

Modelowanie numeryczne w prognozowaniu i zapobieganiu szkodom górniczym w budynkach

LUCYNA FLORKOWSKA, JAN WALASZCZYK

Instytut Mechaniki Górniczej PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

Ochrona powierzchni terenu ulegającego degradacji wskutek wydobywania kopalin użytecznych wciąż stanowi ważny problem dla wszystkich regionów, na których eksploatacja jest lub była dokonywana. Zagadnienie to nabiera jeszcze większego znaczenia, gdy w grę wchodzi również potrzeba ochrony obiektów budowlanych znajdujących się w zasięgu wpływów górniczych. Zaprojektowanie i wykonanie odpowiednich zabezpieczeń wymaga wykonania prognozy stanu naprężenia (oraz związanego z nim stanu odkształcenia i przemieszczenia) zarówno podłoża, jak i konstrukcji. Ponieważ jest to zagadnienie bardzo złożone, właściwym narzędziem jego rozwiązania wydają się być metody numeryczne.

W Instytucie Mechaniki Górniczej PAN od kilku lat trwają prace nad modelowaniem numerycznym wpływu górniczych deformacji terenu na budynki. W ich wyniku opracowana została metodyka, która pozwala na uwzględnienie sprężystych, plastycznych i lepkich własności gruntu, a wykorzystując teorię prognozowania deformacji terenu Budryka-Knothe'go, umożliwia symulowanie, przebiegającego w czasie i w przestrzeni, kształtowania się niecki górniczej. Obliczenia numeryczne wykonywane są w pakiecie programów MES – ABAQUS.

W pracy przedstawiono wyniki płaskiego i przestrzennego modelowania numerycznego wpływu niecki górniczej na konstrukcję budynku, przeprowadzonego według opracowanej metodyki.

Słowa kluczowe: modelowanie numeryczne, MES, szkody górnicze, budynek, podłoże

Wstęp

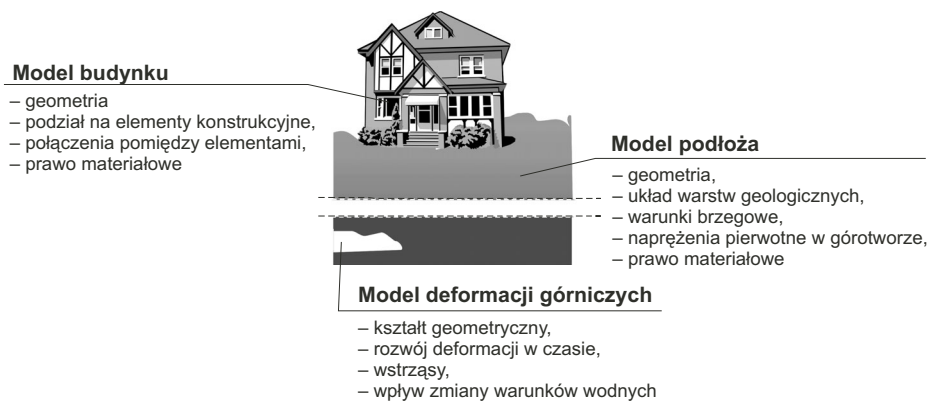
Zaprojektowanie i wykonanie odpowiedniego zabezpieczenia budynku, chroniącego go przed niekorzystnym oddziaływaniem eksploatacji, musi opierać się na wyznaczeniu sił wewnętrznych, jakie wywołuje w konstrukcji deformujące się podłoże. Jest to zadanie złożone, zważywszy, że łączy w sobie problemy mechaniki gruntów, mechaniki budowli, analizę zagadnień kontaktowych i prognozowanie górniczych deformacji górotworu. Wielu badaczy, zajmujących się podobnymi problemami, m.in. Majewski (1995), Kok-Kwan Phoon (2003), czy Heping Xie (1999) sięga więc po narzędzie symulacji komputerowej.

Wybór metody wyda się tym bardziej uzasadniony, gdy spojrzymy na rys. 1. Naszkicowano na nim w zarysie zagadnienia, z którymi należy się zmierzyć przy budowie modelu matematycznego mającego opisać zagadnienie współpracy budynku z deformującym się wskutek eksploatacji podłożem.

Na całościowy model składają się trzy odrębne części, które stanowią:

1. model budynku
2. model podłoża
3. model procesu deformacji.

Rozpoczynając modelowanie budynku należy najpierw odwzorować jego geometrię, wyodrębnić poszczególne elementy konstrukcyjne, przyjąć schemat ich pracy oraz schemat pracy połączeń. Następnie formułowane jest prawo materiałowe dla materiału, z którego wykonana jest konstrukcja. Jeżeli mamy do czynienia np. z żelbetem, to trzeba się zmierzyć z jego anizotropią, z pełzaniem betonu i relaksacją stali, kruchym pękaniem. W przypadku muru z elementów drobnowymiarowych, np. cegły, czy pustaków wła-



Rys. 1. Schemat zagadnień do uwzględnienia w procesie modelowania wpływu eksploatacji na obiekty budowlane

ściwości materiałowe będą jeszcze inne. Modelowania podłoża rozpoczyna się także od wprowadzenia geometrii. Problemem stanowi jednakże fakt, że górotwór ma, w porównaniu do budynku, wymiary niemal nieskończone. Kolejno, należy uwzględnić jego budowę geologiczną, przyjąć warunki brzegowe na krańcach obszaru oraz warunki początkowe odwzorowujące stan pierwotnych naprężeń geostatycznych. Następnie przyjmuje się prawo materiałowe, które opisuje skomplikowane zachowanie się gruntu. Wreszcie najistotniejszym zagadnieniem jest odpowiednie zamodelowanie występujących w podłożu skutków eksploatacji, do których należą zarówno deformacje powierzchni, jak i wstrząsy oraz zmiany warunków wodnych.

Jak widać, rozwiązanie zagadnienia wpływu eksploatacji górniczej na budynek wymaga uwzględnienia bardzo wielu czynników.

W rezultacie kilkuletnich prac w IMG PAN opracowana została metodyka modelowania numerycznego współpracy budynku z deformującym się podłożem górniczym. Nie udało się, jak na razie, uwzględnić wszystkich wymienionych czynników. Ograniczono się zatem wyłącznie do ciągłych deformacji terenu (niecek), budynek zaś opisany jest najprostszym modelem materiałowym (Hooka), jednak wiele istotnych aspektów zostało uchwyconych.

Opis metodyki modelowania

Najistotniejsze cechy opracowanej metodyki:

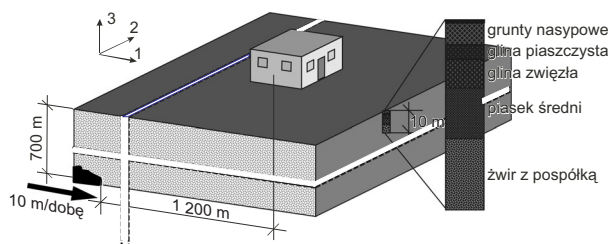
1. Modelowanie oddziaływań górniczych powodujących deformacje podłoża budynku odbywa się w oparciu o sprawdzoną w praktyce teorię Budryka-Knothego, a ściślej mówiąc, o jej analityczne przybliżenie podane przez Budzanowskiego i Lessaera (1966). Na tej podstawie opisywany jest geometryczny kształt niecki górniczej. Zmiany obniżenia w czasie określa natomiast teoria Knothego (1953). W ten sposób sformułowane zostają zmieniające się w czasie przemieszczeniowe warunki brzegowe, które narzucane są na brzegu zadania za pomocą oddzielnego podprogramu współpracującego z modułem obliczeniowym Abaqus/Standard (Florkowska, 2003).
2. W modelowaniu podłoża zastosowane zostały tzw. elementy nieskończone (*infinite elements*), pozwalające opisać względną „nieskończoność” górotworu w porównaniu do wymiarów obiektu. Odwzorowana jest też budowa geologiczna podłoża poprzez wprowadzenie do modelu podziału na poszczególne warstwy geotechniczne. Jako prawo materiałowe przyjęto zmodyfikowany model nakładkowy Drucker-Pragera, dzięki czemu odtworzone zostaje sprężyste, plastyczne i lepkie zachowanie się gruntu, sterowane mechanizmem konsolidacyjnym. Rozwój odkształceń w czasie przebiega według prawa potęgowego (Abaqus Theory Manual, 1988).
3. Na kontakcie fundamentów z podłożem przyjmowane są geometryczne, realne, skleronomiczne, dwustronne więzy kontaktowe. W ustalaniu wartości współczynnika tarcia oparto się na wynikach prac Kwiatka (1967) i Rosikonina (1970). Możliwe są również poślizgi na styku fundamentu z podłożem.
4. Model budynku jest na tym etapie prac najmniej zaawansowany. Jako prawo materiałowe przyjęte zostało prawo Hooka.

Przykład obliczeniowy

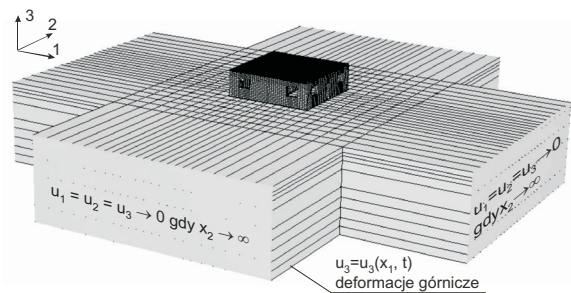
Ilustrację działania omówionej metodyki stanowi prosty przykład, którego schemat widoczny jest na rys. 2.

Rozpatrywany jest jednokondygnacyjny budynek, którego podłoże składa się z warstw geotechnicznych pokazanych na rysunku 2. Przyjęto, że poniżej 10 m zalega calizna skalna. W odległości ok. 1200 m od obiektu i na głębokości 700 m rozpoczyna się eksploatacja. Przesuwa się ona z prędkością ok. 10 m/dobę.

Na rys. 3 pokazano siatkę elementów skończonych modelu numerycznego. Dyskretyzację przeprowadzono przy pomocy ośmiowęzłowych, liniowych elementów skończonych oraz również ośmiowęzłowych, liniowych elementów nieskończonych na pionowych brzegach bryły podłoża. Na brzegu dolnym narzucono czasowo zmienne, przemieszczeniowe warunki brzegowe, symulujące przebieg niecki górniczej. Model składał się z 23 500 elementów. Czas CPU obliczeń na 1 procesorze 500 MHz to ok. 11 000 s.



Rys. 2 Schemat przykładu obliczeniowego



Rys. 3 Siatka elementów dla przykładu obliczeniowego

W stanie początkowym założono w podłożu istnienie naprężeń geostatycznych, co opisano tensorem naprężeń głównych o kierunkach pokrywających się z pionem i poziomem. Następnie rozpoczęty zostaje proces eksploatacji, który, przesuwając się pod kątem prostym w stosunku do osi budynku, przechodzi pod obiektem i biegnie dalej.

Dane dotyczące niecki przyjęte na podstawie prognozy górniczej:

- $u_{3\max} = 1.0$ [m] – maksymalne obniżenie terenu,
- $r = 350$ [m] – promień rozproszenia wpływów eksploatacji na powierzchni terenu,
- $H = 700$ [m] – głębokość eksploatacji,
- $\operatorname{tg}\beta = 2.0$ – parametr górotworu,
- $c = 8e-7$ [1/s] – współczynnik czasu.

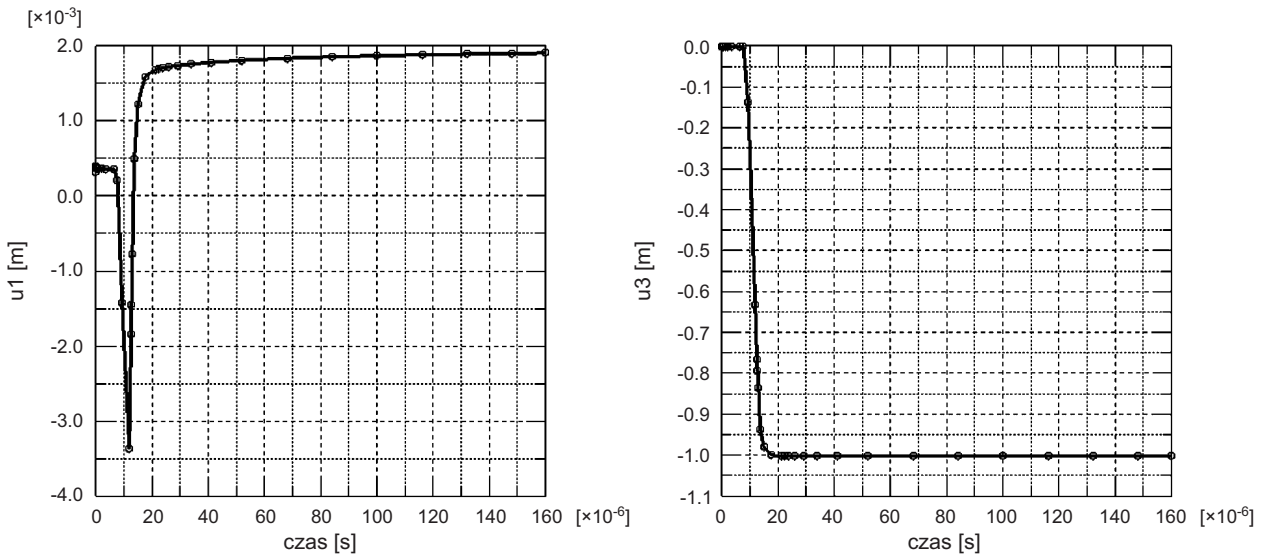
Symulacja obejmowała okres 5 lat. Zastosowany został automatyczny dobór przyrostów czasowych wewnątrz kroku, kontrolowany poprzez wyznaczenie maksymalnej, dopuszczalnej w przyroście czasu, zmiany odkształceń niesprężystych.

Omówienie wyników

Przebieg procesu deformacji w podłożu

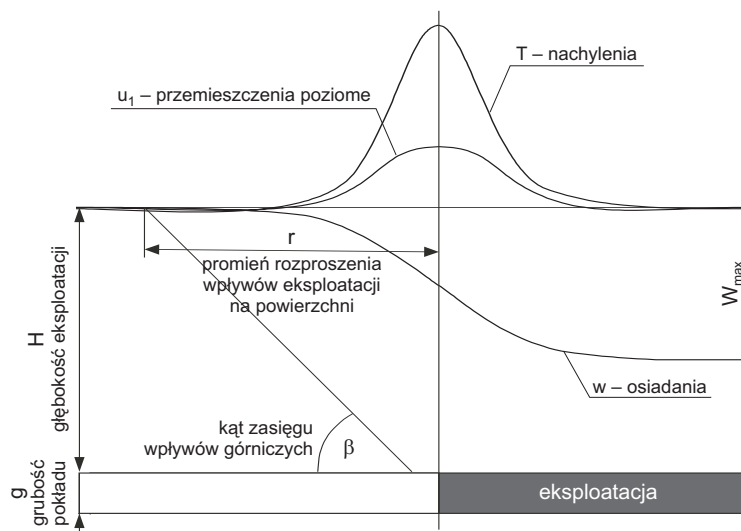
Czasowy przebieg przemieszczeń podłoża w okresie 5 lat pokazany jest, dla wybranego punktu, usytuowanego w pobliżu naroża ławy fundamentowej, na rys. 4. Oczywiście najszybszy przyrost przemieszczeń następuje w okresie przechodzenia frontu eksploatacji pod obiektem. Później procesy deformacji powoli się „uspokajają”. Proces ten nie przebiega jednak równomiernie w przestrzeni podłoża. Obecność sztywnej bryły budynku powoduje „hamowanie” przemieszczeń, w rezultacie na fundamenty budynku nie działają aż tak duże siły, jakich można by się spodziewać biorąc wartości przemieszczeń, jak dla niecki swobodnie się kształtującej.

Jak wiadomo, najniebezpieczniejsze dla fundamentów są w tym wypadku oddziaływania poziome. Wykres na rys. 4 pokazuje, że ekstremum osiągają one, gdy eksploatacja przebiega pod budynkiem, po czym wartości przemieszczeń poziomych powoli powracają w pobliże stanu początkowego. Według teorii



Rys. 4. Przebieg przemieszczeń poziomych u_1 w kierunku eksploatacji oraz pionowych u_3 w czasie, w podłożu budynku tuż pod fundamentem

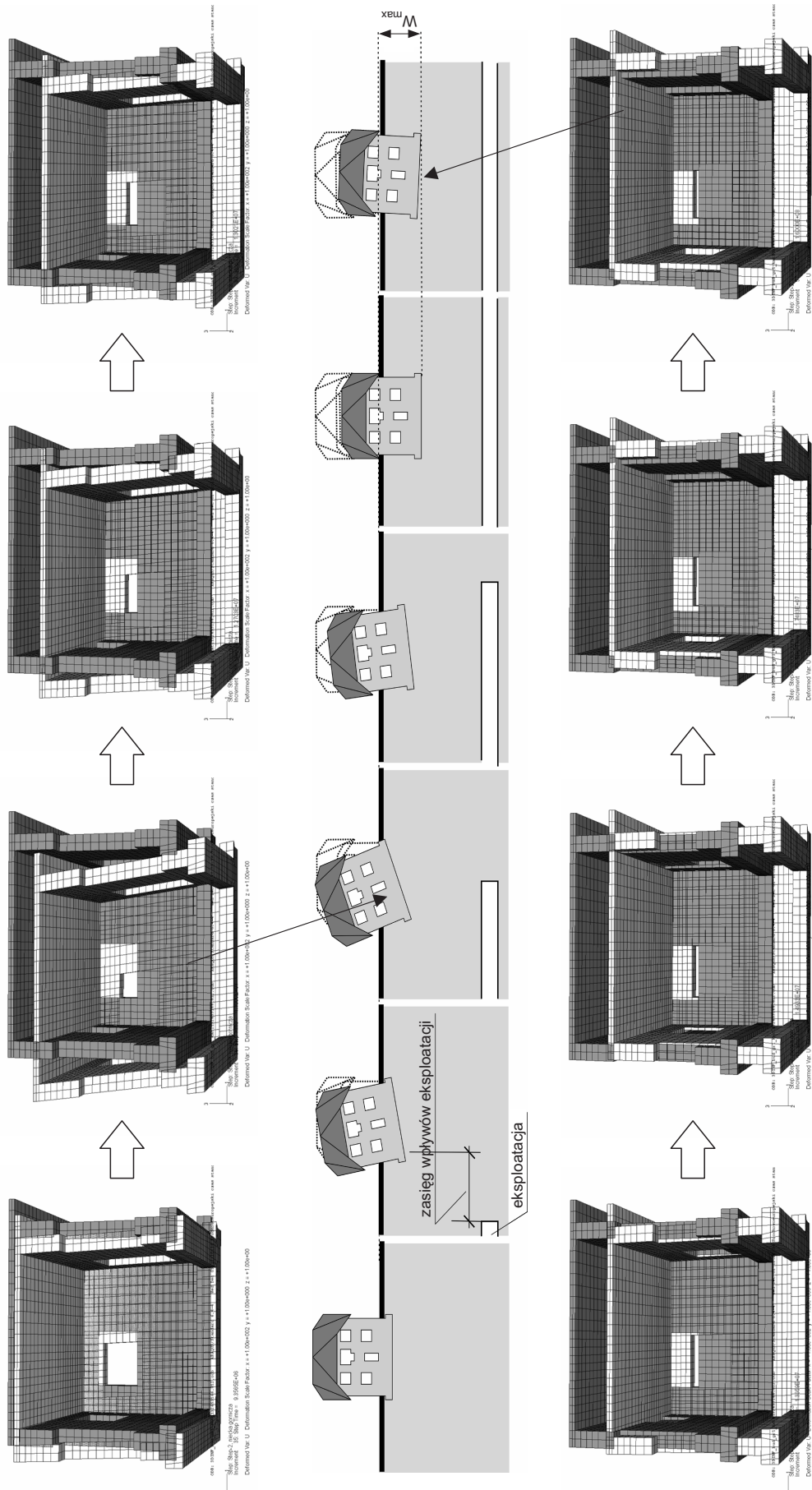
Budryka-Knothego (Kwiatek, 1997, s. 62) ekstremalne przemieszczenia poziome występują nad krawędzią, po czym zanikają i w odległości większej, niż promień zasięgu wpływów są zerowe (patrz rys. 5). W przedstawianym przykładzie ekstremalne wartości poziomych przemieszczeń podążają za przesuwanym się frontem eksploatacji. Natomiast w punktach, pod którymi front już przeszedł, nie powracają do zera, ponieważ zaczynają działać mechanizmy plastyczności gruntu. Dochodzi zatem do powstania deformacji trwałych. Ważne jest zatem uwzględnienie w obliczaniu zabezpieczeń stanów przejściowych, znacznie bardziej niekorzystnych, niż ostatecznie wykształcony stan ustalony.



Rys. 5. Rozkład osiadań w , przemieszczeń poziomych u_1 oraz nachyleń T na powierzchni terenu nad krawędzią eksploatacji wg teorii Budryka-Knothego

Reakcja budynku na deformacje podłoża

Przebiegające w czasie deformacje podłoża stanowią dla budynku dodatkowy rodzaj obciążenia, którego wartość oraz kierunek działania uzależniona jest głównie od: sposobu prowadzenia eksploatacji, usytuowania bryły budynku względem kierunku wybierania, oraz rodzaju podłoża. Przeprowadzenie symulacji komputerowej pozwala na uwzględnienie wszystkich tych czynników oraz stopniowe śledzenie zmian stanu konstrukcji pod wpływem eksploatacji. Na rys. 6 na fragmencie budynku przedstawiono proces



Rys. 6. Deformacja fragmentu budynku z przykładu obliczeniowego pod wpływem eksploatacji. Kolorem ciemniejszym zaznaczono początkowy kształt siatki, kolorem jaśniejszym – aktualny. Skala deformacji: w kierunku poziomym – 100, w kierunku pionowym – 1

deformowania się konstrukcji w miarę przesuwania się pod nim frontu eksploatacji. Proces ten rozpoczyna się w momencie, gdy budynek wchodzi w zasięg wpływów eksploatacji. Następuje wówczas przechylenie się konstrukcji w kierunku wybieranego pokładu wywołane poziomymi przemieszczeniami podłoża zwróconymi w stronę wybranego pokładu. Jak wskazuje teoria Budryka-Knothe, przemieszczenia te osiągną maksimum w punkcie położonym nad krawędzią eksploatacji (patrz rys. 5). W tym też miejscu teren doznaje największych nachyleń. Wyniki modelowania pokazują, że (z niewielkim opóźnieniem) zarówno przemieszczenia poziome w kierunku wybierania, jak i nachylenia budynku mają wartości ekstremalne, gdy front eksploatacji znajduje się pod osią budynku. Wartości przenoszonych się z podłoża na budynek deformacji są jednak mniejsze, niż deformacje niezabudowanej powierzchni terenu, na której wykształca się poeksploatacyjna niecka obniżeń. Znajomość wielkości tych deformacji oraz wywołanych przez nie sił wewnętrznych w elementach konstrukcyjnych pozwala na ocenę bezpieczeństwa konstrukcji oraz zaprojektowanie odpowiednich zabezpieczeń.

Podsumowanie

Wyznaczanie stanu konstrukcji budowlanej wywołanego przez górnicze deformacje podłoża i zmieniającego się w czasie wraz postępiami wybierania złoża jest, jak już stwierdzono, zadaniem o takim stopniu złożoności, że poszukiwanie analitycznego rozwiązania nie wydaje się być słuszną drogą postępowania. Istnieją oczywiście zbiory wytycznych, oparte na uproszczonych schematach, sprawdzone i powszechnie stosowane w profilaktyce szkód górniczych dla budowli o typowej konstrukcji. Jednakże w przypadkach obiektów nietypowych, o szczególnym znaczeniu lub cennych ze względów historycznych konieczne jest zawsze przeprowadzenie indywidualnej analizy. W takich właśnie przypadkach możliwości, jakie stwarza modelowanie numeryczne okazują się bardzo cenne.

Zaprezentowany w pracy prosty przykład obliczeniowy ilustrujący opracowaną w IMG PAN metodykę symulowania wpływu eksploatacji na obiekty budowlane, pokazał, że uzyskane przy jej użyciu wyniki są zgodne z aktualnym stanem wiedzy w dziedzinie szkód górniczych w budynkach. Na obecnym etapie wyniki nie zostały jeszcze jednak zweryfikowane doświadczalnie. Metodyka pozostaje wciąż w fazie rozwoju i doskonalenia.

Literatura

1. ABAQUS Theory Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., U.S.A., 1998.
2. Budzanowski Z., Lessaer S.: *O osiadaniu fundamentów posadowionych na sypkim gruncie podlegającym rozpełzaniu w czasie eksploatacji górniczej*, Archiwum Inżynierii Łądowej, 1966.
3. Florkowska L.: Wybrane problemy współdziałania budowli z górotworem, Prace IMG PAN, Rozprawy, monografie 3, Kraków 2003.
4. Knothe S.: Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, 1953; Vol. I, No. 1, p. 22-38 [in polish].
5. Knothe S.: *Wpływ czasu na kształtowanie się niecki osiadania*, Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, 1953; t. 1, z. 1.
6. Kwiatek J.: *Wpływ rozpełzania podłoża na siły rozciągające w fundamentach budowli*, Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice, 1967.
7. Majewski S.: *Sprężysto-plastyczny model współpracującego układu budynek – podłoże poddanego wpływom górniczych deformacji terenu*, Politechnika Śląska, Zeszyty Naukowe, 1995, Gliwice.
8. Phoon K., Chan S., Toh K., Lee F.: *Fast iterative solution of large undrained soil-structure interaction problems*, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 2003, 27: 159-181.
9. Rosikoń A.: *Badania modelowe odkształceń i naprężeń w podłożu ławy rozciągany lub ściskany osiowo*, Archiwum Inżynierii Łądowej, vol. 16, z. 2, 1970.
10. Xie H., Chen Z., Wang J.: *Three-dimensional numerical analysis of deformation and failure during top coal caving*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36, 651-658.

Numerical modelling in predicting and preventing for mining damages in buildings**Abstract**

The preservation of the ground surface subjected to the degradation as a result of extracting useful minerals still is making the important problem for all regions, on which the exploitation is or was made. This problem gains the even bigger significance when a need of the preservation of building objects being found is also possible in the range of mining influences. Designing and making appropriate safety barriers require the state of stress prediction (and, connected with it, prediction of strains and displacements) made for both: subsoil and the structure. Since there is this very complex problem, numerical methods seem to be an appropriate tool of solving it.

In the Strata Mechanics Research Institute works on numerical modelling the influence of mining deformations of the rock mass on surface structures are conducted for a few years. In their result a methodology which lets for taking into consideration elastic, plastic and viscous properties of soil was worked out and using the theory of predicting the deformation of the ground surface established by Budryk & Knothe. This methodology is enabling simulating, running in the time and in the space, of developing of mining trough. Numerical calculations are being made in the package of FEM programs – ABAQUS.

At work results of 2D and 3D numerical modelling of the influence of the mining exploitation on the structure of a building, carried out according to methodology worked out were introduced.

Keywords: numerical modelling, FEM, mining damage, building, base

Recenzent: Prof. dr. hab. inż. *Edward Popiołek*, Akademia górniczo-Hutnicza