

KATARZYNA DZIADOSZ-KULPA, KRZYSZTOF STYPUŁA*

WPŁYW GRUBOŚCI PŁYTY STROPOWEJ NA ODBIÓR DRGAŃ PRZEZ LUDZI

INFLUENCE OF FLOOR SLAB THICKNESS ON HUMAN RESPONSE TO VIBRATIONS

Streszczenie

W artykule, na przykładzie wybranego budynku, przedstawiono, jak operując sztywnością i masą konstrukcji, poprzez zmianę grubości stropów, można kształtować odpowiedź dynamiczną obiektu. Przeprowadzone obliczenia dynamiczne dotyczyły przykładowego wymuszenia kinematycznego od przejazdu pociągu metra. Dowiedziono, że uwzględnienie obciążeń dynamicznych na etapie projektowania budynku umożliwia skuteczną redukcję wibracji oddziałujących na ludzi przebywających w budynku.

Słowa kluczowe: strop, wymuszenie kinematyczne, odpowiedź dynamiczna, drgania komunikacyjne

Abstract

On the example of a chosen building the authors show how the dynamic response of building can be modified by changing stiffness and mass of structure using different floor slabs thicknesses. Dynamic calculations were performed for exemplary kinematic excitation of ground motion caused by subway train passage. The authors proofed that change of floor slab thickness during the designing process can be an effective way of reduction of vibration influence on people in building.

Keywords: floor slab, kinematic excitation, dynamic response, train vibrations

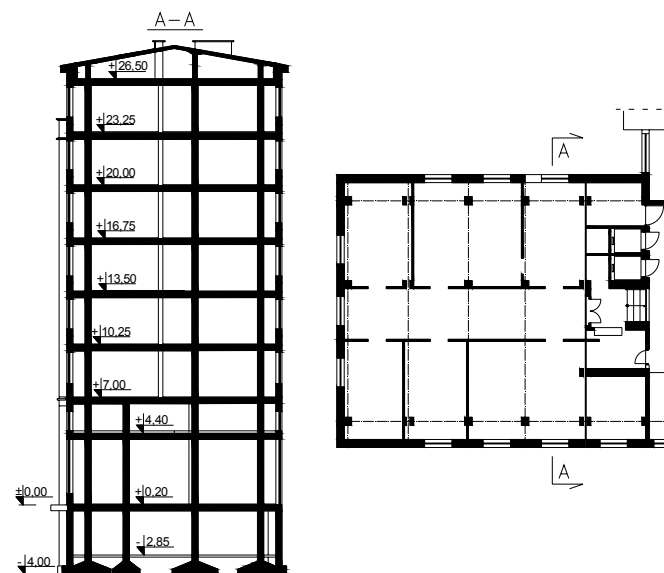
*Mgr inż. Katarzyna Dziadosz-Kulpa, dr hab. inż. Krzysztof Stypuła, prof. PK, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój miast oraz towarzysząca mu rozbudowa i zagęszczanie sieci komunikacyjnej to bezpośrednie przyczyny intensyfikacji negatywnych oddziaływań transportu miejskiego na środowisko i ludzi. Konieczność zwrócenia uwagi na problemy drgań wzbudzanych przejazdami pojazdów komunikacji miejskiej (autobusy, tramwaje, metro) zrodziła się z większej świadomości społeczeństwa, które domaga się zapewnienia komfortu przebywania ludzi w budynkach [9, 10]. W przypadku projektowania budynków w strefie wpływów dynamicznych arterii komunikacyjnych jednym ze sposobów ograniczenia oddziaływania wibracji na ludzi jest odpowiednie przyjęcie konstrukcji stropu, na którym przebywają. Problem ten przedstawiono na przykładzie obliczeń symulacyjnych (analizy numerycznej) budynku wielokondygnacyjnego poddanego oddziaływaniu dynamicznemu od przejazdu pociągu metra.

2. Charakterystyka obiektu

Poddany analizie budynek jest istniejącym obiektem usytuowanym w Warszawie w odległości 15 m od osi tunelu metra. Jest to, wybudowany w latach 50., budynek biurowy, ośmiokondygnacyjny (rys. 1), podpiwniczony, w dobrym stanie technicznym. Budynek ma konstrukcję szkieletową o rzucie wydłużonego prostokąta i wymiarach 64×14 m. Wysokość budynku to ok. 28 m. Szkielet nośny stanowi 20 żelbetowych ram poprzecznych w rozstawie ok. 3 m, usztywnionych płytami stropowymi. Na wspornikach ram i stropach poszczególnych kondygnacji oparto zewnętrzne, ceglane ściany osłonowe. Budynek przy-



Rys. 1. Rzut skrajnej sekcji piętra i przekrój pionowy przez budynek
Fig. 1. Projection of storey outer-section and vertical cross-section of building

kryty jest dachem dwuspadowym. Obiekt posadowiony jest na biegnących wzdłuż budynku – na głębokości ok. 4 m – ławach fundamentowych. Cała konstrukcja podzielona jest na sekcje trzema przerwami dylatacyjnymi.

Poddany badaniom budynek został zamodelowany w programie ALGOR, bazującym na metodzie elementów skończonych. Ściany oraz stropy budynku modelowano elementami skończonymi typu *plate* – są to elementy powłokowe o pięciu stopniach swobody w każdym węźle. Słupy, rygle oraz ławy fundamentowe modelowano elementami typu *beam*, o sześciu stopniach swobody w każdym węźle. W modelu – na podstawie norm [7, 8] – przyjęto charakterystyki materiałowe odpowiadające poszczególnym elementom konstrukcyjnym budynku. Zgodnie z normami [4–6] uwzględniono obciążenia ściankami działowymi i warstwami wykończeniowymi na stropach. Natomiast zgodnie z normą [1] przyjęto obciążenie długotrwałe o wartości 40% obciążenia zmiennego (obciążenie użytkowe). Współpracę fundamentu z podłożem uwzględniono przez podparcie za pomocą sprężyn (przyłożonych w trzech kierunkach x , y i z) o sztywnościach obliczonych na podstawie normy [3].

3. Charakterystyka źródła drgań

Obliczenia dynamiczne modelu wykonano, przyjmując przykładowe wymuszenie kinematyczne zarejestrowanymi składowymi drgań wywołanych przejazdem pociągu metra w tunelu (rys. 2). Maksymalne wartości przyspieszenia wynoszą: w kierunku x – $0,058 \text{ m/s}^2$, w kierunku y – $0,03 \text{ m/s}^2$, w kierunku z – $0,04 \text{ m/s}^2$.

Na rysunku 3 zamieszczono spektra częstotliwości drgań przedstawionych na rys. 2.

W obliczeniach wpływu drgań na ludzi analizowano przebiegi drgań punktów znajdujących się w środkowej części rozpiętości stropów poszczególnych kondygnacji. Jako czas trwania drgań – zgodnie z normą [2] – przyjęto czas, w którym wartości amplitud przyspieszenia były większe od 0,2 wartości amplitudy maksymalnej w danym przebiegu.

4. Przyjęta procedura oceny wpływu drgań na ludzi

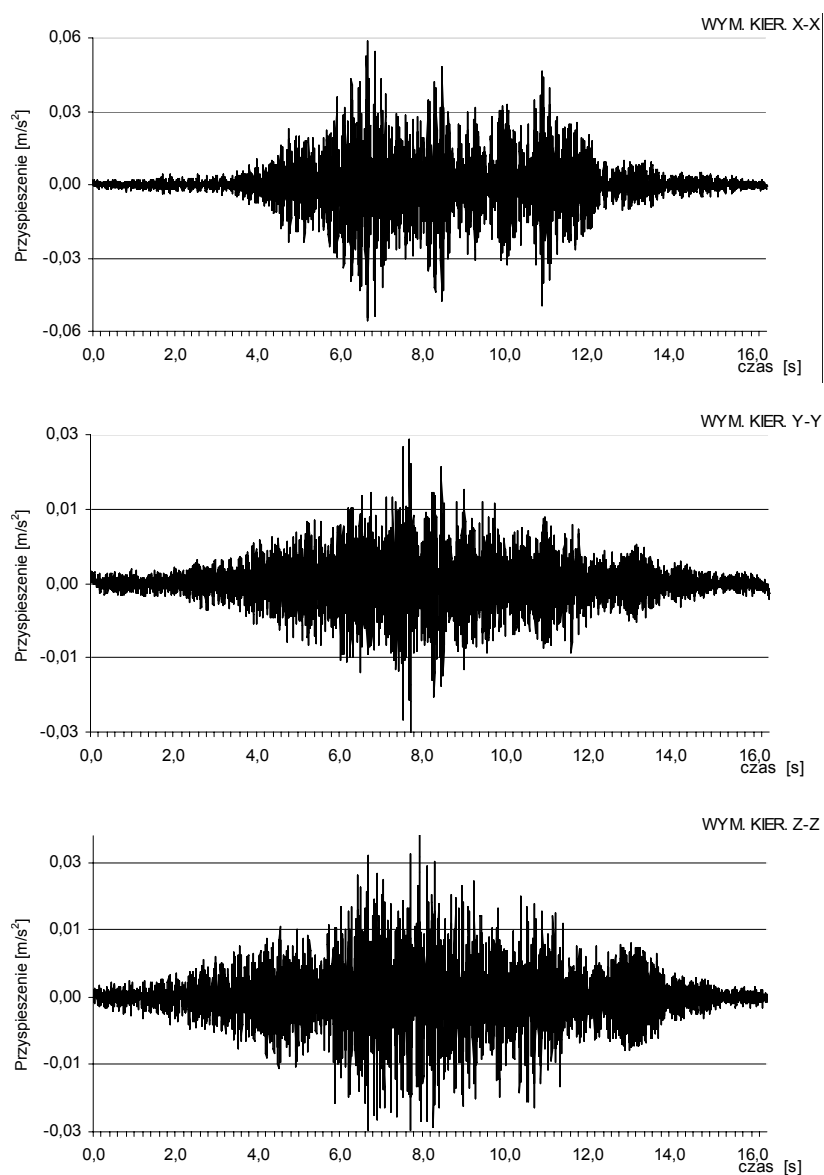
W modelu konstrukcji budynku przyjęto żelbetowe stropy płytowe. Obliczenia prowadzono dla różnych grubości stropów – przyjmując grubość początkową 18 cm, a potem zwiększając ją, odpowiednio, do 20, 22 i 24 cm.

W punktach odbioru drgań przez ludzi obliczano wartości skuteczne przyspieszenia drgań RMS wg (1), w pasmach $\frac{1}{3}$ -oktawowych, dla analizowanego kierunku drgań, w zależności od grubości zamodelowanych stropów

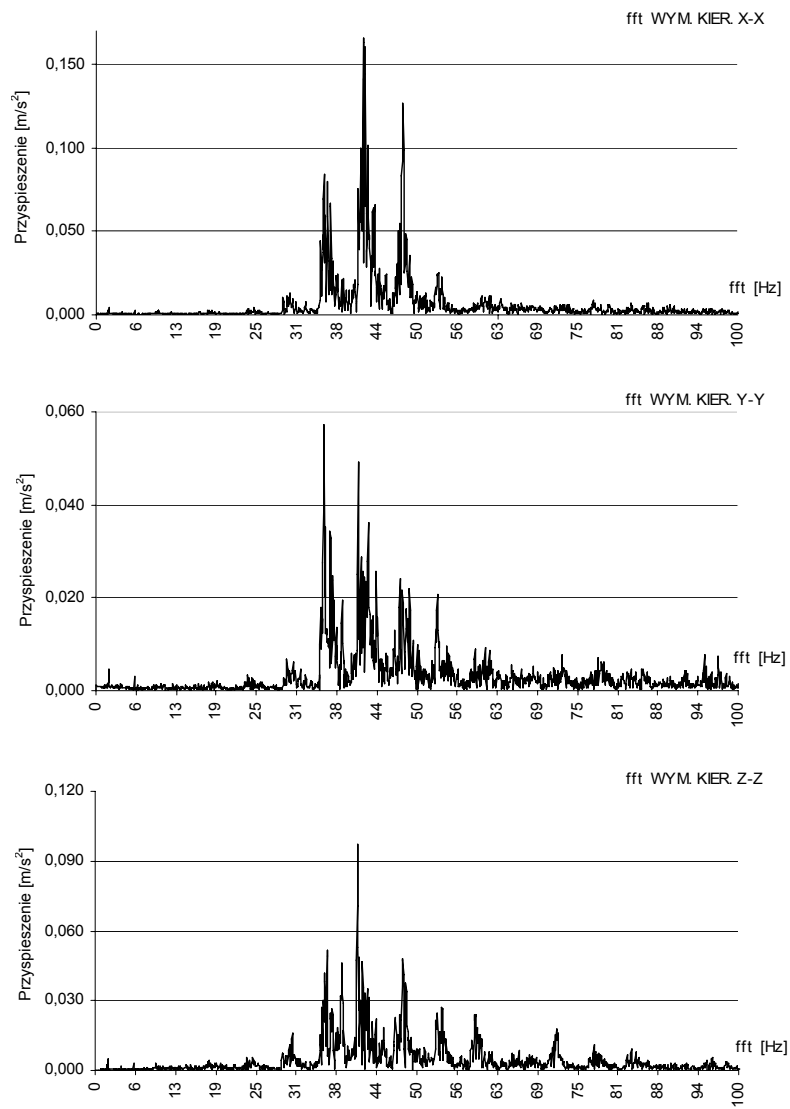
$$y_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T [y(t)]^2 dt} \quad (1)$$

gdzie T to okres uśredniania.

Ocenę wpływu drgań na ludzi znajdujących się w pomieszczeniu (w zależności od kierunku obioru drgań) – zgodnie z normą PN-88/02171 – przeprowadzono, porównując do-



Rys. 2. Wymuszenie kinematyczne – drgania budynku wywołane przejazdem pociągu metra
Fig. 2. Kinematic excitation – building vibrations caused by metro train passage



Rys. 3. Spektra częstotliwości przebiegów drgań przedstawionych na rys. 2
 Fig. 3. Frequency spectra of vibrations presented in Fig. 2

puszczalną wartość przyspieszenia (a_{dop}) z wartością przyspieszenia wyznaczoną z symulacji (a). Oba parametry sprawdzono w każdym paśmie $\frac{1}{3}$ -oktawowym o częstotliwości środkowej f_i wg poniższego wzoru

$$a < a_{\text{dop}} \quad (2)$$

gdzie:

$$a_{\text{dop}} = a_1 n,$$

a_1 – wartość przyspieszenia odpowiadająca progowi odczuwalności drgań przez człowieka dla pasma $\frac{1}{3}$ -oktawowego o częstotliwości środkowej f_i ,

n – współczynnik normowy przyjmowany w zależności od przeznaczenia pomieszczenia, pory występowania drgań i charakteru ich powtarzalności.

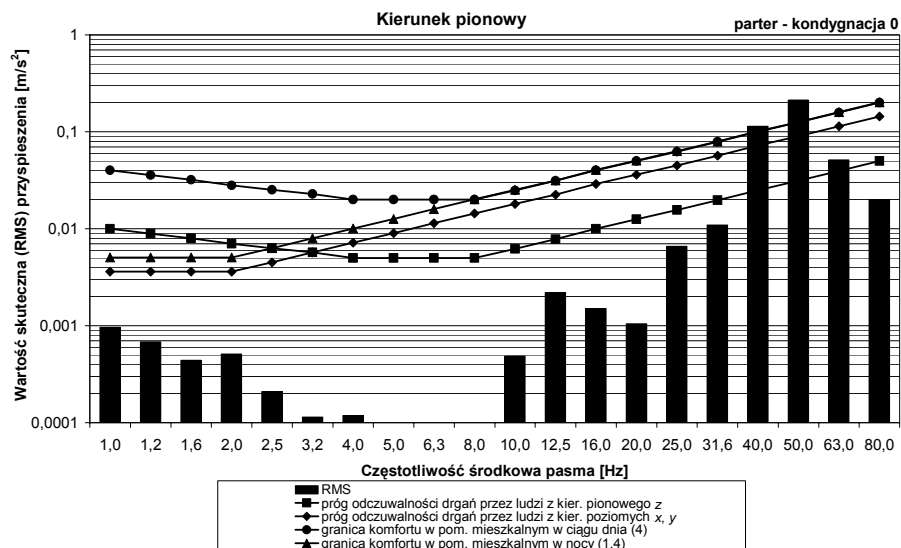
5. Analiza wpływu drgań na ludzi w zależności od grubości płyty stropowej

Spośród wszystkich wyników otrzymanych w wybranych punktach siatki MES wybrano wartości skuteczne RMS przyspieszenia drgań najbardziej niekorzystne w każdym tercjowym paśmie częstotliwości. Największe wartości RMS uzyskano na parterze (kondygnacja 0) w przypadku drgań pionowych stropu. Ze względu na małe wartości RMS przyspieszenia poziomych drgań stropów w dalszej analizie zostały one pominięte. Otrzymane dane zostały naniesione na wykres, którego oś rzędnych przedstawia częstotliwość środkową pasma f_i [Hz], natomiast oś odciętych opisuje wartość skuteczną (RMS) przyspieszenia [m/s^2]. Na wykresach tych (rys. 4–7) naniesiono dolne granice odczuwalności drgań przez ludzi przebywających w budynku w kierunku poziomym x i y oraz pionowym z , a także krzywe określające progi komfortu w pomieszczeniu mieszkalnym. Można zauważyć, że najwyższe wartości przyspieszeń drgań w kierunku pionowym zawierają się w granicach 40–50 Hz.

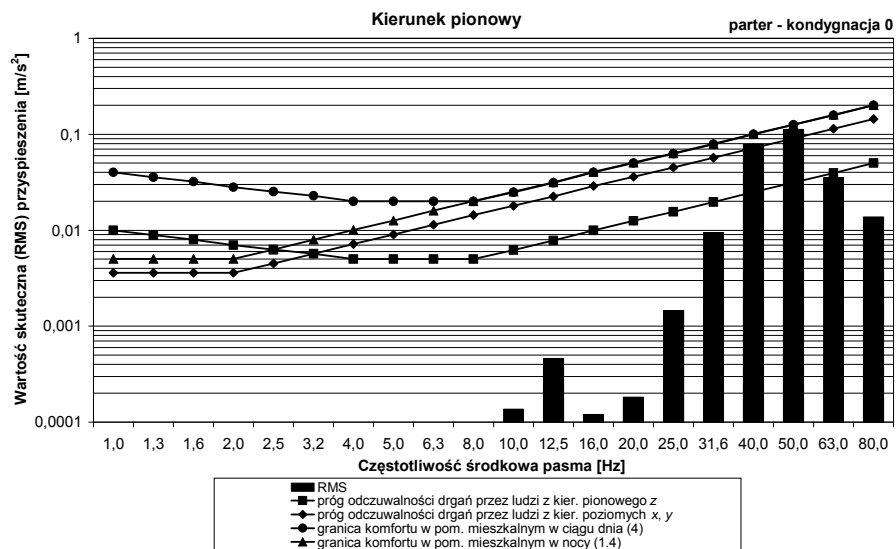
W przypadku stropów płytowych, żelbetowych o grubości 18 cm, zarówno na parterze (oznaczonym jako kondygnacja 0), jak również na pierwszym piętrze, przekroczone zostały progi odczuwalności przez ludzi drgań pionowych, a ludzie przebywający na parterze mogą odczuwać dyskomfort wynikający z przekroczonej wartości dopuszczalnych przyspieszeń drgań pionowych (w ciągu dnia i nocy) w pasmach 40 i 50 Hz (por. rys. 4). Przy przyjęciu grubości płyty równej 20 cm i 22 cm wartości przyspieszeń drgań w kierunku pionowym przekraczają krzywe opisujące progi odczuwania drgań przez ludzi przebywających na parterze. Jednak drgania te zarówno w ciągu nocy, jak i dnia znajdują się poniżej krzywych dyskomfortu dla składowych poziomych i pionowych (rys. 5 i 6).

Analizując wyniki obliczeń w przypadku stropów o grubości 24 cm (rys. 7), zauważyć już można nieznaczne przekroczenie granicy progu odczuwalności drgań pionowych przez ludzi przebywających na parterze.

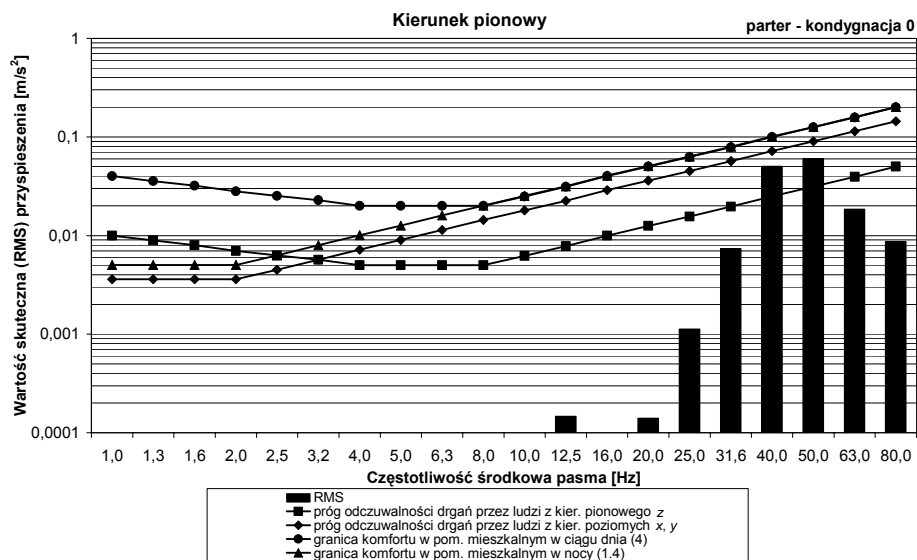
W dalszych rozważaniach otrzymane wartości skuteczne RMS unormowano, dzieląc je przez wartość przyspieszenia odpowiadającą progowi odczuwalności drgań przez człowieka wg [2]. Wraz ze wzrostem wysokości poziomu kondygnacji wartości skuteczne RMS



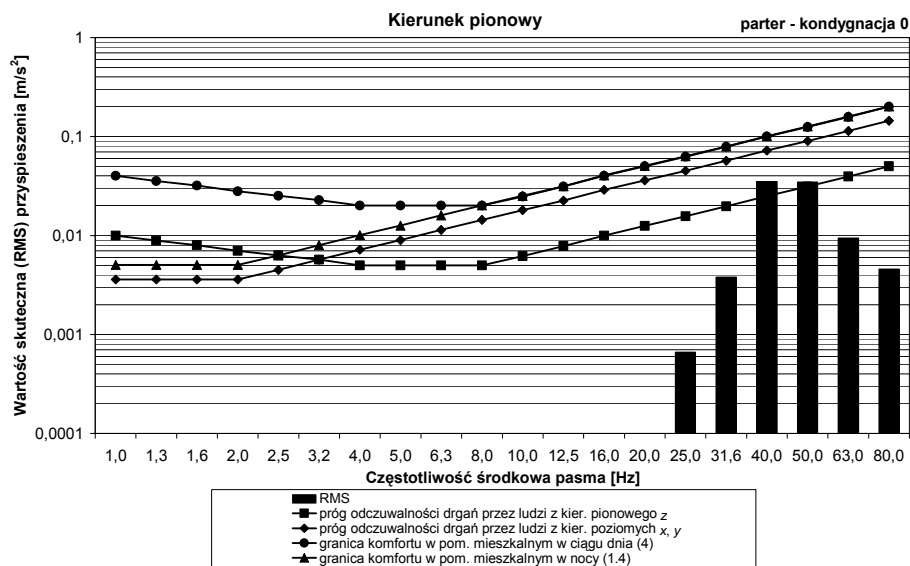
Rys. 4. Wpływ drgań pionowych na ludzi na parterze budynku o stropach o grubości 18 cm
 Fig. 4. Vertical vibration influence on people in first floor of building of 18 cm floor slab thickness



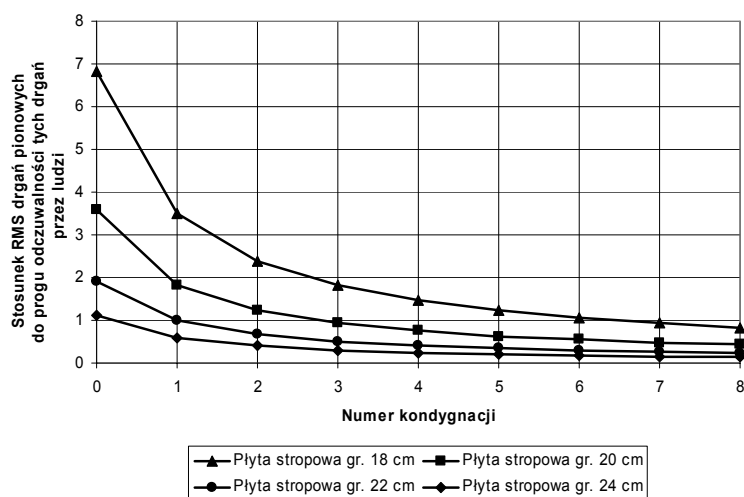
Rys. 5. Wpływ drgań pionowych na ludzi na parterze budynku o stropach o grubości 20 cm
 Fig. 5. Vertical vibration influence on people in first floor of building of 20 cm floor slab thickness



Rys. 6. Wpływ drgań pionowych na ludzi na parterze budynku o stropach o grubości 22 cm
 Fig. 6. Vertical vibration influence on people in first floor of building of 22 cm floor slab thickness

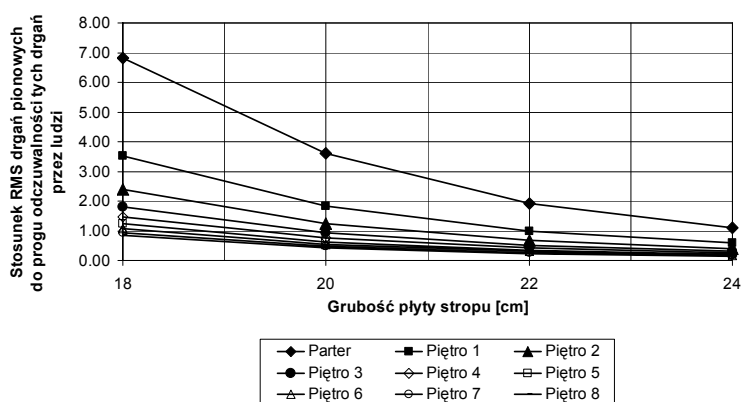


Rys. 7. Wpływ drgań pionowych na ludzi na parterze budynku o stropach o grubości 24 cm
 Fig. 7. Vertical vibration influence on people in first floor of building of 24 cm floor slab thickness



Rys. 8. Zależność unormowanych wartości RMS drgań pionowych od zmiany poziomu kondygnacji przy częstotliwości środkowej pasma 50 Hz

Fig. 8. Relation between normalized RMS value of vertical vibrations and story level for band of central frequency 50 Hz



Rys. 9. Zależność unormowanych wartości RMS drgań pionowych od przyjętych grubości stropów przy częstotliwości środkowej pasma 50 Hz

Fig. 9. Relation between normalized RMS value of vertical vibrations and story level for band of central frequency 50 Hz

przyspieszenia maleją w przypadku każdej z przyjętych grubości stropów (rys. 8 i 9). Jest to zjawisko charakterystyczne w przypadku drgań budynków wywołanych przejazdem pociągu metra w tunelu.

Najbardziej wyraźny spadek unormowanych wartości RMS drgań pionowych występuje w przypadku płyty stropowej o grubości 18 cm. Zwiększenie grubości płyty stropu o 2 cm na kondygnacji parteru daje zmniejszenie unormowanych drgań pionowych o ok. 50%

(rys. 9). Na parterze spadek oddziaływań dynamicznych jest najbardziej wyraźny wraz ze wzrostem grubości płyty. Zwiększenie grubości płyt stropowych na najwyższych kondygnacjach daje niewielki spadek wartości unormowanych drgań pionowych.

6. Wnioski

Przyjęcie odpowiedniej grubości płyty stropowej na etapie projektowania konstrukcji może mieć istotny wpływ na późniejszy komfort ludzi przebywających w pomieszczeniach projektowanego budynku. Zwiększenie grubości płyty stropowej rzędu 2 cm skutecznie obniża poziom vibracji. Przy typowej grubości płyty jest to zwiększenie rzędu 10%. Próba zmniejszenia intensywności drgań stropów w przypadku obiektu istniejącego związana jest z dodatkowymi kosztami wynikającymi z niezbędnych badań dynamicznych, jak również z ograniczoną możliwością zastosowania odpowiednich i skutecznych rozwiązań (por. [12]).

Obecnie przy tworzeniu Planów Ogólnych i Miejscowych precyzowane są przebiegi nowych linii tramwajowych i metra. Informacje te mogą być wykorzystane przy projektowaniu budynków w ich pobliżu. Uwzględnienie w obliczeniach konstrukcji budynku – oprócz obciążeń statycznych – obciążeń dynamicznych spowodowanych w przyszłości przez tramwaje lub pociągi metra może uchronić użytkowników budynku przed negatywnymi skutkami ich późniejszych oddziaływań [11].

Literatura

- [1] PN-85/B-02170 Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- [2] PN-88/B-02171 Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.
- [3] PN-80/B-03040 Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny. Obliczenia i projektowanie.
- [4] PN-82/B-02003 Obciążenia budowli. Obciążenia technologiczne. Podstawowe obciążenia technologiczne i montażowe.
- [5] PN-82/B-02000 Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości.
- [6] PN-82/B-02001 Obciążenia budowli. Obciążenia stałe.
- [7] PN-87/B-03002 Konstrukcje murowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [8] PN-84/B-03264 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [9] Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E., *Ocena wpływu vibracji na budowle i ludzi w budynkach (Diagnostyka dynamiczna)*, ITB, Warszawa 1993.
- [10] Ciesielski R., Maciąg E., *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki*, W KiŁ, Warszawa 1990.
- [11] Stypuła K., *Drgania mechaniczne wywołane eksploatacją metra płytkiego i ich wpływ na budynki*, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria Inżynieria Lądowa nr 72, Kraków 2001.
- [12] Stypuła K., Dziadosz-Kulpa K., *Wpływ konstrukcji stropu płytowego w budynku wielokondygnacyjnym na odbiór przez ludzi drgań od przejazdów metra*, Inżynieria i Budownictwo 10/2006, 553-555.