

Zastosowanie przybliżonych modeli SSI w przypadku wstrząsów górniczych

Application of approximate SSI models in case of mining tremors



Prof. dr hab. inż. Krystyna Kuźniar^{*)}



Prof. dr hab. inż. Tadeusz Tatara^{**)}

Treść: W pracy dokonano przeglądu wybranych, proponowanych w literaturze, przybliżonych, prostych modeli uwzględniających zjawisko współpracy podłoże-budynki (j. ang.: *soil-structure interaction* – SSI) podczas trzęsień ziemi. Analizowano przydatność tych modeli do prognozowania różnic między jednocześnie zachodzącymi drganiami gruntu obok budynku i fundamentu budynku, których źródłem były wstrząsy górnicze w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (LGOM). Skupiono się na ocenie dokładności modeli w przypadku ich stosowania do wyznaczania relacji odpowiednich spektrów odpowiedzi: bezwymiarowych przyśpieszeniowych spektrów odpowiedzi (β) oraz wymiarowych przyśpieszeniowych spektrów odpowiedzi (S_a) od drgań poziomych. Pod uwagę wzięto różnego typu budynki.

Abstract: This paper presents the selected, proposed in the literature, approximate, simple models which take into account the phenomenon of soil-structure interaction (SSI) during earthquakes. The usefulness of these models for the prediction of the differences between mine-induced vibrations in the Legnica-Glogow Copperfield (LGOM) occurring at the same time on the ground near the buildings and building foundations is analysed. The focus is on the evaluation of the accuracy of the models in the case of their application for the estimation of the relation (ratio) between the corresponding response spectra: non-dimension acceleration response spectra (β) as well as dimension averaged acceleration response spectra (S_a) from the horizontal vibrations. Various types of buildings are taken into account.

Słowa kluczowe:

wstrząsy górnicze, model SSI, interakcja dynamiczna podłoże-budynki, spektra odpowiedzi, transmisja spektrów odpowiedzi

Key words:

mining tremors, SSI model, soil-structure interaction, response, spectra, transmission of response spectra

1. Wprowadzenie

Wśród oddziaływań dynamicznych na konstrukcję budowlaną można wyróżnić wymuszenia, których źródłem jest ruch podłoża gruntowego. W tym przypadku drgania dochodzą do obiektu powierzchniowego w wyniku propagacji w ośrodku gruntowym. Drgania podłoża mają więc charakter wymuszenia kinematycznego, a obciążenie konstrukcji związane jest z siłami bezwładności.

Źródła takich drgań mogą być naturalne, tzw. sejsmiczne, do których zalicza się trzęsienia ziemi, albo są wynikiem działalności ludzkiej. W tym drugim przypadku mówimy o tzw. drganiach parasejsmicznych. Wśród nich największą intensywnością wyróżniają się drgania wzbudzone wstrząsami górnymi.

Drgania powierzchniowe od wstrząsów górniczych wykazują pewne podobieństwa (np. losowość występowania) w stosunku do drgań wzbudzanych ruchami tektonicznymi skorupy ziemskiej (trzęsieniami ziemi), ale też i różnice (np. czas trwania intensywnej fazy drgań, zasięg występowania, dominujące częstotliwości drgań) [22].

Zarówno w przypadku drgań sejsmicznych, jak i drgań od wstrząsów górniczych, podczas przekazywania drgań z gruntu na obiekt budowlany występuje zjawisko wzajemnego oddziaływania (współpracy) układu konstrukcja-podłoże, nazywane interakcją dynamiczną. Jednocześnie występujące drgania gruntu obok budynku i drgania fundamentu budynku mogą się istotnie różnić [6, 8, 10, 13, 14, 19], tymczasem to przebiegi drgań fundamentów pozwalają na dokładniejszą ocenę szkodliwości drgań dla budynków [12].

W literaturze, w obszarze analizy problemu interakcji dynamicznej podłoże-budynki dominują prace teoretyczne,

^{*)} Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie ^{**)} Politechnika Krakowska

w których często używane są bardzo złożone modele matematyczne mające opisywać ten problem [1, 2, 21].

W zdecydowanie skromniejszej liczbie są prace z zakresu doświadczalnego badania interakcji podłoże-budynki [8, 9, 10, 11, 18, 19].

Alternatywną, wygodną w praktycznych zastosowaniach propozycją w stosunku do skomplikowanych modeli, wymagających dużego kosztu numerycznego, może być wykorzystanie do oceny przekazywania drgań z gruntu na fundament budynku prostych modeli przybliżonych [5, 14, 15, 16].

W niniejszej pracy przedstawiono wybrane, proponowane w literaturze, przybliżone, proste modele uwzględniające zjawisko współpracy podłoże-budynki (j. ang.: *soil-structure interaction* – SSI) podczas trzęsień ziemi. Analizowano przydatność tych modeli do prognozowania różnic między jednocześnie zachodzącymi drganiami gruntu obok budynku i fundamentu budynku, których źródłem były wstrząsy górnicze w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (LGOM). Skupiono się na ocenie dokładności modeli w przypadku ich stosowania do wyznaczania relacji odpowiednich spektrów odpowiedzi: bezwymiarowych przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi (β) oraz wymiarowych przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi (S_a) od drgań poziomych. Pod uwagę wzięto różnego typu budynki mieszkalne: niski, średniej wysokości i wysoki.

2. Przybliżone modele SSI proponowane w przypadku trzęsień ziemi

Głównym celem pracy jest analiza ewentualnej przydatności prostych, przybliżonych, empirycznych modeli SSI, które zostały przygotowane w odniesieniu do trzęsień ziemi, do warunków wstrząsów górniczych w LGOM. Zdecydowano się na rozważenie propozycji tego typu modeli zawartych w jednym z ostatnich raportów opracowanych przez National Institute of Standards and Technology, USA [16].

Skoncentrowano się na dwóch modelach przekazywania drgań poziomych z gruntu na fundament budynku: H_u i RRS , zgodnie z oznaczeniami z [16]. Model H_u nazywany jest w [16] funkcją transformacji (j. ang.: *transfer function*), a model RRS – relacją (stosunkiem) spektrów odpowiedzi (j. ang.: *ratio of response spectra*).

W obu tych modelach uwzględniono modyfikację drgań powierzchniowych z uwagi na posadowienie budynku w stosunku do drgań powierzchniowych występujących w przypadku braku obiektu, jak również głębokość zagłębienia fundamentów. Zatem zgodnie z modelami proponowanymi w [16], całkowita redukcja drgań przy ich przekazywaniu z gruntu na fundament budynku jest kombinacją tych dwóch efektów.

Równania (2.1)–(2.4) przedstawiają pierwszy z rozważanych modeli, a więc funkcję transformacji H_u do zastosowania w przypadku transmisji wymiarowych przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi (S_a) z gruntu na fundament budynku:

$$H_u = \frac{S_{af}}{S_{ag}} \quad (2.1)$$

$$H_u = H_{ubsa} \cdot H_{uemb} \quad (2.2)$$

$$H_{ubsa} = \frac{\sin(a_0^k \cdot \frac{V_s}{V_{app}})}{a_0^k \cdot \frac{V_s}{V_{app}}}, \quad \text{dla } a_0^k \leq \frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_{app}}{V_s} \quad (2.3a)$$

$$H_{ubsa} = \frac{2}{\pi}, \quad \text{dla } a_0^k > \frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_{app}}{V_s} \quad (2.3b)$$

$$a_0^k = \frac{\omega \cdot B_e^A}{V_s} \quad (2.3c)$$

$$H_{uemb} = \cos\left(\frac{D \cdot \omega}{V_s}\right), \quad \text{dla } \frac{D \cdot \omega}{V_s} < 1,1 \quad (2.4a)$$

$$H_{uemb} = 0,45, \quad \text{dla } \frac{D \cdot \omega}{V_s} > 1,1 \quad (2.4b)$$

gdzie:

S_{ap} , S_{ag} – odpowiednio bezwymiarowe przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi od drgań fundamentu budynku i gruntu obok budynku,

H_u – funkcja transformacji jako model SSI,

H_{ubsa} – funkcja uwzględniająca w modelu H_u modyfikację drgań powierzchniowych z uwagi na posadowienie budynku w stosunku do drgań powierzchniowych występujących w przypadku braku obiektu,

H_{uemb} – funkcja uwzględniająca w modelu H_u głębokość podszwy fundamentów,

ω – częstość drgań własnych obiektu; $\omega = 2\pi f$,

f – częstotliwość drgań własnych obiektu, Hz,

V_s – prędkość fali poprzecznej, m/s,

V_{app} – prędkość pozorna propagacji fali, m/s,

B_e^A – połowa wymiaru boku kwadratu o polu równoważnym obszarowi rzeczywistej podstawy fundamentowej obiektu ($Pole = (2)^2$), m,

D – głębokość posadowienia, m.

Z kolei równania dotyczące drugiego z rozważanych modeli – RRS (relacja spektrów odpowiedzi), również w odniesieniu do wymiarowych przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi (S_a), po matematycznych przekształceniach wzorów z raportu [16].

$$RRS = \frac{S_{af}}{S_{ag}} \quad (2.5)$$

$$RRS = RRS_{bsa} \cdot RRS_{emb} \quad (2.6)$$

$$RRS_{bsa} = 1 - \frac{1}{14100} \cdot \left(\frac{2500}{381} \cdot B_e^A \cdot f\right)^{1,2}, \quad \text{dla } f < f_L \quad (2.7a)$$

$$RRS_{bsa} = 1 - \frac{1}{14100} \cdot \left(\frac{2500}{381} \cdot B_e^A \cdot f_L\right)^{1,2}, \quad \text{dla } f \geq f_L \quad (2.7b)$$

$$RRS_{emb} = \cos\left(\frac{2\pi D \cdot f}{V_{sr}}\right), \quad \text{dla } f < f_L \quad (2.8a)$$

$$RRS_{emb} = \cos\left(\frac{2\pi D \cdot f_L}{V_{sr}}\right), \quad \text{dla } f \geq f_L \quad (2.8b)$$

gdzie:

S_{ap} , S_{ag} – zgodnie z oznaczeniami do równań (2.1)(2.4),

RRS – relacja (stosunek) spektrów odpowiedzi jako model SSI,

RRS_{bsa} – funkcja uwzględniająca w modelu RRS modyfikację drgań powierzchniowych z uwagi na posadowienie budynku w stosunku do drgań powierzchniowych występujących w przypadku braku obiektu,

RRS_{emb} – funkcja uwzględniająca w modelu RRS głębokość podszwy fundamentów,

B_e^A – zgodnie z oznaczeniami do równań (2.1)(2.4),

f – zgodnie z oznaczeniami do równań (2.1)(2.4),

f_L – częstotliwość graniczna, Hz,

- D – zgodnie z oznaczeniami do równań (2.1)(2.4),
- V_{sr} – prędkość fali poprzecznej zredukowana, m/s.

W przypadku bezwymiarowych przyśpieszeniowych spektrów odpowiedzi (β) modele SSI występują w analogicznej postaci odpowiednio do równań (2.1)÷(2.4) oraz równań (2.5)÷(2.8).

3. Krótka charakterystyka danych do obliczeń

Przydatność przedstawionych w punkcie 2 przybliżonych modeli do oceny różnic między jednocześnie występującymi drganiami gruntu obok obiektu i jego fundamentu, badano w przypadku drgań typowych budynków mieszkalnych z rejonu Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM), wzbudzanych wstrząsami górnymi. Były to: budynek niski, jednokondygnacyjny (N); budynek średniej wysokości, pięciokondygnacyjny (S); budynek wysoki, dwunastokondygnacyjny (W). Wszystkie te budynki są podpiwniczone, posadowione na ławach fundamentowych. We wszystkich analizowanych obiektach głębokość posadowienia $D = 1,5$ m.

W tabelicy 1 podano wymiary w rzucie w poziomie posadowienia rozważanych budynków oraz odpowiadające im „zastępcze” wymiary.

W przypadku próby weryfikacji dokładności przybliżonych modeli SSI dla związku między uśrednionymi spektrami odpowiedzi wyznaczonymi na podstawie wszystkich, równocześnie zarejestrowanych przebiegów drgań gruntu i fundamentów budynków (bez podziału na typy obiektów), wartość $= 11,4$ m ustalono jako średnią dla wszystkich trzech budynków.

Tabela 1. Zestawienie wymiarów w rzucie w poziomie posadowienia budynków N, S, W oraz odpowiadające im wymiary

Table 1. Summary of dimensions in the plan view in foundation level of the buildings N, S, W, and the corresponding dimensions

| Budynek | Wymiary w rzucie w poziomie posadowienia, m × m | $B_{e,m}^A$ |
|---------|---|-------------|
| N | 10,0 × 10,0 | 5,0 |
| S | 101,1 × 11,7 | 17,1 |
| W | 54,6 × 10,8 | 12,1 |

Źródłem analizowanych drgań były wstrząsy górnicze o energiach co najmniej 10^6 J, które generowały drgania gruntu o pomierzonych maksymalnych wartościach przyśpieszeń równych co najmniej $0,1$ m/s².

W przypadku każdego z rozważanych obiektów przebiegi przyśpieszeń drgań rejestrowane były równocześnie na gruncie obok budynku (w odległości kilku metrów od budynku) i na fundamentach budynku, w sumie od kilkuset wstrząsów górnymi.

Dokładność modeli H_u i RRS wykorzystywanych jako potencjalne narzędzia do prognozowania różnic w drganiach gruntu i fundamentu budynku od wstrząsów pochodzenia górnymi, oceniano osobno w kierunku x, osobno w kierunku y, oraz w obu tych kierunkach bez rozróżniania (x i y). Kierunki składowych drgań poziomych x i y są równoległe odpowiednio do osi poprzecznej i podłużnej budynku.

W obu modelach (H_u i RRS) przyjęto średnią prędkość fali poprzecznej $V_s = 200$ m/s stosownie do warunków gruntowych w LGOM [3].

W przeprowadzonych obliczeniach założono wartość częstotliwości granicznej $f_L = 10$ Hz zgodnie ze średnią wartością

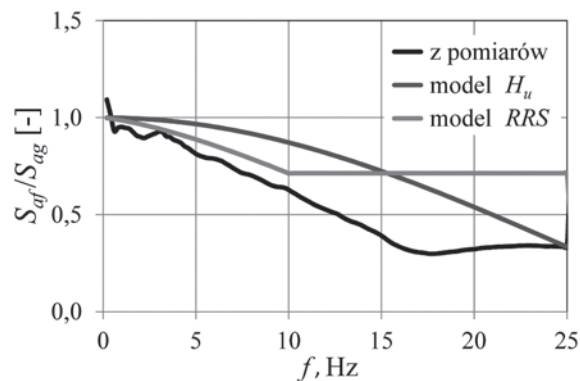
dominujących częstotliwości drgań gruntu wywoływanych wstrząsami górnymi w LGOM. Dla trzęsień ziemi, podczas których dominujące częstotliwości drgań podłoża są niższe, proponowane jest przyjęcie $f_L = 5$ Hz [5].

Biorąc pod uwagę warunki gruntowe oraz maksymalne wartości przyśpieszeń drgań od wstrząsów górnymi w LGOM, zgodnie z wytycznymi z Raportu [16], w obliczeniach przyjęto, że prędkość fali poprzecznej zredukowana jest równa prędkości fali poprzecznej: $V_{sr} = V_s$.

Z kolei, również za [16], przyjęto w obliczeniach przybliżoną zależność między prędkością pozorną propagacji fali (V_{app}), a prędkością fali poprzecznej (V_s): $V_{app}/V_s = 10$.

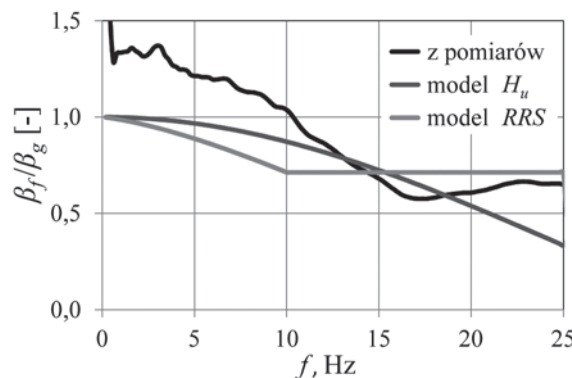
4. Ocena dokładności modeli SSI w przypadku wstrząsów górnymi

Od wszystkich kilkuset zarejestrowanych i uwzględnionych w rozważaniach przebiegów przyśpieszeń drgań gruntu i fundamentów budynków, wyliczono przyśpieszeniowe spektra odpowiedzi – zarówno spektra wymiarowe S_a , jak i spektra bezwymiarowe β (rys. 1, 2, 3, 4) (tabl. 2, 3).



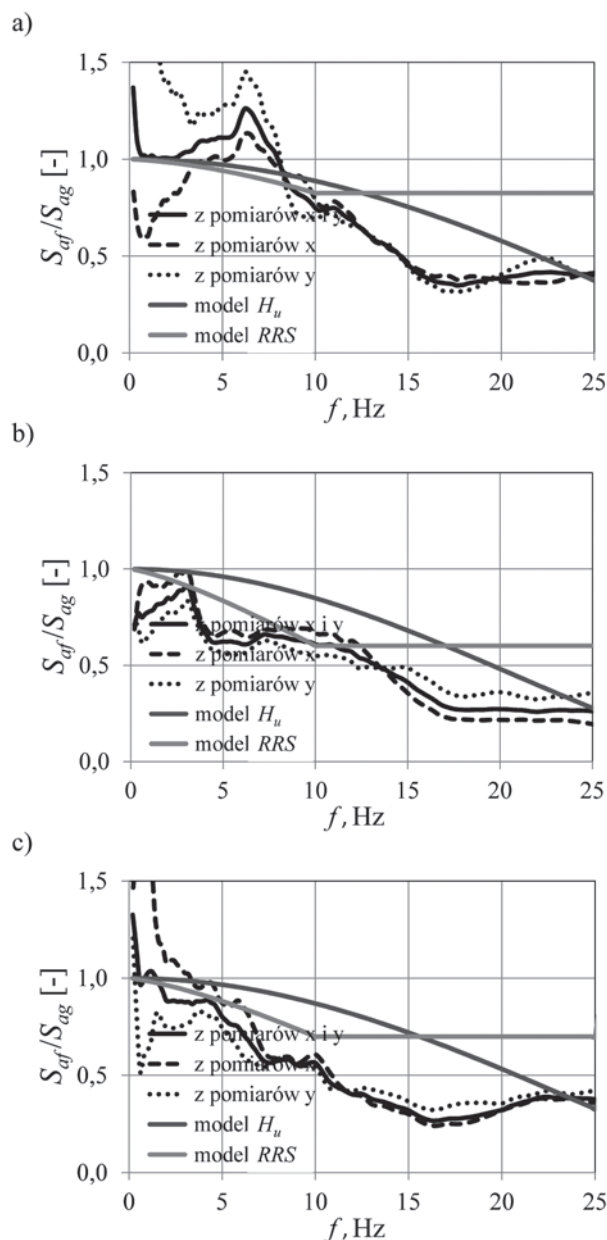
Rys. 1. Relacja (stosunek) S_{af} / S_{ag} w przypadku uśrednionych spektrów odpowiedzi S_a od wszystkich przebiegów drgań zarejestrowanych na gruncie i na fundamentach budynków N, S i W

Fig. 1. Relation (ratio) S_{af} / S_{ag} , case of the averaged response spectra S_a determined on the basis of all recorded ground and foundation motions of N, S and W buildings



Rys. 2. Relacja (stosunek) β_f / β_g w przypadku uśrednionych spektrów odpowiedzi β od wszystkich przebiegów drgań zarejestrowanych na gruncie i na fundamentach budynków N, S i W

Fig. 2. Relation (ratio) β_f / β_g , case of the averaged response spectra β determined on the basis of all recorded ground and foundation motions of N, S and W buildings



Rys. 3. Relacja (stosunek) S_{af} / S_{ag} w przypadku uśrednionych spektrów odpowiedzi S_a :

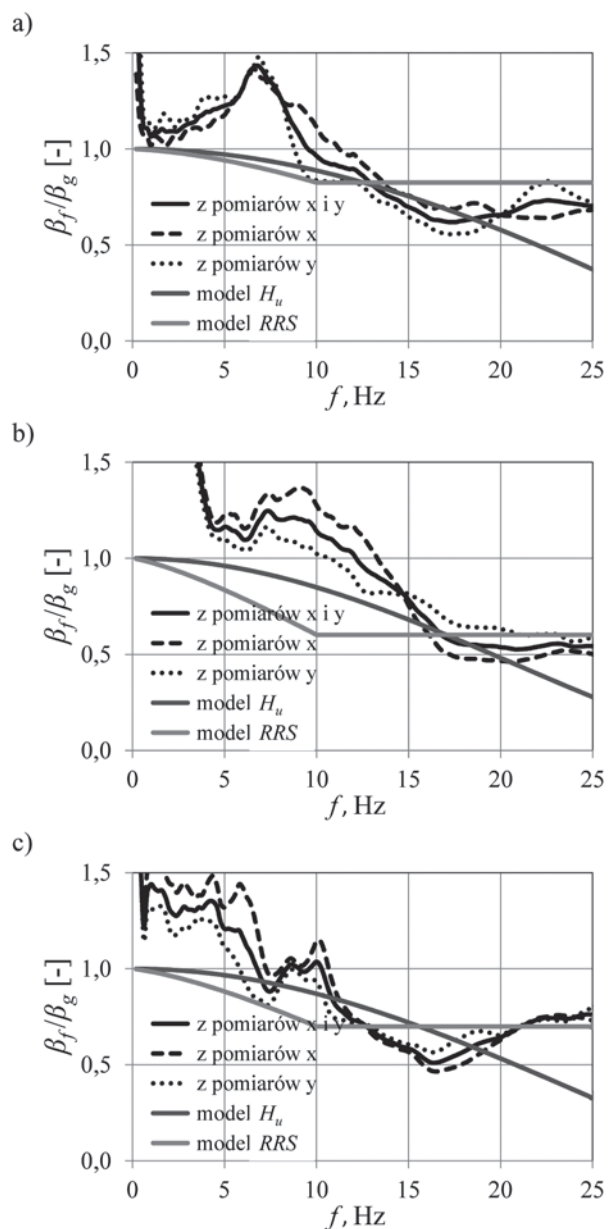
a) budynek N; b) budynek S; c) budynek W

Fig. 3. Relation (ratio) S_{af} / S_{ag} , case of the averaged response spectra S_a :

a) building N; b) building S; c) building W

Wykorzystując spektra odpowiedzi wyznaczone w przypadku pojedynczych wstrząsów górniczych, konstruowano uśrednione spektra odpowiedzi dla poszczególnych typów budynków w obu kierunkach drgań bez rozróżniania (x i y) oraz osobno w kierunku x i osobno w kierunku y, a także uśrednione spektra odpowiedzi od wszystkich przebiegów drgań zarejestrowanych na gruncie i na fundamentach budynków N, S i W.

Dokładność przybliżonych modeli H_u i RRS oceniano w przypadku ich stosowania do wyznaczania relacji między spektrami odpowiedzi od drgań poziomych jednocześnie rejestrowanych na gruncie obok budynku i drgań fundamentu budynku.



Rys. 4. Relacja (stosunek) β_f / β_g w przypadku uśrednionych spektrów odpowiedzi β :

a) budynek N; b) budynek S; c) budynek W

Fig. 4. Relation (ratio) β_f / β_g , case of the averaged response spectra β :

a) building N; b) building S; c) building W

Na rys. 1 i rys. 2 porównano odpowiednio relację (stosunek) S_{af} / S_{ag} w przypadku uśrednionych spektrów odpowiedzi S_a oraz relację (stosunek) β_f / β_g w przypadku uśrednionych spektrów odpowiedzi β od wszystkich przebiegów drgań zarejestrowanych na gruncie i na fundamentach budynków N, S i W, z właściwymi wykresami wynikającymi z modeli H_u i RRS .

Z kolei na rys. 3, z modelami H_u i RRS porównano relacje S_{af} / S_{ag} w przypadku uśrednionych spektrów odpowiedzi S_a osobno dla każdego z rozważanych budynków: N, S, W. Ponadto na tym rysunku zamieszczono również krzywe relacji S_{af} / S_{ag} uzyskane dla spektrów uśrednionych osobno w kierunkach x i y równoległych do osi poprzecznej i podłużnej każdego z rozważanych typów budynków.

Tablica 1. Średnie wartości względnych błędów prognozowania transmisji uśrednionych spektrów odpowiedzi od drgań wywołanych wstrząsami górniczymi z gruntu na fundamenty budynków z użyciem modeli H_u i RRS

Table 1. Average values of relative errors of the prediction of response spectra from mining-induced vibrations' transmission from the ground to building foundations by use of H_u and RRS models

| Budynek | Średnie wartości błędów względnych, % | | | | |
|---------|---------------------------------------|---------|-------------|---------|------|
| | Model H_u | | Model RRS | | |
| | S_a | β | S_a | β | |
| N | kier. x i kier. y | 31,8 | 24,3 | 61,1 | 18,4 |
| | kier. x | 32,8 | 23,4 | 64,8 | 19,3 |
| | kier. y | 38,5 | 27,2 | 64,9 | 18,4 |
| S | kier. x i kier. y | 49,1 | 29,7 | 70,3 | 24,6 |
| | kier. x | 59,4 | 31,7 | 108,7 | 33,2 |
| | kier. y | 46,0 | 30,5 | 44,6 | 19,7 |
| W | kier. x i kier. y | 55,2 | 28,8 | 78,8 | 18,1 |
| | kier. x | 57,4 | 32,1 | 86,7 | 23,5 |
| | kier. y | 52,6 | 27,0 | 67,8 | 12,5 |
| N, S, W | kier. x i kier. y | 45,3 | 18,4 | 59,7 | 20,2 |

Tablica 2. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona (r) wyników badań doświadczalnych transmisji uśrednionych spektrów odpowiedzi od drgań wywołanych wstrząsami górniczymi z gruntu na fundamenty budynków i rezultatów otrzymanych z użyciem modeli H_u i RRS

Table 2. Pearson correlation coefficient (r) of the experimental results of the transmission of averaged response spectra from the mining-induced vibrations from the ground to the building foundations and the results obtained by use of H_u and RRS models

| Budynek | r [-] | | | | |
|---------|-------------------|---------|-------------|---------|-------|
| | Model H_u | | Model RRS | | |
| | S_a | β | S_a | β | |
| N | kier. x i kier. y | 0,779 | 0,707 | 0,849 | 0,779 |
| | kier. x | 0,777 | 0,798 | 0,668 | 0,675 |
| | kier. y | 0,704 | 0,572 | 0,936 | 0,794 |
| S | kier. x i kier. y | 0,895 | 0,868 | 0,807 | 0,851 |
| | kier. x | 0,901 | 0,879 | 0,793 | 0,803 |
| | kier. y | 0,824 | 0,836 | 0,828 | 0,899 |
| W | kier. x i kier. y | 0,699 | 0,649 | 0,839 | 0,819 |
| | kier. x | 0,662 | 0,693 | 0,825 | 0,791 |
| | kier. y | 0,663 | 0,564 | 0,792 | 0,815 |
| N, S, W | kier. x i kier. y | 0,888 | 0,866 | 0,913 | 0,890 |

Analogiczne porównania dla relacji β_f / β_g , dotyczące bezwymiarowych przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi, pokazano na rys. 4.

Dodatkowo, pomocne w ocenie przydatności w warunkach wstrząsów górniczych przybliżonych modeli H_u i RRS , które skonstruowane zostały na podstawie danych dotyczących wstrząsów sejsmicznych, mogą być zestawienia z tablicy 2 i tablicy 3.

Tablica 2 zawiera średnie wartości względnych błędów prognozowania transmisji uśrednionych spektrów odpowiedzi od drgań wywołanych wstrząsami górniczymi z gruntu na fundamenty budynków z użyciem modeli H_u i RRS , a tablica 3 – odpowiednie współczynniki korelacji liniowej Pearsona.

Można zauważyć, że oba modele w stopniu poprawnym pozwalają przewidywać trendy wynikające z wyników badań doświadczalnych dotyczących wstrząsów górniczych w LGOM.

Prognozowanie zależności między przyspieszeniowymi spektrami odpowiedzi od jednocześnie zachodzących drgań gruntu obok budynku i fundamentu budynku z użyciem tych modeli jest jednak obciążone sporą niedokładnością.

Uproszczona ocena z wykorzystaniem błędów względnych (tabl. 2) wskazuje, że zarówno model H_u , jak i model RRS wykazują lepsze dopasowanie w przypadku spektrów

β . Natomiast błędy względne prognozowania spektrów S_a są bardzo duże we wszystkich grupach spektrów uśrednionych.

Pełniejszą informację o zależności między wynikami oczekiwanymi (dokładnymi), za które w tym przypadku uważa się rezultaty badań doświadczalnych, a wynikami uzyskanymi za pomocą modeli, daje współczynnik korelacji liniowej. Widać w nim duży rozrzut (tabl. 3) – od wartości 0,564 w przypadku transmisji uśrednionych, bezwymiarowych spektrów odpowiedzi β w kierunku y budynku wysokiego, do wartości 0,936 w przypadku transmisji wymiarowych spektrów odpowiedzi S_a w kierunku y budynku niskiego. Generalnie, na podstawie wartości współczynników korelacji liniowej trudno jest rozstrzygnąć który z modeli prowadzi do dokładniejszych prognoz oraz transmisja którego ze spektrów jest „łatwiejsza” do przewidywania za pomocą ww. prostych modeli.

5. Podsumowanie

W przypadku wstrząsów górniczych w LGOM można próbować prognozować przyspieszeniowe spektra odpowiedzi od drgań fundamentu budynku na podstawie odpowiednich spektrów odpowiedzi od drgań gruntu, używając przybliżonych, prostych modeli H_u albo RRS , przeznaczonych do

uwzględniania zjawiska dynamicznej współpracy podłoże-budynków podczas trzęsień ziemi. Trzeba jednak liczyć się wtedy ze stosunkowo małą dokładnością takiego prognozowania.

Autorzy niniejszego artykułu planują skonstruowanie własnych modeli, które będą lepiej dopasowane do charakteru drgań od wstrząsów górniczych i specyfiki podłoża w LGOM.

Literatura

1. *Ambrosini R. D., Riera J.D., Danesi R.F.*: On the influence of foundation flexibility on the seismic response of structures, *Computers and Geotechnics*, 27, 3, 2000, 179÷197.
2. *Bode Ch., Hirschauer R., Savidis S. A.*: Soil-structure interaction in the time domain using halfspace Green's functions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 2002, 283÷295.
3. *Dubiński J., Lurka A., Stec K.*: Badanie zależności pomiędzy radiacją sejsmiczną a mechanizmem ognisk wstrząsów górotworu na podstawie rejestracji sejsmologicznych i sejsmometrycznych, *Materiały Sympozjum: Warsztaty 2006 z cyklu Zagrożenia naturalne w górnictwie, Kraków 2006*, 65÷77.
4. *Dutta S. C., Bhattacharya K., Roy R.*: Response of low-rise buildings under seismic ground excitation incorporating soil-structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 12, 2004, 893-914.
5. FEMA 440, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, ATC-55 Project, 2005.
6. *Kim S., Stewart J.P.*: Kinematic soil-structure interaction from strong motion recordings, *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 129, 4, 2003, 323÷335.
7. *Kuźniar K.*: Analiza drgań budynków ścianowych o średniej wysokości podlegających wstrząsom górniczym z wykorzystaniem sieci neuronowych, *Monografia 310, seria: Inżynieria Łądowa, Wydawnictwo PK, Kraków 2004*.
8. *Kuźniar K., Maciąg E., Tatara T.*: Acceleration response spectra from mining tremors. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES), Geneva 2006, Switzerland, Abstract Book, 2006 466-467 (full paper on CD).
9. *Kuźniar K., Tatara T.*: Przekazywanie drgań od wstrząsów górniczych z gruntu na fundamenty budynków różnego typu. *Przeгляд Górnicy* 6, 2014, 30÷34.
10. *Luco J. E., Trifunac M. D., Wong H. L.*: Isolation of soil-structure interaction effects by full-scale forced vibration tests, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 1, 1988, 1÷21.
11. *Maciąg E.*: Experimental evaluation of changes of dynamic properties of buildings on different grounds, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 14, 1986, 925÷932.
12. *Maciąg E.*: Ocena szkodliwości wstrząsów górniczych dla budynków na podstawie drgań ich fundamentów czy gruntu? *Inżynieria i Budownictwo* 12, 2005, 670÷677.
13. *Maciąg E.*: Interakcja układu budynek-podłoże gruntowe w świetle doświadczalnego badania drgań parasejsmicznych. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 4, 2006, 240÷250.
14. *Mikami, A., Stewart, J.P., Kamiyama, M.*: Effects of time series analysis protocols on transfer functions calculated from earthquake accelerograms, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 9, 2008 695-706.
15. *Mylonakis G., Nikolaou S., Gazetas G.*: Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 48, 26, 2006, 824÷853.
16. NIST GCR 12-917-21, Soil-Structure Interaction for Building Structures, prepared by NEHRP Consultants Joint Venture (a partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering), 2012.
17. *Spyrakos C. C., Koutromanos I. A., Maniatakis C.A.*: Seismic response of base-isolated buildings including soil-structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 4, 2009, 658÷668.
18. *Stypula K.*: Badania propagacji w podłożu gruntowym oraz przekazywanie się na budynki drgań wywołanych wbijaniem pali fundamentowych, *praca doktorska, Biblioteka Główna Politechniki Krakowskiej, Kraków 1981*.
19. *Tatara T.*: Działanie drgań powierzchniowych wywołanych wstrząsami górniczymi na niską tradycyjną zabudowę mieszkalną, *Zeszyty Nauk. Politechniki Krakowskiej, seria Inż. Łąd., 74, 2002*.
20. *Tatara T.*: Odporność dynamiczna obiektów budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych, *Wydawnictwo PK, Kraków 2012*.
21. *Wolf J. P., Song Ch.*: Some cornerstones of dynamic soil-structure interaction, *Engineering Structures*, 24, 2002, 13÷28.
22. *Zembaty Z.*: Rockburst induced ground motion – a comparative study, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 2004, 11÷23.