

Bernard DRZEŻLA, Andrzej CHMIELA, Piotr KOŁODZIEJCZYK, Marek WESOŁOWSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

MODELE GÓROTWORU W „MES” A GÓROTWÓR RZECZYWISTY

Streszczenie. Artykuł przedstawia wyniki modelowania numerycznego deformacji górotworu poddanego wpływom eksploatacji górniczej. Wyznaczone na tej podstawie wartości podstawowych wskaźników deformacji zostaną porównane z najczęściej stosowanymi rozwiązaniami teoretycznymi oraz w miarę możliwości z wynikami pomiarów terenowych. W końcowej części pracy przedstawiono możliwości oraz ograniczenia wynikające ze stosowania modeli numerycznych do opisu deformacji terenu.

COMPARISON OF MODELS OF ROCK MASS IN “FEM” AND REAL ROCK MASS

Summary. The paper presents the results involving the numerical modeling of the deformation of rockmass subjected to the influence of mining. Principal values of basic deformation indexes determined in this way were compared with the most commonly applied theoretical solutions and with selected results of site measurements. Also the advantages and existing limitations were presented involving the application of various numerical models for the description of the parameters of ground deformation.

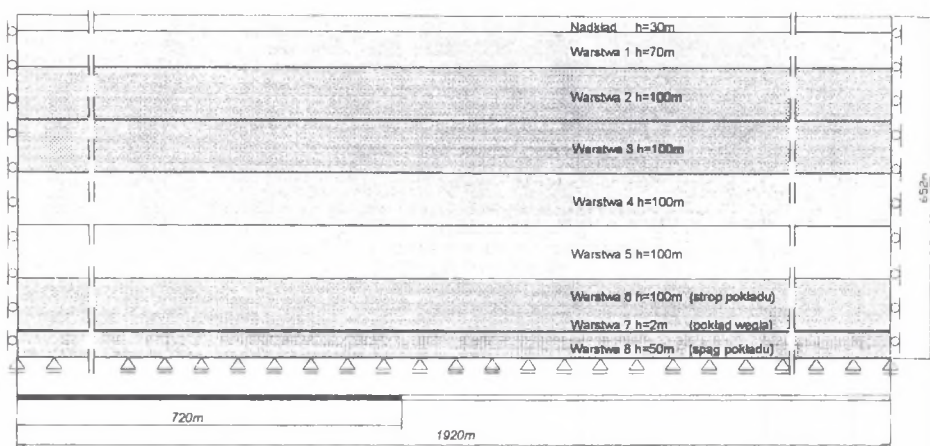
1. Wprowadzenie

Nieodłącznym elementem budowy modelu numerycznego jest jego weryfikacja pod względem ilościowej i jakościowej zgodności z prowadzonymi w warunkach rzeczywistych pomiarami. Przez pojęcie weryfikacji modelu górotworu należy rozumieć porównanie wyników przeprowadzonych obliczeń z pewnymi wartościami uznanymi za wzorcowe. Najczęściej wartościami wzorcowymi są wyniki pomiarów prowadzonych w rzeczywistym ośrodku będącym przedmiotem prowadzonej symulacji. W przypadku braku takich pomiarów lub też w przypadku prowadzenia symulacji na modelach nie posiadających rzeczywistego

odpowiednika (modele wyidealizowane) proces weryfikacji prowadzi się na podstawie wartości średnich uzyskanych z pomiarów innych (podobnych) ośrodków, lub też wyników uzyskanych innymi metodami obliczeniowymi, które uznano za poprawne. W związku z faktem, iż coraz częściej do opisu deformacji górotworu stosuje się modele numeryczne, przeprowadzenie wnikliwej oceny uzyskiwanych wyników wydaje się zasadne.

2. Model górotworu

Dla celów praktycznej oceny przydatności poszczególnych modeli do wyznaczenia wpływu eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu zbudowano płaski model górotworu o wymiarach 1920 m x 652 m (L x H). Powyższy model obejmuje swym zasięgiem pokład węgla o miąższości 2 m. W stropie pokładu zamodelowano sześć kolejnych warstw skalnych górotworu karbońskiego o grubościach od 70 m do 100 m oraz jedną warstwę nadkładową o miąższości 30 m. Spąg przeznaczony do eksploatacji pokładu zamodelowano jako warstwę skalną o grubości 50 m. Schemat tarczy modelowej przedstawia rys 1.



Rys. 1. Schemat tarczy płaskiej górotworu

Fig. 1. Diagram of flat shield of the rockmass

Każda z wymienionych wyżej warstw stanowi ośrodek ekwiwalentny dla zbiorczego pakietu skalnego o zadanej miąższości [6]. Budowa modelu górotworu umożliwia przypisanie każdej warstwie oddzielnego modelu mechanicznego, którego dobór określono wariantowo w zależności od przykładu obliczeniowego [3, 4].

W modelu górotworu poprowadzono symulację eksploatacji górniczej w pokładzie węgla ze średnim dobowym postępowaniem określonym na 5 m/dobę. Symulowana eksploatacja górnicza z podsadzką hydrauliczną prowadzona będzie w prawym skrzydle modelu górotworu na wybiegu ok. 1200 m. Rozwiązanie takie pozwoli na sprowadzenie rozpatrywanego zagadnienia do tzw. „półpłaszczyzny”.

W celu przeprowadzenia obliczeń wyodrębnione w tarczy warstwy podzielone zostały siatką prostokątnych oraz trójkątnych elementów, których wymiary zależne są od przypisanego miejsca w modelu. Skrajnym węzłem siatki elementów znajdującym się na bocznych krawędziach tarczy przyporządkowano możliwość przemieszczania się jedynie w kierunku pionowym odpowiadającym osi Z. Węzły znajdujące się na dolnej krawędzi modelu mają możliwość przemieszczania się jedynie w kierunku poziomym opisanym przez układ współrzędnych jako kierunek X. Pozostałe węzły siatki mają swobodę przemieszczeń w obrębie płaszczyzny XZ [6, 8, 11].

Założono, że pionowe naprężenie pierwotne w tarczy górotworu wynika z ciężaru warstw nadległych i jest uzależnione od gęstości objętościowej poszczególnych warstw ośrodka. Poziome naprężenie pierwotne w tarczy górotworu zgodnie z powszechnie stosowanym rozwiązaniem stanowi ułamek naprężenia pionowego pierwotnego, którego wartość zależna jest od współczynnika Poissona [5].

3. Wyniki symulacji komputerowej

Oceniając przydatność poszczególnych modeli mechanicznych do opisu deformacji powierzchni terenu, zbudowano siedem wariantowych rozwiązań tarczy górotworu, których charakterystyki przedstawiono poniżej.

Jako kryterium oceny poszczególnych modeli przyjęto wartości wskaźników deformacji wyznaczone na podstawie polskich rozwiązań teoretycznych [1, 2, 9, 12] oraz angielskiej metody SEH [10]. Z uwagi na powszechność stosowania wspomnianych metod wyznaczone tą drogą wartości wskaźników deformacji można uznać za wzorcowe. Przyjęte powyżej rozwiązania teoretyczne zostały poszerzone o analizę wyników badań terenowych przeprowadzoną przez E. Popiołka i J. Ostrowskiego [7].

Przykład 1. Tarcza górotworu stanowi kombinację kilku modeli mechanicznych. Warstwa nadkładowa opisana została modelem doskonale plastycznym Druckera-Pragera. Zasadniczy górotwór karboński do głębokości 500 m opisany został za pomocą ośrodka

sprężysto-lepkiego, natomiast 100-metrową warstwę stanowiącą bezpośredni strop eksploatowanego pokładu oraz pokład węgla odwzorowano przy użyciu modelu sprężysto-plastyczno-kruchego. Przestrzeń podsadzkowa stanowi model liniowo-sprężysty. Wszystkie warstwy są ośrodkami izotropowymi.

Przykład 2. Górótwór stanowi jednorodny ośrodek sprężysto-lepki. Różnice pomiędzy warstwami nadkładowymi a warstwami tworzącymi górótwór karboński uzyskano przez zmianę parametrów materiałowych, takich jak: moduł Younga E , współczynnik Poissona ν , gęstość objętościowa ρ . Tak jak w poprzednim przykładzie wszystkie warstwy tworzące górótwór są ośrodkami izotropowymi.

Przykład 3. Górótwór stanowi kombinację modelu liniowo-sprężystego, sprężysto-plastyczno-kruchego oraz sprężysto-plastycznego. Zasadnicza część górótworu (do głębokości 500 m) opisana została modelem sprężysto-plastycznym. Zastosowano w nim ponadto możliwość przenoszenia dużych odkształceń plastycznych. Strop pokładu oraz pokład węgla stanowią ośrodek sprężysto-plastyczno-kruchy, natomiast przestrzeni podsadzkowej przyporządkowano model liniowo-sprężysty.

Przykład 4. Tarcza górótworu prawie w całości zbudowana została z modelu Druckera-Pragera. Celem takiego założenia jest symulowanie ośrodka sypkiego. Różnice pomiędzy warstwami nadkładowymi a górótworem karbońskim oraz różnice pomiędzy poszczególnymi warstwami uzyskano poprzez zmianę parametrów materiałowych, takich jak: gęstość objętościowa ρ , kohezja c oraz kąt tarcia wewnętrznego ϕ . Jedynie pokład węgla oraz warstwa spągowa opisane zostały modelem sprężysto-plastyczno-kruchym.

Przykład 5. Rozpatrywany górótwór stanowi powiązanie ośrodka liniowo-sprężystego, sprężysto-lepkiego oraz sprężysto-plastyczno-kruchego. Warstwa nadkładowa, podobnie jak zasadnicza część górótworu karbońskiego z przedziału głębokości od 30 m do 500 m, stanowi ośrodek sprężysto-lepki. Pokład węgla oraz 100-metrowa warstwa stropowa, jak również warstwa spągowa opisane zostały modelem sprężysto-plastyczno-kruchym. Przestrzeń podsadzkowa, podobnie jak w poprzednich rozwiązaniach, stanowi model liniowo-sprężysty.

Przykład 6. Model górótworu w przeważającej mierze zbudowany został z nieliniowego ośrodka sprężysto-plastyczno-kruchego. Jedynie do opisu przestrzeni podsadzkowej przyporządkowano model liniowo-sprężysty. Różnice w uwarstwieniu górótworu uzyskano poprzez przyporządkowanie kolejnym warstwom oddzielnych charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych.

Przykład 7. W tym przypadku ośrodek w całości zbudowano z modelu liniowo-sprężystego. Wszystkie warstwy górotworu stanowią ośrodki ortotropowe o zróżnicowanych stałych sprężystości w kierunkach X oraz Z. Jedynie przestrzeń podsadzkowa opisana została izotropowym ośrodkiem liniowo-sprężystym. W rozpatrywanym przypadku przyjęto, że moduł Younga E_Z w kierunku osi Z jest ok. dziesięciokrotnie mniejszy od modułu Younga E_X przypisanego do kierunku X.

Dla wszystkich przypadków przyjęto stałą wartość współczynnika eksploatacji $a=0,23$. Wyniki prowadzonej symulacji zestawiono w tabeli nr 1, natomiast na rysunkach od 2 do 6 przedstawiono graficzne zależności wyznaczonych wskaźników deformacji.

W przypadku górotworu opisanego w przykładzie 1 wystąpił efekt osunięcia warstwy przypowierzchniowej. Gwałtowny przyrost odkształceń spowodował utratę stabilności modelu oraz zatrzymanie prowadzonych obliczeń. Otrzymane wartości wskaźników deformacji nie są zatem wielkościami końcowymi, przez co porównanie ich z wartościami wzorcowymi traci sens.

Tabela 1

Maksymalne wskaźniki deformacji dla poszczególnych modeli górotworu

Model	Modelowy wskaźnik deformacji							
	$\frac{W_{\max}}{a \cdot g}$	$\frac{W(x=0)}{W_{\max}}$	$\frac{d}{[x \cdot h]}$	$\frac{U_{\max}}{W_{\max}}$	$T \left[\frac{W_{\max}}{h} \right]$	$\varepsilon \left[\frac{W_{\max}}{h} \right]$	$K \left[\frac{W_{\max}}{h} \right]$	$tg\beta$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Przykład 1*	1	0,372	0,163	0,462	2,00	--	--	--
Przykład 2	1	0,370	0,168	0,366	0,93	0,354 -0,292	2,67 -2,40	0,95
Przykład 3	1	0,144	0,197	0,542	3,67	-- -0,610	--	3,68
Przykład 4	1	0,433	0,062	0,575	1,20	0,616 -0,523	3,760 -3,747	1,21
Przykład 5	1	0,408	0,105	0,477	1,00	0,517 -0,413	2,813 -3,267	1
Przykład 6	1	0,408	0,110	0,472	1,00	0,507 -0,408	2,773 -2,933	1
Przykład 7	1	0,381	0,058	0,321	2,33	0,395 -0,317	13,12 -13,28	2,34

* dane niekompletne z uwagi na osunięcie nadkładu

Na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych można wyciągnąć następujące wnioski:

Oceniając otrzymane na podstawie obliczeń numerycznych przebiegi obniżen (rys.2) należy stwierdzić, że dla wszystkich rozpatrywanych układów modelowych osiągnięta została oczekiwana wartość osiadań $W_{max}=0.45$ m. Obniżenia punktu znajdującego się nad krawędzią eksploatacji mieszczą się w granicach od $0.144W_{max}$ do $0.433W_{max}$. Analogiczne wartości wyznaczone na podstawie wzorów teoretycznych wynoszą $0.19+0.5W_{max}$ dla zależności Knothego [9] oraz $0.2W_{max}$ dla metody SEH [10]. Jak wynika z powyższego zestawienia, wszystkie otrzymane wartości obniżen $W(x=0)$ dla modeli numerycznych mieszczą się w granicach określonych przez przyjęte wzorce.

Rozpatrując obniżenia punktów znajdujących się nad calizną węglową można stwierdzić, iż w zależności od przyjętego układu modelowego, miejsce, w którym kończą się wpływy eksploatacji na powierzchnię, mieści się w przedziale od $0.3h$ do $0.84h$. Dla porównania według SEH wpływy eksploatacji kończą się w odległości $0.7h$, natomiast zgodnie z zależnością Knothego miejsce takie występuje w odległości ok. $0.3h$.

Dla wszystkich rozpatrywanych przypadków wystąpiło przesunięcie punktu o wartości $0.5W_{max}$ w kierunku przestrzeni wybranej. Wielkość tego przesunięcia zmienia się dla poszczególnych modeli w zakresie od $0.058h$ (przykład 7) do $0.197h$ (przykład 3). Dla porównania wartość tzw. obrzeża obserwowana w warunkach polskich mieści się w przedziale $d=0.05h-0.1h$, natomiast według SEH [10] wielkość ta wynosi ok. $0.14h$.

Analiza wyników symulacji komputerowych wykazała, iż na całej długości modelowego górotworu wystąpiły dodatnie przemieszczenia poziome U_x . Zerowanie się ich wartości na krańcach tarczy należy w tym przypadku tłumaczyć obecnością podpór ograniczających, a nie - jak można by sądzić - granicą oddziaływania eksploatacji. Ekstremalne wartości przemieszczeń poziomych wyznaczone dla poszczególnych przykładów mieszczą się w przedziale od $0.321W_{max}$ do $0.542W_{max}$. Analogiczna wielkość przemieszczeń poziomych wyznaczona na podstawie zależności Budryka-Knothego wynosi $0.4W_{max}$ [9]. Można zatem wnioskować, że modele opisane w przykładach 5 oraz 6 w przybliżeniu spełniają powyższą zależność. Uwzględniając natomiast średni błąd wyznaczony z badań E. Popiołka oraz J. Ostrowskiego [7], można przyjąć, iż wartość wzorcowa przemieszczeń poziomych równa jest $0.32W_{max}$. Warunek ten spełniony został jedynie w przypadku 7 (ośrodek liniowo-sprężysty o ortotropowej budowie warstw). Przemieszczenia wyznaczone dla pozostałych modeli znacznie odbiegają od przyjętych wzorców.

Dla większości ocenianych układów modelowych maksymalne wartości nachyleń T_{max} mieszczą się w przedziale $0.93+1.20W_{max}/h$. Jedynie dla przypadku 7 maksymalne nachylenie profilu niecki obniżeniowej osiąga wartość $2.33W_{max}/h$. Dla porównania według SEH maksymalne nachylenie profilu pełnej niecki obniżeniowej wynosi $2.5W_{max}/h$, natomiast według zależności Budryka-Knothe'go wielkość ta równa jest $2W_{max}/h$ (dla $tg\beta=2$). Z kolei E. Popiołek oraz J. Ostrowski stwierdzili, że wartość prognozowanych nachyleń jest systematycznie zaniżana o ok. 13%. Ostatecznie proponują oni przyjąć, że średnia wartość nachyleń wynosi $T_{max}=2.25W_{max}/h$. Odnosząc się do powyższego stwierdzenia można założyć, że wyznaczone dla przypadku 7 maksymalne nachylenia $T_{max}=2.33W_{max}/h$ w przybliżeniu spełniają warunek zgodności z wartościami wzorcowymi.

Otrzymane natomiast w przypadku 3 wartości nachyleń $T_{max}=3.67W_{max}/h$ przy stosunkowo dużym obrzeżu wskazywać mogą na wystąpienie efektu „załamania” warstw. Porównanie zatem tego przypadku z teoriami zakładającymi ciągłość przemieszczeń nie wydaje się rozwiązaniem właściwym.

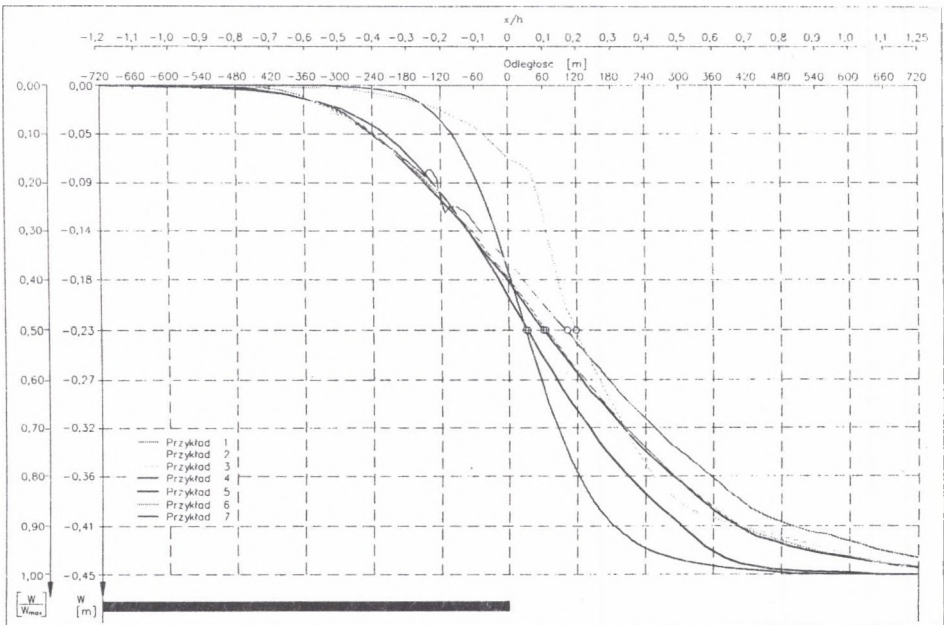
Rozpatrując powstałe na skutek prowadzonej eksploatacji odkształcenia poziome można zauważyć niewielką asymetrię pomiędzy odkształceniami rozciągającymi a odkształceniami ściskającymi. Wielkość powstałej asymetrii dla poszczególnych modeli waha się w granicach $15+20\%$. Odnosząc się do literatury należy stwierdzić, że jedynie metoda SEH oraz teoria J. Zycha [12] zakładają asymetrię odkształceń rozciągających w stosunku do ściskających. Pozostałe rozwiązania, stanowiące materiał porównawczy dla badań modelowych, nie przewidują takich relacji.

Oceniając powstałe odkształcenia pod względem ilościowych zmian należy zauważyć, że prawie wszystkie rozpatrywane modele wykazują poważne rozbieżności w stosunku do wartości wzorcowych. Jedynie w przypadku 4 ekstremalne wartości wyznaczonych odkształceń poziomych są w przybliżeniu zgodne z angielską metodą SEH. Pozostałe przykłady charakteryzują się znacznie zaniżonymi wartościami odkształceń w stosunku do przyjętych wzorców.

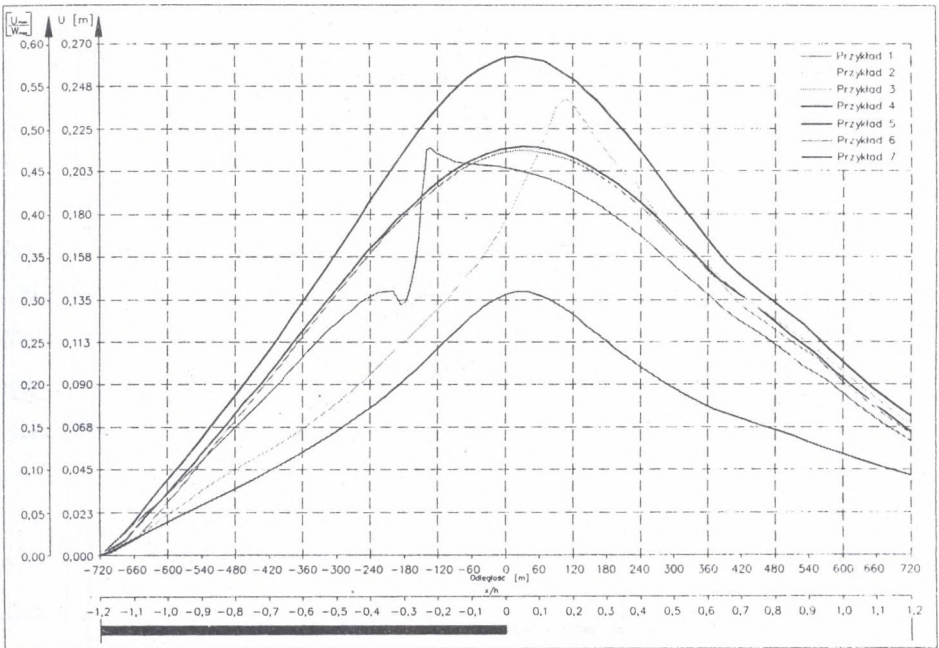
Odnosząc się do krzywizn profilu niecki obniżeniowej stwierdzono, iż jedynie dla przykładu 7 wyznaczone wielkości są zbliżone do przyjętych wzorców. W porównaniu z teorią Budryka-Knothe'go wyznaczone krzywizny wypukłe (nad wybraną częścią pokładu) są większe o ok. 30%, natomiast krzywizny wklęsłe (nad calizną węglową) o ok. 31% przekraczają teoretyczną wartość tego parametru. Wprowadzając natomiast poprawkę proponowaną przez E. Popiołka i J. Ostrowskiego ($\Delta K_{max}=34\%$), uzyskujemy większą

zgodność pomiędzy rozpatrywanymi krzywiznami. Wielkość powstałego w takim przypadku błędu nie przekroczy 4%. Maksymalne krzywizny profilu niecki obniżen wyznaczone dla pozostałych układów modelowych są znacznie zaniżone i kształtują się na poziomie 30% wartości wzorcowych.

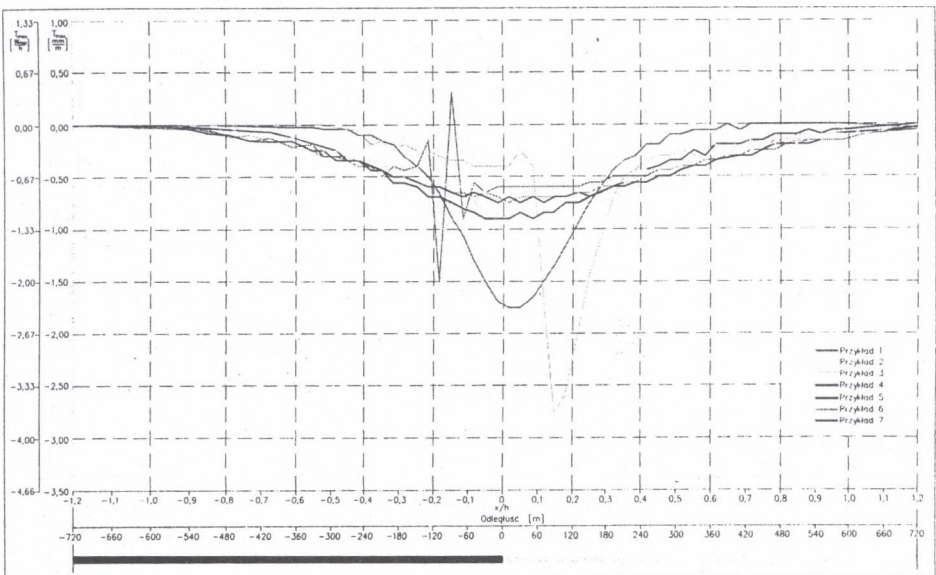
Podobnych wniosków jak w przypadku nachyleń dostarcza analiza wartości $tg\beta$. Jedyne w przykładzie 7 wyznaczone wielkości ($tg\beta=2.34$) są zbliżone do proponowanych wzorców. Warto w tym miejscu podkreślić, iż wartości tego parametru obserwowane w warunkach polskich są większe lub równe 2,0. Wyznaczone dla pozostałych układów modelowych wielkości $tg\beta$ mieszczą się w przedziale 0,95+1,21, a więc nie mogą być uznane za poprawne.



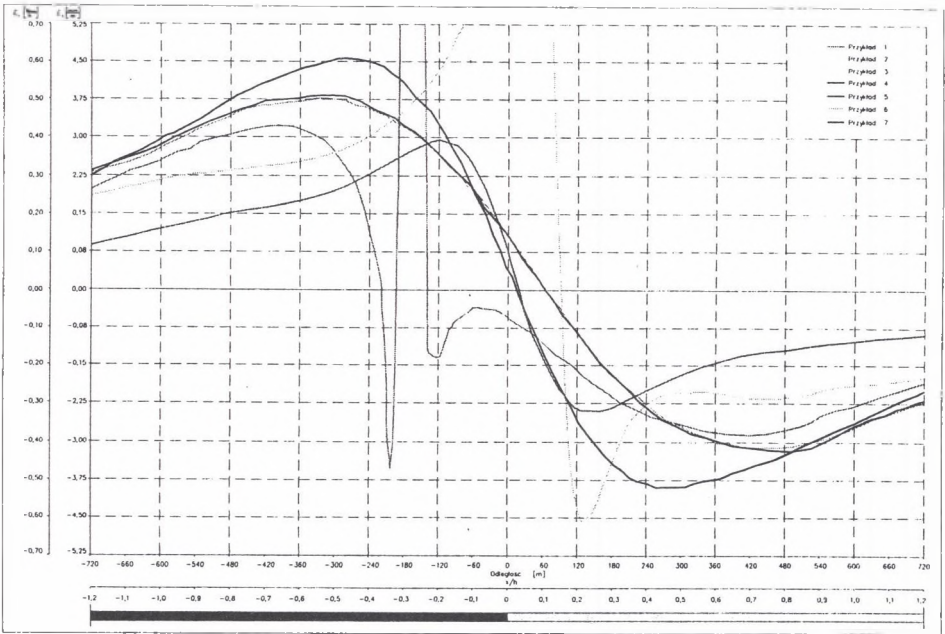
Rys. 2. Profile obniżen pełnej niecki dla rozpatrywanych modeli numerycznych
Fig. 2. Subsidence profiles of full trough for the investigated numerical models



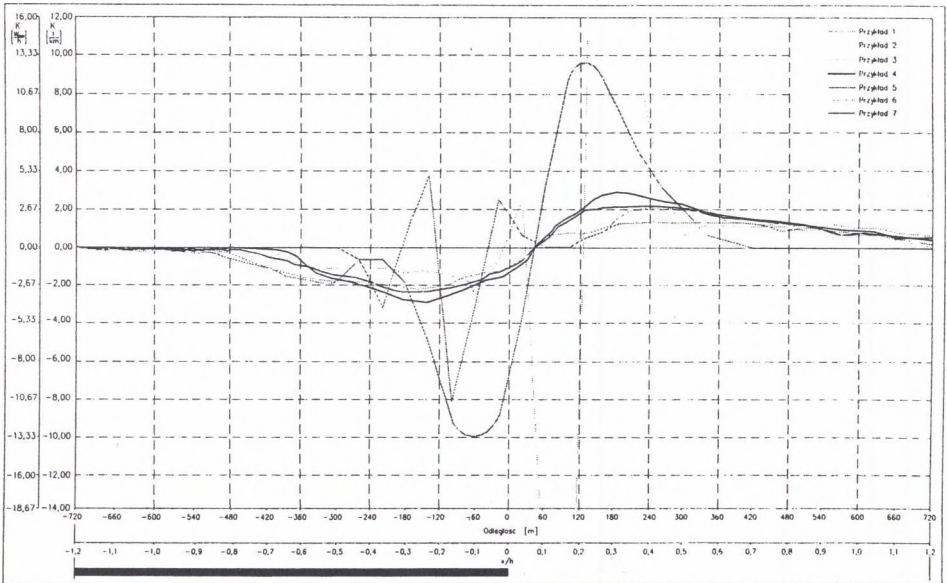
Rys. 3. Przemieszczenia poziome dla poszczególnych modeli numerycznych
 Fig. 3. Horizontal dislocations for particular numerical models



Rys. 4. Nachylenia profilu niecki obniżen dla poszczególnych układów modelowych
 Fig. 4. Slopes of subsidence trough profile for particular modeling systems



Rys. 5. Odształcenia poziome wyznaczone dla rozpatrywanych układów modelowych
 Fig. 5. Horizontal strains determined for the investigated modeling systems



Rys. 6. Krzywizny niecki osiadań wyznaczone z badań modelowych
 Fig. 6. Trough curvatures determined from the modeling

4. Podsumowanie

W artykule przeprowadzona została ogólna weryfikacja siedmiu numerycznych modeli górotworu. Jako kryterium oceny przyjęto końcowe wartości wskaźników deformacji oraz możliwość stosowania rozpatrywanych modeli dla celów praktycznych.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych można stwierdzić, że na bazie użytego w pracy oprogramowania bardzo trudne jest zbudowanie modelu górotworu, który pozwoliłby na kompleksową obserwację wszystkich zjawisk zachodzących w rzeczywistym górotworze pod wpływem prowadzonej eksploatacji górniczej. Większość rozpatrywanych modeli przedstawionych w niniejszym artykule charakteryzuje się zbyt łagodnym profilem niecki obniżen. Świadczyć mogą o tym uzyskane wielkości maksymalnych nachyleń T_{max} oraz wyznaczone na ich podstawie wartości $tg\beta[1]$.

Największe rozbieżności pomiędzy wynikami badań modelowych a wartościami wzorcowymi dotyczą przemieszczeń poziomych U_x oraz będących ich pochodną odkształceń poziomych ε_x . Wspomniane rozbieżności dotyczą w zasadzie wszystkich analizowanych układów modelowych. Zauważalnym zjawiskiem jest również znacznie większy zasięg występowania przemieszczeń oraz odkształceń poziomych w stosunku do przyjętych rozwiązań teoretycznych.

Natomiast duży stopień zgodności pomiędzy wyznaczonymi na drodze obliczeń numerycznych wskaźnikami deformacji a wartościami wzorcowymi uzyskano jedynie w przypadku modelu liniowo-sprężystego o ortotropowej budowie warstw (przykład 7). Jednak podstawową wadą tego modelu jest możliwość opisu jedynie końcowych stanów deformacji.

Oceniając przydatność poszczególnych modeli do opisu zjawisk zachodzących w górotworze należy stwierdzić, iż jedynie dla układu modelowego opisanego w przykładzie 5 istnieje możliwość oceny zjawisk zależnych od czasu. Pomimo zauważalnych rozbieżności w stosunku do wartości wzorcowych, model ten zachowuje pełną stabilność dla całego zadanego cyklu obliczeniowego. Pozostałe oceniane modele, z uwagi na ograniczone możliwości stosowania oraz wartości wyznaczanych wskaźników deformacji, nie spełniają wymaganych warunków.

LITERATURA

1. Białek J.: Opis nieustalonej fazy obniżenia terenu górniczego z uwzględnieniem asymetrii wpływów końcowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej z. 1106, Gliwice 1991.
2. Drzęźła B.: Badania teoretyczne i modelowe ruchów górotworu przy eksploatacji górniczej. Praca doktorska (niepublikowana). Pol. Śl. Gliwice 1971.
3. Filcek H., Wałaszczuk J., Tajduś A.: Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
4. Kidybiński A.: Podstawy geotechniki kopalnianej. Wyd. Śląsk, Katowice 1982.
5. Kłeczek Z.: Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
6. Kwaśniewski M., Wang J.: Analiza numeryczna deformacji górotworu wywołanych eksploatacją górniczą. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej. 1996.
7. Popiołek E., Ostrowski J.: Próba ustalenia głównych przyczyn rozbieżności prognozowanych i obserwowanych poeksploatacyjnych wskaźników deformacji. Ochrona Terenów Górniczych. Nr 58, Katowice 1980.
8. Praca zbiorowa: Metoda Elementów Skończonych w dynamice konstrukcji. Arkady, Warszawa 1984.
9. Praca zbiorowa: Ochrona powierzchni przed szkodami górniczymi. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1980.
10. Praca zbiorowa: Subsidence Engineers' Handbook. National Coal Board—Mining Department 1975.
11. Zienkiewicz O. C.: Metoda Elementów Skończonych. Arkady, Warszawa.
12. Zych J., Drzęźła B., Strzałkowski P.: Prognozowanie deformacji powierzchni terenu pod wpływem eksploatacji górniczej. Politechnika Śląska. Skrypty Uczelniane. Gliwice 1993.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Tadeusz Majcherczyk

Abstract

In the paper a general verification of the seven assumed numerical models of rockmass was carried out. The evaluation criterion was accepted as the final values of deformation indexes and practical applicability of the investigated models (including also the problems of dynamics).

We can state, basing on the carried out numerical calculations, that with the application of the existing computer programs it is very difficult to build a rockmass model which would yield a comprehensive description of all deformation indexes taking place in a real rockmass when subjected to the influence of the carried out mining process. The most of the investigated models presented in this paper are characterized by a too mild profile of

subsidence trough as compared to the observations of site measurements. It has been confirmed by the obtained values of maximum tilt T_{max} and the values of $tg\beta$ determined on the basis of tilt values. The biggest discrepancies between the results of modeling studies and the reference values involve the horizontal dislocations U_x and strains ϵ_x being their derivatives. The said discrepancies involve in fact all investigated modeling systems. What can also be noticed is a considerably bigger area of dislocations and horizontal strains with respect to the commonly accepted theoretical solutions.

But a high level of agreement between deformation indexes determined through numerical calculations and the reference values was obtained solely for the linear-elastic model of the orthotropic structure of layers (example 7). Yet the basic disadvantage of this model is the possibility to describe only the final deformation states. On the other hand, in view of the applicability of particular models for the description of deformation in time, we can say that only the numerical model presented in the example 5 yields such a possibility. In spite of noticeable discrepancies with respect to the reference values, this model maintains full stability for the whole preset calculation cycle. The other investigated models, due to limited applicability potentials and the values of the determined deformation indexes, do not comply with the required standards.