

Beata ŁAŻNIEWSKA\*  
Politechnika Śląska

## MODEL KINETYKI ZMIAN POROWATOŚCI BETONÓW SAMOZAGĘSZCZALNYCH (SCC)

**Streszczenie.** W referacie podjęto problematykę badania zmian porowatości SCC. Wykorzystano model numeryczny kinetyki zmian porowatości, który bazuje na teorii homogenizacji tworzywa [18, 19, 20]. W wyniku procesu samozagęszczania w tworzywie występuje pewna ilość porów powietrznych. Z punktu widzenia odporności mrozowej stwardniałego tworzywa powinno się ono charakteryzować optymalną zawartością porów powietrznych. Wielkość porów oraz ich rozstaw również decyduje o mrozoodporności SCC, o czym będzie mowa w niniejszym referacie. Postawiono tezę, że istnieje związek pomiędzy kinetyką zmian porowatości mieszanki a odpornością mrozową stwardniałego tworzywa.

## THE KINETICS MODEL OF POROSITY CHANGES OF SELF COMPACTING CONCRETE (SCC)

**Summary.** This report brings closer problem of investigation of SCC porosity changes. Numeric model kinetics of porosity changes is bases on theory of homogenisation with guarantees suitable quantity of aerial pores witch doubtlessly enlarges frost resistance of concrete.

### 1. Wprowadzenie

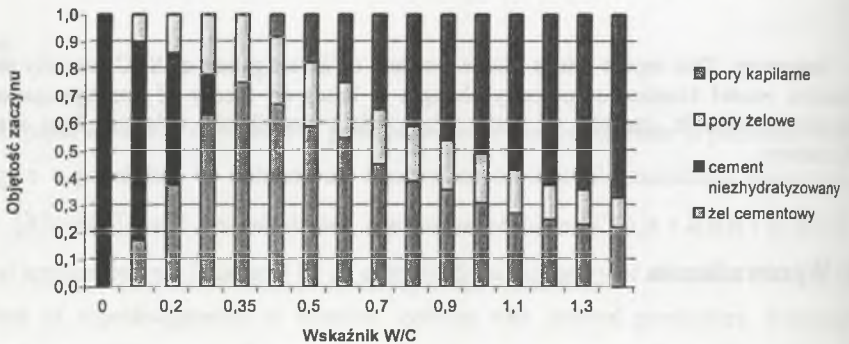
Betonowanie przy użyciu betonów samozagęszczalnych (Self-Compacting Concrete – SCC) jest obecnie najbardziej dynamicznie rozwijającą się dziedziną technologii betonu. Składniki SCC dobierane są nie tylko ze względu na jego wytrzymałość i trwałość, ale przede wszystkim ze względu na specyficzne właściwości reologiczne mieszanki, zapewniające formowanie betonu bez potrzeby jego wibracyjnego zagęszczania. Podstawową cechą SCC jest wysoka płynność przy jednoczesnym braku segregacji składników [1]. SCC charakteryzują się niskim wskaźnikiem wodno-cementowym oraz ciekłą konsystencją i

\* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Jan Ślusarek.

szczególnie korzystną urabialnością. Projektując SCC, należy zapewnić zdolność mieszanki do samoistnego odpowietrzania. Optymalna porowatość betonu stanowi o jego odporności mrozowej, która będzie przedmiotem rozważań w pracy doktorskiej. Referat stanowi wstęp do badań. Rozważana będzie kinetyka zmian porowatości powietrznej w procesie samozagęszczania się betonu. Istotą tego procesu jest homogenizacja tworzywa, polegająca na usunięciu nadmiaru powietrza z mieszanki betonowej. Wykorzystanie równania homogenizacji pozwoli na zidentyfikowanie parametrów odporności mrozowej (niejednorodności końcowych). Równanie homogenizacji wydaje się być dobrym narzędziem do opisu kinetyki zmian porowatości powietrznej SCC.

## 2. Istota struktury SCC

Rzeczywiste rozmiary i rozmieszczenie porów powietrznych w betonie mogą być bardzo zróżnicowane. SCC cechują się wskaźnikiem W/C < 0,50. Zmienność proporcji objętościowych w stwardniałym zaczynie cementowym w zależności od współczynnika W/C (przy założeniu pełnej hydratacji cementu) przedstawia rysunek 1.

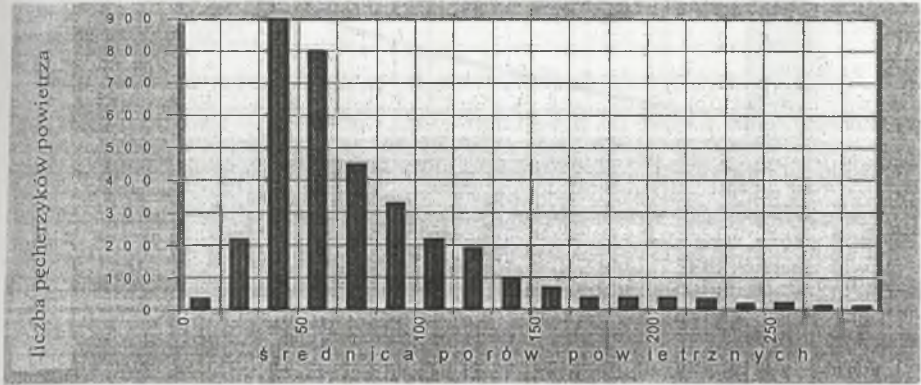


Rys. 1. Stosunki objętościowe w stwardniałym zaczynie cementowym wg [2]

Fig. 1. Voluminal relations in hardened cement leaven, accord to [2]

Decydujący wpływ na odporność mrozową mają pory kapilarne [3]. Hadley [4], [5] uważa, że przy małym wskaźniku W/S pory tzw. *hollow-shell pores* (HS) mogą mieć ponad dwukrotnie większe wymiary w stosunku do występujących wtedy drobnych porów kapilarnych. Istnienie nawet niewielkiej ilości takich porów może prowadzić do nieoczekiwanego niszczenia mrozowego SCC [3].

Na rysunku 2 przedstawiono rozkład wielkości porów powietrznych w typowym, odpowiednio napowietrzonym betonie (powietrze stanowi około 5,5% objętości betonu).



Rys. 2. Rozkład średnic porów powietrznych [μm] określony na podstawie obserwacji typowego przekroju napowietrzonego betonu [6]

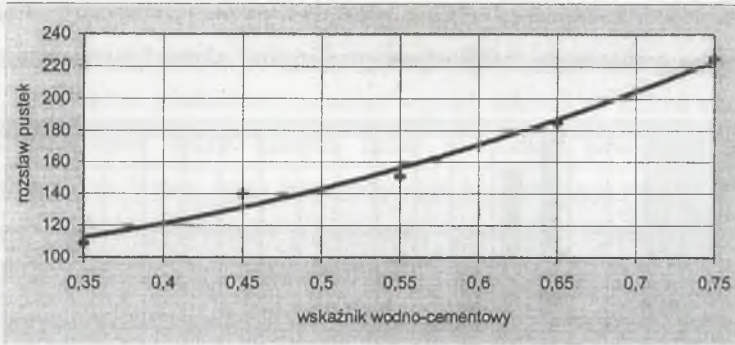
Fig. 2. Aerial definite of diameters of pores [μm] schedule on basis of observation of typical section air-entraining of concrete [6]

Podstawowym wymaganiem, które zapewnia efektywność napowietrzania, jest ograniczenie maksymalnego dystansu, jaki wypierane powietrze musi przebyć. Miernikiem stosowanym w praktyce jest rozstaw pęcherzyków powietrza  $\bar{L}_{cr}$ , tj. grubość warstwy stwardniałego zaczynu cementowego pomiędzy najbliższymi pęcherzykami powietrza.

Końcowa jakość napowietrzenia zależy od wielu czynników, które decydują o wielkości pęcherzyków [6], [7], [8]. Przy danej zawartości powietrza rozstaw pustek powietrznych zależy od wskaźnika wodno-cementowego mieszanki, jak pokazano na rysunku 3. Struktura porów dla betonów o  $W/C < 0,40$  może być nieco odmienna – przy podobnych zawartościach powietrza uzyskiwane są pory powietrzne o większych rozmiarach i wartościach  $\bar{L}_{cr}$  [9], [10], [11]. Przy wskaźnikach wodno-cementowych poniżej 0,4 betony zawierające superplastyfikator wykazują dobrą odporność na zamarzanie i odmarzanie przy wartości współczynnika rozstawu porów nieco większej niż zazwyczaj wymagana (do 240 μm).

Zależność pomiędzy  $\bar{L}_{cr}$  a wskaźnikiem  $W/C$  stanowi przesłankę do szukania odpowiedzi na pytanie, czy SCC o bardzo szczelnej strukturze (niskim  $W/C$ ) wymagają napowietrzenia, czy też nie [12], [13] ?





Rys. 3. Wpływ wskaźnika wodno-cementowego na rozstaw pustek w betonie [ $\mu\text{m}$ ] o średniej zawartości powietrza 5% wg [14]

Fig. 3. Of relation water - cement onto span of emptinesses in concrete [ $\mu\text{m}$ ] about average contents of air 5% of accord to [14]

Niektóre superplastyfikatory, w połączeniu z pewnymi cementami i domieszkami napowietrzającymi, mogą wytworzyć niestabilny układ pustek powietrznych.

Przy porównywalnej porowatości całkowitej stwardniały zaczyn cementowy zawierający dodatki pyłaste ma pory drobniejsze od czystego zaczynu cementowego o tej samej wartości W/C [15], [16], [17]. Dodatkowym efektem obserwowanym w przypadku wszystkich dodatków mineralnych jest zjawisko obniżenia zawartości powietrza w mieszance betonowej, w porównaniu z mieszankami betonowymi z czystym cementem portlandzkim o zbliżonej urabialności. Rusin [8] twierdzi, że jeśli całkowita zawartość wody w mieszance betonowej, to znaczy wody zarobowej oraz wody zawartej w kruszywie i wprowadzonej wraz z domieszkami chemicznymi, w stosunku do masy czystego cementu portlandzkiego wynosi więcej niż 0,37 ( $W/C > 0,37$ ), to niezależnie od ilości pyłów krzemionkowych należy wykonać zabieg napowietrzania. Pojawiają się jednak doniesienia o przypadkach uszkodzeń lub zniszczeń betonów o  $W/C < 0,35$  (nawet 0,26) [9], [10], [6], przy czym W/C jest określane często dla spoiwa zawierającego dodatki mineralne, np. pył krzemionkowy.

### 3. Model matematyczny kinetyki zmian porowatości SCC

#### 3.1. Ogólne założenia modelowe

W celu identyfikacji związku pomiędzy kinetyką zmian porowatości powietrznej oraz odpornością mrozową stwardniałego tworzywa można wykorzystać teorię homogenizacji. Parametry równania homogenizacji, takie jak: współczynnik dyfuzji

pęcherzyków powietrza w mieszance, czas relaksacji (tj. czas, po upływie którego pierwotna niejednorodność maleje „e” razy), niejednorodności końcowe (tj. końcowa zawartość powietrza w betonie), pozwolą na ilościową charakterystykę odporności mrozowej wybranych tworzyw SCC.

Jako podstawę do rozważań przyjęto II prawo Ficka. Jeżeli współczynnik dyfuzji  $D$  nie zależy od koncentracji ( $c$ ), a więc i od współrzędnej  $x$ , wzdłuż której zmienia się koncentracja, to prawo to można zapisać w postaci równania:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

gdzie:

$t$  – czas dyfuzji,

$x$  – współrzędna, wzdłuż której zmienia się koncentracja,

$D$  – współczynnik dyfuzji.

$c$  – koncentracja składnika (pęcherzyków powietrza).

Rozwiązaniem równania (1) dla czasów długich jest zależność opisująca przebieg homogenizacji tworzywa. Jeżeli warunek początkowy ( $t = 0$ ) można opisać zależnością

$$c(x) = c_0 + c_m \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (2)$$

gdzie:

$c_0$  – niejednorodności końcowe,

$c_m$  – niejednorodności początkowe,

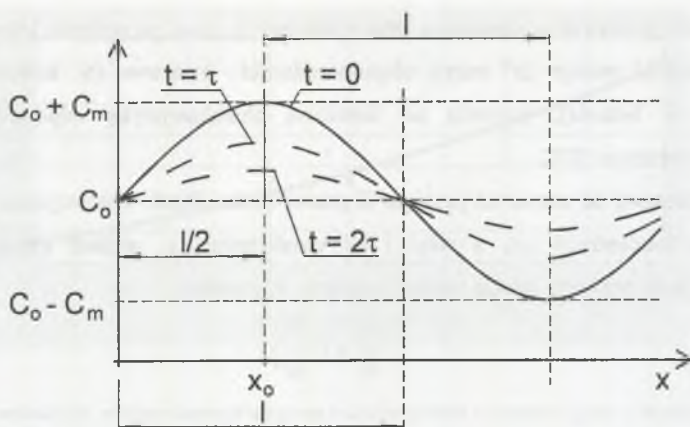
to rozwiązaniem równania (1) będzie zależność [18], [19], [20]:

$$c(x, t) - c_0 = c_m \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3)$$

gdzie:

$$\tau \equiv \frac{l^2}{\pi^2 D} \quad (4)$$

jest czasem relaksacji, tj. czasem, po upływie którego pierwotna niejednorodność maleje „e” razy. Czas relaksacji daje informację, jak szybko układ zbliża się do stanu równowagowego. Graficzną interpretację równania homogenizacji (3) przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Graficzny obraz przebiegu homogenizacji  
Fig. 4. The course of homogenization

### 3.2. Metodyka badań

Niejednorodności końcowe, tj. końcowa porowatość betonu, zbadane zostaną na podstawie laboratoryjnych badań zawartości powietrza w mieszance betonowej. Zawartość powietrza mierzona będzie po czasie  $t = t_1, t_2, t_3 \dots t_n$ . Pozwoli to na wyznaczenie czasu relaksacji  $\tau$ . Określenie tego czasu da informację, jak szybko układ zbliży się do stanu równowagi. Analiza wyników badań pozwoli na identyfikację współzależności odporności mrozowej stwardniałego SCC i parametrów  $D, c_0, c_m, \tau$ . W referacie postawiono bowiem tezę, że istnieje ścisły związek pomiędzy kinetyką zmian porowatości powietrznej mieszanki a odpornością mrozową stwardniałego tworzywa SCC.

### 4. Podsumowanie

Struktura porowatości SCC kształtowana jest przez wiele czynników i w rezultacie decyduje o mrozoodporności. Należy zauważyć, że mrozoodporność betonu zależy między innymi od współczynnika rozstawu  $\bar{L}_{cr}$  oraz od wielkości porów powietrznych. Warto zwrócić uwagę, że niektóre kombinacje domieszek stosowanych w SCC mogą być wzajemnie niekompatybilne i mogą zmieniać współczynnik rozstawu  $\bar{L}_{cr}$  i wielkość porów, a w rezultacie pogarszać mrozoodporność betonu.

W pracy doktorskiej przeanalizowane będą zmiany porowatości świeżej mieszanki betonowej oraz obserwowana będzie struktura stwardniałego SCC. Wielkości, takie jak: zawartość powietrza w betonie, wielkość oraz rozstaw porów, analizowane będą na podstawie badań laboratoryjnych. W celu identyfikacji związku pomiędzy kinetyką zmian porowatości powietrznej oraz odpornością mrozową stwardniałego tworzywa wykorzystana zostanie teoria homogenizacji. Analiza struktury stwardniałego betonu oraz kinetyka zmian porowatości mieszanki pozwoli na ilościową charakterystykę odporności mrozowej wybranych tworzyw SCC.

#### LITERATURA

1. Okamura H., Ouchi M.: SCC. Development, present use and future, 1<sup>st</sup> It. RILEM Symp. on SCC, Stockholm, Sep. 13-14 1999, ed. RILEM Publ. S.A.R.L., p. 13-14.
2. Sulikowski J.: Cement – produkcja i zastosowanie, Arkady, Warszawa 1981.
3. Rusin Z.: Mrozoodporność betonowych nawierzchni drogowych. Polski Cement, kwiecień – czerwiec 2002 r., s. 44-46.
4. Hadley D., Dolch W., Diamond S.: On the occurrence of hollow-shel hydration grains in hydrated cement paste. Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, p. 1-6 .
5. Hadley D.: The nature of the paste-aggregate interface. Ph.D. thesis, Purdue University, 1972.
6. Pigeon M., Pleau R.: Durability of Concrete in Cold Climates. Modern Concrete Technology Series, E & FN SPON, 1995.
7. Neville A.M.: Właściwości betonu. Polski Cement, Kraków 2000.
8. Rusin Z.: Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement, Kraków 2000.
9. Litvan G.: Air entrainment in the presence of superplasticizers. ACI Journal, Vol. 80, No. 4, 1983, p. 326-331.
10. Philleo R.: Frost susceptibility of high – strength concrete. Katharine and Bryant Mather International Conference – Concrete Durability, American Concrete Institute, SP – 100 – 46, Atlanta 1987, p. 821-842.
11. Sommer H.: The precision of the microscopical determination of the air void system in hardened concrete. Cement, Concrete and Aggregates. Vol. 1, No. 2, 1979, p. 49-55.
12. Aitcin P. –C.: High performance concrete. E & FN SPON, London 1998.



13. Aitcin P. –C.: Trwały wysokowartościowy beton – sztuka i wiedza. Konferencja „Beton na progu nowego Millenium”, Kraków 2000.
14. U.S. Bureau of Reclamation, Investigation into the effect of water/cement ratio on the freezing-thawing resistance of non-air and air-entrained concrete, Concrete Laboratory Report Nr C-810, Denver, Colorado 1995.
15. Szwabowski J.: Reologia mieszanek na spoiwach cementowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
16. Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J.: Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji. Wyd. Górażdże Cement, Opole 2002.
17. Szwabowski J.: Reologia samozagęszczalnych mieszanek betonowych. IV Sympozjum Naukowo-Techniczne, Reologia w technologii betonu. Wyd. Górażdże Cement, Gliwice czerwiec 2002, s. 61-76.
18. Crank J.: Mathematics of diffusion. The Clarendon Press, Oxford 1956.
19. Jost W.: Diffusion in solids, liquids, gasses. Academic Press, New York 1952.
20. Shewmon P. G.: Diffusion in solids. Mc Graw-Hill, New York 1963.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Wyrwał

## Abstract

Structure of porosity SCC depends from many factors, some they decides among others about structure of aerial pores. It results from here conclusion, do SCC demand air – entrain or else no, to be frost-proof were. Moreover analysis of changes of moved porosity will become both for fresh as hardened concrete mixture what will permit SCC doubtless onto general examining of problem of kinetics of changes of porosity.