

Jerzy FLISIAK*, Marek CAŁA*, Antoni TAJDUŚ*

MOŻLIWOŚCI NUMERYCZNEGO MODELOWANIA FILAROWO-KOMOROWEGO SYSTEMU EKSPLOATACJI

W poniższym referacie zajęto się problematyką numerycznego modelowania eksploatacji systemem filarowo-komorowym z ugięciem stropu. Dla wybranej sytuacji górniczo-geologicznej przeprowadzono szereg symulacji stanu naprężenia, przemieszczenia i wyężenia w otoczeniu filarów i komór. Obliczenia wykonano w dwóch wariantach. W wariacie pierwszym w płaskim stanie odkształcenia (2D) za pomocą programu Metody Różnic Skończonych FLAC. W wariacie drugim w przestrzennym stanie odkształcenia (3D) za pomocą programu Metody Elementów Skończonych COSMOS/M. Skupiono się tutaj na analizie zasięgu stref uplastycznienia, które występują w stropach poszczególnych komór i na skrzyżowaniach. Okazało się, że przyjęcie do obliczeń płaskiego modelu numerycznego daje zupełnie różne wyniki w porównaniu do modelowania 3D. Stawia to pod znakiem zapytania celowość stosowania płaskich modeli numerycznych dla opisu stanu naprężenia podczas eksploatacji systemem filarowo-komorowym.

1. WPROWADZENIE

Od wielu lat podejmowane są próby modelowania eksploatacji systemem filarowo-komorowym za pomocą metod numerycznych. Stosuje się tutaj różne metody numeryczne: Metodę Elementów Skończonych, Metodę Elementów Brzegowych, Metodę Różnic Skończonych lub też metody hybrydowe będące kombinacją wyżej wspomnianych.

Celem niniejszego referatu jest próba porównania wyników obliczeń numerycznych przeprowadzonych w płaskim stanie odkształcenia (2D) z wynikami obliczeń dla przestrzennego stanu odkształcenia (3D). Love [3] podaje, że przemieszczenia konturu kołowego tunelu są dwukrotnie większe niż przemieszczenia sfery o takiej samej średnicy przy założeniu hydrostatycznego stanu naprężenia.

Dla celów modelowania numerycznego na podstawie pracy [5] przyjęto zmienne parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe filarów w funkcji ich odległości od czoła frontu. Na podstawie analizy wyników wielu pomiarów prowadzonych *in situ* uzyskano uśrednioną krzywą konwergencji w zależności od odległości od czoła przodka. Przyjmując, dla uproszczenia że konwergencja jest wynikiem jednakowych przemieszczeń stropu i spagu, na podstawie tej krzywej oszacowano wartości przemieszczeń pionowych stropu w zależności od odległości od czoła przodka, które wykorzystano do kalibracji modelu.

Dla uzyskania wartości pomierzonych przemieszczeń zastosowano przeliczniki zaproponowane w pracy [4] dla obliczeń w płaskim stanie odkształcenia. Zaproponowano tam przeliczniki pomiędzy własnościami wytrzymałościowymi i odkształceniowymi próbki i górotworu. Zaleca się aby parametry wytrzymałościowe zmniejszyć do 60 %, a parametry

odkształceniowe zmniejszyć do 36 % (w stosunku do parametrów próbki). Po przeliczeniu kilkudziesięciu różnych modeli numerycznych udało się, metodą odwrotną, uzyskać krzywą osiadania stropu zbliżoną do krzywej uzyskanej z pomiarów połowych.

Obliczenia wykonywano w dwóch wariantach. W wariacie pierwszym przeprowadzono szereg obliczeń w płaskim stanie odkształcenia. Miały one pokazać jaki jest wpływ różnych czynników na zasięg stref uplastycznienia w stropie komory.

W drugim wariacie obliczeń przeprowadzono obliczenia w przestrzennym stanie odkształcenia z zastosowaniem programu MES COSMOS/M. Obliczenia te miały na celu określenie zasięgu stref uplastycznienia na skrzyżowaniach.

2. MODELOWANIE W PŁASKIM STANIE ODKSZTAŁCENIA

Dla realizacji celów sprecyzowanych we wprowadzeniu zrealizowano program obliczeń numerycznych obejmujący przeliczenie około 100 modeli numerycznych różniących się między sobą: szerokością frontu eksploatacyjnego, litologią warstw stropowych, wysokością furty eksploatacyjnej (co było równoważne wysokości komory), długością filarów, szerokością komór oraz parametrami wytrzymałościowymi warstw stropowych.

Do obliczeń numerycznych wykorzystano pakiet programów metody różnic skończonych FLAC - wersja 3.4, firmy ITASCA [2].

We wszystkich zbudowanych modelach przyjęto, że warstwa rud miedzi o grubości 4 m spoczywa na grubej warstwie czerwonego spagowca. Ponad furta zalega warstwa dolomitów o grubości 60 m, na której spoczywa warstwa anhydrytów o miąższości 140 m i dalej warstwa pstrego piaskowca [5].

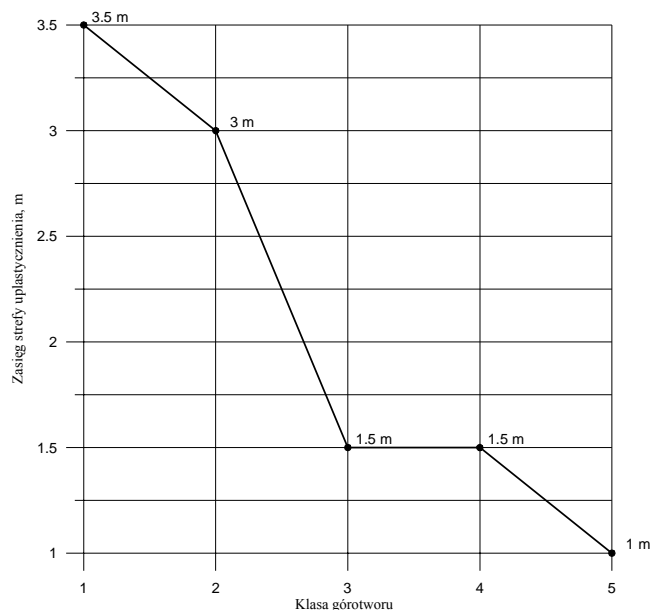
W tabeli 1 zebrano parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe poszczególnych warstw skalnych oraz filarów dobrane drogą analizy odwrotnej:

Tabela 1 Parametry mechaniczne warstw skalnych i filarów

Warstwa/filar	E, MPa	ν	c, MPa	φ , deg	ρ , kg/m ³
czerwony spagowiec	6500	0.14	4	46.5	2300
strop	22319	0.255	9.9	63.5	2450
furta	4858.5	0.185	3.9	60.5	2450
wapienie i dolomity	45600	0.255	16.5	63.5	2450
anhydryt	55500	0.26	16.5	64	2850
pstry piaskowiec	28500	0.17	12.5	59	2300
1 filar	4858.5	0.185	3.9	60.5	2450
2 filar	4858.5	0.185	3.9	45	2450
3 filar	2254	0.185	3.232	45	2450
4 filar	2151	0.185	3.17	45	2450
5 filar	1910	0.185	3.05	45	2450
zroby zawałowe	100	0.25	0.1	30	2000

Zasadnicza część symulacji numerycznych sprowadzała się do określenia zasięgu stref uplastycznienia dla różnych przyjętych modeli górotworu. Obliczenia te przeprowadzono zmieniając długość wybiegu frontu (120 m, 150 m, 200 m), wysokość furty (przyjmowano wysokość komory równą wysokości furty - 2 m, 4 m, 7 m), długość filarów (10 m, 16 m, 32 m) oraz szerokość komór (4 m, 7 m, 9 m).

Wszystkie obliczenia dla powyższych modeli numerycznych przeprowadzono dla średnich parametrów wytrzymałościowych przyjętych do obliczeń w pierwszym etapie opracowania. Odpowiadają one mniej więcej III klasie stropu (strop średni) wg klasyfikacji Cuprum.



Rys.1. Zasięg stref uplastycznienia w stropie komór dla poszczególnych klas stropu
 Fig.1. Plastic zone range for different roof classes

W trakcie analizy wyników obliczeń stwierdzono jednak, że konieczne jest jeszcze sprawdzenia jaki wpływ na zasięg stref uplastycznienia mają parametry wytrzymałościowe warstw stropowych.

Dodatkowo przeprowadzono obliczenia dla kilkunastu modeli numerycznych, w których przyjęto parametry wytrzymałościowe jak dla stropów zaliczanych do klas I i II (stropy słabe) oraz jak dla stropów zaliczanych do klasy IV i V (stropy mocne). Obliczenia te przeprowadzono zakładając długość wybiegu frontu równą 200 m, zaś długość filarów przyjęto równą 16 m.

Analiza wyników obliczeń pozwala na stwierdzenie że, przy przyjętym sposobie modelowania, zasięg stref uplastycznienia w otoczeniu poszczególnych komór nie jest zależny od odległości od czoła frontu eksploatacyjnego, długości wybiegu frontu, długości filarów ani od wysokości komór. Na rys.1 pokazano wysokość stref uplastycznienia w stropie komory w zależności od przyjętej klasy górotworu dla komór o szerokości 8 m i filarów o długości 16 m. We wszystkich analizowanych przypadkach maksymalne wysokości stref uplastycznienia w stropie komory występowały w pobliżu jej ociosów. Można więc stwierdzić, że z modelowania 2D wynika, że zasięg stref uplastycznienia, dla analizowanych geometrii systemu, jest zależny tylko od szerokości komór oraz od parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych warstw stropowych.

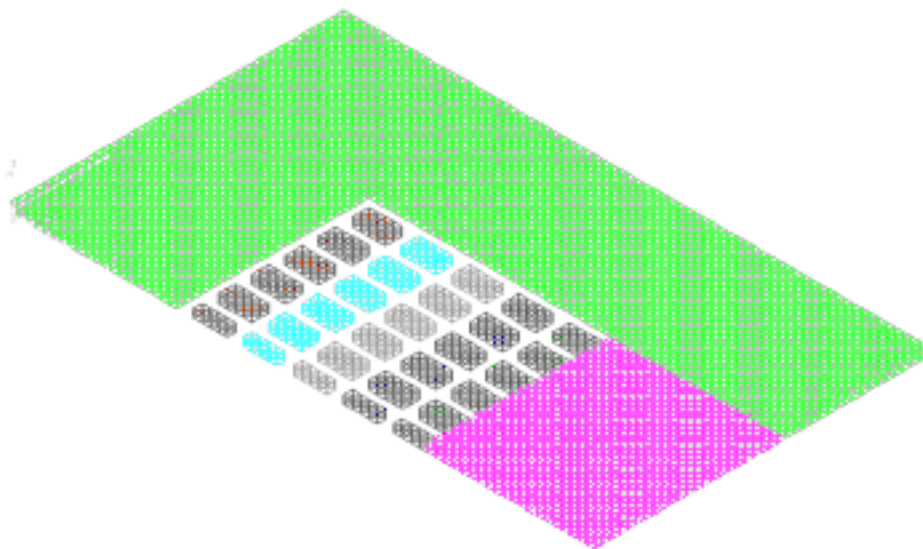
3. MODELOWANIE W PRZESTRZENNYM STANIE ODKSZTAŁCENIA

Głównym celem rozważań zawartych w niniejszym rozdziale było określenie wielkości stref uplastycznienia (zniszczenia) w rejonie skrzyżowań komór wykonywanych przy eksploatacji rud miedzi systemem filarowo-komorowym. Dla określenia wielkości tych

stref konieczne było zbudowanie modeli przestrzennych, gdyż tylko one umożliwiają uwzględnienie wpływu układu komór i filarów na stan naprężenia i wyężenia górotworu.

Do obliczeń numerycznych wykorzystano pakiet programów metody elementów skończonych COSMOS/M - wersja 2.5, firmy Structural and Analysis Corporation [1]. Dla określenia zasięgu stref uplastycznionych w warstwie stropowej z górotworu wycięto kostkę prostopadłościenną o wymiarach: - długość - 280 m, - szerokość - 160 m, - wysokość - 300 m. Przyjęto taką samą litologię warstw jak dla modelowania płaskiego.

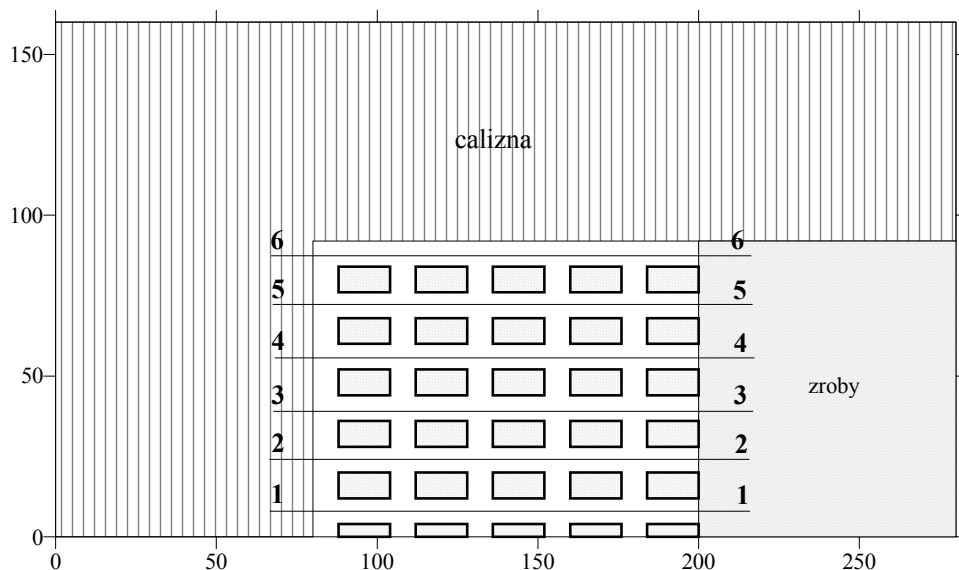
Dla rozpatrywanych modeli wygenerowano siatkę elementów skończonych o kształcie prostopadłościennym, różnicując w odpowiednich strefach własności odkształceniowe i wytrzymałościowe górotworu, zgodnie z informacjami zawartymi w poprzednich rozdziałach. Przy modelowaniu eksploatacji systemem filarowo-komorowym przyjęto, że szerokość komór wynosi 8 m, a filary mają długość 16 m i szerokość 8 m (rys. 2).



Rys.2. Podział rejonu eksploatacji na elementy
Fig.2. Finite element mesh for rooms and pillars

Przyjęto również, że wybieg frontu eksploatacji (odległość od czoła frontu do krawędzi zrobów wynosi 200 m, a szerokość pola eksploatacyjnego wynosi 184 m. W obszarze takim zlokalizowanych jest 5 rzędów komór, przy czym w każdym rzędzie znajduje się 11 filarów (łącznie 55 filarów). Ze względu na przyjętą symetrię pola eksploatacyjnego ograniczono się do rozpatrywania jego połowy. Liczba elementów w modelach wynosiła 95 530 a liczba węzłów 95 804. Na brzegach zadano przemieszczeniowe warunki brzegowe. Górną powierzchnię modelu obciążono ciśnieniem pionowym o wartości $p_z = 16.5$ MPa, zastępującym oddziaływanie skał nadległych. W obliczeniach uwzględniano ciężar własny ośrodka. W obliczeniach założono, że górotwór ma cechy ośrodka sprężysto-plastycznego Druckera-Pragera. Obliczenia przeprowadzono dla pięciu klas skał stropowych, różnicując w poszczególnych modelach wartości parametrów wytrzymałościowych w warstwie dolomitów zalegających w stropie złoża.

W oparciu o wyniki uzyskane z obliczeń określono zasięgi stref uplastycznienia w



Rys.3. Lokalizacja przekrojów

Fig.2. Localisation of cross-sections

stropie komór w środku skrzyżowań, w sześciu przekrojach poprowadzonych przez środek komór, prostopadłe do czoła frontu. Lokalizację tych przekrojów ilustruje rysunek 3.

Wykorzystując wyniki obliczeń sporządzono wykresy zmienności zasięgu stref uplastycznienia w poszczególnych przekrojach, w funkcji odległości od czoła frontu eksploatacyjnego. Wykresy te zamieszczono na kolejnych rysunkach:

- rys. 4 – zasięg stref uplastycznienia w przekroju 1-1,
- rys. 5 – zasięg stref uplastycznienia w przekroju 2-2,
- rys. 6 – zasięg stref uplastycznienia w przekroju 3-3,
- rys. 7 – zasięg stref uplastycznienia w przekroju 4-4,
- rys. 8 – zasięg stref uplastycznienia w przekroju 5-5,
- rys. 9 – zasięg stref uplastycznienia w przekroju 6-6,

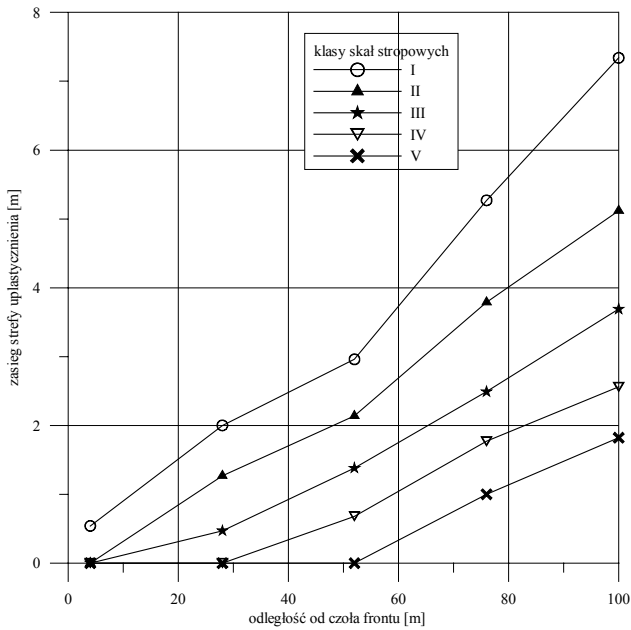
Dla zobrazowania wpływu lokalizacji komór na zasięg stref uplastycznienia sporządzono mapy warstwiczne, które z pewnym przybliżeniem umożliwiają oszacowanie wartości zasięgu w dowolnym punkcie pola eksploatacyjnego. Mapy te przedstawiono na kolejnych rysunkach:

- rys.10 – izolinie zasięgu stref uplastycznienia w stropie komór - I klasa stropu,
- rys.11 – izolinie zasięgu stref uplastycznienia w stropie komór - II klasa stropu,
- rys.12 – izolinie zasięgu stref uplastycznienia w stropie komór - III klasa stropu,
- rys.13 – izolinie zasięgu stref uplastycznienia w stropie komór - IV klasa stropu,
- rys.14 – izolinie zasięgu stref uplastycznienia w stropie komór - V klasa stropu,

Dla lepszej czytelności rysunków 4-14, zasięgi stref uplastycznienia w analizowanych przekrojach, dla poszczególnych klas górotworu dodatkowo zebrano w tabeli 2.

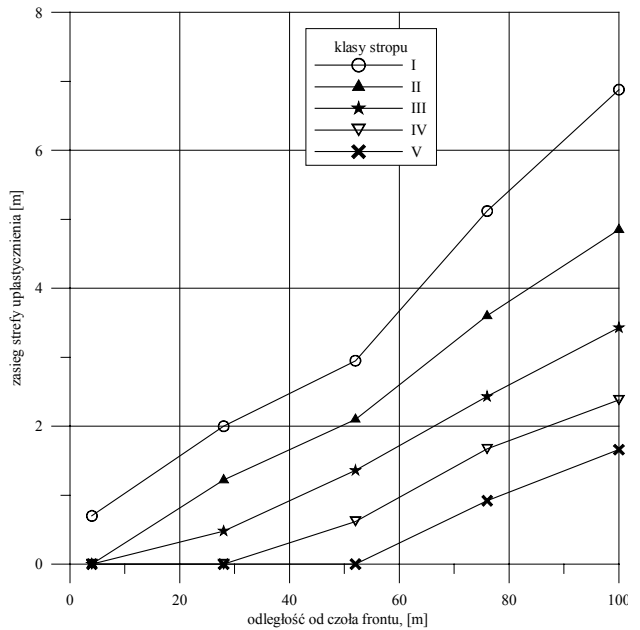
Tabela 2. Zasięgi stref uplastycznienia w analizowanych przekrojach dla poszczególnych klas stropu

Numer przekroju	Odległość od czoła frontu	Klasa skał stropowych				
		I	II	III	IV	V
1-1	4	0.54	0	0	0	0
	28	2	1.27	0.47	0	0
	52	2.96	2.14	1.38	0.68	0
	76	5.27	3.79	2.49	1.77	1
	100	7.34	5.12	3.69	2.56	1.82
2-2	4	0.7	0	0	0	0
	28	2	1.22	0.48	0	0
	52	2.95	2.1	1.36	0.62	0
	76	5.12	3.6	2.43	1.67	0.92
	100	6.88	4.85	3.43	2.38	1.66
3-3	4	0.82	0	0	0	0
	28	1.96	1.19	0.43	0	0
	52	2.78	2.02	1.29	0.56	0
	76	4.69	3.15	2.21	1.45	0.71
	100	5.65	4.21	2.78	2.07	1.36
4-4	4	0.94	0	0	0	0
	28	1.9	1.14	0.38	0	0
	52	2.62	1.89	1.16	0.42	0
	76	4	2.64	1.87	1.13	0.36
	100	4.7	3.25	2.27	1.56	0.83
5-5	4	1.07	0.13	0	0	0
	28	1.79	1.03	0.29	0	0
	52	2.35	1.64	0.91	0.19	0
	76	2.96	2.1	1.37	0.62	0
	100	3.26	2.29	1.59	0.84	0.12
6-6	4	1.17	0.25	0	0	0
	28	1.29	0.34	0	0	0
	52	1.65	0.81	0	0	0
	76	1.94	0.96	0	0	0
	100	2	1.04	0.1	0	0



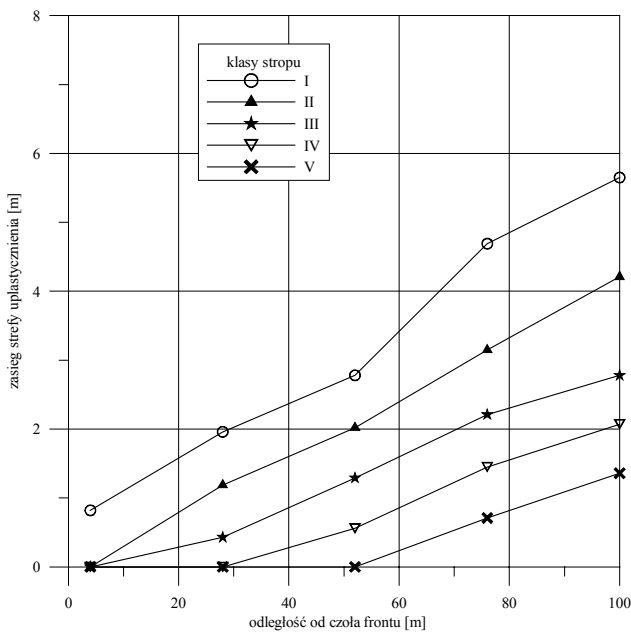
Rys.4. Zasięg stref uplastycznienia w przekroju 1-1

Fig.4. Plasticity zone range for section 1-1



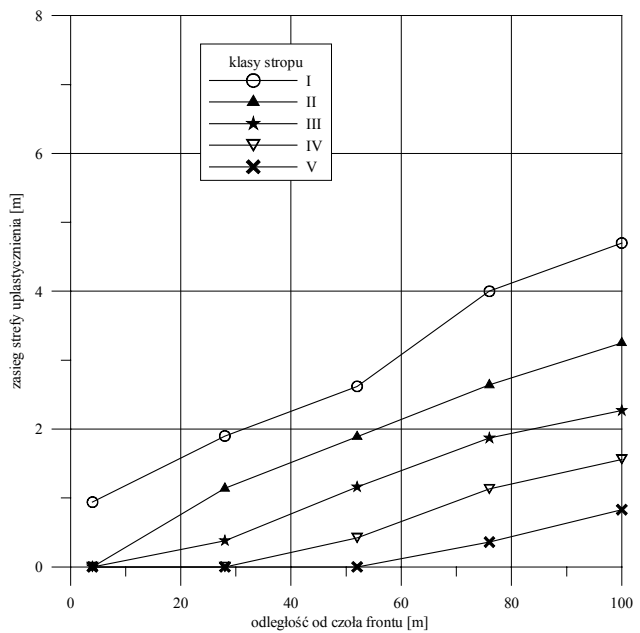
Rys.5. Zasięg stref uplastycznienia w przekroju 2-2

Fig.5. Plasticity zone range for section 2-2



Rys.6. Zasięg stref uplastycznienia w przekroju 3-3

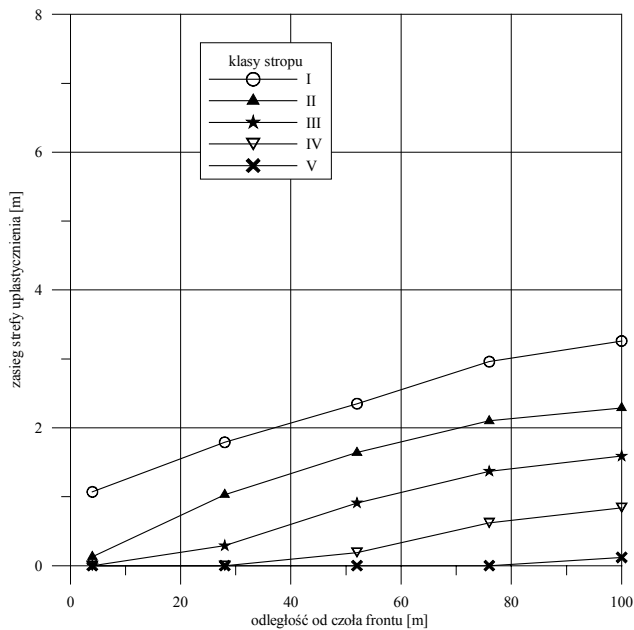
Fig.6. Plasticity zone range for section 3-3



Rys.7. Zasięg stref uplastycznienia w przekroju 4-4

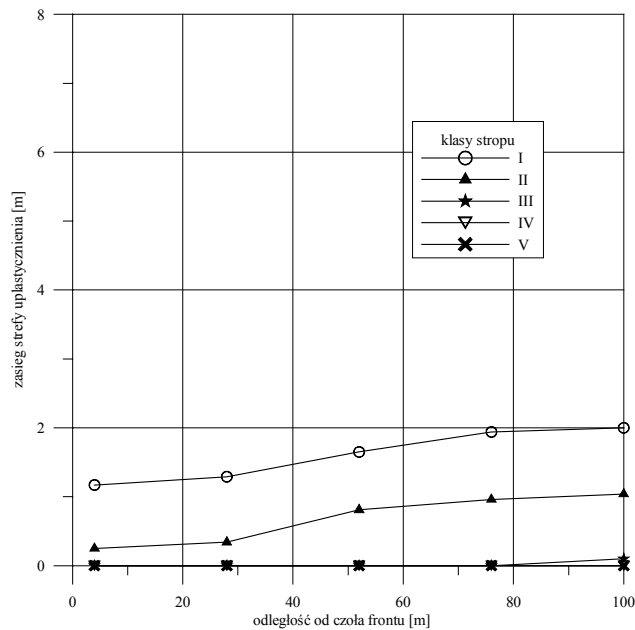
Fig.7. Plasticity zone range for section 4-4

Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że zasięg strefy uplastycznienia w rejonie skrzyżowań komór zależy od klasy stropu oraz ich lokalizacji w polu eksploatacyjnym. Przy tej samej klasie stropu najwyższe wartości w komorach zlokalizowanych w rejonie osi symetrii pola eksploatacyjnego i maleją w miarę zbliżania się do calizny.



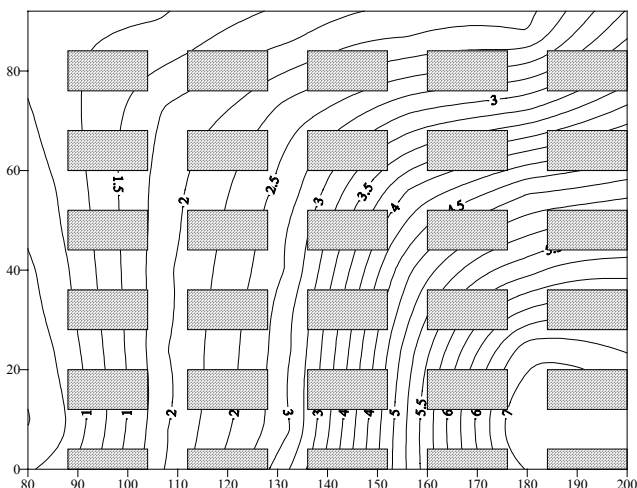
Rys.8. Zasięg stref uplastycznienia w przekroju 5-5

Fig.8. Plasticity zone range for section 5-5



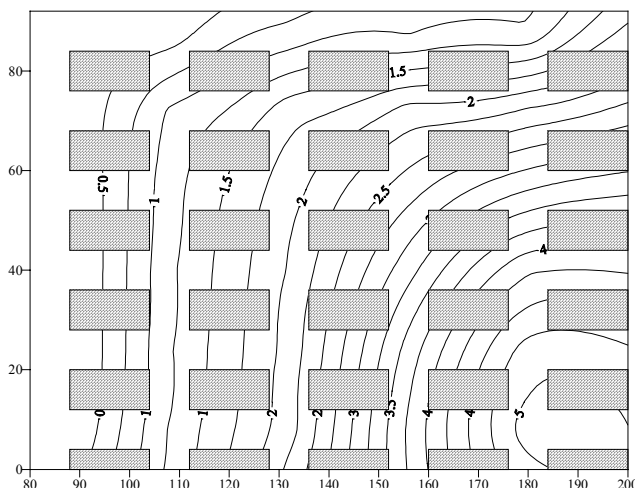
Rys.9. Zasięg stref uplastycznienia w przekroju 6-6

Fig.9. Plasticity zone range for section 6-6



Rys. 10. Izolinie zasięgu stref uplastycznienia w stropie komór – I klasa stropu

Fig.10. Distribution of plastic zone range – I class of the roof



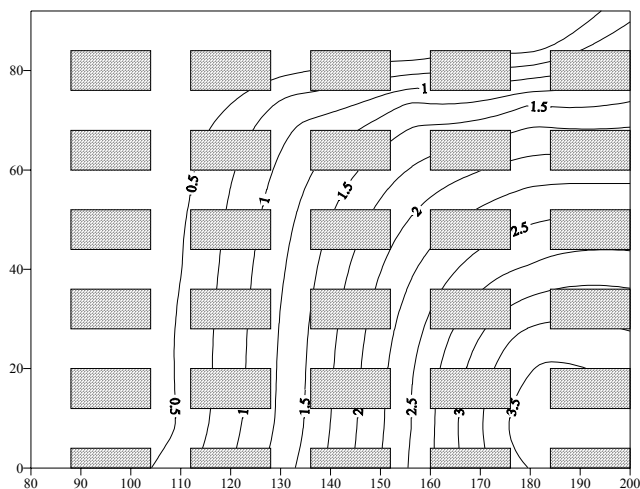
Rys. 11. Izolinie zasięgu stref uplastycznienia w stropie komór – II klasa stropu

Fig.11. Distribution of plastic zone range – II class of the roof

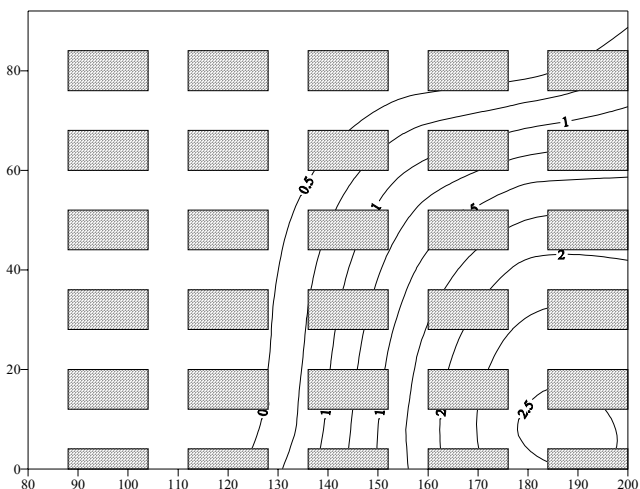
Równocześnie we wszystkich przekrojach obserwuje się w przybliżeniu liniowy wzrost wielkości stref uplastycznienia w miarę zbliżania się do zrobów.

Porównując wyniki obliczeń w płaskim stanie odkształcenia z wynikami w przestrzennym stanie odkształcenia widać, że są one całkowicie rozbieżne, jeżeli chodzi o zasięgi stref uplastycznienia. Obliczenia prowadzone w płaskim stanie odkształcenia dają w rezultacie takie same zasięgi stref uplastycznienia w stropach poszczególnych komór niezależnie od ich lokalizacji w stosunku do czoła frontu eksploatacyjnego. Co więcej – z wyników obliczeń 2D wynika także, że zasięg stref uplastycznienia w stropach komór nie zależy także od odległości od czoła frontu eksploatacyjnego, długości wybiegu frontu, długości filarów ani od wysokości komór. Zasięg stref uplastycznienia, dla analizowanych

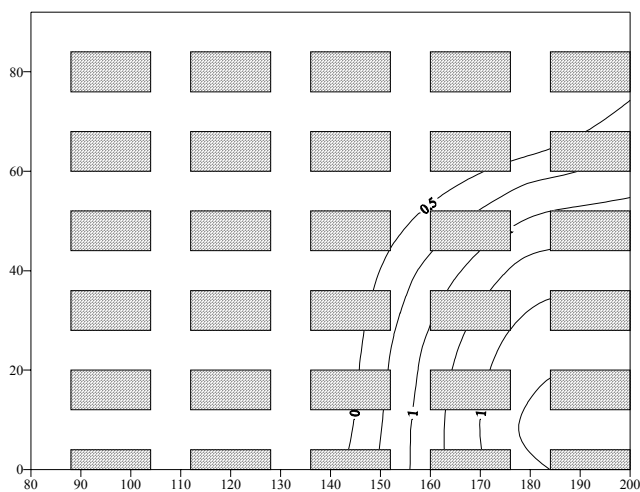
geometrii systemu jest zależny tylko od szerokości komór oraz od parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych warstw stropowych.



Rys. 12. Izolinie zasięgu stref uplastycznienia w stropie komór – III klasa stropu
Fig.12. Distribution of plastic zone range – III class of the roof



Rys. 13. Izolinie zasięgu stref uplastycznienia w stropie komór – IV klasa stropu
Fig.13. Distribution of plastic zone range – IV class of the roof



Rys. 14. Izolinie zasięgu stref uplastycznienia w stropie komór – V klasa stropu
Fig.14. Distribution of plastic zone range – V class of the roof

Stan naprężenia, przemieszczenia i wyężenia otrzymany na podstawie obliczeń numerycznych w przestrzennym stanie odkształcenia wskazuje, że zasięg stref uplastycznienia w stropach komór i na skrzyżowaniach jest zależny od ich lokalizacji w stosunku do czoła frontu.

Zasięgi stref uplastycznienia wyraźnie zmieniają się w zależności od klas stropu. Przykładowo maksymalny zasięg strefy uplastycznienia dla I klasy stropu w przekroju 1-1 tuż przy zrobach jest równy 7.34 m, podczas gdy zasięg ten otrzymany z obliczeń 2D jest stały i równy 3.5 m. Podobnie sytuacja wygląda dla pozostałych klas stropu. Zawsze maksymalny zasięg stref

uplastycznienia uzyskany na podstawie modelowania 3D jest ponad dwukrotnie większy niż uzyskany z modelowania 2D. Jednakowoż największym zafałszowaniem wynikającym z przyjęcia płaskiego modelu numerycznego wydaje się być stały zasięg stref uplastycznienia w otoczeniu poszczególnych komór niezależnie od ich umiejscowienia w stosunku do położenia czoła frontu eksploatacyjnego.

4. PODSUMOWANIE

Celem niniejszego referatu było wykazanie różnic wynikających z przyjęcia różnych sposobów numerycznego modelowania eksploatacji złóż miedzi systemem filarowo-komorowym. Przeprowadzone obliczenia pozwalają na stwierdzenie, że stosowanie płaskich i przestrzennych modeli numerycznych prowadzi do uzyskania całkowicie rozbieżnych wyników w zakresie zasięgów stref uplastycznienia w otoczeniu poszczególnych komór i skrzyżowań. Pozwala to na sformułowanie wniosku, że jedynie przestrzenne modelowanie numeryczne pozwala na wiarygodny opis stanu naprężenia, przemieszczenia i wyężenia występującego w otoczeniu systemu komór i filarów.

LITERATURA

- [1] COSMOS/M v.2.5. *Users Manual*. Structural and Analysis Corporation. USA.
- [2] FLAC v.3.4. *Users Manual*. Itasca Consulting Group. Minneapolis. USA.
- [3] LOVE A.E.H. *Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*. Dover. 1944, pp. 142-144.
- [4] PARISEAU W.G., JOHNSON J.C., MCDONALD M.M., POAD M.E.. *Rock Mechanics Study of Shaft Stability and Pillar Mining*. Homestake Mine, Lead, SD(in three parts). 1995. USBM RI 9576.
- [5] PIECHOTA S., TAJDUŚ A., FLISIAK J., KORZENIOWSKI W., CAŁA M., CIEŚLIK J. *Eksploatacyjne wskaźniki osłabienia górotworu*. Opracowanie niepublikowane. AGH. Kraków. 1999.

ABSTRACT

This paper deals with the numerical modeling of room and pillar mining. Several numerical calculations were performed to estimate stress field in the vicinity of rooms and pillars. In first case Finite Difference Method (code FLAC) was used for to simulate plain strain conditions. In second case Finite Element Method (code COSMOS/M) was used for to simulate three dimensional strain condition. Authors of the paper focused on analyzing plastic zone ranges around rooms and junctions. It turned out that assumption of plain strain conditions gives considerably different results than 3D models. The comparison of the 2D and 3D calculations results seriously questions the applicability of 2D models for room and pillar mining.