

Badania eksperymentalne i analiza numeryczna niekonwencjonalnie zbrojonych elementów betonowych

Krzysztof Cichocki, Mariusz Ruchwa

Katedra Mechaniki Budowli, Politechnika Koszalińska

email: krzysztof.cichocki@tu.koszalin.pl, mariusz.ruchwa@kmb.tu.koszalin.pl

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych przeprowadzonych na elementach betonowych wykonanych z udziałem odpadowego kruszywa ceglanego oraz zbrojenia włóknami stalowymi. Badane elementy to płyty kołowe o średnicy 1 m, grubości 0,1 m i różniące się ilością zastosowanych włókien. Przetestowano płyty bez udziału włókien oraz trzy warianty zbrojenia o stopniach: 0,5, 1,0 i 1,5%. Płyty podparte zostały w trzech strefach, rozmieszczonych na obwodzie co 120° . Rozpatrzono obciążenie udarowe, zrealizowane poprzez upadek masy 40 kg z wysokości 1 m. Po każdym uderzeniu rejestrowano ugięcia płyty na dwóch prostopadłych do siebie kierunkach, konfigurację i rozmieszczenie rys oraz ich rozwarcie. Przy pomocy urządzenia ultradźwiękowego mierzono także intensywność zniszczeń wewnątrz materiału. Oprócz tego przeprowadzono klasyczne statyczne badania własności materiału, w celu określenia jego parametrów wytrzymałościowych, przydatnych przy realizacji symulacji numerycznych. W symulacji Metodą Elementów Skończonych (program ABAQUS) wykorzystano nieliniowy model materiałowy betonu, uwzględniający jego zniszczenie (skalaryny opis zniszczenia).

SŁOWA KLUCZOWE: badania eksperymentalne, fibrobeton, kruszywo odpadowe, obciążenia udarowe, metoda elementów skończonych

1. Wstęp

Rosnące zapotrzebowanie na elementy i konstrukcje wykonane z betonu napotyka na problemy związane z ograniczonymi naturalnymi zasobami kruszyw mineralnych w wielu regionach Polski. Z drugiej strony rośnie ilość różnego rodzaju materiałów odpadowych (gruzu) powstających na skutek prac wyburzeniowych, modernizacyjnych oraz jako odpady przy produkcji materiałów budowlanych (elementy betonowe oraz ceramika budowlana). W chwili obecnej materiały te znajdują ograniczone powtórne zastosowanie, głównie jako podbudowy, materiały zasypowe oraz wypełnienia.

Jednym z celów prowadzonych badań było sprawdzenie możliwości powtórznego zastosowania materiału odpadowego (sortowany gruz ceglany) jako kruszywa w produkcji elementów betonowych. Zastosowanie włókien stalowych (zbrojenie rozproszone) w istotny sposób poprawiło odporność elementów na działanie obciążeń o charakterze udarowym.

Przeprowadzone próby eksperymentalne były podstawą zbudowania dyskretnego modelu numerycznego Metody Elementów Skończonych w systemie obliczeniowym ABAQUS. Pozwoliło to na kalibrację parametrów zastosowanego modelu materiałowego, opisu działania obciążenia, zastosowanych algorytmów modelowania kontaktu pomiędzy uderzającym obiektem a badanym elementem betonowym, jak też ustalenie innych parametrów sterujących analizą numeryczną.

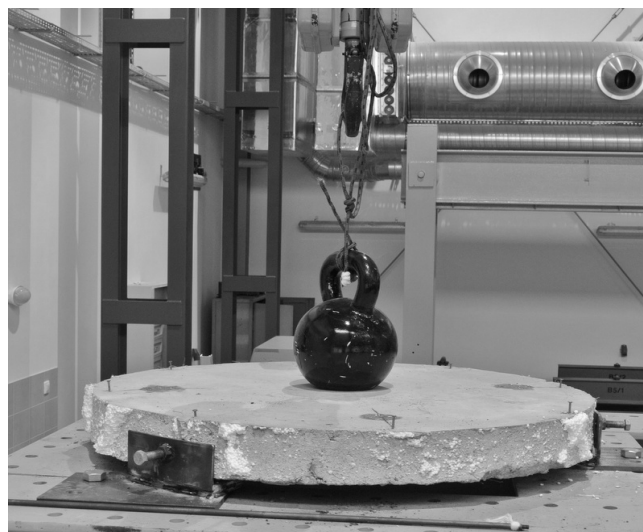
Tak zweryfikowany model numeryczny może znaleźć zastosowanie przy analizach złożonych konstrukcji wykonanych z badanego materiału, bez konieczności wykonywania serii kosztowych i pracochłonnych prób eksperymentalnych. Pozwoli także na określenie korelacji pomiędzy wynikami statycznych badań nad wytrzymałością próbek materiału, a jego odpornością na obciążenia o charakterze udarowym.

2. Badania eksperymentalne

Testy eksperymentalne zostały przeprowadzone na serii płyt kołowych o średnicy 1 m i grubości 0,1 m, podpartych

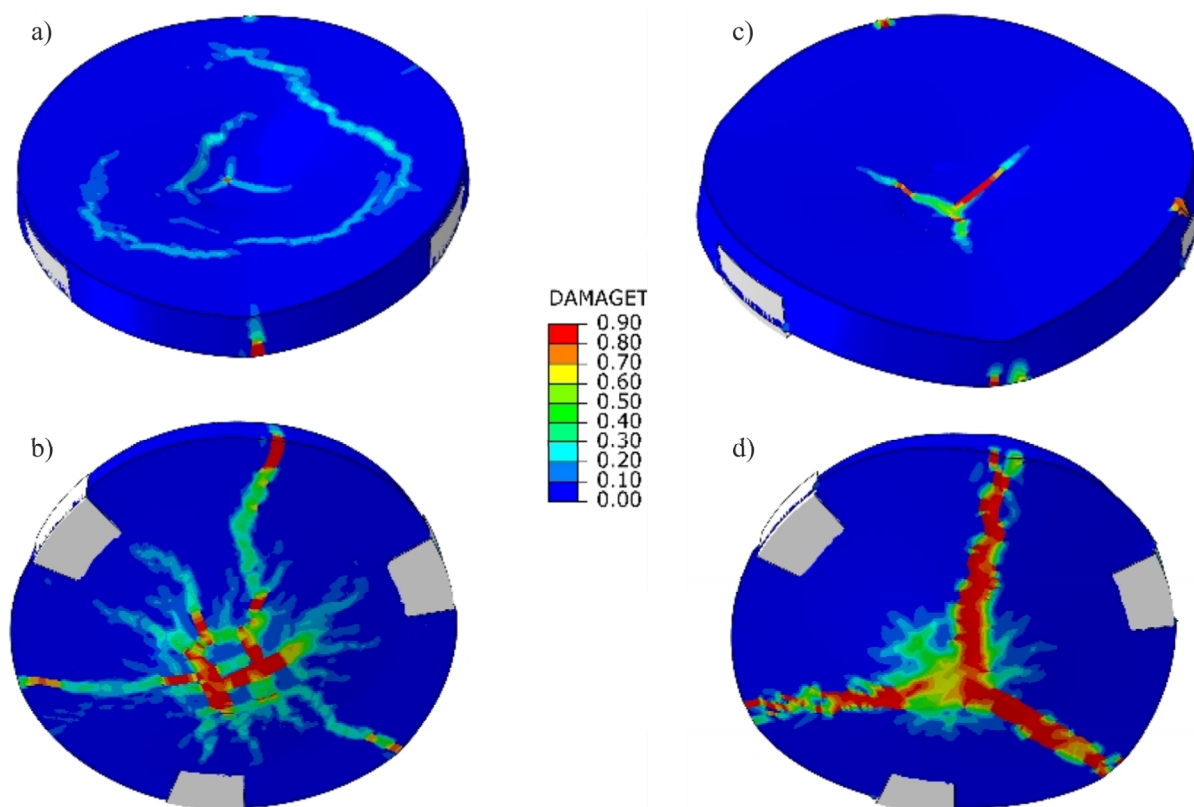
miejscowo na obwodzie. Podpory zostały wykonane w postaci trzech odcinków o długości 15 cm, rozmieszczonych równomiernie na obwodzie płyty.

Obciążenia udarowe zrealizowano poprzez swobodny upadek masy 40 i 200 kg z różnych wysokości (od 0,2 do 1 m). Spadające obiekty miały kulisty kształt. Ciężar oraz wysokości swobodnego spadku dobrano na podstawie wstępnych symulacji numerycznych tak, aby móc zaobserwować cały proces powstawania i propagacji zniszczeń, aż do całkowitego zniszczenia badanego elementu. W rozpatrywanych wariantach materiałowych (procentowy udział włókien 0,0/0,5/1,0/1,5%) miarodajny okazał się spadek masy 40 kg z wysokości 1 m (rys. 1).



Rys. 1. Stanowisko badawcze; masa 40 kg, swobodny spadek z wysokości 1 m

Dodatkowo wykonano szereg badań statycznych na próbkach materiału, w celu wyznaczenia podstawowych włas-



Rys. 2. Płyta bez udziału włókien, upadek masy 40 kg z wysokości 0,2 m – widok z góry (a), widok z dołu (b).
Płyta z udziałem włókien, upadek masy 200 kg z wysokości 0,25 m – widok z góry, (c) widok z dołu (d)

ności materiałowych, [1, 2]. Posłużyły one do wstępnej kalibracji zastosowanych w symulacjach numerycznych nieliniowych modeli materiałowych betonu o różnych stopniach zbrojenia [3, 4].

3. Obliczenia numeryczne

W omawianych badaniach analiza numeryczna ma fundamentalne znaczenie, ponieważ badania eksperymentalne pozwalają jedynie na wykonanie ograniczonej liczby testów, ze względu na dużą liczbę możliwych kombinacji parametrów opisujących zastosowany materiał: procentowy udział włókien, zastosowane frakcje kruszywa odpadowego, itp.

W symulacjach numerycznych wykonanych w środowisku systemu obliczeniowego ABAQUS zastosowano model materiałowy Concrete Damage Plasticity (CDP), którego podstawowe założenia oraz implementację do systemu obliczeniowego przedstawiono w pracach [3, 4]. Przykładowe wyniki symulacji numerycznych pokazano na rys. 2.

4. Podsumowanie

Porównanie wyników uzyskanych na drodze eksperymentalnej z rezultatami analiz numerycznych wykazało ich zadowalającą zgodność w zakresie ugięć, przebiegu głównych rys, a zwłaszcza wartości energii koniecznej do zniszczenia płyty. Pozwala to na zastosowanie omawianego w pracy modelu numerycznego do analizy złożonych ustrojów wykonanych z badanego materiału.

Głównym celem badań było określenie odpowiedzi dynamicznej elementów wykonanych z fibrobetonu wykonanego z udziałem kruszywa odpadowego. Możliwości powtórnego wykorzystania odpadów w przemyśle materiałów budowlanych jest zagadnieniem ważnym ze względów ekonomicznych i społecznych.

Zdaniem autorów niniejszej pracy, oprócz eksperymentalnych badań nad podstawowymi własnościami tego rodzaju materiałów, konieczne jest określenie możliwości numerycznego modelowania konstrukcji wykonanych z tego rodzaju materiałów. Coraz szersze wykorzystanie nieliniowych systemów obliczeniowych Metody Elementów Skończonych umożliwia określenie pełnego spektrum odpowiedzi konstrukcji na działające na nią obciążenia: od jej początkowej odpowiedzi liniowo-sprężystej, aż do całkowitego zniszczenia.

Autorzy określili parametry zastosowanego modelu materiałowego (CDP) oraz zweryfikowali inne składowe modelu obliczeniowego mające istotne znaczenie przy numerycznym modelowaniu badanego zagadnienia, m.in.: opis kontaktu pomiędzy uderzającym obiektem i konstrukcją oraz między konstrukcją i elementami podporowymi itp.

Praca została wykonana w ramach projektu 2011/01/B/ST8/06579, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Literatura

- [1] Katzer J., Domski J., *Quality and Mechanical Properties of Engineered Steel Fibres Used as Reinforcement for Concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 34, pp. 243–248, 2012.
- [2] Katzer J., Domski J., *Optimization of fibre Reinforcement for Waste Aggregate Cement Composite*, Construction and Building Materials, Vol. 38, pp. 790–795, 2013.
- [3] Cichocki K., Ruchwa M., *Propagacja zniszczenia w konstrukcji obciążonej wybuchem*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Z. 58, nr 3/III (276), pp. 17–24, 2011.
- [4] Cichocki K., Ruchwa M., *Przestrzenne konstrukcje żelbetowe obciążone wybuchem*, Polioptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, tom X, s. 7–19, 2012.