

6

BADANIE EFEKTU DYLATANCJI W NUMERYCZNYM MODELU PRÓBKII SKALNEJ

6.1 WPROWADZENIE

Szczególne znaczenie dla projektowania wyrobisk górniczych mają właściwości górotworu opisujące ich wytrzymałość i odkształcalność. W przypadku stanów naprężeniowych zbliżonych do granicy wytrzymałości w materiale skalnym występuje zjawisko dylatacji, rozumiane jako względny przyrost objętości w trakcie obciążania materiału. Właściwe odwzorowanie tego zjawiska pozwala na dokładniejsze opisanie procesów mechanicznych zachodzących w górotworze.

Stosowane modele numeryczne bazujące na metodzie elementów skończonych lub metodzie różnic skończonych uwzględniają zjawisko dylatacji na skutek plastycznego płynięcia, którego intensywność (przebieg) determinowana jest stowarzyszonym lub nie stowarzyszonym prawem płynięcia. W takim przypadku odkształcenie plastyczne uzależnione jest od potencjału plastycznego oraz kąta dylatacji lub np. kąta tarcia wewnętrznego (w przypadku stowarzyszonego prawa płynięcia z warunkiem wytrzymałościowym Coulomba-Mohra).

Dobłą alternatywą dla symulacji numerycznych opartych na MES, pozwalającą na uwzględnienie procesów dylatacyjnych występujących w modelu przed osiągnięciem granicy wytrzymałości może być zastosowanie modeli opartych na metodzie elementów odrębnych, a w szczególności kodu PFC opracowanego przez firmę Itasca. Jego przydatność do symulacji zjawisk w skałach potwierdza duża liczba publikacji prezentujących wyniki uzyskiwane dla zróżnicowanych zagadnień, takich jak:

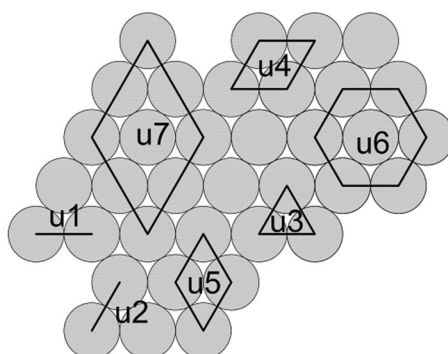
- modelowanie współpracy obudowy z górotworem w warunkach oddziaływania obciążeń dynamicznych [6],
- badanie zachowania się próbek piaskowca podczas prób trójosiowego ściskania [1],
- badanie zachowania się nieciągłości w próbkach skalnych [4],
- analiza stanu górotworu w sąsiedztwie wyrobisk tunelowych [10],
- modelowanie wielkogabarytowych wyrobisk komorowych za pomocą symulacji sprzężonej z programem FLAC [3].

Niniejszy artykuł prezentuje wyniki symulacji numerycznych przeprowadzonych na płaskich i przestrzennych modelach cząstkowych, w celu określenia ich charakterystyk wytrzymałościowych oraz opisanie zjawiska dylatacji.

6.2 SYMULACJA JEDNOOSIOWEGO ŚCISKANIA W MATERIALE ZIARNISTYM

Przedstawiane badania miały na celu określenie przebiegu procesów dylatacyjnych podczas prób jednoosiowego ściskania materiału ziarnistego. Symulacje przeprowadzone zostały za pomocą programu PFC2D pozwalającego na tworzenie płaskich modeli ośrodka skalnego, zbudowanych z elementarnych dysków. Poprzez przyjęcie parametrów cząsteczek oraz ich połączeń zastosowany program komputerowy umożliwia definiowanie właściwości mechanicznych pozwalających na symulacje procesów naprężeniowo-odkształceniowych o dużym podobieństwie do rejestrowanych w warunkach rzeczywistych (laboratoryjnych).

Symulacje jednoosiowego ściskania przeprowadzone zostały dla 7 wariantów zróżnicowanych pod względem kształtu agregatów utworzonych przez sztywne połączenie pojedynczych dysków. Wariant „0” odpowiada próbce bez elementów połączonych w agregaty. Sposoby połączenia i kształty agregatów w poszczególnych wariantach przedstawione zostały na rysunku 6.1.



Rys. 6.1 Sposoby połączenia pojedynczych dysków i kształty brył

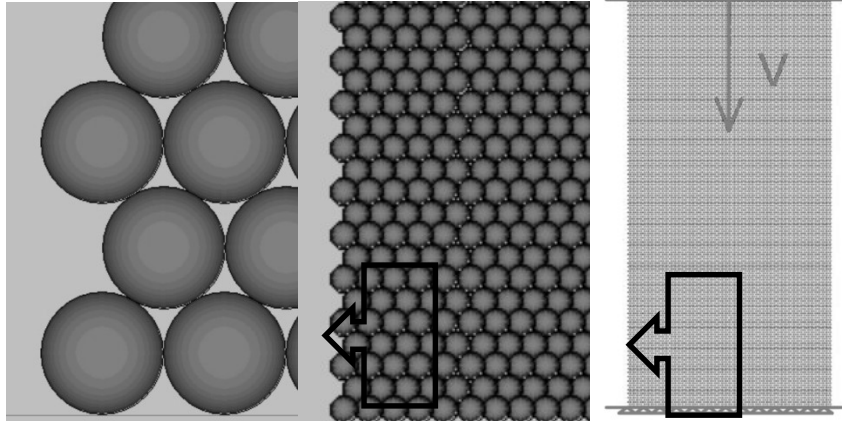
W każdym z analizowanych wariantów przyjęto taką samą geometrię modelu, odwzorowującą w przekroju pionowym walcową próbkę laboratoryjną przygotowaną do próby jednoosiowego ściskania o wymiarach 42 x 84 mm. Próbkę zbudowaną została z 16296 dysków odwzorowujących ziarna piaskowca o średnicy 0,5 mm. Cząsteczki rozmieszczone zostały heksagonalnie tak, że porowatość całego ośrodka wynosi 9,3%.

Obok elementów budujących modelowaną próbkę skalną konieczne było wprowadzenie do modelu poziomych elementów typu „wall”, które pełniły rolę płyt maszyny wytrzymałościowej obciążających próbkę.

Dla modelu przyjęto następujące parametry definiujące połączenia pomiędzy cząsteczkami:

- współczynnik tarcia – 0,5,
- sztywność normalna dysków – 80 GN/m,

- sztywność styczna dysków – 20 GN/m,
- siła zrywająca wiązanie w kierunku normalnym – 1 kN,
- siła zrywająca wiązanie w kierunku stycznym – 2 kN.



Rys. 6.2 Struktura modelu numerycznego z oznaczonymi warunkami brzegowymi

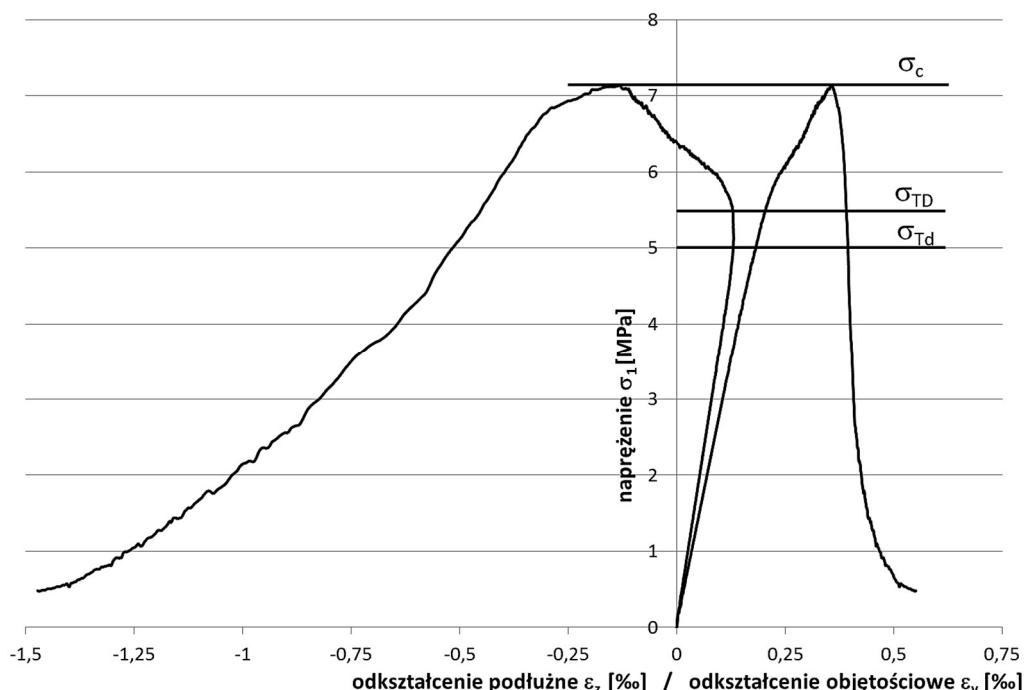
Symulacje dla kolejnych wariantów przeprowadzane były przez wymuszenie przemieszczeń górnej krawędzi i trwały aż do zniszczenia modelowanej próbki. W trakcie obciążenia próbki rejestrowane były następujące dane:

- położenie (zmiana współrzędnej Y) górnej krawędzi obciążającej próbkę,
- położenie (zmiana współrzędnej X) trzech dysków na bocznych krawędziach modelowanej próbki,
- naprężenia i porowatość – rejestrowane za pomocą „kół pomiarowych”,
- odkształcenia podłużne, poprzeczne i objętościowe.

W celu opisania procesów dylatacyjnych wygenerowane zostały charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe pozwalające na wyznaczenie:

- progu dylatacji właściwej σ_{TD} – wartości naprężeń dla których następuje względny przyrost objętości,
- progu mikrodylatacji σ_{Td} – wartości naprężeń dla których następuje wzrost objętości w stosunku do oczekiwanych zmian sprężystych (hipotetycznych, określonych przedłużeniem liniowego odcinka krzywej odkształceń objętościowych) [7],
- granicznej wytrzymałości na ściskanie σ_c ,
- odkształcenia objętościowego na granicy mikrodylatacji $T^{d\varepsilon_v}$,
- odkształcenia objętościowego na granicy dylatacji właściwej $T^{D\varepsilon_v}$,
- odkształcenia objętościowego na granicy wytrzymałości F^{ε_v} .

Charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa dla wariantu „0” z oznaczeniem wyżej przedstawionych progów zaprezentowana została na rysunku 6.3.



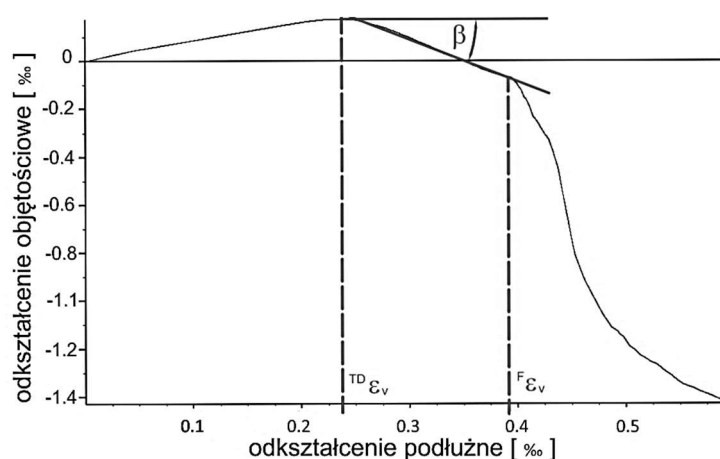
Rys. 6.3 Charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa dla modelu bez agregatów z oznaczeniem charakterystycznych wartości naprężeń

Na podstawie przeprowadzonych symulacji określone zostały również wartości kąta dylatacji Ψ , który stosowany jest w modelach opisujących zachowanie pozniszczeniowe materiału przez niestowarzyszone prawo płynięcia [12]:

$$\Psi = \arcsin \frac{\operatorname{tg} \beta}{2 + \operatorname{tg} \beta} \quad (6.1)$$

gdzie:

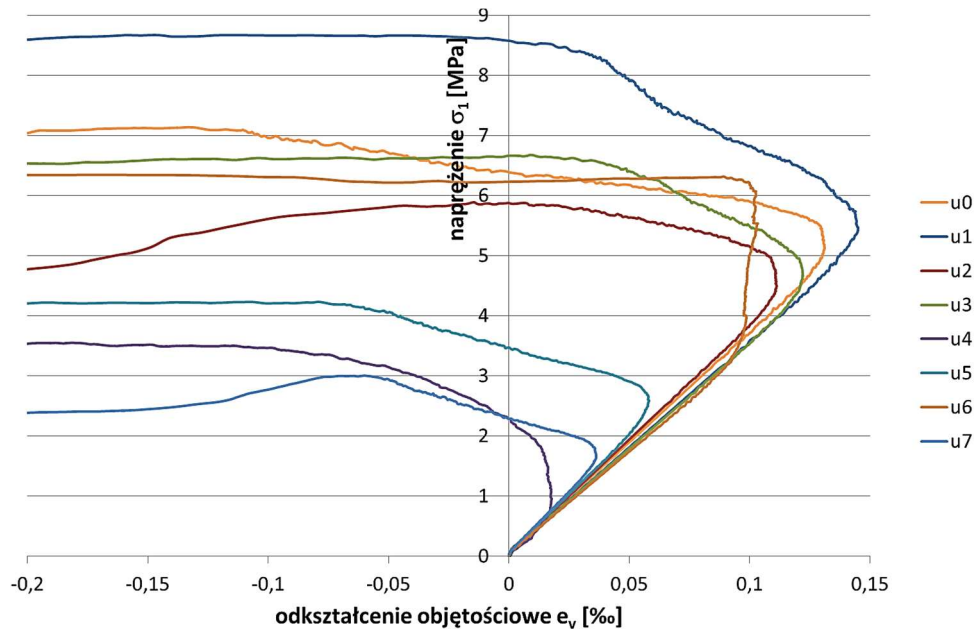
β – kąt odchylenia krzywej odkształcenie objętościowe – odkształcenie podłużne (rys. 6.4).



Rys. 6.4 Charakterystyka odkształcenie objętościowe – odkształcenie podłużne z oznaczeniem kąta β

Zbiorcze zestawie uzyskanych charakterystyk naprężenie-odkształcenie objętościowe dla każdego z analizowanych wariantów przedstawione zostało na

rysunku 6.5, a zestawienie parametrów opisujących przebieg procesów dylatacyjnych zestawiono w tabeli 6.1 (parametry wytrzymałościowe) oraz tabeli 6.2 (parametry odkształceniowe).



Rys. 6.5 Charakterystyki naprężenie - odkształcenie objętościowe uzyskane dla analizowanych wariantów (u0 – u7)

Tabela 6.1 Wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz progi dylatacji dla wariantów 0-7

WARIANT	σ_c [MPa]	σ_{TD} [MPa]	σ_{Td} [MPa]	σ_{TD}/σ_c	σ_{Td}/σ_c
U0	7,11	5,41	5,03	0,76	0,71
U1	8,66	5,59	5,41	0,65	0,62
U2	5,86	4,91	4,27	0,84	0,73
U3	6,64	4,82	4,46	0,73	0,67
U4	3,65	1,24	0,83	0,34	0,23
U5	4,19	2,88	2,57	0,69	0,61
U6	6,33	3,86	3,24	0,61	0,51
U7	3	1,76	1,59	0,59	0,53

Na podstawie uzyskanych charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych wyznaczono również objętościowe odkształcenie dylatacyjne ε_D zdefiniowane jako różnica pomiędzy odkształceniem objętościowym na granicy wytrzymałości i odkształceniem objętościowym na progu dylatacji właściwej. Parametr ten charakteryzuje przyrost objętości jaki doznał analizowany materiał w trakcie symulowanej próby jednoosiowego ściskania od momentu osiągnięcia progu dylatacji właściwej i przedstawiony został w tabeli 6.2.

Tabela 6.2 Wartości wskaźników odkształceniowych opisujących zjawisko dylatacji dla wariantów 0-7

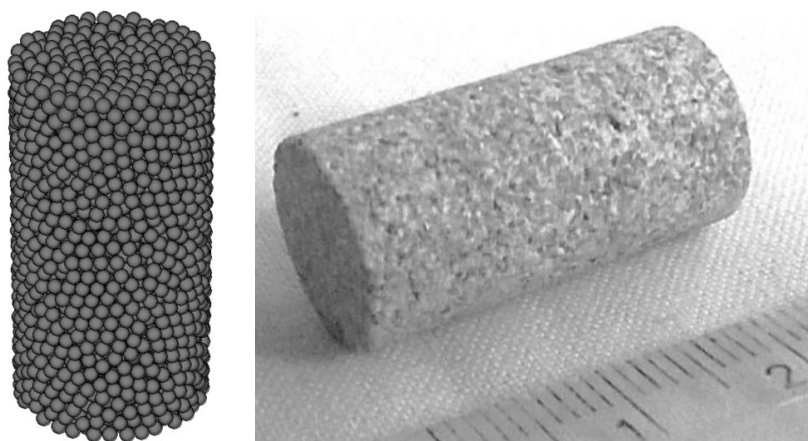
WARIANT	I_{ϵ_V} [%o]	F_{ϵ_V} [%o]	ϵ_D [%o]	β [°]	Ψ [°]
U0	0,13	-0,13	0,26	62	29
U1	0,14	-0,04	0,18	37	16
U2	0,11	-0,01	0,12	55	25
U3	0,12	0,01	0,11	43	18
U4	0,02	-0,26	0,28	45	20
U5	0,06	-0,08	0,13	52	23
U6	0,10	-0,13	0,23	85	59
U7	0,04	-0,06	0,10	51	22

Oprócz wartości bezwzględnych opisujących progi dylatacji istotne jest również przanalizowanie zależności naprężeń na progach dylatacji do wartości wytrzymałości granicznej. W przeprowadzonych symulacjach, dla dylatacji właściwej zależności te zawierały się w przedziale od 0,34 dla wariantu 4 do 0,84 w wariantcie 2. Przy czym wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że wartości te dla piaskowców mieszczą się w przedziale 0,6-0,98, [7], a badania przeprowadzone dla piaskowców pochodzących z GZW [2] wskazują, że zależność naprężenia na progu dylatacji właściwej do wytrzymałości granicznej zawierają się pomiędzy 0,77 a 0,85.

Analizując uzyskane w modelu kąty dylatacji za wyjątkiem wariantu 6 ($\Psi = 59^\circ$) zawierały się w przedziale od 16 do 29° , co jest zbliżone do wartości prezentowanych w literaturze [9, 11].

6.3 SYMULACJA TRÓJKIERUNKOWEGO ŚCISKANIA MODELI PRÓBEK WALCOWYCH

Symulację trójkierunkowego ściskania wykonano na modelach próbek walcowych o wysokości 25 mm i średnicy 12,5 mm. Model zbudowany był z 4100 cząsteczek w kształcie kuli o promieniu 0,5 mm (rys. 6.6).

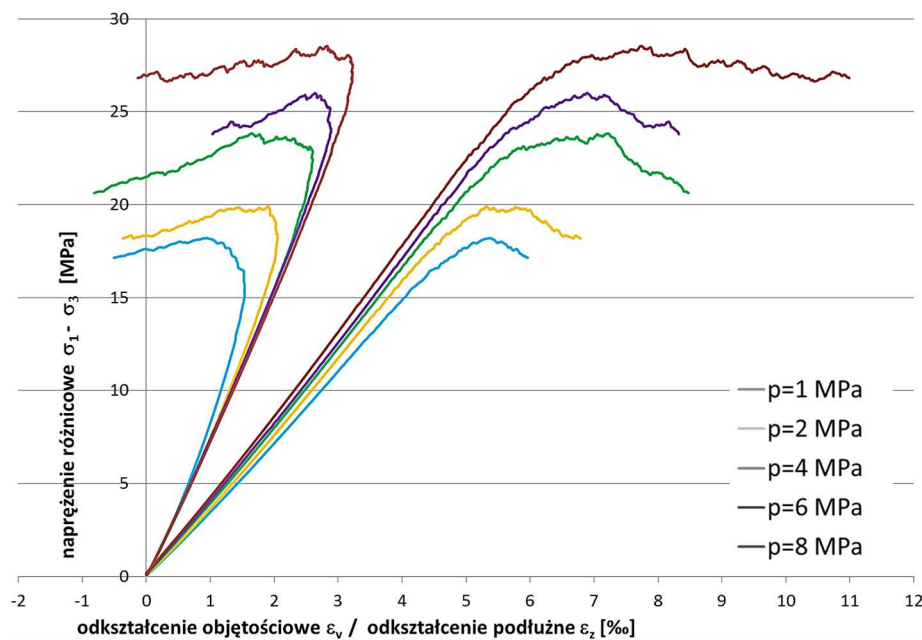


Rys. 6.6 Model próbki zastosowany do symulacji trójkierunkowego ściskania

Parametry przyjęte dla połączeń pomiędzy cząsteczkami są następujące:

- współczynnik tarcia – 0,3,
- sztywność normalna dysków – 20 MN/m,
- sztywność styczna dysków – 20 MN/m,
- siła zrywająca wiązanie w kierunku normalnym – 1 kN,
- siła zrywająca wiązanie w kierunku stycznym – 2 kN.

Symulacje trójkierunkowego ściskania przeprowadzone zostały dla 5 wartości ciśnienia okólnego wynoszącego odpowiednio: 1, 2, 4, 6 i 8 MPa. Uzyskane wyniki w postaci charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych przedstawione zostały na rysunku 6.7. Analizując uzyskane charakterystyki ustalone zostały wskaźniki opisujące zjawisko dylatacji (tabela 6.3).



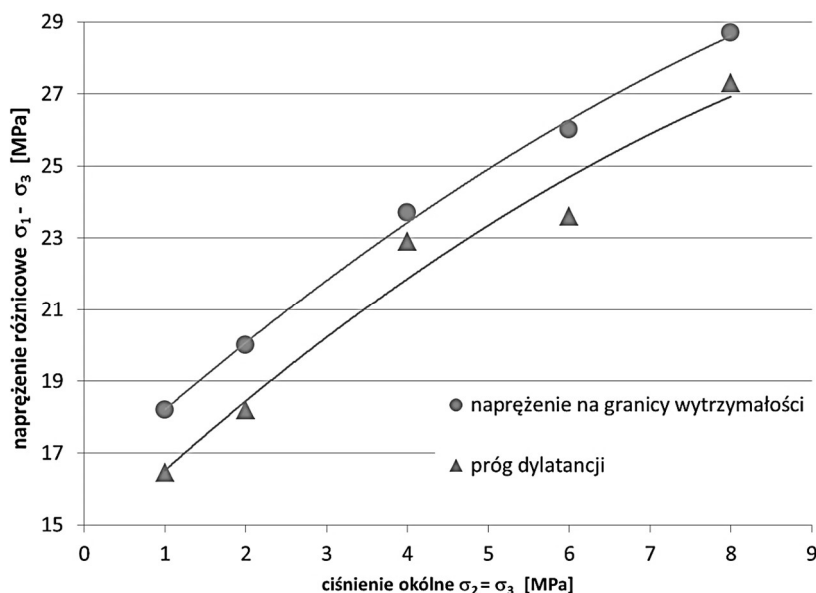
Rys. 6.7 Charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe dla symulacji trójkierunkowego ściskania

Tabela 6.3 Wartości wskaźników opisujących zjawisko dylatacji podczas symulacji trójkierunkowego ściskania

σ_3 [MPa]	F_{σ_1} [MPa]	$F_{(\sigma_1 - \sigma_3)}$ [MPa]	$DT_{(\sigma_1 - \sigma_3)}$ [MPa]	$\frac{DT_{(\sigma_1 - \sigma_3)}}{F_{(\sigma_1 - \sigma_3)}}$	TD_{ϵ_v} [%]	F_{ϵ_v} [%]	ϵ_D [‰]	β [°]	ψ [°]
1	19,2	18,2	16,4	0,90	1,52	0,94	0,58	32	14
2	22	20	18,2	0,91	2,05	1,9	0,15	24	10
4	27,7	23,7	22,9	0,97	2,6	1,67	0,93	32	14
6	32	26	23,6	0,91	2,89	2,67	0,22	30	13
8	36,7	28,7	27,3	0,95	3,22	2,84	0,38	39	17

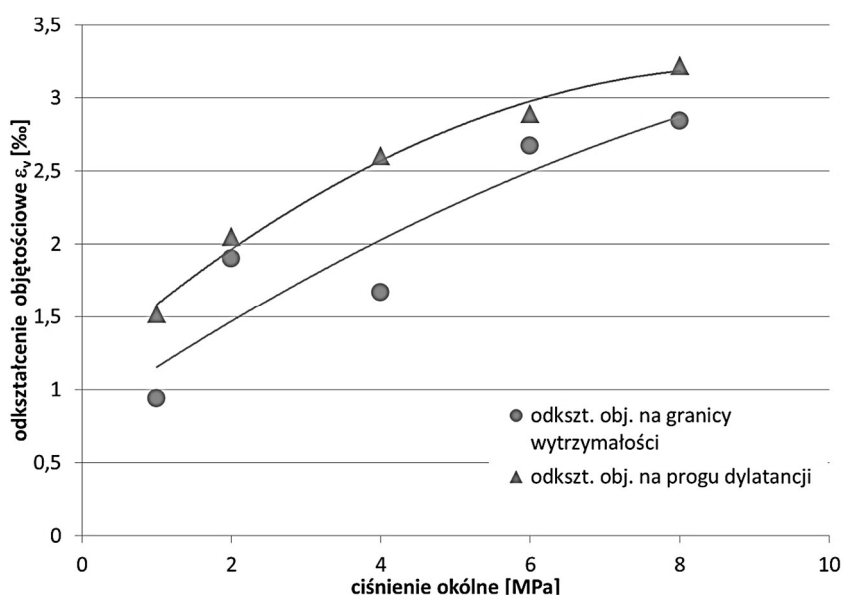
Uzyskane wyniki wskazują, że wzrost naprężeń okólnych powoduje przyrost wartości naprężeń różnicowych na progu dylatacji właściwej, co przedstawiono na rysunku 6.8. Przyrost naprężeń różnicowych na progu dylatacji jest proporcjonalny

do przyrostu naprężeń różnicowych na granicy wytrzymałości, a stosunek $DT(\sigma_1 - \sigma_3) / F(\sigma_1 - \sigma_3)$ jest zmienny w zakresie 0,90-0,97.



Rys. 6.8 Wpływ ciśnienia okólnego na wartość naprężenia na granicy wytrzymałości i na progu dylatacji

Równie wysokie wartości tych wskaźników uzyskał w badaniach wytrzymałościowych [5] oraz [8]. Przyrosty ciśnienia okólnego wymuszają również większe wartości odkształceń na progu dylatacji właściwej, co zobrazone zostało na rysunku 6.9.



Rys. 6.9 Wpływ ciśnienia okólnego na wartość odkształcenia objętościowego na progu dylatacji i na granicy wytrzymałości

6.4 WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych jednoosiowego i trójkierunkowego ściskania walcowych próbek można sformułować następujące wnioski:

1. Uzyskane charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe są zbliżone do charakterystyk uzyskiwanych podczas prób wytrzymałościowych.
2. W każdym z analizowanych wariantów uzyskano dylatację przed osiągnięciem granicy wytrzymałości, co jest trudne do odwzorowania za pomocą klasycznych modeli ciągłych opartych na metodach elementów skończonych lub różnic skończonych.
3. Próg dylatacji właściwej i kąt dylatacji są porównywalne do określanych na podstawie badań. W przypadku modeli płaskich problematyczne są jedynie stosunkowo wysokie wartości progu dylatacji względnej. Dla modeli przestrzennych próg dylatacji trudny jest do jednoznacznego wyznaczenia ze względu na nieliniowość charakterystyki naprężenie – odkształcenie objętościowe.
4. W przypadku trójkierunkowego ściskania naprężenie różnicowe na progu dylatacji wynosiło od 0,9 do 0,97 naprężenia różnicowego na granicy wytrzymałości, co wskazuje, że dylatacja może być interpretowana jako prekursor zniszczenia, a wzrost ciśnienia okólnego skutkuje podwyższeniem progu dylatacji. Nie stwierdzono jednak, jednoznacznej zależności pomiędzy stosunkiem naprężeń na progu dylatacji do naprężeń na granicy wytrzymałości.
5. Zmiana parametrów modelu (wielkość ziaren, sztywność i wytrzymałość połączeń) wpływają na przebieg jego charakterystyki naprężenie-odkształcenie, w tym na zjawisko dylatacji. Przy czym, ważne są również odpowiednie proporcje pomiędzy poszczególnymi parametrami.
6. Poprzez grupowanie cząsteczek w ziarna o różnych kształtach (przy takich samych parametrach kontaktów) uzyskać można materiał o zróżnicowanych właściwościach odkształceniowych i wytrzymałościowych.
7. Uzyskane wyniki odzwierciedlają zachowanie próbki w warunkach badań laboratoryjnych, ale praktyczne zastosowanie do oceny stanu górotworu wymaga budowy modeli o bardziej skomplikowanej strukturze.

LITERATURA

1. L. Baumgarten, H. Konietzky. „Investigation on the fracture behaviour of rock in a triaxial compression test” in *Rock Mechanics for Resource, Energy and Environment*. M. Kwaśniewski, D. Łydzba, Ed. Londyn: Taylor & Francis Group, 2013.
2. M. Borecki, M. Kwaśniewski i in. *Mechaniczne, strukturalno-fizyczne i petrograficzne własności skał z warstw dolnosiodłowych z kopalni Jastrzębia*. Gliwice: Prace Instytutu Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej, 1981.

3. M. Cai et al. „FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations”. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44, pp. 550-564, 2007.
4. C.-C. Chiua, M.-C. Wengb, T.-H. Huang. „Modeling rock joint behavior using a rough-joint model”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 89, pp. 14-25, 2016.
5. J. Cieřlik. „Onset of crack initiation in uniaxial and triaxial compression tests of dolomite samples”. *Studia Geotechnica et Mechanica*, vol. XXXVI, no. 1, pp. 23-27, 2014.
6. A. Kidybiński. „Obciężenie obudowy chodnikowej w trakcie wstrząsu górotworu – wg badań numerycznych modeli cząstkowych”. *Przegląd Górniczy*, nr 4, pp. 9-14, 2007.
7. M. Kwaśniewski. „Dylatacja jako zwiastun zniszczenia skały. Część I. Fizykalna istota zjawiska dylatacji”. *Przegląd Górniczy*, nr 2, pp. 42-49, 1986.
8. M. Kwaśniewski, M. Takahashi, X. Li. „Volume changes in sandstone under true triaxial compression conditions”, ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, pp. 683-688.
9. M. Kwaśniewski, P. Rodriguez-Oitaben. „Study on the dilatancy angle of rocks in the pre-failure domain” in *Harmonising Rock Engineering and the Environment*. Q. Qian, Y. Zhou, Ed. London: Taylor & Francis Group, 2012, pp. 681-686.
10. R. Poisel, A. Poisel, A. Preh, E. Tentschert, A. H. Zettler. „Behaviour of soft rock around shallow double tube tunnels” in *Impact of Human Activity on the Geological Environment*. P. Konečný, Ed. Londyn: Taylor & Francis Group, 2005.
11. R. Ribacchi. „Mechanical Tests on Pervasively Jointed Rock Material: Insight into Rock Mass Behaviour”. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 33 (4), pp. 243-266, 2000.
12. P.A. Vermeer, R. de Borst. „Non-Associated Plasticity for Soils, Concrete and Rock”. *Heron*, 29(3), pp. 3-64, 1984.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.2016

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2017

dr inż. Marek Jendryś
Politechnika Śląska,
Wydział Górnictwa i Geologii
Katedra Geomechaniki,
Budownictwa Podziemnego
i Zarządzania Ochroną Powierzchni
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska
e-mail: marek.jendrys@polsl.pl

dr hab. inż. Henryk Kleta, prof. Pol. Śl.
Politechnika Śląska,
Wydział Górnictwa i Geologii
Katedra Geomechaniki,
Budownictwa Podziemnego
i Zarządzania Ochroną Powierzchni
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska
e-mail: henryk.kleta@polsl.pl

BADANIE EFEKTU DYLATANCJI W NUMERYCZNYM MODELU PRÓBKI SKALNEJ

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania mające na celu określenie przebiegu procesów dylatacyjnych w podczas prób jednoosiowego i trójkierunkowego ściskania próbek walcowych z materiału ziarnistego. Symulacje przeprowadzone zostały za pomocą programów PFC2D i PFC3D pozwalających na budowę modeli z wykorzystaniem na metody elementów odrębnych. W celu opisanie procesów dylatacyjnych obliczone zostały charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe pozwalające na wyznaczenie parametrów opisujących przebieg procesów dylatacyjnych.

Słowa kluczowe: górotwór, badania numeryczne, dylatacja

STUDY ON THE PHENOMENON OF DILATANCY OF NUMERICAL MODELS OF ROCK SAMPLES

Abstract: The paper presents results of research to determine the dilatancy in the triaxial and uniaxial compression of cylindrical samples of granular material. Simulations were carried out using the PFC2D and PFC3D programs which allow to build numerical models based on discrete elements method. To describe the effect of dilatancy the stress-strain curves were generated. On the basis of course of those curves parameters describing dilatant behavior of rock samples were assigned.

Key words: rock mass, numerical simulation, dilatancy