

Wpływ podziemnej eksploatacji górniczej na grupę budynków. Modelowanie fizyczne i numeryczne 2D

JERZY CYGAN, LUCYNA FLORKOWSKA, JAN LEŚNIAK, JAN WALASZCZYK

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

Streszczenie

Oddziaływanie podziemnej eksploatacji złóż na budynki pozostające w gęstej zabudowie stanowi istotny problem na terenach górniczych. W IMG PAN od lat prowadzone są badania nad metodyką numerycznego modelowania tego typu zagadnień. Obecnie rozpoczęto stadium eksperymentów testujących i weryfikujących opracowaną metodykę w oparciu o wyniki pomiarów na istniejących obiektach.

W pracy zaprezentowano rezultaty badań wstępnych tego etapu. Objęły one eksperymenty fizyczne i numeryczne. Obserwacje prowadzone na modelu fizycznym obrazowały zachowanie się zespołu obiektów usytuowanych na powierzchni deformującej się na kształt niecki górniczej. Symulacje numeryczne w tym stadium miały charakter szacunkowy i prowadzone były na modelach dalece wyidealizowanych.

Uzyskane na tej drodze wyniki staną się podstawą opracowania modelu szczegółowego, umożliwiającego analizę stanu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń konstrukcji budynków.

Słowa kluczowe: szkody górnicze w budynkach, modelowanie fizyczne, modelowanie numeryczne, MES

1. Wstęp

Określanie wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na naziemne obiekty budowlane jest istotnym problemem w wielu obszarach kraju. Ponieważ tereny objęte oddziaływaniem eksploatacji kopalni to zwykle tereny o gęstej, zarówno przemysłowej, jak i mieszkaniowej zabudowie, zagadnienie staje się jeszcze bardziej złożone. Dochodzi bowiem do zjawiska nakładania się zarówno wpływów kolejnych eksploatacji, jak i wzajemnego oddziaływania sąsiadujących obiektów. Problem staje się na tyle skomplikowany, że jedyną drogą postawienia naukowej prognozy wydaje się być zastosowanie aparatu numerycznej symulacji.

W pracy przedstawiono wyniki wstępnych badań nad zastosowaniem, opracowywanej przez zespół autorów, metodyki modelowania numerycznego do określania oddziaływania podziemnej eksploatacji górniczej na grupę budynków mieszkalnych. W badaniach wykorzystano udostępnione przez Kompanię Węglową SA materiały i ekspertyzy dotyczące wpływu eksploatacji pokładu 418 KWK Pokój na grupę budynków mieszkalnych zlokalizowanych przy ul. 1-go Maja w Rudzie Śląskiej.

2. Opis analizowanego zagadnienia

KWK „Pokój” od wielu lat prowadzi eksploatację pod Rudą Śląską. W rejonie, który był przedmiotem analizy wyeksploatowanych zostało kilkanaście pokładów w latach 1975-2006. Eksploatacje prowadzone były z różnym sposobem utrzymania stropu: z zawalem, z podsadzką suchą lub z podsadzką płynną. Łączne obniżenie powierzchni w wyniku przeprowadzonych eksploatacji wyniosło kilkanaście metrów. Górotwór w tym rejonie został w znacznym stopniu naruszony. Na przełomie lat 2004-2005 w analizowanym rejonie przeprowadzono eksploatację z podsadzką płynną w pokładzie 416, a następnie, z końcem 2005 roku, przystąpiono do eksploatacji z podsadzką suchą w niżej leżącym pokładzie 418. Przedmiotem analizy był wpływ eksploatacji pokładu 418 na budynki od numeru 222 do 238 przy ul. 1 Maja w Rudzie Śląskiej (rys. 1).



Rys. 1. Analizowane budynki przy ul. 1. Maja w Rudzie Śląskiej

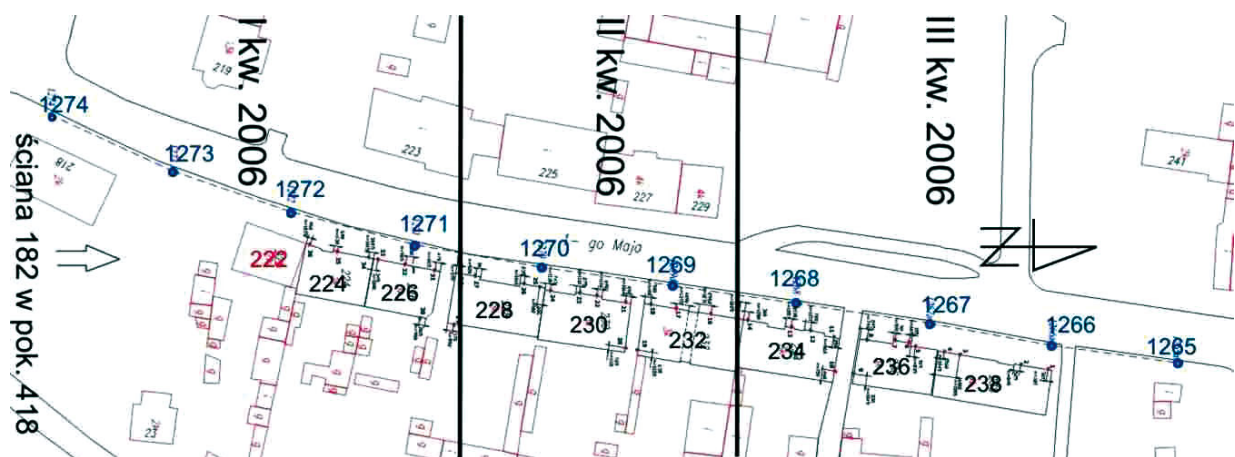
2.1. Charakterystyka budynków

Rozważane budynki (rys. 1) zlokalizowane są, jak już wspomniano, przy ul. 1-go Maja w Rudzie Śląskiej. Szczegóły lokalizacji przedstawiono na mapie powierzchni – rys. 2. Budynki wybudowane zostały w latach 1895-1920 jako wielorodzinne budynki mieszkalne w zabudowie półzwartej. Są to budynki 3-4 kondygnacyjne. Posiadają poprzeczny układ konstrukcyjny: stropy oparte są na ścianach podłużnych (zewnętrznych i wewnętrznych). Uogólniając stwierdzić można, że: ściany wykonane są z cegły pełnej, stropy nad piwnicą to stropy ceramiczne na belkach stalowych (Kleina), natomiast pozostałe stropy to stropy drewniane (Kawulok, 2006). Obiekty posadowione zostały na poziomie stałym, fundamenty wykonano z cegły lub kamienia. Podłoże stanowią przeważnie grunty gliniaste. Ogólny stan techniczny tych budynków określono jako średni.

W czasie prowadzenia eksploatacji pokładu 418 zaobserwowane zostały deformacje budynków, głównie w formie znacznych wychyleń ścian szczytowych. Ich następstwem były zarysowania i pęknięcia. Główną przyczyną było niewątpliwie zatrzymanie frontu eksploatacji pod obszarem budynków, zaś dodatkowym czynnikiem mogło być znaczne naruszenie górotworu w tym rejonie wielokrotnymi już eksploatacjami.

2.2. Sytuacja górnicza

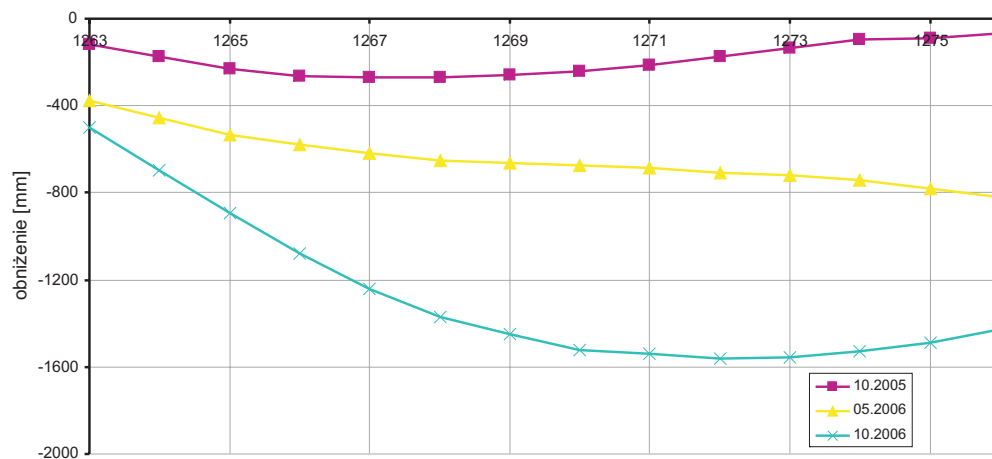
W pokładzie 418 pod ulicą 1 Maja rozpoczęto eksploatację z podsadzką suchą pod koniec 2005 roku ścianą 182 o długości ok. 300 m. Głębokość eksploatacji w omawianym rejonie wynosiła ok. 670 m, a grubość wybieranej warstwy pokładu wynosiła ok. 2.7 m. Analizowane budynki przy ul. 1 Maja znalazły się pod wpływem eksploatacji pokładu 418 z początkiem 2006 roku. Na rysunku 2 przedstawiono usytuowanie omawianych budynków w stosunku do prowadzonej eksploatacji. Eksploatacja ściany 182 w pokładzie 418 w początkowym okresie prowadzona była bez zakłóceń. W czwartym kwartale 2005 roku i w pierwszym kwartale 2006 roku średnia prędkość postępu frontu eksploatacyjnego wynosiła ok. 2-3 m/dobę. Na skutek problemów z utrzymaniem stropu z końcem pierwszego i w drugim kwartale 2006 roku postęp eksploatacji uległ zmniejszeniu, a nawet front eksploatacji był zatrzymywany. Niestety w tym czasie front eksploatacji znajdował się bezpośrednio pod analizowanymi budynkami przy ul. 1 Maja, co wpłynęło w niekorzystny sposób na obiekty i spowodowało w nich znaczne uszkodzenia. W trzecim kwartale 2006 roku eksploatacja przebiegała znowu w sposób równomierny ze średnią prędkością ok. 2.5 m/dobę.



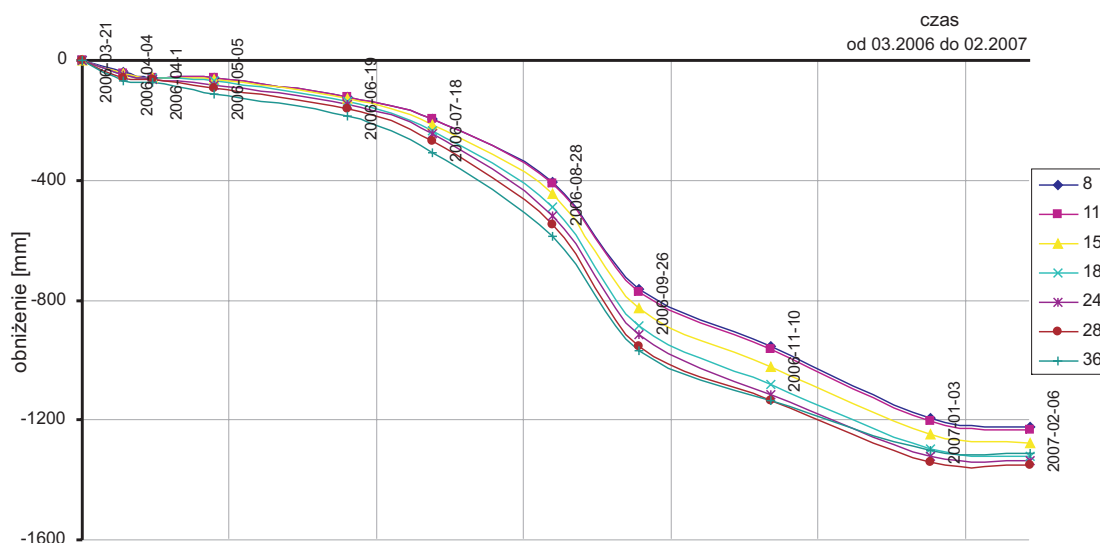
Rys. 2. Schemat eksploatacji KWK Pokój pod budynkami przy ul. 1 Maja w Rudzie Śląskiej

Wzdłuż ul. 1 Maja prowadzone były pomiary niwelacyjne na reperach ziemnych z częstotliwością dwa razy w roku. Na rysunku 3 przedstawiono wykresy niecek obniżeniowych wzdłuż ul. 1 Maja w sąsiedztwie analizowanych budynków. Niestety zbyt mała częstotliwość pomiarów (tylko cztery pomiary w czasie oddziaływania eksploatacji na budynki) nie pozwala na wyciąganie zbyt daleko idących wniosków. Stwierdzone największe obniżenia wynoszą ok. 1.6 m i występują pod analizowanymi budynkami. Budynki zlokalizowane są pomiędzy reperami 1272 i 1266.

Jak wyżej wspomniano, pod koniec pierwszego kwartału 2006 roku wystąpiły problemy z płynnością eksploatacji (zatrzymania frontu eksploatacyjnego), co skutkowało zwiększeniem uszkodzeń obiektów przy ul. 1 Maja. W związku z tym zainstalowano na analizowanych budynkach repery pomiarowe (rys. 2) i od marca 2006 rozpoczęto na nich pomiary niwelacyjne ze zwiększoną częstotliwością (jeden raz w miesiącu). Na rysunku 4 przedstawiono wykresy obniżeń w zależności od czasu dla wybranych reperów na budynkach. Można stwierdzić spowolnienie przyrostu obniżeń w drugim kwartale 2006 roku w wyniku znacznego zmniejszenia prędkości eksploatacji, w trzecim kwartale następuje znaczny przyrost obniżeń (eksploatacja zwiększyła prędkość) a w czwartym kwartale 2006 roku (eksploatacja oddaliła się poza analizowane budynki) przyrosty obniżeń maleją. Końcowe obniżenia reperów na budynkach wynoszą ok. 1.3 m i są mniejsze od obniżeń stwierdzonych na linii obserwacyjnej wzdłuż ul. 1 Maja (rys. 3) ponieważ nie obejmują one początkowej fazy oddziaływania eksploatacji na obniżenia budynków (są to obniżenia względne).



Rys. 3. Obniżenia reperów ziemnych na linii pomiarowej wzdłuż ul. 1-go Maja zarejestrowane od października 2005 r. do października 2006 r.



Rys. 4. Obniżenia w czasie wybranych reperów na budynkach przy ul. 1 Maja

Pomiary prowadzone w rejonie budynków przy ul. 1 Maja w Rudzie Śląskiej nie pozwoliły na wyciągnięcie jednoznacznych wniosków, ponieważ częstotliwość pomiarów reperów ziemnych wzdłuż ul. 1 Maja była mała (dwa razy w roku) a repery na budynkach zostały założone zbyt późno, kiedy eksploatacja ściany 182 już od pewnego czasu oddziaływała na budynki.

3. Badania modelowe

Zgromadzone materiały pomiarowe oraz dane na temat eksploatacji i budynków poddano gruntownej analizie. Prace te zapoczątkowały serię eksperymentów testujących i weryfikujących opracowaną w IMG i wciąż rozbudowywaną metodykę modelowania numerycznego wpływu eksploatacji na budynki. W ramach badań wstępnych wykonano próby z modelem fizycznym oraz analizę numeryczną na uproszczonym modelu dwuwymiarowym. Prace te opisano szerzej w rozdz. 3.1 i 3.2. Wyniki tych eksperymentów, jakkolwiek o znaczeniu wyłącznie jakościowym, posłużyć miały do:

- weryfikacji prawidłowości obranego kierunku modelowania,
- uzyskania obrazu zjawisk zachodzących w podłożu zespołu budynków,
- sformułowania właściwego (szczegółowego) modelu numerycznego, uwzględniającego zjawiska mające istotny wpływ na to, co dzieje się z konstrukcją obserwowanych obiektów.

3.1. Modelowanie fizyczne

Eksperymenty realizowano na urządzeniu do badań modelowych z przesuwaną szczeliną wysypową. Urządzenie omówiono w pracach (Knothe i in., 2000; Cygan i in. 2000). Jako ośrodek sypki zastosowano piasek niezagęszczony. Wysokość modelu wynosiła $H = 320$ mm. Pod powierzchnią modelu na poziomach $H = 310$ mm i $H = 300$ mm umieszczono linie pomiarowe złożone z 41 punktów pomiarowych. Odległości pomiędzy punktami pomiarowymi wynosiły 10 mm.

W badaniach modelowych odtworzono proporcjonalnie wymiary i wzajemne położenie budynków z ul. 1 Maja w Rudzie Śląskiej (rys. 5). Budynki reprezentowane były poprzez skrzynki z blachy aluminiowej wypełnione śrutem ołowianym. Wagę poszczególnych skrzynek dobrano tak, aby obciążenie przez nie powierzchni modelu było jednakowe i wynosiło 3 g/cm^2 podobnie jak w eksperymentach realizowanych w roku ubiegłym (Florkowska i in., 2006). Na ścianie czołowej skrzynek umieszczono po dwa krzyże pomiarowe.

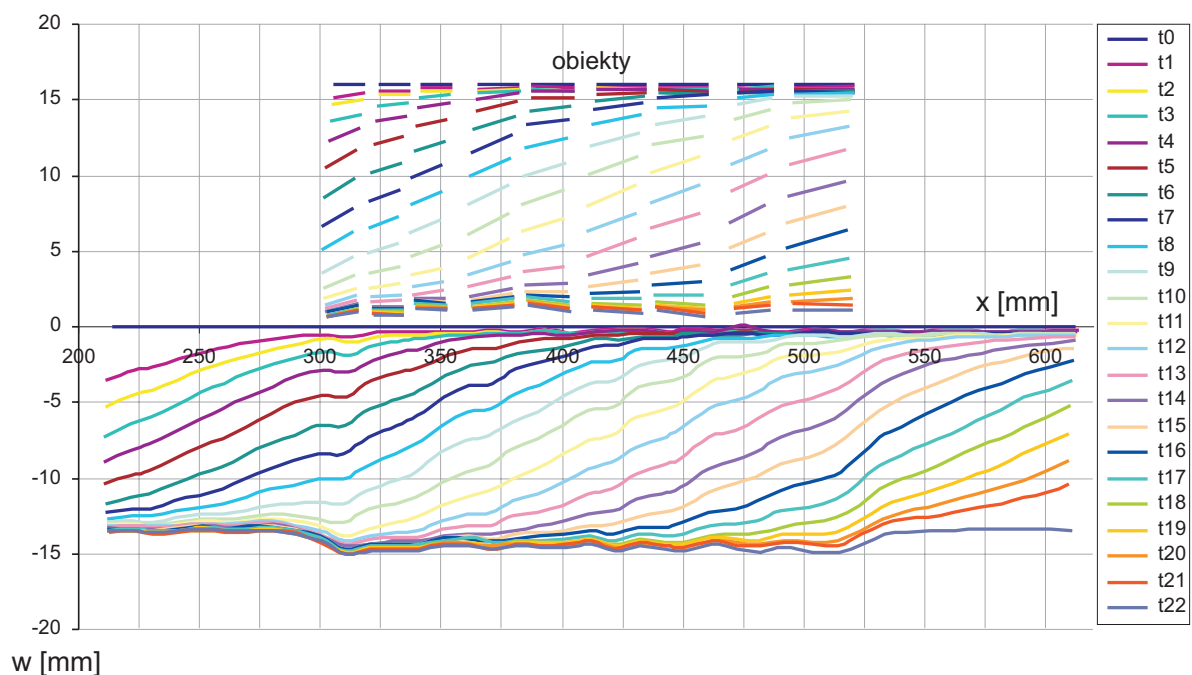
Przebieg eksperymentu wyglądał następująco: szczelina wysypowa realizująca eksploatację przesuwała się od lewego brzegu skrzyni modelowej ze stałą prędkością w kierunku prawego brzegu. Kolejne zatrzymania szczeliny wysypowej (co 25 mm) realizowały poszczególne etapy eksperymentu. Eksploatacja zbliżała się do obiektów, przechodziła pod nimi i następnie oddalała się – zrealizowano 22 etapy eksperymentu. Ilość usuniętego przez szczelinę wysypową piasku w dnie skrzyni modelowej odpowiadała zadaniu



Rys. 5. Fotografia modelu

w dnie skrzyni obniżenia o ok. 6 mm. Stan zerowy i poszczególne etapy eksperymentu rejestrowane były przy użyciu aparatu cyfrowego. Zdjęcia cyfrowe po wprowadzeniu do komputera stanowiły bazę danych do określenia przemieszczeń pionowych i poziomych na linii pomiarowej oraz przemieszczeń obiektów znajdujących się na powierzchni modelu.

Na rysunku 6 przedstawiono wykresy niecek obniżeniowych dla wszystkich kolejnych etapów eksperymentu na linii obserwacyjnej znajdującej się bezpośrednio pod powierzchnią modelu ($H = 310$ mm) oraz obniżenia 9 obiektów usytuowanych na powierzchni modelu imitujących budynki przy ul. 1 Maja. Przebieg niecek obniżeniowych jest regularny, związany z kolejnymi położeniami szczeliny wysypowej. Na skutek usytuowania na powierzchni modelu obiektów występują lokalne zwiększenia obniżeń na linii pomiarowej bezpośrednio pod każdym z obiektów na co zwrócono już uwagę w pracy (Florkowska i in., 2006). Zwiększenie obniżeń pod obiektem pojawia się w chwili, gdy front eksploatacji zbliża się do obiektu na ok. 80 mm i utrzymuje się przy dalszym przesuwaniu się frontu. Na takie kształtowanie się obniżeń pod obiektami ma wpływ zagęszczanie się ośrodka podczas eksploatacji a dodatkowe zwiększenie wartości obniżeń pod obiektami może być spowodowane lokalnym ekranowaniem wpływów w wyniku obciążenia generowanego przez obiekt usytuowany na powierzchni modelu. Obserwuje się również zwiększenie o ok. 15% obniżeń końcowych (po przejściu frontu pod wszystkimi obiektami) pod wszystkimi obiektami traktowanymi jako całość (rys. 6). Można przypuszczać, że kompleks wszystkich dziewięciu obiektów jako całość oddziałuje na powierzchnię modelu podlegającą obniżeniom podczas eksploatacji. Nachylenia obiektów (rys. 6) są zgodne z nachyleniami niecek obniżeniowych we wszystkich fazach eksperymentu. Obiekty wychylają się w kierunku zbliżającej się eksploatacji, największe nachylenie występuje w chwili przechodzenia frontu eksploatacji pod obiektem a następnie nachylenie obiektu maleje. Gdy front eksploatacji znajduje się za obiektem w znacznej odległości obiekty powracają w przybliżeniu do położenia wyjściowego, a w niektórych obiektach następuje nieznacznie nachylenie w kierunku oddalającej się eksploatacji.



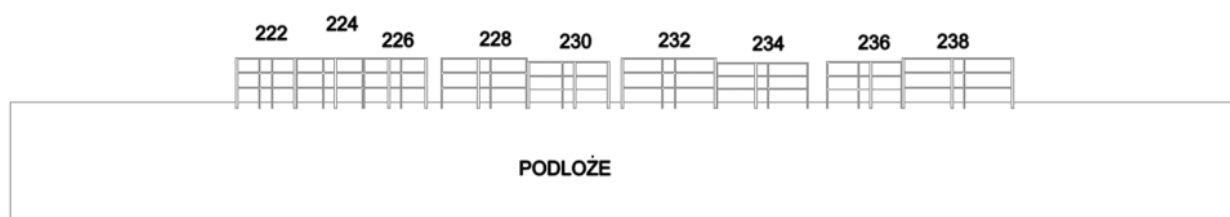
Rys. 6. Obniżenia na linii obserwacyjnej i nachylenia obiektów w kolejnych stanach (etapy od 1 do 22) w badaniach modelowych

Przedstawione powyżej wyniki badań modelowych pozwalają na stwierdzenie oddziaływania umieszczonych na powierzchni modelu obiektów na zakłócenie przebiegu obniżeń. Prawdopodobnie podobne zjawisko występuje w przypadku eksploatacji prowadzonej pod budynkami. Niestety pomiary wykonane przez KWK „Pokój” przy eksploatacji prowadzonej pod budynkami przy ul. 1 Maja w Rudzie Śląskiej nie pozwalają na przeprowadzenie szczegółowej analizy.

3.2. Modelowanie numeryczne

Modelowanie numeryczne opisanego problemu wykonano w oparciu o opracowaną w IMG PAN metodykę, przy zastosowaniu pakietu programów MES ABAQUS.

Sytuacja przestrzenna, w której eksploatacja ściany przebiegała w kierunku ścian podłużnych (wzdłuż ulicy 1-go Maja), pozwoliła na sformułowanie modelu zagadnienia jako zadania płaskiego (płaski stan odkształcenia). Schemat geometryczny modelu pokazano na rys. 7. Przedstawia on równoległy do osi ulicy, uproszczony przekrój przez budynki. Ze względu na fakt, że ten etap modelowania ma charakter badań wstępnych, w modelu zastosowano daleko idącą idealizację tak geometrii, jak i praw materiałowych przyjętych dla obiektów. Jak pokazano na rys. 7 budynki posiadają zróżnicowane wymiary podłużne – przyjęte jak dla budynków rzeczywistych, natomiast układ konstrukcyjny uproszczono przyjmując, że wszystkie obiekty są trzykondygnacyjne.



Rys. 7. Schemat geometrii modelu obliczeniowego

Dla zamodelowania zachowania się budynków zastosowano liniowo sprężysty model materiałowy (prawo Hooke'a) przyjmując parametry tego prawa dla ścian – jak dla homogenicznego elementu murowego, natomiast dla stropów – jak dla drewna. Wartości współczynników (modułu Younga i współczynnika Poissona) zaczerpnięto z literatury (Szojda, 2001). Dla podłoża przyjęto sprężysto-plastyczny model Druckera-Pragera. Parametry prawa przyjęto z literatury jak dla gruntu gliniastego (Kania, 2007).

W przyjętym modelu budynki połączone zostały z podłożem za pomocą skleronomicznych (nie zmieniających się z upływem czasu), realnych (wywołujących siłę tarcia), dwustronnych (punkt materialny w czasie ruchu pozostaje na powierzchni, która nie zmienia swego kształtu z upływem czasu) więzów kontaktowych.

W oparciu o wyniki pomiarów przemieszczeń reperów linii pomiarowej na brzegu obszaru podłoża narzucono zmieniające się w czasie przemieszczeniowe warunki brzegowe, odwzorowujące rzeczywiste deformacje terenu.

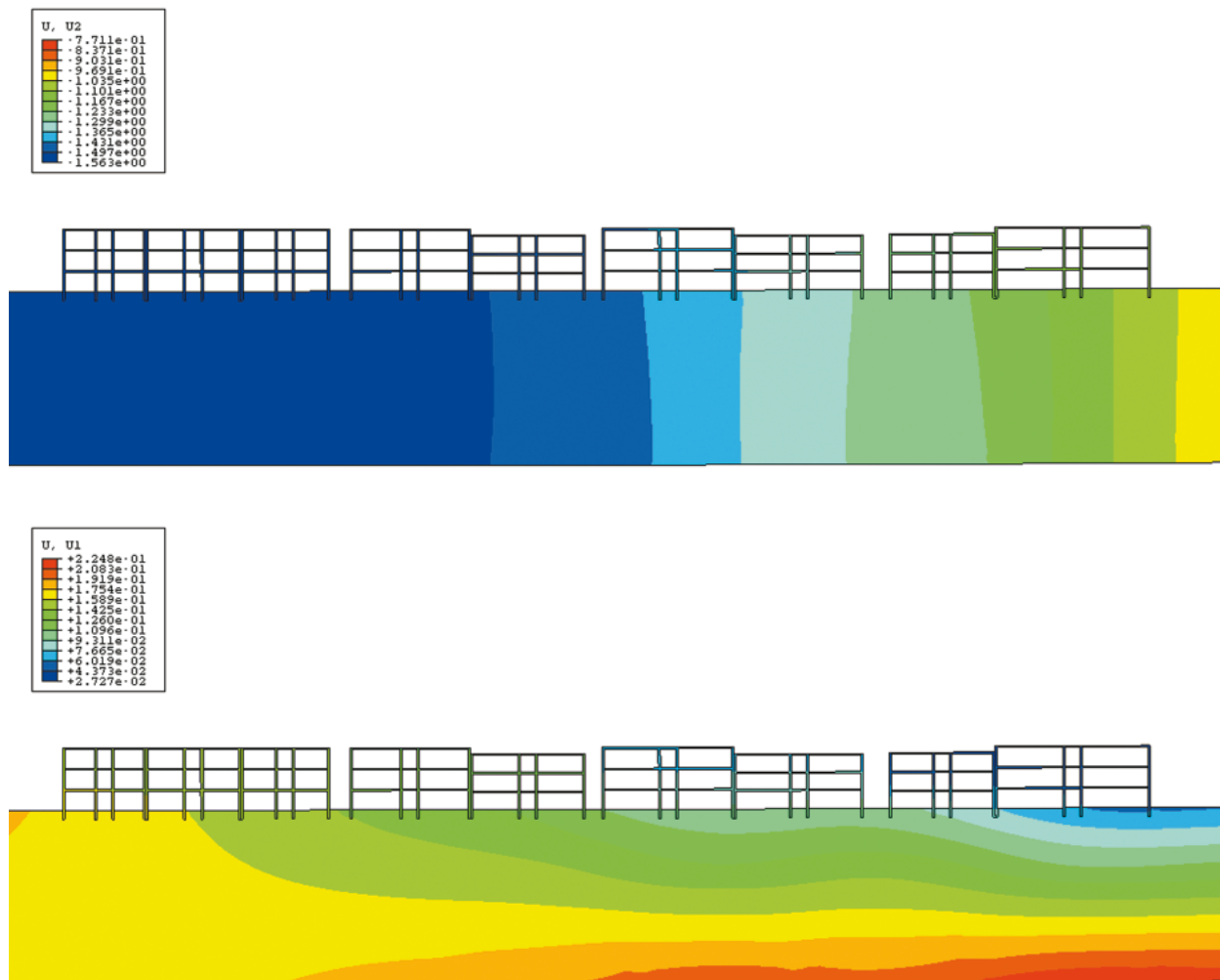
W wyniku tak przeprowadzonej analizy uzyskano obraz przemieszczeń ścian szczytowych jakościowo zgodny z przemieszczeniami zaobserwowanymi na obiektach – rys. 8 i 9. Na drodze odpowiedniej korekty przyjętych w modelu obliczeniowym stałych materiałowych możliwe byłoby uzyskanie lepszej zgodności ilościowej. Nie podjęto tego rodzaju prób z uwagi na brak możliwości weryfikacji. Nie przeprowadzono bowiem odpowiednich badań i właściwości materiałowe, zarówno dla budynków, jak i dla podłoża, przyjęte zostały szacunkowo (jak wspomniano powyżej).

4. Podsumowanie

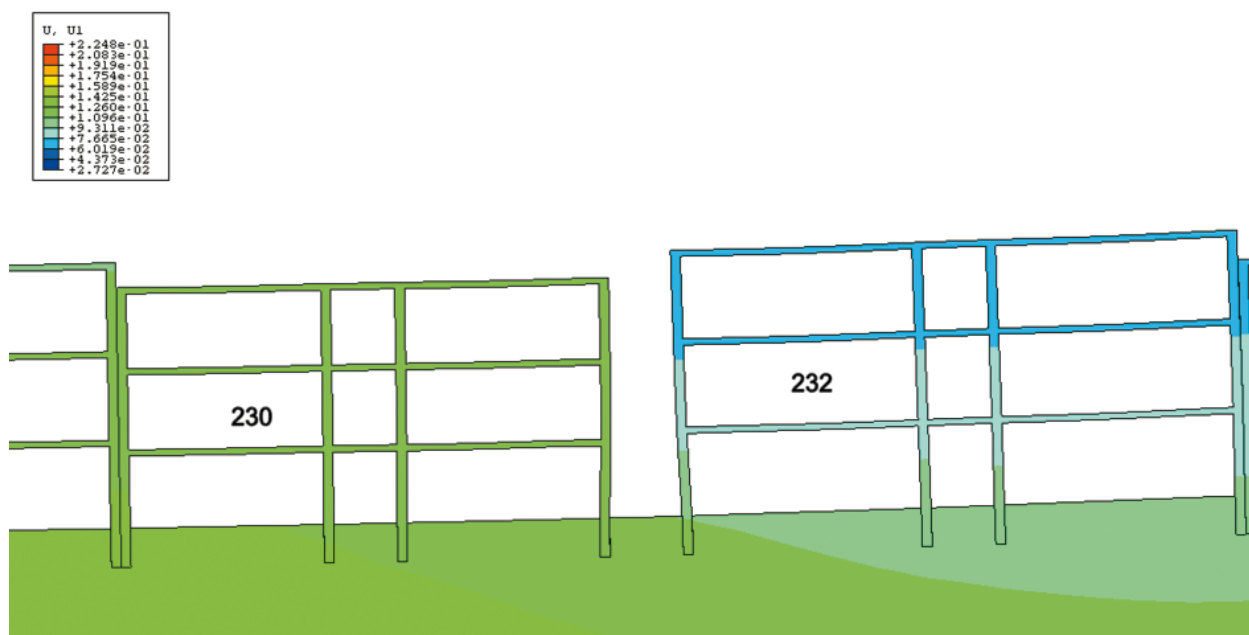
W pracy zaprezentowano wyniki badań nad testowaniem i weryfikacją opracowanej w IMG PAN metodyki modelowania numerycznego zagadnień związanych z oddziaływaniem podziemnej eksploatacji górniczej na obiekty budowlane. W tym celu rozważaniom poddano grupę istniejących budynków mieszkalnych, które w wyniku eksploatacji uległy znacznym deformacjom.

Eksperymenty prowadzone na modelu fizycznym pozwalały na obserwację przebiegu procesu i wizualizację zachowania się brył obiektów pod wpływem deformacji podłoża.

Wstępne testy numeryczne na prostych modelach dwuwymiarowych przebiegły pomyślnie – uzyskano wyniki jakościowo zgodne z pomiarami dokonanymi na obiektach. Niestety nie istniała możliwość dokładniejszej oceny ilościowej, głównie ze względu na brak wiarygodnych danych na temat podłoża i jego



Rys. 8. Pole przemieszczenia pionowych U2 i poziomych U1 budynków [m] uzyskane w wyniku obliczeń numerycznych na uproszczonym modelu płaskim



Rys. 9. Przemieszczenia poziome budynków nr 230 i 232

właściwości fizycznych. Również parametry materiałowe przyjęte dla budynków określić można wyłącznie jako szacunkowe. Niemniej jednak uzyskane rezultaty pozwalają stwierdzić, że testowana metodyka na poziomie najprostszyc, wstępnych testów, funkcjonuje poprawnie.

Następny etap badań stanowić będzie analiza prowadzona na bardziej zaawansowanych modelach trójwymiarowych. Pozwoli to na odtworzenie przestrzennej pracy konstrukcji budynków oraz uzyskanie obrazu stanu naprężeń ścian. W ten sposób możliwe będzie zinterpretowanie przyczyn powstałych uszkodzeń (rys i pęknięć) i ocena bezpieczeństwa konstrukcji.

Pracę wykonano w ramach pracy statutowej realizowanej w IMG PAN Kraków w roku 2007, finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Cygan J., Leśniak J., Pielok W., Rogowska J., 2000: *Kształtowanie się przemieszczeń w górotworze o różnym stopniu naruszenia wcześniejszymi eksploatacjami na podstawie badań modelowych na ośrodku sypkim pionowo niejednorodnym. Cz. 1*, Prace IMG PAN, t. 2, nr 3-4.
- Florkowska L., Cygan J., Leśniak J., Tajduś K., Walaszczyk J., 2006: *Metody analizy numerycznej współdziałania budynku z podłożem deformującym się wskutek eksploatacji podziemnej*. Prace IMG PAN, t. 8, nr 1-4.
- Kania M., 2007: *Analiza warunków stateczności budowli w sąsiedztwie zbocza przy różnych efektywnych głębokościach posadowienia*. Geoinżynieria drogi, mosty, tunele, 03/2007 [14].
- Kawulok M., 2006: *Wykonanie obliczeń określających wytrzymałość wychylonych ścian szczytowych w budynkach mieszkalnych przy ul. 1-go Maja 226, 228, 230, 232, 234, 236 i 238 w Rudzie Śląskiej*. Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Budownictwa na Terenach Górniczych w Gliwicach, Gliwice.
- Knothe S., Leśniak J., Pielok W., Rogowska J., 2000: *Möglichkeiten der Anwendung der Modelluntersuchungen zur Klärung von Fragen der Abbaueinflüsse auf den Prozess der Gebirgisverschiebungen*. 11 International Congress of the International Society for Mine Surveying. Cracow.
- Szojda L., 2001: *Analiza współdziałania murowanych budynków ścianowych z deformującym się podłożem*. Politechnika Śląska, Gliwice.

The influence of underground exploitation on a group of buildings. Physical and numerical 2D modelling

Abstract

The influence of underground mining excavation on buildings in the high-density housing is a significant problem on a mining areas. The research into methodic of numerical modelling of this kind of issues is being conducted for years in Strata Mechanics Research Institute of PAS. The phase of experiments which tested and verify this methodic based on results of measurements of buildings displacements were begun at present.

This paper presents results of preliminary research which enclose physical and numerical experiments.

Keywords: mining damage, physical modelling, numerical modelling, FEM

Recenzent: Prof dr hab. inż. *Edward Popiolek*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków