

Zenon PILECKI

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków

## Modelowanie oddziaływania wstrząsu górniczego na budynek

### Streszczenie

Przedstawiono sposób numerycznego modelowania oddziaływania wstrząsu górniczego na budynek mieszkalny posadowiony na podłożu czwartorzędowym charakterystycznym dla rejonu Jastrzębia Zdr. Symulację przeprowadzono w układzie dwuwymiarowym, metodą różnic skończonych, za pomocą programu *FLAC v.3.4*. Konstrukcję budynku modelowano jako sprężystą ramę, a ośrodek gruntowy przyjęto jako sprężysto-plastyczny. Obciążenie dynamiczne zadano w postaci zarejestrowanego przebiegu przyspieszenia drgań cząstek gruntu wywołanego wstrząsem górniczym. Pokazano przykładowe reakcje budynku i ośrodka gruntowego na oddziaływanie dynamiczne.

### 1. Wstęp

Jednym z czynników górniczych zagrożeń środowiska jest oddziaływanie wstrząsów na powierzchnię, a zwłaszcza na budynki. Oddziaływanie to jest zjawiskiem dość częstym na terenach górniczych Górnośląskiego Zagłębia Węglowego i Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego. Zdarzają się również silniejsze wstrząsy na terenach eksploatacji węgla brunatnego w rejonie Belchatowa. Wstrząsy powodują drgania budowli, niejednokrotnie wzbudzając niepokój mieszkańców powodowany zagrożeniem zniszczenia elementów budynku. Wynika stąd potrzeba oceny tego zagrożenia, w tym odporności budynku na oddziaływanie wstrząsów. Ocenę tego zagrożenia można przeprowadzić poprzez:

- obliczenia wielkości drgań na podstawie zależności empirycznych,
- pomiaru wielkości w wyznaczonych miejscach, w tym w budynkach,
- symulacji obciążenia dynamicznego w konkretnych warunkach pomiarowych, głównie za pomocą metod numerycznych.

Niewątpliwie najkorzystniejszą ocenę daje pomiar wielkości drgań. Dla możliwie dokładnego rozpoznania zagrożenia należałoby zainstalować większą ilość czujników dla analizy zmienności pola sejsmicznego w dłuższym okresie. Jest to jednak sposób uciążliwy w przeprowadzeniu i stosunkowo kosztowny. Z tego powodu pomiary wykonuje się dla pojedynczych budynków szczególnie zagrożonych oddziaływaniem wstrząsów. W tej sytuacji efektywnym środkiem może okazać się modelowanie numeryczne. Pozwala ono uwzględnić energię w źródle, wielkość jej tłumienia i rozproszenia w górotworze, a także wpływ interakcji podłoża z budowlą. Najmniej dokładnym sposobem jest szacowanie wielkości drgań na podstawie różnego rodzaju klasyfikacji, nomogramów i map zasięgu oddziaływania. Jednakże jest to sposób, który pozwala przeprowadzić ocenę szybko, niemal bezpośrednio po wystąpieniu wstrząsu górniczego.

## 2. Sposób symulowania numerycznego

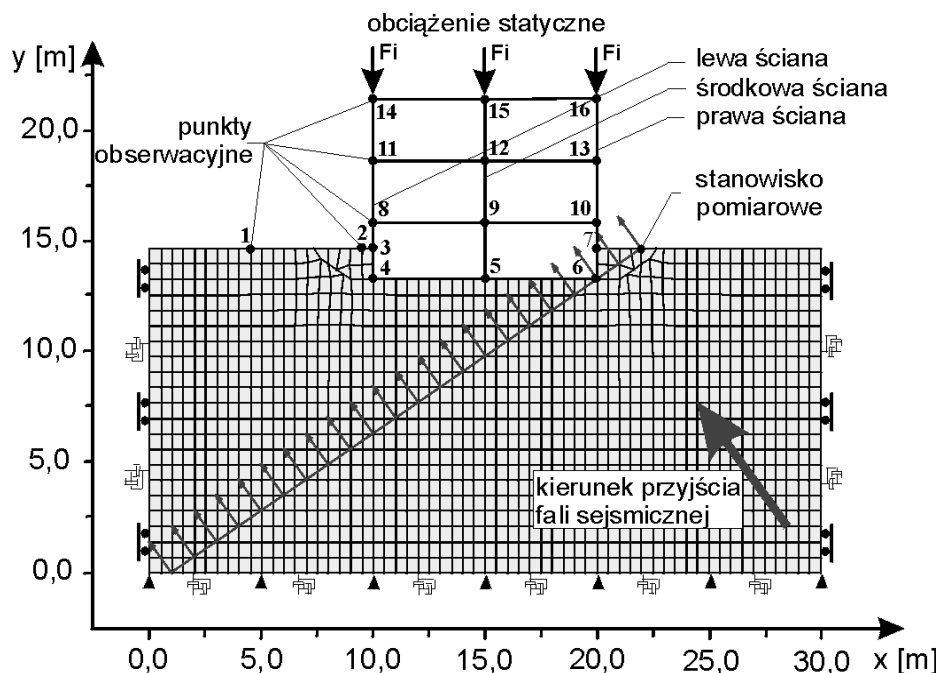
W pracy przedstawiono przykład sposobu numerycznego modelowania oddziaływania dynamicznego na niski budynek mieszkalny. Jest on posadowiony na utworach czwartorzędowych, piaszczystych, charakterystycznych dla rejonu Jastrzębia Zdr. Szerszy opis modelu fizycznego i numerycznego zawiera praca Pileckiego i in. (2000).

Przykładową analizę przeprowadzono w układzie dwuwymiarowym, metodą różnic skończonych za pomocą programu *FLAC v. 3.4*. Konstrukcję budynku modelowano jako sprężystą ramę przy użyciu elementów belkowych. Ośrodek gruntowy przyjęto jako sprężysto-plastyczny, z kryterium wytrzymałościowym Coulomba-Mohra, z zastosowaniem nie stowarzyszonego prawa płynięcia dla warunku plastyczności w obszarze ścinania oraz stowarzyszonego prawa płynięcia dla warunków plastyczności w obszarze rozciągania.

### 2.1 Obliczenia stanu dla obciążeń statycznych

Do modelowania ośrodka gruntowego przyjęto prostokątną tarczę o wymiarach 30m x 14,7 m z oczkami siatki obliczeniowej o wymiarach 0,25m x 0,35m. Brzegi tarczy odpowiednio utwierdzono od dołu, na lewym i prawym boku dopuszczono pionowe przemieszczenia, górny brzeg pozostawiono swobodny.

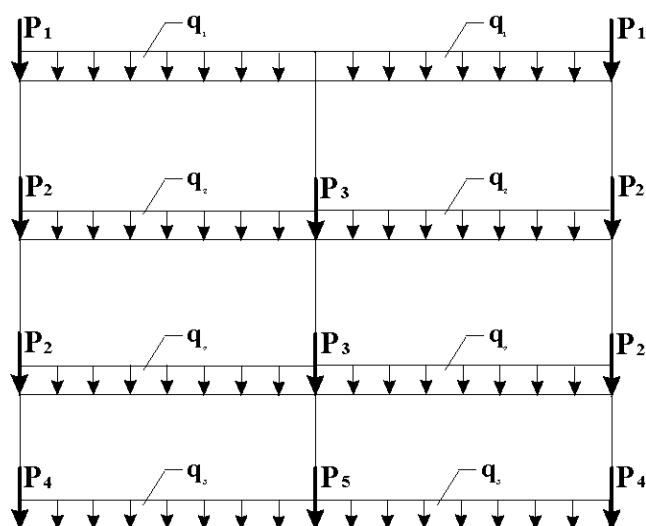
Tarczę użytą do modelowania wraz z zastosowaną siatką, warunkami brzegowymi, ramą reprezentującą budynek oraz punktami obserwacyjnymi przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 2.1 Geometria, warunki brzegowe i początkowe modelu numerycznego (Pilecki i in.2000)  
Fig.2.1 The model geometry and boundary conditions (Pilecki et al. 2000)

Do modelowania przyjęto budynek o szerokości 10 m i wysokości 8 m zbudowany z cegły na fundamencie betonowym. W wybranych punktach ramy (rys. 2.2) przyłożono siły wynikające z działania stałych i zmiennych obciążeń. Ramę usztywniono dopuszczając przemieszczenia w kierunkach osi  $x$  i  $y$  bez możliwości rotacji.

W pierwszym etapie obliczono stan naprężeń pierwotnych w gruncie. Następnie symulowano wykonanie wykopu pod budynek, po czym obliczono nowy stan naprężenia. Wprowadzono elementy belkowe reprezentujące konstrukcję budynku oraz przyłożono w wybranych punktach ramy dodatkowe siły wynikające z działania obciążeń stałych i zmiennych – użytkowych. W dalszej kolejności „zasypano” odkrytą część wykopu fundamentowego, po czym obliczono nowy stan naprężeń, uwzględniając konsolidację gruntu.



Rys. 2.2 Schemat konstrukcji budynku z miejscami przyłożenia obciążenia statycznego  
Fig. 2.2 The scheme of construction with static forces

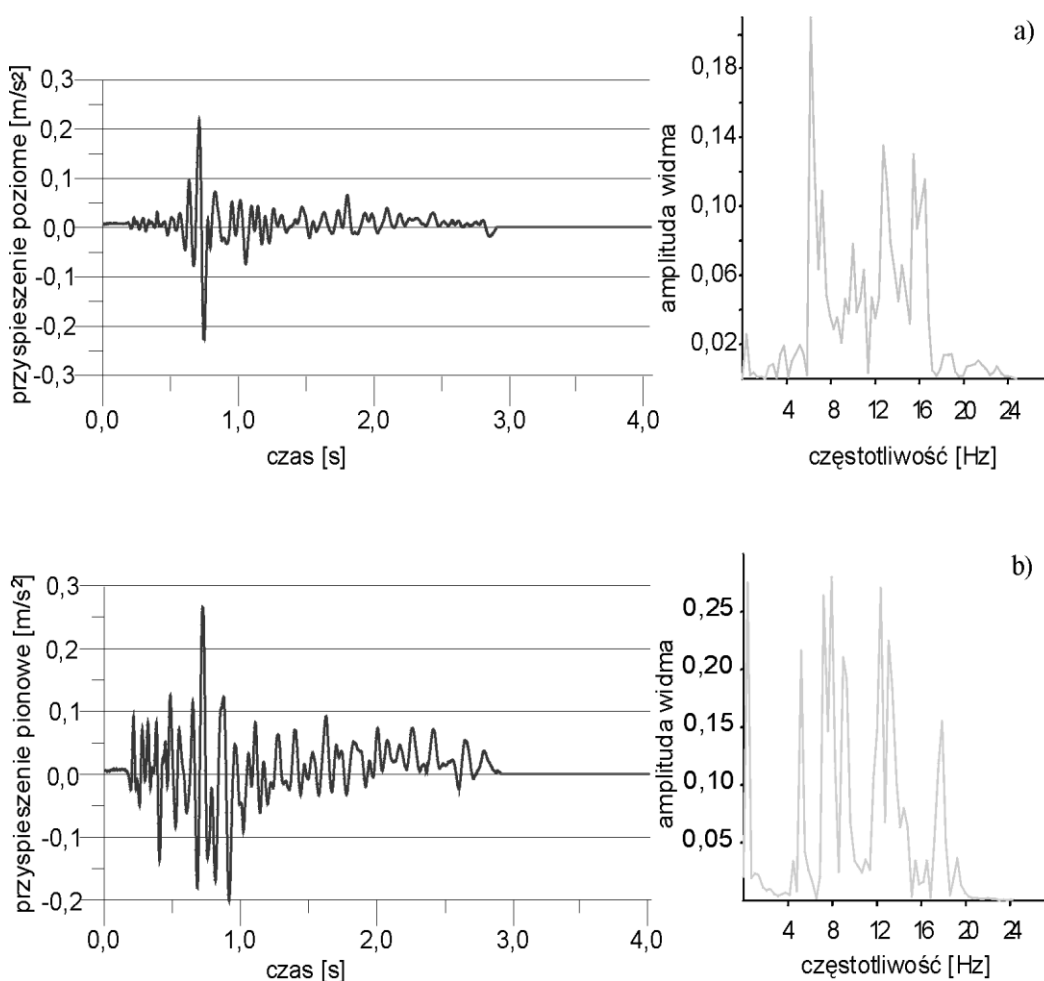
## 2.2 Obliczenia stanu dla obciążeń dynamicznych

W tej części obliczeń przyjęto warunki początkowe wynikające z analizy statycznej, przy czym dla kontroli obliczeń założono zerowe wartości przemieszczeń i prędkości. W prezentowanym rozwiązaniu przyjęto na dolnym i bocznych brzegach modelu lepkie granice według Lysmera i Kuhlmejera (1969). Propagacja fali jest oparta na rozwiązaniu równania ruchu przy użyciu zmiennej masy w punktach siatki obliczeniowej (FLAC User's Manual 1998).

Zaburzenie dynamiczne symulowano poprzez zadanie w wybranych punktach siatki, leżących na prostej aproksymującej czoło fali sejsmicznej, składowych przyspieszenia w kierunkach pionowym i poziomym. Kąt nachylenia czoła fali do podstawy modelu wyliczono z danych geometrycznych położenia ogniska wstrząsu i punktu pomiarowego. Składowe przyspieszenia zostały wprowadzone w postaci tablicy obliczonej na podstawie scyfrowanego przebie-

gu (rys. 2.3), pochodzącego od wstrząsu górniczego o energii  $3,2e5J$  zarejestrowanego na obszarze górniczym jednej z kopalń węgla kamiennego. Rejestracja wstrząsu przed wprowadzeniem do modelu została poddana operacji wstępnego przetwarzania danych cyfrowych. Odległość punktu pomiarowego od ogniska wstrząsu wynosiła ok. 850 m.

Przyjęto, że płaszczyzna przekroju modelu przedstawiona na rys. 2.1 jest prostopadła do płaszczyzny czoła fali sejsmicznej. W związku z odmiennym zorientowaniem układu współrzędnych stanowiska pomiarowego dokonano odpowiedniej transformacji trójskładowych rejestracji sejsmologicznej na dwuwymiarowy układ obliczeniowy  $x, y$ .



Rys. 2.3 Uśredniony przebieg przyspieszeń drgań cząstek gruntu wraz z widmem w kierunkach  $x$  (poziowym) i  $y$  (pionowym), odpowiednio na rysunkach a i b (Pilecki i in. 2000)

Fig. 2.3 Input waveform - a) horizontal b) vertical component of ground acceleration and their spectrum (Pilecki et al 2000)

W wybranych punktach siatki i ramy umiejscowiono punkty obserwacyjne, do rejestracji zmian w czasie przyspieszenia, prędkości i przemieszczenia. Rozmieszczenie punktów obserwacyjnych oraz punkty przyłożenia wymuszenia dynamicznego pokazano na rysunku 2.1.

### 3. Wyniki obliczeń oraz ich analiza

Wybrane wyniki obliczeń statycznych i dynamicznych przedstawiono na rysunku 3.1. Porównując wielkości składowych tensora naprężenia w gruncie w obliczeniach statycznych (rys. 3.1a-c) oraz dynamicznych (rys. 3.1e-g), widać wyraźny wpływ sił sejsmicznych na rozkład ich wartości. Największe zmiany obserwuje się w obszarze pod fundamentem budynku, w jego narożach. W momencie przejścia maksymalnej amplitudy przyspieszenia występuje zmiana wartości wszystkich składowych tensora naprężenia średnio o ok. 30 kPa.

Porównując odkształcenia osiowe w elementach konstrukcji przed (rys. 3.1a) i po (rys. 3.1e) przejściu zaburzenia dynamicznego widać zmiany w rozkładzie i wartości odkształceń elementów belkowych. Maksymalna wartość odkształcenia osiowego wzrosła 18-krotnie i występuje w ścianach piwnicy.

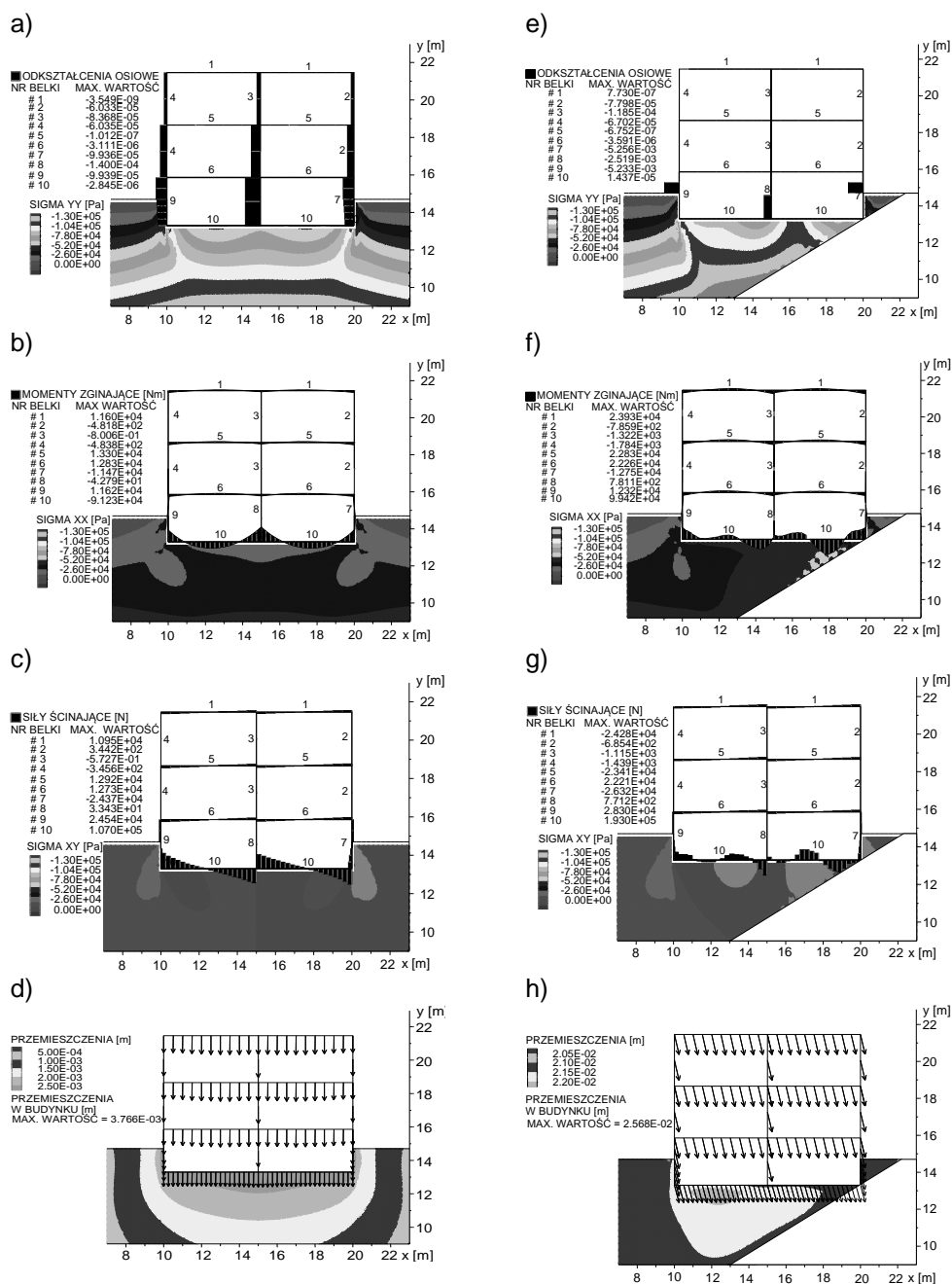
Momenty zginające w elementach belkowych przed (rys. 3.1b) i po (rys. 3.1f) przejściu fali charakteryzują się zmianą rozkładu i kierunku działających sił. Maksymalna wartość momentu zginającego w obliczeniach statycznych wynosi -91 kNm natomiast w fazie dynamicznej wzrasta do 99 kNm i zmienia zwrot. Maksymalne momenty zginające występują w fundamencie budynku.

Siły ścinające w elementach konstrukcji przed (rys. 3.1c) i po przejściu maksymalnej amplitudy przyspieszenia (rys. 3.1g) zmieniają swój rozkład i wartości. Maksymalna wartość sił ścinających w momencie działania obciążenia dynamicznego w porównaniu do stanu statycznego wzrosła 1,7-krotnie i występuje w fundamencie konstrukcji.

Wartość maksymalnego przemieszczenia w analizie statycznej wynosi w gruncie 2,5 mm, a w budynku 3,8 mm, natomiast po przejściu zaburzenia dynamicznego odpowiednio 22 mm i 26 mm.

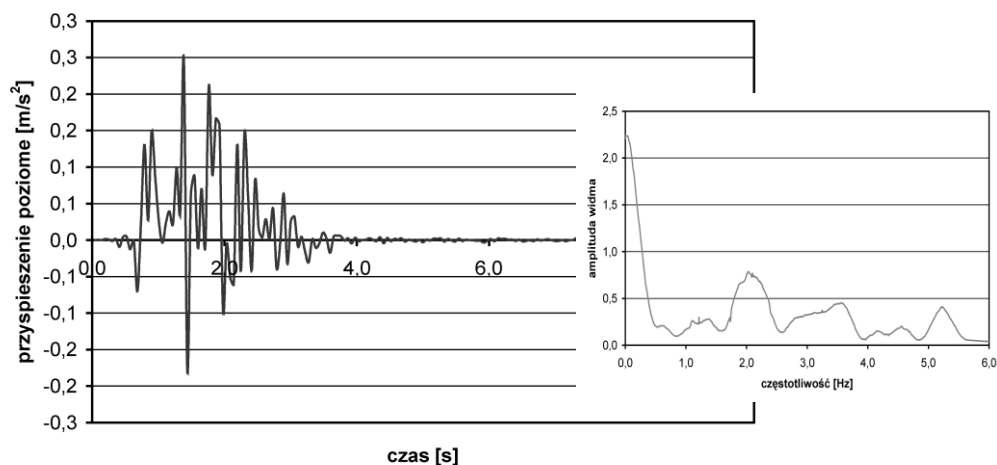
Rysunek 3.2 przedstawia rejestrację przyspieszenia poziomego wraz z widmem w środkowej części fundamentu (w punkcie nr 5). Czas trwania drgań oraz ich amplituda jest porównywalna z sygnałem wejściowym (rys. 2.3). Zmianie uległ charakter przebiegu przyspieszenia, w wyniku tłumienia i rozchodzenia się fali w ośrodku i budynku oraz drgań samej konstrukcji. Zmiany te potwierdza analiza widmowa sygnału.

Rysunek 3.3 pokazuje znormalizowane przemieszczenia poziome w punktach obserwacyjnych umiejscowionych w pionowych ścianach budynku - prawej, środkowej i lewej (rys. 2.1). Widać wykładniczy wzrost wartości przemieszczeń poziomych wraz ze wzrostem wysokości. W fundamencie budynku zaznacza się nieznaczny spadek wartości przemieszczenia poziomego wraz ze wzrostem odległości od źródła. Na poziomie poddasza budynku występują przemieszczenia poziome wielkości 5 mm oraz przemieszczenie pionowe - 24 mm.



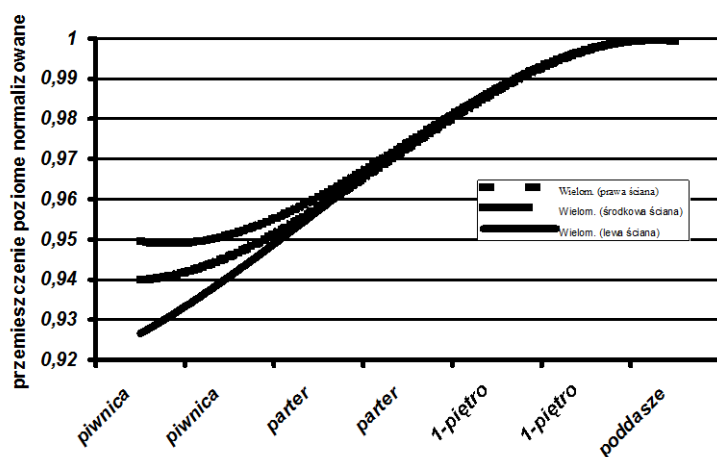
Rys. 3.1 Stan podłoża gruntowego i konstrukcji przed (a,b,c,d) i po (e,f,g,h) przejściu maksymalnej amplitudy przyspieszenia, gdzie: a,e - naprężenie pionowe w podłożu oraz odkształcenia osiowe w konstrukcji budynku; b,f - naprężenie poziome w podłożu oraz momenty zginające w budynku; c,g - naprężenie ścinające w podłożu oraz siły ścinające w budynku; d,h - przemieszczenia wypadkowe w podłożu i budynku (Pilecki i in. 2000)

Fig. 3.1 The behavior of soil basement and construction before (a, b, c, d) and after (e, f, g, h) the maximum acceleration amplitude has passed, where a,e - vertical stress in a basement and axial strain in construction; b,f – horizontal stress in basement and bending moments in construction; c,g – shear stress in basement and shear forces in construction; d, h – displacements in basement and in construction (Pilecki et al 2000)



Rys. 3.2 Przyspieszenie poziome wraz z widmem obserwowane w środkowej części fundamentu (w punkcie nr 5)

Fig. 3.2 Horizontal components of acceleration and their spectrum registered at the basement of the construction



Rys. 3.3 Znormalizowane przemieszczenia poziome w punktach umiejscowionych w pionowych ścianach budynku

Fig. 3.3 Normalised horizontal displacements in points localised in vertical walls of construction

#### 4. Podsumowanie

Przedstawiony w artykule przykład sposobu modelowania pozwala na bliższe poznanie mechanizmu oddziaływania wstrząsu na obiekty powierzchniowe. Podstawową zaletą takiej procedury jest możliwość przeprowadzenia kompleksowej oceny ilościowej w dowolnym czasie oddziaływania dynamicznego i dowolnym punkcie modelu.

Głównymi ograniczeniami symulacji numerycznej są trudności w matematycznym opisie procesów dynamicznych, opisie obiektu, a także niejednorodności ośrodka i doborze odpowiednich stałych materiałowych.

#### Literatura

- [1] FLAC User's Manual 1998: Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis.
- [2] Lysmer J., Kuhlmeyer R.L. 1969: Finite dynamic model for infinite media. J. Eng. Mech., 95(EM4), 859-877.
- [3] Pilecki Z., Zegadłowicz M., Gołębiowski T. 2000: Sposób modelowania oddziaływania wstrząsu sejsmicznego na budynek mieszkalny. Miesięcznik WUG 12, 37-42.

#### **Numerical modeling of mine tremor impact on surface construction**

The paper presents a possibility of numerical modeling of dynamic impact of mine tremor on a construction. The obtained results concentrate on stress and strain distribution caused by dynamic load. The input waveform was registered close to the building. The seismic response of the construction was measured in assigned points. The described example comes from one of the Polish coal mine site it is usual for Upper Silesian Basin.

*Przekazano: 30 marca 2001*