

Barbara ZAJĄC, Irena GOŁĘBIOWSKA

e-mail: zajacbar@poczta.onet.pl

Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

Samoleczenie betonu. Cz. 2. Metody biologiczne i specjalne**Wstęp**

W celu ograniczenia kosztów konserwacji i napraw konstrukcji betonowych i wpisania się w rygor budownictwa zrównoważonego, w ostatnich latach, rozwijane są intensywnie dwa podstawowe kierunki badań. Pierwszy kierunek to ulepszanie tradycyjnych metod diagnostyki, napraw, konserwacji, poszukiwanie nowych rozwiązań przedłużających cykl życia konstrukcji, spełniających aspekty społeczne, ekonomiczne i środowiskowe [Zajac i in., 2012]. Drugi kierunek polega na opracowywaniu nowych technologii i materiałów cementowych umożliwiających bez interwencji człowieka naprawę zarysowanych konstrukcji betonowych. Celem tego ostatniego kierunku badań jest znalezienie optymalnych metod samoleczenia betonu obejmujących wykrywanie i leczenie rys.

Zrównoważona, samolecząca się konstrukcja betonowa powinna zawierać czynnik leczący spełniający sześć następujących kryteriów:

- 1) długi okres trwałości (nie krótszy niż planowany cykl życia budowli),
- 2) wszechobecność (w każdej części konstrukcji, która potencjalnie może ulec zarysowaniu),
- 3) uniwersalność (wysoka efektywność w różnych środowiskach),
- 4) powtarzalność (czynnik działający wielokrotnie w ciągu całego życia konstrukcji),
- 5) wysoka jakość (możliwość pełnego odzyskania właściwości transportowych i mechanicznych betonu),
- 6) niezawodność (zgodność wyników badań dotyczących odzyskiwania właściwości transportowych i mechanicznych w kolejnych testach).

Właściwości transportowe i mechaniczne betonu wg Li to odpowiednio: przepuszczalność i dyfuzyjność oraz sztywność, wytrzymałość i ciągliwość betonu [Li i in., 2012].

W tej części pracy opisano metody biologiczne i specjalne samoleczenia betonu oraz przeprowadzono analizę efektywności opisanych metod.

Biologiczne metody samoleczenia

Możliwość stosowania mikroorganizmów do samoleczenia betonów analizowano w wielu pracach [Jonkers, 2011; Wu i in., 2012; Tittelboom i in., 2013].

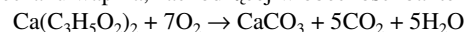
Wytrącanie się węglanu wapnia CaCO_3 , jest najważniejszym, naturalnym procesem samoleczenia betonu [Edwardsen, 1999]. Na podstawie przeprowadzonych badań z różnymi typami bakterii stwierdzono powstawanie większej ilości CaCO_3 w rysach, niż w przypadku naturalnego procesu samoleczenia. Aktualnie w literaturze proponowane są dwie główne metody naprawy rys w betonie za pomocą bakterii – pierwsza, polegająca na hydrolizie mocznika; druga metoda to aktywna przemiana metaboliczna mleczanu wapnia.

Tittelboom stosował w badaniach bakterię do produkcji enzymu moczniowego, który katalizuje hydrolizę mocznika $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ do jonów amonowych NH_4^+ i węglanowych CO_3^{2-} [Wu i in., 2012].

Jony CO_3^{2-} reagują z jonami wapnia Ca^{2+} (pochodzącymi z rozkładu wodorotlenku wapnia $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w betonie), powodując wytrącanie się w rysie węglanu wapnia CaCO_3 . Wadą tej metody jest powstawanie amoniaku, który stwarza ryzyko korozji zbrojenia i niszczenia betonu.

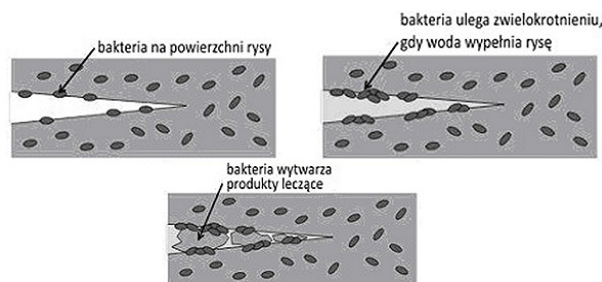
Jonkers [2011] w swoich badaniach stosował specjalnie wybrane typy bakterii gatunku *Bacillus* oraz mleczan wapnia (zwany inaczej pożywieniem). Zarodniki bakterii oraz mleczan wapnia były umieszczane wewnątrz oddzielnych kapsułek o średnicy od 2 do 4 mm, wykonanych z glinoporytu. Kapsułki te wprowadzono do mieszanki betonowej podczas mieszania jej składników [Jonkers, 2011; Mihashi i in., 2012].

Proces samoleczenia betonu zaproponowany przez Jonkersa [2011] jest bardzo wydajny z powodu aktywnej przemiany metabolicznej mleczanu wapnia, zachodzącej w obecności bakterii:



Węglan wapnia CaCO_3 jest w tym przypadku nie tylko bezpośrednio produkowany z przemiany mleczanu wapnia w równoważną ilość CaCO_3 , lecz także pośrednio poprzez dalszą reakcję chemiczną, produkowanego metabolicznie CO_2 . Wydzielane CO_2 na powierzchni wewnątrz rysy będzie reagować z cząstkami portlandytu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ obecnymi we wnętrzu rysy.

W przypadku, gdy konstrukcja betonowa ulegnie uszkodzeniu i przez rysy w betonie zacznie przeciekać woda, przecięte rysą kapsułki uwolnią zarodniki bakterii i mleczan wapnia. Zarodniki bakterii będą kiełkować w kontakcie z wodą i z pożywieniem. Podczas karmienia się aktywnej bakterii mleczanem wapnia będzie konsumowany tlen i rozpuszczalny $\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_2)_2$ będzie zamieniany w nierozpuszczalny węglan wapnia [Jonkers, 2011a,b]. Węglan wapnia będzie teżal na zarysowanej powierzchni i tym samym będzie ją uszczelniał (Rys. 1).



Rys. 1. Schemat koncepcji samoleczenia betonu z bakterią [Li i in., 2012]

Podstawowymi wadami tej metody są: losowy charakter przemiany mleczanu wapnia w CaCO_3 , ze względu na przypadkowe rozproszenie i przecięcie rysą kapsułek zawierających dwa różne składniki; znacząco obniżona wytrzymałość betonu na ściskanie, ponieważ kapsułki glinoporytowe, zawierające czynnik leczący, stanowią ok. 20% objętości betonu; wysoki koszt umieszczania czynników leczących w kapsułkach oraz wysoki koszt mleczanu wapnia. Całkowite zamknięcie rys w betonie z bakterią możliwe jest dla rys o szerokości do 0,15 mm [Jonkers, 2011].

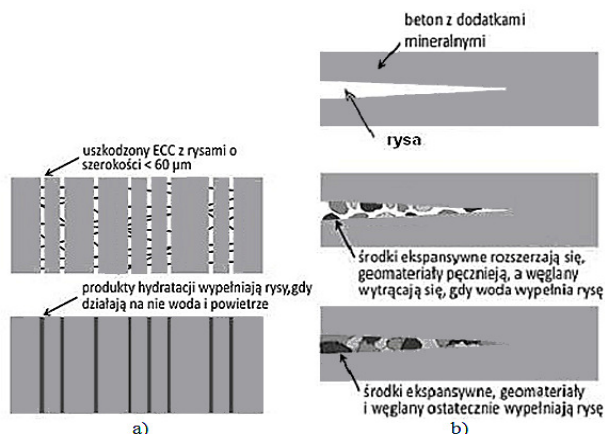
Specjalne metody samoleczenia

W ramach tych metod przedstawiono samoleczący kompozyt cementowy ECC oraz opisano pokrótce badania dotyczące leczących właściwości domieszek mineralnych.

ECC (Engineered Cementitious Composite) jest nowym rodzajem materiału cementowego. Różnice między ECC a tradycyjnym materiałem cementowym, jakim jest beton, to w przypadku ECC: wysoka ciągliwość, występowanie mikropręknęć i wąskich rys z możliwością ich kontroli. ECC jest materiałem o dużym potencjale do samoleczenia wewnętrznego (Rys. 2a). Według Li i in. [2007] ECC to kompozyt, który składa się z cementu, włókien poliwinylowych, bardzo drobnego piasku i popiołu lotnego o niskiej zawartości wapnia.

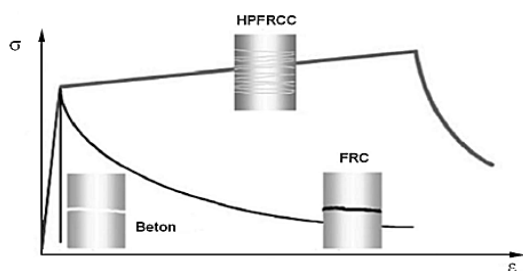
Na rys. 3 podano zależność naprężenie-odkształcenie dla jednoosiowo rozciąganego betonu HPFRCC (*High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite*), którego szczególnym rodzajem jest ECC, FRC (*Fiber Reinforced Concrete*) oraz betonu zwykłego.

Rys. 4 przedstawia typową krzywą naprężenie-odkształcenie dla ECC, która pokazuje wyraźne podobieństwo tego kompozytu do zachowania się metali ciągliwych.



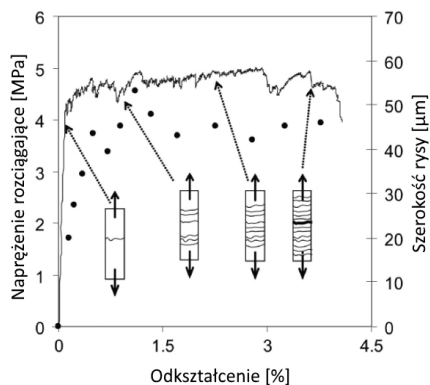
Rys. 2. Schemat koncepcji samoleczenia a) bazującej na samokontroli szerokości wąskich rys, b) z zastosowaniem dodatków mineralnych [Li i in., 2012]

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że podczas rozciągania, aż do osiągnięcia około 1% odkształcenia powstają w próbce mikrorysy o szerokościach wzrastających od 0 do wartości ustalonej wynoszącej ok. 50 μm (Rys. 4).



Rys. 3. Wykres zależności między jednoosiowymi naprężeniami rozciągającymi i odkształceniami dla FRC i dla HPFRC [Wu i in., 2012]

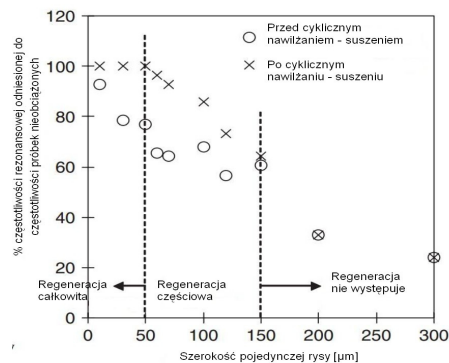
Gdy materiał jest poddany dalszym odkształceniom, powstaje więcej rys, ale ich szerokości prawie się nie zmieniają. Ta ustalona szerokość rysy jest nieodłączną cechą ECC i zależy tylko od właściwości włókien i połączenia włókno-matryca [Li i in., 2007].



Rys. 4. Typowa krzywa naprężenie-odkształcenie dla ECC [Li i in., 2007]

Na rys. 5 przedstawiono wyniki badań próbek ECC poddanych cyklicznemu suszeniu i nawilżaniu, które wcześniej zostały celowo zarysowane, w celu ustalenia zakresów szerokości rys odpowiadających stopniom regeneracji. 100% wskaźnik regeneracji oznacza regenerację całkowitą próbki, który odpowiada zakresowi szerokości rys wynoszącej 0÷50 μm [Li i in., 2012].

Dodatki mineralne są dodawane do mieszanki betonowej podczas jej mieszania. Po spękaniu betonu, nieprzereagowane dodatki mineralne obecne są na powierzchniach rys. Gdy woda wnika do rysy dodatki mineralne zaczynają z nią reagować i rysy wypełniane są produktami reakcji (Rys. 2b).



Rys. 5. Zależność między wskaźnikiem regeneracji i szerokością pojedynczej rysy [Li i in., 2007]

W badaniach dotyczących zdolności betonu do samoleczenia stosowano dodatki mineralne w postaci: środków ekspansyjnych (glinokrzemian wapnia, siarczan wapnia i tlenek wapnia), pęczniących geomateriałów (dwutlenek krzemu, glinokrzemian wodorotlenku sodu i glina montmorylonitowa) i środki aktywne (w postaci różnego rodzaju węglanów), jako częściowy zamiennik cementu – do 10%. Na podstawie badań przepuszczalności wody w betonie ustalono, że możliwe jest zamknięcie rys do szerokości 0,22 mm [Ahn i in., 2010; Mihashi i in., 2012; Shim i in., 2015].

Wnioski

Efektywność metod biologicznych zależy głównie od żywotności zarodników bakterii (która powinna być dłuższa od cyklu życia budowli betonowej) i od obecności wody przeciekającej przez rysę. Efektywność ta ma charakter losowy z powodu przypadkowości równoczesnego przecięcia rysą kapsulek z bakterią i z pożywieniem.

W przypadku ECC, ze względu na efektywnie przebiegający proces samoleczenia wewnętrznego, kompozyt ten posiada większość cech charakteryzujących zrównoważony materiał samoleczący. Jednak z ekonomicznego punktu widzenia koszt produkcji ECC jest obecnie znacząco wyższy (od 2 do 3 razy) niż betonu zwykłego.

Efektywność metody samoleczenia betonu z dodatkami mineralnymi będzie zależała od ich ilościowego i jakościowego doboru (aby w sposób niekontrolowany, na skutek pęcznienia, nie nastąpiło zjawisko niepożądanego rozciągania wewnętrznego w betonie).

LITERATURA

- Ahn T., Kishi T., (2010). Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures. *J. Adv. Concrete Technol.*, 8(2), 171-186. DOI: 10.3151/jact.8.171
- Edwardsen C., (1999). Water permeability and autogenous healing of crack in concrete. *ACI Materials J.*, 96(4), 448-454. DOI: 10.1680/jicstdac.28241.0047
- Jonkers H.M., (2011a). Bacteria-based self-healing concrete. *Heron*, 56(1-2)
- Jonkers H.M., (2011b). Self-healing concrete. *Ingenia online* 46, 39-43
- Li V.C., Herbert E., (2012) Robust the self-healing for sustainable infrastructure. *J. Adv. Concrete Technol.*, 10, 207-218
- Li V.C., Yang E.H., (2007). Self-healing in concrete materials. An alternative approach to 20 Centuries of Materials Science, Springer
- Mihashi H., Nishiwaki T., (2012). Development of engineered self-healing and self-repairing concrete – state of the art report. *J. Adv. Concrete Technol.*, 10, 170-184
- Shim K.B., Kishi T., Choi S.Ch., Ahn T.H., (2015). Cementitious materials for crack self-healing concrete. *J. Ceramic Proc. Res.*, 16(Special 1), 1-13
- Tittelboom K.V., De Belie N., (2013). Self-healing in cementitious materials – a review. *Materials* 6, 2182- 2217. DOI: 10.3390/ma6062182
- Wu M., Johanessen B., Geiker M., (2012). A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Constr. Build. Mat.*, 28, 571-583. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.086
- Zając B., Gołębiowska I., (2012). Ocena cyklu życia konstrukcji betonowej. *Inż. Ap. Chem.*, 51(5), 265-267.