

*Jacek Jakubowski**, *Krzysztof Reiman**

NUMERYCZNA SYMULACJA WYBURZENIA KOMINA MUROWEGO**

1. Wstęp

Podczas projektowania robót strzałowych inżynierowie opierają się głównie na swoim doświadczeniu i intuicji. Przeprowadzenie na etapie projektowania numerycznej symulacji wyburzenia, czyli jego przybliżonej, wirtualnej próby, może być przydatne w procesie projektowania robót strzałowych.

Wykorzystanie inżynierskich systemów analizy numerycznej do symulacji przebiegu wyburzenia budowli jest jak do tej pory bardzo rzadkie i ograniczone do zastosowań o charakterze raczej badawczym niż praktycznym. Problemem jest czasochłonność budowy realistycznych modeli i olbrzymie koszty obliczeń numerycznych.

Analiza numeryczna wyburzenia wymaga dynamicznej symulacji ruchu obiektu i jego elementów, modelowania zniszczenia, dopuszczenia możliwości podziału modelowanego obiektu na części podczas symulacji.

Popularne narzędzia obliczeń inżynierskich, oparte na metodzie elementów skończonych, są ze swej natury narzędziami analizy ośrodka ciągłego, ale w swoich obecnie najbardziej zaawansowanych implementacjach umożliwiają dynamiczne modelowanie ośrodków dyskretnych. Można jednak przypuszczać, że w zastosowaniu do symulacji wyburzenia obiektów murowych lepsze będą narzędzia wykorzystujące metody naturalnie modelujące ośrodek nieciągły i jego ruch, takie jak np. metoda elementów odrębnych [1, 3, 4], dlatego autorzy podjęli próbę przeprowadzenia symulacji wyburzenia obiektów budowlanych z zastosowaniem systemu 3DEC, stosowanego do modelowania górotworu nieciągłego w wielu wiodących ośrodkach mechaniki skał na świecie.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Przygotowano w ramach badań 11.11.100.197

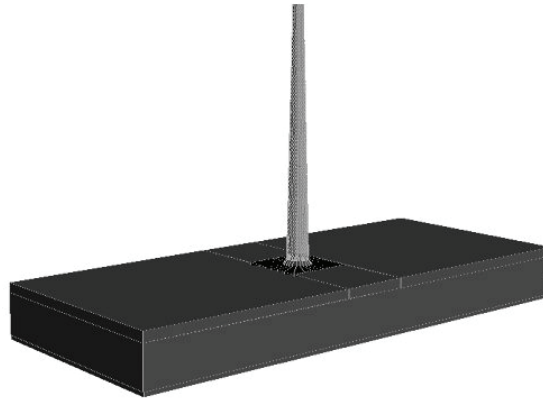
2. Metoda Elementów Odrębnych i system 3DEC

Metoda Elementów Odrębnych (DEM — *Distinct Element Method*) [1] jest znana i stosowana na świecie przede wszystkim jako metoda analizy geomechanicznej. Była pierwszą metodą, która opisywała masyw skalny jako zbiór sztywnych lub odkształcalnych bloków oddziałujących na siebie poprzez odkształcalne powierzchnie kontaktu. Algorytmy obliczeniowe DEM są oparte na jawnym w czasie schemacie całkowania dynamicznych równań ruchu. W równaniach równowagi uwzględniane są związki opisujące oddziaływania pomiędzy blokami w funkcji ich wzajemnego położenia. Do analizy odkształceń wewnątrz bloków wykorzystywana jest metoda różnic skończonych. Metoda elementów odrębnych jest zatem metodą pseudostatycznej i dynamicznej analizy odkształceń i naprężeń, ale wydaje się również stworzona do dynamicznej analizy dyskretnych układów mechanicznych, takich jak obiekty z cegły, bloków betonowych czy skalnych. DEM może być stosowana zarówno do modelowania układów płaskich, jak i trójwymiarowych. Najbardziej zaawansowaną implementacją tej metody jest system 3DEC firmy Itasca.

3. Budowa modelu obliczeniowego

Geometrię modelu numerycznego wzorowano na kominie koksowni Makoszowy w Zabrze o wysokości 67,6 m [8], wykonanym z cegły klinkierowej i szamotowej na zaprawie cementowej. Model zbudowano przy pomocy preprocesora systemu 3DEC, obsługiwanego interakcyjnie w środowisku graficznym oraz przy pomocy programów wspomagających w języku komend Fish [1]. Model numeryczny obejmował komin, fundament, na którym spoczywała konstrukcja, i obszar gruntu wokół niego (rys. 1). Na płaszczyznach brzegowych tego obszaru przyłożono w odpowiednich kierunkach zerowe wartości prędkości. Zadano globalne przyspieszenie grawitacyjne. Model składał się z bloków odkształcalnych posiadających cechy ośrodka liniowo-sprężystego. Na kontaktach pomiędzy blokami zadano zdolność do normalnych i stycznych sprężystych odkształceń i do plastycznego poślizgu oraz ograniczono wytrzymałość na rozciąganie. Dane materiałowe charakteryzujące elementy modelu obliczeniowego (tab. 1) przyjęto za Schlegelem i Rautenstrauchem [9, 11, 12], oraz normami [9, 10]. Cały model składa się z 2516 bloków, co w wyniku dyskretyzacji bloków siatką różnic skończonych daje 73 464 stopni swobody. Pominięto wewnętrzny płaszcz z cegły szamotowej oraz opory powietrza.

Zbudowano dwa warianty modelu komina murowego dla stopy oporowej o współczynniku bezpieczeństwa $k = 3$ i $k = 5$, obliczonej wg standardowej metodologii projektowania włomów. Zasięg strefy włomu oraz powierzchnię stopy oporowej w obu wariantach ilustruje rysunek 2. Efekt „skrawania” włomu przez działanie MW został uzyskany przez podzielenie włomu na obszary, które w odstępach co 25 ms są kolejno usuwane w trakcie realizacji detonacji (rys. 3, 5 i 7). W stopie oporowej rozłożono sieć punktów monitorowania wartości naprężeń.

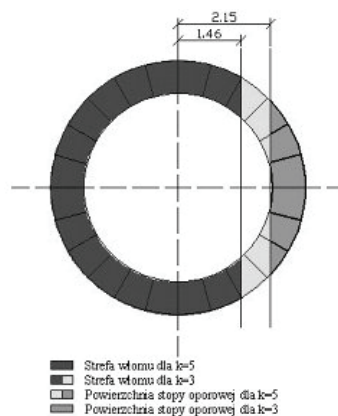


Rys. 1. Model kominy z fundamentem i obszarem gruntu

TABELA 1

Własności odkształceniowe i wytrzymałościowe elementów modelu

	ρ [kg/m ³]	K [MPa]	G [MPa]	Kn [MN/m ³]	Ks [MN/m ³]	Φ/ψ [°]	c [MPa]	T [MPa]
Cegła	1800	1188	400	–	–	–	–	–
Fundament	2700	16 700	1 5200	–	–	–	–	–
Grunt	1890	53,3	32	–	–	–	–	–
Nieciągłości (zaprawa)	–	–	–	764 300	246 700	30/0	0,65	0,52



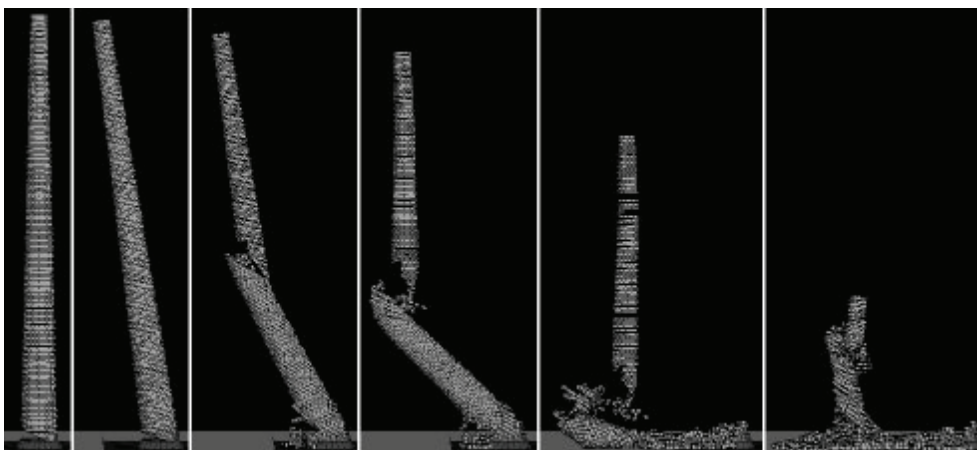
Rys. 2. Schemat włomu dla $k = 3$ i $k = 5$



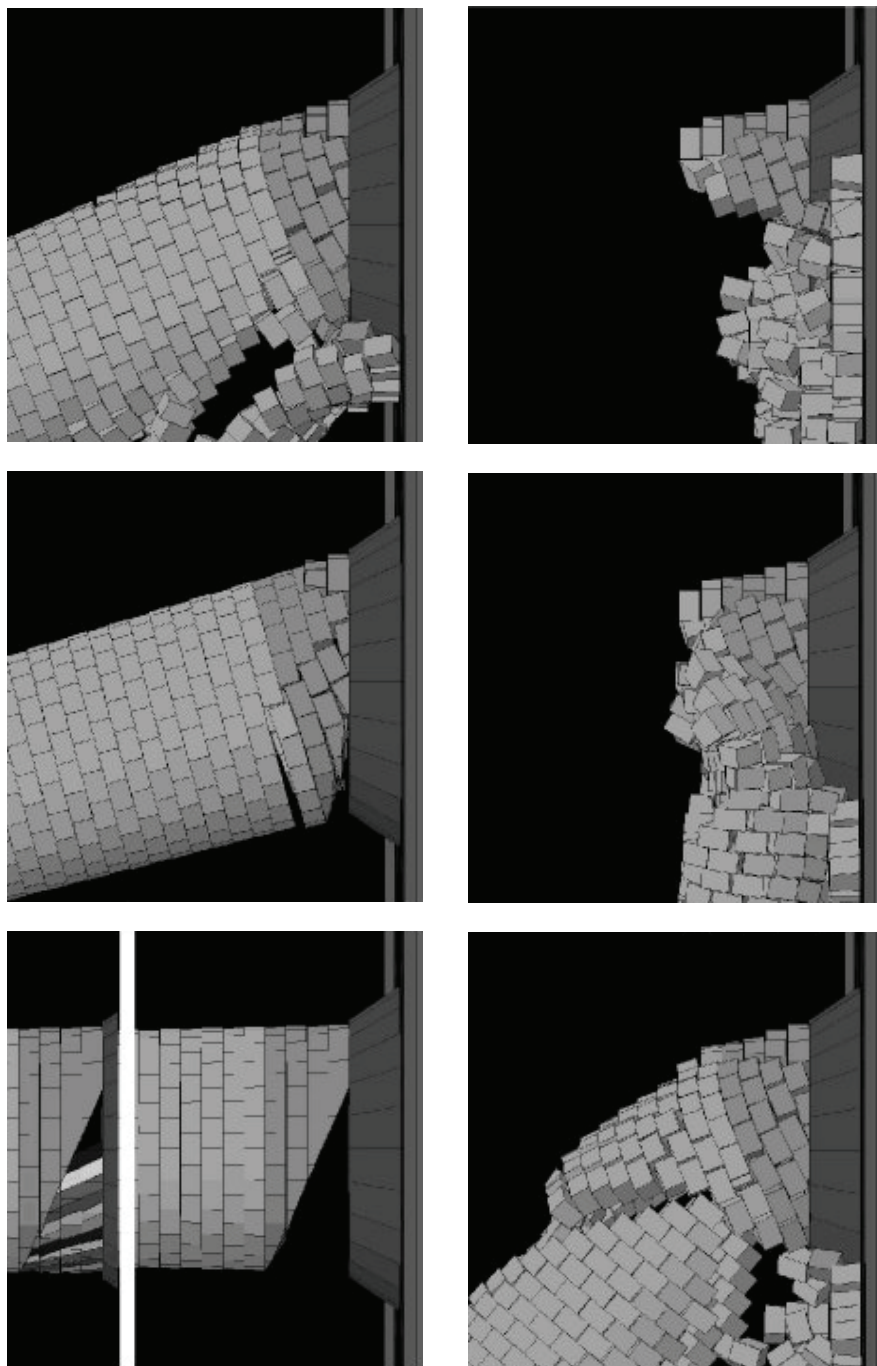
Rys. 3. Strefa włomu (po lewej) i stopa oporowa komina

4. Eksperyment numeryczny

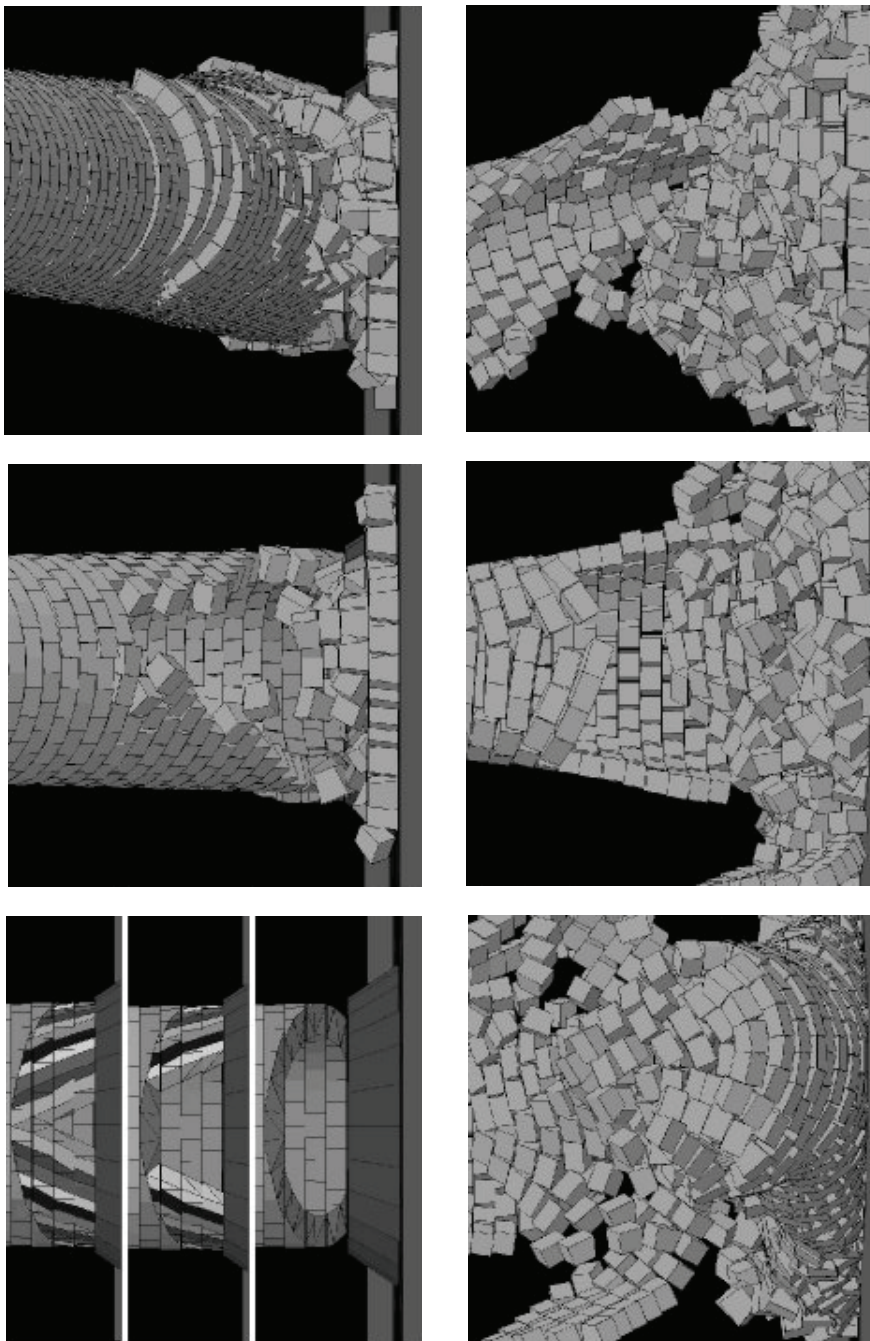
Na rysunkach 4, 5 i 6 pokazano kolejne fazy symulacji wyburzenia komina. Usunięcie włomu wywołuje pochylenie całego komina, następnie jego przełamanie poniżej połowy wysokości, upadek i rozpad. Przebieg obalania komina murowego odwzorowany w wyniku obliczeń numerycznych jest zgodny z obserwacjami praktycznymi.



Rys. 4. Kolejne fazy obalenia komina. Widok z boku



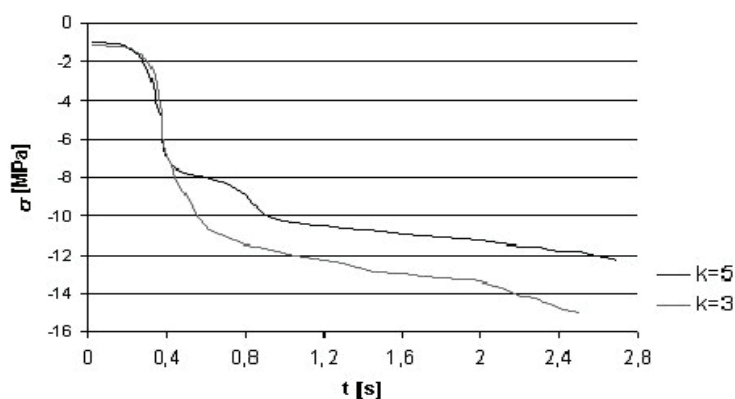
Rys. 5. Kolejne fazy wyburzenia komina. Widok z boku, zbliżenie



Rys. 6. Kolejne fazy wyburzenia komina. Widok z kierunku włomu, zbliżenie

Szczegółowa analiza wyników liczbowych pokazuje, że wartości naprężeń głównych w bloku położonym na brzegu stopy oporowej, tuż przy wyznaczonej osi obrotu komina (rys. 3, blok nr 3), są kilkanaście razy większe od naprężeń w sąsiednich blokach. Koncentracja naprężeń w tym krytycznym bloku powoduje jego zniszczenie, przeniesienie obciążenia na następne bloki i propagację strefy zgniotu w stopie.

Na rysunku 7 pokazano uśrednione wartości najmniejszego naprężenia głównego otrzymane w węzłach siatki różnic skończonych w bloku krytycznym dla $k = 3$ oraz $k = 5$. W przypadku $k = 3$ naprężenie 12 MPa jest osiągane już po około 1 sekundzie, natomiast dla $k = 5$ ta sama wartość naprężenia ściskającego jest osiągana dopiero po 2,5 sekundy. Prędkość przyrastania naprężenia, czyli kąt nachylenia wykresu jest wyraźnie ostrzejszy dla $k = 3$ niż dla $k = 5$. Wykres przebiegu najmniejszego naprężenia głównego w czasie dla wariantów $k = 3$ i $k = 5$ wskazuje, że zniszczenie bloku krytycznego i tym samym rozpoczęcie zgniatania stopy następuje znacznie szybciej dla $k = 3$ niż dla $k = 5$. Czas przyrostu naprężeń do wartości krytycznych i tym samym czas niszczenia stopy jest kluczowy dla właściwego przebiegu wyburzenia komina. Czas ten musi być wystarczająco długi, żeby komin przechylił się i obalił w sposób kontrolowany, w stronę wyznaczoną przez włom, zgodnie z zamierzeniami projektantów. Otrzymane wyniki analizy stanu naprężenia i wnioski dotyczące procesu zniszczenia stopy są zgodne jakościowo z obserwacjami praktycznymi.



Rys. 7. Uśrednione najmniejsze naprężenia główne w bloku krytycznym, w funkcji czasu

5. Podsumowanie

Autorzy przeprowadzili symulację numeryczną wyburzenia komina murowego z zastosowaniem metody elementów odrębnych i systemu 3DEC, dotychczas nie stosowanego nigdzie na świecie w tego rodzaju funkcjach. Odwzorowany przebieg wyburzenia i inne wyniki symulacji są zgodne jakościowo z obserwacjami prowadzonymi w trakcie rzeczywistych wyburzeń. 3DEC może być przydatnym narzędziem w rękach doświadczonego

inżyniera strzałowego, może wspomagać jego intuicję i kreatywność, szczególnie przy realizacji trudnych lub nowatorskich wyburzeń.

Przedstawiona tutaj lub bardziej szczegółowa analiza numeryczna może prowadzić do optymalizacji wielkości stopy oporowej i zwiększenia bezpieczeństwa robót wyburzeniowych, szczególnie w przypadku złożonych prac wyburzeniowych.

Na dalszym etapie badań planuje się przeprowadzenie symulacji wpływu obalenia komina na otoczenie poprzez analizę drgań parasejsmicznych generowanych podczas padania komina. Planowane jest również udoskonalenie przeprowadzonej wcześniej symulacji wyburzenia komina żelbetowego przez złożenie, z zastosowaniem dwóch włomów obalających (rys. 8) [13].



Rys. 8. Symulacja obalenia komina żelbetowego przez składanie. Wizualizacja

Autorzy dziękują Panu dr. Józefowi Lewickiemu z Katedry Górnictwa Odkrywkowego, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH za podzielenie się swoim doświadczeniem w robotach strzałowych i wyburzeniach kominów oraz za zachęcenie do publikacji przedstawionych tu wyników.

LITERATURA

- [1] 3DEC ver. 2.0, 1998: Theory and Background, Itasca Consulting Group, Itc, Minneapolis, Minnesota
- [2] *Jakubowski J.*: Modelowanie zjawisk geomechanicznych w górotworze nieciągłym przy pomocy metody odrębnych elementów. Cz. I, Prace Naukowo-Badawcze Instytutu Geomechaniki Górniczej AGH, nr 10.302.09, Kraków, 1991
- [3] *Jakubowski J.*: 3DEC modeling results generalized by stochastic approach, Numerical modeling of discrete materials in geotechnical engineering, civil engineering & earth sciences; edited by H.Konietzky; 1st International UDEC/3DEC Symposium Proceedings, Itasca, Balkema Publishers, Bochum Germany, 2004, 165–173

- [4] *Lemos J.V.*: Modeling stone masonry dynamics with 3DEC, 1st International UDEC/3DEC Symposium Proceedings, Itasca, Balkema Publishers, Bochum Germany, 2004
- [5] *Lewicki J.*, 2004: Zasady i metody bezpiecznego wykonywania robót strzałowych w budownictwie, *Górnictwo i Geoinżynieria*, r. 28, z. 3/1, 2004, 269–293
- [6] *Lewicki J.*: Prognozowanie wielkości zagrożeń powstałych przy prowadzeniu robót strzałowych w budownictwie, *Górnictwo i Geoinżynieria*, r. 28, z. 3/1, 2004, 251–267
- [7] *Lewicki J., Krzyworączka P., Batko P., Morawa R.*: Sposoby zwiększenia pewności kierunkowego obalania kominów, *Górnictwo i Geoinżynieria*, r. 28, z. 3/1, 2004, 313–321
- [8] *Lewicki J., Krzyworączka P., Batko P., Budzicz L.*: Określenie warunków bezpieczeństwa, ocena oddziaływania robót strzałowych na otoczenie oraz technologia wyburzenia metodą wybuchową komina ceramicznego w Koksowni „Makoszowy” w Zabrze, Kraków, 2004 (praca niepublikowana)
- [9] PN-87/B-03002. Konstrukcje murowe. Obliczenia statyczne i projektowe
- [10] PN-88/B-03004. Kominy murowe i żelbetowe. Obliczenia statyczne i projektowe
- [11] *Schlegel R., Rautenstrauch K.*: Comparative computations of masonry arch bridges using continuum and discontinuum mechanics, 1st International UDEC/3DEC Symposium Proceedings, Itasca, Balkema Publishers, Bochum Germany, 2004
- [12] *Schlegel R., Rautenstrauch K.*: Failure analysis of masonry shear walls, 1st International UDEC/3DEC Symposium Proceedings, Itasca, Balkema Publishers, Bochum Germany, 2004
- [13] *Jakubowski J., Reiman K.*: Numeryczna symulacja obalania komina żelbetowego przez złożenie. Bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie. *Miesięcznik Wyższego Urzędu Górniczego*, nr 9(157)/1/2007