

NUMERYCZNA SYMULACJA PROCESU ZAPADLISKOWEGO W WARUNKACH GEOLOGICZNYCH I GÓRNICZYCH NIECKI BYTOMSKIEJ NA TERENIE POGÓRNICZYM PŁYTKIEJ EKSPLOATACJI ZŁÓŻ RUD METALI

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono sposób symulacji numerycznej procesu zapadliskowego w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej na obszarze Górnego Śląska. Teren ten był przedmiotem intensywnej płytkiej eksploatacji złóż rud metali do lat osiemdziesiątych XX w. oraz nadal podlega wpływom głębokiej eksploatacji pokładów węgla. Do tej pory w niektórych rejonach występują zapadliska aktywizowane głównie intensywnymi opadami atmosferycznymi, wiosennymi roztopami pokrywy śnieżnej lub eksploatacją pokładów węgla.

Przedstawiona symulacja numeryczna rozwoju strefy zniszczenia w stropie pustki składa się z czterech podstawowych etapów od redystrybucji naprężenia w wyniku wytworzenia pustki do ujawnienia się zapadliska na powierzchni terenu. Charakterystycznym i nowym rozwiązaniem jest sposób deklaracji w symulacji numerycznej kształtu strefy zniszczenia w stropie pustki i kryteriów jej propagacji ku powierzchni terenu. W symulacji procesu zapadliskowego przyjęto, że rozwój zniszczenia zachodzi wewnątrz strefy naprężenia rozciągającego i niewielkiego naprężenia ściskającego w polu naprężenia pionowego. Maksymalny zasięg strefy zniszczenia jest określony przez kształt pola naprężenia pionowego przy założeniu braku wytrzymałości na rozciąganie ośrodka.

Wykonane symulacje dla budowy i właściwości górotworu charakterystycznego dla rejonu silnie zagrożonego potwierdzają możliwość wystąpienia zapadliska na powierzchni terenu. Symulacje przeprowadzono w ośrodku ciągłym sprężysto-plastycznym z osłabieniem za pomocą programu FLAC 2D v. 7.0.

SŁOWA KLUCZOWE

Modelowanie numeryczne, proces zapadliskowy, sklepienie naprężenia, płytka eksploatacja rud metali, Górnos Śląskie Zagłębie Węglowe

* * *

WPROWADZENIE

Symulacje numeryczne rozwoju strefy zniszczenia w stropie pustki prowadzącego do deformacji nieciągłych na powierzchni terenu zostały zapoczątkowane w latach siedem-

dziesiątych XX w. (Sainsbury i in. 2011) i są stale doskonalone wraz z postępowaniem w metodologii obliczeń numerycznych. W ogólnym ujęciu rozwój tego rodzaju symulacji numerycznych dokonuje się z wykorzystaniem metod ośrodków ciągłych oraz metod ośrodków dyskretnych. Obie grupy metod mają swoje zalety i ograniczenia. W zależności od stopnia skomplikowania geometrii modelu czy ogólnie modelu fizycznego, w mniej złożonych warunkach wykorzystuje się metody ośrodków dyskretnych, a w bardziej złożonych metody ośrodków ciągłych. Zastosowanie, coraz częściej, znajdują również metody hybrydowe, w których w rozbudowanym ośrodku ciągłym lokalnie wykorzystuje się ośrodek dyskretny.

Podstawową zaletą użycia ośrodków dyskretnych jest możliwość opisu zachowania się wyodrębnionych elementów reprezentujących bloki skalne. W ten sposób można analizować złożone przemieszczenia i naprężenia w ośrodku sfragmentaryzowanym, symulując rzeczywiste zachowanie się spękanego górotworu. Podstawowe trudności wynikają głównie z właściwego doboru parametrów nieciągłości między blokami skalnymi, jak również opisie geometrycznym siatki spękań. Realizacja symulacji numerycznych z wykorzystaniem ośrodków ciągłych ma tę podstawową zaletę, że można analizować bardziej złożone sytuacje geomechaniczne. Właściwości spękanego ośrodka można symulować wprowadzając tzw. ekwiwalentne parametry ośrodka, charakteryzujące zachowanie ośrodka spękanego, dyskretnego i osłabionego oddziaływaniem wody. Podstawową niedogodnością jest potrzeba użycia sztucznych operacji w modelu opisujących rzeczywiste zachowanie się górotworu np. usunięcia materiału, stopniowe osłabienie przez redukcję gęstości objętościowej, modułów czy parametrów wytrzymałościowych itp.

W przypadku symulacji zachowania się ośrodków ciągłych zastosowanie znajdują modele dwu- i trójwymiarowe realizowane przez programy np. FLAC 2D i FLAC 3D, Cosmos, Abaqus i inne. Natomiast zachowanie ośrodków dyskretnych można analizować w programach np. dwu- i trójwymiarowych UDEC, PFC oraz innych.

W pracy przedstawiono sposób symulacji numerycznej rozwoju strefy zniszczenia w części stropowej pustki w układzie dwuwymiarowego ośrodka ciągłego za pomocą programu FLAC 2D v. 7.0. W pracy z zamysłem pominięto omówienie zagadnienia związanego z kryteriami wytworzenia tzw. sklepienia naprężeń (ciśnień) ze względu na jego obszerność. Skupiono się głównie na przedstawieniu zagadnienia metodologii symulacji numerycznej i jej fizycznej interpretacji. Pojęcie „strefy zniszczenia” autorzy konsekwentnie używają w odniesieniu do tzw. sklepienia ciśnień podanego przez Sałustowicza (1955) lub sklepienia naprężenia używanego przez innych autorów.

W opisie mechanizmu procesu zapadliskowego wykorzystano sprężysto-plastyczne zachowanie się górotworu z osłabieniem parametrów. Sposób ten bazuje na ekwiwalentnych parametrach ośrodka spękanego metodą Hoeka-Browna (Hoek 2007). W pracy opis rozwiązania poprzedzono szerokim studium rozwoju metodologii symulowania strefy zniszczenia w stropie pustki (wyrobiska górniczego) opracowanego na podstawie pracy Sainsbury'ego i in. (2011).

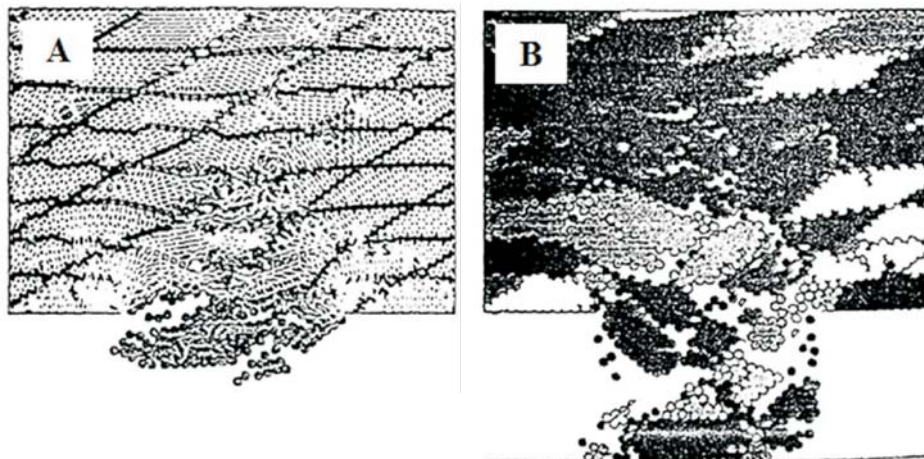
1. SYMULACJE NUMERYCZNE ROZWOJU STREFY ZNISZCZENIA W STROPIE PUSTKI W ŚWIETLE DOTYCHCZASOWYCH BADAŃ

W numerycznej symulacji rozwoju strefy zniszczenia w stropie pustki, najbardziej istotnych jest kilka czynników, takich jak: metodologia symulacji rozwoju zniszczenia, parametry ośrodka, konstrukcja modelu obliczeniowego, a zwłaszcza siatki obliczeniowej. Problemem tym zaczęto się interesować wkrótce po wprowadzeniu obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych (Sainsbury i in. 2011). Modelowano wówczas zachowanie się stropu w systemie eksploatacji blokowej. Według Sainsbury'ego i in. (2011) pierwsze tego rodzaju dwuwymiarowe obliczenia numeryczne wykonali Palma i Agarwal (1973) dla modelu sprężystego zachowania się górotworu w kopalni rudy miedzi El Teniente w Chile. Wskazali oni na potrzebę identyfikacji systemu spękań skał w warunkach *in situ* i wpływu kierunku naprężenia głównego na korzystniejszą eksploatację w rejonach mocniejszych i bardziej zwięzłych skał. Spękany górotwór symulowali przez wprowadzenie braku wytrzymałości na rozciąganie. Oznaczało to, że rozwój zniszczenia w górotworze zachodził w warunkach wystąpienia naprężeń rozciągających w oczku siatki (Sainsbury i in. 2011). Analizy pokazały istotne znaczenie wysokości strefy pustki i jej orientacji w odniesieniu do kierunku i wielkości głównego naprężenia dewiatorowego.

Bardziej rozwiniętą metodologię zaproponowali Barla i in. (1980) symulując stan zniszczenia wynikający z rozciągania i ściskania za pomocą osłabienia wybranych parametrów ośrodka. Założyli oni, że zniszczenie w stropie pustki może zachodzić nie tylko w wyniku naprężeń rozciągających, czyli w warunkach dominującego oddziaływania siły ciężkości, lecz również w wyniku naprężeń ściskających w warunkach płynięcia spowodowanego ściskaniem. Takie założenie jest możliwe dla słabszych ośrodków skalnych, nie wykazujących zachowania kruchego na niewielkich głębokościach, lub ośrodków mocniejszych na dużych głębokościach. Modelowanie przeprowadzono dla warunków geologiczno-górnictwowych kopalni rudy żelaza Grace w Pensylwanii. Proces symulacji osłabienia ośrodka był poprzedzony obserwacją stanu zniszczenia w oczkach siatki. Jeżeli doszło do zniszczenia materiału skalnego w oczku na skutek naprężeń rozciągających lub ściskających, obniżano wartość wytrzymałości, gęstości objętościowej i sztywności ośrodka skalnego do wartości rezydualnych.

Z kolei Rech i Lorig (1992) redukowali naprężenia do zera, a parametry ośrodka skalnego obniżali do wartości odpowiadających parametrom skał całkowicie luźnych. Zasięg strefy zniszczenia był korelowany z zasięgiem postępu eksploatacji. Autorzy przeprowadzili dwuwymiarową analizę w osrodku ciągłym wykorzystując program FLAC dla warunków kopalni molibdenu Henderson w Kolorado.

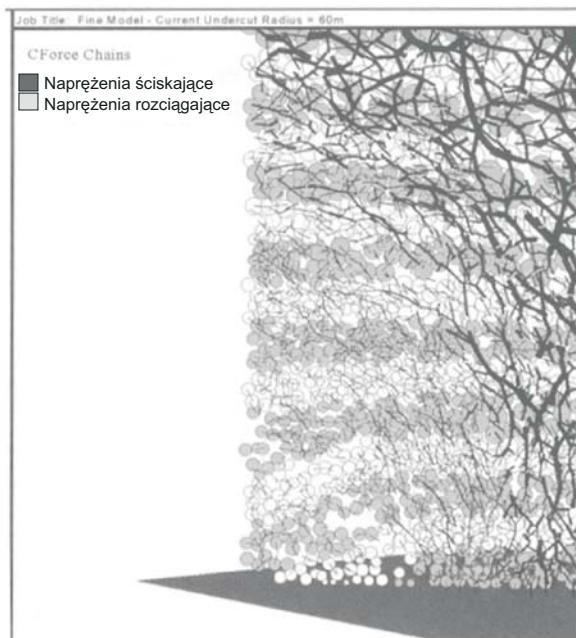
Dla podkreślenia wpływu spękań ośrodka na rozwój strefy zniszczenia Lorig i in. (1995) zaproponowali symulację w osrodku dyskretnym z wykorzystaniem metody elementów odrębnych, realizowanej m.in. przez program PFC. Koncepcja symulacji rozwoju strefy zniszczenia związana była z kryteriami przemieszczenia jednorodnego bloku skalnego oraz sił tarcia między blokami skalnymi. Uzyskane wyniki były bardzo zbliżone do wyników w modelu ośrodka ciągłego (rys. 1).



Rys. 1. Rozwój procesu zapadliskowego symulowany w programie PFC (Lorig i in. 1995)

Fig. 1. Simulation of sinkhole-forming process development by PFC code at the initial A) and advance stage of damage development B) (Lorig at al. 1995)

Podobne i interesujące wyniki uzyskane metodą elementów odrębnych z podkreśleniem wielkości i położenia naprężeń rozciągających i ściskających pojawiających się w modelu przedstawił Brown (2003) (rys. 2). Modele opracowane metodą elementów odrębnych były



Rys. 2. Rozwój sklepienia naprężeń w strefie niestabilnego górotworu (Brown 2003)

Fig. 2. Development of the damage zone in the void roof (Brown 2003)

silnie rozwijane, lecz ich zastosowanie jest do tej pory ograniczone ze względu na trudności w opisie bardziej złożonych sytuacji i trudności w określeniu parametrów nieciągłości między blokami skalnymi.

Inne podejście zaproponowali Karzulovic i Flores (2002) zakładając, że proces zniszczenia górotworu w stropie obejmuje jedynie szerokość 10% otwarcia stropu. W wyniku deklaracji parametrów górotworu zniszczonego i redystrybucji naprężenia określali tzw. współczynnik propagacji pustki CPF (ang. *Cave Propagation Factor*) jako stosunek aktualnego średniego naprężenia dewiatorowego do maksymalnego naprężenia dewiatorowego, utrzymującego wokół pustki stateczność górotworu. Wielkość współczynnika CPF wskazywała, w jakim stopniu rozwój strefy zniszczenia w stropie jest problematyczny dla utrzymania stateczności wyrobiska. Autorzy posłużyli się obliczeniami metodą elementów skończonych w ośrodku ciągłym wykorzystując program Phase2. Wyniki symulacji zastosowano w warunkach geologiczno-górnich kopalni miedzi i złota Northparkes Lift I w Australii.

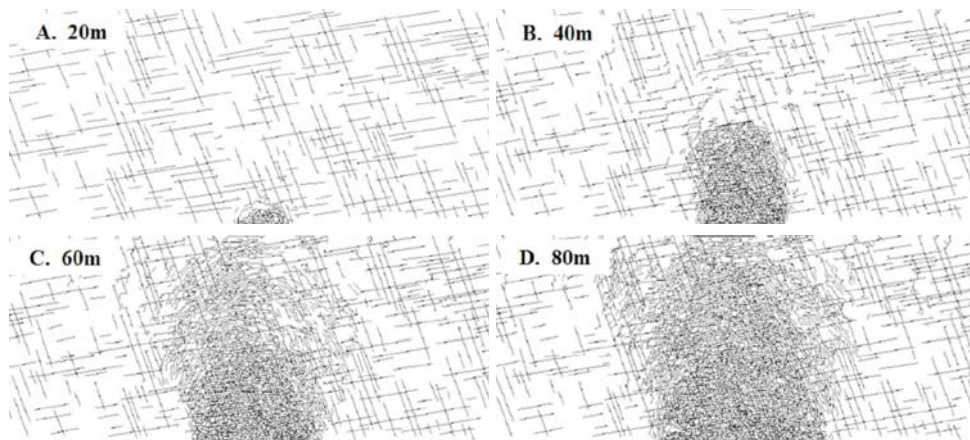
Natomiast Pierce i Lorig (1998) zmniejszali monotonicznie naprężenia przeciwdziałające przemieszczeniu stropu pustki (symulacja działania obudowy) i oceniali rozwój zasięgu strefy zniszczeń, jednocześnie modyfikując parametry ośrodka. Zasięg strefy zniszczenia oceniali na podstawie zmian gęstości objętościowej ośrodka, naprężenia i modułów odkształcenia.

Podobne rozwiązanie zastosował Pilecki (2002) do oceny rozwoju strefy zniszczeń w utworach fliszu karpackiego dla tunelu komunikacyjnego Laliki, posługując się programem FLAC 2D. Wytworzona pustka, nie dopuszczając do odprężenia otaczającego ośrodka po wybraniu, wypełniona została fikcyjnym materiałem podsadzkowym. W wyniku obniżania modułu sprężystości tego materiału analizowano możliwe warianty rozwoju strefy zniszczenia. Po każdorazowej stabilizacji sił w modelu w strefie zniszczenia osłabiano parametry ośrodka. Zmniejszono gęstość objętościową maksymalnie do 25%, zakładano brak wytrzymałości na rozciąganie, a moduł odkształcenia zmniejszono do wartości minimalnej wynikającej z badań. W ten sposób analizowano rozwój zniszczeń nie tylko w stropie, ale również w ociosach i w szczególności w narożnikach przekroju tunelu.

Pierce i in. (2006) zadawali małe wartości prędkości pionowej na węzłach siatki obliczeniowej w stropie wyrobiska. W wyniku dokonanych zmian objętości określali zasięg strefy zniszczenia, w której modyfikowali gęstość objętościową i moduły odkształcenia. Rozwiązanie to sprawdziło się w ocenie rozwoju pustki w kopalni Northparkes Lift 2.

Vyazmensky i in. (2007) wprowadzili do ośrodka ciągłego dyskretny system spękań. W wyniku stopniowego rozwoju rozciągania w zależności od kierunku i wielkości naprężenia głównego w modelu tworzyły się nieciągłości o różnej gęstości (rys. 3). Użyli oni programu ELFEN, wykorzystującego metodologię hybrydową, łączącą metodę elementów odrębnych i metodę elementów skończonych.

Sainsbury i in. (2008) na podstawie dotychczasowych doświadczeń zaproponowali model wykorzystujący osłabienie górotworu wraz z dyskretnym wprowadzeniem systemów spękania za pomocą metody UJRM (ang. *Ubiquitous Joint Rock Mass*) uwzględniającej lokalne zastosowanie metody elementów odrębnych. Redukcję spójności i wytrzymałości na



Rys. 3. Symulacja rozwoju zniszczenia w stropie pustki metodą hybrydową. Opisy od A do D oznaczają rosnącą chronologicznie wysokość strefy zniszczenia (Vyazmensky i in. 2007)

Fig. 3. Simulation of the damage development in the void roof by hybrid method. Names from A to D means the chronologically increasing of the damage zone high (Vyazmensky i in. 2007)

rozciąganie wprowadzali na podstawie wyników trójosiowych testów. Zmiany gęstości objętościowej nie mogły przekraczać maksymalnej wartości zależnej od porowatości skały w postaci:

$$\rho_v = \frac{\rho_{vp}}{1 + \frac{\eta}{1-\eta}}$$

gdzie:

- ρ_v – gęstość objętościowa,
- ρ_{vp} – początkowa gęstość objętościowa,
- η – porowatość.

Zastosowali oni również metodę redukcji modułu odkształcenia, wykorzystując nieliniową zależność Hoeka i Diedericha (2006) dla znanego GSI (RMR lub Q) w postaci:

$$E_{rm} (MPa) = 100,000 \left(\frac{1-D/2}{1+e^{((75+25D-GSI)/11)}} \right)$$

gdzie

- E_{rm} – moduł odkształcenia górotworu,
- D – współczynnik naruszenia górotworu,
- GSI – wskaźnik jakości górotworu,

lub, jeżeli dodatkowo znany jest moduł materiału skalnego:

$$E_{rm} = E_i \left(0,02 + \frac{1-D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$$

gdzie

E_i – moduł odkształcenia materiału skalnego.

2. NUMERYCZNY MODEL PROCESU ZAPADLISKOWEGO W WARUNKACH GEOLOGICZNO-GÓRNICZYCH W NIECCE BYTOMSKIEJ NA TERENIE DAWNEJ, PŁYTKIEJ EKSPLOATACJI ZŁOŻA RUD METALI

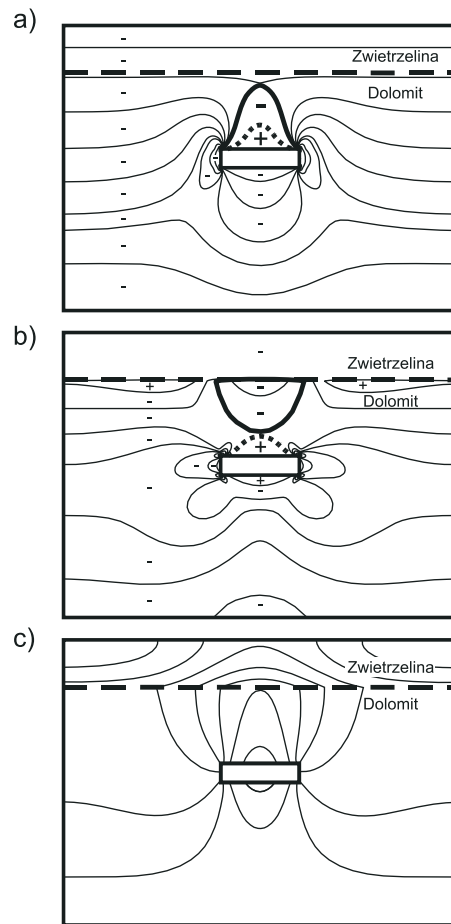
2.1. Podstawowe założenia symulacji procesu zapadliskowego

W symulacji procesu zapadliskowego przyjęto, że rozwój zniszczenia w stropie pustki zachodzi wewnątrz strefy naprężenia rozciągającego i niewielkiego naprężenia ściskającego w polu naprężenia pionowego. Przyjęcie założenia dotyczącego pola naprężenia pionowego jest związane z silną fragmentaryzacją górotworu i dominującym wpływem siły ciężkości na niewielkich głębokościach do kilkudziesięciu metrów. Na rysunkach 4a,b,c pokazano przykłady pola naprężenia pionowego, poziomego i przemieszczenia pionowego w stropie pustki dla charakterystycznych warunków geologicznych i górniczych niecki bytomskiej.

W proponowanym sposobie symulacji, w odróżnieniu od rozwiązania Palmy i Agarwala (1973) oczka siatki obliczeniowej znajdujące się wewnątrz strefy rozciągania są usuwane, symulując zawał stropu. W strefie niewielkiego naprężenia ściskającego, w wyniku dodatkowego osłabienia ośrodka zawałem stropu zachodzi dalszy rozwój strefy zniszczenia. Należy przyjąć, że rozluźnione bloki skalne przemieszczają się do zawaliska. W dłuższym okresie czasu osłabienie ośrodka w tej strefie może zachodzić w wyniku rozwoju procesu reologicznego przyspieszanego najczęściej procesami wietrzenia z udziałem wody. W warunkach słabych parametrów górotworu, usunięcie oczek siatki może obejmować całą strefę zniszczenia z naprężeniami rozciągającymi i niewielkimi ściskającymi.

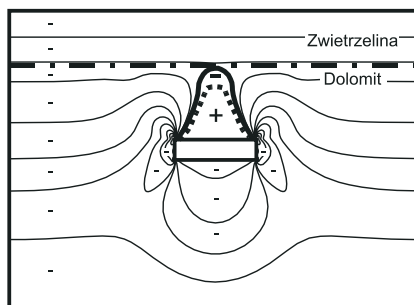
Kształt strefy zniszczenia w dużym stopniu zależy od wartości parametrów górotworu – gęstości objętościowej, wytrzymałości na rozciąganie i modułów odkształcenia. Im słabsze parametry tym strefa jest szersza i bardziej wydłużona w kierunku powierzchni terenu. Miarą maksymalnego zasięgu strefy zniszczenia, w tym jej wysokości, jest kształt pola naprężenia pionowego określony przy przyjęciu braku wytrzymałości na rozciąganie ośrodka (rys. 5).

Silna fragmentaryzacja górotworu w warunkach geologiczno-górniczych niecki bytomskiej jest efektem intensywnej działalności górniczej. W rejonach najbardziej zagrożonych zapadliskami, eksploatacja złóż rud metali prowadzona była metodą odkrywkową i pod-



Rys. 4. Przykład izoliniowego pola a) naprężenia pionowego, b) poziomego i c) przemieszczenia pionowego wokół prostokątnej pustki w modelu sprężysto-plastycznym

Fig. 4. Example of the field of isolines a) vertical stress, b) horizontal stress and c) vertical displacement around the rectangular void in elastic-plastic model



Rys. 5. Przykład zasięgu strefy zniszczenia w stropie pustki przy braku wytrzymałości na rozciąganie

Fig. 5. Example of the damage zone extent in the void roof assuming lack of tensile strength

ziemną systemem szybkowym, komorowym i ubierkowym do głębokości około 70 m. Często wyrobiska nie były właściwie likwidowane lub likwidowane przez samozawalenie. Dodatkowo, w ostatnim okresie eksploatacji od początku XX w., w wielu rejonach niecki bytomskiej naruszenie górotworu było wzmacniane głęboką eksploatacją pokładów węgla. W takich warunkach geologicznych i górniczych głównym czynnikiem powodującym ruchy masowe w górotworze jest siła grawitacji, stąd siły rozciągające w silnie spękanym stropie pustki decydują o jego zawale i rozwoju strefy zniszczenia.

Symulacja została przeprowadzona za pomocą programu przeznaczonego do obliczeń w ośrodkach ciągłych FLAC 2D v. 7.0. Fragmentaryzację ośrodka zasymulowano przyjęciem odpowiednio osłabionych ekwiwalentnych parametrów górotworu obliczonych metodą Hoeka-Browna (Hoek 2007). Parametry te uwzględniają spękania górotworu i niekorzystny wpływ wody.

2.2. Konstrukcja modelu numerycznego

Model fizyczny skonstruowano dla wybranych silnie zagrożonych zapadliskami warunków geologicznych i górniczych płytkiej, historycznej eksploatacji rud cynku i ołowiu w niecce bytomskiej na terenie miasta Bytomia. Model składa się z dwóch warstw: luźnego nadkładu zbudowanego ze zwietrzliny dolomitu o miąższości 5m oraz podłoża skalnego, tzw. górotworu zasadniczego zbudowanego z warstwy dolomitów o miąższości 25 m. W podłożu na głębokości 13 m znajduje się prostokątna pustka o wysokości 2 m i szerokości 8 m.

Parametry górotworu zostały obliczone według schematu Hoeka-Browna (Hoek 2007) na podstawie badań zamieszczonych w pracy Popiołka i Pileckiego (2005) (tab. 1).

Symulację numeryczną przeprowadzono w płaskim stanie odkształcenia, w ośrodku sprężysto-plastycznym opisanym dwoma warunkami wytrzymałościowymi: Coulomba-Mohra dla warstwy nadkładu zbudowanej z luźnego materiału oraz Hoeka-Browna dla górotworu podstawowego zbudowanego ze skał. W modelu obliczeniowym przyjęto, że naprężenia rosną liniowo z głębokością.

Siatka obliczeniowa została skonstruowana w taki sposób, aby osiągnąć dużą dokładność i powtarzalność wyników w strefie rozwoju procesu zniszczenia w części stropowej pustki. W tym celu zastosowano zagęszczenie siatki obliczeniowej do wymiaru oczka 0,1 na 0,1 m. Poza tą strefą oczka miały wymiar zróżnicowany, dochodzący do maksymalnych wartości 2,0 na 3,0 m.

2.3. Etapy rozwoju procesu zapadliskowego w świetle symulacji numerycznej

Zakładając, że decydujący wpływ na rozwój zniszczenia w stropie pustki mają naprężenia rozciągające wynikające z działania siły grawitacji, symulację przeprowadzono na podstawie analizy pola naprężeń pionowych. Na podstawie otrzymanych wyników podstawowe etapy rozwoju procesu zapadliskowego można scharakteryzować następująco:

Tabela 1

Parametry modelu numerycznego

Table 1

The parameters of the numerical model

Nazwa parametru	Wartość parametru	
	zwietrzelina	dolomit
Gęstość objętościowa ρ [kg/m ³]	1950	2719
Moduł Younga E [Pa]	$8 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^{10}$
Współczynnik Poissona ν [-]	0,30	0,24
Kąt tarcia wewnętrznego φ [°]	20,0	36,3
Spójność c [Pa]	$53,75 \cdot 10^3$	$9,0 \cdot 10^6$
Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie R_c [Pa]	0	$5,5 \cdot 10^7$
Wytrzymałość na rozciąganie R_r [Pa]	0	$1,5 \cdot 10^6$
Moduł sprężystości objętościowej K^a [Pa]	$6,67 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^{10}$
Moduł sprężystości postaciowej G^b [Pa]	$3,08 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^{10}$
Współczynnik GSI [-]	–	35,5
Stała Hoeka-Browna a [-]	–	0,515
Stała Hoeka-Browna m_b [-]	–	0,899
Stała Hoeka-Browna s [-]	–	0,0008

Objaśnienia: ^a $K = E/3(1-2\nu)$; ^b $G = E/2(1+\nu)$

Etap I — redystrybucja naprężenia pierwotnego i rozwój strefy zniszczenia w stropie pustki

W wyniku wykonania pustki w górotworze dochodzi do redystrybucji naprężenia pierwotnego (rys. 6). W stropie pustki powstaje charakterystyczna strefa zniszczenia w kształcie kopuły (skłębienia naprężenia), która w zależności od sztywności skały przyjmuje różny kształt i wysokość. Wewnątrz strefy zachodzi zmiana właściwości ośrodka. Maleją wartości gęstości objętościowej, wytrzymałości na rozciąganie oraz modułu odkształcenia. W bezpośrednim stropie pojawia się naprężenie rozciągające, a powyżej niewielkie naprężenie ściskające. Kształt strefy zniszczenia odzwierciedla pole naprężenia pionowego dla ośrodka pozbawionego wytrzymałości na rozciąganie (rys. 5). Stateczność ośrodka w stropie utrzymują siły tarcia między powierzchniami spękań oddzielającymi bloki skalne. Wokół narożników pustki występuje duża koncentracja naprężenia, która ma wpływ na kształt strefy zniszczenia.

Etap II — zawal stropu pustki obejmującego strefę naprężenia rozciągającego

W bezpośrednim stropie pustki w wyniku pojawienia się naprężeń rozciągających tworzy się strefa rozluzowanych bloków skalnych wzdłuż istniejących spękań związanych z kli-

ważem lub innymi nieciągłościami. Jeżeli siła grawitacji będzie większa od siły tarcia między blokami, wysunięcie się jednego z bloków może spowodować rozluźnienie ośrodka i nagły zawał pozostałych luźnych fragmentów górotworu (rys. 7). Bloki skalne na spągu pustki tworzą zawalisko, a w stropie zostaje wytworzona tzw. pustka wtórna. W wyniku wytworzenia pustki wtórnej w jej sąsiedztwie następuje redystrybucja naprężenia i wytworzenie nowej strefy zniszczenia w części stropowej. Wymiary tej strefy zależą od szerokości otwarcia stropu pustki, dotychczasowego rozwoju strefy zniszczenia oraz budowy i właściwości górotworu.

Etap III – wtórny zawał stropu

Redystrybucja pola naprężenia powoduje wytworzenie kolejnej strefy naprężenia rozciągającego w stropie pustki wtórnej (rys. 8). Naprężenie to może być przyczyną wtórnego zawału stropu. Zawał ten i jednocześnie pustka wtórna może się dodatkowo przemieścić w kierunku powierzchni terenu, jeżeli w strefie niewielkiego naprężenia ściskającego bloki skalne zostaną rozluźnione i opadną na zawalisko. W dłuższym okresie czasu należy się liczyć z osłabieniem ośrodka w tej strefie w wyniku rozwoju procesu reologicznego przyspieszanego najczęściej procesami wietrzenia z udziałem wody.

Postępujący z czasem rozwój spękań i szczelin w stropie pustki powoduje spadek wytrzymałości górotworu nawet do 20–30% wartości początkowej (Tharp 1995; Hoek 2007). Przez system powstałych spękań i szczelin często dochodzi do infiltracji wody w głąb górotworu. Zawodnienie ośrodka skalnego w istotny sposób wpływa na redukcję wytrzymałości i rozwój procesu zapadliskowego. Jednocześnie pustka wtórna zmniejsza swoją objętość, w związku ze zwiększającą się względnie objętością zawaliska o zmniejszonej gęstości objętościowej w porównaniu do górotworu. W przypadku podparcia stropu pustki przez zawalisko proces zapadliskowy może zostać zatrzymany przez samo podsadzenie w sposób okresowy lub trwały.

Etap IV – przemieszczenie pustki do granicy z luźnym ośrodkiem oraz wystąpienie zapadliska na powierzchni terenu

Jeżeli objętość zawaliska jest niewystarczająca do samopodsadzenia „wędrującej” w kierunku powierzchni terenu pustki możliwe jest wystąpienie zapadliska. W przypadku przerwania ciągłości granicy ośrodka skalnego z luźnym nadkładem przez propagującą pustkę, jest bardzo prawdopodobne wystąpienie zapadliska na powierzchni terenu (rys. 9). Cząsteczki luźnego ośrodka pod wpływem siły grawitacji i infiltracji wody przemieszczają się do zawaliska. Grubość warstwy ośrodka luźnego ma wpływ na wielkość zapadliska na powierzchni terenu. Decyduje o tym głównie kąt tarcia wewnętrznego materiału ośrodka luźnego oraz objętość pustek wraz ze szczelinami w ośrodku skalnym.

PODSUMOWANIE

Symulacje numeryczne mają ograniczone możliwości opisu mechanizmu procesu zapadliskowego, stąd w dużym stopniu wykorzystywane są rozwiązania przybliżone. Przedstawiony w pracy opis procesu zapadliskowego wynika z dotychczasowej wiedzy i praktyki w symulacji numerycznej zagrożenia zapadliskowego w niecce bytomskiej.

Polega on na określeniu kształtu przewidywanej strefy zniszczenia w stropie pustki na podstawie kształtu pola naprężenia pionowego przy deklaracji braku wytrzymałości materiału na rozciąganie. Rozwój procesu zapadliskowego zachodzi wewnątrz strefy zniszczenia w wyniku usunięcia jej części poddanej naprężeniu rozciągającemu, a w kolejnym etapie niewielkiemu naprężeniu ściskającemu. W ten sposób uwzględnia się oddziaływanie w czasie procesów reologicznych i wietrzenia, a zwłaszcza wpływu wody. Opracowany model sprawdza się w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej na niewielkiej głębokości do około 70 m. Wyniki symulacji numerycznej pochodzą z rejonu silnie zagrożonego zapadliskami, potwierdzonego badaniami geofizycznymi i wierceniami badawczymi oraz występującymi zapadliskami. Zagrożenie zapadliskowe na tym terenie jest bardzo duże, mimo zakończenia eksploatacji rud w latach osiemdziesiątych XX w.

LITERATURA

- BARLA G., BOSHKOV S., PARISEAU W., 1980 — Numerical modeling of block caving at the Grace Mine. Geomechanics applications in underground hardrock mining, Turyn, Włochy, s. 241–256.
- CAŁA M., JARCZYK M., POSTAWA J., 2004 — Numeryczna analiza możliwości utraty stateczności wyrobisk zlokalizowanych na niewielkiej głębokości. *Górnictwo i Geoinżynieria*, R. 28, z. 4/1, s. 69–78.
- CAUDRON M., EMERIAULT F., KASTNER R., AL HEIB, M., 2006 — Collapse of underground cavities and soil – structure interactions: Experimental and numerical models. Proc. of the 1st Euro-Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures, Hammamed, Tunisia, s. 311–316.
- FLORES H., KARZULOVIC A., 2002 — Geotechnical guidelines for a transition from open pit to underground mining. Report to International Caving Study (niepublikowane).
- HOEK E., 2007 — Practical rock engineering, <http://www.rockscience.com>.
- HOEK E., DIEDERICHS M. S., 2006 — Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 43, s. 203–215.
- LLOYD P.W., MOHAMMAD N., REDDISH D.J., 1997 — Surface subsidence prediction techniques for UK coalfields – an innovative numerical modeling approach. Proc. of 15th Mining Congress of Turkey, Red. Guyaguler T., Ersayn S., Bilgen S., Ankara, Turcja, May 6–9, s. 111–124.
- LORIG L., 2000 — The Role of Numerical Modelling in Assessing Cavability. Itasca Consulting Group, Inc., Report to the International Caving Study, ICG00-099-3-16, October 22–25 (niepublikowane).
- LORIG L., BOARD M., POTYONDY D., COETEE M., 1995 — Numerical modeling of caving using continuum and micro-mechanical models. Proc. of CAMI'95 Canadian Conference on Computer Applications in the Mining Industry, Montreal, Quebec, Kanada, October 22–25, 1995, s. 416–424.

- PALMA R., AGARWAL R., 1973 — A study of the cavability of primary ore at the El Teniente Mine. Technical Report from Colombia University, New York, (niepublikowane).
- PIERCE M., LORIG L., 1998 — FLAC^{3D} Analysis of Cavability of the Northparkes E26 Lift 2 Orebody. Itasca Consulting Group, Inc., Report to Northparkes Mines, Parkes, NSW, Australia, November 1998 (niepublikowane).
- PIERCE M., YOUNG P., REYES-MONTES J., PETTITT W., 2006 — Six Monthly Technical Report, Caving Mechanics, Sub-Project No. 4.2: Research and Methodology Improvement and Sub-Project 4.3, Case Study Application. Itasca Consulting Group, Inc., Report to Mass Mining Technology Project, 2004–2007, ICG06-2292-1-Tasks 2-3-14, March.
- PILECKI Z., 2002 — Model geotechniczny górotworu dla potrzeb budowy tunelu drogowego w utworach fliszu karpackiego. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. M-24 (340), s. 383–396.
- POPIOŁEK E., PILECKI Z., 2005 — Ocena przydatności do zabudowy terenów zagrożonych deformacjami nieciągłymi za pomocą metod geofizycznych. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- RECH W., LORIG L., 1992 — Predictive numerical stress analysis of panel caving at the Henderson Mine. Proc. of MASSMIN'92, SAIMM, Johannesburg, s. 55–62.
- SAINSBURY B.L., PIERCE M., MAS IVARS D., 2008 — Simulation of rock mass strength anisotropy and scale effects using a Ubiquitous Joint Rock Mass (UJRM) model. Proc. of the 1st International FLAC/DEM Symposium on Numerical Modeling, August 25–27, Minneapolis, USA.
- SAINSBURY B.L., SAINSBURY D.P., PIERCE M.E., 2011 — A historical review of the development of numerical cave. Proc. of the 2nd International FLAC/DEM Symposium on Numerical Modeling, February 14–16, Melbourne, Australia.
- SALUSTOWICZ A., 1955 — Mechanika Górotworu. Bytom, Wyd. Górniczo-Hutnicze.
- THARP T.M., 1995 — Design against collapse of karst caverns. Karst Geohazards: Engineering and Environmental Problems in Karst Terrane, Red. B. F. Beck, Wyd. Balkema, Rotterdam, s. 397–406.
- VYAZMENSKY A., ELMO D., STEAD D., RANCE J., 2007 — Combined finite-discrete element modeling of surface subsidence associated with block caving mining. Proc. of 1st Canada-U.S. Rock Mechanics Symposium, May 27–31, 2007, Vancouver, Canada, s. 467–475.

NUMERICAL SIMULATION OF A SINKHOLE-FORMING PROCESS UNDER GEOLOGICAL AND MINING CONDITIONS OF THE BYTOM SYNCLINE IN THE AREA OF SHALLOW MINING OF METAL ORE DEPOSITS

ABSTRACT

This work presents the methodology of a numerical simulation of the sinkhole-forming process under geological and mining conditions of the Bytom syncline in the Upper Silesian Coal Basin. Intensive, shallow mining of metal ore deposits was carried out until the 1980s in that area, which is still influenced by the deep

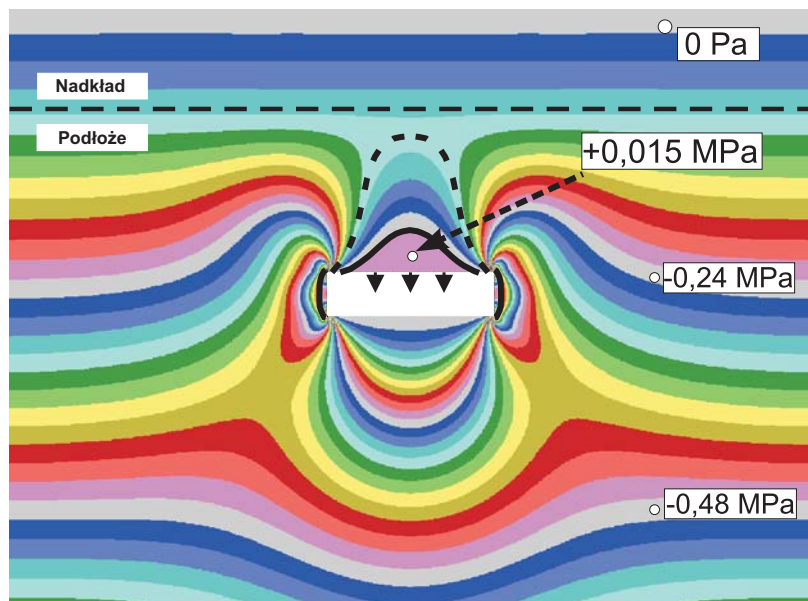
exploitation of hard coal seams. Sinkholes still occur in this region and are activated mainly due to intense precipitation, the spring thaw of snow or the mining of hard coal.

The presented numerical simulation of the development of the sinkhole-forming process in the void roof is composed of four basic stages, from stress redistribution as a result of void formation to the appearance of a sinkhole on the surface of the terrain. The distinctive new solution presented in this work is based on the methodology of determination, by numerical modeling, of the shape of the damage zone in the void roof and the criteria of its propagation to the surface of the terrain. Development of the damage zone, in simulations of the sinkhole-forming process, occurs within the zone of tensile and small compressive stress in the vertical stress field. The maximum extent and shape of the damage zone is determined by the shape of the vertical stress field in the void roof, assuming lack of tensile strength in the rock mass.

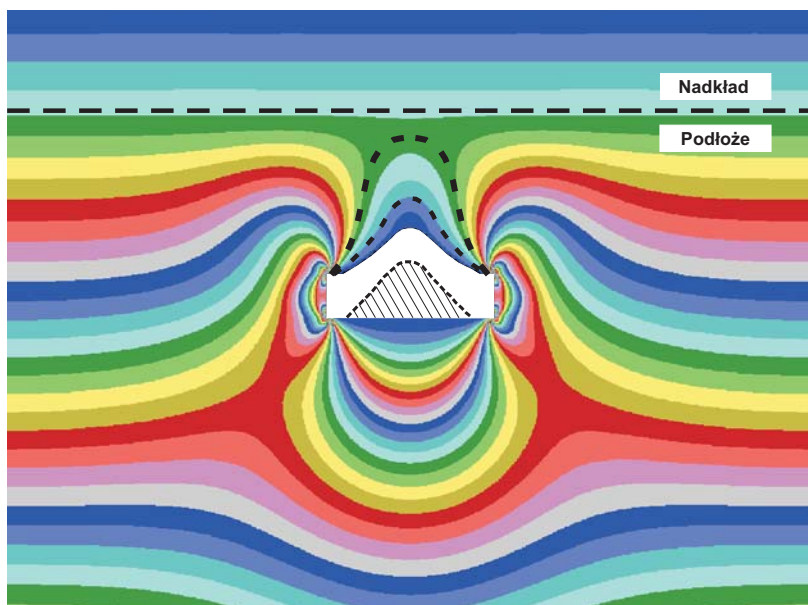
Simulations performed under the conditions of the rock mass structure and properties characteristic for the highly endangered region confirm the possibility of sinkholes occurring on the terrain surface. Simulations were carried out in the elastic-plastic weakening medium using FLAC 2D v. 7.0.

KEY WORDS

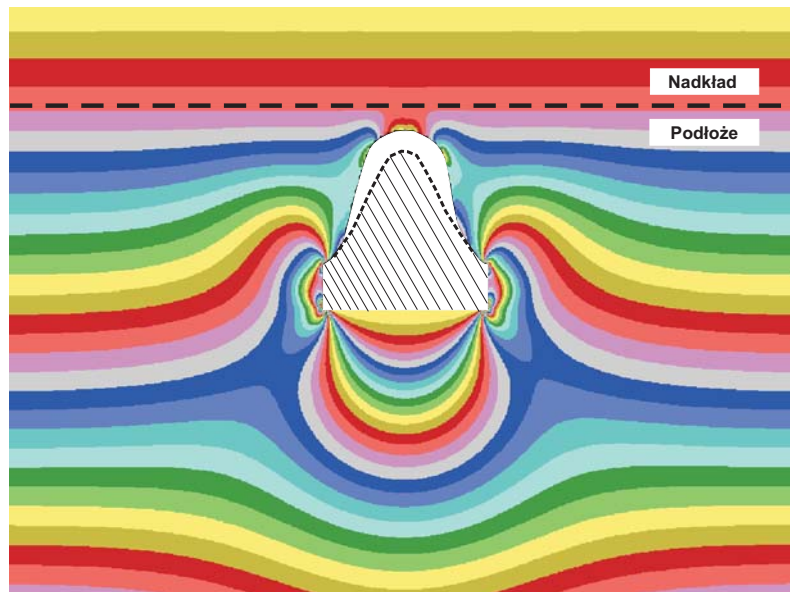
Numerical modeling, sinkhole process, arch stress, shallow exploitation of metal ore deposits, Upper Silesian District



Rys. 6. Redystrybucja naprężenia pierwotnego i rozwój strefy zniszczenia w stropie pustki
 Fig. 6. The vertical stress redistribution and development of the damage zone in the void roof

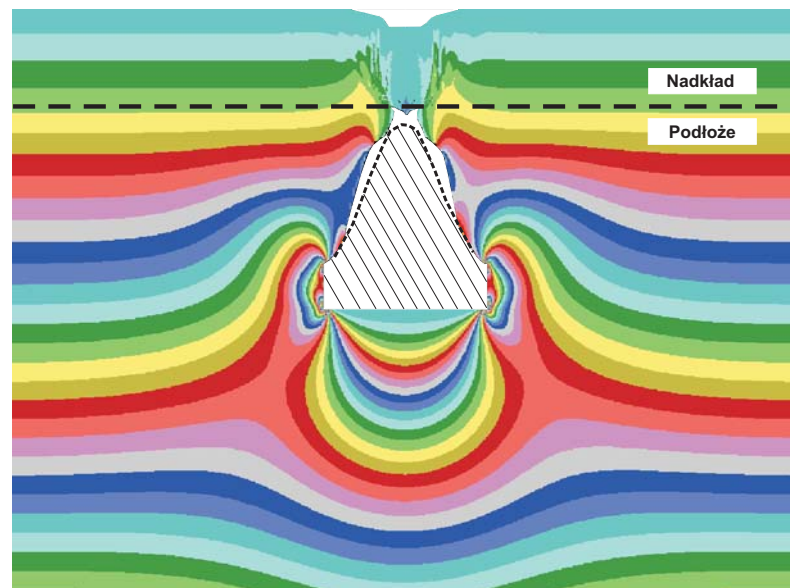


Rys. 7. Zawal stropu pustki obejmującego strefę naprężenia rozciągającego
 Fig. 7. Falling of the void roof within the zone of tensile stress



Rys. 8. Wtórny zawal stropu

Fig. 8. Secondary falling of the void roof



Rys. 9. Przemieszczenie pustki do granicy z luźnym ośrodkiem oraz wystąpienie zapadliska na powierzchni terenu

Fig. 9. Void propagation to the loose ground boundary and the appearance of a sinkhole on the surface of the terrain