

Magdalena MROZEK, Dawid MROZEK*
Politechnika Śląska

ANALIZA PORÓWNAWCZA DYNAMICZNEJ ODPOWIEDZI MODELI BUDYNKÓW 3D I 2D Z UWZGLĘDNIENIEM PODATNOŚCI PODŁOŻA. CZĘŚĆ 1. OPIS PROCEDURY

Streszczenie. Artykuł zawiera analizę porównawczą modeli przestrzennego oraz tarczowego budynków wysokiego i niskiego. Wykorzystywane modele numeryczne analizowanych obiektów murowych uwzględniają podatność podłoża. Przedstawiony został sposób modyfikacji modelu 2D oraz dobór jego parametrów, tak aby istniało podobieństwo w odpowiedzi z modelem 3D – zarówno pod względem obciążenia statycznego, jak i dynamicznego. Wyniki obliczeń zostały zamieszczone w części 2. Wyniki obliczeń.

COMPARITIVE ANALISIS OF DYNAMIC RESPONSES OF 3D AND 2D MODELS OF BUILDINGS WITH CONSIDERATION OF THE GROUND FLEXIBILITY. PART 1. DESCRIPTION OF PROCEDURE

Summary. The paper contains comparative analysis of 3D and 2D models of buildings: tall and low. Numerical models consider the ground flexibility. The way of 2D models modification and their parameters selection are introduced in such a way that similarity of the appropriate 3D models responses, in respect of static as well as dynamic is achieved. Results of calculations are placed in part 2. Results of calculation.

1. Wprowadzenie

Analizy numeryczne budynków obciążonych dynamicznie, w postaci modeli przestrzennych (powłokowych), bywają praco- i czasochłonne [3, 5]. Dodatkowo podczas obliczeń, w przypadku korzystania z programu wykorzystującego metodę elementów skończonych, dokładność rozwiązania uzależniona jest od zagęszczenia siatki elementów skończonych [5, 6]. W przypadku gdy oczekiwana jest duża dokładność, tworzone są modele trójwymiarowe o gęstym podziale siatki dyskrytyza-

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Andrzej Wawrzynek.

cyjnej, co powoduje znaczący wzrost wymagań sprzętowych. W takiej sytuacji alternatywnym rozwiązaniem jest zastąpienie modelu przestrzennego modelem tarczowym. Takie rozwiązanie umożliwia zastosowanie elementów skończonych o mniejszych wymiarach, a co za tym idzie uzyskanie dokładniejszych wyników mniejszym nakładem pracy i czasu. Istotną kwestią pozostają określenie zakresu wprowadzonych uproszczeń i ich wpływ na uzyskane wyniki.

W artykule przedstawiona została propozycja zamiany modelu 3D na 2D. Analizą objęte zostały dwa budynki: niski oraz wysoki. Każdy z nich posiada swój model przestrzenny, z którego następnie wydzielono jedną ze ścian zewnętrznych, tworząc jej model tarczowy. Zamiana modelu przestrzennego na tarczowy jest możliwa, jak wykazano w [7], tylko w przypadku budynków symetrycznych. Dalej przedstawiony został proces uzyskania parametrów modyfikujących model tarczowy w zakresach statycznym i dynamicznym. Do przeprowadzenia analizy numerycznej posłużono się programem ABAQUS, w którym do obliczeń wybrano plastyczno-degradacyjny model materiałowy.

2. Opis modelu numerycznego

2.1. Model materiałowy

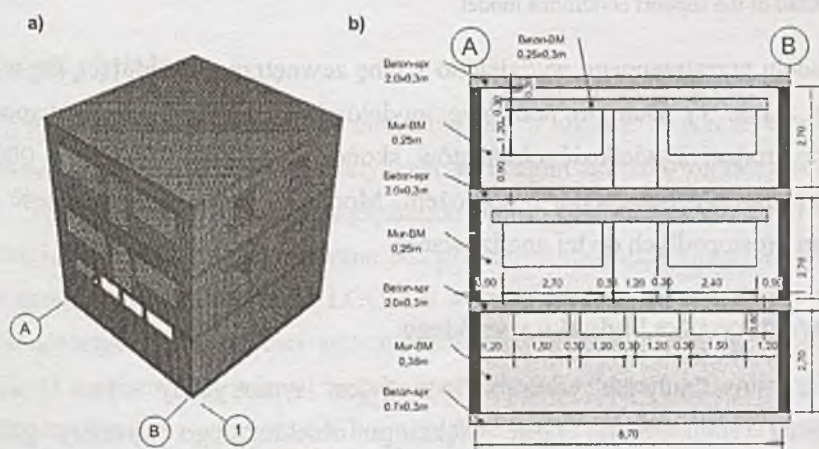
W czasie przeprowadzania analiz numerycznych posługiwano się modelem materiałowym, zwanym Barcelona Model (*BM*). Łączy on w sobie dwa podejścia do analizowanego zagadnienia, a mianowicie przyrostową teorię plastyczności z kontynuálną mechaniką zniszczenia, a to charakteryzuje plastyczną mechanikę zniszczenia. W modelu wprowadza się pojęcie naprężeń efektywnych do równań konstytutywnych teorii plastyczności. Dzięki takiemu sprzężeniu możliwe jest uwzględnienie wpływu przyrastającego zniszczenia materiału na odpowiedź modelu w kolejnych cyklach obciążenie-odciążenie. Rozpatrując *BM* pod kątem teorii plastyczności, należy zaznaczyć, że jest on rozszerzeniem klasycznego modelu Druckera-Pragera z niekołowym przekrojem dewiatorowym powierzchni plastyczności. Kolejne cechy tego modelu materiałowego to: niestowarzyszone prawo płynięcia oraz nieliniowe wzmocnienie izotropowe typu dwumechanizmowego. W aspekcie kontynuálnej mechaniki zniszczenia *BM* charakteryzuje bidysypacyjna, izotropowa degradacja materiału, opisana dwoma zmiennymi degradacji materiału: d_t i d_c , odpowiednio w przypadku rozciągania i ściskania. Mogą one osiągać wartości z przedziału $\langle 0,1 \rangle$, gdzie 0 oznacza brak degradacji, a 1 całkowite zniszczenie.

Zmienne te, określane na podstawie niezależnych funkcji zniszczenia materiału, mogą być ze sobą powiązane, czyli jedna wielkość zmiennej może mieć wpływ na drugą po zmianie znaku naprężenia.

Plastyczno-degradacyjny model betonu został sformułowany przez J. Lubliner [1], a zmodyfikowany przez J. Lee [2]. Propozycję adaptacji modelu w przypadku konstrukcji murowych zaproponował A. Cińcio [3].

2.2. Charakterystyka budynku niskiego

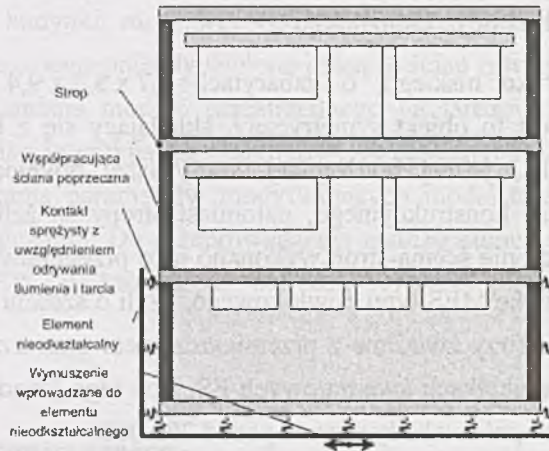
Geometria budynku niskiego, o gabarytach $8,7 \times 8,7 \times 9,4$ m, przedstawiona została na rys. 1. Jest to obiekt symetryczny, składający się z trzech kondygnacji: dwóch nadziemnych i jednej podziemnej, stanowiącej piwnicę. Ściany budynku wykonane są z muru konstrukcyjnego, natomiast stropy są żelbetowe. W modelu przestrzennym połączenie ściana-strop wykonano jako przegubowe. Model ten posiada wygenerowaną siatkę MES typu powłokowego, czyli o sześciu stopniach swobody w każdym z węzłów (trzy związane z przemieszczeniem oraz trzy z obrotem), znajdujących się na wierzchołkach kwadratowych ES. Bok tego kwadratu wynosi 15 cm. Sumaryczna liczba stopni swobody wynosi ponad 200 000.



Rys. 1. Geometria modeli budynku niskiego: a) przestrzennego, b) tarczowego
Fig. 1. Geometry of low buildings models: a) the spatial, b) planar one

Połączenie budynku z podłożem zrealizowano przez zastosowanie kontaktu sprężystego. Szczegóły przedstawia rys. 2. Grunt reprezentowany jest przez kontakt sprężysty, wymodelowany pomiędzy elementem nieodkształcalnym a modelem obiektu. Charakterystyka podłoża opisana jest przez podatność gruntu o składowej pionowej 15 MPa/m^2 oraz składowej poziomej stanowiącej 70% wartości pionowej.

Ten rodzaj połączenia pozwala na uwzględnienie tarcia wynikającego z bezpośredniego kontaktu gruntu z budynkiem. Współczynnik tarcia w przypadku elementu poziomego wynosi 0,7, natomiast pionowego 0,5. Obciążenie w postaci wymuszenia kinematycznego przykładane jest do elementu nieodkształcalnego, co powoduje różne odkształcenia krawędzi fundamentu budynku. Taka sytuacja nie jest możliwa w przypadku obciążenia bezpośrednio, przyłożonego do dolnej krawędzi modelu.



Rys. 2. Szczegół modelowania warunków podporowych modelu

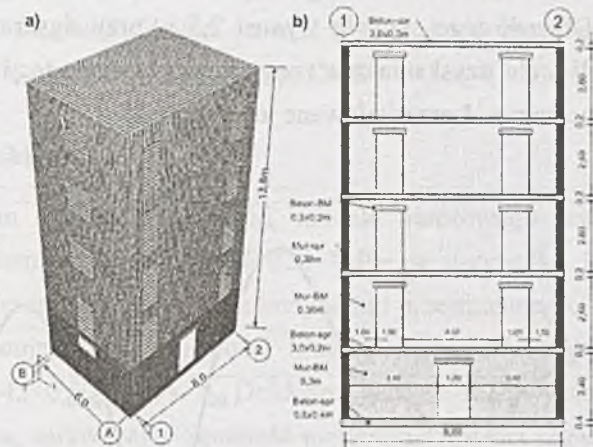
Fig. 2. Detail of the support conditions model

Z modelu przestrzennego wydzielono ścianę zewnętrzną, znajdującą się w osi nr 1 (zgodnie z rys. 1). Dało to podstawę modelowi tarczowemu. Zachowano w nim geometrię, rodzaj i wielkość elementów skończonych (otrzymano 13 000 stopni swobody) oraz typ połączenia z podłożem. Model tarczowy zawiera część stropów oraz ścian prostopadłych do tej analizowanej.

2.3. Charakterystyka budynku wysokiego

Analizowany budynek wysoki również jest symetryczny (rys. 3) i stanowi samodzielną (zdylatowaną) część większego obiektu. Jego wymiary gabarytowe wynoszą 8,0 x 6,0 x 13,8 m, a składa się z czterech kondygnacji nadziemnych i jednej podziemnej. Materiały zostały przypisane poszczególnym elementom obiektu podobnie jak w modelu niskim, czyli ściany wykonane są z muru, a stropy oraz wieńce z żelbetu. Połączenie ścian z wieńcami zostało wymodelowane jako przegubowe [4]. Rodzaj elementów skończonych jest identyczny z rodzajem ES w przypadku modelu niskiego. Wymiary siatki na ścianach budynku to 10 x 10 cm, natomiast stropy zostały

podzielone na ES o boku 20 cm. Daje to ponad 300 000 stopni swobody. Podparcie budynku wysokiego wymodelowano tak jak w poprzednim przypadku.



Rys. 3. Geometria modeli budynku wysokiego: a) przestrzennego, b) tarczowego
Fig. 3. Geometry of tall buildings models: a) the spatial one, b) planar one

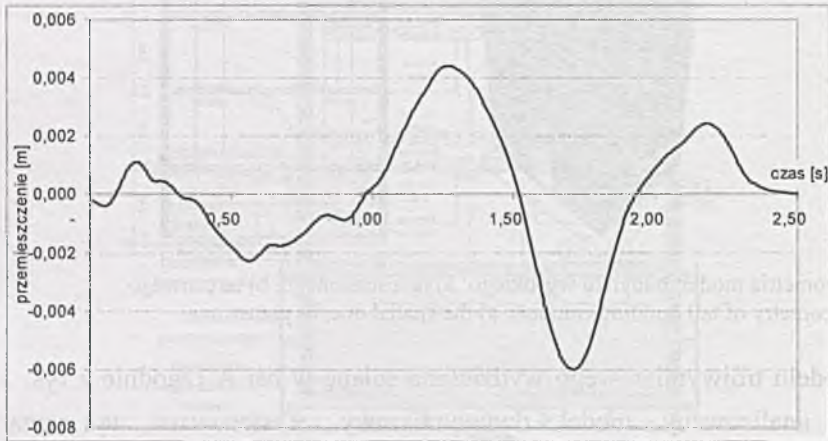
Z modelu trójwymiarowego wydzielono ścianę w osi A (zgodnie z rys. 3), która stanowi analizowany model dwuwymiarowy. Zastosowano tę samą siatkę dyskretyzacyjną i otrzymano około 20 000 stopni swobody.

2.4. Przyjęte obciążenie

Wszystkie modele numeryczne obciążone są w dwóch krokach: w pierwszym przyłożone jest tylko obciążenie statyczne, w drugim dodatkowo obciążenie dynamiczne. W części statycznej uwzględniono tylko obciążenie ciężarem własnym konstrukcji. Dynamika reprezentowana jest przez dwa rodzaje wymuszeń: harmoniczne oraz zarejestrowany na terenie LGOM-u wstrząs parasejsmiczny. Poziome wymuszenie kinematyczne w postaci przemieszczeniowej (o kierunku równoległym do powierzchni analizowanej ściany) zostało przyłożone do elementu nieodkształcalnego.

Przemieszczeniowe wymuszenie harmoniczne w postaci sinusoidy zostało dobrane w taki sposób, aby było bliskie strefie rezonansu budynku niskiego. Zostało ono opisane wzorem $u = \sin 357t$. Zadanie rozwiązano przez całkowanie równań ruchu układu dynamicznego metodą MES, przyjmując krok czasowy równy 0,005 s. Czas trwania analizy dynamicznej wynosi 1,5 s, przy czym rzeczywiste wymuszenie harmoniczne trwa 1,0 s, a pozostałą część stanowi swobodne wygaszenie drgań układu.

Drugi rodzaj wymuszenia zastosowany jest do analizy dynamicznej budynku wysokiego. Zarejestrowany wstrząs parasejsmiczny (ograniczony do zakresu, który ma znaczenie w przypadku tego obiektu) został sprowadzony do zmiany przemieszczenia w czasie (rys. 4). Długość tego sygnału wynosi 2,5 s, przy dyskretyzacji czasu na poziomie 0,002 s. W celu uzyskania znacznego poziomu degradacji modelu, wymuszenie przedstawione na rys. 4 przeskalowane jest 3-krotnie.



Rys. 4. Charakter przemieszczenia wprowadzonego jako wymuszenie kinematyczne budynku wysokiego

Fig. 4. Characteristic of the displacements input treated as a kinematics enforcement of tall building

3. Opis procedury

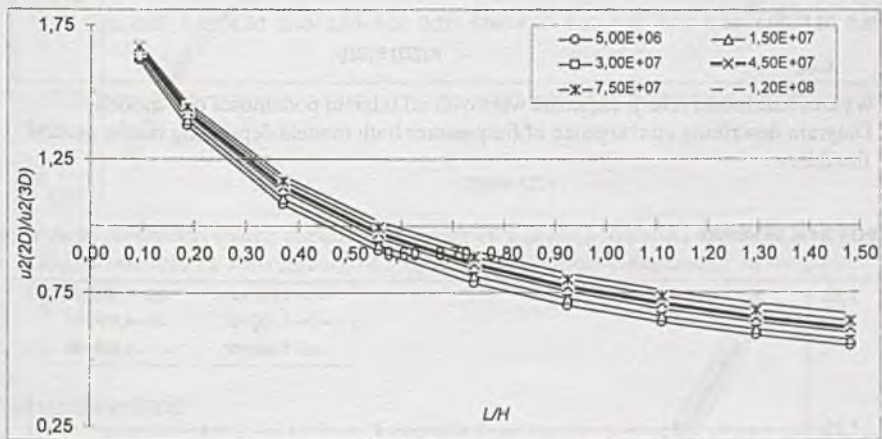
Niech $u_2(2D)$ i $u_2(3D)$ oznaczają odpowiednio wartości pionowego przemieszczenia górnego narożnego węzła modelu tarczowego i modelu przestrzennego. Zamiana modelu 3D na 2D przebiega w dwóch etapach. Pierwszy etap polega na wyznaczeniu zależności, jak zmienia się relacja $u_2(2D)/u_2(3D)$ wraz ze zmianą L/H , przy czym L oznacza długość ściany poprzecznej, uwzględnianej w modelu płaskim, a H wysokość kondygnacji nadziemnej. Obliczenia przeprowadza się w przypadku różnych wartości podatności podłoża. Efektem tych obliczeń są wykresy, z których można odczytać, w jakim przedziale wartości L/H przemieszczenia w obu typach modeli są zbliżone. Oczywiście przedziały te zależą również od przyjętej „zastępczej” podatności podłoża modelu tarczowego. Ostateczny dobór L/H następuje w etapie drugim proponowanej procedury. Do tego celu wykorzystuje się analizę częstości drgań własnych obydwu modeli. Rozwiązanie wielu zadań początkowo-brzegowych pozwala wygenerować zależność (1):

$$\omega_1(2D)/\omega_1(3D) = f(K(2D)/K(3D)) \quad (1)$$

w której $\omega_1(2D)$ i $\omega_1(3D)$ oznaczają kolejno pierwszą częstotliwość drgań własnych modelu tarczowego oraz modelu przestrzennego. Zgodność na poziomie analizy modalnej obu modeli uzyskuje się, modyfikując wartość podatności podłoża modelu tarczowego $K(2D)$ w relacji do modelu przestrzennego $K(3D)$.

3.1. Budynek niski

W pierwszym etapie modyfikacji modelu tarczowego przyjęto 6 wartości zastępczych podatności gruntu od 5÷120 MPa, w przypadku których otrzymano zgodność przemieszczeń pionowych z budynkiem przestrzennego. Zależność długości ściany współpracującej od wysokości kondygnacji nadziemnej L/H zawarta jest w przedziale (0,45÷0,60) - rys. 5. Dokładną wartość L/H wyznaczono po analizie podatności gruntu, sprawdzając zgodność pierwszej częstotliwości drgań własnych modeli przestrzennego i tarczowego (rys. 6).

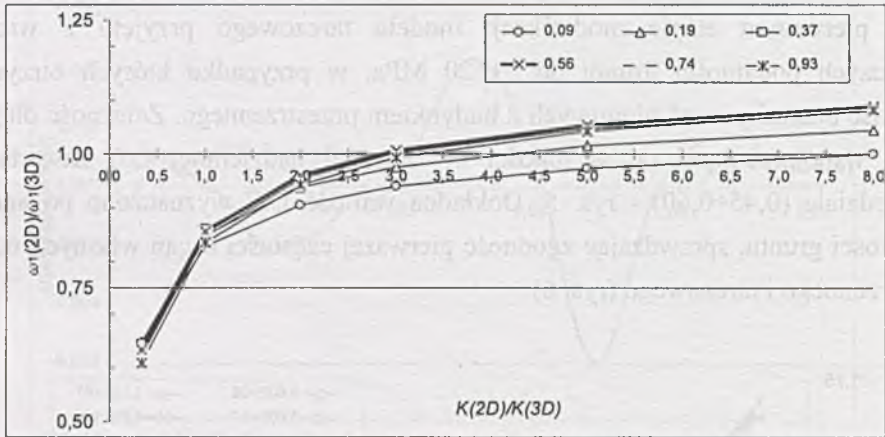


Rys. 5. Wykres określający zbieżność przemieszczeń obu modeli w zależności od długości ściany poprzecznej

Fig. 5. Diagram describing convergence of displacements both models depending on the length of crosswise wall

W celu precyzyjniejszego wyznaczenia podatności zastępczej, analizowane są modele tarczowe, w których udział ściany poprzecznej wzrasta kolejno o pół metra i dzięki temu otrzymuje się zależności L/H na poziomie: 0,09; 0,19; 0,37; 0,56; 0,74; 0,93. Wartość 0,09 oznacza brak uwzględnienia współpracy ściany poprzecznej. W zależności od wartości ilorazu L/H , wynoszącej 0,37, kolejne krzywe na rys. 6 charakteryzują się tym, że odcięte, odpowiadające rzędnym $\omega_1(2D)/\omega_1(3D) = 1,0$,

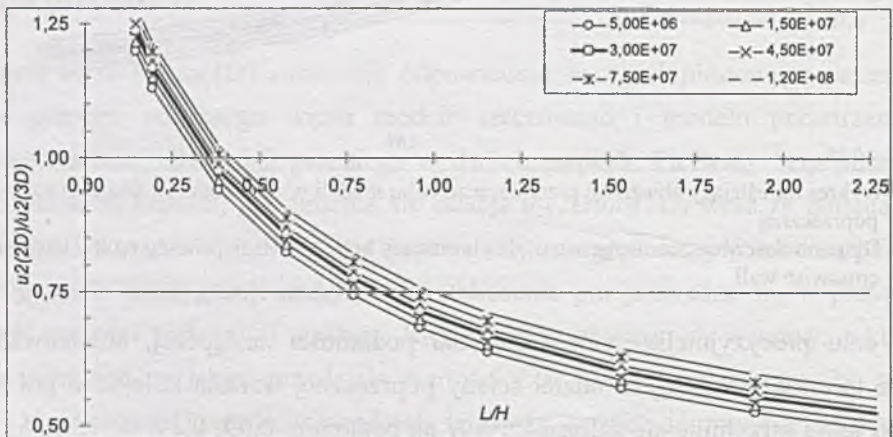
przyjmują wartość około $K(2D)/K(3D) = 3$. Oznacza to, że wartości pierwszych częstotliwości drgań własnych obu modeli są sobie równe, gdy zastępcza podatność gruntu w modelu tarczowym jest 3,0 razy większa niż w modelu przestrzennym. Tym samym zachodzi jednoczesna zgodność obu warunków (przemieszczeniowego i modalnego) w przypadku $L/H = 0,56$ oraz przyjęciu zastępczej podatności gruntu modyfikowanej tarczy równej 45 MPa.



Rys. 6. Wykres zależności relacji częstotliwości własnych od udziału podatności obu modeli

Fig. 6. Diagram describing convergence of frequencies both models depending on the ground flexibility

3.2. Budynek wysoki

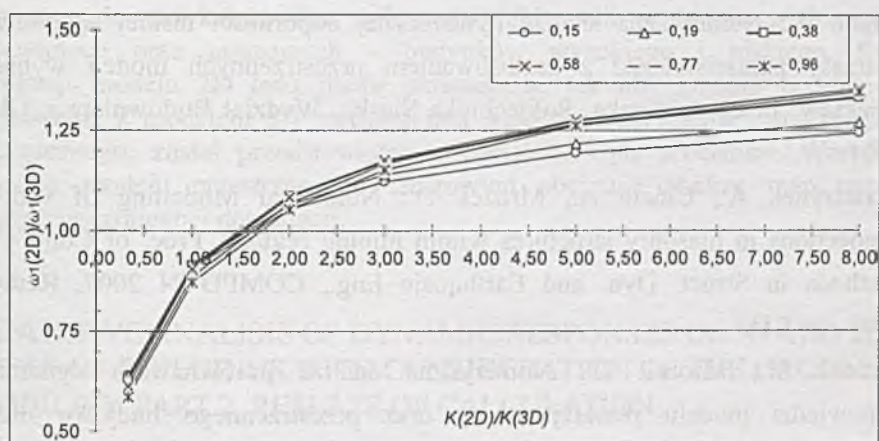


Rys. 7. Wykres określający zbieżność przemieszczeń obu modeli w zależności od długości ściany poprzecznej

Fig. 7. Diagram describing convergence of displacements both models depending on the length of crosswise wall

Podobną analizę przeprowadzono w przypadku budynku wysokiego. Również tutaj zastosowano 6 (takich samych, jak w budynku niskim) zastępczych wartości podatności gruntu. Tym razem zgodność przemieszczeń uzyskano przy wartości w zakresie ok. $0,35 \div 0,45$ (rys. 7).

Analizowano także zależności L/H wynoszące 0,15; 0,19; 0,38; 0,58; 0,77; 0,96 i otrzymano przecięcie się grupy wykresów z rzędną o wartości 1,0 w okolicach ilorazu $K(2D)/K(3D)$ wynoszącego ok. 1,5 (rys. 8). W przybliżeniu założono, że poprawną wartością zależności L/H w przypadku modelu tarczowego budynku wysokiego jest $L/H = 0,38$, przy zastępczej podatności gruntu na poziomie $22,5 \text{ MPa/m}^2$.



Rys. 8. Wykres zależności relacji częstotliwości własnych od udziału podatności obu modeli

Fig. 8. Diagram describing convergence of frequencies both models depending on the ground flexibility

4. Podsumowanie

Przedstawiona procedura zamiany modelu przestrzennego na modyfikowany model tarczowy została zastosowana w dwóch typach budynków: niskim oraz wysokim. Porównując rozmiary zadania wsadowego, otrzymujemy 15-krotnie mniejszą liczbę stopni swobody na korzyść zadania 2D, co ma znaczenie podczas długich i obszernych analiz dynamicznych. Dostosowanie odpowiedzi statycznej oraz dynamicznej modelu 2D do modelu 3D odbywa się przez analizę przemieszczeniową i analizę modalną. Ten sposób pozwala na jednokrotne rozwiązanie obszernego modelu powłokowego oraz potwierdza konieczność modyfikacji modelu tarczowego. Dostrojenie uzyskuje się przez uwzględnienie współpracy ścian poprzecznych do analizowanej (rys. 5 i rys. 7) oraz wprowadzenie zmodyfikowanej podatności

podłoża (rys. 6 i rys. 8). Niedoszacowanie w zakresie samej analizy modalnej, w przypadku braku modyfikacji, może wynieść 35÷40% (rys. 6 i rys. 8). Taka różnica spowoduje zdecydowaną rozbieżność odpowiedzi podczas obciążenia dynamicznego.

BIBLIOGRAFIA

1. Lubliner J., Oliver J., Oller S., Oñate E.: A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 25, 1989, p. 299-329.
2. Fenves L., Lee J.: A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams. *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 27, 1998, p. 937-956.
3. Cińcio A.: Numeryczna analiza dynamicznej odporności niskiej zabudowy na wstrząsy parasejsmiczne z zastosowaniem przestrzennych modeli wybranych obiektów. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Gliwice 2004.
4. Wawrzynek A., Cińcio A., Mrozek D.: Numerical Modelling of wall-floor connections in masonry structures within mining regions. *Proc. of Conf. Comp. Methods in Struct. Dyn. and Earthquake Eng., COMPDYN 2007, Rethymno 2007* – on CD.
5. Mrozek M., Mrozek D.: Numeryczna analiza porównawcza dynamicznej odpowiedzi modelu płaskiej ściany oraz przestrzennego budynku niskiego w zakresie pozasprężystym. Praca magisterska pod kierunkiem A. Cińcio, Biblioteka KTKB, Politechnika Śląska, Gliwice 2006.
6. Cińcio A., Mrozek M., Mrozek D.: Analiza wrażliwości odpowiedzi układu dynamicznego w zakresie pozasprężystym na gęstość podziału dyskretnego w MES. *Proc. 5th International Conference on New Trends in Static and Dynamic of Buildings*, Bratislava 19-20.10. 2006, p. 65-68.
7. Mrozek D. Porównanie dynamicznej odpowiedzi ściany budynku opisanej modelami przestrzennym i płaskim. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Budownictwo*, z.112, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007; s.169-176.

Obliczenia numeryczne wykonano w Akademickim Centrum Komputerowym AGH-Cyfronet na podstawie przyznanych grantów obliczeniowych nr MNiSW/Sun6800/ PŚląska/083/2007, MNiSW/SG13700/PŚląska/083/2007, a także MNiSW / Sun6800 / Śląska / 084/2007, MNiSW/SG13700/PŚląska/084/2007.