseous and liquid media

Permeability is a property presenting the resistance of the concrete against the migration of gaseous and liquid media under pressure. According to the opinion of several authors, for example Baron and Ollivier (6), Aitcin (10) and Torrent (11), this property characterizes in the best way the degree of the porous material accessibility to different media. The lower permeability, the higher potential durability of material because the lower amount of harmful medium can penetrate it. Similarly as absorbance and strength, it is strongly dependent upon the quantity and structure porosity of concrete. For this reason permeability is dependent also upon other properties of the material, governed by its porosity structure.

The permeability of concrete can be measured in the case of liquid – for obvious reasons the most frequently used is water – and gases flow. In the latter case usually the media used are air, oxygen, nitrogen or CO_2 .

In the case of experiments with water flow the most popular measures of permeability are: the popular, frequently used degree of water – tightness, defined and measured according to standard PN-88/B-06250 – Classic Concrete, and so called rate flow index (13). The latter one, which gives the medium, conventional rate of displacement of water front under pressure in the material, can be calculated from the formulas:

$$- k_v = \frac{g_{\max}^2}{2ht}, \text{ in the case of water flow under constant pressure,}$$

Przepuszczalność betonu można badać w przypadku przepływu cieczy – z oczywistych powodów najczęściej wody – lub gazu. Zazwyczaj medium stosowanym w pomiarach jest powietrze, tlen, azot lub dwutlenek węgla.

W przypadku badań przy przepływie wody najpopularniejszymi miarami przepuszczalności są: popularnie stosowany i znany w kraju stopień wodoszczelności, zdefiniowany i badany według normy PN-88/B-06250. Beton zwykły. (12) oraz tak zwany wskaźnik prędkości przepływu (13). Ten ostatni, podający wartość średniej umownej prędkości przemieszczania się w materiale czoła wody pod ciśnieniem, obliczyć można według wzorów:

$$- k_v = \frac{g_{max}^2}{2ht}, \text{ m/s w przypadku przepływu wody pod stałym ciśnieniem,}$$

$$- k_v = \frac{g_{max}^2}{2\sum h_i t_i} \text{ m/s przypadku przepływu wody pod ciśnieniem zmieniającym się skokowo,}$$

gdzie określone podczas badań doświadczalnych:

g_{max} – maksymalna głębokość penetracji wody, m,

h, h_i – ciśnienie, odpowiednio stałe lub i -te działające okresowo, m słupa wody,

t, t_i – czas trwania ciśnienia, odpowiednio h lub h_i, s .

Obydwe podane wyżej charakterystyki można ze sobą skorelować w ten sposób, że dla poszczególnych stopni wodoszczelności ustalić można maksymalne dla nich wartości wskaźnika prędkości przepływu. W tym celu, do drugiego z podanych wyżej wzorów wstawiać należy:

- $g_{max} = 0,15$ m (według (12) dany stopień wodoszczelności osiągnięty jest, gdy woda przecieknie przez próbkę sześcienną $0,15^3$ m),
- $t_i = \text{const.} = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$ (według (12) dane ciśnienie: 2, 4, 6, 8, 10 lub 12 atm utrzymywane jest w czasie 24 h),
- wartość maksymalnego ciśnienia wody, która w zależności od stopnia wodoszczelności wynosi: $h_i = 20, 40, 60, 80, 100$ lub 120 m słupa wody.

Maksymalne wartości współczynnika prędkości przepływu k_v , odpowiadające poszczególnym stopniom wodoszczelności podano w tablicy 1, zaś przebieg zależności $k_{v, max} - W$ na rysunku 4.

W ostatnim czasie coraz popularniejszym staje się badanie przepuszczalności przy przepływie mediów gazowych, czego powodem jest pojawienie się betonów o bardzo wysokiej szczelności wobec wody. Cecha ta określana jest w badaniach, których ogólną zasadę wyraża wzór:

$$k = \frac{2QP_a\eta L}{A(P^2 - P_a^2)}$$

w którym: $Q = V/t$ – określone doświadczalnie natężenie przepływu, m^3/s ,

P – stosowana wielkość ciśnienia (absolutnego), Pa,

$$- k_v = \frac{g_{max}^2}{2\sum h_i t_i} \text{ in the case of water flow under changed pressure}$$

where; experimentally measured:

g_{max} – maximum depth of water penetration, m

h, h_i – pressure constant or h_i applied periodically, m of water

t, t_i – time of applied pressure h or h_i respectively, s.

The results of both methods can be correlated by establishing for the individual water – tightness degree the maximal values of rate flow index. To achieve this, we should substitute to the second formula the following:

- $g_{max} = 0.15$ m (according to the results given in the paper (12) the given degree of water – tightness is achieved when the water filtered through the cube sample is 0.15 m^3),

- $t_i = \text{const} = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$ (as above according (12) the constant pressure is maintained during 24h),

- the maximum water pressure which, depending upon, water – tightness degree is equal $h_i = 20, 40, 60, 80, 100$ or 120 m of water.

The maximal values of rate flow index k_v , corresponding to individual water – tightness degrees, are given in Table 1 and the curve of $k_{v, max}$ as a function of W is presented in Fig. 4.

Recently the permeability tests for gaseous media flow have become popular which is due of concrete appearing with extremely high water – tightness. The gas flow test is illustrated by the following formula:

$$k = \frac{2QP_a\eta L}{A(P^2 - P_a^2)}$$

where: $Q = V/t$ – measured flow intensity, m^3/s

P – pressure applied, Pa,

P_a – atmospheric pressure, Pa,

η – dynamic gas plasticity, Pa · s,

A – cross section of the sample, m^2 ,

L – sample thickness, m.

Permeability defined by the above equation is a material constant, independent of gaseous medium which is used for its determination. For example, on the basis of the known permeability (k value), it is possible to evaluate the quality of concrete also in the context of the cover on reinforcement of steel protection ability. In Table 4 the classification of this ability given by Torrent (11) is presented.

Permeability, as it was already mentioned above, is a property which is governing directly the durability of cement concrete, exposed to the influence of gaseous and liquid media, from the environment. The importance of this property and its influence on concrete durability is testified by the fact that, for example, the concrete applied for element production in Channel Tunnel must have the flow rate index k_v (measured for water flow) not higher than 10^{-12} m/s (14). It can be estimated that the degree of water

Tablica 1 / Table 1

STOPNIE WODOSZCZELNOŚCI W WG NORMY (12) I ODPOWIADAJĄCE IM MAKSYMALNE WARTOŚCI WSKAŹNIKA PRĘDKOŚCI PRZEPIŁYWU $k_{v,max}$

WATER – TIGHTNESS DEGREES W ACCORDING TO THE STANDARD PN-88/B-06250 AND CORRESPONDING MAXIMAL FLOW RATE INDEX

$k_{v,max}$

Stopień wodoszczelności Water - tightness	Maksymalna wartość Maximal value $k_{v,max} \cdot 10^{-10}, \text{ m/s}$
W 2	65,1
W 4	21,7
W 6	10,9
W 8	6,5
W 10	4,3
W 12	3,1

P_a – ciśnienie atmosferyczne, Pa,

η – lepkość dynamiczna gazu, Pa·s,

A – powierzchnia przekroju próbki, m^2 ,

L – grubość próbki, m.

W przypadku przepuszczalności opisanej powyższym wzorem stanowi ona stałą materiałową niezależną od medium gazowego, przy przepływie którego była oceniana. Znając przepuszczalność (wartość k), można na przykład ocenić jakość betonu w kontekście jego zdolności ochronnych wobec stali. W tablicy 2 podano stosowną klasyfikację zaproponowaną przez Torrenta (11).

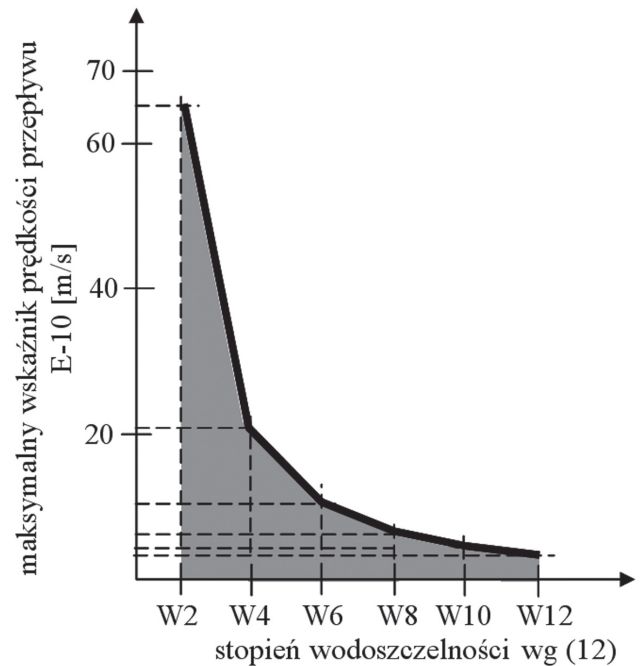
Tablica 2 / Table 2

KLASYFIKACJA JAKOŚCI OTULINY W ZALEŻNOŚCI OD PRZEPUSZCZALNOŚCI BETONU WEDŁUG TORRENT'A (11)

CLASSIFICATION OF STEEL PROTECTION ABILITY OF CONCRETE COVER AS A FUNCTION OF CONCRETE PERMEABILITY

Zdolność ochronna otuliny Protection ability of the concrete cover	Wartość k , betonu k value of concrete 10^{-16} m^2
bardzo dobra very good	< 0,01
dobra/good	0,01 do 0,1
przeciętna/average	0,1 do 1,0
zła/bad	1,0 do 10
bardzo zła/very bad	> 10

Przepuszczalność, o czym już wspomniano na wstępie, jest cechą, od której bezpośrednio zależy trwałość betonu cementowego poddanego oddziaływaniu mediów ciekłych i gazowych pochodzących ze środowiska. O ważności tej cechy i jej wpływie na trwałość betonu świadczyć może fakt, iż na przykład od betonu stosowanego do wykonywania elementów Eurotunelu pod kanałem La Manche wymagano, aby charakteryzował się wspomnianym współczyn-



Rys. 4. Wskaźnik prędkości przepływu k_v odpowiadający stopniom wodoszczelności od W2 do W12

Fig. 4. Flow rate index k_v corresponding to water – tightness degrees from W2 to W12

tightness of this concrete must, according to PN-88/B-06 250, have the level of W48.

To which degree the concrete permeability is linked with compressive strength show the works of Flaga and Rudka (15) and Torrent & Jornet (16).

According to the author of the first paper (15) the permeability of concrete, having compressive strength in the range 40 to 70 MPa, is correlated with its compressive f_c and splitting strength f_t by the following equations:

$$k_v = - 0,23f_c + 17,42 \text{ by } r = 0,848; R^2 = 0,719,$$

$$k_v = - 3,14f_t + 12,34 \text{ by } r = 0,970; R^2 = 0,940.$$

The attention should be paid to the fact that the correlation of permeability with strength is much higher in the case of splitting than compressive strength.

The work of Torrent and Jornet embraced the correlation of compressive strength with permeability tested by oxygen flow (Fig. 5). It is worth mentioning that in this case the correlation of two properties is much stronger than in the case presented in Fig. 1 and concerning strength and chloride ions permeability.

4. Summary

The information presented in the paper shows clearly that the concrete durability exposed to different agents is defined by its basic properties. It can be also concluded that the durability forecast must be based on all concrete properties the influence of which upon durability is known, and taking into account their

niem prędkości przepływu k_v (określanym przy przepływie wody) nie większym od 1×10^{-12} m/s (14). Można szacunkowo ocenić, że innymi słowy wymagano od tego betonu osiągnięcia stopnia wodoszczelności w rozumieniu normy (12) na poziomie około W48.

W jakim stopniu przepuszczalność betonu związana jest z jego wytrzymałością na ściskanie, świadczyć mogą wyniki badań podane między innymi w pracach Flagi i Rudki (15) oraz Torrenta i Jorneta (16).

Według autorów pracy (15) przepuszczalność betonu o wytrzymałości na ściskanie w zakresie od 40 do 70 MPa, mierzona współczynnikiem prędkości przepływu wody k_v zależy w następujący sposób od wytrzymałości na ściskanie f_c oraz od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu f_t :

$$k_v = -0,23f_c + 17,42 \quad \text{przy } r = 0,848; \\ R^2 = 0,719,$$

$$k_v = -3,14f_t + 12,34 \quad \text{przy } r = 0,970; R^2 = 0,940.$$

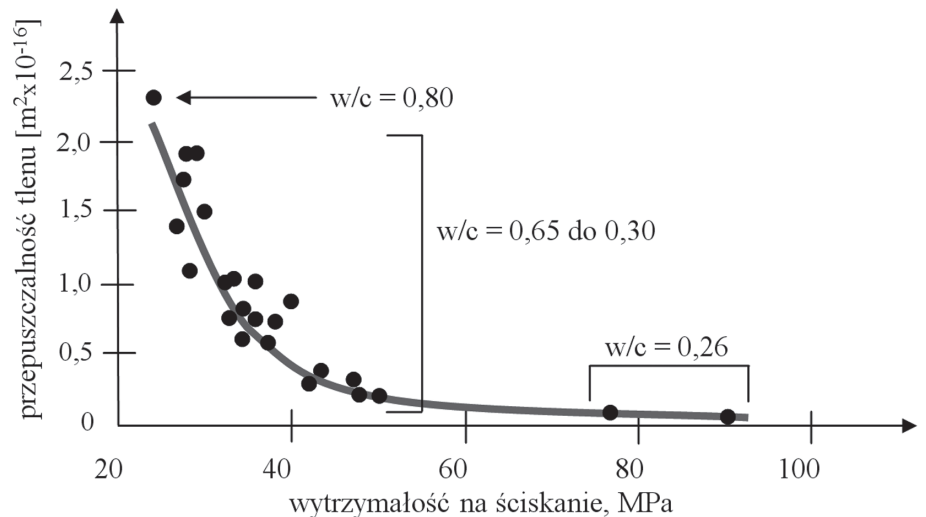
Na uwagę zasługuje tu wyraźnie silniejszy związek przepuszczalności z wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu niż z wytrzymałością na ściskanie.

Badania prezentowane w pracy Torrenta i Jorneta (16) dotyczyły zależności między wytrzymałością na ściskanie i przepuszczalnością określaną przy przepływie tlenu. Przedstawiono ją na rysunku 5. Warto zauważyć, iż w tym przypadku korelacja wartości obydwu cech jest wyraźnie silniejsza, niż w przypadku pokazanym na rysunku 1, dotyczącym wytrzymałości i przepuszczalności jonów chlorkowych.

4. Podsumowanie

Podane w artykule informacje wskazują bardzo wyraźnie, że trwałość betonu eksploatowanego w warunkach oddziaływań różnych czynników zewnętrznych zależy od jego podstawowych właściwości. Wynika z nich także, że ocena trwałości musi być prowadzona przy równoczesnym uwzględnieniu wszystkich właściwości betonu, których wpływ na trwałość jest znany, a także przy uwzględnieniu ich wzajemnych powiązań. Pokazano także, w jaki sposób wymagania normy PN-EN 206-1:2003 (3) dotyczące składu betonu, zapewniają jego trwałość.

Na zakończenie autor chciałby wyrazić opinię, iż w krajowej, dosyć bogatej literaturze technicznej dotyczącej zagadnień związanych z trwałością betonu, brak jest opracowania, które w sposób kompleksowy przedstawiałoby tą problematykę. Jako wzór takiego opracowania zdaniem autora służyć może wydana przed kilkunastoma laty we Francji praca pod redakcją Barona i Olliviera (5).



Rys. 5. Zależność przepuszczalności betonu, mierzonej przepływem tlenu, od wytrzymałości na ściskanie (16)

Fig. 5. Permeability of concrete (tested with oxygen flow) as a function of compressive strength (16)

correlations. It was also shown how standard PN-EN 206-1: 2003 (3) requirements concerning the concrete composition, assure its durability.

Concluding the author wishes to state that in the Polish relatively rich technical literature concerning the problem of concrete durability there is no monograph presenting this subject in a complex manner. As an example of such a monograph is the French book, edited by Baron and Ollivier, about 12 years ago.

Literatura / References

1. C. A. Goslich, Szkodliwe wpływy na przyrządzanie zaprawy i betonu z portland-cementu, czasopismo Architektura, 9 (1903).
2. P. K. Mehta Durability - Critical Issues for the Future, Concrete International, 27-33, July 1997.
3. PN-EN 206-1:2003: Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
4. PN-S-10040:1999: Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Wymagania i badania.
5. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej nr 735 dotyczące warunków jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, Dz.U.nr 63, poz.735 z dnia 30. V. 2000.
6. Praca zbiorowa pod red. Baron J., Ollivier J-P.: La durabilité des bétons, Presse de l'ENPC, 1992.
7. J. Olek, Betony wysokowartościowe - przegląd technologicznych doświadczeń w USA, materiały Konferencji Dni betonu - tradycja i nowoczesność, Stowarzyszenie Producentów Cementu i Wapna, Polski Cement, 91-112, Szczyrk 2002.
8. M. Rössler, I. Odler, Investigation on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes. I. Effect of porosity, Cem. Concr. Res., **15**, 320-330 (1985).
9. K. Flaga, Szczególne wymagania stawiane betonom konstrukcyjnym w mostownictwie, materiały Konferencji Naukowo-Technicznej *Wybrane problemy technologii betonu i konstrukcji betonowych*, Politechnika Krakowska, 23-37, Kraków 1997.
10. P-C Aïtcin, Béton haute performance, Eyrolles, Paris 2001.
11. R. J. Torrent, A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, vol. 25, nr 150, 358-365, July 1992.
12. PN-88/B-06250: Beton zwykły.
13. J. Śliwiński, K. Witek, Metody oceny parametrów charakteryzujących wodoszczelność betonów, Inżynieria i Budownictwo, 10, 467-470 (1994).
14. P. Jensen, Le problème de la durabilité des structures en béton confrontée à un environnement particulièrement hostile, Annales de l'ITBTP, 505, 1992.
15. K. Flaga, T. Rudka, Spostrzeżenia dotyczące przepuszczalności betonów mostowych przy badaniu ich wodoszczelności, materiały IV Konferencji Naukowo-Technicznej *„Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej”* Matbud, Politechnika Krakowska, 144-151, Kraków 2003.
16. R. J. Torrent, A. Jornet, The Quality of the Covercrete of Low-, Medium- and High Strength Concretes, Proc. of the 2nd Int.Conf. on *Durability of Concrete*, ACI SP-126, Editor Malhotra V.M., 1147-1161, Montreal 1991.