

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Modelowanie materiałów kruchych w warunkach obciążeń dynamicznych

Paweł Baranowski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Wydział Inżynierii Mechanicznej, Instytut Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna  
email: pawel.baranowski@wat.edu.pl

**STRESZCZENIE:** W pracy przedstawiono metodę modelowania materiałów kruchych na przykładzie betonu w aspekcie realizacji poprawnego i wiarygodnego opisu zachowania się tego materiału w warunkach symulacji dynamicznych i silnie nieliniowych problemów. Do tego celu opracowano oryginalne modele mezoskopowe stosując quasi-automatyczne skrypty do generowania stochastycznie rozmieszczonych frakcji kruszywa. W pierwszym etapie badań oszacowano wpływ promieniowych efektów bezwładnościowych oraz tarciovych na granicy próbki i prętów w testach na stanowisku dzielonego pręta Hopkinsona na proces wyznaczania dynamicznych parametrów materiałowych. W tym celu wytypowano model Johnson-Holmquist-Concrete (JHC). Wypracowana metodologia została następnie zaadaptowana do symulacji procesu perforacji próbki betonu pociskiem z miękkim rdzeniem. Zastosowano podejście hybrydowe, tzn. opis dyskretny (siatkowy) w pierwszej fazie z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES), a w kolejnej opis bazujący na metodzie bezsiatkowej Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). W tym wypadku zaimplementowano model konstytutywny Karagozian-Case Concrete (KCC). Na podstawie przeprowadzonych rozważań potwierdzono wiarygodność i skuteczność zaproponowanego podejścia mezoskopowego z poprawnie oszacowanymi parametrami dla dedykowanych modeli konstytutywnych dla betonu (JHC i KCC).

**SŁOWA KLUCZOWE:** beton, zniszczenie, symulacje numeryczne, SPH

#### 1. Wstęp

Mechanizmy pękania mają zupełnie odmienny charakter w przypadku złożonych stanów obciążenia. Niezmiernie ciekawymi, a zaraz wyzywającymi zagadnieniami szeroko analizowanymi w literaturze, są badania dotyczące zachowania się materiałów kruchych podczas obciążeń dynamicznych wynikających z interakcji z falą uderzeniową wybuchu oraz oddziaływań o charakterze punktowym, tj. penetracje i perforacje pociskiem. Duża część badań nad materiałami kruchymi prowadzona jest zazwyczaj z wykorzystaniem testów eksperymentalnych [1–4]. Jednak ze względu na kosztowność i czasochłonność rzeczywistych prób i testów, uzasadnionym wydaje się zastosowanie metod numerycznych i zaawansowanych kodów obliczeniowych do symulacji i predykcji zachowania się materiałów kruchych w warunkach dynamicznych oddziaływań.

Pomimo różnego rodzaju analizowanego problemu czy przyjętej metody modelowej we wszystkich badaniach numerycznych podstawowym zagadnieniem jest opracowanie odpowiedniego i efektywnego modelu konstytutywnego odwzorowującego jak najwięcej właściwości fizycznych i mechanicznych badanego materiału. Wytypowany model konstytutywny z poprawnie wypracowanymi parametrami materiałowymi jest jednym z kluczowych elementów gwarantujących uzyskanie wiarygodnych wyników zaawansowanych analiz numerycznych.

W związku z powyższym w niniejszej pracy zaprezentowano metodologię prowadzenia prac badawczych ukierunkowanych na opracowanie rzetelnych i wiarygodnych modeli numerycznych betonu wraz

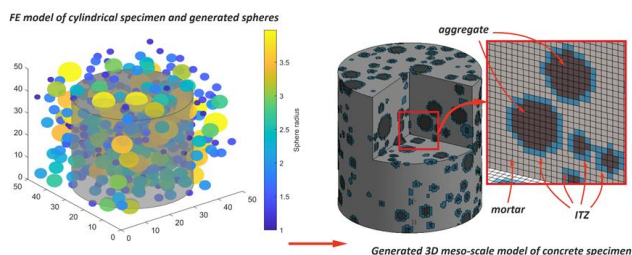
z opisem konstytutywnym bazując na poprawnie wypracowanych parametrach uwzględniających m.in. wpływ efektów promieniowych w badaniach na stanowisku SHPB. Zastosowano podejście mezoskopowe ze stochastycznie rozmieszczonym kruszywem w objętości próbek betonu również z uwzględnieniem warstwy przejściowej ITZ (ang. interface transition zone).

#### 2. Analiza wpływu warunków testu na stanowisku dzielonego pręta Hopkinsona

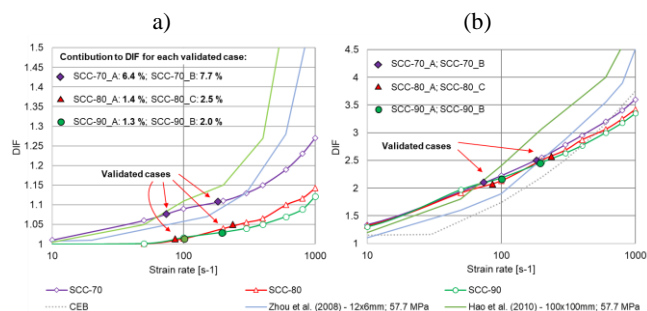
W pierwszym etapie badań zademonstrowano potrzebę uwzględnienia promieniowych efektów bezwładnościowych oraz tarciovych na granicy próbki i prętów stanowiska SHPB (ang. lateral confinement) na szacowany współczynnik dynamicznego wzmocnienia (ang. dynamic increase factor (DIF)) podczas szacowania parametrów dla dedykowanych modeli materiałowych dla materiałów kruchych. Opracowano dokładne modele numeryczne próbek uwzględniając zaprawę, kruszywo oraz strefę przejściową ITZ (rys. 1). Dla każdej z frakcji wyznaczono osobne parametry modelu JHC bazując na danych eksperymentalnych i zaleceniach literaturowych odnośnie stosunków wytrzymałości każdej z nich.

Po walidacji modeli numerycznych przeprowadzono szerokie studium symulacji numerycznych w celu dokładnego oszacowania radialnych sił bezwładnościowych oraz tarciovych na granicy próbki i prętów oraz ich wpływu na DIF. Potwierdzono i wykazano, że należy uwzględniać ww. efekty podczas szacowania parametrów odpowiedzialnych za wzmocnienie materiału, gdyż w przeciwnym wypadku otrzymany wybrany model

konstrytywny może zawiązać wytrzymałość materiału (rys. 2).



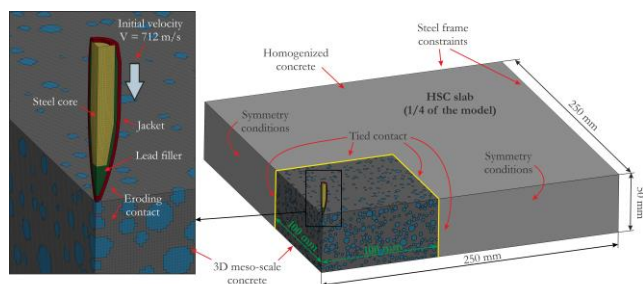
Rys. 1. Procedura generowania trójwymiarowego mezoskopowego modelu próbki betonowej [5]



Rys. 2. DIF uzyskany dla modelu 3D z modelem JHC: (a) bez parametru odpowiedzialnego za umocnienie materiału; (b) z parametrem C [5]

### 3. Symulacje uderzenia pocisku w blok betonowy

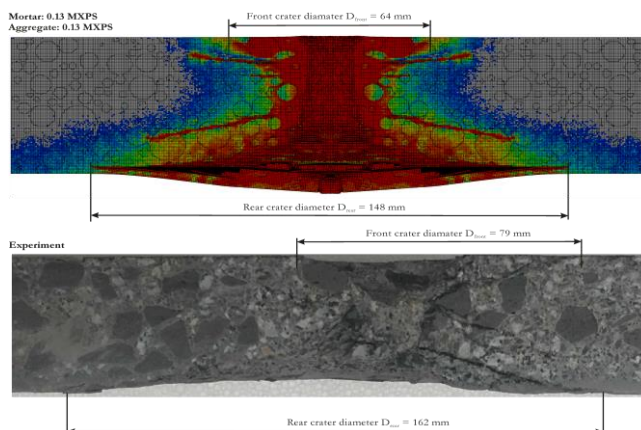
Wypracowana metodologia została następnie zaadaptowana do symulacji procesu perforacji i penetracji próbki betonu pociskiem z miękkim rdzeniem. Do tego celu wykorzystano metodę opisu mezoskopowego struktury betonu przy użyciu opracowanych skryptów zaimplementowanych w poprzednim etapie (rys. 3).



Rys. 3. Model mezeoskopowy zastosowany do symulacji uderzenia pociskiem w próbkę betonu [6]

Beton oraz kruszywo odwzorowano stosując model KCC. Zastosowano podejście hybrydowe, tzn. opis dyskretny (siatkowy) w pierwszej fazie z wykorzystaniem MES, a w kolejnej opis bazujący na metodzie bezsiatkowej SPH ze względu na silną lokalną fragmentację struktury betonu powodującą zmienne warunki połączenia materiałów i powstawaniem wolnych przestrzeni na skutek spękań. Podczas badań symulacyjnych wykazano wpływ rozmieszczenia oraz wielkości kruszywa na zachowanie się pocisku uderzającego w próbkę betonu. Wykazano również, że wzory analityczne nie są w stanie prawidłowo wyliczyć prawidłowej wartości prędkości w przypadku uderzenia odkształcalnego pocisku z miękkim

i plastycznym rdzeniem w cel wykonany z betonu gruboziarnistego. Ostatecznie, uzyskano bardzo dobrą zgodność dla uzyskanej prędkości rezydualnej pocisku (prędkość pocisku po procesie perforacji próbki) oraz charakteru zniszczenia modelowanej próbki betonu



Rys. 4. Procedura generowania trójwymiarowego mezoskopowego modelu próbki betonowej [6]

### 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych rozważań potwierdzono wiarygodność i skuteczność zaproponowanego podejścia mezoskopowego z poprawnie oszacowanymi parametrami dla dedykowanych modeli konstytutywnych dla betonu (JHC i KCC). Wykazano, że należy uwzględniać wpływ zjawisk związanych z efektami inercyjnymi oraz tarcieniem na powierzchniach styku próbki i prętów na stanowisku SHPB, gdyż wpływa to na współczynnik wzrostu wytrzymałości DIF uwzględniany w większości dedykowanych modeli dla materiałów kruchych.

### Podziękowania

Podziękowania dla prof. dr. hab. inż. Jerzego Malachowskiego, dr. hab. inż. Jacka Janiszewskiego, dr. hab. inż. Piotra Sielickiego, dr. inż. Małgorzaty Pająk, dr. inż. Łukasza Mazurkiewicza oraz mgr. inż. Michała Kucwicza za wsparcie przy realizacji badań.

### Literatura

- [1] Máca P., R. Sovják R., Konvalinka P., *Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact*, International Journal of Impact Engineering, Vol. 63, pp. 158-163, 2014.
- [2] Sovják R., Vavřínek T., Zatloukal J., Máca P., Mičunek T., Frydrýn M., *Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets*, International Journal of Impact Engineering, Vol. 76, pp. 166-177, 2015.
- [3] Sielicki P.W., Łodygowski T., *Masonry wall behaviour under explosive loading*, Engineering Failure Analysis, Vo. 104, pp. 274-291, 2019.
- [4] Wu H., Fang Q., Chen X.W., Gong Z., Liu J.Z., *Projectile penetration of ultra-high performance cement based composites at 510-1320 m/s*, Construction and Building Materials, Vol. 74, pp. 188-200, 2015.
- [5] Pająk M., Baranowski P., Janiszewski J., Kucwicz M., Mazurkiewicz Ł., Łażniewska-Piekarczyk, B., *Experimental testing and 3D meso-scale numerical simulations of SCC subjected to high compression strain rates*, Construction and Building Materials, Vol. 302, 124379, 2021.
- [6] Baranowski P., Kucwicz M., Małachowski J., Sielicki P.W., *Failure behavior of a concrete slab perforated by a deformable bullet*, Engineering Structures, Vol. 245, 112832, 2021.