

MODEL BETONU Z USZKODZENIEM W UJĘCIU MEZOMECHANICZNYM

GRZEGORZ L. GOLEWSKI♣, TOMASZ SADOWSKI♠

♣*Katedra Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Lubelska*

♠*Katedra Mechaniki Ciała Stałego, Politechnika Lubelska*

e-mail: glgo@wp.pl, sadowski.t@gmail.com

Streszczenie. Przedstawiony w pracy model betonu pozwala w sposób teoretyczny opisywać zjawiska zachodzące w procesie uszkodzania i niszczenia się kompozytu, pod wpływem zewnętrznych obciążeń ściskających. W tym celu rozpatruje się ewolucję zmian struktury wewnętrznej betonu poprzez analizę reprezentatywnego wycinka badanej próbki. Model pozwala na opis wzrostu szczelin w procesie jego degradacji wyodrębniając układy szczelin prostych (mezoszczelin) i skrzydłowych. Wyznaczone teoretycznie odkształcenia betonu dają dobre zbieżności z wynikami uzyskiwanymi w sposób doświadczalny.

1. WSTĘP

Beton jest materiałem heterogenicznym i wielofazowym zaliczanym do kompozytów. W modelu sferycznym betonu, np. [1] daje się wyodrębnić fazę ciągłą w postaci kruchej osnowy cementowej, sztywne inkluzje, którymi są przede wszystkim ziarna kruszyw, oraz warstwę stykową (WS) występującą pomiędzy dwoma powyższymi materiałami. WS w betonach zwykłych charakteryzuje się najmniejszą wytrzymałością, wysokim wskaźnikiem wodno - cementowym (w/c) oraz znaczną porowatością. Powoduje to, że miejsca styku ziaren kruszywa z matrycą stają się punktami newralgicznymi, w strukturze kompozytów betonowych, w których dochodzi do powstawania pierwszych defektów. Jak wyglądają uszkodzenia w obszarze WS szczegółowo można przeanalizować wykonując zdjęcia skaningowe zdeformowanego betonu [2].

W pracy przedstawiono sposób modelowania mezomechanicznego kompozytów betonowych wykonanych na bazie kruszyw łamanych: bazaltowych i wapiennych o różnych wymiarach ziaren maksymalnych (D_{max}) tzn. 8 i 16 mm. Opracowany model teoretyczny dotyczy opisu zachowania się betonów poddanych oddziaływaniu dwuwymiarowych stanów naprężenia. Po przekroczeniu granicy sprężystej pracy kompozytu, rozpoczyna się inicjacja oraz wzrost mikrouszkodzeń. W opisie pęknięć uwzględniono dwa rodzaje szczelin: proste i skrzydłowe. Model mezomechaniczny materiału, wymaga wprowadzenia eksperymentalnych danych obejmujących: opis mikrostruktury wewnętrznej materiału, określenia jego cech mechanicznych, ustalenia parametrów mechaniki pęknięcia. W procesie opisu wzrostu pęknięć podstawowymi są badania odporności na pęknięcie wg I i II modelu [3,4]. Na ich podstawie możliwe jest wyznaczenie podstawowych parametrów mechaniki pęknięcia betonu tzn. K_{Ic}

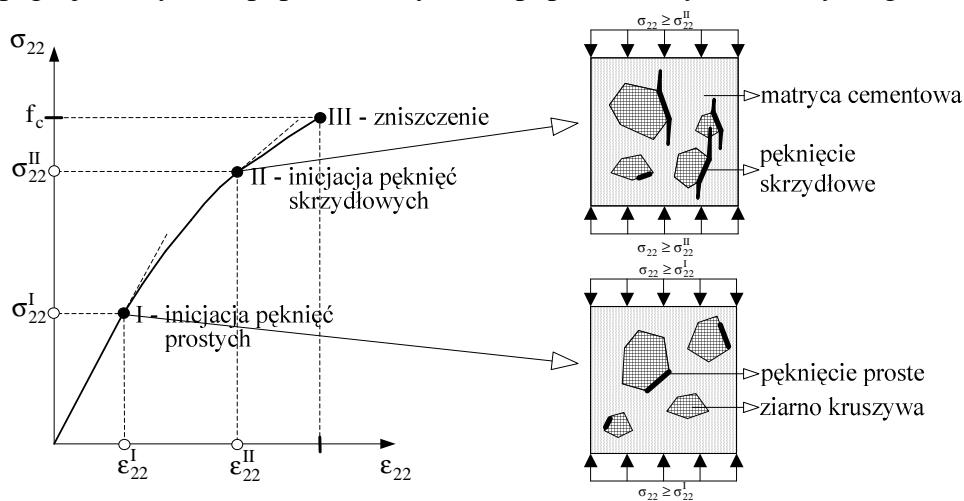
i K_{IIc} , które są niezbędne przy modelowaniu mezomechanicznym. W celu ustalenia odpowiednich współczynników intensywności naprężeń, przeprowadzono eksperymenty oceniające odporność na pęknięcie analizowanych betonów na belkach trójpunktowo zginanych z jedną szczeliną pierwotną (dla I modelu pęknięcia) [3], oraz na kostkach sześciennych typu compact shear (CS) z dwoma szczelinami pierwotnymi (dla II modelu pęknięcia) [4].

W celu porównania zaproponowanego modelu z wynikami doświadczalnymi przeprowadzono eksperymenty określające rozwój odkształceń w próbkach walcowych o wysokości 300 i średnicy 150 mm w procesie osiowego ściskania. Uzyskane wyniki doświadczalne wykazują dużą zbieżność z prezentowanym modelem teoretycznym.

2. ETAPY ROZWOJU USZKODZEŃ W WS ZDEFORMOWANEGO BETONU

Pierwsze uszkodzenia w kompozytach betonowych pojawiają się przede wszystkim w obszarze inkluzji kruszywa grubego. Zjawisko postępującego wzrostu uszkodzeń, w WS reprezentatywnego ziarna kruszywa, w procesie narastania obciążenia zewnętrznego przeanalizowano w pracy [5]. W procesie tym można wyróżnić następujące etapy:

- inicjacja prostego mikropęknięcia w WS kruszywa,
- rozwój mikropęknięcia w mezopeknięcie występujące na całej długości ziarna,
- rozwój pęknięcia typu skrzydłowego.
- propagację skrzydełka poprzez matrycę lub poprzez matrycę i kruszywo grube.



Rys. 1. Związek poziomów naprężeń krytycznych z procesem rozwoju szczelin.

Proces inicjacji i wzrostu pęknięć wewnątrz struktury betonu można również zobrazować korelując poziomy naprężeń krytycznych, występujące w obciążonym betonie, z procesem destrukcji materiału. Znajomość wartości tych naprężeń, określanymi jako σ_{22}^I i σ_{22}^{II} może być przydatna zarówno do ustalenia podatności danego kompozytu na proces rozwoju zarysowania w elementach betonowych (wykorzystanie np. w modelu mezomechanicznym) jak też prognozowania trwałości i bezpieczeństwa konstrukcji. Mechanizm niszczenia betonu w aspekcie teorii naprężeń krytycznych przedstawiono w pracy [6] natomiast rys. 1 obrazuje etapy rozwoju pęknięć od momentu pojawienia się pierwszych mikroszczelin w obszarach WS (poziomy naprężeń σ_{22}^I) do punktu, w którym następuje lawinowy wzrost uszkodzeń powodujący zniszczenie elementu (punkt III na wykresie).

3. OPIS MAKROSKOPOWYCH ODKSZTAŁCENÍ W MODELU MEZOMECHANICZNYM

3.1. Składowe tensora odkształcenia

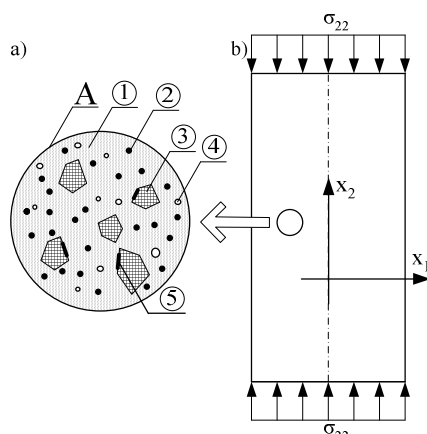
W modelu założono, że całkowite makroskopowe odkształcenia w betonie ε_{ij} są sumą następujących składowych cząstkowych:

- odkształceń czysto sprężystych (ε_{ij}^0),
- odkształceń wywołanych porowatością początkową (ε_{ij}^P),
- odkształceń powodowanych występowaniem szczelin (ε_{ij}^D),

co można zapisać równaniem (1):

$$\varepsilon_{ij}(\sigma_{kl}) = \varepsilon_{ij}^0(\sigma_{kl}) + \varepsilon_{ij}^P(\sigma_{kl}) + \varepsilon_{ij}^D(\sigma_{kl}) \quad (1)$$

W celu ustalenia szczegółowych postaci równań konstytutywnych (1) zastosowano modelowanie mezomechaniczne materiału, w którym rozpatrzono fragment próbki (na poziomie mezoskali) zwany Reprezentatywnym Elementem Powierzchniowym (*REP*) o dostatecznie dużej powierzchni *A* (rys. 2) [7]. Aby uzyskać makroskopowe składowe stanu odkształcenia ε_{ij}^P i ε_{ij}^D przeanalizowano układy: porów i szczelin powstające wewnątrz *REP* pod wpływem działającego obciążenia.



Rys. 2. Struktura betonu konstrukcyjnego: a) reprezentatywny element powierzchniowy (*REP*), b) próbka betonowa; 1-matryca, 2-ziarna piasku, 3-ziarna kruszywa grubego, 4-pory, 5-uszkodzenia.

W celu uproszczenia modelu teoretycznego ograniczono rozważania do przypadku dwuwymiarowego stanu deformacji, realizowanego w procesie jednoosiowego ściskania. Stosując podejście mezomechaniczne [8,9] przeanalizowano proces destrukcji materiału przy narastającym obciążeniu i stowarzyszony z nim proces rozwoju układu defektów wewnątrz *REP*.

W zaawansowanym stadium deformacji, wywołanym przyłożonym obciążeniem, w materiale rozwijają się szczeliny proste i skrzydłowe [5,7] a każda z nich generuje lokalną fluktuację pola naprężeń i odkształceń. Aby sformułować zależności konstytutywne (1) dla betonu ze zmieniającą się strukturą wewnętrzną niezbędne jest zastosowanie w modelu mezomechanicznym procedury uśredniania po powierzchni *REP*. Dla kolejnych poziomów

obciążenia materiału, przy jednoosiowym ściskaniu ($\sigma_{kl} = \sigma_{22}$) i odpowiadających im układów defektów, wyznacza się składowe tensora odkształceń całkowitych ε_{ij} wg (1).

Odształcenia sprężyste kompozytu bez uwzględnienia wpływu porów i defektów (dla betonu traktowanego jako kontinuum) są równe:

$$\varepsilon_{ij}^0(\sigma_{22}) = \frac{1}{A} \int_{A_0} \bar{\varepsilon}_{ij}^0(\sigma_{22}) dA \quad (2)$$

gdzie A_0 oznacza pole powierzchni bez porów i uszkodzeń w obszarze *REP*, A jest powierzchnią *REP*, a $\bar{\varepsilon}_{ij}^0$ opisuje lokalną funkcję tensorową pola odkształceń sprężystych.

Pory, które zajmują od kilku do kilkunastu procent w części *REP* (o powierzchni A_p) powodują powstawanie dodatkowych składowych stanu odkształcenia wyznaczanych następująco:

$$\varepsilon_{ij}^P(\sigma_{22}) = \frac{1}{A} \sum_{s=1}^{N_p} \int_{A_p^{(q)}} \bar{\varepsilon}_{ij}^{P(q)}(\sigma_{22}) dA \quad (3)$$

gdzie N_p jest liczbą porów w *REP*, $\bar{\varepsilon}_{ij}^{P(q)}$ oznacza lokalne odkształcenia powodowane występowaniem pojedynczego pora „ q ”, $A_p^{(q)}$ jest powierzchnią pora, A - jak we wzorze (2).

Szczeliny występujące w materiale powodują również powstawanie odkształceń dodatkowych ε_{ij}^D . Można wyróżnić tu odkształcenia pochodzące od mezoszczelin (ε_{ij}^{Dm}) oraz odkształcenia wywoływane przez skrzydełka ($\hat{\varepsilon}_{ij}^{Dw}$). Te drugie są sumą efektów otwierania się i wzrostu skrzydełek (ε_{ij}^{Dwo}) oraz efektów zmiany kształtów skrzydełek (ε_{ij}^{Dwz}). I tak całkowite odkształcenia dodatkowe powodowane układem pęknięć w betonie są równe:

$$\varepsilon_{ij}^D = \varepsilon_{ij}^{Dm} + 2\hat{\varepsilon}_{ij}^{Dw} = \varepsilon_{ij}^{Dm} + 2(\varepsilon_{ij}^{Dwo} + \varepsilon_{ij}^{Dwz}) \quad (4)$$

w którym współczynnik 2 wynika z faktu, iż na każdą prostą mezoszczelinę przypadają dwa skrzydełka. Odkształcenia powodowane przez proste szczeliny wynoszą:

$$\varepsilon_{ij}^{Dm}(\sigma_{22}) = \frac{1}{A} \sum_{s=1}^{N_m} \int_{A_{Dm}^{(s)}} \bar{\varepsilon}_{ij}^{Dm(s)}(\sigma_{22}) dA \quad (5)$$

gdzie $\bar{\varepsilon}_{ij}^{Dms}$ jest lokalnym tensorem odkształceń „ s ”-tej mezoszczeliny, $A_{Dm}^{(s)}$ - polem jej powierzchni, a N_m - liczbą szczelin w *REP*. Odkształcenia wywołane propagacją „ w ”-tego skrzydełka (jego otwieraniem się) oblicza się ze wzoru:

$$\varepsilon_{ij}^{Dwo}(\sigma_{22}) = \frac{1}{A} \sum_{w=1}^{N_w} \int_{A_{Dw}^{(w)}} \bar{\varepsilon}_{ij}^{Dwo(w)}(\sigma_{22}) dA \quad (6)$$

a odkształcenia związane z zamykaniem się skrzydełka (zmianą jego kształtów) są równe:

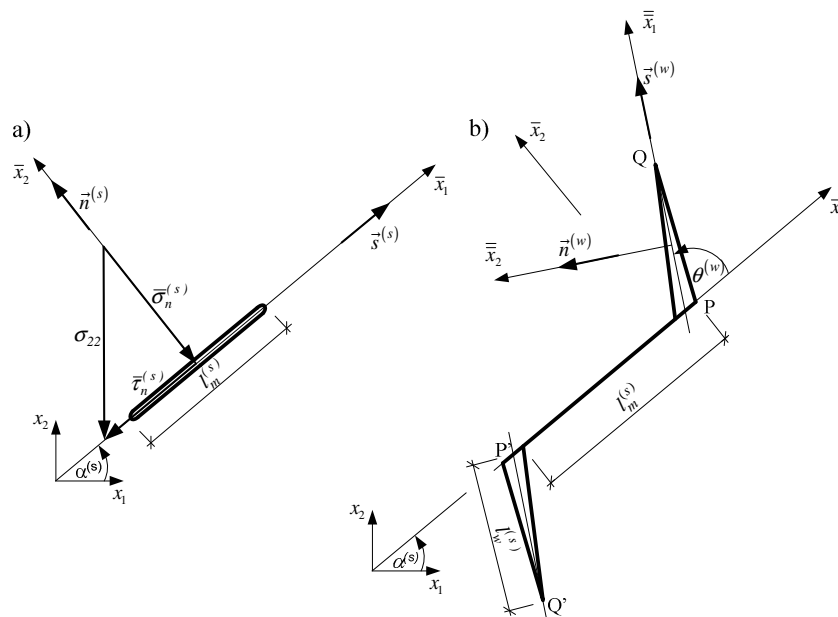
$$\varepsilon_{ij}^{Dwz}(\sigma_{22}) = \frac{1}{A} \sum_{w=1}^{N_w} \int_{A_{Dw}^{(w)}} \bar{\varepsilon}_{ij}^{Dwz(w)}(\sigma_{22}) dA \quad (7)$$

W powyższych wzorach $\bar{\varepsilon}_{ij}^{Dwo(w)}$ i $\bar{\varepsilon}_{ij}^{Dwz(w)}$ są lokalnymi tensorami odkształceń „w”-tego skrzydełka związanymi odpowiednio z jego propagacją i zamykaniem się. $A_{Dw}^{(w)}$ oznacza pole powierzchni skrzydełka, a N_w jest liczbą szczelin skrzydłowych w REP. Całkowita liczba defektów N_D (mezoszczelin i skrzydełek) jest sumą:

$$N_D = N_m + N_w \quad (8)$$

Opisane we wzorach od (2) do (8), relacje umożliwiają wyznaczenie odkształceń całkowitych w kompozycie zgodnie z równaniem konstytutywnym (1) dla układu defektów w REP, który odpowiada danemu poziomowi obciążenia σ_{22} .

3.2. Model szczelin prostych



Rys. 3. Schematy szczelin z układami odniesienia: a) mezoszczeliny, b) szczeliny skrzydłowej.

Przy modelowaniu mezomechanicznym założono, że inicjacja pęknięć w betonie rozpoczyna się przy poziomie zewnętrznego obciążenia, ściskającego próbkę $\sigma_{22} = \sigma_{22}^I$. Poniżej tego poziomu obciążony kompozyt zachowuje się jak ciało liniowo-sprężyste, tzn. spełnione jest prawo Hooke’a.

Po przekroczeniu poziomu σ_{22}^I inicjują się pierwsze mezopeknięcia. Są one zamkniętymi prostymi szczelinami z tarcie kontaktowym [10]. Rys. 3a przedstawia mezopeknięcie z lokalnym stanem naprężenia: naprężeniem normalnym ($\bar{\sigma}_n^{(s)}$) - powodującym tarcie dociskanych powierzchni i naprężeniem stycznym ($\bar{\tau}_n^{(s)}$). Powierzchnie pęknięcia mogą

przesunąć się względem siebie tzn. może nastąpić propagacja szczeliny, jeśli składowa styczna naprężenia wzdłuż kierunku szczeliny (oś \bar{x}_1) $\bar{\tau}_w^{(s)}$ będzie równa:

$$\bar{\tau}_w^{(s)} = |\bar{\tau}_n^{(s)}| - \mu |\bar{\sigma}_n^{(s)}| = \sigma_{22} (-0,5 \sin 2\alpha^{(s)} + \mu^{(s)} \cos^2 \alpha^{(s)}) \quad (9)$$

gdzie μ oznacza współczynnik tarcia obu powierzchni pęknięcia względem siebie.

Długość „s”-tego mezopęknięcia wzrasta, gdy w wierzchołku pęknięcia przekroczona zostaje odporność na pęknięcie betonu przy II modelu pęknięcia. Współczynnik intensywności naprężeń $K_{II}^{(s)}$ osiąga wtedy wartość krytyczną tzn:

$$K_{II}^{(s)} = \bar{\tau}_w^{(s)} \sqrt{\pi \frac{1}{2} l_m^{(s)}} = K_{IIc}^{ws} (p_{ws}) \quad (10)$$

gdzie K_{II}^{ws} jest odpornością na pęknięcie WS kruszywa grubego z matrycą dla II modelu pęknięcia. p_{ws} określa porowatość WS na granicy kruszywo - matryca cementowa. Wartość liczbowa K_{IIc}^{ws} jest równa:

$$K_{IIc}^{ws} = \sqrt{2\gamma_{ws} (p_{ws}) E(p)} \quad (11)$$

We wzorze (11) $\gamma_{ws} (p_{ws})$ jest energią powierzchniową pęknięcia w WS kompozytu, natomiast $E(p)$ modułem Younga kompozytu betonowego, zależnym od całkowitej porowatości materiału p .

3.3. Model szczelin skrzydłowych

Następnym etapem propagacji mezoszczeliny jest powstawanie skrzydełek. Modelowy schemat tego typu uszkodzeń pokazano na rys. 3b. Zmiana kierunku propagacji mezoszczeliny (skręcenie) powodowana jest napotkaniem bariery energetycznej np. drugiego ziarna kruszywa lub tendencją rozwoju szczeliny w kierunku pionowym w niestabilnej fazie jej wzrostu. W celu opisanego odkształceń wywołanych przez skrzydełka wprowadzono lokalny układ odniesienia $\{\bar{x}_k\}$. W układzie tym orientacja „w”-tego skrzydełka jest opisana wektorem stycznym $\vec{s}^{(w)}$ i normalnym $\vec{n}^{(w)}$ [8] natomiast kąt nachylenia skrzydełek będzie równy:

$$\psi^{(w)} = \alpha^{(s)} + \theta^{(w)} \quad (12)$$

W modelowaniu przyjęto energetyczne kryterium pęknięcia w wierzchołku skrzydełka w następującej formie:

$$G^{(w)} - 2\gamma_{ws} = 0 \quad (13)$$

gdzie $G^{(w)}$ jest prędkością uwalniania energii sprężystej. Skrzydełko podczas rozwoju otwiera się i jest poddane dwuosowemu stanowi naprężenia. Zatem funkcję $G^{(w)}$ można zapisać w ogólnej postaci [10]:

$$G^{(w)}(\alpha^{(s)}, \theta^{(w)}) = \frac{(k_I^{(w)})^2 + (k_{II}^{(w)})^2}{E} \quad (14)$$

gdzie $k_I^{(w)}$ i $k_{II}^{(w)}$ są współczynnikami intensywności naprężeń w wierzchołku „w”-tego skrzydełka, odpowiednio dla pierwszego i drugiego modelu pęknięcia. Szczegółowe wzory na $k_I^{(w)}$ i $k_{II}^{(w)}$ podają m.in.: S. Nemat - Nasser i M. Obata [11] i T. Sadowski [10]:

$$k_I^{(w)} = \frac{l_m^{(s)} \bar{\tau}_w^{(s)} \sin \theta^{(w)}}{\sqrt{\pi(l^{(w)} + l^*)}} + \sqrt{\pi l^{(w)}} \frac{1}{2} \sigma_{22} (1 + \cos 2\psi^{(w)}) \quad (15)$$

oraz

$$k_{II}^{(w)} = \frac{l_m^{(s)} \bar{\tau}_w^{(s)} \cos \theta^{(w)}}{\sqrt{\pi(l^{(w)} + l^*)}} - \sqrt{\pi l^{(w)}} \frac{1}{2} \sigma_{22} \sin 2\psi^{(w)} \quad (16)$$

Przy wprowadzaniu wzorów (15) i (16) przyjęto następujące założenia:

- siła napędowa ścinania na powierzchni pierwotnej „s”-tej mezoszczeliny jest równa:

$$\tau_w^{(s)} = -\frac{1}{2} \sigma_{22} \sin 2\alpha^{(s)} + \mu \sigma_{22} \cos^2 \alpha^{(s)} \quad (17)$$

- zastępcza długość początkowa skrzydełka $l^{(w)} + l^*$, gdzie $l^* = 0,27l_m^{(s)}$ jest początkową długością skrzydełka [8], przyjętą po to, aby wzory (15) i (16) były uniwersalne, tzn. obejmowały zarówno bardzo krótkie, jak i długie skrzydełka (od chwili ich inicjacji, aż do osiągnięcia maksymalnej długości).

W modelowaniu mezomechanicznym istotnym zagadnieniem jest określenie wpływu występowania skrzydełek na całkowite odkształcenia ϵ_{ij} i postać równania konstytutywnego (1). Największe znaczenie mają skrzydełka o dużej długości, skierowane pionowo. Dlatego też można wprowadzić pewne uproszczenia, sugerowane przez innych badaczy [8,9,12] i zapisać wzory (15) i (16) w skróconej formie, słusznej dla długich skrzydełek o kierunku pionowym (wzdłuż działającego obciążenia σ_{22}):

$$k_I^{(w)} = \frac{l_m^{(s)} \bar{\tau}_w^{(s)} \sin \theta^{(w)}}{\sqrt{\pi l^{(w)}}} \quad (18)$$

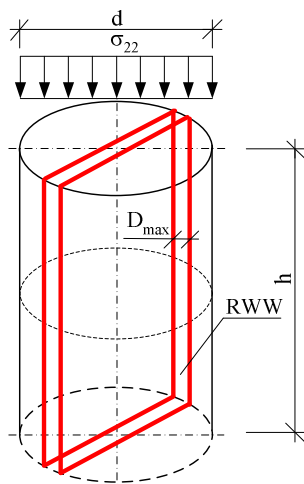
oraz

$$k_{II}^{(w)} = -\frac{l_m^{(s)} \bar{\tau}_w^{(s)} \cos \theta^{(w)}}{\sqrt{\pi l^{(w)}}} \quad (19)$$

4. METODYKA WYZNACZANIA ODKSZTAŁCEŃ W BETONIE

W modelu założono, iż miejscami decydującymi o powstawaniu uszkodzeń i wartościach odkształceń całkowitych w kompozycie (1) są *WS* ziarn kruszywa grubego. Liczba pęknięć w materiale skorelowana jest z liczbą dużych ziaren stąd w celu ustalenia ich wartości przyjęto tzw. reprezentatywny wycinek walca (*RWW*), rys. 4. Założono, iż w zależności od D_{max} szerokość *RWW* będzie wynosiła 8 lub 16 mm. Po ustaleniu objętości analizowanego *RWW* oraz znając całkowitą masę zastosowanego kruszywa grubego w betonie, ustalono ile wynosi masa wypełniacza znajdującego się w *RWW*. W dalszej kolejności korzystając z analiz krzywych uziarnienia i prostych zależności ustalono liczbę ziarn kruszyw dla poszczególnych frakcji w *RWW* [7].

Pierwsza faza deformacji kompozytu betonowego aż do poziomu naprężeń krytycznych σ_{22}^I (inicjacja pęknięć) ma charakter liniowo - sprężysty. Składowe odkształcenia obliczone dla poziomu naprężeń od 0 do σ_{22}^I wyznaczono wg prawa Hooke'a [7]. Po przekroczeniu naprężeń σ_{22}^I składowe stanu odkształcenia obliczano wg (4) tj. uwzględniając występowanie pęknięć prostych i skrzydłowych (dla poziomu obciążenia powyżej naprężeń σ_{22}^H).



Rys. 4. Schemat obrazujący reprezentatywny wycinek walca (*RWW*).

Założono przy tym, iż kąt nachylenia szczeliny prostej - $\alpha^{(s)}$ będzie się zawierał w przedziale od 40° do 50° , przy czym na kąt 45° będzie przypadała połowa występujących uszkodzeń w betonie, a na dwa pozostałe kąty tj. 40° i 50° - po $\frac{1}{4}$. Przyjęte wartości wynikają z przeprowadzonych badań. Ponadto założono, że kąt nachylenia skrzydełka - $\theta^{(w)}$ w chwili inicjacji wynosić będzie 60° [7]. W modelu przyjęto, iż każde z ziarn kruszywa grubego będzie generowało w obszarze swojej *WS* jedną szczelinę, a uszkodzenia te będą inicjować się stopniowo. Przy każdym kolejnym poziomie obciążenia wzrasta liczba szczelin w materiale, zatem liczbę ziarn kruszywa grubego występującego w *RWW* podzielono proporcjonalnie do liczby poziomów naprężeń [7].

5. ANALIZA WYNIKÓW TEORETYCZNYCH I EKSPERYMENTALNYCH

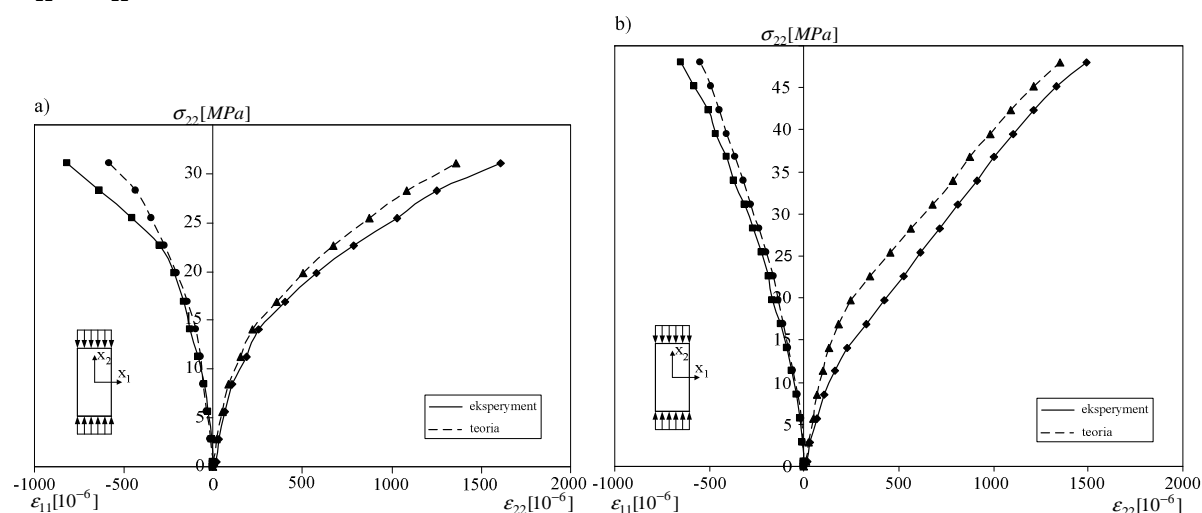
W pracy przeanalizowano betony zwykłe różniące się między sobą tylko rodzajem zastosowanego wypełniacza. Wykonano je na bazie łamanych kruszyw: wapiennych i bazaltowych o (D_{max}) do 8 mm (**B1**, **W1**) i 16 mm (**B2**, **W2**). Szczegółowe informacje

dotyczące składu mieszanek betonowych podano w [7], natomiast parametry wytrzymałościowe analizowanych kompozytów zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyki wytrzymałościowe analizowanych betonów

Seria betonu	Charakterystyki wytrzymałościowe			
	$f_{cm\Box 15}$ [MPa]	$f_{cm\phi 15/30}$ [MPa]	f_{ctm} [MPa]	E [MPa]
B1	48,9	45,0	3,47	33350
W1	39,2	35,7	2,57	31325
B2	51,4	47,5	3,65	34559
W2	45,1	39,1	3,17	32645

Na rys. 5 pokazano przykładowe wykresy funkcji odkształceń w jednej z próbek serii **W1** i **B2**. W analizie uwzględniono odkształcenia uzyskane w badaniach (odczyty na mostku tensometrycznym - ε_{11}^{bm} , ε_{22}^{bm}) i zestawiono je z wartościami odkształceń, które były wynikiem obliczeń z modelu mezomechanicznego - ε_{11}^{om} , ε_{22}^{om} . W tabeli 2 zestawiono natomiast końcowe wartości średnie odkształceń dla poszczególnych serii betonu uzyskane w badaniach wraz z wynikami uzyskanymi w modelu. Porównanie końcowych wartości odkształceń uzyskanych podczas badań oraz obliczonych na podstawie opracowanego algorytmu w modelu mezomechanicznym wykazało dużą zbieżność uzyskiwanych rezultatów. Najmniejsze różnice w wartościach końcowych odkształceń wystąpiły przy porównaniu ε_{11}^{bm} z ε_{11}^{om} i ε_{22}^{bm} z ε_{22}^{om} w betonie **B2** (10% i 7%), a największe różnice przy porównaniu ε_{11}^{bm} z ε_{11}^{om} i ε_{22}^{bm} z ε_{22}^{om} w betonie **W1** (37% i 24 %).



Rys. 5. Proces propagacji odkształceń w próbkach betonowych: a) serii **W1**, b) serii **B2**.

Tabela 2. Końcowe odkształcenia betonów

Seria betonu	Średnie końcowe wartości odkształceń [%]			
	Uzyskane w badaniach		Uzyskane w modelu	
	ε_{11}^{bm}	ε_{22}^{bm}	ε_{11}^{om}	ε_{22}^{om}
B1	0,67	1,58	0,58	1,36
W1	0,92	2,04	0,67	1,54
B2	0,61	1,44	0,55	1,35
W2	0,86	1,75	0,78	1,42

Powyższy model analizuje tylko odkształcenia pochodzące od pojedynczych szczelin rozwijających się w obszarze *WS* kruszywa grubego. Założenie, iż na jedno ziarno kruszywa przypada jedna szczelina oraz fakt nie uwzględniania interakcji pomiędzy poszczególnymi defektami (tuż przed zniszczeniem materiału) może być przyczyną wynikających różnic. Kolejnym etapem w procesie udoskonalania modelu będzie weryfikacja uzyskanych wyników metodami numerycznymi. Zalety dyskretyzacji niejednorodnej struktury betonu w zastosowaniu do analizy stanów naprężeń i odkształceń w tych kompozytach przedstawiono np. w pracy [13].

5. PODSUMOWANIE

Zaproponowany nowy model mezomechaniczny do opisu zachowania się kompozytów betonowych o różnej strukturze początkowej umożliwia uwzględnienie fizykalnych podstaw zjawisk rozwoju mikropęknięć w betonie przy działaniu obciążeń mechanicznych. W modelu tym uwzględnia się rzeczywistą strukturę początkową materiału. Receptura składu mieszanki betonowej oraz obserwacje mikroskopowe i makroskopowe dostarczają informacji o strukturze materiału: kształcie i wielkości ziaren, występowaniu porów i szczelin oraz ich morfologii. Obserwacje eksperymentalne powierzchni przełomów umożliwiają sformułowanie wniosków, co do sposobu pęknięcia kompozytu betonowego tj.: wzdłuż warstw stykowych, w matrycy lub poprzez ziarna. Sposób rozwoju mikropęknięć zależy od rodzaju i wielkości wypełniacza. W proponowanym modelu mezomechanicznym uwzględnia się wszystkie typy pęknięć [5], oraz wszystkie etapy deformacji kompozytów betonowych. W początkowej fazie materiał zachowuje się liniowo - sprężyste. Gdy obciążenie próbki powoduje powstanie naprężeń ściskających σ_{22}^I , w kompozycie betonowym inicjują się mikropęknięcia z mikroporów występujących w *WS*. Wraz ze wzrostem obciążenia tworzą się wewnątrz materiału układy mikroszczelin. Mikroszczeliny rozwijają się w mezoszczeliny proste, gdy spełnione są kryteria ich wzrostu (10), gdzie krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{IIc} wyznaczony jest na podstawie badań eksperymentalnych. Gdy stan naprężenia w próbce przekroczy poziom naprężeń krytycznych σ_{22}^{II} część mezoszczelin zmienia kierunek propagacji i tworzą się szczeliny wtórne w postaci skrzydełek. Do opisu wzrostu skrzydełka potrzebna jest znajomość wartości K_{Ic} i K_{IIc} , gdyż proces ich rozwoju odbywa się przy mieszanym modelu pęknięcia. Niszczenie materiału rozpoczyna się, gdy szczeliny rozwijają się w sposób katastroficzny (niestabilny).

Wyniki modelowania (rys. 5) pokazują, że proponowany model daje dobre przybliżenie rzeczywistego zachowania się kompozytów betonowych poddanych obciążeniom ściskającym. Porównując rozkłady odkształceń przy narastającym naprężeniu σ_{22} stwierdzić można dużą zbieżność w rezultatach uzyskiwanych metodami eksperymentalnymi z wynikami modelowania teoretycznego. Szczególnie części wykresów w obszarach od zerowego poziomu naprężeń do wartości naprężeń krytycznych σ_{22}^{II} mają prawie idealną konwergencję w porównywalnych wartościach odkształceń poprzecznych i podłużnych.

LITERATURA

1. Li G., Zhao Y., Pang S. S.: Four - phase sphere modeling of effective bulk modulus of concrete. "Cement and Concrete Research" 1993, 29, p. 839-845.
2. Golewski G., Sadowski T.: Analiza uszkodzeń betonów na mineralnych kruszywach naturalnych i łamanych z wykorzystaniem metod mikroskopii skaningowej. „Inżynieria Materiałowa” 2007, 1, s. 33-38.
3. Golewski G., Sadowski T.: Parametry mechaniki pęknięcia betonów określone na podstawie badań doświadczalnych wg I modelu pęknięcia. „Przegląd Budowlany” 2005, 10, s. 31-37.
4. Golewski G., Sadowski T.: Fracture toughness at shear (mode II) of concretes made of natural and broken aggregates. The Eight International Symposium on Brittle Matrix Composites, Warszawa 2006, p. 537-546.
5. Golewski G., Sadowski T.: Analiza kruchych uszkodzeń w kompozytach betonowych. "Czasopismo Techniczne" 2007, 1-B, s. 55-62.
6. Golewski G., Sadowski T.: Mechanizm zniszczenia kompozytów betonowych przy ściskaniu w aspekcie teorii naprężeń krytycznych. "Przegląd Budowlany" 2006, 5, s. 26-33.
7. Golewski G. L., Sadowski T. S.: Rola kruszywa grubego w procesie destrukcji kompozytów betonowych poddanych obciążeniom doraźnym. Lublin: IZT Sp. z o. o., 2008.
8. Sadowski T.: Mechanical response of semi - brittle ceramics subjected to tension - compression state. Part I: Theoretical modeling. "International Journal of Damage Mechanics" 1994, 3, p. 213-233.
9. Sadowski T.: Mechanical response of semi - brittle ceramics subjected to tension - compression state. Part II: Description of deformation process. "International Journal of Damage Mechanics" 1995, 4, p. 293-317.
10. Sadowski T.: Modeling of semi - brittle MgO ceramic behaviour under compression. "Mechanics of Materials" 1994, 18, p. 1-16.
11. Nemat - Nasser S., Obata M.: A microcrack model of dilatancy in brittle materials. "Journal of Applied Mechanics" 1988, 55, p. 24-35.
12. Hori H., Nemat - Nasser S.: Compression - induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure. "Journal Geophysics Research" 1985, 90, p. 3105-3125.
13. Cińcio A., Wawrzynek A., Piłśniak J.: Analiza numeryczna degradacji betonu z uwzględnieniem makrostruktury. "Modelowanie Inżynierskie" 2007, 34, s. 5-10.

THE CONCRETE MODEL WITH DAMAGE IN TERMS OF MESOMECHANIC

Summary. In the paper, a mesomechanic model was presented which describes micro-crack development in concrete composites subjected to compression. It has been assumed in the mathematical description presented that the cracks occurring in the interfacial transition zone area of coarse aggregate are mainly decisive for destruction of composites. Total deformations generated by the cracks (mesocrack and wing crack). Comparison of the final experimental results concerning deformations with the final results calculated on the basis of the model showed big convergence of the results obtained.