

UKD 622.271: 622.2: 622.83/84: 69.059.22

Analiza reakcji dynamicznej budynków murowych poddanych wstrząsom górniczym z uwzględnieniem wpływu nieregularności położenia elementów nośnych

Analysis of the dynamic response of masonry buildings with irregularities in the location of bearing elements due to mining shocks



*Dr inż. Filip Pachla**



*Prof. dr hab. inż. Tadeusz Tatara**

Treść: Praca dotyczy analizy wpływu nieregularności układu konstrukcyjnego budynków murowych na ich charakterystyki dynamiczne oraz reakcję dynamiczną na zadane wymuszenie kinematyczne. Analizie poddano kilka modeli budynków uznanych za reprezentatywne dla tej klasy obiektów na terenach objętych wpływami wstrząsów górniczych. Na obszarach Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) i Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) najliczniejszymi są budynki murowe o wysokości od 1 – 5 kondygnacji. Pierwsza część pracy dotyczy przyjęcia przestrzennych modeli dynamicznych budynków o zróżnicowanym układzie ścian konstrukcyjnych. Były to budynki o nieregularnym, symetrycznym i bisymetrycznym układzie ścian nośnych. W drugiej części pracy wyznaczono charakterystyki dynamiczne modeli i oceniono wpływ nieregularności układu ścian nośnych na podstawowe częstotliwości drgań własnych. Następnie, stosując metodę spektrum odpowiedzi i przyjmując różne wzorcowe spektra odpowiedzi, wyznaczono reakcję dynamiczną modeli budynków. Oceniono poziom dynamicznych naprężeń głównych i stycznych w zależności od przyjętej krzywej opisującej wzorcowe spektrum odpowiedzi oraz nieregularności położenia ścian konstrukcyjnych. Wyniki analiz numerycznych wskazały istotny wpływ nieregularności układu konstrukcyjnego na częstotliwości drgań własnych analizowanych modeli budynków. Wykazano także wpływ przyjętej krzywej wzorcowego spektrum odpowiedzi w obszarze LGOM na poziom obliczanych naprężeń.

Abstract: The study concerns the analysis of the impact of structural irregularities in the masonry buildings on their dynamic characteristics and dynamic response to kinematic loads. We analyzed several models of buildings deemed to be representative of this class of structures in areas under the influence of mining tremors. In the areas of Legnica-Głogow Copperfield (LGC) and the Upper Silesian Coal Basin (USCB) there are the most numerous masonry buildings with the height of 1-5 storeys. The first part of the study refers to the adoption of 3-D dynamic models of buildings of different structural wall system. These were buildings with irregular, symmetrical and bisymmetrical system load-bearing walls. The second part concerns the dynamic characteristics of the building models and the assessment of the impact of the irregularities in the load-bearing walls on the natural frequencies. Then, using the response spectrum method and assuming different standard response spectra, dynamic responses of building models were determined. The level of dynamic principal and tangent stresses which depend on the adopted standard curve, describing the response spectrum and irregularities in the structural walls was also evaluated. The results of the numerical analyzes showed a significant influence of the structural irregularities on the natural frequencies of the analyzed models of buildings. It also showed the impact of the adopted standard response spectrum curve in the LGC on the level of the calculated stresses.

Słowa kluczowe:

wstrząs górniczy, budynki murowe, nieregularność układu konstrukcyjnego, częstotliwość drgań własnych, wzorcowe spektra odpowiedzi

Key words:

mining shock, masonry buildings, irregularities in structural elements, frequency of free vibrations, standard response spectra

* *Politechnika Krakowska, Kraków*

1. Wprowadzenie

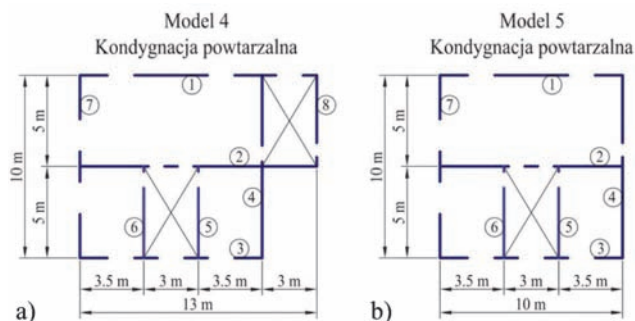
W Polsce, w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (LGOM) i Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW) najintensywniejsze wstrząsy górnicze charakteryzują się energią dochodzącą do $1E10$ J i intensywnością drgań powierzchni, które osiągają nawet $0,3$ g (g - przyspieszenie ziemskie). Podziemna eksploatacja górnicza jest prowadzona głównie pod obszarami zurbanizowanymi i silnie zaludnionymi, więc problem działających wstrząsów górniczych na zabudowę powierzchniową i ocena ryzyka są szczególnie ważne. Budynki murowe stanowią największą część zabudowy mieszkaniowej w wymienionych obszarach. Są to na ogół budynki jednorodzinne lub wielorodzinne (w mniejszym stopniu) od jednej do 5 kondygnacji. Remonty i przebudowy wymuszają konieczność zmian strukturalnych w budynkach. Zmiany te często powodują pojawienie się symetrii lub nawet bisymetrii układu ścian nośnych. Często jednak w układach konstrukcyjnych tych budynków pojawiają się zaburzenia układu konstrukcyjnego na skutek na przykład dobudowania dodatkowych, zewnętrznych klatek schodowych. W pracy w analizach dynamicznych stosuje się metodę spektrum odpowiedzi [11]. W tej metodzie wykorzystuje się: a) modele przyjętych budynków traktowanych jako reprezentacyjne dla rozważanej klasy obiektów, b) wzorcowe spektra odpowiedzi charakteryzujące przebiegi drgań powierzchniowych indukowanych wstrząsami górniczymi. Spektra te zostały także porównane z wzorcowym spektrum odpowiedzi z normy Eurocode 8 (EC 8). Porównanie to wskazało na różnice między drganiami powierzchniowymi typu górniczego i sejsmicznego (od trzęsień ziemi) [10, 11]. W analizach numerycznych uwzględniono równoczesne działanie dwóch wzajemnie prostopadłych wymuszeń kinematycznych (równoległych do osi poprzecznej i podłużnej modeli budynków) opisanych poprzez wzorcowe spektra odpowiedzi. Pionowa składowa została pominięta. Oceny wpływu usytuowania elementów nośnych w budynkach dokonano poprzez porównanie wyników analizy dynamicznej modeli. Podstawą tej oceny były wartości dodatkowych maksymalnych naprężeń głównych i maksymalnych naprężeń stycznych.

2. Analizowane budynki i ich charakterystyki konstrukcyjne

Wszystkie analizowane budynki to obiekty murowe o zróżnicowanej wysokości i konstrukcji. Budynki można uznać za reprezentatywne dla tej klasy obiektów mieszkalnej zabudowy jednorodzinnej. Wzniesiono je metodą tradycyjną z murów niezbrojonych. Stropy i klatki schodowe oraz biegi schodów są wykonane jako monolityczne, żelbetowe.

Trzy pierwsze to budynki o trzech kondygnacjach; rzuty ich kondygnacji powtarzalnej pokazano na rys. 1.a-c. Budynek z rys. 1.a charakteryzuje się symetrią układu ścian nośnych względem jednej osi, a budynek z rys. 2.a jest bisymetryczny. W budynku z rys. 1.c brak jest symetrii. Budynek z rys. 1.c różni się w stosunku do budynku z rys. 1.a zewnętrzną klatką schodową dobudowaną do jednej ze ścian zewnętrznych (szczytowej). Cechą charakterystyczną jest brak dylatacji pomiędzy zewnętrzną klatką schodową a ścianą szczytową.

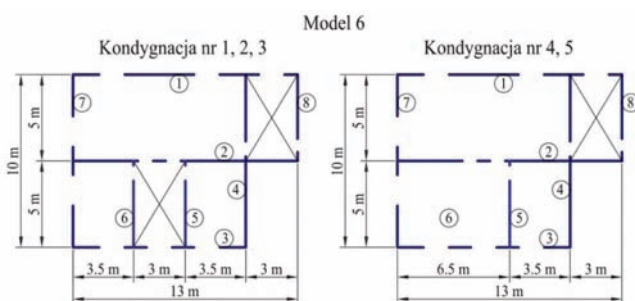
Budynki nr 4 i nr 5 (rys. 2) mają identyczne rozkłady ścian nośnych jak budynki odpowiednio nr 3 i nr 1 z rys. 1.c i rys. 1.a. Budynek nr 4 posiada dwie klatki schodowe, w tym jedną zewnętrzną, nieoddylatowaną od głównej bryły budynku (rys. 2a).



Rys. 2. Rzut kondygnacji budynków 5-kondygnacyjnych: nr 4 (a), nr 5 (b)

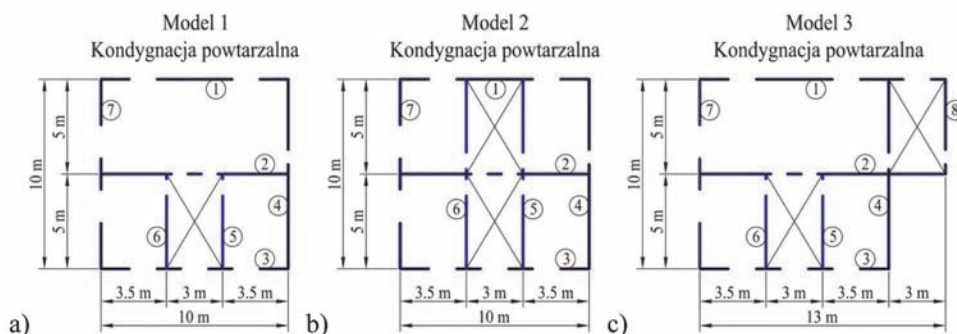
Fig. 2. Floor plan of 5-storey buildings: no. 4 (a), no. 5 (b)

Pięciokondygnacyjny budynek nr 6 ma trzy pierwsze kondygnacje identyczne jak budynek nr 4, pozostałe dwie kondygnacje są o innym układzie ścian konstrukcyjnych (rys. 3). Dostępność do 1, 2. i 3. kondygnacji budynku jest poprzez wewnętrzną klatkę schodową (rys. 3a), a do 4. i 5. kondygnacji tylko boczną, zewnętrzną klatką schodową usytuowaną przy ścianie szczytowej i nieoddylatowaną od głównej bryły budynku (rys. 3b).



Rys. 3. Rzut kondygnacji 5-kondygnacyjnego budynku nr 6

Fig. 3. Floor plan of the 5-storey building: no. 6



Rys. 1. Rzut kondygnacji budynków 3-kondygnacyjnych: nr 1 (a), nr 2 (b), nr 3 (c)

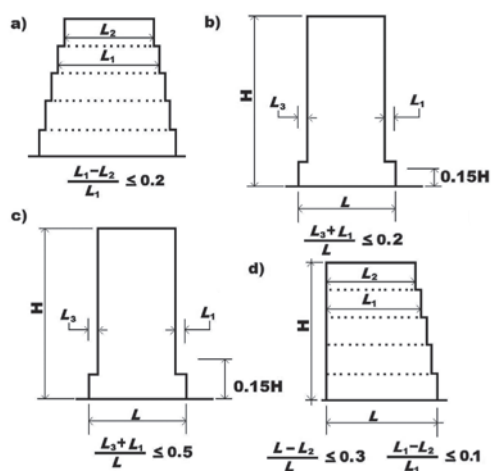
Fig. 1. Floor plan of 3-storey buildings: no. 1 (a), no. 2 (b), no. 3 (c)

3. Ocena regularności układu konstrukcyjnego analizowanych budynków

Wykorzystując informacje zawarte m.in. w [19], analizowane w pracy budynki można scharakteryzować jako obiekty w których:

- stosunek wysokości do szerokości (długości) jest bliski jedności, co zapobiega utracie stateczności obiektu i w konsekwencji jego wywróceniu,
- występują identyczne wysokości pięter,
- jest zbliżona nośność na obciążenia poziome w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach,
- występuje jednorodne ukształtowanie w planie i w pionie,
- występują obwodowe wieńce usztywniające i ściany nośne na obwodzie, co prowadzi do zmniejszenia efektów skręcania,
- brak jest elementów wspornikowych,
- brak jest stropów na różnych poziomach w ramach tej samej kondygnacji,
- statyczna niewyznaczalność układu konstrukcyjnego sprzyja odporności i możliwości przeniesienia obciążeń w przypadku wystąpienia uszkodzeń jednego lub grupy elementów konstrukcyjnych.

Występowanie wymienionych czynników w analizowanych budynkach świadczy, że tak skonstruowane budynki powinny przenosić dodatkowe obciążenia dynamiczne wywołane ruchem podłoża indukowanym, w obszarach objętych wpływami podziemnej eksploatacji górniczej. Analizowane w pracy budynki z rys. 1.a – c i rys. 2. charakteryzują się regularnością wzdłuż wysokości. Ich środek ciężkości i środek ścinania pozostają na linii pionowej. Budynki te spełniają warunki regularności podane w EC 8 (rys. 4).



Rys. 4. Kryteria regularności budynków [14]

Fig. 4. Criteria for the regularity of buildings [14]

W niektórych budynkach brak jest symetrii w planie, szczególnie dotyczy to budynków z bocznymi klatkami schodowymi, co może sprzyjać pojawieniu się dodatkowych efektów skręcania – por. rys. 1.c, 2.a, 3.

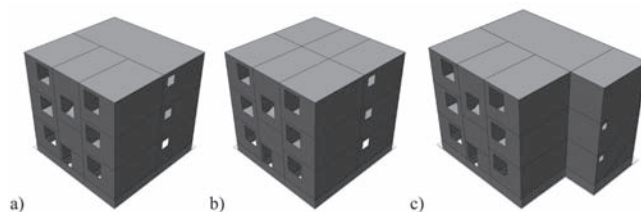
4. Modele analizowanych budynków i ich charakterystyki dynamiczne

W modelach budynków uwzględniono odmienne właściwości materiałów tworzących układ nośny, obciążenia wynikające z masy wypraw i elementów wykończeniowych, lekkiego ocieplenia stropodachu oraz część długotrwałą (40

%) obciążenia użytkowego zgodnie z normą [15]. Przyjęcie tylko długotrwałej części obciążenia wynika z faktu, że w trakcie użytkowania obiektu, obciążenie zmienne sporadycznie osiąga wartość maksymalną, co w połączeniu z wystąpieniem wstrząsu górniczego jest mało prawdopodobne. Ponadto obciążenie statyczne zgodne z kierunkiem przyspieszenia ziemskiego działa redukująco na rozciągania powodowane wstrząsem górniczym, co prowadzi do bezpieczniejszego oszacowania reakcji obiektu na obciążenia dynamiczne. Przy określeniu wartości modułu Younga muru na zaprawie cementowo-wapiennej posłużono się wynikami badań sieciowego modułu sprężystości muru podanymi w pracy [5] i normą [17]. Wartość współczynnika Poissona przyjęto na podstawie wyników badań zawartych w pracy [3]. Parametry pozostałych materiałów przyjęto na podstawie norm budowlanych [17, 18]. W analizowanych modelach przyjęto: stropy żelbetowe o charakterystyce materiałowej - moduł Younga $E = 29$ GPa, współczynnik Poissona $\nu = 0.2$, gęstość masy $\rho_m = 2500$ kg/m³, ściany murowe na zaprawie cementowej o charakterystyce materiałowej muru - moduł Younga $E = 2$ GPa, współczynnik Poissona $\nu = 0.25$, gęstość masy $\rho_m = 1800$ kg/m³.

W modelach analizowanych budynków uwzględniono istotne z punktu widzenia sztywności układu elementy, m.in. biegi schodów, otwory, nadproża. W rozważanych modelach budynków elementy murowe przyjęto jako jednorodne, traktując takie założenie jako wystarczająco dokładne z punktu widzenia dokładności obliczeń inżynierskich [10]. Elementów wykończeniowych nie modeluje się z wykorzystaniem MES z przyczyn praktycznych. Przyjęto sprężyste podparcie modeli budynków wynikające z posadowienia na podatnym gruncie. Wpływ podłoża gruntowego uwzględniono poprzez sprężyste zamocowanie modeli w podłożu, za pomocą elementów w postaci sprężyn przyłożonych w poziomie spodu fundamentu. Sztywność elementów brzegowych określono wg [16], jak dla podłoża III kategorii o średniej sztywności oraz prac [8, 9]. Dynamiczne współczynniki podłoża dla gruntów w stanie naturalnego zalegania wynoszą wówczas 50 MPa/m.

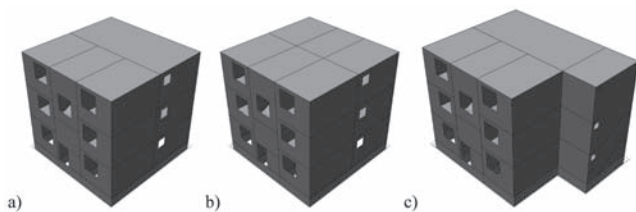
Przyjęte modele budynków 3-kondygnacyjnych z rys. 1.a – c pokazano na rys. 5a – c, a budynków 5-kondygnacyjnych z rys. 2. i 3. przedstawiono na rys. 6. Modele te będą przedmiotem dalszych analiz obliczeniowych.



Rys. 5. Przyjęte modele geometryczne budynków 3-kondygnacyjnych odpowiadające obiektom o rzutach poziomych z rys. 2.1.a – c

Fig. 5. Assumed geometric models of 3-storey buildings from fig. 2.1. a-c

W tabeli 1. przykładowo zestawiono po trzy pierwsze obliczone częstotliwości drgań własnych dla każdego z analizowanych modeli budynków murowych. Obliczone postacie drgań własnych są złożone, tak więc przy ustalaniu kolejności częstotliwości drgań własnych kierowano się dominującymi względnymi przemieszczeniami w danym kierunku.



Rys. 6. Przyjęte modele geometryczne budynków 5-kondygnacyjnych odpowiadające obiektom o rzutach poziomych z rys. 2.2.a, b i rys. 2.3.

Fig. 6. Assumed geometric models of 5-storey buildings from fig 2.1. a-c

Tabela 1. Obliczone wartości trzech pierwszych częstotliwości drgań własnych f_1 analizowanych modeli budynków murowych

Table 1. First three calculated natural frequencies of the analyzed models of masonry buildings

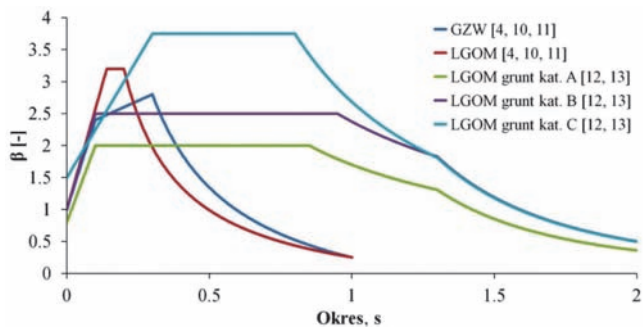
f_i , Hz	Model budynku nr					
	1	2	3	4	5	6
f_1	7,08	7,34	6,93	3,70	3,81	3,73
f_2	7,57	7,73	8,04	4,42	4,07	4,46
f_3	11,22	10,92	10,51	6,14	6,54	6,18

We wszystkich modelach, dwie pierwsze obliczone częstotliwości drgań własnych f_1 i f_2 odpowiadają drganiom poprzecznym, a częstotliwość f_3 drganiom skrętnym. W przypadku modeli budynków z dobudowaną do ściany szczytowej klatką schodową, bez względu na ich wysokość, wartość częstotliwości drgań własnych f_2 jest prawie 20% wyższa od wartości częstotliwości f_1 . Dowodzi to istotnego wpływu nieregularności położenia ścian nośnych w tych budynkach na sztywność i w konsekwencji na wartość podstawowej częstotliwości drgań własnych w kierunku poprzecznym. W przypadku pozostałych budynków wpływ tej nieregularności nie przekracza 7%.

5. Odpowiedź dynamiczna modeli analizowanych budynków murowych

Do dalszych obliczeń dynamicznych wykorzystano metodę spektrum odpowiedzi (RSA) opisaną szczegółowo w [10]. W metodzie tej wykorzystuje się model konstrukcji i odpowiedni program komputerowy, do którego należy zaimplementować wzorcowe, względne przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi. Spektra wzorcowe zawierają informacje o strukturze częstotliwościowej zarejestrowanych przebiegów powierzchniowych drgań wzbudzanych wstrząsami górniczymi, mogą być wykorzystywane w obliczeniach dynamicznych przy projektowaniu konstrukcji narażonych na działanie obciążeń kinematycznych.

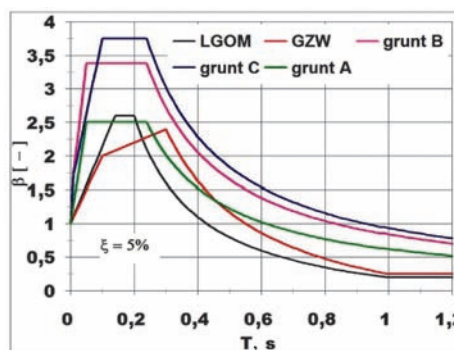
Na rys. 7. pokazano przebiegi krzywych spektralnych dla obszaru GZW i LGOM uzyskanych na podstawie analiz wielu przebiegów składowych poziomych przyspieszeń drgań. Z porównania krzywych wzorcowych uzyskanych na podstawie badań widać duże różnice. Stosowanie do analiz dynamicznych krzywych zaproponowanych w pracach [12, 13], a adaptowanych z EC 8, może prowadzić do błędnych rozwiązań z uwagi na bardzo szeroki zakres okresów drgań, w którym przyjmuje się stałą maksymalną wartość β . Krzywe te są wzorowane na EC 8, który to dokument odnosi się tylko do zjawisk naturalnych trzęsień ziemi.



Rys. 7. Przyjęte wymuszenia kinematyczne w postaci przyspieszeniowych spektrum odpowiedzi

Fig. 7. Assumed kinematic excitations as response spectra

Prace prowadzone od wielu lat w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej związane z budową spektrum wzorcowych dla obszarów górniczych wykazały różnice w kształcie krzywych spektralnych w różnych rejonach LGOM i GZW [1, 2, 4, 6, 7, 10]. W pracach tych wskazano na istotny wpływ podłoża gruntowego na kształt tych krzywych. W pracy [10] dokonano porównania krzywych wzorcowych z LGOM i GZW z krzywą z EC 8 typu 1. Z porównania tego wynika, że w przypadku poziomego odcinka krzywej z EC - 8 jest on opisany poprzez znacznie szersze pasmo okresów, obejmujące znacznie większe okresy niż w przypadku wstrząsów górniczych. Na rys. 8. przykładowo pokazano porównanie krzywych wzorcowych z obszaru LGOM i GZW uzyskanych z wcześniejszych badań i analiz [1, 4, 10] z krzywymi spektralnymi typu 2 dla różnych rodzajów gruntu wzorcowych z LGOM i GZW z krzywą z EC 8 typu 1. Z porównania tego wynika, że krzywe wzorcowe z EC 8 odpowiadające różnym typom podłoża istotnie różnią się w stosunku do krzywych wzorcowych uzyskanych dla obszarów GZW i LGOM i nieuzasadnione byłoby stosowanie tych krzywych w procesie projektowania konstrukcji na obciążenia dynamiczne pochodzenia górniczego. Trudno bowiem założyć, że w obszarze LGOM charakterystyka podłoża odpowiada podłożu skalistemu (grunt A) – dla tego typu podłoża krzywa spektralna z EC 8 jest najbliższa krzywemu wzorcowym z obszaru LGOM i GZW (rys. 8). Przeprowadzona podobna analiza porównawcza wzorcowych krzywych uzyskanych wg EC-8 z wzorcowymi krzywymi spektralnymi z różnych obszarów górniczych GZW (obszar KWK „Rydułtowy” i KWK „Anna”) wskazuje na istotne różnice i dowodzi o istotnym wpływie lokalnych warunków gruntowych na kształt wzorcowych krzywych spektralnych [11].



Rys. 8. Porównanie wzorcowych spektrum odpowiedzi dla obszarów GZW i LGOM ze spektrum wzorcowym typu 2 z EC 8 dla różnych warunków gruntowych

Fig. 8. Comparison of USCB and LGC response spectra with response spectra of type 2 from EC 8 for different types of soils

Różnice te występują zarówno dla krzywych spektralnych sporządzonych na podstawie poziomych, jak i pionowych składowych powierzchniowych drgań gruntu. Różnice te dotyczą szerokości poziomego odcinka spektrum („półki”) oraz wartości opisującej ten odcinek. W przypadku poziomego odcinka krzywej z EC 8 jest on opisany poprzez znacznie szersze pasmo okresów, obejmujące większe okresy niż w przypadku wstrząsów górniczych.

Obliczenia dynamiczne wykonano przyjmując: a) modele budynków pokazane w rozdziale 4, b) wartość przyspieszenia drgań gruntu $a_p = 1 \text{ m/s}^2$, c) działanie wymuszenia kinematycznego w postaci wzorcowego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przyłożonego w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach poziomych. Obliczenia przeprowadzono zgodnie z procedurą szczegółowo opisaną w pracy [11].

W tabeli 2. i w tabeli 3. przykładowo przedstawiono wyniki obliczeń dynamicznych w poszczególnych ścianach nośnych analizowanych modeli budynków pokazanych na rys. 1. b i 1. c, w zakresie maksymalnych dynamicznych naprężeń głównych σ_{max}^D , a w tabeli 4. i w tabeli 5. maksymalnych dynamicznych naprężeń stycznych τ_{max}^D , bez uwzględnienia wpływu ciężaru własnego i obciążenia użytkowego.

Z analizy przykładowych wyników obliczeń dotyczących obszaru LGOM, zestawionych w tabeli 2. i tabeli 3,

zauważyć można istotny wpływ rodzaju krzywej opisującej wzorcowe spektrum odpowiedzi uwzględnianej w obliczeniach dynamicznych. I tak w przypadku budynku z rys. 5b. (pełna symetria) i uwzględnieniu krzywej spektralnej podanej w pracach [4, 10, 11] uzyskuje się większe wartości tych naprężeń w poszczególnych ścianach konstrukcyjnych w stosunku do przypadku wykorzystania krzywych odpowiadających gruntowi kat. A, B i C [12, 13], odpowiednio o ok. 58, 27 i 22%. W przypadku budynku z nieregularnym układem ścian nośnych (rys. 5c), uzyskano również większe wartości tych naprężeń średnio o ok. 50, 20 i 19%. Praktycznie we wszystkich ścianach modeli budynków z rys. 5b i 5c obliczone maksymalne wartości dynamicznych naprężeń ścinających przy użyciu krzywych spektralnych z prac [4, 10, 11] są większe od obliczonych na podstawie krzywych z prac [12, 13] – por. tabele 4 i 5.

W obszarze LGOM i GZW w większości ścian budynku o bisymetrycznym układzie ścian uzyskuje się większe wartości obliczonych maksymalnych naprężeń głównych niż w budynku z nieregularnym rozkładem ścian nośnych. Nie można ustalić jednoznacznego trendu wskazującego wpływ nieregularnego układu ścian nośnych na maksymalne wartości naprężeń ścinających – por. tabele 4 i 5.

Tabela 2. Maksymalne dynamiczne naprężenia główne w ścianach nośnych modelu budynku z rys. 5 b, przy $a_p = 1 \text{ m/s}^2$
Table 2. Maximum dynamic principal stress in supporting walls for the building model from fig. 5. b, assuming that $a_p = 1 \text{ m/s}^2$

Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi	Maksymalne naprężenie główne σ_{max}^D [MPa] w ścianie						
	1	2	3	4	5	6	7
GZW [4, 10, 11]	0,26	0,42	0,57	0,37	0,33	0,42	0,14
LGOM [4, 10, 11]	0,33	0,54	0,72	0,47	0,42	0,53	0,18
LGOM grunt kat. A [12, 13]	0,21	0,34	0,46	0,30	0,27	0,34	0,11
LGOM grunt kat. B [12, 13]	0,26	0,43	0,57	0,37	0,33	0,42	0,14
LGOM grunt kat. C [12, 13]	0,26	0,43	0,58	0,38	0,34	0,42	0,14

Tabela 3. Maksymalne dynamiczne naprężenia główne w ścianach nośnych modelu budynku z rys. 5c, przy $a_p = 1 \text{ m/s}^2$
Table 3. Maximum dynamic principal stress in supporting walls for the building model from fig. 5c, assuming that $a_p = 1 \text{ m/s}^2$

Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi	Maksymalne naprężenie główne σ_{max}^D [MPa] w ścianie							
	1	2	3	4	5	6	7	8
GZW [4, 10, 11]	0,37	0,40	0,37	0,35	0,28	0,34	0,17	0,44
LGOM [4, 10, 11]	0,44	0,48	0,46	0,42	0,33	0,41	0,22	0,53
LGOM grunt kat. A [12, 13]	0,30	0,32	0,30	0,29	0,22	0,27	0,14	0,36
LGOM grunt kat. B [12, 13]	0,37	0,40	0,38	0,36	0,28	0,34	0,17	0,45
LGOM grunt kat. C [12, 13]	0,36	0,39	0,37	0,35	0,27	0,33	0,18	0,44

Tabela 4. Maksymalne dynamiczne naprężenia ścinające w ścianach nośnych modelu budynku z rys. 5b, przy $a_p = 1 \text{ m/s}^2$

Table 4. Maximum dynamic shear stress in supporting walls for the building model from fig. 5. b, assuming that $a_p = 1 \text{ m/s}^2$

Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi	Maksymalne naprężenie ścinające τ_{max}^D [MPa] w ścianie						
	1	2	3	4	5	6	7
GZW [4, 10, 11]	0,106	0,130	0,176	0,069	0,096	0,106	0,085
LGOM [4, 10, 11]	0,135	0,165	0,135	0,088	0,121	0,134	0,107
LGOM grunt kat. A [12, 13]	0,086	0,105	0,145	0,056	0,077	0,086	0,068
LGOM grunt kat. B [12, 13]	0,108	0,131	0,178	0,070	0,097	0,107	0,086
LGOM grunt kat. C [12, 13]	0,108	0,132	0,179	0,071	0,097	0,108	0,086

Tabela 5. Maksymalne dynamiczne naprężenia ścinające w ścianach nośnych modelu budynku z rys. 5c, przy $a_p = 1 \text{ m/s}^2$

Table 5. Maximum dynamic shear stress in supporting walls for the building model from fig. 5.c, assuming that $a_p = 1 \text{ m/s}^2$

Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi	Maksymalne naprężenie ścinające τ_{\max}^D [MPa] w ścianie							
	1	2	3	4	5	6	7	8
GZW [4, 10, 11]	0,115	0,118	0,132	0,086	0,107	0,077	0,081	0,083
LGOM [4, 10, 11]	0,139	0,143	0,160	0,106	0,131	0,094	0,103	0,100
LGOM grunt kat. A [12, 13]	0,094	0,096	0,108	0,070	0,087	0,063	0,066	0,067
LGOM grunt kat. B [12, 13]	0,118	0,121	0,135	0,088	0,109	0,079	0,082	0,084
LGOM grunt kat. C [12, 13]	0,115	0,117	0,132	0,086	0,107	0,077	0,084	0,082

6. Podsumowanie

W pracy wykonano wiele analiz dynamicznych budynków murowych o wysokości 3 i 5 kondygnacji. Budynki były zróżnicowane pod kątem układu ścian nośnych i wykazywały symetrię względem jednej lub dwóch osi. Analizowano także modele budynku o nieregularnym układzie ścian nośnych. Wykazano istotny wpływ nieregularnego układu ścian nośnych na sztywność układu, a co za tym idzie na wartości częstotliwości drgań własnych. W przypadku budynków z nieregularnościami, jak rozpatrywane w prezentowanej pracy, uzyskuje się do 20% większe wartości częstotliwości drgań własnych w stosunku do pozostałych modeli budynków. Wykazano istotny wpływ typu uwzględnianej krzywej wzorcowej na obliczane maksymalne wartości naprężeń dynamicznych bez względu na typ rozważanego układu nośnego budynku. W obu rozważanych obszarach górniczych, nie stwierdzono wpływu nieregularności rozkładu ścian nośnych na obliczane maksymalne wartości dynamicznych naprężeń głównych i stycznych.

Praca zrealizowana w ramach prac finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Nr L-4/124/2014/DS).

Literatura

1. Ciesielski R., Kowalski W., Maciąg E., Tatara T.: Spektra odpowiedzi od trzęsień ziemi i wstrząsów górniczych oraz ich zastosowanie, XLII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1996, s. 29-36.
2. Czerwionka L., Tatara T.: Wzorcowe spektra odpowiedzi z wybranych obszarów GZW, „Zasopismo Techniczne – seria Budownictwo”, 2007, z. 2-B, s. 11-18.
3. Drobiec Ł., Piekarczyk A., Kubica J.: Wpływ kształtu elementu badawczego oraz kierunku obciążenia na wartość współczynnika Poissona murów z cegły, XLVI Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB, Wrocław-Krynica 2000.
4. Kowalski W., Maciąg E., Tatara T.: Wpływ wstrząsów górniczych na budynki i ludzi w nich przebywających. W: Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych, Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice 1997, s. 583-628.
5. Kubica J., Drobiec Ł., Jasiński R.: Badania siecznego modułu sprężystości murów z cegły, XLV Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB, Wrocław – Krynica 1999.

6. Kuźniar K., Maciąg E., Tatara T.: Acceleration response spectra from mining tremors, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (a joint event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC), Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006, Paper Number:665
7. Kuźniar K., Maciąg E., Tatara T.: Prognozowanie spektrów odpowiedzi drgań fundamentów budynków od wstrząsów górniczych z zastosowaniem sieci neuronowych, Prace Naukowe GIG, „Górnictwo i Środowisko” 2010, nr 4/4, s. 50-64.
8. Lipiński J.: Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny, Arkady, Warszawa 1985.
9. Sawinow O.A.: Sowiemiennyje konstrukcii fundamentow pod maszyny i ich raseziot, Strojizdat, Moskwa 1964.
10. Tatara T.: Działanie drgań powierzchniowych wywołanych wstrząsami górniczymi na niską tradycyjną zabudowę mieszkalną, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria „Inżynieria Lądowa” 2002 nr 74.
11. Tatara T.: Odporność dynamiczna obiektów budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2012, s. 258.
12. Zembaty Z.: Adaptacja Eurokodu 8 do obliczeń budowli na wpływy wstrząsów górniczych, „Inżynieria i Budownictwo” 2011, nr 3, s. 161-164.
13. Zembaty Z.: Prędkościowa koncepcja oceny intensywności wstrząsów górniczych dla celów projektowania budowli narażonych na wstrząsy górnicze. W: Zagrożenia i technologie. Praca zbiorowa pod red. J. Kabiesz, Katowice 2012, s. 405-411.

Normy i inne materiały

14. Eurocode 8: Earthquake resistant design of structures – draft No 6 January 2003, Ref. No: prEN 1998-1:200X.
15. PN-85/B-02170, Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
16. PN-80/B-03040. Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny.
17. PN-B-03002:1999. Konstrukcje murowe niezbrojone – projektowanie i obliczanie.
18. PN-B-03264:2002. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
19. Wytyczne do projektowania obiektów kubaturowych na terenie Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego na wpływy dynamiczne od wstrząsów górniczych, Materiały Seminarium pt. Wytyczne do projektowania obiektów kubaturowych na terenie Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego na wpływy dynamiczne od wstrząsów górniczych, KGHM Polska Miedz S.A. i KGHM CUPRUM sp. z o.o. – CBR, Lubin, 8 marca 2013.