

Numeryczne modelowanie współpracy budynku z podłożem w ujęciu przestrzennego i płaskiego opisu zagadnienia

LUCYNA FLORKOWSKA, JAN WALASZCZYK

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

Streszczenie

Odpowiednie zabezpieczenie obiektu budowlanego, przed niekorzystnymi skutkami przewidywanych deformacji podłoża, opiera się na umiejętności wyznaczenia wpływu tego procesu na stan naprężenia elementów konstrukcji. Zagadnienie to jednak, ze względu na jego znaczną złożoność, nie doczekało się zadowalających rozwiązań. W artykule przedstawiono fragment rezultatów prac, prowadzonych w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN, nad zastosowaniem techniki obliczeń numerycznych do rozwiązywania złożonych zagadnień geotechnicznych, w szczególności zaś do wyznaczania wpływu górniczych deformacji górotworu na budynki. Zaprezentowane wyniki obejmują analizę porównawczą płaskiego i przestrzennego modelowania współpracy budynku z podłożem oraz omówienie najważniejszych aspektów analizy trójwymiarowej.

Słowa kluczowe: podłoże, budynek, modelowanie numeryczne, MES, modelowanie przestrzenne

Wstęp

Wyznaczenie oddziaływania deformującego się podłoża na fundamenty budowli jest zadaniem bardzo złożonym. W praktyce, aby go rozwiązać, stosuje się myślowe rozbicie zagadnienia na zadania prostsze, rozważając (z konieczności) oddzielnie, wpływy poszczególnych zjawisk składających się na całościowy obraz procesu. Jednakże stały rozwój zarówno technik obliczeniowych, jak i narzędzi komputerowych sprawia, że wykorzystanie ich do analizy skomplikowanych zagadnień geotechnicznych stwarza nowe możliwości w tym zakresie. Możliwe staje się nie tylko całościowe rozważanie oddziaływania zjawiska zachodzącego w górotworze na związaną z nim budowlę, ale również rezygnacja z niektórych założeń upraszczających, które w znaczący sposób ograniczały rozwiązanie.

Analiza numeryczna zagadnień geotechnicznych

W Instytucie Mechaniki Górotworu PAN od kilku lat prowadzone są prace nad numeryczną symulacją wpływu deformacji podłoża na konstrukcję budowli, w szczególności zaś nad skutkami przechodzenia górniczej niecki osiadania dla budynków. W zagadnieniu tym wyróżnić można trzy zasadnicze elementy. Pierwszy, to kwestia prognozowania szkód na powierzchni, drugi to część związana z tym, jak szkody te rozkładają się w otoczeniu obiektu budowlanego i jak się na niego przekazują i wreszcie trzeci aspekt odnosi się do określenia wywołanego w ten sposób stanu elementów konstrukcji.

W zakresie prognozowania deformacji powierzchni, oparto się na powszechnie stosowanej teorii Budryka-Knothe'go. Na jej podstawie przeprowadzana jest symulacja kształtowania się w czasie niecki górniczej. Tak więc, w rozważaniach nie zostają zaniedbane deformacje nieustalone. W celu uwzględnienia w analizie wpływu właściwości warstw czwartorzędowych, szczególnie dużo uwagi poświęcono zagadnieniu modelu materiałowego podłoża. Górotwór modelowany jest jako ośrodek warstwowy, oddający istniejącą budowę geologiczną. W obrębie poszczególnych warstw geotechnicznych dla gruntów dobrane zostało zmodyfikowane

prawo Druckera-Pragera, które uwzględnia sprężyste, plastyczne i lepkie zachowanie się ośrodka [Florkowska, 2003]. W połączeniu z faktem czasowego kształtowania się niecki górniczej, reologiczne właściwości gruntu wydają się być nie do pominięcia w prowadzonej w czasie rzeczywistym analizie zagadnienia.

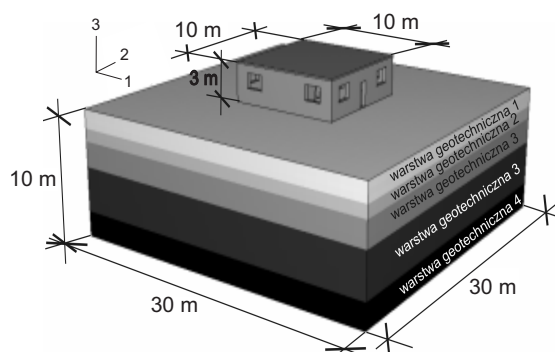
Takie podejście do problemu pozwala na symulowanie współpracy konstrukcji budynku z deformującym się podłożem, bez konieczności oddzielnego rozpatrywania wpływu poszczególnych wskaźników deformacji, które odnoszą się poza tym do deformacji swobodnej powierzchni. Obecność bryły budynku powoduje inny rozkład oddziaływań w jego otoczeniu, co dobrze oddaje wynik modelowania numerycznego.

Przekazywanie sił wywołanych deformowaniem się podłoża na fundament następuje poprzez odpowiednie sformułowanie więzów kontaktowych. Naprężenia styczne między podstawami fundamentu a podłożem przekazywane są przez odpowiednie współczynniki tarcia [Kwiatek, 1967, 1974, 1998; Budzyński, 1974; Zawora, 1974], przy czym umożliwiające jest powstawanie poślizgów. Poprzez zawarte w prawie materiałowym mechanizmy zagęszczenia i rozluźnienia gruntu uwzględniony zostaje wpływ tych zjawisk na parcie gruntu na fundamenty.

Omówienie wybranych modeli numerycznych

Mając na celu wyłonienie optymalnego sposobu modelowania współpracy budynku z podłożem, w szczególności zaś z podłożem ulegającym deformacji, przeanalizowano kilkadziesiąt dwu- i trójwymiarowych zadań. W pracy tej przedstawiono kilka przykładów obrazujących najistotniejsze czynniki wpływające na rozwiązanie.

Ogólnie, wszystkie zaprezentowane modele opisują jednokondygnacyjny budynek o szerokości 10 m, powiązany z podłożem poprzez fundament zagłębiony w nim na 1 m. Bryła podłoża ma wymiary 30×30×10 m i jest podzielona na warstwy geotechniczne o zróżnicowanych właściwościach, jak pokazuje to rys. 1. Dla budynku przyjęto sprężysty model materiałowy o właściwościach, jak dla betonu B20. Podłoże, jak już wspomniano powyżej, posiada właściwości sprężysto-plastyczno-lepkie, kierowane mechanizmem konsolidacji, opisane zmodyfikowanym prawem nakładkowym Druckera-Pragera [Florkowska, 2003].



Rys. 1. Ogólny schemat zagadnienia poddane rozważaniom

Obliczenia wykonywane były Metodą Elementów Skończonych, przy użyciu pakietu programów ABAQUS.

W przypadku analizy płaskiej, podłoże obliczane było w płaskim stanie odkształcenia, zaś ściana budynku w płaskim stanie naprężenia.

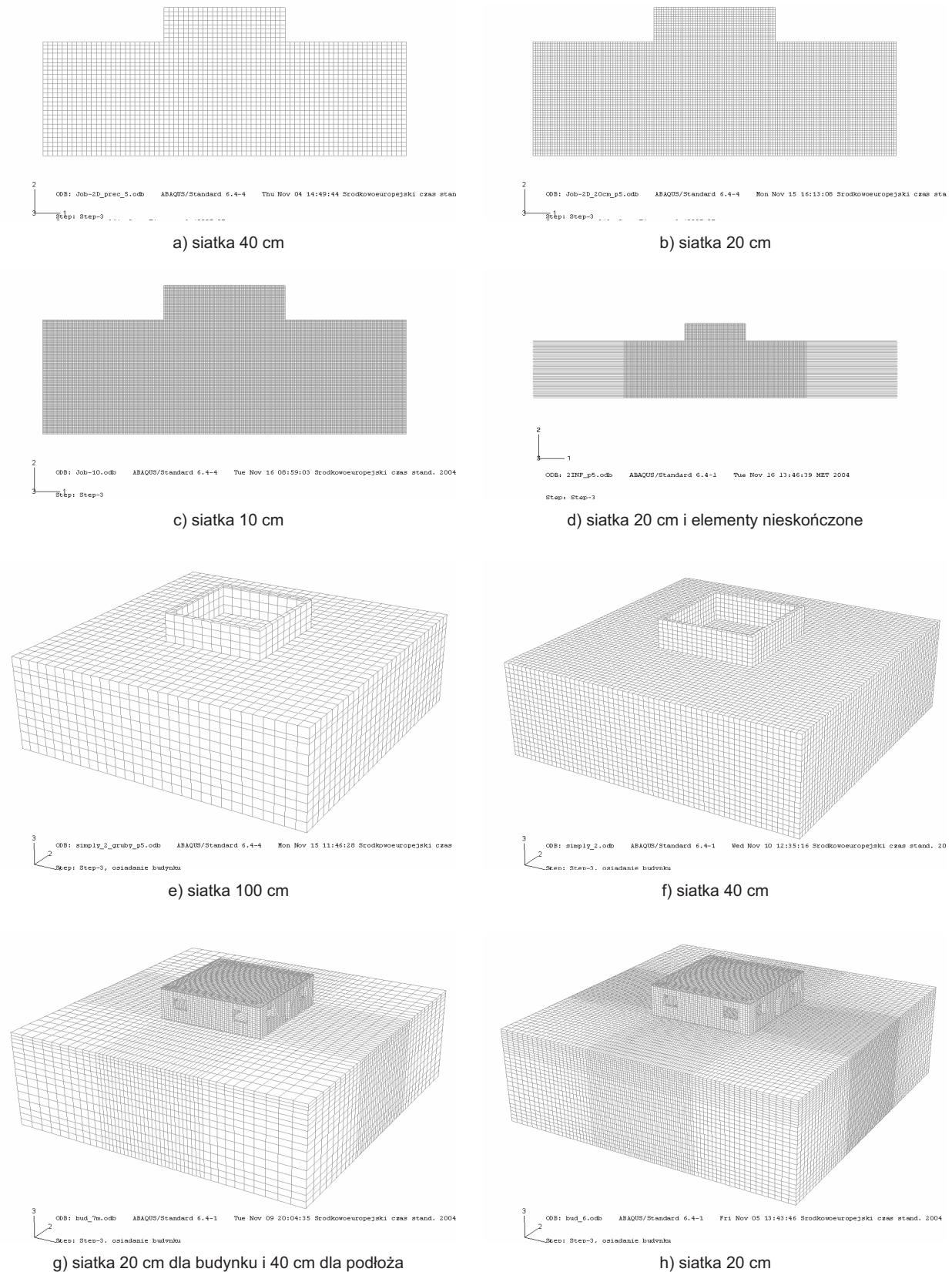
Wstępna analiza, w każdym przypadku, obejmowała obliczenia geostatyczne. Kolejnym krokiem było, trwające 1 rok, powolne osiadanie budynku i związane z tym zmiany zachodzące w podłożu. Następnie, w kilku przypadkach, symulowane zostało przejście niecki górniczej.

Analiza uzyskanych wyników

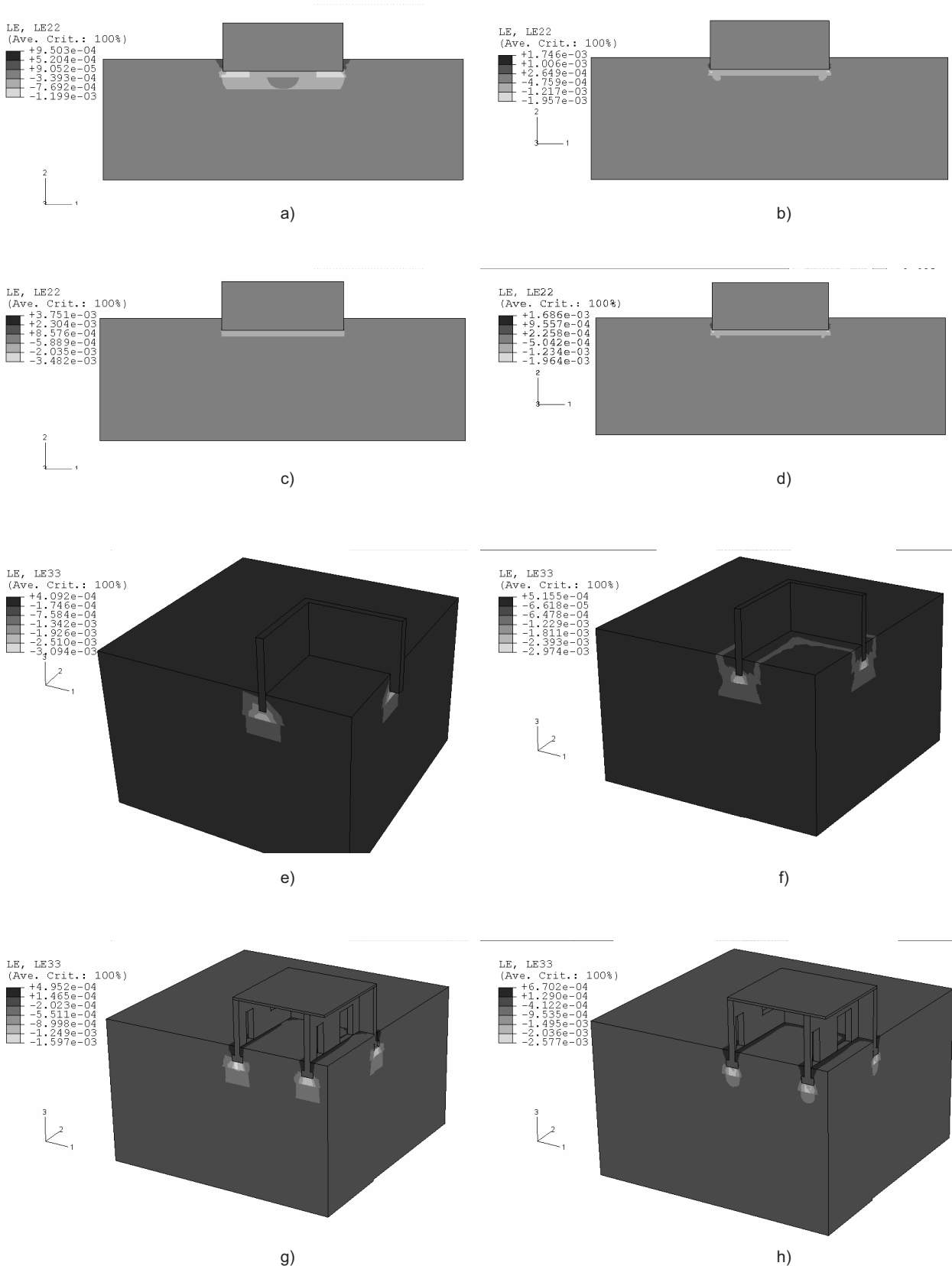
W początkowym etapie prac zwrócono uwagę na wpływ stopnia dyskretyzacji oraz przestrzennego lub płaskiego sformułowania modelu na wyniki obliczeń. Na rysunku 2 pokazano przyjęte do obliczeń nu-

merycznych siatki elementów płaskich (2D) i przestrzennych (3D), których wymiar oczka wynosił kolejno 40, 20 i 10 cm (rys. 2a, b, c i d) – dla modeli 2D oraz 100, 40, i 20 cm – dla modeli 3D (rys. 2e, f, g i h).

Rysunek 3 przedstawia rozkłady liniowych odkształceń logarymicznych ($LE = \ln \lambda$, gdzie λ – jest wydłużeniem względnym), na kierunku pionowym (odpowiednio LE22 – w przypadku płaskim i L33 –



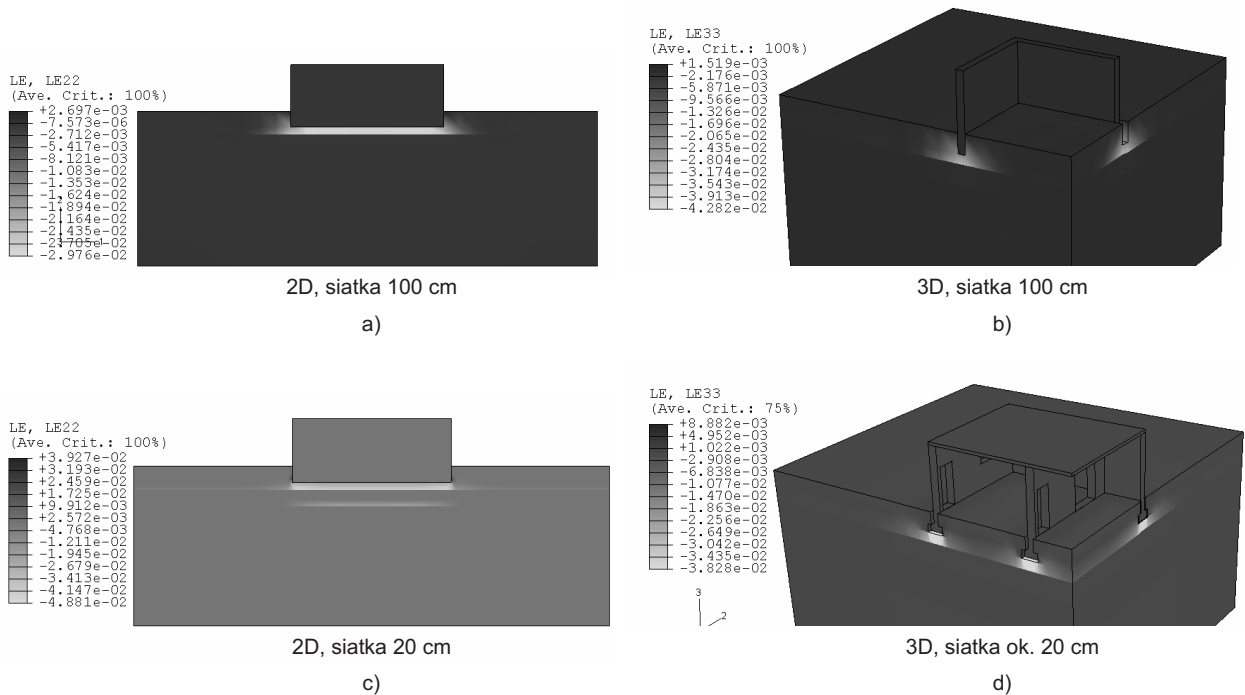
Rys. 2. Dyskretyzacja obszaru zadania w kilku prezentowanych w pracy modelach płaskich i przestrzennych



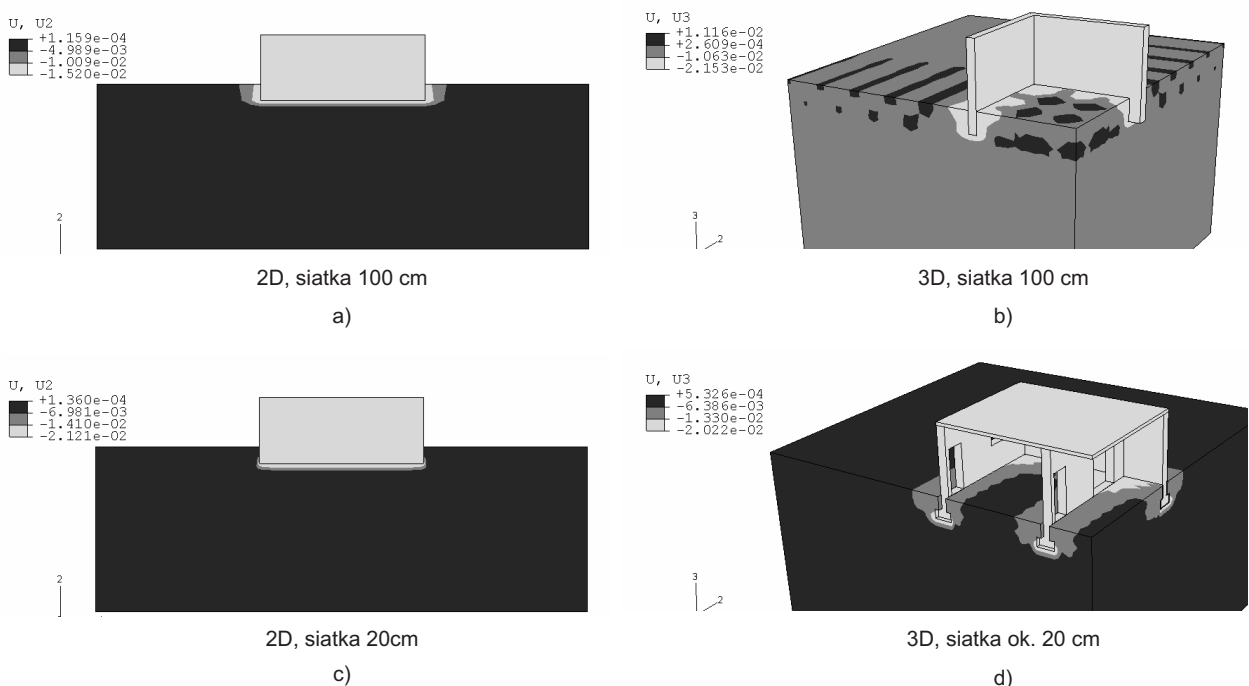
Rys. 3. Rozkład liniowych odkształceń logarytmicznych na kierunku pionowym, bezpośrednio po obciążeniu podłoża ciężarem budynku, dla modeli płaskich i przestrzennych o siatkach odpowiednio, jak na rys. 2

w przypadku przestrzennym) po obciążeniu podłoża ciężarem własnym budynku, otrzymane dla poszczególnych modeli. Wielkości uzyskanych w ten sposób odkształceń praktycznie nie różnią się. W obrębie bryły podłoża widoczne są różnice odkształceń wynikające z uwarstwienia. Na tym etapie analizy mamy

do czynienia jedynie z odkształceniami „natychmiastowymi”. Proces osiadania budynku dopiero się rozpoczyna i znaczące odkształcanie się gruntu pod fundamentami, wywołane naciskiem, związane są z procesem pełzania, który zachodzić będzie w czasie. Rys. 4 przedstawia rozkłady tych samych odkształceń, po upływie 1 roku, dla kilku modeli. Widoczny jest wyraźny przyrost odkształceń. Ma on znaczenie dla końcowych osiadań budynku, które zaprezentowano na rys. 5. Porównując wielkości zarówno odkształceń (rys. 4), jak i pionowych przemieszczeń (rys. 5) oraz pionowych naprężeń normalnych (rys. 6), uzyskane



Rys. 4. Rozkład liniowych odkształceń logarytmicznych na kierunku pionowym po upływie jednego roku od obciążenia podłoża ciężarem budynku

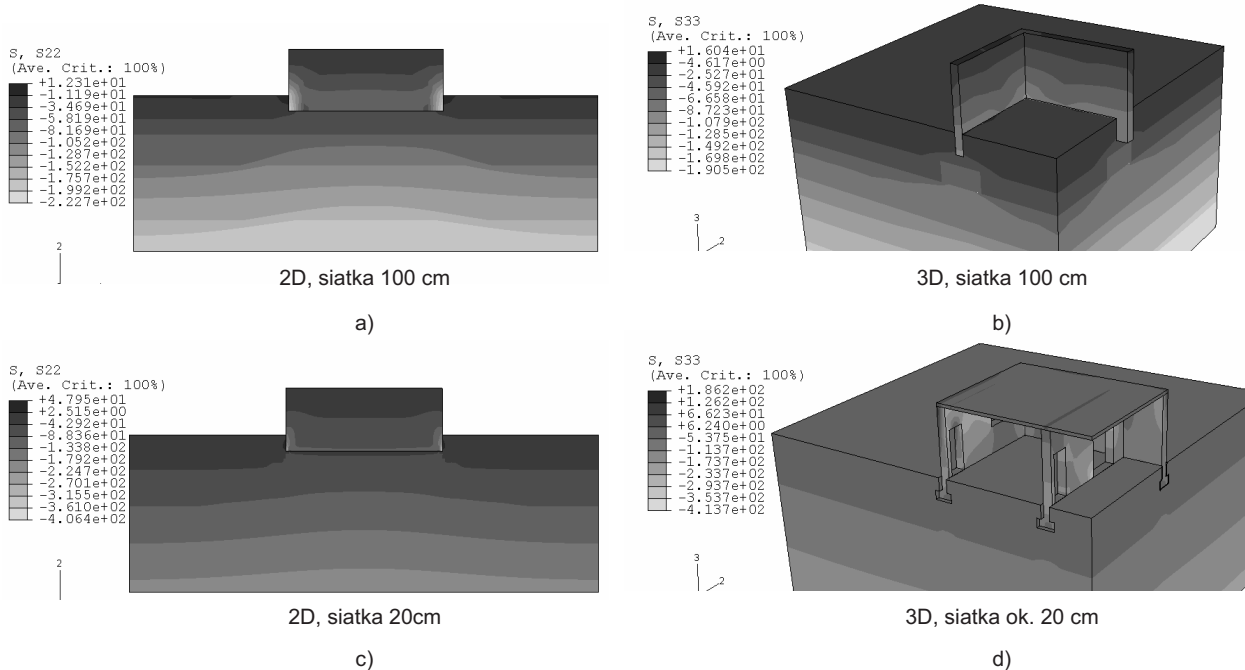


Rys. 5. Przemieszczenia pionowe [m] po upływie 1 roku od obciążenia podłoża budynkiem

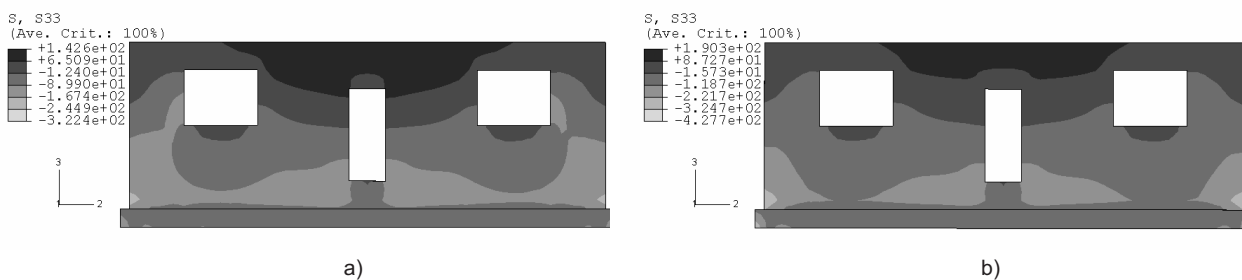
dla modeli dwu- i trójwymiarowych, o takim samym wymiarze oczka siatki, można stwierdzić, że różnice są nieistotne. Oczywiście, przy zastosowaniu zbyt grubej dyskretyzacji (w tym przypadku 100 cm), możemy otrzymać „nieciągłość” wyników, jak to jest widoczne na rys. 5b. Konfrontując uzyskiwane z obliczeń 2D i 3D rozkładu naprężeń zauważyć można, że modele przestrzenne wykazują stopniową redystrybucję naprężeń pod fundamentami wywołaną uplastycznieniem gruntu, co jest niezauważalne w przypadku modelowania płaskiego. Ma to znaczenie dla oceny stanu podłoża.

Z perspektywy wyznaczania stanu konstrukcji, modelowanie 3D wydaje się być bezsprzecznie korzystniejsze. Otrzymywane w postaci przejrzystych map naprężenia, przemieszczenia, czy odkształcenia ułatwiają analizę zmian zachodzących w poszczególnych elementach. Na rys. 7 pokazano mapy naprężeń dla ściany budynku, obliczonej w modelu 3D, wyznaczone zaraz po wzniesieniu budynku (7a) oraz po upływie 1 roku (7b). Jak pokazuje rys. 7, 8 i 9, modelowanie przestrzenne, dając w wyniku znacznie dokładniejszy obraz zachowania się budynku, istotnie ułatwia wymiarowanie elementów konstrukcyjnych. Na rys. 8 przedstawiono przemieszczenia pionowe stropu obliczone po ukończeniu budowy oraz po upływie 1 roku. Można zaobserwować, że samo ugięcie praktycznie nie uległo zmianie, strop obniżył się równomiernie, wraz z całym budynkiem. Widoczne na rys. 9 mapy naprężeń fragmentu budynku dają łatwy pogląd na pracę poszczególnych elementów, pokazują strefy niekorzystnych naprężeń rozciągających, wskazując optymalny układ potrzebnego zbrojenia.

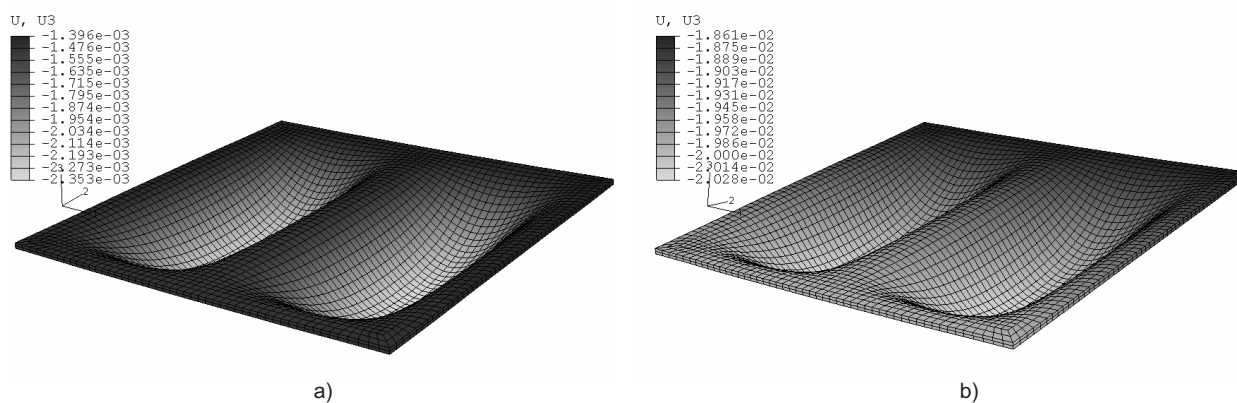
Przestrzenna praca układu, istotna nie tylko ze względów wytrzymałości, ale i stateczności, może być odpowiednio odwzorowana jedynie poprzez opis trójwymiarowy.



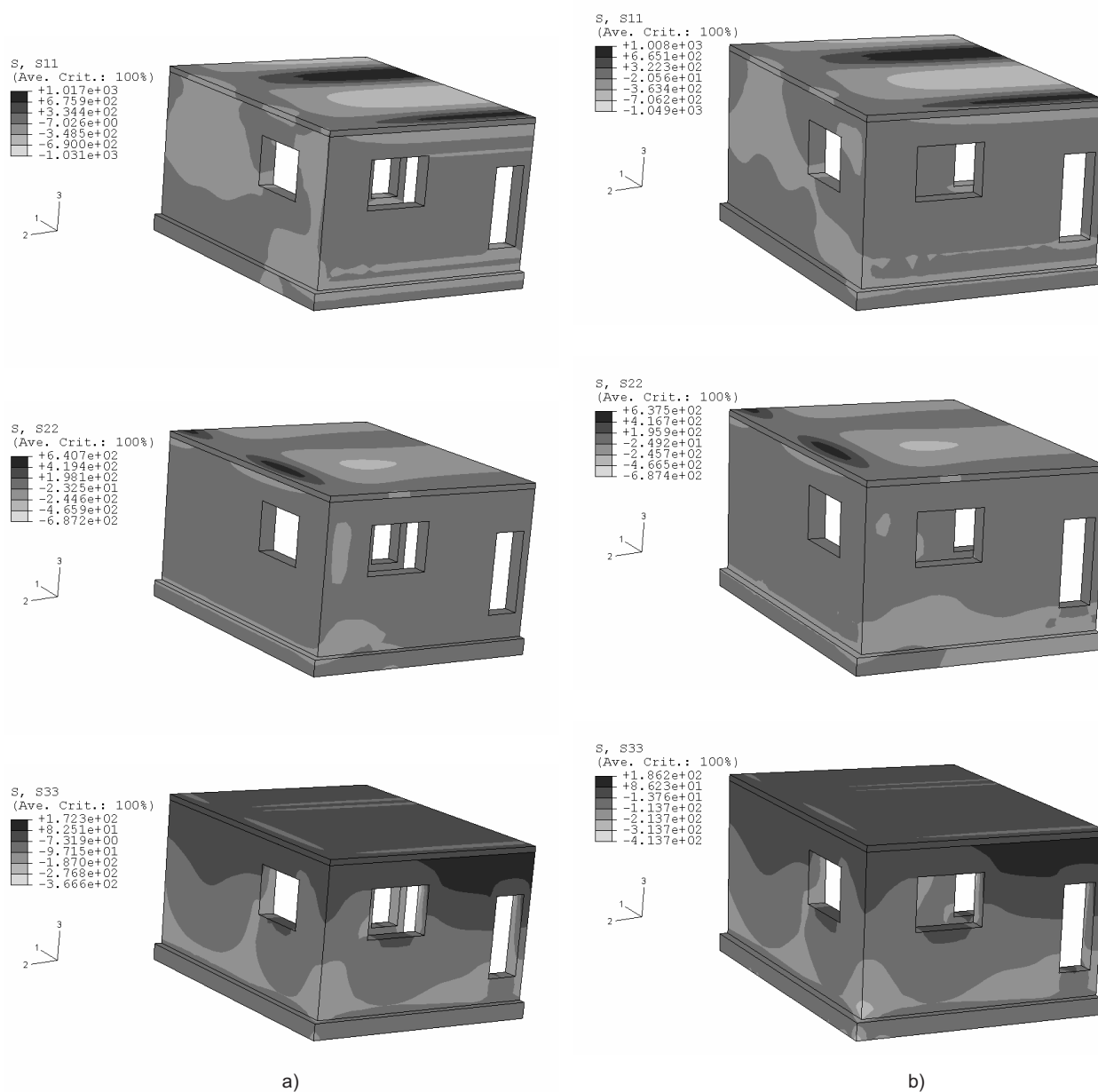
Rys. 6. Naprężenia normalne na kierunku pionowym [kPa] po upływie 1 roku od obciążenia podłoża budynkiem



Rys. 7. Zmiana naprężeń normalnych na kierunku pionowym [kPa] w ścianie budynku (model 3D, siatka ok. 20 cm): a) naprężenia natychmiast po wzniesieniu budynku, b) naprężenia po upływie 1 roku



Rys. 8. Przesunięcia pionowe stropu [m]: a) po wzniesieniu budynku, b) po upływie 1 roku

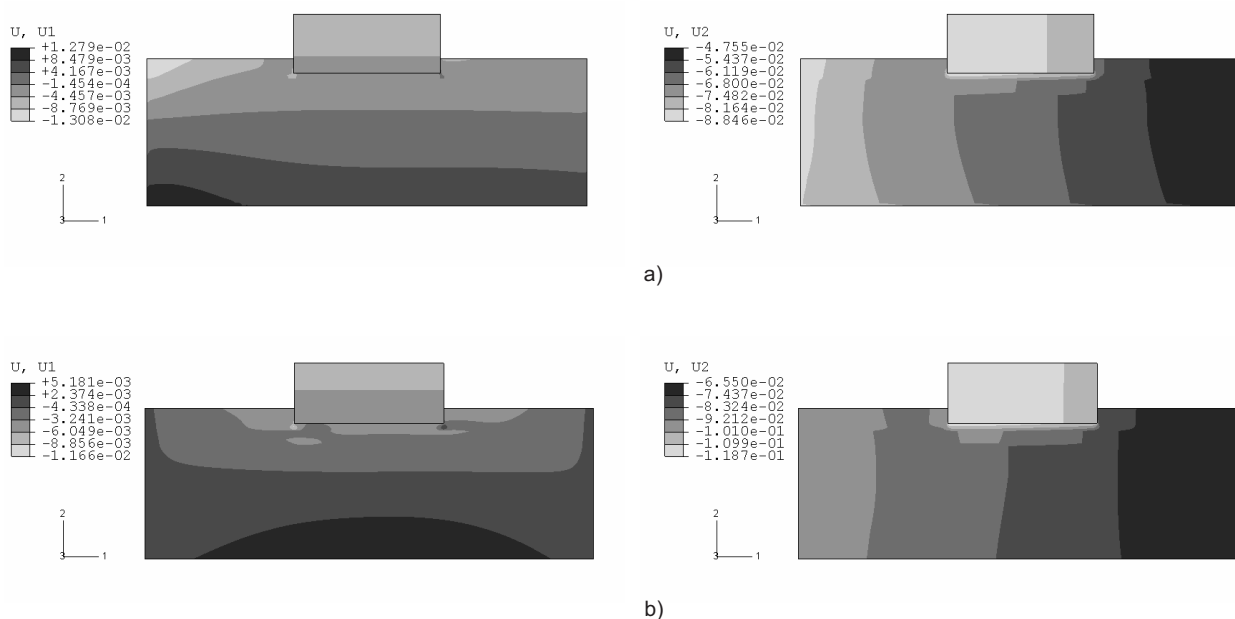


Rys. 9. Następująca z upływem czasu, pod wpływem osiadania, zmiana naprężeń normalnych [kPa] w budynku:
a) rozkłady naprężeń zaraz po wzniesieniu budynku, b) rozkłady naprężeń po upływie 1 roku

Wnioski i perspektywy

Poprzez zaprezentowane powyżej wyniki wykazano przewagę modelowania trójwymiarowego w analizie zagadnień związanych ze współpracą budynku z podłożem. Należy przypuszczać, że znaczenie przestrzennego sformułowania problemu jest jeszcze większe, gdy w grę wchodzi górnicze deformacje podłoża. W zależności od zorientowania budynku w stosunku do formującej się niecki układ konstrukcyjny, jako całość, podlegać może różnego rodzaju oddziaływaniom, co nie sposób odpowiednio uchwycić, przez opis płaski. Istotną rolę odgrywa wówczas praca połączeń pomiędzy elementami i usztywniająca rola elementów poprzecznych.

W odniesieniu do symulowania wpływu niecki górniczej na obiekty budowlane, w IMG PAN opracowana została metodyka modelowania dwuwymiarowego. Trwają prace nad rozszerzeniem jej na zagadnienia przestrzenne. Pierwszy etap tych prac, związany z modelowaniem współpracy konstrukcji z podłożem, przy uwzględnieniu plastycznych i reologicznych własności gruntów oraz analizy w czasie rzeczywistym został zakończony. Jego częściowe wyniki prezentuje poniższa praca. Obecnie w trakcie opracowywania jest przeprowadzenie symulacji kształtowania się niecki górniczej. Istotnym problemem stają się tutaj rozmiary zadania. Konieczne będzie również zastosowanie trójwymiarowych elementów „nieskończonych”. Na rys. 10 pokazano mapę przemieszczeń poziomych podczas kształtowania się niecki, na przykładzie analizy 2D. Rys. 9a) – dla powszechnie stosowanego podejścia z współpracującą z budynkiem bryłą podłoża, ograniczoną przemieszczeniowymi warunkami brzegowymi oraz, 9b) – dla modelu z zastosowaniem elementów „nieskończonych”. Przykład ten wykazuje bezużyteczność klasycznego podejścia dla potrzeb modelowania górniczych deformacji podłoża budowlanego.



Rys. 10. Rozkład przemieszczeń poziomych U_1 i pionowych U_2 [m] podczas zbliżania się frontu eksploatacji do budynku a) przy zastosowaniu elementów nieskończonych (rys. 2d), b) – z przyjętymi na brzegach przemieszczeniowymi warunkami brzegowymi

Kończącym etapem pracy będzie zmodyfikowanie modelu materiałowego budynku, tak by jak najlepiej odwzorować pracę konstrukcji. Uwzględnienia wymagać mogą, w zależności od zastosowanych materiałów, np. właściwości reologiczne lub anizotropia związaną z pracą zbrojenia.

Tak opracowany model umożliwi wygodną analizę wpływu prognozowanych deformacji podłoża na obiekt budowlany. Pozwoli na wyznaczenie stanu poszczególnych elementów konstrukcji, co znacznie ułatwi pracę nad zaprojektowaniem odpowiedniego zabezpieczenia.

Literatura

1. *Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych*. Praca zbiorowa pod kierunkiem J. KWIATKA, Wyd. GIG, Katowice 1998.
2. BUDZYŃSKI H., 1974: *Wpływ rozpełzania podłoża górniczego na wiotkie ławy fundamentowe usytuowane równolegle do kierunku rozpełzania*. Praca doktorska, Katowice.
3. FLORKOWSKA L., 2003: *Wybrane problemy współdziałania budowli z górotworem*. Prace IMG PAN, Rozprawy, monografie 3, Kraków.
4. KNOTHE S., 1953: *Wpływ czasu na kształtowanie się niecki osiadania*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t. 1, z. 1.
5. KWIATEK J., 1967: *Wpływ rozpełzania podłoża na siły rozciągające w fundamentach budowli*. Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice.
6. KWIATEK J. I. IN., 1974: *Badania terenowe wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na budowle eksperymentalne*. Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Komunikat nr 620, Katowice.
7. ZAWORA J., 1974: *Wpływ poziomych odkształceń podłoża na ławy fundamentowe usytuowane poprzecznie do kierunku tych odkształceń*. Praca doktorska, Katowice.

Numerical modelling of interaction between a structure and its base in aspect two and three dimensional problem description

Abstract

The determination of the state of the building seems to be an important geotechnical problem especially when the building is subjected to the influence of mining damages. The paper is focused on numerical solution of a problem of interaction between a building and soil. To represent soils properties in a best way a visco-plastic-elastic model was applied, while the building was assumed to be an linear elastic body.

Keywords: base, subsoil, building, numerical modelling, FEM, three-dimensional modelling

Recenzent: Prof. dr hab. inż. *Roman Kinasz*, Akademia Górniczo-Hutnicza