

Lucyna Florkowska*

MODELOWANIE NUMERYCZNE WPŁYWU GÓRNICZYCH DEFORMACJI PODŁOŻA NA GRUPĘ BUDYNKÓW W ZWARTEJ ZABUDOWIE MIEJSKIEJ**

1. Wstęp

Zidentyfikowanie charakteru i wielkości zmian zachodzących w konstrukcji wskutek oddziaływania eksploatacji górniczej jest podstawą odpowiedniego zabezpieczenia obiektu. Modelowanie numeryczne stanowić może cenne narzędzie wyznaczania stanu konstrukcji obciążonej górnictwem deformacjami podłoża. Zarówno w procesie prognozowania wpływu eksploatacji na budynek, jak również w aspekcie jego monitorowania.

W artykule zaprezentowane zostaną wyniki prac, których celem było rozpoznanie możliwości obserwacji zmian zachodzących w konstrukcji budynków wskutek eksploatacji górniczej, w oparciu o pomiary geodezyjne oraz modelowanie numeryczne.

2. Opis zagadnienia

Rozważać będziemy wpływ podziemnej eksploatacji górniczej na grupę siedmiu budynków murowanych, usytuowanych wzdłuż jednej ulicy, w zabudowie półzwartej. Schemat zagadnienia przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat zagadnienia

* Instytut Mechaniki Górotworu, Polska Akademia Nauk, Kraków

** Praca finansowa ze środków MNiSW w ramach projektu badawczego nr N N524 1749333

2.1. Sytuacja górnicza i geologiczna

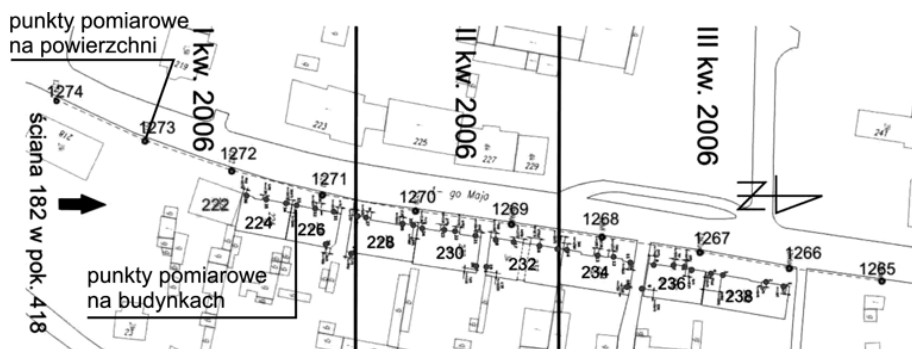
Omawiane obiekty zlokalizowane są na terenie miasta *R*. Bezpośrednio pod budynkami, według udokumentowanych danych, wyeksploatowanych zostało kilkanaście pokładów węgla kamiennego. Eksploatacja ta przebiegała w latach 1975–2006. Wybieranie prowadzone było z różnym sposobem utrzymania stropu: z zawałem, z podsadzką suchą lub z podsadzką płynną. Łączne obniżenie powierzchni w wyniku przeprowadzonych eksploatacji wyniosło kilkanaście metrów. Górnotwór w tym rejonie został w znacznym stopniu naruszony.

Na przełomie lat 2004–2005 w analizowanym obszarze 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.

Rozważaniom poddany zostanie wpływ eksploatacji pokładu 418 na grupę budynków o numerach od 226 do 238.

Pokład 418 zalega na głębokości ok. 670 m. Jego miąższość wynosi średnio 2,7 m. Eksploatację rozpoczęto pod koniec roku 2005 ścianą o długości ok. 300 m i prowadzono z podsadzką suchą. W początkowym okresie prędkość wybierania wynosiła ok. 2÷3 m/dobę. Budynki znalazły się w obrębie oddziaływania eksploatacji z początkiem roku 2006. W pierwszym i drugim kwartale 2006 r. wystąpiły jednakże problemy techniczne z utrzymaniem stropu, wskutek czego prędkość eksploatacji uległa zmniejszeniu. Dochodziło nawet do całkowitego zatrzymywania frontu. W trzecim kwartale 2006 roku eksploatacja przebiegała znowu w sposób równomierny ze średnią prędkością ok. 2,5 m/dobę.

Rozważane budynki zorientowane są w stosunku do eksploatacji w ten sposób, że ich ściany poprzeczne są prostopadłe do kierunku wybierania. Eksploatacja biegnie niemal równoległe do ulicy, wzdłuż której są one usytuowane. Kierunek prowadzenia ściany oraz postęp frontu eksploatacji w stosunku do rzutów obiektów przedstawia rysunku 2.



Rys. 2. Usytuowanie budynków względem eksploatacji, postępy frontu oraz rozmieszczenie punktów pomiarowych

Jedynie dostępne informacje na temat geologii rozważanego rejonu pochodziły z dokumentacji kopalnianej. Nie zawierały one szczegółowych danych dotyczących warstw przy-

powierzchniowych. Na ich podstawie udało się jedynie ustalić, że stanowią je grunty gliniaste. Stąd zaznaczyć należy, że rozpoznanie w odniesieniu do podłoża budynków jest bardzo słabe.

2.2. Charakterystyka budynków

Omawiane budynki powstały pod koniec XIX i na początku XX wieku. Wzniesione zostały w technologii typowej dla tego okresu. Są to murowane kamieniczki na planie prostokąta, o podłużnym układzie konstrukcyjnym, w większości podpiwniczone. Fundamenty i ściany piwnic wykonane są z kamienia lub cegły. Ściany pozostałych kondygnacji — z cegły na zaprawie wapiennej lub cementowo-wapiennej. Grubość ścian podłużnych zewnętrznych wynosi ok. 45 cm. Grubość ścian szczytowych wynosi ok. 50 cm na parterze i ok. 38 cm na wyższych kondygnacjach. Stropy w większości są stropami ceramicznymi na belkach stalowych, jedynie stropy (stropodachy) nad najwyższą kondygnacją w niektórych budynkach są konstrukcjami drewnianymi.

Na zlecenie kopalni P, prowadzącej w tym rejonie eksploatację, wykonana została ocena stanu technicznego budynków przygotowana przez Śląski Oddział ITB. W opracowaniu tym [8] stan obiektów określono, jako średni. Budynki, pomimo prowadzenia pod nimi kilkunastokrotnej eksploatacji nie wykazywały znaczących uszkodzeń. Jednakże eksploatacja pokładu 418 doprowadziła do niebezpiecznych wychyleń ścian szczytowych. Najprawdopodobniej było to skutkiem zatrzymywania eksploatacji, gdy front znajdował się bezpośrednio pod budynkami. Dla zabezpieczenia obiektów zaprojektowano i wykonano wzmocnienia wychylonych ścian, co zapobiegło dalszym uszkodzeniom.

2.3. Pomiary geodezyjne

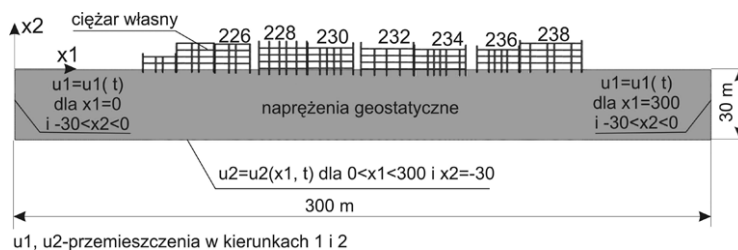
W omawianym okresie czasu służby miernicze kopalni P prowadziły pomiary niwelacyjne oraz pomiary odległości pomiędzy punktami na reperach ziemnych tworzących linię wzdłuż ulicy. W rozpatrywanym czasokresie wykonane zostały cztery pomiary. Zarejestrowano obniżenia terenu pochodzące od trwającej eksploatacji, których ekstremum zlokalizowane było na wysokości budynków i wynosiło 1,6 m. Zaobserwowano również odkształcenia poziome powierzchni terenu, których znak zmieniał się w procesie wykształcania się niecki górniczej. Pozostałe po przejściu eksploatacji odkształcenia podłoża ustabilizowały się na poziomie ok. $-2E-03$ [-].

Po zaobserwowaniu pierwszych wychyleń ścian punkty pomiarowe zastabilizowane zostały także na budynkach. Ich rozmieszczenie pokazano na rysunku 2. Umieszczono po 3 lub 4 repery na podłużnych ścianach frontowych (od strony ulicy) oraz, w przypadku budynków o numerach 230, 232, 234 i 236, dodatkowo po jednym reperze na ścianach szczytowych, a dla budynków 226 i 228 po jednym reperze na tylnych ścianach podłużnych. W ten sposób wyznaczano profile wychYLENIA ścian budynków. Największe wartości przemieszczeń poziomych zarejestrowano na krawędzi północno-wschodniej budynku nr 226. Przemieszczenia te w poziomie najwyższego stropu wyniosły 267 mm.

3. Model numeryczny zagadnienia

Na podstawie zgromadzonego materiału dokumentacyjnego skonstruowany został model numeryczny zagadnienia.

Wykorzystując fakt, że ciąg budynków usytuowany jest niemal równoległe do kierunku eksploatacji, możliwe było zastosowanie modelu płaskiego (rys. 3), znacznie upraszczające opracowanie geometrii zagadnienia. Mimo to odtworzenie geometrii całej grupy budynków okazało się zadaniem żmudnym z uwagi na liczne braki oraz rozbieżności w istniejącej dokumentacji. Chociaż większość nieścisłości udało się wyjaśnić i skorygować, uzyskany model traktować należy jako dalece przybliżony.



Rys. 3. Model zagadnienia

Jeszcze większe trudności wystąpiły na etapie opracowywania modelu materiałowego. Pomimo, że zastosowana tutaj, opracowana w IMG PAN, metodyka modelowania umożliwia [2, 3] wykorzystanie zaawansowanych opisów zachowania się ośrodków, to użycie ich w tym przypadku nie było możliwe, z uwagi na brak danych na temat parametrów materiałowych.

Jeżeli chodzi o podłoże, to jedyne wiadomości na jego temat pochodziły z map geologicznych, jakimi dysponowała kopalnia. Zwarta zabudowa miejska uniemożliwia wykonanie odpowiedniego rozpoznania geologicznego. W tej sytuacji przyjęto najprostszy model materiałowy, czyli model idealnie sprężysty, a jego parametry zaczerpnięto z literatury. Według informacji zawartych w ww. dokumentacji na omawianym terenie przeważają grunty gliniaste. Przyjęto zatem na podstawie [1, 6, 10], że dla gruntów tego typu moduł Younga wynosi ok. $E = 80 \text{ MPa}$, współczynnik Poissona $\nu = 0,27$ a gęstość $\rho = 2060 \text{ kg/m}^3$.

Opracowując model materiałowy dla budynków oparto się na pracy L. Szojdy [9], w której zawarte są m.in. wyniki obszernych badań laboratoryjnych różnego typu próbek murowych. Biorąc pod uwagę wiek rozważanych budynków zastosowano jednak korektę wartości stałych materiałowych, gdyż wytrzymałości zarówno cegieł jak i zapraw wykonywanych na przełomie XIX i XX wieku, kiedy wzniesiono budynki, różniły się od wykonywanych obecnie. Jak podaje Z. Janowski [4, 5] „wytrzymałość cegieł używanych do wznoszenia budowli na terenie Polski pomiędzy XIV a XIX wiekiem wahała się pomiędzy 2÷6 MPa”. Stare zaprawy wapienne w istniejących obiektach również nie odpowiadają cechom współ-

czesnych zapraw o tej samej nazwie. Dobrze zachowane zaprawy mogą odpowiadać klasom zaprawy M1 i M2, których wytrzymałość zawiera się w przedziale 1÷2 MPa.

Warunki początkowe analizy stanowił stan równowagi układu budynki — podłoże na który składały się naprężenia pierwotne (geostatyczne) w podłożu oraz naprężenia od ciężaru własnego budynków i podłoża. Stąd uzyskane w analizie stany naprężeń, odkształceń i przemieszczeń obrazują wyłącznie zmiany tych wielkości w wyniku deformacji górniczych. Deformacje te zadano jako przemieszczeniowe warunki brzegowe na dolnym brzegu zadania, co odpowiada przyjęciu założenia, że na pewnej głębokości pod budynkami deformacje podłoża odpowiadają przemieszczeniom swobodnej powierzchni terenu. Inaczej mówiąc — na pewnej głębokości deformacje górotworu nie są już zaburzone oddziaływaniem budynków.

Zadawane przemieszczenia były przemieszczeniami pomierzonymi na punktach linii pomiarowej i miały charakter funkcji zmiennej w czasie i przestrzeni.

Na styku fundamentu i gruntu oraz styku ścian sąsiadujących ze sobą budynków przyjęto skleronomiczne, realne, dwustronne więzy kontaktowe. Realizowały one połączenie budynku z podłożem w ten sposób, że oddziaływania normalne do powierzchni kontaktowej przekazywane były w całości (tzw. *hard contact*). Na kierunku stycznym do powierzchni kontaktu możliwe były poślizgi, natomiast oddziaływania przekazywane były poprzez tarcie. Kontakt ścian budynków sąsiadujących również pozwalał na całkowite przekazywanie oddziaływań normalnych do powierzchni, zaś na kierunku stycznym występowało tarcie (bez poślizgów). Umożliwiono dodatkowo rozdzielanie stykających się początkowo powierzchni.

W rezultacie model matematyczny rozważanego zagadnienia stanowił klasyczny układ równań zadania płaskiego liniowej teorii sprężystości z naprężeniowymi warunkami początkowymi w obszarze podłoża i przemieszczeniowymi warunkami na brzegach obszaru podłoża oraz więzami kontaktowymi.

Obszar zadania, pozostający w płaskim stanie odkształcenia, zdyskretyzowano używając prostokątnych, czterowęzłowych elementów biliniowych [9]. Siatka węzłów posiadała zmienną gęstość i składała się z ponad 82 000 elementów (ogółem 190 780 stopni swobody).

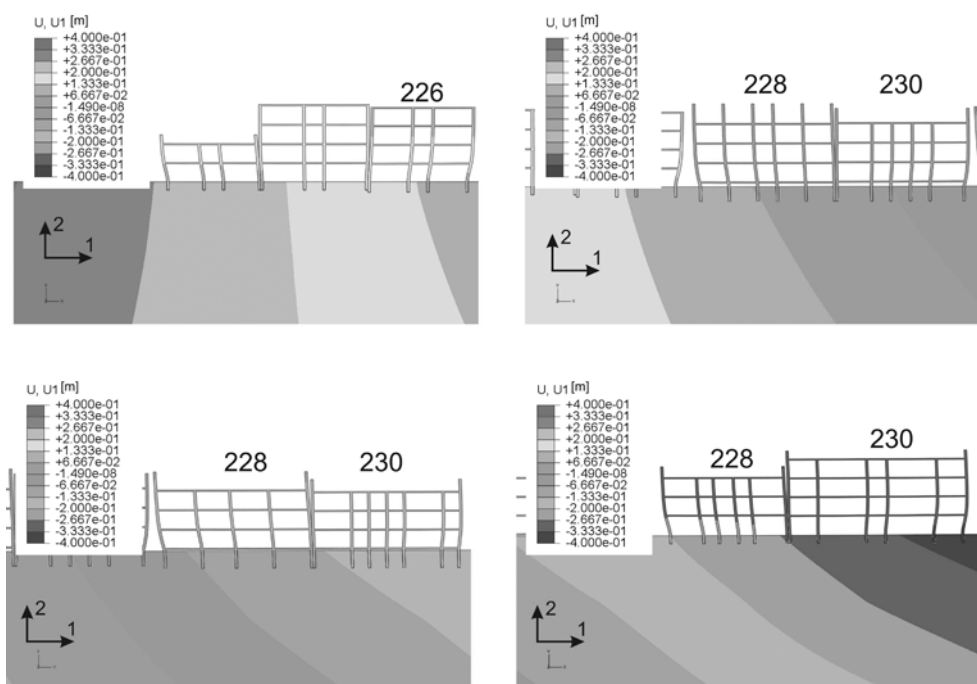
Obliczenia numeryczne przeprowadzono za pomocą programu MES Abaqus.

Na etapie wstępnym przeprowadzone zostały analizy wrażliwości modeli na zmiany parametrów materiałowych, gęstość siatki oraz warunki początkowo — brzegowe i kontaktowe.

4. Wyniki analizy

Pod wpływem przyłożenia przemieszczeniowych warunków brzegowych wymuszających deformacje podłoża (odpowiadające deformacjom pomierzonym), wyjściowy stan budynków ulegał zmianie. Następowало przemieszczanie się pionowe konstrukcji wraz z postępującymi obniżeniami powierzchni terenu. Najniekorzystniejsze zmiany powodowały jednak oddziaływania poziome — związane z formowaniem się niecki górniczej poziome

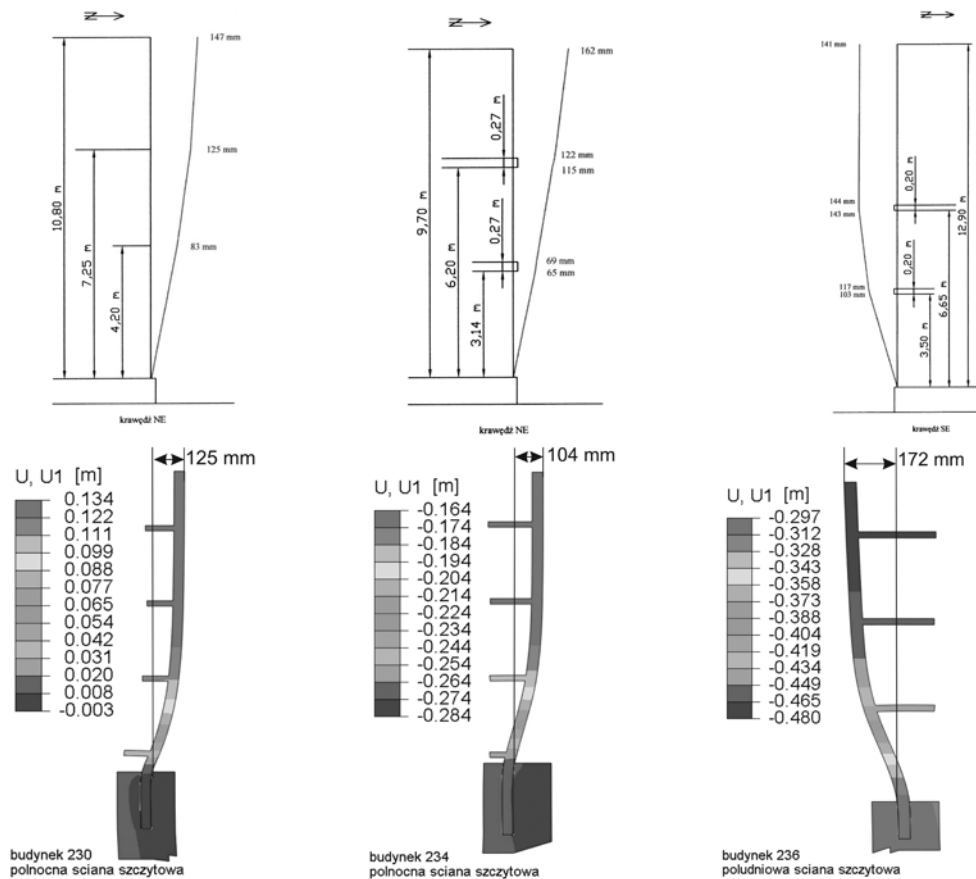
odkształcenia rozluźniająco i konsolidujące grunt, przy czym znacznie bardziej niekorzystne były oddziaływania o charakterze ściskającym. Jak pokazano to na rysunku 4, oddziaływania te powodowały ścisnienie zagłębionych w podłożu ścian piwnicznych i fundamentowych i deformowanie się ścian kondygnacji naziemnych w formie „beczkowatej”. Dokładnie taki charakter deformacji został zarejestrowany w przeprowadzonych pomiarach. Ściany zewnętrzne (niesąsiadujące z innym obiektem) odchyłały się na zewnątrz (rys. 4).



Rys. 4. Deformacja konstrukcji budynków wskutek eksploatacji

Wykorzystując pomiary wychyleń prowadzonych na punktach zastabilizowanych w ścianach szczytowych budynków 230, 234 i 236 dokonano porównania rzeczywistych deformacji budynków z wynikami obliczeń numerycznych. (Do punktu na budynku 232 utracono dostęp i pomiary nie były na nim wykonywane).

Na rysunku 5 zestawiono szkice przemieszczeń poziomych ścian wykonane na podstawie pomiarów z obrazem przemieszczeń uzyskany w rezultacie obliczeń numerycznych. Przedstawione na rysunku porównanie dotyczy jednego punktu czasowego (22. 05. 2006 r.). Był to wczesny etap formowania się niecki. Obniżenia mierzone na budynkach ustabilizowały się latem 2007 r., a więc po około roku. Dzień ten wybrano jednak dla celów porównawczych z uwagi na fakt, że budynki nie miały jeszcze wtedy dodatkowych wzmocnień, które zostały później wykonane w celu zabezpieczenia przed awarią.



Rys. 5. Porównanie pomiarów geodezyjnych przemieszczeń poziomych ścian szczytowych budynków 230, 234 i 236 z wynikami obliczeń numerycznych

Mimo, że opracowany model numeryczny był najprostszy z możliwych, a wartości potrzebnych parametrów przyjęte zostały orientacyjnie, można stwierdzić, że uzyskane wyniki są w bardzo dobrym stopniu zbliżone do rzeczywistego zachowania się obserwowanych budynków. Na tej podstawie uznać można, że opracowany model numeryczny posłużyć może do wyznaczenia stanu naprężeń panującego w konstrukcji budynków i oceny ewentualnych zagrożeń.

5. Podsumowanie

Modelowanie numeryczne jest chętnie stosowanym i stwarzającym duże możliwości narzędziem wspomagającym rozwiązywanie zagadnień inżynierskich. W praktyce te szero-

kie możliwości są jednak często trudne do wykorzystania z uwagi na problemy dotyczące rozpoznania stanu istniejącego. W przypadku zagadnień związanych ze szkodami górnictwami w budynkach chodzi przede wszystkim o trudności z oceną sytuacji geologicznej podłoża oraz odpowiedniego zinventaryzowania obiektów. Taka właśnie sytuacja miała miejsce zaprezentowanym przykładzie. Wykazano jednak, że nie są to warunki zupełnie dyskryminujące prowadzenie symulacji komputerowej. Skonstruowany odpowiednio, nawet najprostszy model numeryczny może okazać dobrym narzędziem analizy.

Celem zaprezentowanej pracy było rozpoznanie, czy opierając się na standardowych pomiarach geodezyjnych deformacji powierzchni można, stosując symulację numeryczną, monitorować zmieniający się stan naprężenia w obiektach budowlanych poddanych oddziaływaniu eksploatacji górniczej. Zaprezentowane wyniki potwierdzają, że jest to dobra metoda. Co istotne, jest to metoda, która może być stosowana również w przypadkach, gdy możliwości dokładnego rozpoznania sytuacji są ograniczone.

LITERATURA

- [1] *Borecka A., Rybicki S.*: Właściwości fizykomechaniczne gruntów zwałowych z nadkładu KWB „Turów”. Materiały XXVII ZSMG, 2004
- [2] *Cygan J., Florkowska L., Leśniak J., Walaszczyk J.*: Wpływ podziemnej eksploatacji górniczej na grupę budynków. Modelowanie fizyczne i numeryczne 2D. Prace IMG PAN, 2007, (w druku)
- [3] *Florkowska L., Cygan J., Leśniak J., Tajduś K., Walaszczyk J.*: Metody analizy numerycznej współdziałania budynku z podłożem deformującym się wskutek eksploatacji podziemnej. Prace IMG PAN, t. 8, nr 1–4, 2006
- [4] *Janowski, Hojdys, Krajewski P.*: Analiza oraz naprawa i rekonstrukcja sklepień w obiektach historycznych, XXIII Konferencja Naukowo — Techniczna Awary Budowlane, Szczecin — Międzyzdroje, maj 2007
- [5] *Jasieńko J., Lodygowski T., Rapp P.*: Naprawa i wzmocnienie wybranych, zabytkowych konstrukcji ceglanych, DWE, Wrocław, 2006
- [6] *Kania M.*: Analiza warunków stateczności budowli w sąsiedztwie zbocza przy różnych efektywnych głębokościach posadowienia. Geoinżynieria. Drogi, mosty, tunele. 03/2007 (14), 2007
- [7] *Kawulok M.*: 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, 2006
- [8] *Lodygowski T., Kąkol W.*: Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich, Poznań, Wyd. politechniki wrocławskiej, 1994
- [9] *Szojda L.*: Analiza współdziałania murowanych budynków ścianowych z deformującym się podłożem. Politechnika Śląska, Gliwice, 2001
- [10] PN=81/B-03020: Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie