

BADANIA I STUDIA – RESEARCH AND STUDIES

Andrzej Cholewicki*

Jarosław Szulc**

Tomasz Nagórski***

EWOLUCJA METOD WYZNACZANIA ODDZIAŁYWAŃ WSTRZĄSÓW GÓRNICZYCH NA TERENIE LGOM

Eksploracja rud miedzi na terenie Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego stwarza możliwość pojawienia się wstrząsów górniczych o charakterystykach zbliżonych już do słabych trzęsień ziemi i intensywnościach wykraczających poza wartości dotychczas prognozowane. Obserwacje skutków takich zjawisk nie w pełni potwierdzają merytoryczną zasadność stosowania metod obliczeń konstrukcji na podstawie tzw. spektrów odpowiedzi. Aktualne tendencje skłaniają do częściowego zastosowania zaleceń normy EC8. W artykule przeprowadzono krytyczną polemikę z tzw. koncepcją prędkościową przy szacowaniu wartości przyspieszenia projektowego. Pojawiające się wątpliwości uzasadniono na podstawie wyników analiz numerycznych prowadzonych obiektywnymi metodami dynamicznymi (krok po kroku) i z wykorzystaniem różnych spektrów odpowiedzi budowli.

1. Wstrząs górniczy jako obciążenie budynku

Technologia wydobywania rud miedzi na terenie LGOM (np. filarowo-komorowy sposób eksploatacji) stanowi okoliczność sprzyjającą kumulacji energii, która wyzwała się w postaci wstrząsów (o energiach nawet $E = 2,5 \cdot 10^{10}$ J), podczas pęknięcia zalegających nad złożem skał wapienno-dolomitowych i anhydrytów.

Typowym przykładem takiego zjawiska jest na przykład silny energetycznie wstrząs górniczy (z dnia 1 XI 1993 r.), w którego zapisie można wyróżnić stosunkowo krótką fazę amplitudalną (w porównaniu z wielosekundowymi wstrząsami sejsmicznymi) oraz amplitudę przyspieszenia PGA (*Peak Ground Acceleration*) równą 285 mm/s^2 . Destrukcyj-

* prof. dr hab. inż. – kierownik Zespołu Obserwacji i Analiz Budowli ITB

** dr inż. – adiunkt w Zespole jw.

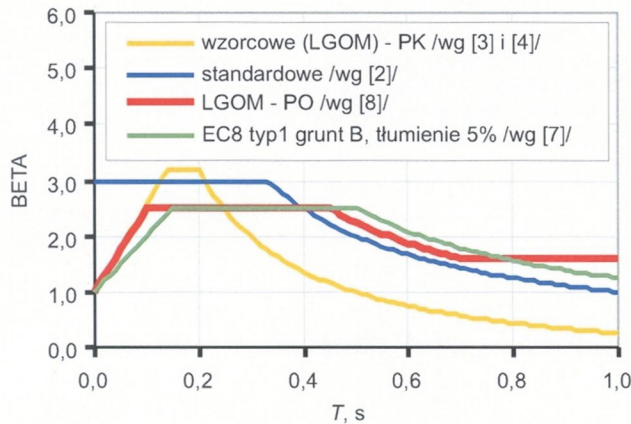
*** inż. – student Politechniki Warszawskiej

ny charakter tego wstrząsu ujawnił się w postaci drobnych zarysowań elementów niekonstrukcyjnych (np. wypraw tynkarskich), spowodował również poważne zniszczenia mebli i wyposażenia mieszkań.

Obserwowane efekty aktywności parasejsmicznej w LGOM wskazują, że wstrząs górniczy może i powinien być traktowany jako obciążenie poziome siłami bezwładności generowanymi przez ciężar budynku. Stwierdzenie tego faktu implikuje problem wiarygodnego, ilościowego określenia zastępczego obciążenia poziomego budowli – przewidywane zachowanie konstrukcji określone na podstawie sankcjonowanych metod obliczeniowych pozostaje często w rozbieżności z obserwowanymi w rzeczywistości skutkami wstrząsów.

Stan wiedzy w zakresie metodyki projektowania budowli na terenach eksploatacji górniczej omówiono m.in. w instrukcjach [1–5] oraz w monografii [6], która jest dorobkiem grantu badawczego wykonanego przez zespół pod kierunkiem prof. Jerzego Kwiatka z Głównego Instytutu Górnictwa.

W wymienionych publikacjach przyjęto zgodnie sposób wyznaczania poziomych sił bezwładności oparty na tzw. względnym spektrum odpowiedzi – przebiegi wykresów tzw. współczynnika dynamiczności β zostały jednak opracowane na podstawie różnych zbiorów zarejestrowanych zjawisk i przy dominacji w tych zbiorach wstrząsów nisko- lub wysokoczęstotliwościowych (rys. 1).



Rys. 1. Zestawienie spektrów projektowych stosowanych na terenie LGOM w porównaniu ze spektrum EC8 dla terenów sejsmicznych

Fig 1. Design spectra applied in LGOM as compared to EC8 spectrum in seismic regions

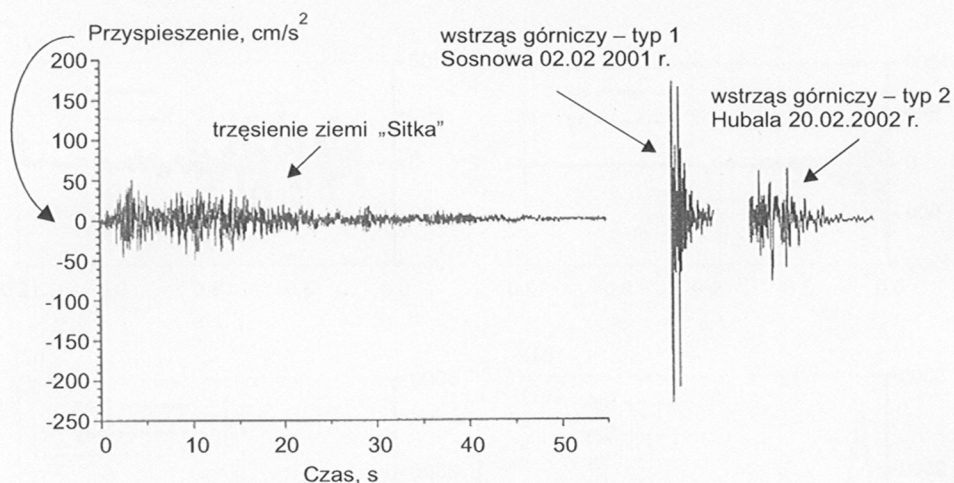
Prowadzone w ostatnich latach (zespół prof. Zbigniewa Zembatego z Politechniki Opolskiej) prace badawcze (np. [8]) pozwoliły na powstanie odmiennej koncepcji ujęcia wstrząsów górniczych w LGOM jako obciążenia budynku, zgodnie z którą dostrzega się zróżnicowanie charakteru występujących zjawisk, co przykładowo ilustruje rysunek 2.

W szczególności stwierdzono, że wstrząsy rejestrowane na terenie LGOM można w pewnym uproszczeniu podzielić na:

- typ 1: stosunkowo często występujące, krótkie (1+2 s) wysokoczęstotliwościowe wstrząsy o dominujących częstotliwościach powyżej 10+15 Hz i o dużych przyspiesze-

niach (często powyżej 1000 mm/s^2), ale małych prędkościach (poniżej 30 mm/s) – rys. 3,

- typ 2: rzadziej występujące, dłuższe (do 5 s), niskoczęstotliwościowe (poniżej 5 Hz), o umiarkowanych (700 mm/s^2) lub dużych przyspieszeniach (powyżej 1000 mm/s^2) i zdecydowanie większych prędkościach (powyżej 30 mm/s) – rys. 3.



Rys. 2. Porównanie zapisów trzech wstrząsów sprowadzonych do jednakowej prędkości
Fig 2. Comparison of ground accelerograms erected to identical velocity

Wstrząsy typu 1, porównywalne w swych efektach z silnymi wybuchami przemysłowymi, budzą najwięcej kontrowersji ze względu na to, że spodziewana dynamiczna odpowiedź budowli uzyskana na drodze obliczeń teoretycznych (zastosowanie klasycznego podejścia sejsmicznego) jest znacznie zawyżona w stosunku do rzeczywistych skutków oddziaływania tych wstrząsów; okazują się one bowiem praktycznie nieszkodliwe dla budowli (poza drobnymi uszkodzeniami o charakterze niekonstrukcyjnym).

Zapisy wstrząsów typu 2 mogą być natomiast porównywalne z zapisami krótkich i słabych trzęsień ziemi – dla nich też uzasadniona staje się metodyka obliczeń oparta na zasadach inżynierii sejsmicznej. [7].

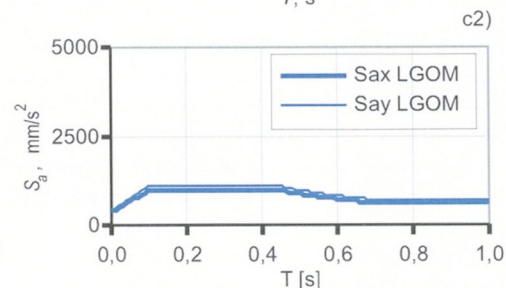
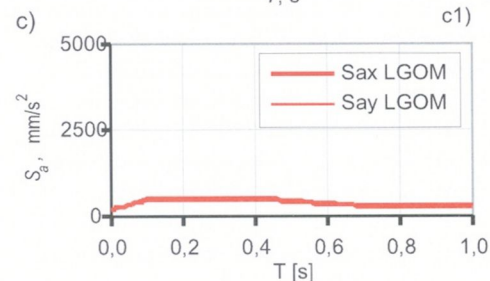
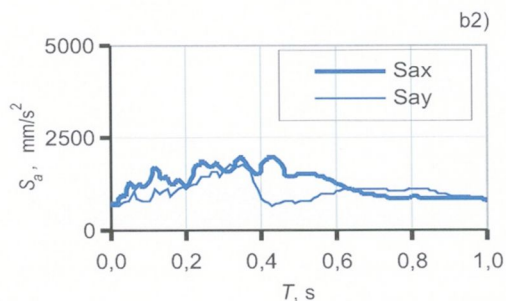
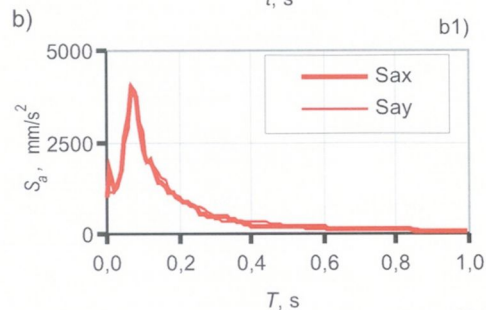
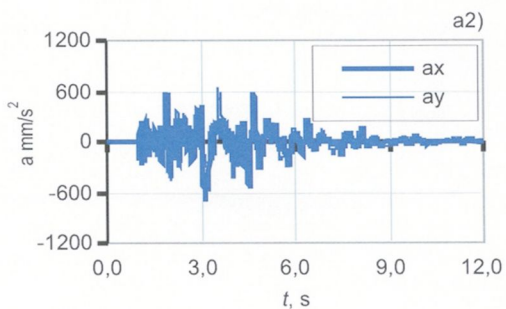
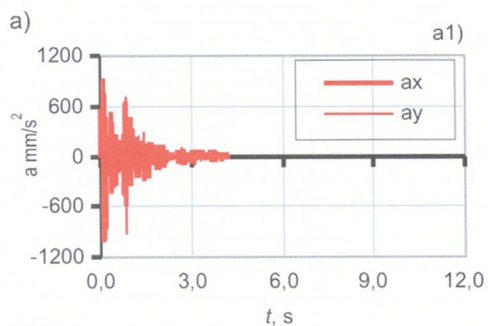
Wykresy na rysunku 3b pokazują, że interpretacja intensywności wstrząsów górniczych według klasycznej metodyki (tj. na podstawie akcelerogramu zjawiska) prowadzi do zasadniczych różnic wartości S_a pomimo zbliżonych wartości PGA (większe wartości S_a w przypadku budowli o $T < 0,2 \text{ s}$ i wstrząsach typu 1 oraz mniejsze wartości S_a przy $T > 0,2 \text{ s}$ i wstrząsach typu 2). Odpowiedź dynamiczna w przypadku wstrząsów niskoczęstotliwościowych jest znacznie bardziej wyrównana w całym zakresie realnych wartości T ; jednocześnie jest to odpowiedź wielokrotnie silniejsza w zakresie $T > 0,2 \text{ s}$. Powyższe uwagi stawiają pod znakiem zapytania wiarygodność i zasadność stosowania w LGOM klasycznej metodyki inżynierii sejsmicznej, sankcjonowanej przez dokument europejski EC8 [7] (funkcjonujący w Polsce, jakkolwiek bez załącznika krajowego i tylko w wersji oryginalnej, jako tzw. norma uznaniowa PKN).

Wstrząs typu 1
dnia 02.02.2001 r.
Polkowice, ul. Sosnowa

Wstrząs typu 2
dnia 20.02.2002 r.
Polkowice, ul. Hubala

$PGA_x = 1024 \text{ mm/s}^2$ $PGV_x = 22 \text{ mm/s}$
 $PGA_y = 1014 \text{ mm/s}^2$ $PGV_y = 25 \text{ mm/s}$

$PGA_x = 658 \text{ mm/s}^2$ $PGV_x = 46 \text{ mm/s}$
 $PGA_y = 698 \text{ mm/s}^2$ $PGV_y = 52 \text{ mm/s}$



Rys. 3. Wymuszenia kinematyczne zastosowane w analizach numerycznych: a) rzeczywisty akcelerogram wstrząsu, b) spektrum odpowiedzi sporządzone z akcelerogramu, c) spektrum projektowe według „kryterium prędkościowego” PO

Fig. 3. Paraseismic action used in numerical analyses: a) real ground accelerogram, b) response spectrum, c) design spectrum by „velocity criterion”

Bazując na własnych analizach, prof. Zembaty stworzył autorskie (rys. 3), przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi (o przebiegu niemal identycznym z zaleconym w dokumencie EC8), opierające się na nader kontrowersyjnej tzw. koncepcji prędkościowej, w myśl

której przyspieszenie projektowe jest proporcjonalne (mnożnik 8,29) do wartości prędkości prognozowanej utożsamianej z wartością pikową PGV (Peak Ground Velocity) w obserwowanych lub możliwych wstrząsach górniczych. Praktyczne zastosowanie wspomnianej metodyki pokazuje, że wstrząsy o mniejszych wartościach PGA (rys. 3b – typ 2) mogą powodować silniejsze (równomierne w zakresie $T > 0,1$ s) odpowiedzi dynamiczne budowli.

2. Prognozy sejsmiczne i skutki ich przekroczenia

Metodyka opracowania prognoz intensywności przewidywanych wstrząsów górniczych stosowana w minionych latach przez CUPRUM (opisana m.in. w monografii [6]) zakłada, że wartości prognozowanego przyspieszenia drgań podłoża nie przekroczą amplitudalnej wartości przyspieszenia zmierzonej już podczas rzeczywistych wstrząsów górniczych.

Znaczące rozbieżności pomiędzy wymienionymi wartościami, jakkolwiek ogólnie zrozumiałe i akceptowalne, wymagają niezbędnej oceny skutków wstrząsu poprzez obiektywne analizy wytrzymałościowe (tzw. metody „krok po kroku”).

W praktyce inżynierskiej obliczeniowej analizie diagnostycznej zastępuje się czasem przez sięgnięcie do skal przybliżonych, na przykład SWD [9] lub obecnie GSI (tzw. górnicze skale intensywności [12]).

Analiza wstrząsu górniczego, który wystąpił w Polkowicach w dniu 20 lutego 2002 r. (rys. 3), wykazała jego maksymalną intensywność w skalach MM (*Modified Mercalli* – 12-stopniowa skala oceny intensywności wstrząsów sejsmicznych na podstawie uszkodzeń obiektów) i EMS-98 (*European Macroseismic Scale* – najnowsza wersja skali MSK, tj. opisowej skali oceny skutków trzęsień ziemi), oszacowaną na VI+ (ponad sześć) do VII, przy czym wykorzystano do tego celu opisy skutków wspomnianego wstrząsu na powierzchni i porównawczo maksymalne prędkości. Wstrząs ten okazał się więc znacznie silniejszy od zakładanego poziomu prognozowanego, ponadto jego charakter zbliżał go do grupy wstrząsów podobnych do słabych sejsmicznych. Poprzestanie w ocenie jego skutków tylko na formalnej ocenie za pomocą skali GSI byłoby posunięciem niezadowolającym, podjęto zatem bardzo szczegółowe analizy – metodami dynamiki i statyki budowli.

W wyniku przeprowadzonych wizji lokalnych (po wstrząsie 20 II 2002) stwierdzono następujące uszkodzenia:

- zarysowania i spękania warstw wykończeniowych na elewacjach,
- częściowe uszkodzenia tynku i zarysowania na stykach między blokami ściennymi i drzewiowymi w klatkach schodowych,
- zarysowanie i częściowe zniszczenie tynku w miejscu oparcia biegu schodowego na płycie podestowej,
- odspojenie ścian działowych od słupów żelbetowych w poziomie kondygnacji parteru.

Działania interwencyjne zostały podjęte natychmiast i po upływie kilku miesięcy od zaistniałego zjawiska w uszkodzonych budynkach wykonano szereg prac wzmacniających, między innymi wprowadzono dodatkowe połączenia dyblowe w połączeniach

bloków ściennych i zabezpieczono połączenie elementów biegów schodowych z płytami podestowymi przed możliwością rozwinięcia się tzw. katastrofy lawinowej.

Po silnym wstrząsie w dniu 21 maja 2006 r. i dokonanym szczegółowym przeglądzie wszystkich budynków w Polkowicach nie stwierdzono nowych uszkodzeń we wzmocnionych budynkach.

Skutki obu wymienionych wstrząsów górniczych (z 20 II 2002 r. i 21 V 2006 r.) o parametrach przekraczających wartości prognozowane wykorzystano jako cenny zbiór informacji o charakterze *in situ* o zachowaniu się budynków w sytuacjach wyjątkowych.

3. Wstrząsy sejsmiczne w Polsce a wstrząsy górnicze

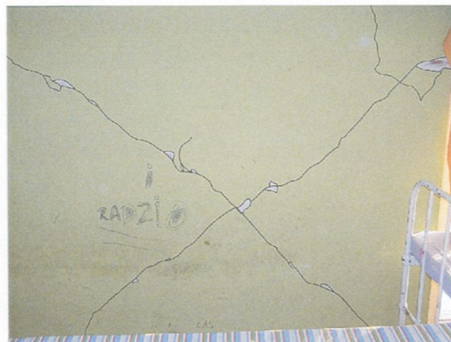
W roku 2004 zarejestrowano w Polsce dwa wstrząsy sejsmiczne: pierwszy w obszarze północno-wschodnim, przyległym do Obwodu Kaliningradzkiego (epicentrum znajdowało się w obszarze Bałtyku), drugi w Polsce południowej (epicentrum było położone w okolicach Czarnego Dunajca).

Oba zjawiska sklasyfikowano jako słabe i charakteryzujące się niskimi intensywnościami PGA. Jednak z racji swej typowo sejsmicznej natury spowodowały one poważne uszkodzenia w budynkach, wśród których jako bardzo charakterystyczny przykład można podać krzyżujące się rysy ukośne (rys. 4) w filarku budynku murowanego na Podhalu [10] (jak zaobserwowano, na terenie LGOM tego rodzaju uszkodzeń nie spowodowały wstrząsy górnicze o znacznie wyższych wartościach PGA).

a)



b)



Rys. 4. Skutki wstrząsu sejsmicznego na Podhalu w 2004 r.: a) Ciche-Miętustwo, dom parafialny, widok ogólny, b) tzw. krzyż św. Andrzeja (widok od wewnątrz)

Fig 4. Consequences of earthquake on Podhale in 2004: a) Ciche Miętustwo, Parich House, general view, b) so called Cross of St. Andrew (view from the inside)

4. Znaczenie dokumentu europejskiego EC8

Przydatność normy europejskiej EC8 [7] w problematyce wpływu wstrząsów górniczych w LGOM podnoszona jest bardzo często przy różnych okazjach. Problematykę tę

dokładnie naświetlił prof. Edward Maciąg podczas konferencji „Wpływy sejsmiczne i para-sejsmiczne na budowle” w Krakowie w 2003 r. [11].

Odnośnie do przydatności tego dokumentu, tj. EC8, można zaryzykować stwierdzenie, iż nie pomoże on bezpośrednio w rozwiązywaniu polskich zadań związanych z ochroną obiektów budowlanych w LGOM przed wstrząsami górnictwymi. Niektóre jego regulacje mogą być pośrednio potraktowane jako materiał porównawczy przy formułowaniu zasad projektowania budynków podlegających oddziaływaniu wstrząsów górnictwowych w zakresie na przykład wyznaczania zastępczych obciążeń od wstrząsów.

W żadnym wypadku nie należy ulegać fascynacji zasadami redukcji obciążeń ze względu na tzw. ciągły model przemieszczeń konstrukcji w stanie granicznym nośności. Autorzy w pełni popierają w tym względzie stanowisko prof. Maciąga zaprezentowane w pracy [11]: *...EC8 wymaga, by konstrukcja była tak zaprojektowana, aby miała wystarczającą ciągłość dla zapewnienia właściwej dysypacji energii. Zdolność do przeniesienia sejsmicznych oddziaływań w zakresie pozasprężystym sprawdza się poprzez współczynnik zachowania się konstrukcji q (behaviour factor). Powyższe wymaganie nie może dotyczyć obiektów na obszarze wstrząsów górnictwowych takich jak LGOM. Silne wstrząsy górnictwowe występują tam zbyt często.*

Zaprezentowana w dokumencie EC8 wiedza dotycząca modelu obliczeniowego niskiego budynku murowanego jest w opinii autorów niezadowolająca w stosunku do rangi zagadnienia. Nakładające się wzajemnie formy odkształceń giętych i postaciowych powinny być sygnalizowane w ujęciach wymiernych tej normy. Ponadto stwierdzić można u autorów dokumentu [7] brak jednoznacznych ustaleń na temat konieczności zbrojenia o kierunku pionowym w ścianach. Ocenia się, że jest to środek konstrukcyjny nie wymagający ponoszenia dużych kosztów, a jednocześnie przyczyniający się efektywnie do stabilizacji cech konstrukcji po jakimkolwiek jej zarysowaniu.

5. Warunki zwalniające wpływ wstrząsów górnictwowych

W dwóch rodzajach dokumentów, tj. w normie [9] oraz w instrukcjach GIG [5] i ITB [2] sformułowane są warunki zwalniające od uwzględnienia wpływu wstrząsów górnictwowych – od wartości przyspieszenia podłoża $a_p = 50 \text{ mm/s}^2$, do wartości $200+250 \text{ mm/s}^2$. Zgodnie z zakresami wspomnianych wyżej dokumentów dotyczą one oceny istniejącej zabudowy i projektowania nowych obiektów budowlanych.

W Polsce po katastrofie wysokiego budynku wielopłytkowego w 1979 r. opracowano w COBPBO zalecenia doraźne nakazujące projektowanie każdego budynku w Polkowicach z uwzględnieniem zastępczych obciążeń poziomych równych wypadkowej 4% jego ciężaru.

W dokumencie europejskim EC8 [7], podstawowym, jeśli chodzi o tematykę inżynierii sejsmicznej, określono możliwość pominięcia obciążeń generowanych przez wstrząsy sejsmiczne na poziomie $a = 400 \text{ mm/s}^2$ (w przybliżeniu odpowiadające obciążeniom poziomym równym 4% ciężaru budynku).

Stwierdzić więc można, że postanowienia dokumentów polskich:

- wychodzą naprzeciw przepisom europejskim dotyczącym budownictwa na terenach tzw. umiarkowanej (niskiej) sejsmiczności,

- antycypują (przyjętą również w regulacjach europejskich) zasadę o wyraźnie bardziej tolerancyjnym dopuszczaniu przekroczeń obciążeń od wstrząsów sejsmicznych niż tego rodzaju przekroczeń od obciążenia wiatrem.

Zważywszy, że w istniejącej zabudowie kubaturowej na terenie LGOM nigdy nie stosowano rozwiązań prowadzących do tzw. jawnej lub ukrytej ciągłości konstrukcji oraz sporządzano spektra odpowiedzi według zasady wygładzania w dół – zasadne staje się mniej liberalne stanowisko autorów postanowień krajowych.

6. Analizy numeryczne

Przeprowadzone w szerokim zakresie analizy numeryczne miały na celu porównanie najbardziej obiektywnej oceny stopnia wzbudzenia konstrukcji przez wstrząs, tj. odpowiedzi dynamicznej dla różnych typologicznie budowli (o podstawowych okresach drgań własnych w przedziale $T_1 = 0,19 \pm 0,98$ s), z obliczeniami metodą spektrum odpowiedzi opierającej się na obecnie obowiązującym spektrum projektowym LGOM i koncepcji prędkościowej wyznaczania przyspieszenia projektowego. Ze względu na to, że metoda spektrum odpowiedzi stosowana jest w praktyce przez inżynierów dużo częściej niż analiza dynamiczna, porównano ze sobą również wyniki analiz dynamicznych z wynikami na podstawie spektrów wybranych wstrząsów wysoko- (typ 1 – rys. 3) i niskoczęstotliwościowych (typ 2 – rys. 3).

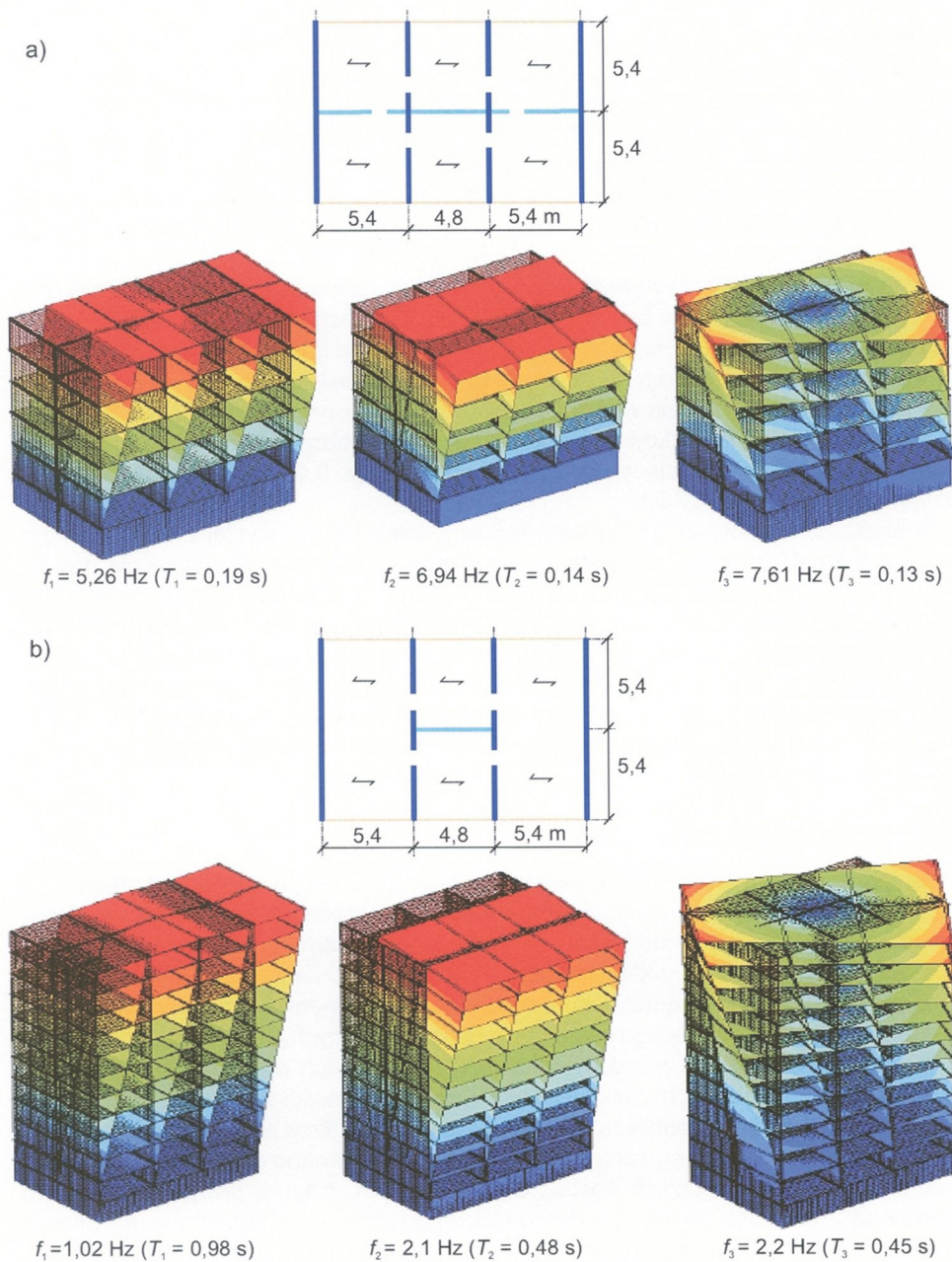
W artykule przedstawiono wyniki analiz dotyczących dwóch budynków o najmocniej zróżnicowanych parametrach sztywnościowych oraz zasadniczo odmiennych charakterystykach dynamicznych.

6.1. Założenia i modele numeryczne

W analizach dynamicznych typowe przebiegi wstrząsów wysoko- i niskoczęstotliwościowych oraz spektralnych (przedstawione na rys. 3) były traktowane jako wymuszenie kinematyczne. Regulowaną postanowieniami EC8 przestrzenność zjawiska zrealizowano w analizach numerycznych, przykładając jednocześnie do modelu ortogonalne składowe akcelerogramów wstrząsów oraz analizując w metodach spektralnych superpozycje efektów oddziaływań zastępczych obciążeń poziomych od sił bezwładności przyłożonych na kierunku podłużnym i poprzecznym według alternatywnych kombinacji normowych [7].

Modele numeryczne budynków (rys. 5) uwzględniały specyfikę budownictwa systemowego, stanowiącego znaczący udział w zabudowie kubaturowej miasta Polkowice: w szczególności w sporządzonych modelach 3D wprowadzono typowe modułowe rozpiętości przęseł, zróżnicowany stopień ciągłości oraz perforacji ścian podłużnych i poprzecznych, dodatkowy udział ścian osłonowych w globalnej sztywności ustroju konstrukcyjnego, podatność połączeń elementów ściennych i stropowych oraz rzeczywiste rozkłady obciążeń powierzchniowych ze stropów na ściany nośne i usztywniające.

Obliczenia przeprowadzono w Interdyscyplinarnym Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego (ICM) Uniwersytetu Warszawskiego w ramach grantu obliczeniowego nr G31-19, za pomocą systemu komputerowego ABAQUS 6.6.1, wykorzystującego w swoich algorytmach metodę elementów skończonych w sformułowaniu przemieszczeniowym.



Rys. 5. Rzuty poziome budynków oraz wyniki analiz modalnych (trzy pierwsze globalne postacie drgań własnych): a) budynek 5-kondygnacyjny, b) budynek 11-kondygnacyjny
 Fig. 5. Horizontal views of buildings and results of modal analyses (free global modes of free vibrations: a) 5-storey building, b) 11-storey building

Identyfikację dynamiczną budynków przeprowadzono za pomocą wstępnych analiz modalnych, umożliwiających wyznaczenie kilku globalnych postaci drgań własnych (rys. 5). W przypadku budynku 5-kondygnacyjnego analizę metodą spektrum odpowiedzi prowadzono wykorzystując dwie globalne postacie drgań, natomiast w przypadku budynku 11-kondygnacyjnego – trzy globalne postacie. W celu otrzymania odpowiedzi wypadkowej wykorzystano kombinację w postaci pierwiastka z sumy kwadratów odpowiadających poszczególnym postaciom drgań własnych (tzw. metoda SRSS – *the Square Root of the Sum of Squares*).

Czas trwania analizowanych wstrząsów przyjętych do obliczeń wynosił 2,45 s oraz 6,05 s odpowiednio dla wstrząsów typu 1 i 2. W obu przypadkach czas był nieco dłuższy niż wynika to z porównania intensywności według wzoru Ariasa (miary intensywności oszacowanej na podstawie akcelerogramu, tj. wartości całki po czasie z kwadratu przyspieszeń).

Analizy dynamiczne przeprowadzono, wykorzystując algorytm Newmarka opierający się na niejawnym (*implicit*) całkowaniu równań ruchu. Do obliczeń w przypadku wstrząsu typu 1 przyjęto dyskretyzację w postaci kroku czasowego 0,002 s, dla wstrząsu typu 2 przyjęto krok czasowy 0,005 s.

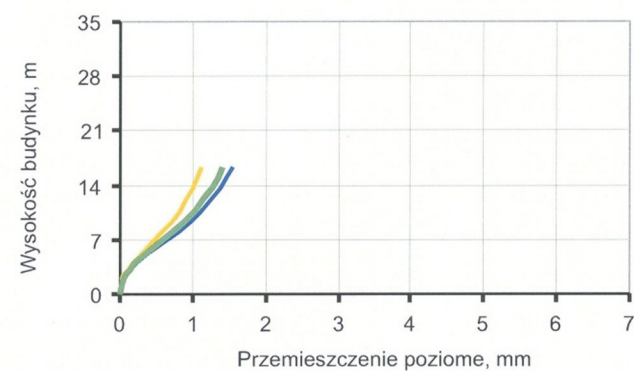
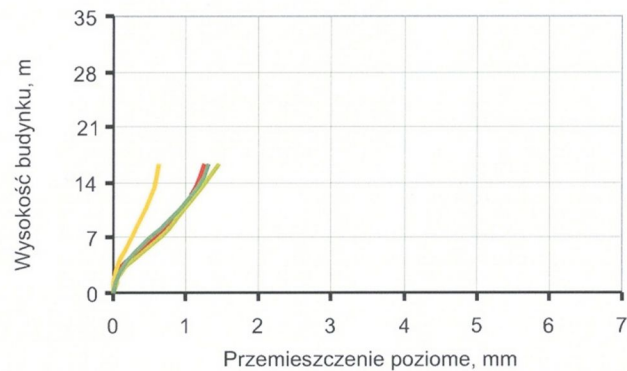
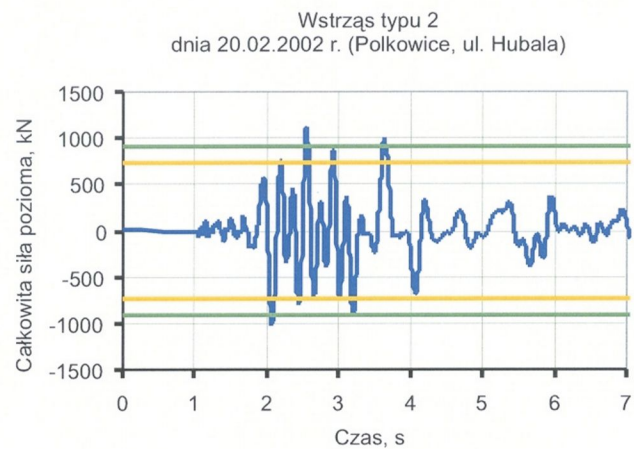
W analizach numerycznych nie uwzględniono interakcji sprężystej z podłożem, zakładając warunki brzegowe w postaci utwierdzenia w poziomie posadowienia (fundamentów). Obliczenia dynamiczne poprzedzono trwającą 1 s analizą statyczną, podczas której przyłożono do konstrukcji przyspieszenie grawitacyjne – wyniki analizy dynamicznej zawierają więc składową pochodzącą od ciężaru własnego. W analizach uwzględniono ponadto tłumienie materiałowe jako 5-procentową wartość tłumienia krytycznego, odpowiadające pierwszej częstotliwości drgań własnych. Wartość ta odpowiada tłumieniu zachodzącemu w elementach betonowych i żelbetowych podlegających niewielkiemu zarysowaniu.

6.2. Podsumowanie wyników analiz

Na rysunkach 6 i 7 zestawiono wyniki całkowitych sił poziomych (tzw. *base shear*) oraz przemieszczeń poziomych (na wysokości budynków) otrzymane z analiz dynamicznych i na podstawie spektrów odpowiedzi wyznaczonych z rzeczywistych przebiegów drgań podłoża oraz według procedury koncepcji prędkościowej prof. Zembatego. Prezentowane na wykresach wielkości charakteryzują strukturalne zachowanie budynków podczas ich zginania i ścinania powstającego od oddziaływań generowanych przez wstrząsy górnicze.

Wartości sił poziomych przedstawiono (rys. 6 i 7) na ich przebiegach czasowych (wyniki analiz dynamicznych), wskazując jednocześnie wartości sił poziomych uzyskane z analiz spektralnych. Przemieszczenia poziome (metoda „krok po kroku”) odpowiadają wynikom z punktu czasowego przebiegu, dla którego otrzymano maksymalne wartości.

Analizując wpływ wyższych postaci drgań własnych, tylko w przypadku budynku sztywnego i wstrząsu wysokoczęstotliwościowego (typu 1) dostrzeżono możliwość błędnej oceny wartości sił poziomych wynikającą z uzyskania przeciwnych relacji porównania wartości *base shear* według metody spektralnej (wymuszenie rzeczywiste) w odniesieniu do wyników analizy dynamicznej. W innych analizowanych przypadkach wpływ wyższych postaci drgań jest pomijalny i nie stwarza zagrożenia przeszacowania sił wewnętrznych i odkształceń w ustrojach konstrukcyjnych.

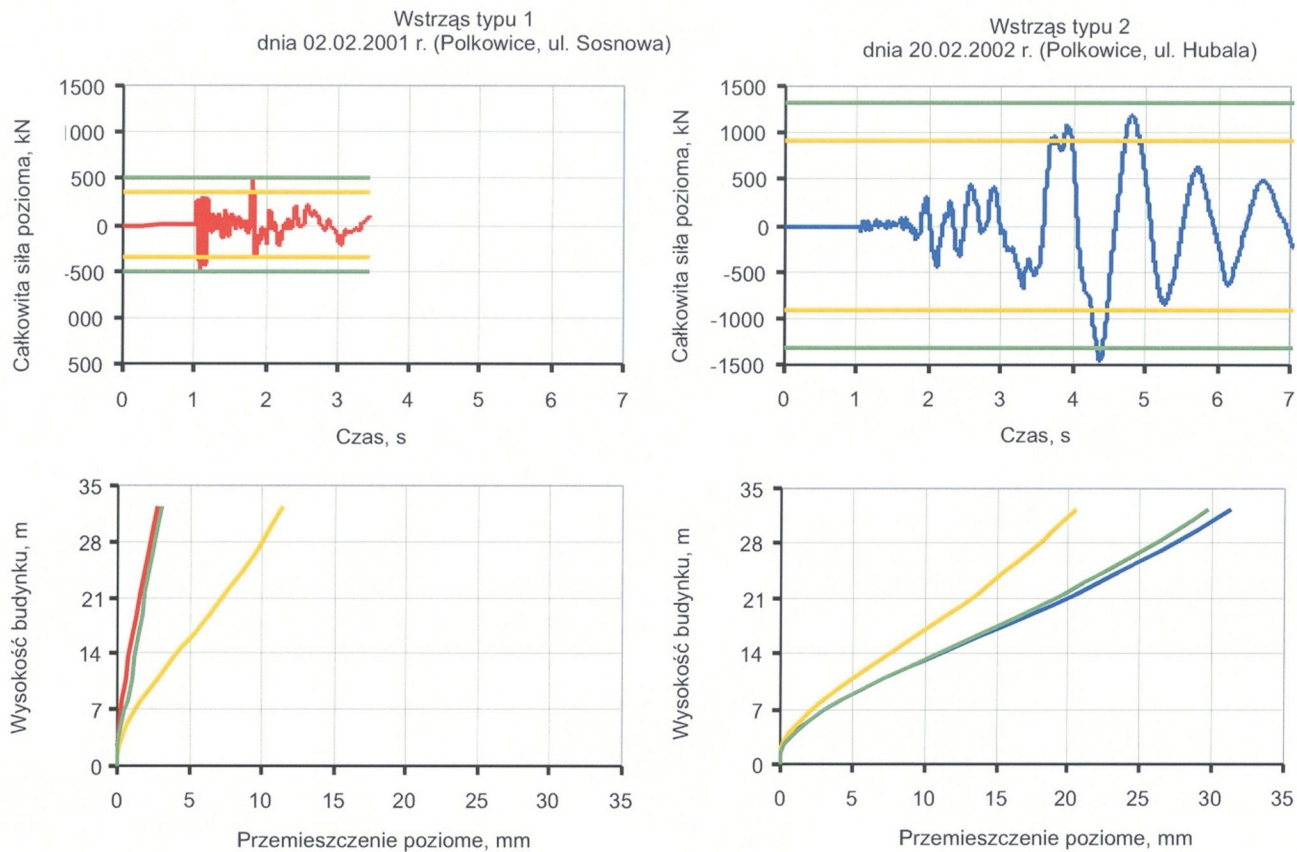


Rys. 6. Wyniki analiz numerycznych – budynki 5-kondygnacyjne (złącza sztywne)

■ ■ – analiza dynamiczna, ■ ■ – spektrum odpowiedzi (wstrząs), ■ – spektrum odpowiedzi LGOM (konceptcja prędkościowa)

Fig. 6. Results of numerical analyses – 5-storey buildings (keyed joints)

■ ■ – dynamic analysis, ■ ■ – response spectrum (tremor), ■ – design spectrum in LGOM (velocity conception)



Rys. 7. Wyniki analiz numerycznych – budynki 11-kondygnacyjne (złącza podatne)

■ ■ – analiza dynamiczna, ■ – spektrum odpowiedzi (wstrząs), ■ – spektrum odpowiedzi LGOM (konceptcja prędkościowa)

Fig. 7. Results of numerical analyses 11-storey buildings (plane joints)

■ ■ – dynamic analysis, ■ – response spectrum (tremor), ■ – design spectrum in LGOM (velocity conception)

Szczegółowe porównanie uzyskanych na drodze numerycznej wyników analizy dynamicznej i spektralnej LGOM (wg koncepcji prędkościowej) pozwala zauważyć ponadto, że w większości przypadków całkowita siła pozioma (odpowiedź budynku) wyznaczona na podstawie spektrum jest niższa o około 50% (wstrząsy typu 1) i około 25% (wstrząsy typu 2) w stosunku do wyników analizy dynamicznej. Stwierdzona zależność wynika bezpośrednio z faktu, iż obecnie upowszechniane na terenie LGOM spektrum odpowiedzi (według tzw. koncepcji prędkościowej) nie stanowi obwiedni spektrum wstrząsów spotykanych w tym rejonie wcześniej oraz mieszczących się w zakresie prognozowanych prędkości, tylko pewne ich uśrednienie – nie odtwarza więc efektu stosowanej w przypadkach innych obciążeń obróbki statystycznej dla określonego prawdopodobieństwa wystąpienia wstrząsu o niekorzystnej charakterystyce (np. 5% kwantyl)).

Zaobserwowane różnice wartości przemieszczeń wstrząsów wysokoczęstotliwościowych są zdecydowanie większe niż w przypadku wstrząsów niskoczęstotliwościowych. Przeprowadzone analizy potwierdziły prawidłowość (będącą założeniem koncepcji prędkościowej), że wstrząsy typu 1 wywołują deformacje nieszkodliwe dla konstrukcji, a poziom tych deformacji można określić w zakresie 23 mm. Autorzy wyrażają pogląd – będący w pewnej sprzeczności z powyższym twierdzeniem – że w przypadku bardzo krępych konstrukcji przemieszczenia rzędu $0,1 \pm 0,5$ mm mogą lokalnie wywoływać znaczne wartości sił wewnętrznych, powodujące miejscową utratę tzw. nośności sprężystej.

Różnice w odpowiedzi sprężystej na niekorzyść spektrum LGOM mogą być postrzegane jako nieświadome uwzględnienie tzw. współczynnika pracy konstrukcji (jako stosunku sił poziomych determinujących pracę sprężystą do sił zredukowanych umożliwiających pracę nieliniową związaną z pojawieniem się uszkodzeń i w konsekwencji silniejsze tłumienie), który jest tym większy, im większy jest stosunek pikowego przyspieszenia do maksymalnej prędkości wstrząsu. Współczynnik ten został niesłusznie „ukryty” w kształcie spektrum oraz w filozofii prędkościowej i generalnie jego wartość ma charakter losowy, abstrahuje on bowiem od typologii konstrukcji oraz materiałów, z których są one wykonane.

Porównując wyniki analizy dynamicznej i spektrum odpowiedzi sporządzonego z przebiegów rozpatrywanych wstrząsów dotyczące obydwu typów budynków, zauważono, że w przypadku wstrząsu niskoczęstotliwościowego otrzymano niewielkie i nieistotne dla obliczeń inżynierskich niedoszacowanie według metody spektralnej. Odmienne charakterystyki przebiegu sił stycznych w złączach budynku wysokiego mogą świadczyć o tym, że dystrybucja sił wewnętrznych wzdłuż wysokości budynku ma również charakter odmienny. Przyczyną może być pominięcie w odpowiedzi kolejnej postaci drgań własnych lub nieadekwatność metodyki sumującej odpowiedzi z poszczególnych postaci.

W przypadku wstrząsów wysokoczęstotliwościowych (typu 1) rozrzut wyników był znacznie większy. Wyniki dotyczące budynku 5-kondygnacyjnego wykazywały dość dobrą zgodność, gdy w metodzie spektrum odpowiedzi wzięto pod uwagę tylko pierwszą postać drgań, natomiast znacznie zawyżoną, gdy uwzględniono dwie pierwsze postaci.

7. Wnioski końcowe

Poznanie nowych faktów zaistniałych w ostatnich latach w LGOM, a szczególnie w obszarze górniczym ZG Rudna (analiza silnych wstrząsów typu 2 o charakterystykach zbliżonych do słabych zjawisk sejsmicznych) doprowadziła do sformułowania nowych zasad wyznaczania zastępczych obciążeń poziomych.

U podstaw tej nowej teorii (autorstwa prof. Zembatego) leży nawiązanie do opisu zjawiska poprzez wielkość prędkości drgań gruntu. Zalety takiej filozofii są następujące:

- niemal całkowite uwolnienie się od kontrowersyjnego faktu absurdalnie dużych odpowiedzi dynamicznych w zakresie krótkich okresów drgań własnych budowli,
- możliwość przyjęcia w zaleceniach do projektowania stałej, procentowej wartości odpowiedzi dynamicznej budynku.

Zdaniem autorów artykułu analizowana koncepcja prędkościowa ma jednak słabe punkty, na przykład niedoszacowanie odpowiedzi dynamicznej (patrz komentarz poniżej). Wyjaśnienie wszelkich wątpliwości jest niezbędne w celu nadania tej koncepcji jakiegokolwiek umocowania formalnego. Nie można również wykluczyć, że zadowalającym (i wystarczającym) rozwiązaniem na terenie LGOM może być w przyszłości projektowe zalecenie stosowania podwójnego spektrum przyspieszeniowego, uwzględniającego odmiennosc zjawisk tam występujących.

Przekroczenia wartości prognozowanych w LGOM (jednostką odpowiedzialną za prognozy w tym rejonie jest Centrum Badawczo-Rozwojowe KGHM „CUPUM” z Wrocławia) należy rozpatrywać w kontekście występowania analizowanych dwóch grup zjawisk – może się bowiem okazać, że groźniejsze w skutkach nie są przekroczenia wartości przyspieszenia PGA, ale właśnie pojawienie się znaczących prędkości (skorelowanych często z dłuższymi czasami trwania wstrząsu). Efekty oddziaływań takich zjawisk stają się już porównywalne ze skutkami charakterystycznymi dla wstrząsów sejsmicznych (w rejonach tzw. niskiej sejsmiczności).

Metoda analizy dynamicznej „krok po kroku” sygnalizuje niedoszacowanie wartości całkowitych sił poziomych (*base shear*) w stosunku do wymienionej wyżej metody spektralnej opartej na koncepcji prędkościowej. Wszelkie analizy porównawcze powinny być dalej kontynuowane, mogą z nich bowiem wynikać wartościowe zalecenia dotyczące korekty „in plus” przy określaniu obciążeń w projektowaniu budowli.

Bibliografia

- [1] Cholewicki A.: Budynki wielkopłytowe podlegające wstrząsom górniczym. Seria: Budynki wielkopłytowe – wymagania podstawowe. Bezpieczeństwo konstrukcji, z. 3. ITB, Warszawa 2002
- [2] Instrukcja nr 325 Projektowanie budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej podlegających wpływom wstrząsów górniczych. ITB, Warszawa 1993
- [3] Instrukcja nr 364 Wymagania techniczne dla obiektów budowlanych wznoszonych na terenach górniczych. ITB, Warszawa 2000
- [4] Instrukcja nr 391 Projektowanie budynków podlegających wpływom wstrząsów górniczych. ITB, Warszawa 2003

- [5] Instrukcja GIG nr 12 Zasady oceny możliwości prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej z uwagi na ochronę obiektów budowlanych. Katowice 2000
- [6] Kwiatek J. i in.: Ochrona obiektów na terenach górniczych. GIG, Katowice 1997
- [7] EN 1998-1 (EC8) Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. December 2004
- [8] Zembaty Z., Kokot S.: Wyznaczenie zastępczych sił bezwładności przyjętych jako efekt wymuszenia kinematycznego od drgań podłoża gruntowego dla celów projektowania nowej zabudowy kubaturowej w obszarze LGOM. Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa, Opole 2007
- [9] PN-85/B-02170 Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki
- [10] Zembaty Z., Cholewicki A., Jankowski R., Szulc J.: Trzęsienia ziemi 21 września 2004 r. w Polsce północno-wschodniej oraz ich wpływ na obiekty budowlane. *Inżynieria i Budownictwo*, 1, 2005
- [11] Maciąg E.: Problemy działań sejsmicznych i parasejsmicznych w ostatniej wersji Eurokodu 8. X Sympozjum „Wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne na budowie”, Kraków 2003
- [12] Dubirński J., Jaśkiewicz K., Lurka A., Mutke G.: Instrukcja prowadzenia powierzchniowych pomiarów sejsmometrycznych, interpretacji wyników oraz oceny i prognozowania drgań sejsmicznych wywołanych wstrząsami górniczymi na powierzchni w LGOM w oparciu o skalę GSI-2004. Praca badawcza GIG, Katowice 2006

EVOLUTION OF METHODS OF LOADS ESTIMATION EQUIVALENT FOR SEISMIC EFFECTS ON THE LGOM TERRITORY

Summary

Years long exploitation of copper on LGOM territory leads to occurrence of soil tremors comparable to minor earthquakes events. Their intensities often exceed the prognosis recommended by authority. Inspections of buildings subjected to those semi earthquake motions show that the classical methods of checking of structural response based on acceleration spectral values have not been fully confirmed. The new tendency in recommendations for this region is estimation of the internal forces equivalent by means of certain agreed proportionally to ground velocity values used in analysis by means of design response spectrum recommended in EC8 document. The aim of the paper is to discuss that approach based on the numerical study carried out by means of step by step method. Conclusions for further standardization has been proposed.

Praca wpłynęła do Redakcji 30 I 2008 r.