

**XXIV**XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009**awarie budowlane**

Dr. inż. ALEKSANDRA RADLIŃSKA, *aleksandra.radlinska@villanova.edu*
Villanova University
Prof. JASON WEISS, *wjweiss@purdue.edu*
Purdue University

STATYSTYCZNA ANALIZA WCZESNEGO PĘKANIA BETONU

STATISTICAL ANALYSIS OF EARLY AGE CRACKING IN CONCRETE ELEMENTS

Streszczenie Pomimo nieustającego rozwoju technologii betonowej, wciąż obserwuje się przypadki przedwczesnego niszczenia konstrukcji wykonanych z betonu. Jednym z powodów tego zjawiska jest pojawianie się spękań, które pozwalają na penetrację wilgoci i szkodliwych związków, na przykład pochodzących z soli używanych do odładzania dróg w okresie zimowym. Obecność chlorków znacznie przyspiesza korozję zbrojenia, a to z kolei przyspiesza proces pęknięcia i degradacji konstrukcji. W związku z tym, stale poszukuje się metod, które pozwolą na rozwój betonu który nie byłby podatny na pęknięcie. W pracy opisanej w tym referacie, badania laboratoryjne oraz symulacje komputerowe użyte zostały w celu korelacji właściwości materiałowych (wraz z niepewnością ich pomiaru) z podatnością na pęknięcie materiałów betonowych. Metoda Monte Carlo i Metoda Stanów Granicznych zostały wykorzystane do opracowania nowej metody projektowania betonu, która pozwala oszacować prawdopodobieństwo występowania pęknięcia.

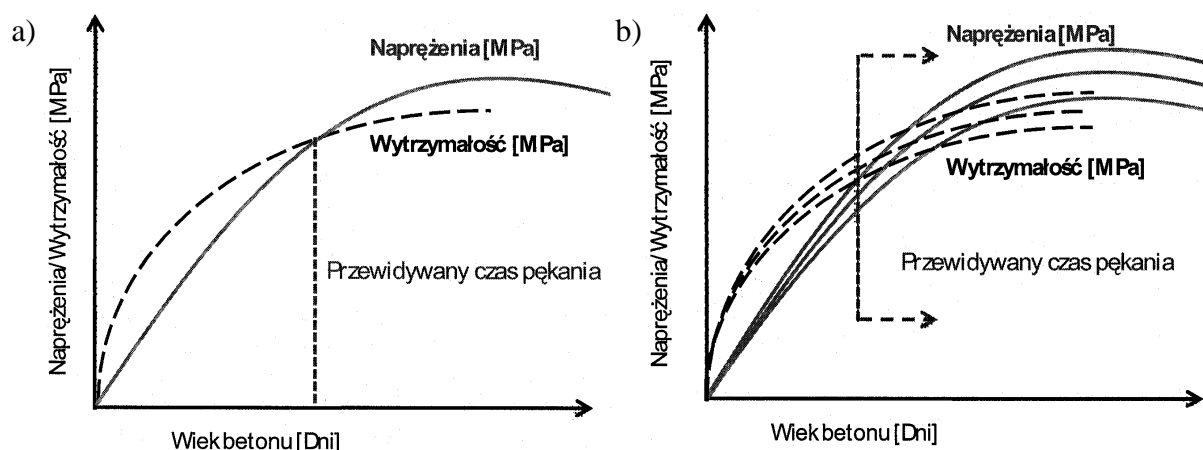
Abstract Despite continues advancement in concrete technology, premature deterioration is still very often observed in concrete structures. One of the causes of this early deterioration is the development of cracks which allow for ingress of moisture and other harmful ingredients, for example deicing salts, that can significantly accelerate corrosion of reinforcement and cause further severe cracking. As a result, there is a continuous interest in developing crack free concrete elements. This research describes how experimental procedures and computer simulations can be used to relate fundamental material properties and material variability to the cracking performance of cement and concrete materials. Monte Carlo method and Load and Resistance Factor Design (LRFD) are utilized in this work to develop new approach that allows incorporating information about the probability of cracking into design process.

1. Wstęp

W obliczu wzmożonego nacisku na zrównoważony rozwój infrastruktury, zjawisko wczesnego pęknięcia w betonie zasługuje na zwiększoną uwagę i opracowanie dokładniejszych metod pozwalających na przewidywanie kondycji konstrukcji betonowych w okresie ich używalności oraz oszacowywanie prawdopodobieństwa wystąpienia spękań. Tradycyjne podejście do projektowania mieszanek betonowych zgodnie z powszechnie stosowanymi wymaganiami amerykańskiej normy ACI 211, koncentruje się na wytrzymałości i urabialności mieszanki betonowej, pozostawiając pytanie o trwałość materiału i jego odporność na zniszczenie bez odpowiedzi. Dodatkowo, dążenie do zwiększania wytrzymałości betonu bez uwzględnienia jego wzmożonej podatności na pęknięcie przyczyniło się do alarmującego stanu dróg i mostów na terenie Stanów Zjednoczonych [1] i licznych awarii wymagających kosztownych napraw. Ocenia się, że same

naprawy istniejących konstrukcji mostowych w USA wynoszą dziesiątki bilionów dolarów rocznie [2], a koszty napraw istniejących konstrukcji betonowych przekroczyły o ponad 50% całkowity koszt nowych inwestycji [1] w minionej dekadzie.

Teoretycznie przyjmuje się, że beton pęka, kiedy rozwój naprężeń własnych przekracza wytrzymałość materiału. Powyższe deterministyczne podejście zostało schematycznie pokazane na rys. 1a jako przecięcie dwóch krzywych. O tym, czy beton pęknie czy nie, dodatkowo decydują między innymi sztywność materiału, przyrost i wielkość skurczu, relaksacja naprężeń oraz wytrzymałość. W rzeczywistości jednak, przewidywanie zjawiska pęknięcia jest o wiele trudniejsze, jako że heterogeniczna natura materiału nie pozwala na jednoznaczne określenie rozwoju danego parametru w czasie. Zatem, jeśli zostaną uwzględnione niepewności związane z właściwościami materiału, zmienne warunki środowiska, czy ograniczenia konstrukcyjne, zamiast pojedynczej krzywej wzrostu naprężeń i wytrzymałości, należałoby posługiwać się raczej zakresem o określonej granicy górnej i dolnej. Tego typu losowe podejście zostało schematycznie pokazane na rys.1b. W tym przypadku, uwzględniona jest zmienność parametrów, ale przewidywany czas pęknięcia nie jest już jednoznacznie określony pojedynczym punktem przecięcia krzywych, lecz szerokim przedziałem czasowym (rys. 1b).



Rys. 1. Przyrost wytrzymałości i naprężeń w betonie w/g analizy a) deterministycznej oraz b) losowej

Warto tutaj wspomnieć, że obliczanie naprężeń w betonie jest problemem złożonym, jako że beton podlega zmiennym w czasie zjawiskom pełzania i relaksacji naprężeń. Wcześniejsze badania [3] pozwoliły na wyprowadzenie równania pozwalającego oszacować rozwój naprężeń w betonie poddanemu skurczowi ograniczonemu:

$$\varepsilon_{\text{Permit}}(t) = \int_0^t \left[\left(\frac{1}{E_{\sigma}(\xi)} + \frac{1}{E_c} \phi(t, \xi) \right) \frac{d\sigma(\xi)}{d\xi} + \alpha(\xi) \right] \cdot d\xi \quad (1)$$

gdzie: $\varepsilon_{\text{Permit}}(t)$ – całkowity skurcz jaki może wystąpić w ograniczonym elemencie, $E_{\sigma}(\xi)$ – moduł elastyczności zależny od czasu, E_c – referencyjny moduł elastyczności (wartość dla 28 dni), $\phi(t, \xi)$ – współczynnik pełzania, $\alpha(\xi)$ – różnica w skurczu zależna od czasu (t).

Wyżej wymienione równanie pozwala oszacować rozwój naprężeń własnych w betonie i porównać je z rozwojem wytrzymałości, aby ocenić podatność danego betonu na pęknięcie. Mimo iż równanie to daje możliwość równoczesnego rozpatrzenia skomplikowanych zależności materiałowych, w obecnej formie nie uwzględnia ono gradientu wilgotności, nie pozwala na analizę materiału w skali makro i nie uwzględnia mikropęknięć. Podczas gdy prowadzone są badania pozwalające uzupełnić te ograniczenia, niniejsza praca koncentruje się

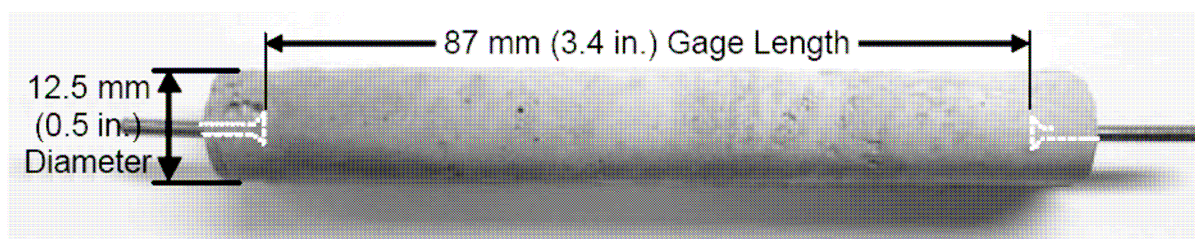
na innym istotnym zagadnieniu, tj. na uwzględnieniu losowych aspektów w analizie rozwoju wytrzymałości i naprężeń w betonie oraz opracowaniu metody pozwalającej na przewidywanie zjawiska pęknięcia w betonie.

2. Numeryczna analiza niepewności pomiaru skurczu

Aby prawidłowo modelować zachowanie betonu niezbędna jest precyzyjna informacja o wielkości oraz niepewności danych wejściowych wykorzystanych w procesie modelowania. W opisywanym tutaj modelu, przyrost naprężeń w czasie obliczany jest za pomocą równania (1) przyjmując założenie, że rozpatrywany element betonowy jest całkowicie ograniczony, czyli nie dopuszcza się żadnych odkształceń ($\epsilon_{\text{permit}}(t)=0$). Dokładny opis modelu obliczeniowego z wyjaśnieniem zastosowanych równań i zmiennych dostępny jest w literaturze [4]. Ponieważ jedną z podstawowych informacji wejściowych modelu jest wielkość skurczu (uwzględnione zostały skurcz od wysychania i skurcz autogeniczny), przeprowadzone zostały dokładnie kontrolowane badania laboratoryjne pomiaru skurczu oraz niepewności tego pomiaru.

Badania skurczu prowadzone były na cylindrycznych próbkach betonowych i próbkach z zaprawy cementowej. Walcowe próbki betonowe (150×300 mm) przygotowane zostały zgodnie z zaleceniami normy ASTM C 192 z betonu o stosunku $w/c = 0,40$. Cylindry dojrzewały w szczelnym zamknięciu przez pierwszych 90 dni, a następnie poddane zostały wysychaniu w kontrolowanych warunkach $23\pm 2^\circ\text{C}$ oraz wilgotności względnej $50\pm 1\%$. Pomiar skurczu wykonany był po 0,5, 1, 2, 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 180, 240, 300 i 365 dniach od czasu, gdy próbki poddane zostały wysychaniu.

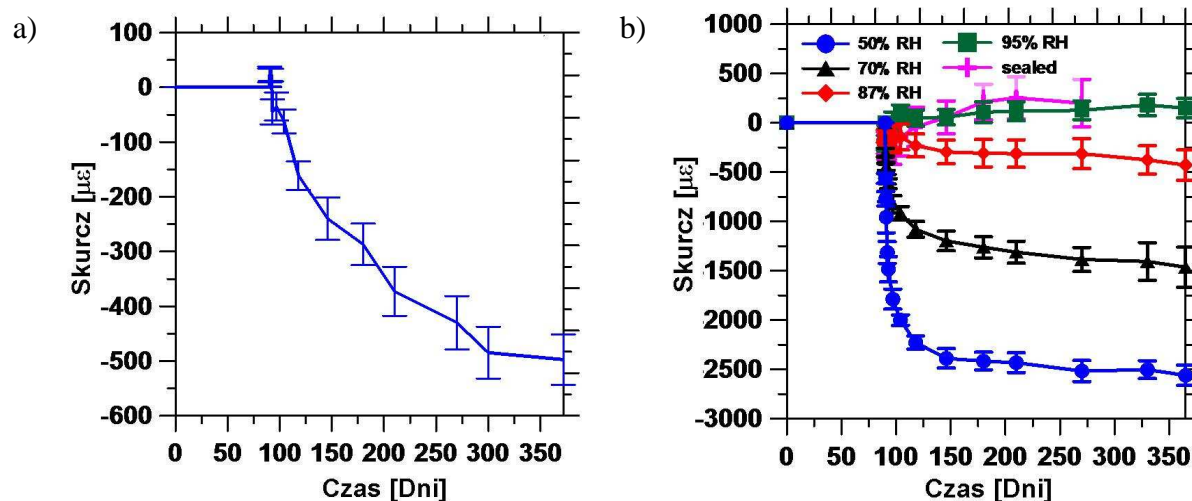
Cylindryczne próbki z zaczynu cementowego o stosunku $w/c=0,40$ przygotowano zgodnie z wymaganiami normy ASTM C 305. Mała średnica próbek (12,5×87 mm) pozwoliła wyeliminować wpływ gradientów wilgotności. Podobnie jak próbki betonowe, próbki zaprawy cementowej dojrzewały w szczelnym zamknięciu przez pierwszych 90 dni, a następnie poddane zostały wysychaniu w specjalnych komorach klimatycznych pozbawionych dwutlenku węgla. Komory utrzymywane były w temperaturze $23\pm 1^\circ\text{C}$ oraz następujących wilgotnościach względnych: 50%, 70%, 87%, 95%. Jedna seria próbek pozostała szczelnie zamknięta, aby śledzić ewentualne zmiany długości, w przypadku gdy uniemożliwiona jest utrata wilgoci do środowiska zewnętrznego. Geometrię próbki z zaprawy cementowej pokazano została na rys.2. Co najmniej 8 próbek poddanych zostało badaniu w poszczególnych warunkach klimatycznych.



Rys. 2. Cylindryczna próbka z zaczynu cementowego

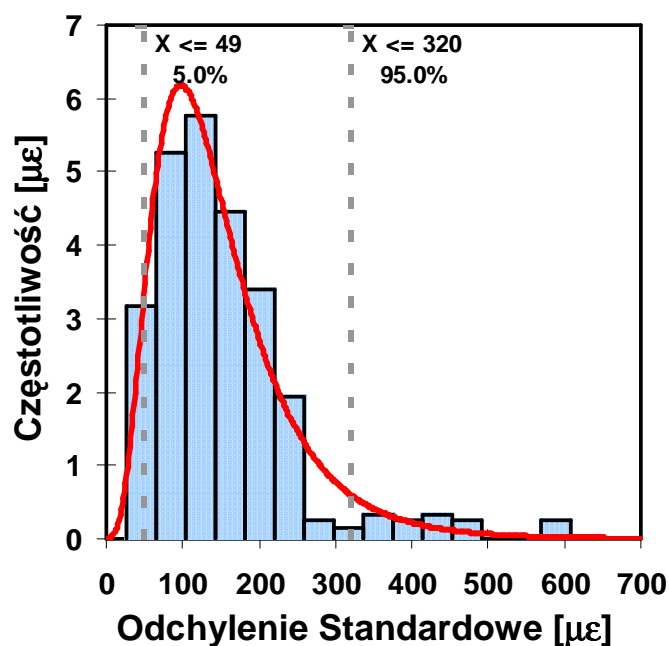
Rys. 3a przedstawia średnią wartość skurczu betonu (średnia pomiaru z sześciu próbek) wraz odchyleniem standardowym, natomiast średnia wartość skurczu i odchylenia standardowego dla próbek cementowych dojrzewających w różnych warunkach klimatycznych pokazana została na rys. 3b. Analizując rozwój skurczu w okresie 365 dni warto zauważyć, że zarówno precyzyjnie kontrolowane pomiary skurczu wykonane na próbkach betonowych, jak i na próbkach z zaczynu cementowego charakteryzują się znacznym rozrzutem i niepewnością

pomiarową. Warto zwrócić uwagę na fakt, iż pomimo przyrostu skurczu odchylenie standardowe ma podobną wartość, niezależną od czasu w jakim skurcz został mierzony. Znaczny rozrzut pomiaru skurczu został także zauważony w innych badaniach [5] oraz zapisach normowych (ASTM C 157) i pozwala wnioskować, że niezależnie od dokładności pomiaru i precyzji operatora, materiał charakteryzuje się pewną nieodłączną zmiennością, która powinna zostać uwzględniona w procesie projektowania betonu.



Rys. 3. a) Skurcz betonu (w/c=0.40) b) Skurcz zaczynu cementowego (w/c=0,40)

Aby umożliwić wykorzystanie informacji o odchyleniu standardowym skurczu zaczynu cementowego, przygotowano histogram i krzywa gęstości prawdopodobieństwa (rozkład log-normalny) (rys. 4). Jak można zauważyć, średnie odchylenie standardowe jakiego można się spodziewać przy pomiarach skurczu zaprawy cementowej wynosi 165 µε. Ponadto, tylko 5% próbek miało odchylenie standardowe mniejsze niż 49 µε, a odchylenie standardowe mniejsze niż 320 µε zaobserwowano zostało dla 95% przebadanych próbek.



Rys. 4. Histogram i krzywa gęstości prawdopodobieństwa opisujące rozkład odchylenia standardowego skurczu zaczynu cementowego

3. Przewidywanie pęknięcia w betonie za pomocą metody Monte Carlo i Metody Stanów Granicznych

Badania laboratoryjne i określenie ich precyzji oraz dane dostępne w literaturze pozwoliły na oszacowanie wielkości rozrzutu dla podstawowych parametrów użytych w modelu wspomnianym w rozdziale 1. Warto tu przypomnieć, iż korzystając z równania Picketta i L’Hermite’a [6, 7], skurcz betonu można wyrazić jako funkcję skurczu zaczynu cementowego, objętości kruszywa i warunków wilgotnościowych w postaci równania:

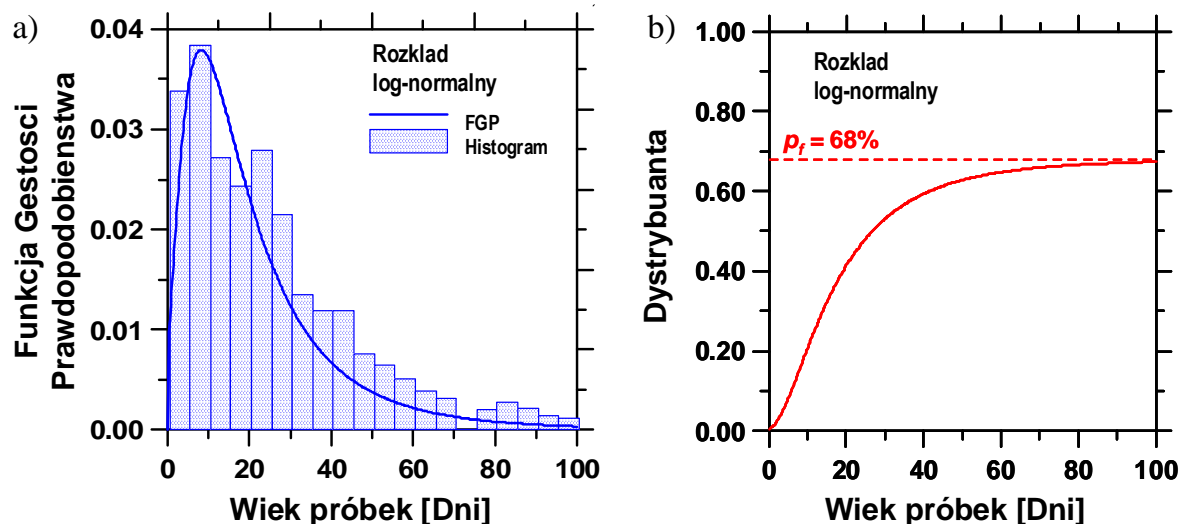
$$\varepsilon_{Shr} = \beta_N (1 - V_F)^n (1 - RH_{AMB}^3) \quad (2)$$

gdzie: ε_{Shr} – skurcz betonu, β_N – skurcz zaprawy cementowej, V_F – objętość kruszywa (68% w przedstawionych obliczeniach), n – współczynnik określający sztywność kruszywa (zazwyczaj przyjmuje się pomiędzy 1,2 a 1,7, tutaj przyjęto 1,43) i RH_{AMB} – wilgotność względna (przyjęto $RH=50\%$).

W czasie procesu modelowania założono typowe parametry reprezentujące beton o wytrzymałości $f'_c = 33$ MPa, module sztywności $E = 27,5$ GPa, wytrzymałości na rozciąganie $f'_t = 5,0$ MPa i długotrwałym skurczu $600 \mu\epsilon$ (szczegółowy opis pozostałych parametrów można znaleźć w [4]). Dodatkowo skurcz, moduł sztywności i wytrzymałość na rozciąganie traktowane będą jako zmienne losowe i opisane będą rozkładem normalnym o współczynniku zmienności 10%. Metoda Monte Carlo została wykorzystana do przeprowadzenia symulacji komputerowych, w których wartości f'_c , E , oraz f'_t były losowane z zdefiniowanych przedziałów i wykorzystywane do obliczania przyrostu wytrzymałości i naprężeń w betonie. W przypadkach, kiedy obliczone naprężenia własne przekraczały wytrzymałość materiału, było to odnotowywane przez program jako zjawisko pęknięcia i czas (dzień) pęknięcia był rejestrowany.

Przeprowadzając analizę niezawodnościową istotne jest, by pojęcie ryzyka zdefiniowane było precyzyjnie. Prawdopodobieństwo awarii w analizie konstrukcyjnej zazwyczaj przyjmowane jest jako przekroczenie stanu nośności lub ugięcia. W szerszym pojęciu, zjawisko awarii można traktować również jako pęknięcie materiału lub wystąpienie korozji. Podczas gdy metoda stanów granicznych definiuje pojęcie awarii w sposób ogólny, niniejsza praca za zjawisko awarii przyjmuje wystąpienie pęknięcia, czyli moment w którym rozwój naprężeń własnych przekracza wytrzymałość materiału.

Rys. 5a przedstawia typowy histogram i krzywą gęstości prawdopodobieństwa otrzymaną jako wynik symulacji przeprowadzonych metodą Monte Carlo. Jak można odczytać z rysunku, najczęstsze zjawiska pęknięcia odnotowane zostały we wczesnym wieku próbek. Scałkowanie funkcji gęstości prawdopodobieństwa po czasie pozwala otrzymać dystrybuantę zmiennej losowej przedstawioną na rys. 5b, który ilustruje zmianę prawdopodobieństwa pęknięcia w czasie, a w końcu stabilizację, przyjmującą w tym przypadku wartość 68%. Oznacza to, że z całej populacji próbek zbadanych z danego betonu, 68% uległoby spękaniu.



Rys. 5. a) Funkcja gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia zjawiska pękania,
b) odpowiadająca jej dystrybuanta

4. Projektowanie betonu z uwzględnieniem prawdopodobieństwa pękania

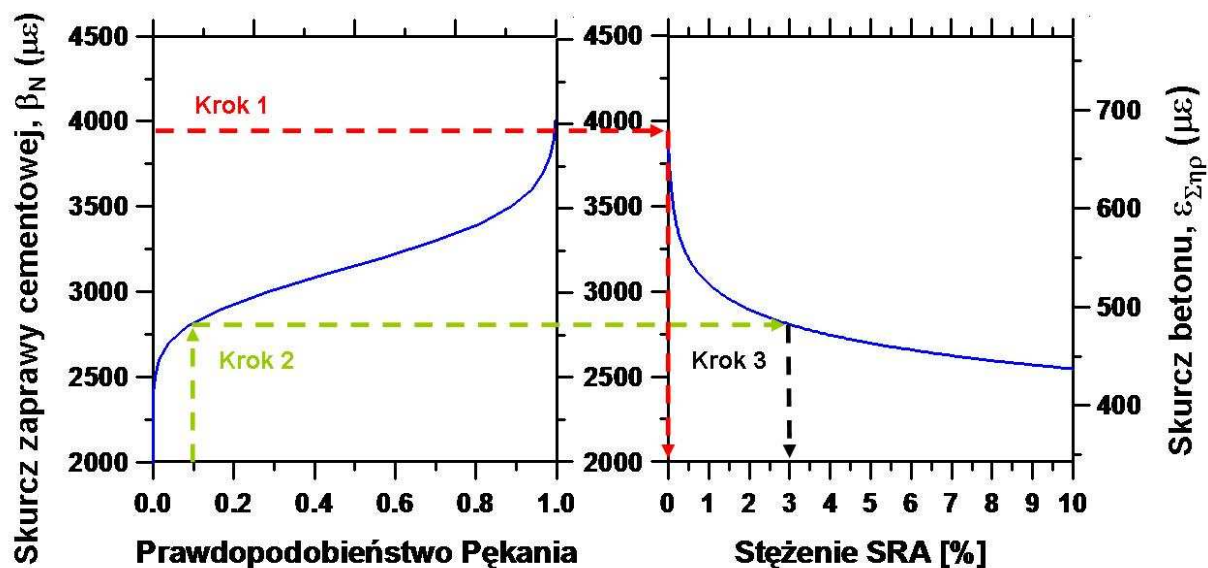
W poprzednim rozdziale przedstawiono przykład modelowania zachowania betonu, który pozwala oszacować przyrost naprężeń własnych w betonie poddanemu skurczowi ograniczonemu. Zastosowanie metody Monte Carlo pozwoliło na określenie prawdopodobieństwa pękania w czasie i jego funkcji gęstości. Pomimo precyzji i mnogości zastosowań metody Monte Carlo, należy tutaj wspomnieć, iż jest ona czasochłonna i wymaga zaawansowanego sprzętu komputerowego. Ograniczenia metody Monte Carlo można jednak ominąć stosując uproszczone obliczenia wzorowane na metodzie stanów granicznych. Podczas gdy szczegółowy opis wykorzystania metody stanów granicznych i przedstawionego modelu do obliczania prawdopodobieństwa pękania dostępny jest w literaturze [8], pokazany zostanie tutaj przykład zastosowania tych obliczeń.

Należy zwrócić uwagę, iż na podstawie wielkości skurczu jaki zachodzi w betonie i przyjętych współczynników zmienności dla poszczególnych zmiennych oszacować można rozwój naprężeń własnych i dla danego przypadku obliczyć prawdopodobieństwo pękania. Wykonanie obliczeń dla różnych wartości skurczu pozwoliło na uzyskanie krzywej relacji pomiędzy wielkością skurczu a prawdopodobieństwem pękania, jak pokazano po lewej części rys.6. Jak można się spodziewać, wraz ze wzrostem skurczu rośnie prawdopodobieństwo pękania. I tak dla stosunkowo niskich wartości skurczu (mniejszych niż $2500 \mu\epsilon$ dla zaczynu cementowego, co odpowiada skurczowi ok. $430 \mu\epsilon$ dla betonu) prawdopodobieństwo pękania betonu jest minimalne, ponieważ obserwuje się niewielki przyrost naprężeń wewnętrznych. Natomiast dla skurczu większego niż $3900 \mu\epsilon$ (co odpowiada ok. $670 \mu\epsilon$ dla betonu) prawdopodobieństwo pękania jest bliskie jedności (wszystkie próbki z danej populacji uległyby spękaniu).

Wielkość skurczu może być kontrolowana poprzez właściwy dobór składników użytych do produkcji mieszanki betonowej (np. zwiększenie ilości kruszywa), zastosowanie nasączonego kruszywa lekkiego, superabsorbujących polimerów, czy domieszek chemicznych redukujących skurcz. Niniejsza analiza ograniczy się do przykładu zastosowania tych ostatnich (z ang. Shrinkage Reducing Admixtures – SRA). Jak widać w prawej części rys.6, zwiększenie stężenia użytej SRA pozwala znacznie obniżyć skurcz betonu [9]. Jeśli więc zostanie określone prawdopodobieństwo pękania danego betonu na podstawie jego skurczu, można z rys. 6 odczytać wymaganą ilość SRA jaka powinna być użyta, aby obniżyć skurcz i prawdo-

podobieństwo pęknięcia do żądanej wielkości. Powyżej wspomniane etapy projektowania mieszanki betonowej na podstawie skurczu sumarycznie można przedstawić w trzech krokach:

- Krok 1: wyznaczenie prawdopodobieństwa pęknięcia betonu (bez domieszki) na podstawie skurczu i współczynników zmienności dla poszczególnych zmiennych wariacyjnych; w prezentowanym przykładzie dla skurczu 3900 $\mu\epsilon$, prawdopodobieństwo pęknięcia wynosi 1.0,
- Krok 2: wyznaczenie dopuszczalnej wartości ryzyka pęknięcia; dla analizowanego przykładu przyjęto 10%,
- Krok 3: wyznaczenie wymaganej ilości domieszki redukującej skurcz; w tym wypadku 3% SRA byłoby potrzebne by obniżyć skurcz z 3900 $\mu\epsilon$ na 2820 $\mu\epsilon$ i tym samym zmniejszyć prawdopodobieństwo pęknięcia ze 100% do 10%.



Rys. 6. Wykres umożliwiający projektowanie mieszanki betonowej na podstawie skurczu

5. Uwagi końcowe

Niniejsza praca przedstawia model umożliwiający stochastyczną analizę rozwoju naprężeń i wytrzymałości w elementach betonowych. Wykorzystując metodę Monte Carlo, model ten pozwala wyznaczyć zarówno prawdopodobieństwo pęknięcia betonu w czasie, ale także całkowite prawdopodobieństwo pęknięcia w postaci procentu próbek z danej populacji, które uległyby spękaniu. Zaletą tego modelu jest możliwość uwzględnienia zmienności parametrów materiałowych lub warunków klimatycznych w procesie obliczeniowym, co pozwala na uzyskanie bardziej miarodajnej informacji o rozwoju naprężeń własnych i wytrzymałości materiału oraz o prawdopodobieństwie pęknięcia. Model może być również wykorzystany do uproszczonej analizy wzorowanej na stanach granicznych nośności.

Przedstawiona metodologia może zostać wykorzystana podczas projektowania mieszanek betonowych, a także w celu optymalizacji procesów konstrukcyjnych. Jeśli projektant lub wykonawca jest w stanie określić zmienność materiałową i procesów technologicznych, wówczas mieszanka betonowa może być projektowana na podstawie dopuszczalnego prawdopodobieństwa pęknięcia. Dodatkowo, przedstawiony proces modelowania może posłużyć jako narzędzie pozwalające ocenić jakość betonu wykorzystywanego na budowie oraz przewidzieć jego trwałość i podatność na pęknięcie.

Literatura

1. Federal Highway Administration: Our nation's highways-selected figures and facts, U.S. Department of Transportation, 2000.
2. Stewart, M.G. : Reliability-based assessment of ageing bridges using risk ranking and life cycle cost decision analyses, Reliability Engineering and System Safety nr 74/2001.
3. Weiss, W. J.: Shrinkage Cracking in Restrained Concrete Slabs: Test Methods, Material Compositions, Shrinkage Reducing Admixtures and Theoretical Modeling, MS Dissertation, Northwestern University, Evanston, IL, 1997
4. Radlinska A., Pease B., Weiss J.: A preliminary numerical investigation on the influence of material variability in the early-age cracking behavior of restrained concrete, Materials and Structures Vol.40(4), 2007.
5. Pellinen, T., Weiss, J., Kuczek, T., Dauksas, G.: Comparison of various INDOT testing methods and procedures to quantify variability in measured bituminous and concrete properties' FHWA/IN/JTRP-2005/03, Indiana Department of Transportation and Federal Highway Administration, West Lafayette, IN, 2005.
6. Pickett, G.: Effect of aggregate on shrinkage of concrete and hypothesis concerning shrinkage, Journal of the American Concrete Institute 52, 1956.
7. L'Hermite, R. G.: Volume changes of concrete, in 'Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement' Washington, D.C., 1960.
8. Radlinska A. and Weiss J.: Determining Early-Age Cracking Potential in Restrained Concrete Elements Using a Load and Resistance Factor Design (LRFD) Approach, Conference proceedings: Advances in Concrete through Science and Engineering, Quebec City, Canada, 2006.
9. Pease, B.J.: The Role of Shrinkage Reducing Admixtures on Shrinkage, Stress Development, and Cracking, MS Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, 2005.