

## ANALIZA NUMERYCZNA DEGRADACJI BETONU Z UWZGLĘDNIENIEM MAKROSTRUKTURY

ANDRZEJ CIŃCIO, ANDRZEJ WAWRZYNEK, JERZY PILŚNIAK

*Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska  
e-mail: andrzej.cincio@polsl.pl, andrzej.wawrzynek@polsl.pl, jerzy.pilsniak@polsl.pl*

Streszczenie. W pracy przedstawiono próbę numerycznej analizy stanu odkształceń, naprężeń oraz stopnia uszkodzeń niejednorodnego materiału typu beton. W opracowaniu dyskretyzacja modelu została wykonana autorskim programem „FEM\_Bmp” na podstawie analizy rzeczywistych obrazów map bitowych uzyskanych poprzez skanowanie powierzchni próbki betonowej. Wyniki końcowe uzyskano, wykorzystując program „ABAQUS”. Głównym celem artykułu jest pokazanie możliwości utworzenia dyskretyzacji, która możliwie najwierniej odpowiada rzeczywistej, niejednorodnej strukturze materiału. Autorzy przedstawiają również wyniki obliczeń dla prostego przykładu numerycznego.

### 1. WSTĘP

Tematem poniższego opracowania jest ocena odkształceń, naprężeń oraz stopnia degradacji w przypadku ściskanej próbki betonowej, z uwzględnieniem niejednorodności materiału. Na obecnym, wstępnym etapie badań zagadnienie jest rozpatrywane jako płaskie. Autorzy postanowili odnieść się do rzeczywistych przekrojów próbek materiału poprzez analizę zeskanowanych, cyfrowych obrazów. Analiza obrazu umożliwia identyfikację składników, przyporządkowując im odpowiednie obszary, co w dalszej kolejności pozwala utworzyć numeryczny model metody elementów skończonych. Przyjęta procedura umożliwia kontrolę stopnia niejednorodności takich jak wielkość najmniejszych uwzględnianych ziaren, liczbę rozpatrywanych składników itp.

Obliczenia wykonywane są w trzech etapach:

- Etap pierwszy – utworzenie cyfrowego obrazu przekroju próbki betonowej poprzez jego skanowanie z zadaną rozdzielczością. Rozdzielczość decyduje o stopniu dokładności analizy struktury (najmniejsze uwzględniane niejednorodności).

- Etap drugi – obróbka obrazu cyfrowego pod kątem identyfikacji składników betonu (kruszywo, spoiwo cementowe, pustki) oraz zapisanie uzyskanych wyników w plikach tekstowych dogodnych do analiz programami MES (np. ABAQUS lub ANSYS). Etap ten jest związany również z przyjęciem modeli i parametrów odpowiadających poszczególnym materiałom. W analizach zastosowano model uwzględniający uszkodzenia materiału (model plastyczno-degradacyjny, znany w literaturze jako model Barcelona - MB). Autorzy zwracają

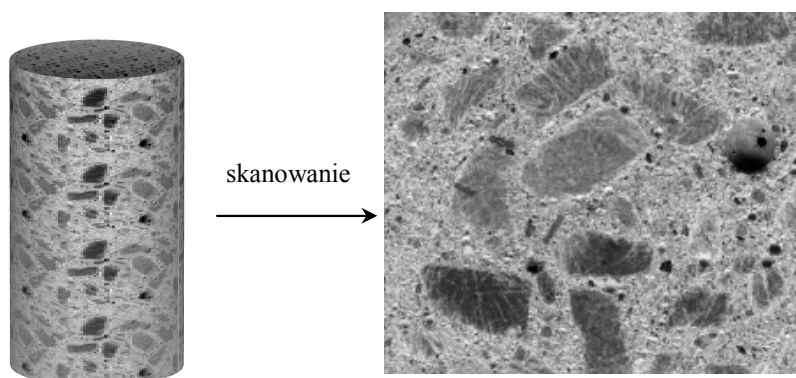
uwagę, że praca ma charakter wstępny, a model obliczeniowy Barcelona został przyjęty ze względu na jego implementację w używanym programie ABAQUS.

· Etap trzeci – analiza degradacji materiału programem MES. Etap ten wiąże się z przyjęciem odpowiednich warunków początkowych oraz brzegowych. W przykładowych obliczeniach przeanalizowano jeden cykl odciążenie - odciążenie.

W pracy wykorzystuje się plastyczno-degradacyjny model MB, opracowany przez zespół badaczy (J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller i E. Onate) i stosowany m.in. w numerycznych symulacjach cyklicznych/dynamicznych obciążeń konstrukcji budowlanych. Własną propozycję adaptacji MB do opisu muru konstrukcyjnego opracował w roku 2005 A. Cińcio. Model Barcelona został zaimplementowany w pakiecie MES – HKS ABAQUS.

## 2. ANALIZA OBRAZU PRZEKROJU PRÓBKKI

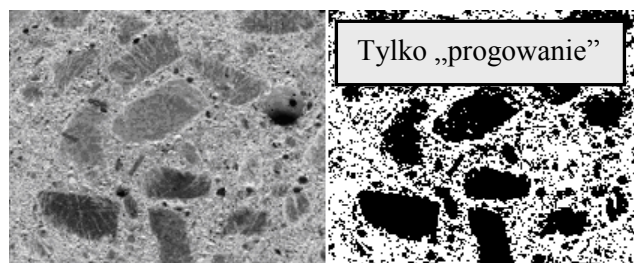
Pierwszym krokiem analizy jest skanowanie powierzchni przekroju próbki. Rozdzielczość otrzymanego obrazu decyduje o szczegółowości analizy statycznej. Na obecnym etapie badań rozważa się tylko mapy bitowe przekształcone do odcienie szarości. Na rys. 1. pokazano widok analizowanej próbki oraz uzyskany obraz.



Rys. 1. Mapa bitowa w odcieniach szarości analizowanej próbki

### 2.1. Przekształcenia obrazu

Otrzymany obraz jest przekształcany tak, aby możliwe stało się w miarę jednoznaczne wydzielenie obszarów o jednolitej strukturze. Można tego dokonać poprzez operacje znane z programów graficznych: „rozmazanie” obrazu, „wyostwienie”, „progowanie”.



Rys. 2. Przekształcenia mapy bitowej: „progowanie” (dwa materiały)

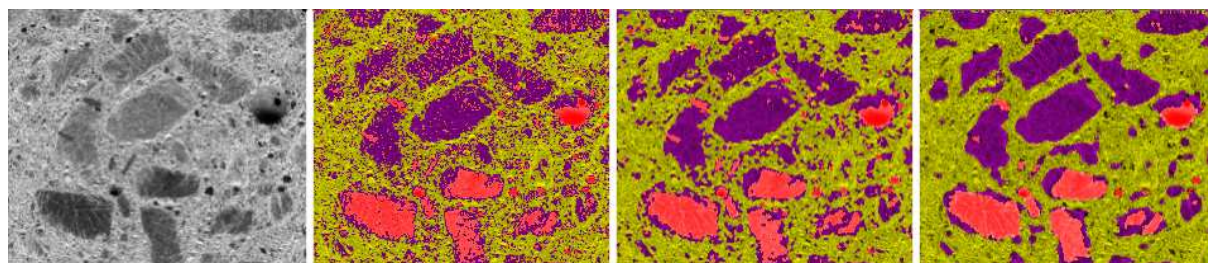
Rys. 2. pokazuje, że bezpośrednie przypisanie materiałów do obszarów mapy bitowej poprzez „progowanie” nie jest zbyt poprawne. Dodatkowe zastosowanie filtru

„rozmazującego” powoduje o wiele bardziej poprawne przyporządkowanie materiałów (patrz rys. 3).



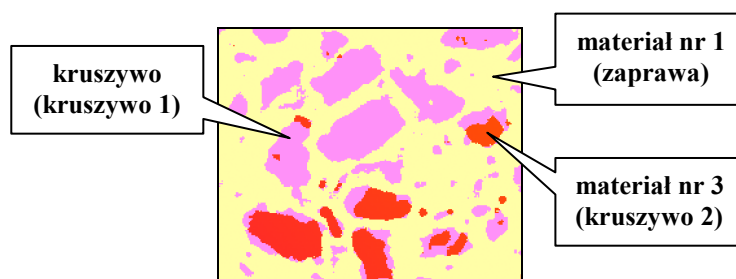
Rys. 3. Przekształcenia mapy bitowej: „rozmazanie”, „progowanie” (dwa materiały)

Autorzy oprócz standardowych filtrów zastosowali również procedurę iteracyjną pozwalającą eliminować odpowiednio małe wyizolowane obszary, jak to pokazuje rys. 4.



Rys. 4. Przekształcenia mapy bitowej stosowane przez autorów nakładanie kolejnych filtrów na mapę bitową – kolory odpowiadają różnym materiałom (trzy materiały)

W przedstawianym przykładzie dokonano przyporządkowania trzem materiałom (jak to pokazują kolory na rysunku 4: żółty, fioletowy, czerwony odpowiadające zaprawie oraz dwóm rodzajom kruszywa). Końcowy wynik analiz jest przedstawiony na rysunku 5. Autorzy pragną dodać, że zastosowane procedury analizy obrazu nie są doskonałe i wymagają dalszych prac (m.in. autorzy rozważają wprowadzenie filtrów opartych na rozwinięciach falkowych). Opisane wyżej procedury są zaimplementowane w autorskim programie „FEM\_Bmp” napisanym w C++.



Rys. 5. Końcowe przyporządkowanie trzech materiałów: kolor żółty, fioletowy, czerwony

## 2.2. Pliki wsadowe do programów ANSYS oraz ABAQUS

Określenie obszarów obrazu cyfrowego i przyporządkowanie ich poszczególnym materiałom umożliwia stworzenie plików wsadowych (makr) do programów typu MES. Autorzy do obliczeń statycznych wykorzystywali dwa programy: ABAQUS oraz ANSYS. Możliwości pakietów obliczeniowych określają, jakimi modelami konstytutywnymi będą opisane poszczególne rodzaje materiałów. Największe (obecnie) możliwości daje ABAQUS,

w którym jest zaimplementowany model plastyczno - degradacyjny zwany *modelem Barcelona*.

Tworzenie plików wsadowych wymaga określenia danych materiałowych. Autorzy w przedstawianym na końcu opracowania przykładzie zastosowali parametry materiałowe określone dla zapraw cementowych.

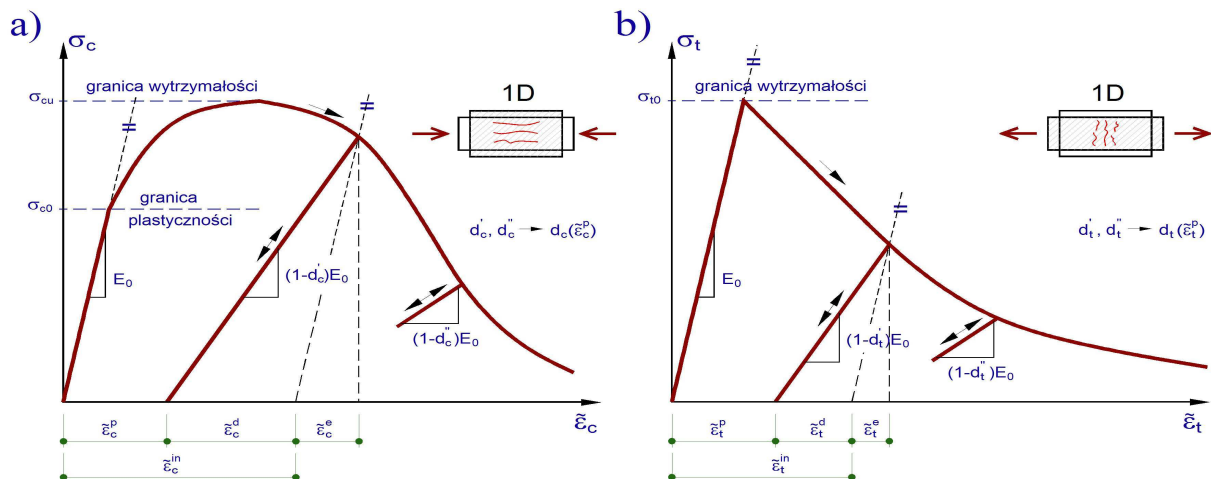
Na obecnym etapie badań autorski program „FEM\_Bmp” dokonuje podziału obszarów na prostokątne elementy skończone zgodne z dyskretyzacją obrazu zapisanego w mapie bitowej. Takie rozwiązanie nie jest optymalne. Otrzymane pliki makra definiują dużą liczbę elementów skończonych.

### 3. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA MODELU BARCELONA

W tym rozdziale autorzy bardzo krótko przedstawiają zastosowany w obliczeniach Model Barcelona (BM), który wywodzi się z przyrostowej teorii plastyczności oraz z kontynualnej mechaniki zniszczenia (dokładniejszy opis można znaleźć np. [1-4] - autorzy również pomijają dyskusję na temat wad oraz zalet modelu). Charakteryzuje go bidysypacyjna, izotropowa degradacja materiału, opisana dwoma skalarnymi zmiennymi degradacji materiału:  $d_t$  i  $d_c$ , odpowiednio dla stanu rozciągania i ściskania. Zmienne te, określane na podstawie niezależnych funkcji zniszczenia materiału, mogą zostać ze sobą powiązane. Sprzężenie sprężysto – plastycznej charakterystyki materiału z opisem jego zniszczenia realizowane jest poprzez wyrażenie równań konstytutywnych teorii plastyczności za pomocą naprężeń efektywnych.

Z punktu widzenia przyrostowej teorii plastyczności omawiany model ten charakteryzuje:

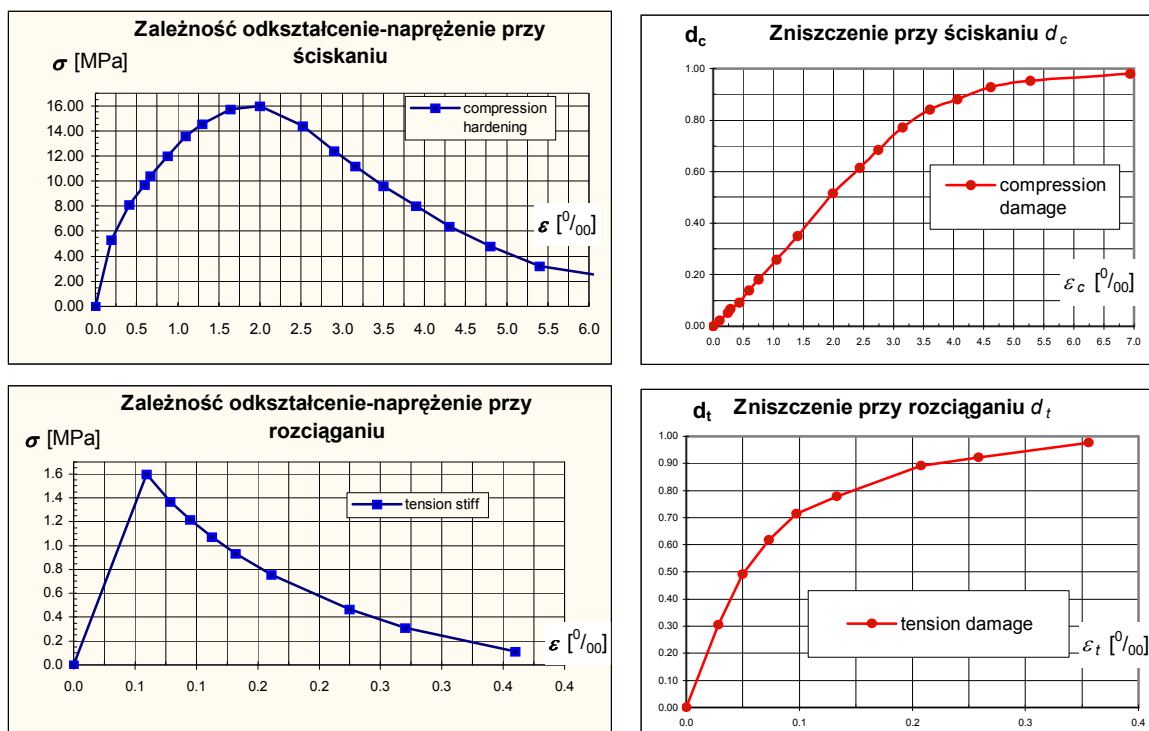
- powierzchnia plastyczności będąca rozszerzeniem klasycznego modelu Druckera-Pragera, w którym południki (tworzące powierzchnię plastyczności w przekroju merydjalnym) są prostymi, natomiast przekrój dewiatorowy jest niekołowy;
- niestowarzyszone prawo płynięcia, w którym odkształcenia plastyczne wyznaczone są na podstawie powierzchni potencjału plastycznego różnej od powierzchni plastyczności;
- nieliniowe prawo wzmocnienia izotropowego typu dwumechanizmowego (niezależnie dla ściskania i rozciągania), oparte na hipotezie wzmocnienia odkształceniowego.



Rys. 6. Opis cyklicznego, jednoosiowego testu w modelu „Barcelona”: a) ściskania, b) rozciągania

Degradacja materiału, uaktywniana po osiągnięciu przez ścieżkę naprężenia powierzchni plastyczności, opisana jest dwoma niemalejącymi funkcjami, odpowiednio dla ściskania

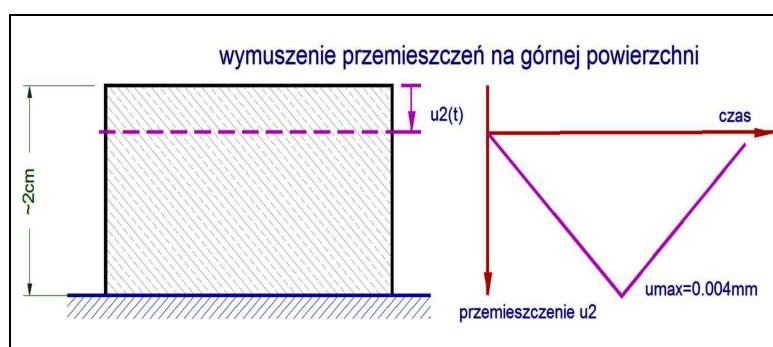
i rozciągania:  $d_c = d_c(\tilde{\varepsilon}_c^p)$ ,  $d_t = d_t(\tilde{\varepsilon}_t^p)$ . Funkcje te określają bieżące wartości zmiennych izotropowego zniszczenia materiału:  $d_c$  i  $d_t$ , determinujących odpowiedź modelu w stadium odciążenia (por. rys. 6a i 6b). Przyjęte parametry materiałowe pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Przyjęte w obliczeniach krzywe wzmocnienia i degradacji

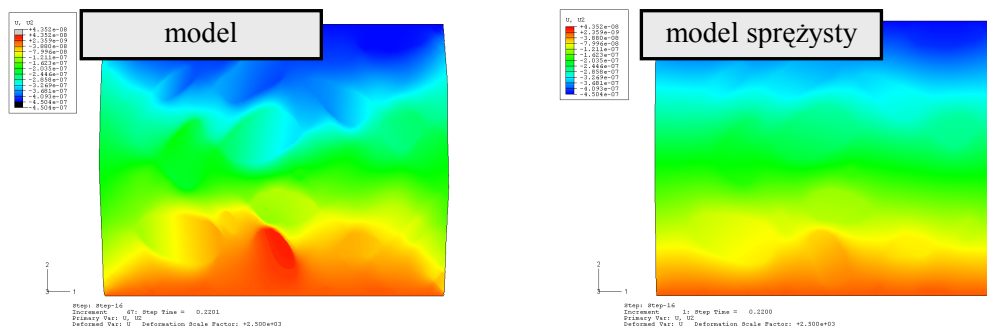
#### 4. PRZYKŁAD OBLICZEŃ DEGRADACJI

Przykład obliczeń dotyczy małej próbki o wymiarach około 2cm x 3 cm. Wymuszono zmienne przemieszczenie górnej powierzchni (rys. 8.).



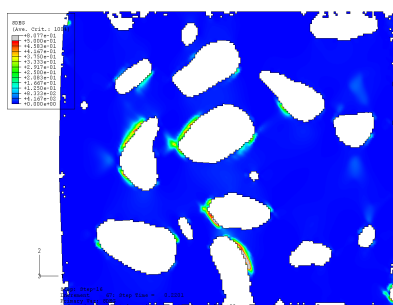
Rys 8. Historia obciążenia próbki prostokątnej (wymiały próbki  $\sim 2 \times 3 \text{ cm}$ )

Przyjęto dla kruszywa model sprężysty oraz model Barcelona dla wypełnienia. Wyniki porównano z wynikami uzyskanymi przy przyjęciu modelu sprężystego również dla wypełnienia. Charakterystyki degradacji pokazano na rys. 7. Na rys. 9 przedstawiono wyniki porównawcze (model Barcelona dla zaprawy – model sprężysty dla zaprawy) w postaci map przemieszczeń pionowych (jednakowa skala barwna).



Rys. 9. Porównanie map przemieszczeń pionowych dla modelu sprężystego oraz Barcelona

Na rys. 10 przedstawiono wyniki obliczeń w postaci map degradacji materiału, gdzie białe pola oznaczają wycięte obszary związane z kruszywem.



Rys. 10. Mapa degradacji materiału

Przedstawione wyniki świadczą o możliwości analizy niejednorodnych struktur w nawiązaniu do ich rzeczywistych struktur.

*Praca została wykonana w ramach projektu badawczego nr 4 T07R 021 28 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji.*

#### LITERATURA

1. Lubliner J., Oliver J., Oller S., Oñate E.: A plastic-damage model for concrete. "International Journal of Solids and Structures" 1989, vol. 25, p. 299-329.
2. Lee J., Fenves G.L.: Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. "Journal of Eng. Mechanics" 1998, vol. 124, No.8, p. 892-900.
3. Fenves L., Lee J.: A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams. "Earthquake Eng. and Structural Dynamics" 1998, vol. 27, p. 937-956.
4. Cińcio A.: Dynamic resistance analysis of buildings subjected to the mining tremors with application of 3-D models. A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy (in Polish). Silesian Technical University of Silesia, Gliwice 2004.
5. Wawrzynek A., Cińcio A.: Plastic-damage macro-model for non-linear masonry structures subjected to cyclic or dynamic loads. Proc. of Conf. Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures, AMCM'2005. Gliwice, Poland 2005.

#### NUMERICAL ANALYSIS OF DEGRADATION IN CONCRETE WITH REGARD TO MACROSTRUCTURES

Summary. This work was intended as an attempt to assess the degradation of compressed concrete sample with regard to heterogeneity. The aim of this paper is to estimate of microdamages in heterogeneous materials as such as concrete.

3/34/2007

ISSN 1896-771X

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Wydział Mechaniczny Technologiczny



Modelowanie Inżynierskie

# Modelowanie Inżynierskie

Tom 3

Nr 34

Grudzień 2007

Gliwice

