

BUDOWNICTWO

CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING

WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3-B/2010
ZESZYT 11
ROK 107
ISSUE 11
YEAR 107

JOANNA DULIŃSKA, ANTONI ZIĘBA*

METODY OCENY WPŁYWU WSTRZĄSÓW GÓRNICZYCH NA WYBRANE BUDOWLE WIELKOGABARYTOWE

EVALUATION METHODS OF EFFECTS OF MINING SHOCKS ON CHOSEN LARGE-DIMENSIONAL STRUCTURES

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę odpowiedzi dynamicznej mostu żelbetowego oraz chłodni kominowej na wymuszenie kinematyczne. Zastosowano metodę bezpośredniego całkowania równań ruchu przy założeniu wymuszenia równomiernego i nierównomiernego oraz metodę spektrum odpowiedzi. Przeanalizowano wpływ uwzględnienia nierównomierności wymuszenia na odpowiedź dynamiczną obiektów oraz rozpoznano możliwości zastosowania metody spektrum odpowiedzi do obliczania odpowiedzi dynamicznej budowli wielkogabarytowych na wstrząsy górnicze.

Słowa kluczowe: nierównomierne wymuszenie kinematyczne, metoda spektrum odpowiedzi, budowle wielopodporowe

Abstract

Paper presents results of dynamic analysis of reinforced bridge and cooling tower to kinematic excitation. Numerical calculation of equations of motion was used basing upon the assumption of uniform and non-uniform excitation as well as response spectrum method. Effects of non-uniformity of excitation on dynamic response of structures were examined. Possibility of adopting response spectrum method for calculations of dynamic response of multiple-support structures was considered.

Keywords: non-uniform kinematic excitation, response spectrum method, multiple-support structures

* Dr hab. inż. Joanna Dulińska, prof. PK, dr inż. Antoni Zięba, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Obliczenia odpowiedzi dynamicznej budowli na wymuszenia kinematyczne, będące następstwem zjawisk sejsmicznych lub parasejsmicznych, wykonuje się m.in. metodą bezpośredniego całkowania równań ruchu – THA (*time history analysis*) lub quasi-stacynną metodą spektrum odpowiedzi – RSA (*response spectrum analysis*). W metodzie RSA do obliczania odpowiedzi dynamicznej budowli na wymuszenia kinematyczne służą procedury podające wzory na wartości sił sejsmicznych oddziałujących na budowlę na skutek ruchów podłoża gruntowego. Klasykna wersja metody (wyprowadzona przy założeniu równomiernego wymuszenia) w większości przypadków szacuje wartości sił wewnętrznych od góry, prowadzi więc do zwiększenia bezpieczeństwa konstrukcji i nie stwarza zagrożenia niedoszacowania wartości sił wewnętrznych w konstrukcji w procesie projektowania.

Odpowiedź dynamiczna budowli na wymuszenie kinematyczne obliczana jest najczęściej przy założeniu, że w każdym punkcie posadowienia budowli działa takie samo wymuszenie. Założenie takie, słuszne dla obiektów o niewielkich rozmiarach fundamentu, jest zbyt daleko idącym uproszczeniem w przypadku budowli, których wymiary są porównywalne z długością fali wstrząsowej. Fala wstrząsowa dociera bowiem do poszczególnych punktów podparcia budowli w innym czasie, występuje utrata spójności fal, różne są też warunki gruntowe w poszczególnych punktach podparcia budowli. Powyższe czynniki sprawiają, że należy liczyć się z wystąpieniem różnych wartości amplitud i faz drgań w poszczególnych punktach podparcia budowli, czyli z efektem nierównomiernego wymuszenia kinematycznego [5, 9]. Wzory na siły sejsmiczne w klasycznej metodzie spektrum odpowiedzi, podawane przez wiele norm sejsmicznych, wyprowadzone są również przy założeniu jednakowego wymuszenia kinematycznego we wszystkich punktach podparcia budowli, chociaż w literaturze można znaleźć również wyprowadzenia uwzględniające nierównomierność wymuszenia [6]. Nierównomierność wymuszenia powoduje redukcję średnich amplitud drgań, ale równocześnie prowadzi do powstania efektów quasi-stacynnych. Z reguły większy wpływ ma zmniejszenie średnich amplitud, wówczas następuje redukcja globalnej odpowiedzi. Jednak w niektórych przypadkach powstające efekty quasi-stacynne mają dominujący wpływ, co skutkuje zwiększeniem odpowiedzi dynamicznej.

W artykule przeprowadzono analizę odpowiedzi dynamicznej dwóch typowych obiektów narażonych na nierównomierne wymuszenie kinematyczne, a mianowicie cztero-przęsłowego mostu żelbetowego oraz hiperboloidalnej chłodni kominowej. Do wyznaczania odpowiedzi dynamicznej zastosowano:

- metodę bezpośredniego całkowania równań ruchu (THA) przy założeniu równomiernego wymuszenia kinematycznego,
- metodę bezpośredniego całkowania równań ruchu (THA) przy założeniu nierównomiernego wymuszenia kinematycznego,
- metodę spektrum odpowiedzi (RSA).

Na podstawie otrzymanych wyników przeanalizowano wpływ uwzględnienia nierównomierności wymuszenia kinematycznego na odpowiedź dynamiczną obiektów oraz rozpoznano możliwości zastosowania metody spektrum odpowiedzi do obliczania odpowiedzi dynamicznej tych budowli wielkogabarytowych na wstrząsy górnicze.

2. Model nierównomiernego wymuszenia kinematycznego

W obliczeniach odpowiedzi dynamicznej wybranych budowli wielkogabarytowych na wstrząsy górnicze przyjęto model nierównomiernego wymuszenia kinematycznego zaproponowany w pracy [2]. Weryfikacja doświadczalna proponowanego modelu obliczeniowego dała pozytywne rezultaty. Założono, że kolejne punkty gruntu położone na kierunku propagacji fali wstrząsowej powtarzają ruch punktu kontrolnego z opóźnieniem, zależnym od prędkości fali w gruncie. Przyjęto również, że następuje redukcja amplitud drgań ze zwiększeniem odległości od źródła. Redukcję tę można wyznaczać ze wzorów empirycznych podających zależność pomiędzy parametrami drgań powierzchni a energią wstrząsu i odległością epicentralną [8]

$$a(r) = a_e \cdot H(r)$$

$$H(r) = 1,53 \cdot r^{0,155} \cdot e^{-0,65 \cdot r} + 0,014 \quad (\text{w obszarze GZW})$$

$$H(r) = 0,8575 \cdot r^{-1,0098} \quad (\text{w obszarze LGOM})$$

gdzie:

$a(r)$ – przyspieszenie drgań w odległości r ,

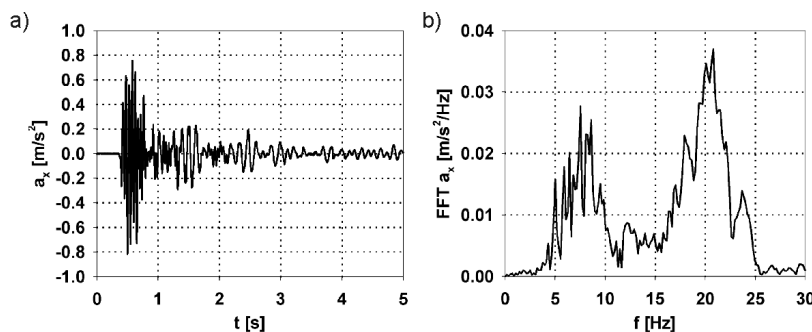
a_e – przyspieszenie drgań w strefie epicentralnej,

$H(r)$ – funkcja charakteryzująca redukcję drgań poza obszarem epicentralnym,

r – odległość hipocentralna [km].

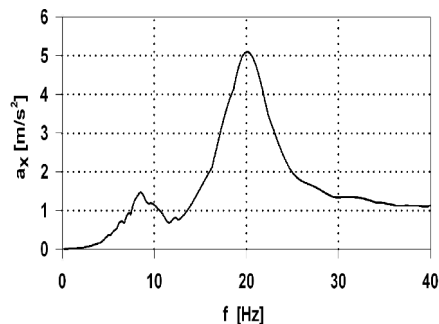
3. Dane o wymuszeniu kinematycznym – wstrząsy górnicze z terenu GZW i LGOM

Do obliczeń odpowiedzi dynamicznej mostu żelbetowego na wymuszenie kinematyczne pochodzące od wstrząsu górniczego wybrano rzeczywiste przebiegi przyspieszeń drgań, zarejestrowane w rejonie LGOM. Na rysunku 1 przedstawiono przebieg czasowy przyspieszeń drgań z obszaru LGOM w kierunku (x), równoległym do kierunku propagacji fali oraz strukturę częstotliwościową tego przebiegu, zaś na rys. 2 pokazano przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi tego wstrząsu w kierunku poziomym (x).



Rys. 1. Przyspieszenia drgań od wstrząsu górniczego z rejonu LGOM w kierunku poziomym (x):
a) przebieg czasowy, b) struktura częstotliwościowa

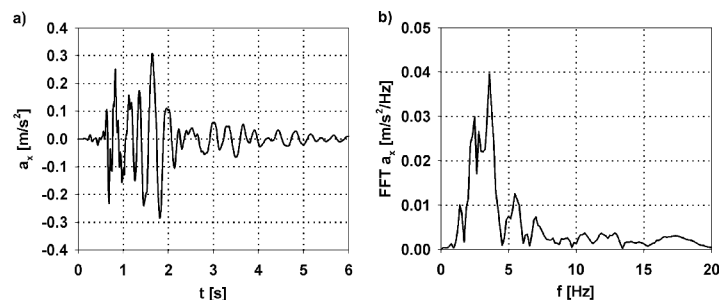
Fig. 1. Accelerations of vibrations arising from mining shock in LGOM in horizontal direction (x):
a) time history, b) frequency spectrum



Rys. 2. Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wstrząsu z rejonu LGOM w kierunku poziomym (x)

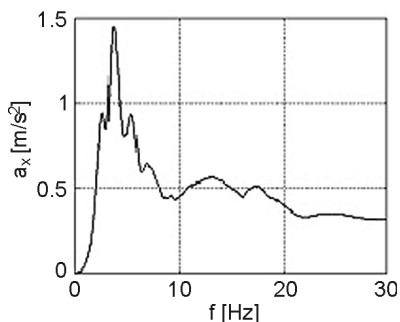
Fig. 2. Acceleration response spectrum of mining shock in LGOM in horizontal direction (x)

Do obliczeń odpowiedzi dynamicznej chłodni wybrano rzeczywisty przebieg przyspieszeń drgań zarejestrowany w rejonie GZW. Na rys. 3 przedstawiono przebieg czasowy przyspieszeń w kierunku (x), równoległym do kierunku propagacji fali oraz strukturę częstotliwościową tego przebiegu. Na rys. 4 pokazano przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi powyższego wstrząsu. W obliczeniach odpowiedzi dynamicznej mostu uwzględniono dwie składowe wymuszenia kinematycznego (poziomą i pionową), zaś w obliczeniach chłodni – trzy składowe wymuszenia. Krzywe spektralne uzyskano przy założeniu ułamka tłumienia krytycznego 5%.



Rys. 3. Przyspieszenia drgań od wstrząsu górniczego z rejonu GZW w kierunku poziomym (x), równoległym do kierunku propagacji fali: a) przebieg czasowy, b) struktura częstotliwościowa

Fig. 3. Accelerations of vibrations arising from mining shock in GZW in horizontal direction (x), parallel to direction of wave propagation: a) time history, b) frequency spectrum



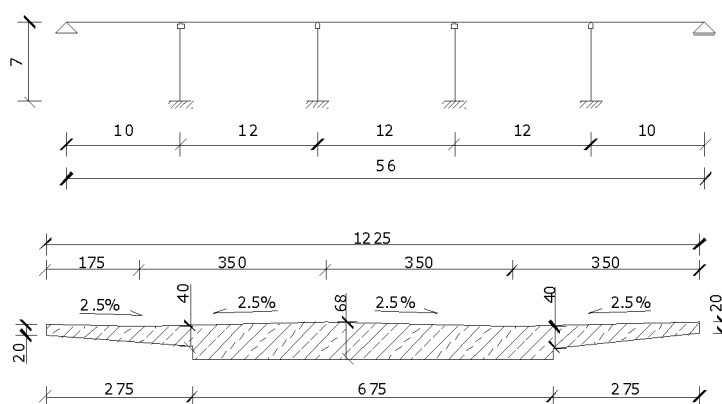
Rys. 4. Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wstrząsu z rejonu GZW w kierunku poziomym (x)

Fig. 4. Acceleration response spectrum of mining shock in GZW in horizontal direction (x)

4. Analiza odpowiedzi dynamicznej mostu na wstrząs górniczy LGOM

Na rysunku 5 przedstawiono model obliczeniowy czteroprzęsłowego mostu żelbetowego o rozpiętości 56 m. Zaznaczono punkty, w których prowadzono analizę sił wewnętrznych (M1-M10) oraz przekrój poprzeczny pomostu.

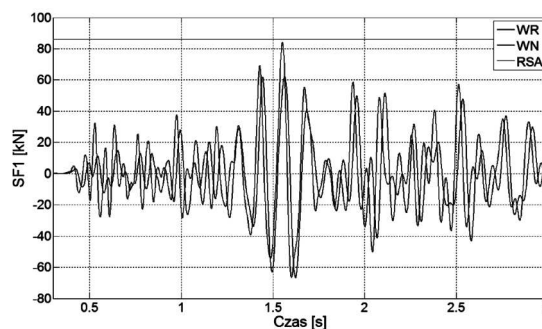
W celu oszacowania wpływu nierównomierności wymuszenia na odpowiedź dynamiczną mostu wykonano obliczenia sił wewnętrznych z założeniem wymuszenia równomiernego i nierównomiernego (prędkość fali 400 m/s) oraz metodą spektrum odpowiedzi. Zastosowano metodę modalną, przyjmując ułamek tłumienia krytycznego 5%.



Rys. 5. Model mostu z punktami wybranymi do analizy (M1-M10) oraz przekrój pomostu

Fig. 5. Model of the bridge, points chosen for analysis (M1-M10) and cross section of bridge

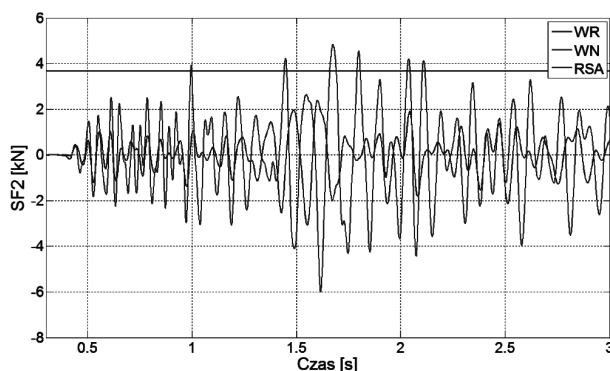
Na rysunku 6 przedstawiono przebieg czasowy sił podłużnych SF1 w punkcie M2 pomostu uzyskany przy założeniu równomiernego i nierównomiernego wymuszenia kinematycznego (prędkość fali 400 m/s) oraz wartość siły podłużnej obliczoną metodą RSA. Wartości otrzymane w wyniku analizy dynamicznej są mniejsze od wartości uzyskanej metodą quasi-statyczną. Metoda RSA daje wartość zbliżoną do maksymalnej wartości otrzymanej w wyniku całkowania równań ruchu, szacując maksymalną wartość od góry. Nie ma więc niebezpieczeństwa niedoszacowania wartości sił podłużnych.



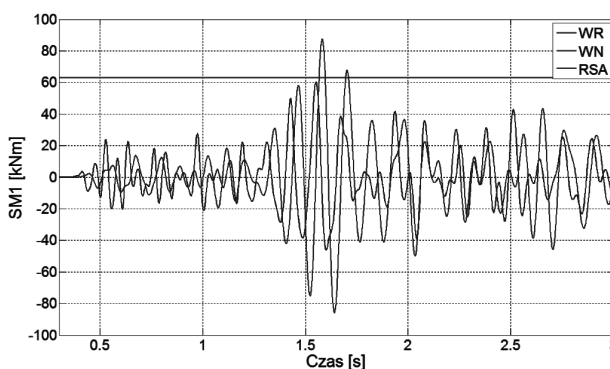
Rys. 6. Siły podłużne SF1 w elemencie M2

Fig. 6. Longitudinal forces SF1 in element M2

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono odpowiednio przebiegi czasowe sił poprzecznych SF2 oraz momentów zginających SM1 w punkcie M7, uzyskane przy założeniu równomiernego i nierównomiernego wymuszenia kinematycznego oraz wartości tych sił obliczone metodą RSA. Wartości uzyskane przy założeniu nierównomiernego wymuszenia przewyższają wartości otrzymane przy założeniu wymuszenia równomiernego.



Rys. 7. Siły poprzeczne SF2 w elemencie M7
Fig. 7. Shear forces SF2 in element M7

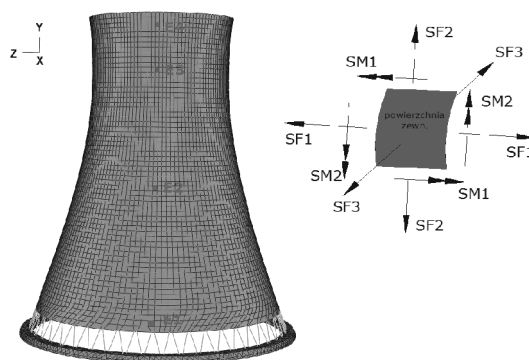


Rys. 8. Momenty zginające SM1 w elemencie M7
Fig. 8. Bending moments SM1 in element M7

Zwiększenie wartości sił tnących i momentów zginających może być spowodowane efektami quasi-statycznymi, tj. zmianami geometrii mostu na skutek niezależnego ruchu podpór. Do zwiększenia ścinania i zginania mogą doprowadzić szczególnie różnice w amplitudach składowych pionowych wymuszenia na poszczególnych podporach. W obliczeniach odpowiedzi dynamicznej obiektów na wymuszenia sejsmiczne amplitudy drgań pionowych są znacząco mniejsze od amplitud drgań poziomych poza strefą epicentralną i często są pomijane. W przypadku wstrząsów górniczych amplitudy drgań pionowych mają wartości porównywalne do wartości amplitud drgań poziomych i efekt ten może być znaczący. Wartości sił wewnętrznych uzyskane w wyniku założenia nierównomiernego wymuszenia przewyższają wartości otrzymane klasyczną metodą spektrum odpowiedzi. Metoda RSA nie prowadzi więc do oszacowań konserwatywnych.

5. Analiza odpowiedzi dynamicznej chłodni na wstrząs górniczy GZW

Na rysunku 9 pokazano model obliczeniowy chłodni kominowej o średnicy fundamentu 100 m [1], a także zaznaczono dodatkowo zwroty wektorów: sił południkowych SF2, sił równoleżnikowych SF1, sił tnących SF3, momentów południkowych SM1 oraz momentów równoleżnikowych SM2. Dodatkowo na rysunku naniesiono punkty, w których prowadzono analizę sił wewnętrznych: E1, E2, E3, E4.



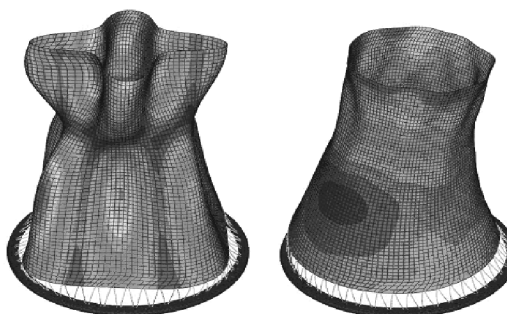
Rys. 9. Model chłodni z punktami wybranymi do analizy (E1, E2, E3, E4) oraz siły wewnętrzne

Fig. 9. Model of cooling tower, points chosen for dynamic analysis (E1, E2, E3, E4) and internal forces

Pierwszym krokiem analizy dynamicznej było obliczenie częstotliwości i postaci drgań własnych. W przypadku obiektów powłokowych spektrum częstotliwości jest zwarte, a otrzymane postaci drgań związane są z deformacją przekroju poprzecznego wg składowych harmonicznych [3, 4, 7]. Na rys. 10 przedstawiono postaci drgań związane z najniższą częstotliwością drgań własnych (0,83 Hz), przy której deformacja przekroju poprzecznego nastąpiła wg funkcji $\cos 4v$ oraz z pierwszą częstotliwością drgań giętych (2,83 Hz). Uzyskane wartości początkowych częstotliwości drgań własnych są zgodne wartościami przedstawianymi w literaturze w przypadku tego rodzaju konstrukcji [3, 4].

Rys. 10. Postaci drgań związane z najniższą częstotliwością drgań własnych (0,83 Hz) oraz z pierwszą częstotliwością drgań giętych (2,83 Hz)

Fig. 10. Modes of vibrations for the lowest natural frequency (0.83 Hz) and for the first frequency of bending mode (2.83 Hz)

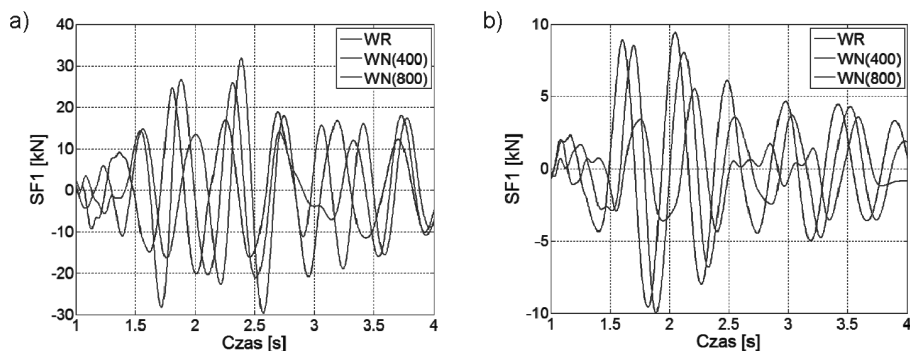


Współczynniki tłumienia sztywnościowo-bezwładnościowego obliczono przy założeniu ułamka tłumienia krytycznego 5%. Jako f_1 przyjęto pierwszą częstotliwość drgań

własnych otrzymaną równą 0,83 Hz, zaś jako f_2 – pierwszą częstotliwość drgań giętnych równą 2,83 Hz.

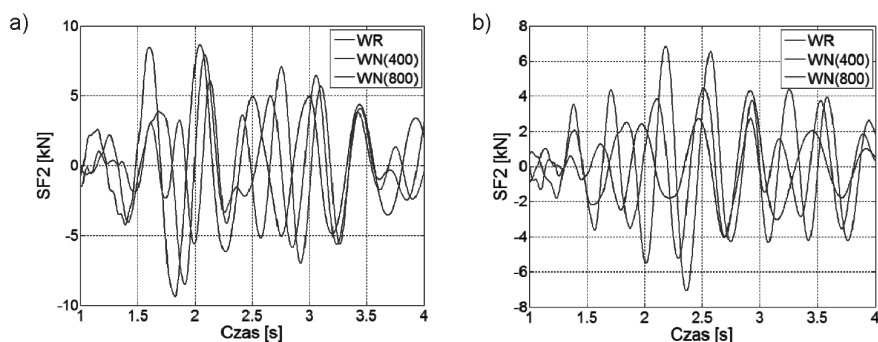
W celu oszacowania wpływu nierównomierności wymuszenia na odpowiedź dynamiczną chłodni wykonano obliczenia sił wewnętrznych w przypadku wymuszenia równomiernego oraz wymuszenia nierównomiernego przy założeniu prędkości fali w podłożu 400 i 800 m/s.

Na rysunku 11a) przedstawiono wykresy sił równoleżnikowych SF1 w punkcie E3. Największe siły równoleżnikowe otrzymano przy założeniu wymuszenia równomiernego, najmniejsze zaś przy prędkości fali 400 m/s. Podobny charakter mają wykresy w punktach E1 i E2. Inną właściwość wykazują wykresy w punkcie E4 (rys. 11b) – największe wartości sił SF1 otrzymano przy prędkości fali 400 m/s, najmniejsze zaś przy wymuszeniu równomiernym. Analogiczne prawidłowości można zauważyć w przypadku sił południkowych SF2 (rys. 12).



Rys. 11. Przebieg czasowy sił równoleżnikowych SF1: a) punkt E3 (strefa środkowa powłoki), b) punkt E4 (krawędź górna powłoki)

Fig. 11. Time history of circumferential forces SF1: a) point E3 (middle part of shell), b) point E4 (upper end of shell)

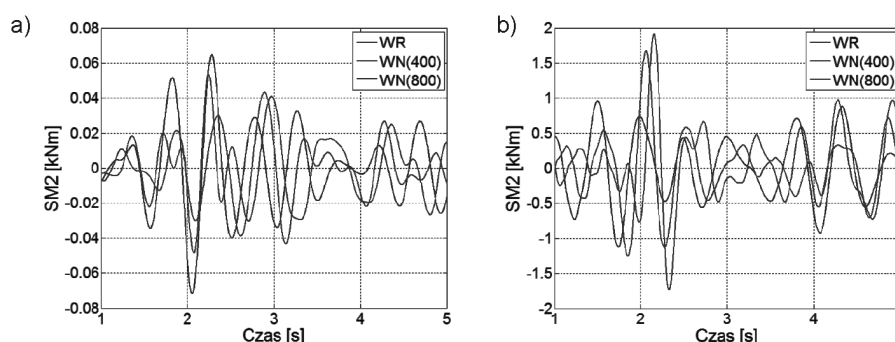


Rys. 12. Przebieg czasowy sił południkowych SF2: a) punkt E2 (strefa środkowa powłoki), b) punkt E4 (krawędź górna powłoki)

Fig. 12. Time history of meridional forces SF2: a) point E2 (middle part of shell), b) point E4 (upper end of shell)

Zwiększenie wartości sił w górnej części powłoki spowodowane jest tzw. zjawiskiem kołysania, które występuje przy uwzględnieniu nierównomierności składowej pionowej wymuszenia. Jest to zjawisko typowe dla wstrząsów górniczych, gdy amplitudy drgań pionowych są podobnej wielkości jak amplitudy drgań poziomych.

Na rysunku 13 przedstawiono przebieg czasowy równoleżnikowych momentów zginających. W punkcie E2 (a także E3 i E4) wartości momentów są największe w przypadku wymuszenia równomiernego. W punkcie E1 (krawędź dolna powłoki) nierównomierność wymuszenia prowadzi do powstania bardziej znaczących efektów brzegowych w postaci momentów zginających powłokę.

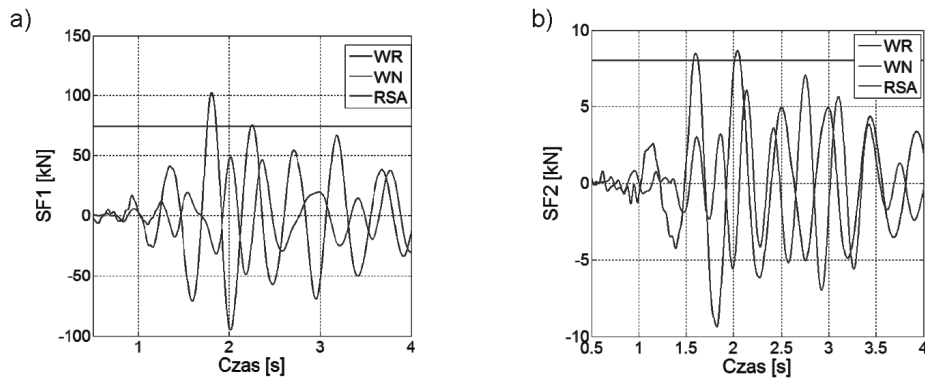


Rys. 13. Przebieg czasowy momentów równoleżnikowych SM2: a) punkt E2 (strefa środkowa powłoki), b) punkt E1 (krawędź dolna powłoki)

Fig. 13. Time history of circumferential moments SM2: a) point E2 (middle part of shell), b) point E1 (bottom end of shell)

Zginanie dolnego fragmentu powłoki spowodowane jest dodatkowo powstaniem efektów quasi-statycznych wynikających ze zmian w geometrii pierścienia fundamentowego. Deformacja pierścienia, nie występująca w przypadku wymuszenia równomiernego, jest skutkiem nierównomierności wymuszenia. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku wstrząsów górniczych składowa pozioma drgań prostopadłych do kierunku propagacji fali jest porównywalna ze składową poziomą drgań równoległych do kierunku propagacji fali. Efekt zginania pierścienia fundamentowego, propagujący się na dolną część powłoki, może więc być większy niż w przypadku drgań sejsmicznych, w których składowa pozioma drgań prostopadłych jest często pomijana w obliczeniach.

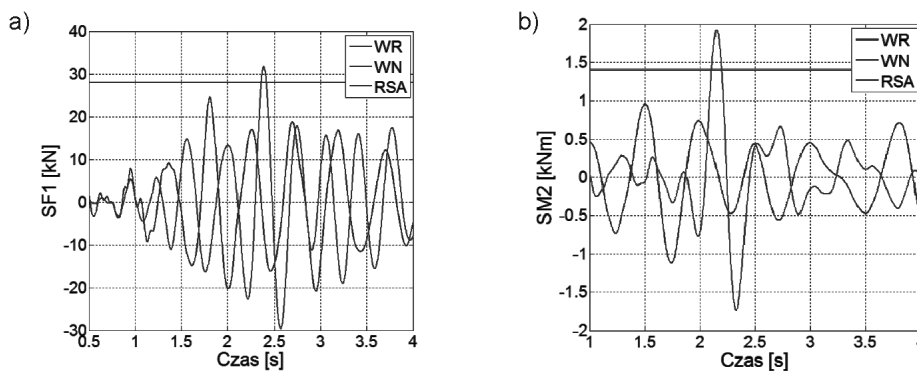
Na rysunkach 14 i 15 wykresy sił wewnętrznych w wybranych punktach powłoki otrzymane metodą bezpośredniego całkowania numerycznego (THA) przy założeniu wymuszenia równomiernego, wymuszenia nierównomiernego ($v = 400$ m/s) zestawiono z wartością otrzymaną z zastosowaniem metody spektrum odpowiedzi. W metodzie RSA do analizy włączono częstotliwości drgań własnych do 8 Hz. Na rys. 14 przedstawiono wykresy sił równoleżnikowych SF1 w punkcie E1 oraz sił południkowych SF2 w punkcie E2. Jak widać nawet w przypadku zastosowania modelu wymuszenia równomiernego wartości sił otrzymane metodą bezpośredniego całkowania numerycznego są większe niż wartość otrzymana metodą spektrum odpowiedzi. Metoda RSA z zastosowaniem SRSS daje więc oszacowanie niekonserwatywne. Jest to przypadek występujący przy obliczeniach powłok o zwartym widmie częstości i postaciach drgań trudnych do rozseparowania.



Rys. 14. Porównanie wartości sił wewnętrznych w powłocie chłodni otrzymanych metodami THA i RSA: a) siły równoleżnikowe SF1 w punkcie E1, b) siły południkowe SF2 w punkcie E2

Fig. 14. Comparison of internal forces in cooling tower shell obtained with THA and RSA methods: a) meridional forces SF1 – point E1, b) circumferential forces SF2 – point E2

Na rysunku 15 pokazano odpowiednio wykresy sił równoleżnikowych SF1 w punkcie E2 oraz momentów równoleżnikowych SM2 w punkcie E1. Klasyczna metoda RSA w tych przypadkach również powoduje niedoszacowanie wartości sił wewnętrznych w powłocie chłodni w porównaniu z wartościami otrzymanymi metodą THA z założeniem nierównomierności wymuszenia.



Rys. 15. Porównanie wartości sił wewnętrznych w powłocie chłodni otrzymanych metodami THA i RSA: a) siły równoleżnikowe SF1 w punkcie E2, b) momenty równoleżnikowe SM2 w punkcie E1

Fig. 15. Comparison of internal forces in cooling tower shell obtained with THA and RSA methods: a) meridional forces SF1 – point E1, b) meridional moments SM2 – point E1

6. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych analiz można sformułować następujące wnioski odnośnie do stosowanych metod obliczeniowych:

1. Przyjęcie nierównomiernego wymuszenia kinematycznego może prowadzić zarówno do zwiększenia, jak i do redukcji wartości sił przekrojowych w porównaniu z wartościami uzyskanych przy założeniu wymuszenia równomiernego.
2. Otrzymanie prawidłowej wielkości odpowiedzi dynamicznej wymaga rozpoznania parametrów fizykomechanicznych podłoża gruntowego, a co za tym idzie prędkości propagacji fali wstrząsowej. Nieprawidłowe przyjęcie prędkości fali prowadzić może do błędnego oszacowania wartości odpowiedzi dynamicznej obiektu.
3. Metoda spektrum odpowiedzi, z reguły szacująca odpowiedź dynamiczną od góry, może w przypadku budowli wielkogabarytowych, narażonych na wymuszenie nierównomierne, prowadzić do niedoszacowania wielkości odpowiedzi dynamicznej.
4. Nawet w przypadku zastosowania modelu wymuszenia równomiernego wartości sił otrzymane metodą bezpośredniego całkowania numerycznego mogą być większe niż wartość otrzymana metodą spektrum odpowiedzi. Metoda RSA z zastosowaniem SRSS prowadzi do oszacowań niekonserwatywnych w przypadku powłok o zwartym widmie częstości i postaciach drgań trudnych do rozseparowania.

Literatura

- [1] Ciesielski R., Dulińska J., *Complex presentation of paraseismic influences on structures of rotatory-symmetric shape*, [in:] *Earthquake resistant construction and design*, Proc. of the 2nd International Conference on Earthquake Resistant Construction and Design, Rotterdam [et al.]: Balkema, 1994, 1145-1152.
- [2] Dulińska J., *Odpowiedź dynamiczna budowli wielopodporowych na nierównomierne wymuszenie parasejsmiczne pochodzenia górniczego*, Monografia 338, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
- [3] Dulińska J., *Modele obliczeniowe chłodni kominowej posadowionej na obszarze występowania wstrząsów górniczych*, VI Sympozjum Wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne na budowlę, Kraków 1991, 155-166.
- [4] Hara T., *Dynamic response of R/C cooling tower shell considering supporting systems*, Takuyama College of Technology, 2005.
- [5] Harichandran R.S., *Spatial variation of earthquake ground motion. What is it, how do we model it and what are its engineering implications?*, Dep. of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University, 1999.
- [6] Kiureghian A., *Response spectrum method for multi-support seismic excitations*, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 21, 1992, 713-740.
- [7] Makovicka D., *Response analysis of an RC cooling tower under seismic and windstorm effects*, *Acta Polytechnica*, vol. 46, No. 6, 2006.
- [8] Mutke G., Stec K., *Seismicity in the Upper Silesian Coal Basin, Poland: Strong regional seismic events*, Proc. 4th Inter. Symp. on Rockbursts and Seismicity in Mines, Balkema /Rotterdam/Brookfield/ Kraków, 1997, 213-217.

- [9] Norman J.A., et al., *Understanding the dynamics of multi-degree-of-freedom structures subjected to multiple support earthquake excitation*, 13th Conference on Earthquake Engineering, No. 3324, Vancouver, Canada 2004.