

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15-18 października 2024

Modelowanie numeryczne procesu urabiania skały w warunkach podziemnych na przykładzie dolomitu

Michał Kucewicz¹, Paweł Baranowski¹, Łukasz Mazurkiewicz¹, Krzysztof Damaziak¹

¹Zakład Inżynierii Obliczeniowej i Biomedycznej, Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Wojskowa Akademia Techniczna
email: michal.kucewicz@wat.edu.pl, pawel.baranowski@wat.edu.pl, Lukasz.mazurkiewicz@wat.edu.pl, Krzysztof.damaziak@wat.edu.pl

STRESZCZENIE: Niniejsza praca przedstawia kompleksową metodologię odwzorowania numerycznego procesu strzelań podziemnych w wyrobiskach górniczych kopalni. Metodologia obejmuje całość procesu modelowania: od pozyskania danych geometrycznych przodków skalnych, poprzez korelację modelu konstytutywnego oraz opracowanie modeli szczegółowych numerycznych 3D i uproszczenie ich do efektywnych modeli 2D aż po opracowanie sposobu odwzorowania numerycznego procesu spękań. Szczególną uwagę przyłożono do wiernego odwzorowania procesu fragmentacji skały, a także wynikającemu z niej rozkładowi wielkości odłamków skalnych. Badaniom poddano także wpływ zastosowanych uproszczeń modelowania na uzyskiwany charakter, ilość i zasięg spękań w górotworze.

SŁOWA KLUCZOWE: JH-2, model konstytutywny, włom, roboty strzałowe, pojedynczy otwór, wybuch

1. Wstęp

Przemysł wydobywczy, szczególnie ten związany z materiałami o wysokiej wartości technologicznej, cały czas się powiększa, pomimo ciągłego pogarszania się jakości pozostałych pod ziemią złóż pierwiastków. Wiąże się to ze zmniejszaniem rentowności wydobycia. Aby zapobiec temu zjawisku niezbędne jest minimalizowanie kosztów prac podziemnych, na które składają się m. in. Koszty wiercenia, ładunków, zapalników, pracowników i dodatkowego kruszenia (Doneva et al., 2015). Z pomocą przychodzi metoda modelowania numerycznego, które pozwalają na optymalizację parametrów procesu strzelań podziemnych poprzez odpowiedni dobór geometrii i rozmieszczenia otworów strzałowych w celu minimalizacji wspomnianych kosztów. Samo modelowanie wymaga jednak szeregu prac przygotowawczych obejmujących dokładne zbadanie parametrów skały czy materiału wybuchowego (Kucewicz et al., 2023). Następnie, konieczne jest opracowanie wyników tak, aby możliwe było opracowanie parametrów konstytutywnych dla wybranego modelu materiału, np. JH-2 (Baranowski et al., 2020). Następnie, konieczne jest opracowanie metodologii modelowania wybuchu oraz warunków brzegowych w warunkach „in-situ” przy zachowaniu rozsądnego czasu obliczeniowego. W niniejszej pracy w sposób przekrojowy przedstawiono wspomnianą metodologię z aplikacją do odwzorowania pojedynczych otworów strzałowych oraz całych włomów (Huang et al., 2019).

2. Model konstytutywny i model numeryczny

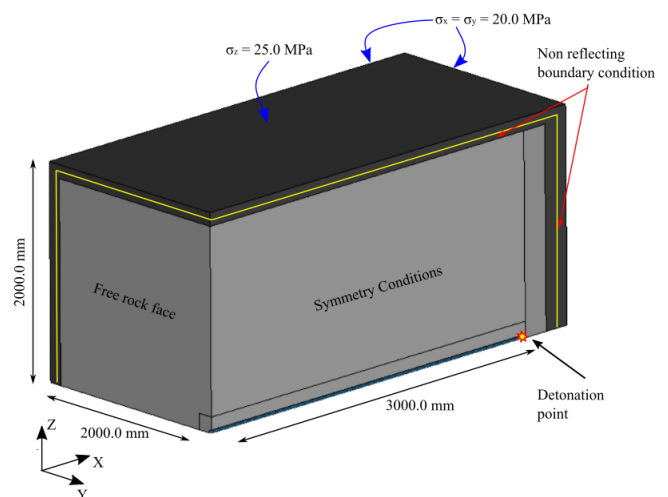
Do modelowania wykorzystano model materiałowy Johnson Holmquist Ceramics (JH-2), który rozróżnia stany, w jakich może znaleźć się materiał: nienaruszony, w pełni zniszczony i pośrednie. Pozwala on na odseparowanie

odpowiedzi hydrostatycznej i dewiatorowej materiału odpowiednio za pomocą powierzchni zniszczenia oraz równania stanu EoS.

3. Analizowana geometria i model numeryczny

Badania prowadzone były w kopalni w ścianie zbudowanej ze skały dolomitowej. Nawiercono w niej pojedyncze otwory, które zostały zdetonowane, a uzyskane kraterki i ich wymiary charakterystyczne pomierzono za pomocą skanowania laserowego.

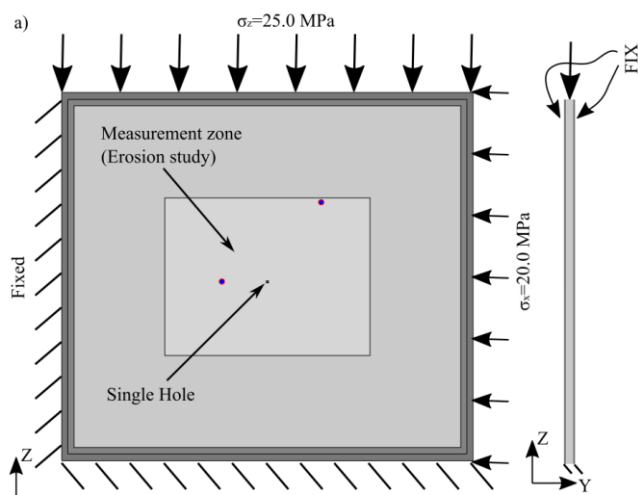
Do modelowania przyjęto wyidealizowaną ścianę skalną z warunkami brzegowymi odpowiadającymi, pod kątem ciśnień i warunków ciągłości górotworu tym, które zaobserwować można pod ziemią. Widok modelu pojedynczego otworu w 2D przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Widok modelu 3D pojedynczego otworu

Ładunek odwzorowano za pomocą elementów SPH o sformułowaniu „płynu”, kontaktujących się ze skałą.

Drugi model powstał w wyniku uproszczenia podejścia 3D do modelu 2D, charakteryzującego się dużo mniejszą czasochłonnością obliczeniową. Stanowi on wycinek modelu 3D, w którym zakładamy stabilny rozwój spękań bez wpływu powierzchni swobodnej oraz miejsca inicjacji detonacji. Taki wybór zapewnia czystą odpowiedź tego, jak dana metodologia jest w stanie odwzorować spękania. Przejście to wymagało dostosowania parametrów równania JWL (zmniejszenia energii wybuchu), w skutek ograniczenia deformacji elementów w kierunku normalnym do wycinka. Przetestowano 60, 70 oraz 80% wartości początkowej energii.



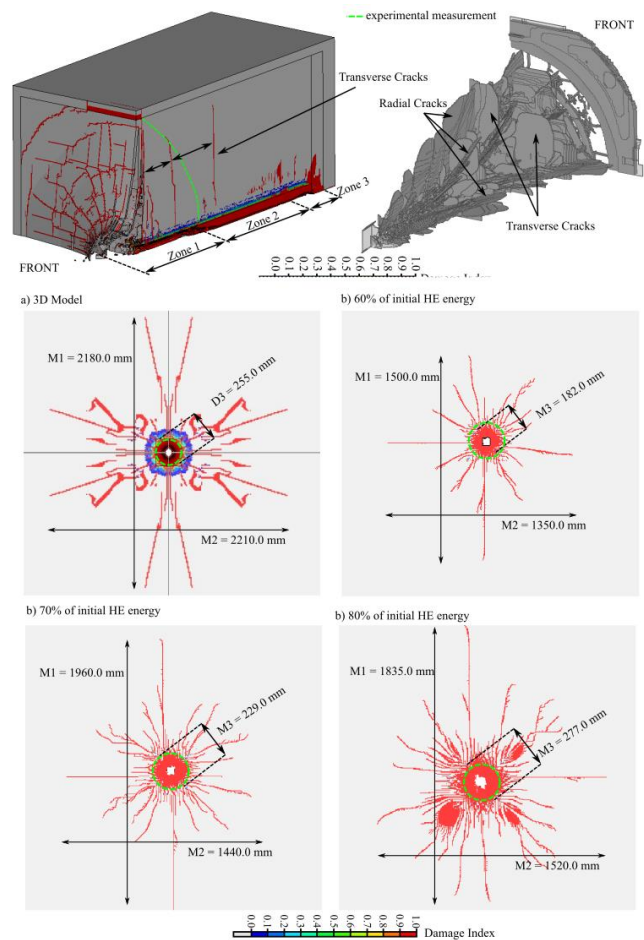
Rys. 2. Widok modelu 2D jako uproszczenie modelu 3D

4. Opracowanie wyników

Na podstawie symulacji wybuchu pojedynczych otworów uzyskano charakterystyki spękań w modelu 2D oraz 3D. Przedstawiono je na Rys. 3 jako materiał w pełni zniszczony (indeks zniszczenia modelu JH-2, $D = 1.0$). Można zaobserwować, że zasięg zniszczenia w modelu 2D wynikającego ze skruszenia skały na skutek jej ściśnięcia w bezpośrednim sąsiedztwie ładunku, dla osłabionego o 70% ładunku była w najlepszej zgodności z badaniami w modelu 3D. Dodatkowo, zaobserwowano, w modelu 2D oraz 3D bardzo dużą zgodność z wynikami eksperymentalnymi, zarówno w zasięgu spękań radialnych (około 2000 mm) jak i strefy przejściowej kruszenia wynikającego ze ściskania i rozciągania, a także bardzo intensywnego ścinania. Widok porównawczy zaprezentowano na Rys. 3.

5. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych rozważań eksperymentalno – numerycznych możemy stwierdzić, że przy zastosowaniu odpowiednich warunków brzegowych możliwe jest uproszczenie modelu górotworu, przyspieszenie obliczeń stukrotnie przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wiarygodności wyników. Ważne jest jednak, że mowa o obszarze w którym obserwowana jest strefa stabilnej propagacji spękań radialnych.



Rys. 3. Widok zniszczenia dookoła pojedynczego otworu w 3D (a), oraz dla energii HE odpowiednio 60% (b), 70% (c) oraz 80% (d) energii nieosłabionego HE.

Praca wykonana w ramach projektów UGB/22-717/2024 oraz UGB/876/WLO/2021 oraz CuBR/III/6/NCBR/2017, KGHM-BZ-U0150-2017

Literatura

- Baranowski, P., Mazurkiewicz, L., Małachowski, J., & Pytlak, M. (2020). Experimental testing and numerical simulations of blast-induced fracture of dolomite rock. *Meccanica*, 55(12), 2337–2352. <https://doi.org/10.1007/s11012-020-01223-0>
- Doneva, N., Despodov, Z., Mirakovski, D., Hadzi-Nikolova, M., & Mijalkovski, S. (2015). Cost analysis in the construction of underground mining structures and opportunities for their reduction. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 30(2), 1–12. <https://doi.org/10.17794/rgn.2015.2.1>
- Huang, D., Qiu, X., Shi, X., Gou, Y., & Zhou, J. (2019). Experimental and Numerical Investigation of Blast-Induced Vibration for Short-Delay Cut Blasting in Underground Mining. *Shock and Vibration*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5843516>
- Kuciewicz, M., Baranowski, P., Mazurkiewicz, L., & Małachowski, J. (2023). Comparison of selected blasting constitutive models for reproducing the dynamic fragmentation of rock. *International Journal of Impact Engineering*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104484>