

Janusz MAKÓWKA

Główny Instytut Górnictwa, Katowice

Analiza numeryczna przestrzennego rozkładu stanu naprężenia w otoczeniu typowych układów krawędzi eksploatacji zawałowej za pomocą metody elementów odrębnych

Słowa kluczowe

stan naprężenia i przemieszczenia, krawędź eksploatacji, analiza numeryczna

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej wybranych typowych sytuacji wzajemnego położenia frontu czynnej eksploatacji ścianowej względem krawędzi dokonanej eksploatacji systemem zawałowym w pokładzie wyżej leżącym: wchodzenie frontu ściany pod krawędź i pod naroże krawędzi oraz wychodzenie frontu spod krawędzi i spod naroża krawędzi. Przedstawiono przestrzenną zmienność tensora naprężeń. Dokonano porównania naprężeniowej charakterystyki oddziaływania krawędzi eksploatacji określonej dla modelu z pojedynczą krawędzią z charakterystyką krawędzi wg J. Dubińskiego.

1. Wstęp

W opisach stanu naprężenia w otoczeniu krawędzi eksploatacji częstym jest skupianie się na naprężeniu pionowym, jako najważniejszym i determinującym stan obciążenia konstrukcji podziemnych, w szczególności obudów wyrobisk chodnikowych. Tymczasem naprężenia działające w płaszczyźnie poziomej (czy w kierunkach istotnie różnych od pionowego) mogą posiadać wartości porównywalne, a nawet większe niż naprężenia pionowe. Najczęściej spotykane otwarte konstrukcje obudowy podatnej ŁP mają ograniczone możliwości przenoszenia obciążeń działających w poziomie. Potrzebna jest więc świadomość okoliczności, w jakich takie obciążenia mogą wystąpić po to, by obudowy odpowiednio projektować lub zabezpieczać, stosownie do spodziewanego obciążenia.

Eksploatacja prowadzona systemem zawałowym generuje powstawanie systemu nieciągłości w górotworze, który ma istotny wpływ na jego stan naprężenia i odkształcenia. Dobór odpowiedniego narzędzia do modelowania numerycznego takiego górotworu jest trudny i zależny od stawianych celów. W przypadku poszukiwania najbardziej realistycznego obrazu zjawisk zachodzących w bezpośrednim sąsiedztwie krawędzi eksploatacji najbardziej odpowiednim wydaje się metoda elementów odrębnych jako umożliwiająca odwzorowanie górotworu podzielonego na bloki i ulegającego dużym przemieszczeniom.

W niniejszym artykule przedstawiono próbę określenia przestrzennego rozkładu naprężenia w sąsiedztwie typowych układów dwóch krawędzi eksploatacji zawałowej. Skupiono się na sytuacjach, w których czynny front ścianowy przemieszcza się pod pokładem, w którym

uprzednio dokonano wybrania jego części: półpłaszczyzny lub ćwierci, zlokalizowanej nad polem ścianowym lub przed nim, co w możliwych kombinacjach umożliwia zobrazowanie wchodzenie frontu pod krawędź lub naroże krawędzi oraz wychodzenie spod krawędzi lub spod naroża.

2. Metoda elementów odrębnych

Podstawy metody elementów dyskretnych opracował P.A. Cundall; opublikował je na kongresie ISRM w Nancy w 1971 roku [1] 3DEC 4.1 User's Guide, Command Reference, Theory and Background. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, 2007

[2]. Jest to metoda, w której stosowany jest bezpośredni, krokowy (ang. *time marching*) schemat rozwiązywania równań ruchu, z użyciem równań: jawnych, bazujących na metodzie objętości skończonych, lub też niejawnych, bazujących na dyskretyzacji z metody elementów skończonych. Ta wersja metody elementów dyskretnych została nazwana przez Cundalla i Starcka metodą elementów odrębnych. W metodzie dopuszczalne są duże przemieszczenia i obroty odrębnych brył, włącznie z całkowitym oderwaniem od siebie. W toku obliczeń automatycznie rozpoznawane są nowe kontakty między tymi bryłami. Bryły mogą być sztywne lub odkształcalne, elementy, na które są podzielone, podlegają liniowym lub nieliniowym równaniom stanu. Nieciągłości są traktowane jako warunki brzegowe pomiędzy blokami i również podlegają liniowym lub nieliniowym zależnościom siła-przemieszczenie w kierunku normalnym i stycznym. Siły kontaktowe oraz przemieszczenia na stykach obciążonego zbioru bloków znajdują się w drodze obliczeń, które śledzą ruchy bloków. Ruchy te wynikają z rozprzestrzeniania się w systemie bloków zakłóceń wywołanych przez siły zewnętrzne lub masowe. Jest to proces dynamiczny, w którym prędkość propagacji zależy od własności fizycznych dyskretnego systemu. Zachowanie się dynamiczne reprezentowane jest numerycznie przez algorytm krokowego postępowania w czasie, w którym wielkość kroku obliczeniowy jest ograniczona przez założenie, że prędkość i przemieszczenie są stałe w obrębie danego kroku. Krok obliczeniowy jest na tyle mały, że w jego obrębie nie jest możliwe rozprzestrzenienie się zakłóceń pomiędzy danym elementem dyskretnym a elementami bezpośrednio z nim sąsiadującymi. Ograniczenie kroku obliczeniowy stosowane jest zarówno do bloków jak i styków (kontaktów) między blokami. W obliczeniach korzysta się na przemian z zależności siła-przemieszczenie dla wszystkich styków i z równania ruchu dla wszystkich bloków. Ta pierwsza zależność służy do obliczania sił działających na stykach na podstawie znanych przemieszczeń. Równanie ruchu określa ruch bloków wywołany działającymi na nie siłami. Jeśli bloki są odkształcalne, ruch jest obliczany w węzłach siatki elementów skończonych. Na podstawie równań konstytutywnych zachowania się materiału bloków obliczane są następnie nowe wartości naprężeń dla bloków.

Metoda ma szerokie zastosowanie w mechanice górotworu, mechanice gruntów, przeróbce surowców mineralnych, mechanice płynów, systemach wielobryłowych, symulacji robotów, animacji komputerowej itp.

Implementacją dwuwymiarową metody elementów odrębnych jest program UDEC firmy Itasca, rozwinięciem do trzech wymiarów jest program 3DEC tej samej firmy. UDEC i 3DEC bazują na schemacie obliczeniowym Lagrange'a, który jest szczególnie odpowiedni do modelowania dużych przemieszczeń i deformacji ośrodków o budowie blokowej. Programy te są niezwykle przydatne do symulowania i analizy wpływu płaszczyzn o zmniejszonej spójności, spękań i szczelin na zachowanie się górotworu i stateczność wykonywanych w nim

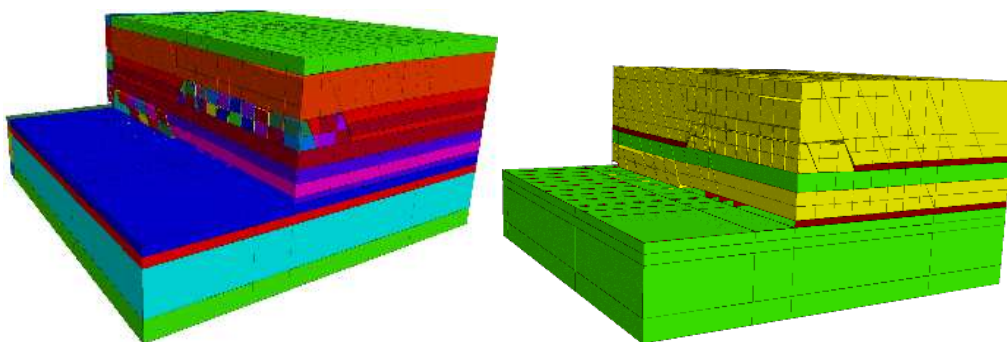
wyrobisk. Stosowane były do szerokiego zakresu zagadnień z zakresu górnictwa podziemnego i odkrywkowego, budownictwa cywilnego i innych dziedzin, w których istotne jest uwzględnienie występowania systemów nieciągłości i wydzielonych brył.

3. Model fizyczny ośrodka

Model fizyczny modelu obejmował:

- dwa pokłady o grubości 3m,
- 30-metrową warstwę iłowca i piaskowca oddzielającą pokłady,
- strop wyższego pokładu o grubości 50m,
- spąg niższego pokładu zbudowany z iłowca o grubości 50m.

W modelu symulowany był postęp ściany poprzez usuwanie ośrodka budującego pokład oraz uwalnianie nieciągłości w stropie, umożliwiając wydzielanie się odrębnych bloków. Rys. 1 przedstawia geometrię modelu. Po lewej kolorami zaznaczono odrębne bloki skalne. Widoczne są również sztuczne nieciągłości, które nie tworzą odrębnych bloków, potrzebne zarówno do prawidłowego późniejszego podziału na strefy deformowalne (ang. *zones*), jak i nieciągłości „uwalniane” w toku modelowania, w celu symulowania postępowania zawалу i wzajemnego przemieszczania się części górotworu. Te ostatnie pozostawały „sklejone” w fazach wcześniejszych w celu uniknięcia nieuzasadnionych zaburzeń w rozkładzie naprężeń. Po prawej kolory obrazują materiały budujące model: brąz oznacza węgiel, zieleń iłowiec a żółć – piaskowiec.



Rys. 1. Przekrój przez model eksploatacji ścianowej z zaznaczeniem kolorami niezależnych bloków (po lewej) i użytych materiałów (po prawej)

Fig. 1. Section by longwall exploitation model with independent block colouring (on the left) and used materials (on the right)

4. Parametry modelu numerycznego

Parametry mechaniczne materiałów użytych do konstrukcji modelu numerycznego przedstawia tabela 1 i 2. Przyjęto sprężysto-plastyczny ośrodek z kryterium wytrzymałościowym Coulomba-Mohra z parametrami zestawionymi w tabeli 1. Dla nieciągłości (styków między blokami) przyjęto model sprężysto-plastyczny z poślizgiem i kontaktem powierzchniowym dla wartości parametrów geomechanicznych zestawionych w tabeli 2 [4,6].

Tabela 1. Materiały użyte w modelu i ich parametry
Table 1. Mterials used in model and its parameters

Rodzaj skały	Wielkość fizyczna	ρ kg/m ³	ν -	E MPa	K MPa	G MPa	φ [°]	c_M MPa	σ_T MPa
	oznaczenie w 3DECu	den			bu	sh	f _{table}	c _{table}	
Pokład - węgiel	mat 1	1400	0.35	1150	1278	425.9	30	1.27	0.44
Strop - piaskowiec drobnoziarnisty	mat 2	2550	0.15	10340	4924	4495.7	27	4.1	3.46
Spąg - iłowiec	mat 3	2750	0.23	8790	5426	3573.2	32	6.6	1.65

Tabela 2. Parametry nieciągłości
Table 2. Joints parameters

Parametry nieciągłości	Sztywność normalna MPa/m	Sztywność styczna MPa/m	Kąt tarcia wewn. [°]	Rezydualny kąt tarcia wewnętrznego [°]	Spójność MPa/m	Wytrzymałość na rozciąganie MPa/m
w węglu	1278	426	30	20	1.3	0.44
w piaskowcu	4924	4496	27	18	4.1	3.46
w iłowcu	5426	3573	32	21.3	6.6	1.65
między iłowcem a węglem	3352	2000	15.5	10.3	1.9	0.52
między węglem a piaskowcem	3101	2461	10.6	7.1	1.5	0.99

Model numeryczny składał się z około 2900 bloków i 279 000 stref deformowanych. W celu ograniczenia zaangażowanej w obliczenia pamięci komputera i czasu obliczeniowego zastosowano podział na strefy deformowalne o zróżnicowanej długości boku czworoboku: większe zagęszczenie i mniejsze rozmiary w obszarze poddawanych później dokładniejszym analizom, mniejsze zagęszczenie i większe rozmiary w obszarach peryferyjnych.

W modelu określono następujące warunki brzegowe:

- dolna płaszczyzna XZ: przemieszczeniowy (prędkość w kierunku Z=0),
- warunek przemieszczeniowy na obu płaszczyznach XY (prędkość w kierunku X=0) i YZ (prędkość w kierunku Y=0) ,

- warunek obciążeniowy na górnej płaszczyźnie XY o wartościach:

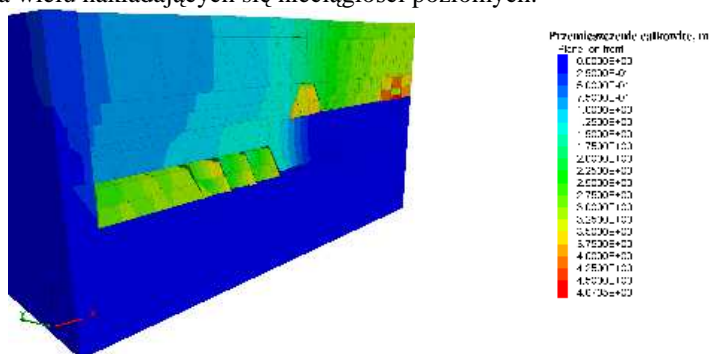
$$\sigma_{zz} = 20 \text{ MPa}, \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 3,53 \text{ MPa} , \text{ naprężenia styczne równe zeru.}$$

5. Wyniki obliczeń

Przebieg obliczeń był następujący. Po wygenerowaniu geometrii modelu i po podziale na strefy deformowalne przeprowadzony był zerowy etap obliczeń do ustabilizowania się modelu, czyli osiągnięcia maksymalnej niezrównoważonej siły w modelu na poziomie 10^{-5} pomiędzy kolejnymi krokami obliczeniowymi. Następnie symulowane było prowadzenie eksploatacji. Najpierw wykonywana była symulowana eksploatacja pokładu wyższego, wytwarzającego krawędź eksploatacji, poprzez wybranie połowy płaszczyzny pokładu w 4 równych krokach. Następnie w pięciu krokach symulowano eksploatację w pokładzie niższym, przy czym w pierwszych trzech etapach obliczenia prowadzono z niższą dokładnością, do $1 \cdot 10^{-4}$ maksymalnej siły niezrównoważonej pomiędzy kolejnymi krokami obliczeniowymi. Przeliczenie jednego kroku obliczeniowego zajmowało komputerowi z procesorem AMD Athlon x2 64 3800+ w przybliżeniu 2 godziny. Przeliczenie całego modelu, z wszystkimi etapami pośrednimi, przy założeniu etapu doprowadzenia modelu bez eksploatacji do stanu równowagi, czterech etapów eksploatacji w pokładzie wytwarzającym krawędź i trzech etapów w pokładzie analizowanym z mniejszą dokładnością oraz ostatniego etapu z dokładnością ostateczną zajmowało łącznie ponad 8 godzin. Przeliczono łącznie cztery modele, nie licząc modeli testowych. W opisie wyników obliczeń znajdują się odwołania do analiz dla pojedynczego pola ścianowego, które nie znalazły miejsca w niniejszym artykule.

5.1. Wchodzenie frontu ściany pod krawędź

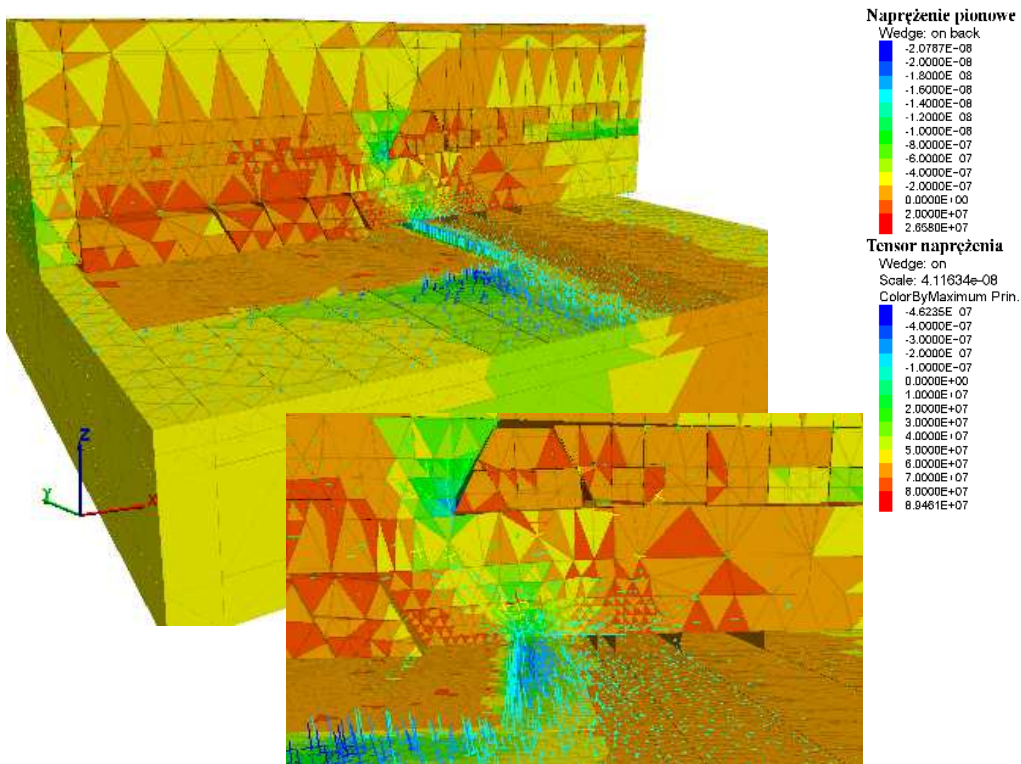
Wchodzenie frontu ścianowego pod krawędź symulowano dla sytuacji, w której pokład uprzednio wybierany znajduje się 30 m nad pokładem analizowanym. Rysunek 2 przedstawia przemieszczenia całkowite w modelu na koniec eksploatacji w pokładzie niższym. Maksymalne przemieszczenia występują na brzegu modelu nad polem ściany w pokładzie wyższym i są raczej wynikiem niedokładności obliczeń w miejscu o zgrubnym podziale na strefy deformowalne. W miejscu występowania bloków zawałowych przemieszczenia są mniejsze, co może być efektem niepełnego dociążenia przez warstwy budujące strop a nie ulegające zawałowi. Jakościowo obraz przemieszczeń jest podobny jak dla pojedynczej ściany, za wyjątkiem strefy osiadania nad polem ścianowym w pokładzie wyższym. Rozkład przemieszczeń na nieciągłościach niestety nie uwidacznia ich dostatecznie dobrze z powodu występowania wielu nakładających się nieciągłości poziomych.



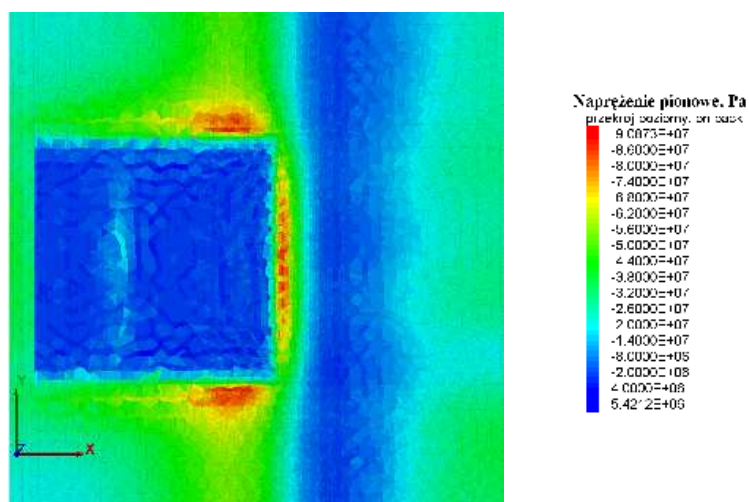
Rys. 2. Przemieszczenie całkowite w modelu symulującym wchodzenie ściany pod krawędź
 Fig. 2. Displacement magnitude in model simulating longwall front entering under gob edge

Rozkład naprężenia na wycinku modelu jest przedstawiony na rysunku 3. Front ściany w pokładzie niższym wchodzi w obszar odprężony eksploatacją w pokładzie wyższym, ale wytwarza strefę koncentracji naprężenia przed swoim czołem, tak jak w rzeczywistości. Ciekawe zjawiska zachodzą w stropie bezpośrednim i zasadniczym w sąsiedztwie frontu ściany. Pokazano to na zamieszczonym wycinku. Otóż w miejsce charakterystycznego układu kierunku naprężenia σ_1 po owalu, występuje tu dominacja kierunku poziomego tego naprężenia daleko przed front ściany w pokładzie niższym.

Rozkład naprężenia pionowego na płaszczyźnie poziomej, przedstawiony na rys. 4, odwzorowuje sytuację górnictwem w ten sposób, że wyraźnie widoczna jest strefa odprężona pod częścią obszaru wybrania w pokładzie wyższym (część dalsza uległa ponownemu częściowemu zaciśnięciu i dociążeniu). Strefa koncentracji naprężenia przed frontem ma mniejszą szerokość, ale wyższą wartość naprężenia, przekraczającą 90 MPa, natomiast po obu stronach pola ścianowego ukształtowały się strefy bardziej rozległe i charakteryzujące się wyższymi wartościami naprężeń, które pochodzą od nakładania się oddziaływania starej i nowo wytwarzanej krawędzi.



Rys. 3. Rozkład naprężenia w modelu symulującym wchodzenie pod krawędź
Fig. 3. Stress distribution in longitudinal cross-section by model simulating longwall front entering under gob edge



Rys. 4. Napężenie pionowe w przekroju poziomym w spągu pod pokładem w modelu symulującym wchodzenie pod krawędź

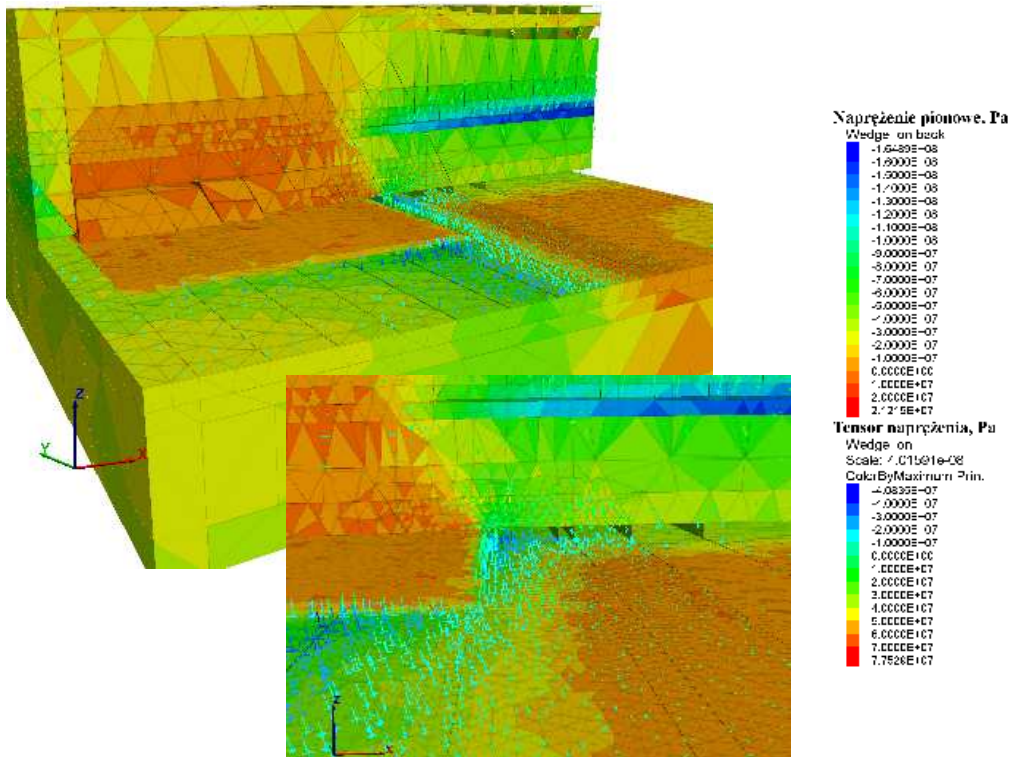
Fig. Vertical stressing longwall floor in longitudinal crosssection by model simulating longwall front entering under gob edge

5.2. Wchodzenie frontu ściany pod narożnik krawędzi

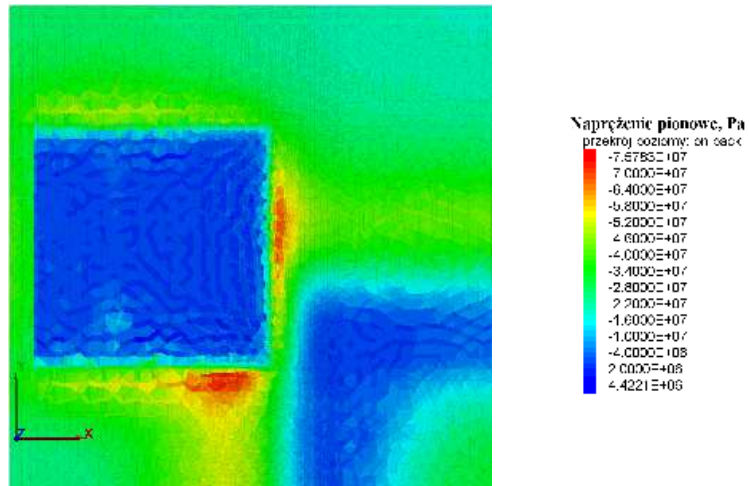
Symulację wchodzenia frontu ściany pod narożnik krawędzi w pokładzie wyżej zalegającym przeprowadzono w ten sposób, że wstępnie wybrano ¼ powierzchni pokładu wyższego, a następnie symulowano postęp ściany w pokładzie niżej zalegającym. Pominięto rozkład przemieszczeń całkowitych w modelu, gdyż jakościowo są podobnie jak w przypadku poprzednim.

Rozkład napężenia - rys. 5 - jest w tym przypadku bardziej zbliżony do rozkładu wokół frontu eksploatacji pojedynczą ścianą. Wynika to z braku ukształtowania się w płaszczyźnie pionowej przekroju obszaru odprężonego, lecz występuje w nim wyższa koncentracja napężenia pionowego, wynikającego z oddziaływania krawędzi pokładu wyższego. Wynika z tego, że przed frontem ściany w pokładzie niższym napężenie σ_1 ma kierunek pionowy. Ogólnie w linii przekroju obserwowane są bardzo wysokie napężenia ściskające, przekraczające 164 MPa.

Na płaszczyźnie pokładu napężenie pionowe również osiąga wysokie wartości, choć nie tak ekstremalne. Rysunek 6 pozwala stwierdzić, że maksymalna wartość napężenia osiąga 75 MPa, czyli 4-krotnie większa od napężenia pierowtnego dla tej głębokości.



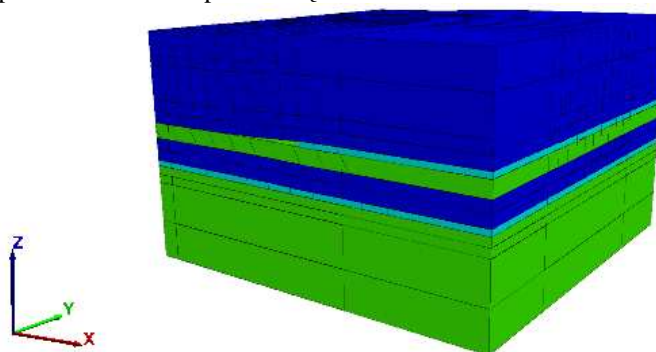
Rys. 5. Rozkład naprężenia w modelu symulującym wchodzenie pod narożnik
Fig. 5. Stress distribution in longitudinal crosssection by model simulating longwall front entering under gob corner



Rys. 6. Naprężenie pionowe w przekroju poziomym w spągu pod pokładem w modelu symulującym wchodzenie pod narożnik
Fig. 6. Vertical stress in longwall floor in horizontal crosssection by model simulating longwall front entering under gob corner

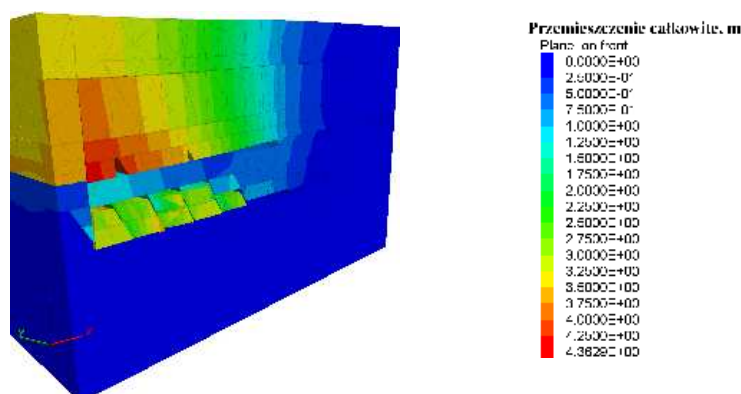
5.3. Wychodzenie frontu ściany spod krawędzi

Symulacja wychodzenia frontu ściany spod krawędzi została przeprowadzona w ten sposób, że w czterech krokach wybrano połowę powierzchni pokładu wyższego w części nad linią rozpoczęcia eksploatacji ścianą w pokładzie niższym. Taki etap rozwoju sytuacji górniczej przedstawia rys. 7. W następnych krokach prowadzono eksploatację ścianą w pokładzie niższym. Budowa geologiczna górotworu, tzn. układ i grubości warstw pozostały te same, co w przypadku wchodzenia pod krawędź.



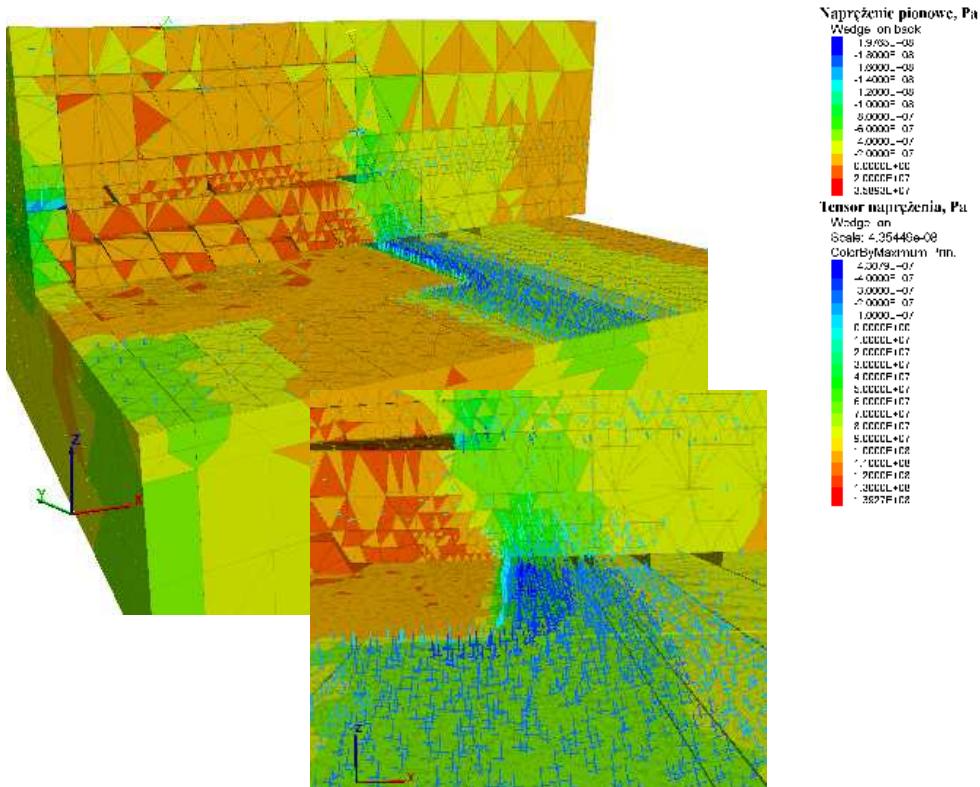
Rys. 7. Budowa modelu numerycznego symulującego wychodzenie frontu ściany spod krawędzi
Fig. 7. Structure of numerical model simulating coming out from under gob edge

Obraz przemieszczenia całkowitego w tak zbudowanym modelu na koniec symulacji przedstawia rys. 8. Największe przemieszczenia zachodzą w części stropu, która uległa podwójnemu podebraniu oraz w niżej leżących warstwach stropowych pokładu wyższego. Strop nad zrobami pokładu niższego nie przemieścił się do strefy zawałowej, czego powodem może być z jednej strony mniejsze obciążenie po wybraniu ściany w pokładzie wyższym, z drugiej - zbyt mały wybieg ściany w pokładzie niższym, nie pozwalający w pełni ukształtować się zawałowi nad tą ścianą.



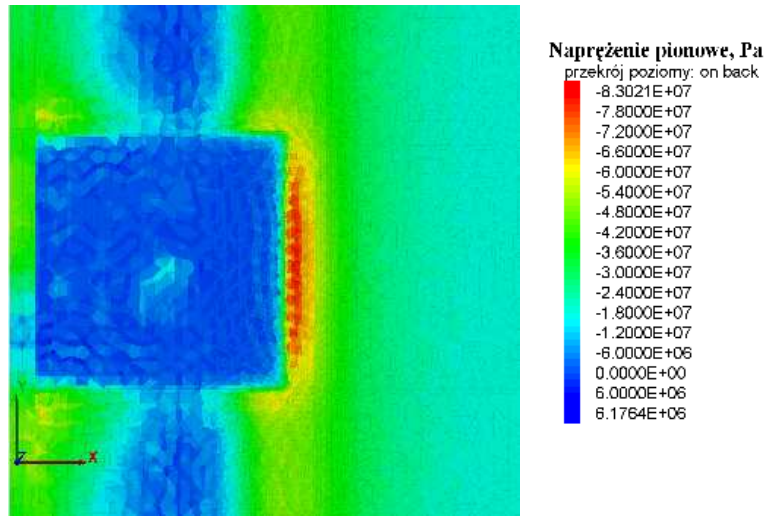
Rys. 8. Przemieszczenie całkowite w przekroju podłużnym w modelu symulującym wychodzenie spod krawędzi
Fig. 8. Displacement magnitude in longitudinal crosssection in model simulating coming out from under gob edge

Obraz naprężeń pionowych na wycinku poprowadzonym wzdłuż osi ściany i po spągu pokładu przedstawia rysunek 9. Przed frontem ściany występuje strefa intensywnego ściskania, osiągającego od 43 do 80 MPa. W sytuacji, gdy front ściany nieznacznie przekroczył rzut krawędzi „starej” eksploatacji, obserwuje się przed nim zorientowanie naprężenia σ_1 do kierunku pionowego lub zbliżonego do pionowego, natomiast tuż za frontem gwałtownie zmienia się na poziomy, osiągając dużo mniejsze wartości.



Rys. 9. Rozkład naprężenia w modelu symulującym wychodzenie spod krawędzi
Fig. 9. Stress distribution in model simulating coming out from under gob edge

W płaszczyźnie poziomej tuż pod płaszczyzną spągu pokładu - rys. 10 - występuje tylko jedna strefa wysokich naprężeń ściskających o wartości maksymalnej naprężenia przekraczającej 83 MPa. Strefy boczne zostały w sposób istotny ograniczone dzięki odprężeniu wywołanemu eksploatacją w pokładzie wyżej leżącym.



Rys. 10. Napężenie pionowe w przekroju poziomym w spągu pod pokładem w modelu symulującym wychodzenie spod krawędzi

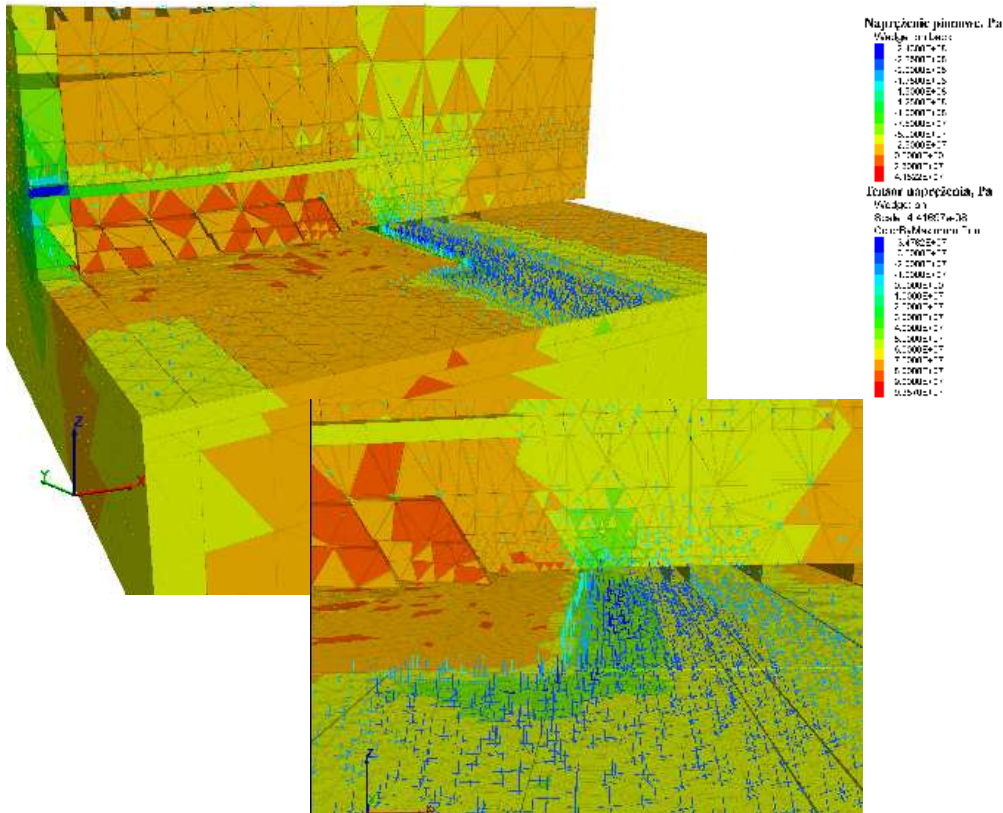
Fig. 10. Vertical stress in longwall floor in horizontal crosssection in model simulating coming out from under gob edge

5.4. Wychodzenie frontu ściany spod narożnika krawędzi

Podobnie jak w przypadku wchodzenia pod narożnik, dla przypadku wychodzenia frontu ściany spod narożnika krawędzi wyżej leżącego pokładu, we wstępnej fazie analizy sytuacji górniczej wybrano ¼ powierzchni pokładu z tym, że w części nad polem analizowanej ściany.

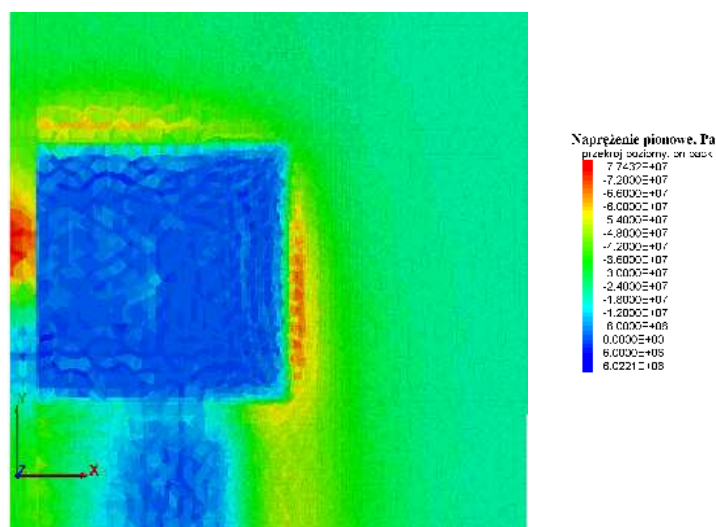
Rozkład przemieszczenia całkowitego (nie zamieszczony w artykule z powodu ograniczonego miejsca) jest jakościowo podobny do tego właściwego dla pojedynczej krawędzi, gdyż w linii przekroju w osi ściany, pokrywającej się z krawędzią narożnika, nie są odzwierciedlone przemieszczenia wynikające z wybrania części pokładu wyższego. Wynikają one z następujących czynników: przemieszczenia do przestrzeni wybranej przez eksploatację ścianą w pokładzie niższym, częściowego wciśnięcia naroży bloków zawałowych do spągu oraz częściowego przemieszczenia tych bloków w kierunku frontu ściany. Maksymalna wartość przemieszczenia przekracza 4.2m. Zauważyć należy, że w stropie przed frontem ściany występują również przemieszczenia rzędu 20 cm, co wynika z uginania się skał stropowych i przemieszczaniem się ich w poziomie w kierunku do zrobów.

Interesująco przedstawia się rozkład napężenia pionowego i tensora naprężeń - rys. 11. Wzdłuż krawędzi prowadzonej ściany występuje strefa wysokiego naprężenia ściskającego, dochodzącego miejscami do 100 MPa, która sięga do około 6m ponad pokład. Natomiast kierunek największej składowej naprężenia głównego przechodzi łagodnie z pionowego przed frontem ściany do poziomego nad zrobami. Kierunek ten utrzymuje się w większej odległości nad zrobami, co nie zachodzi w przypadku odosobnionej krawędzi eksploatacji.



Rys. 11. Rozkład naprężenia w modelu symulującym wychodzenie spod narożnika
Fig. 11. Stress distribution in model simulating coming out from under gob corner

Rozkład naprężenia pionowego na płaszczyźnie, zaprezentowany na rys. 12, jest wynikiem złożenia się oddziaływań obu symulowanych eksploatacji. W efekcie obserwowane są trzy strefy wysokich naprężeń ściskających. Pierwsza towarzyszy frontowi ściany i naprężenia w jej obrębie i jest efektem nakładania się oddziaływania krawędzi w pokładzie wyżej leżącym z oddziaływaniem frontu ściany, co wywołuje naprężenia przekraczające 70 MPa. Druga strefa to strefa oddziaływania bocznej krawędzi prowadzonej ściany i maksimum naprężeń tam obserwowanych to 60 MPa. Strefa trzecia to oddziaływanie krawędzi z pokładu wyższego na wąski pas calizny pozostawionej na brzegu modelu, ale strefę tą trudno interpretować w kategoriach innych, niż warunków brzegowych prowadzonych symulacji.



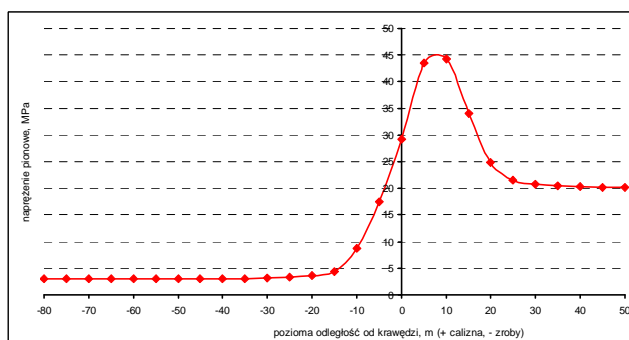
Rys. 12. Napięcie pionowe w przekroju poziomym w śpągu pod pokładem w modelu symulującym wychodzenie spod narożnika

Fig. 12. Vertical stress in longwall floor in horizontal crosssection in model simulating coming out from under gob corner

6. Porównanie wyników z charakterystyką krawędzi według J. Dubińskiego

Prof. Józef Dubiński w swojej pracy „Sejsmiczna metoda wyprzedzającej oceny zagrożenia wstrząsami górnictwymi w kopalniach węgla kamiennego” [3] przedstawił charakterystyki oddziaływania krawędzi eksploatacji dla systemów eksploatacji zawałowej i podsadzkowej.

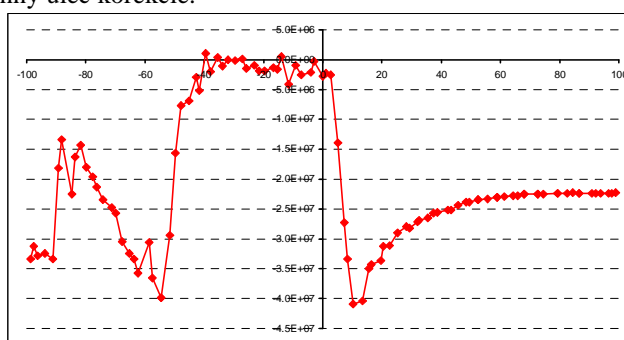
W celu dokonania porównania z wynikami przeprowadzonych obliczeń wykonano wykres odpowiadający poziomemu przekrojowi, 10m nad płaszczyzną pokładu (rys. 13). Maksimum naprężenia jest tu osiągany w odległości 10m od granicy pokład-zroby, wynosi ono 45 MPa, a oddziaływanie zanika około 30 m od krawędzi.



Rys. 13. Napięcie pionowe w otoczeniu krawędzi zawałowej 10m nad pokładem dla eksploatacji na poziomie 800m wg Dubińskiego [2]

Fig. 13. Vertical stress surrounding gob edge 10m over seam in level 800m according to Dubinski [2]

Wykres naprężenia dla linii przekroju poprowadzonego w analogicznym miejscu w modelu numerycznym przedstawia rys. 14. Na rysunku można zauważyć maksimum koncentracji naprężenia w odległości 10m od krawędzi i wynosi 41 MPa. Istotnie podwyższony poziom naprężenia utrzymuje się nawet do 50m od krawędzi. Po stronie zrobów charakterystyka przedstawia naprężenia bliskie zero do około 40m od krawędzi, zaś dalej następuje gwałtowny skok naprężenia nawet do poziomu 40 MPa. Jak pamiętamy z obrazów przemieszczeń bloków w przestrzeni zrobów, duże bloki skalne opadając wywierały nacisk na spąg. Przedstawiony obraz naprężeń jest wynikiem tego zjawiska. Niewątpliwie w rzeczywistości zjawisko takie występuje raczej rzadko, tym niemniej faktem jest występowanie zaciskania zrobów w dużej odległości od krawędzi eksploatacji i w tym zakresie standardowe charakterystyki krawędzi eksploatacji powinny ulec korekcie.



Rys. 14. Naprężenie pionowe w otoczeniu krawędzi zawałowej 10 m nad pokładem według wyników dla modelu z pojedynczą eksploatacją

Fig. 14. Vertical stress surrounding gob edge 10m over seam in model with single gob edge

7. Podsumowanie

Przeprowadzone analizy na modelach numerycznych symulujących eksploatację ścianową miały na celu zbadanie charakteru rozkładu naprężeń i przemieszczeń w różnych sytuacjach górniczych. W modelach użyto rzeczywistych parametrów geotechnicznych węgla i skał. Rozmiary geometryczne modelu zredukowano w stosunku do rzeczywistych, poprzez założenie długości frontu ściany równego 100m, grubość skał stropowych i spągowych ograniczono do 40m, ograniczono podział warstwowy skał, podobnie jak gęstość podziału na strefy deformowalne. Wszystkie te uproszczenia przyczyniły się do wystąpienia pewnych niedokładności uzyskanych wyników, nieoczekiwanych zakłóceń oraz rozbieżności w stosunku do charakterystyki odniesienia, za jaką przyjęto charakterystykę krawędzi eksploatacji określoną przez J. Dublińskiego na podstawie pomiarów sejsmicznych in situ.

Pomimo tego uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie obserwacji, które mogą służyć do uzupełnienia i poszerzenia informacji o oddziaływaniu krawędzi eksploatacji na stan naprężenia w jej otoczeniu, w szczególności dla przypadków, gdy zachodzi nakładanie się oddziaływań dwóch krawędzi.

1. W używanych dotychczas charakterystykach efekt odprężenia jest niezależny od poziomej odległości od frontu ściany czy krawędzi eksploatacji. Tymczasem zaobserwować się daje zanik tego efektu wraz z odległością. Odległość ta może ulegać zmianie w zależności od warunków stropowych.

2. Rozkład stref koncentracji naprężenia pionowego na płaszczyźnie poziomej charakteryzuje się redukcją naprężenia w sąsiedztwie naroży pola ścianowego/pola zrobów. Kształt stref koncentracji naprężenia przybiera formę zbliżoną do owalu, w kontraście do przyjmowanych zwykle stref o charakterze pasów.

3. Składowe tensora naprężenia w sąsiedztwie krawędzi eksploatacji ulegają istotnym zmianom co do wartości jak i kierunku działania, a zwłaszcza największego naprężenia głównego σ_1 . W całości przed frontem ściany kierunek tego naprężenia jest w przybliżeniu pionowy, następnie wraz z przemieszczaniem się ponad pole ścianowe i do zrobów kierunek naprężenia σ_1 przechodzi w poziomy, by wrócić do pionowego w strefie pełnego osiadania gruzowiska zawałowego.

4. W przypadku wchodzenia frontu ściany pod krawędź eksploatacji pokładu wyższego kierunku działania naprężenia σ_1 utrzymuje się w poziomie na dużej odległości od frontu ściany. Oznacza to inne warunki obciążenia obudowy wyrobisk korytarzowych.

Praca powstała w oparciu o wyniki pracy statutowej GIG o numerze 11030199-141 [5].

Literatura

- [1] 3DEC 4.1 User's Guide, Command Reference, Theory and Background. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, 2007
- [2] Cundall P.A., 1971: A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems [W:] Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics (Nancy, France, 1971), Vol. 1, Paper No. II-8.
- [3] Dubiński J., 1989: Sejsmiczna metoda wyprzedzającej oceny zagrożenia wstrząsami górnictwymi w kopalniach węgla kamiennego. Prace GIG. Seria dodatkowa. Katowice
- [4] Makówka J., 2002: Wpływ parametrów płaszczyzn nieciągłości na modelowane numerycznie procesy deformacyjne furtki eksploatacyjnej LGOM. Materiały XXV Zimowej Szkoły Mechaniki Górniczej, Wrocław.
- [5] Makówka J., 2009: Analiza rozkładu naprężenia 3D w otoczeniu wyrobiska chodnikowego i krawędzi eksploatacji oraz typowych przestrzennych wzajemnych lokalizacji wyrobisk górniczych. Dokumentacja pracy statutowej GIG nr 11030199-141. Niepublikowana
- [6] Walaszczyk J., Makówka J., 2005: Matematyczny model niszczenia strypy stropu uwarstwionego. Kwartalnik AGH „Górnictwo i geoinżynieria”, rok 29, zeszyt 3/1, Kraków.

Numerical analyze of special stress distribution in surroundings of typical gob edges configurations using distinct element method

Keywords

state of stress and deformation, gob edge, numerical analyze

Abstract

In the paper numerical analyze results of some typical mutual orientations of longwall front and previously made gob edge in incumbent coal bed has been presented. Spatial variation of stress tensor is shown. Stress characteristic of exploitation edge determined in single edge model is compared with edge characteristic according to J. Dubinski.

Przekazano: 26kwietnia 2010 r.