

DYNAMIC RESPONSE OF FORUM GDANSK STRUCTURE DUE TO RAIL TRAFFIC

**M. MIŚKIEWICZ¹, Ł. PYRZOWSKI², M. RUCKA³, K. WILDE⁴,
J. CHRÓSCIELEWSKI⁵**

This paper presents the study of the impact of vibration induced by the movement of the railway rolling stock on the Forum Gdańsk structure. This object is currently under construction and is located over the railway tracks in the vicinity of the Gdańsk Główny and Gdańsk Śródmieście railway stations. The analysis covers the influence of vibrations on the structure itself and on the people within. The in situ measurements on existing parts of the structure allow us to determine environmental excitations used for validation and verification of the derived FEM model. The numerical calculations made the estimates of the vibration amplitudes propagating throughout the whole structure possible.

Keywords: structural dynamics, FEM analysis, vibrations

¹ PhD., Eng., Gdańsk University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Poland, e-mail: mikolaj.miskiewicz@pg.edu.pl

² PhD., Eng., Gdańsk University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Poland, e-mail: lukasz.pyrzowski@pg.edu.pl

³ DSc., PhD., Eng., Gdańsk University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Poland, e-mail: magdalena.rucka@pg.edu.pl

⁴ Prof., DSc., PhD., Eng., Gdańsk University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Poland, e-mail: krzysztof.wilde@pg.edu.pl

⁵ Prof., DSc., PhD., Eng., Gdańsk University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Poland, e-mail: jacek.chroscielewski@pg.edu.pl

1. INTRODUCTION

Construction of Forum Gdańsk began in 2015. This multifunctional urban complex is located in the centre of the city in the area of Targ Sienny and Targ Rakowy. Its most prominent part is located above the railway tracks between the Gdańsk Główny and Gdańsk Śródmieście railway stations. The railway line serves both passengers and cargo and is characterized by high rail traffic. Due to the fact that the structure's foundations are in the vicinity of the railway tracks, the threat that vibration induced by the passage of trains would transfer to the structure and cause excessive oscillations of the object's structural members loomed [1-6]. To prevent these complications, in the early stages of construction the design of the railway tracks was changed and under-ballast mats were used (see [7,8]); they were made of composite damping material which provided high vibration isolation. However, there was still no assurance that this solution would provide the desired results. The dynamic analysis and dynamic testing [9-11] based on procedures of structural dynamics [12,13] answers the question whether the expected vibration transfer would threaten the structure itself or affect the comfort of those inside the building.

The study includes in situ measurements of vibration excitation in the standing parts of the structure, identification of representative vibration excitations, derivation of numerical models, simulations of the structure's response and assessment of induced vibrations on the structure and people. The computational part was divided into two stages; the first covered the dynamic analysis of a separated tunnel (foundations, walls, and slab), and the second included all buildings which are to be positioned above the tunnel and in its immediate vicinity.

2. STRUCTURE DESCRIPTION

Forum Gdańsk is planned to be a multifunctional urban complex located mainly over railway tracks (see, Fig. 1). The Forum Gdańsk buildings are going to consist the following facilities: a parking deck, a hotel, offices, and a shopping mall. The part of the structure which will be above the general vicinity of the tracks, has been analysed in detail with respect to the potential vibration transmission problems.



Fig. 1. Architectural vision of Forum Gdańsk [urbanity.pl]

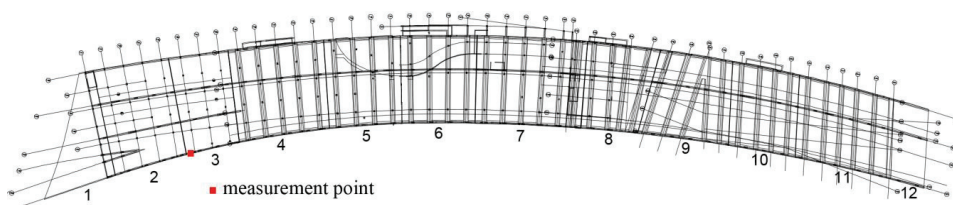


Fig. 2. Structure above the railway tracks – top view

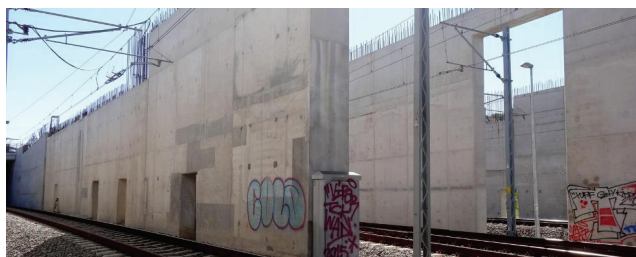


Fig. 3. Tunnel walls at the construction stage at time of analysis

The foundations of the structure are based on linear diaphragm walls finished with capping beams. The structure is divided into twelve separated sections with use of expansion devices (see, Fig. 2). The structural walls are made of monolithic concrete, their thickness varies from 60 to 80 cm. The stage of construction at the point of analysis included only foundations and tunnel walls, as shown in Fig. 3. The first and last sections are used only to transfer installations of a different kind, their structure consists of concrete ribs and plates. The slab of the first two sections (No. 2 and 3) is designed as a monolithic 80 cm thick concrete plate based directly on the walls. The middle sections are designed to carry loads from the further construction stages. Sections 3 to 11 consist of 220x140 cm prestressed beams and 30 cm thick concrete plates. Full horizontal dimensions of the

tunnel are $\sim 400 \times 30 \div 50$ m. The structures of the buildings placed above the tunnel consist mainly of slab-column frames. An example of the cross-section of the structure of the parking deck area is presented in Fig. 4.

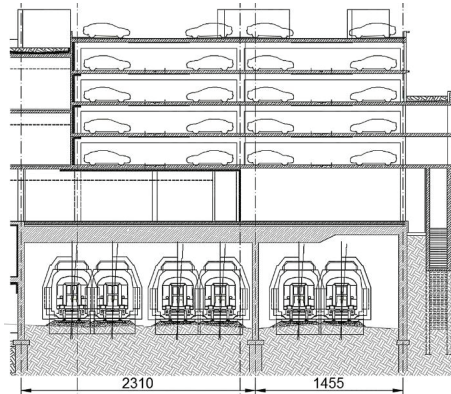


Fig. 4. Cross-section of the tunnel covering the railway tracks and the parking deck above

3. IN SITU MEASUREMENTS

The aim of the experimental investigation was the measurement of vibrations (see [14]) generated by a passing train. Accelerations were measured at one wall of the structure (Fig. 3) 30 cm above the ground. The location was selected so that strong dynamic impacts from train traffic could be recorded. One of the elements affecting measurement point selection was the location of the track junctions in the immediate vicinity of the chosen measurement points. The presence of rail switches may increase the dynamic effects on nearby structures. The total number of measurement points was 4 and the number of registered train passes was 30. Vibration signals were recorded by data acquisition system LMS SCADAS (Fig. 5a) through the use of a three-axial accelerometer (Fig. 5b). The applied sampling rate was 512 Hz.



Fig. 5. Data acquisition system LMS SCADAS (left) and accelerometer PCB model 356B18 (right)

The signals chosen as representative for further FEM analysis revealed the highest values of induced accelerations from typical daily rail traffic (Figure 6a). The location of the measurement point at which these accelerations were registered is shown in Fig. 2. These signals were chosen as representative for further FEM simulations. Signals were recorded in two horizontal directions (X and Y) and in vertical direction Z . The largest amplitudes were observed along the y direction. The signals in the frequency domain are illustrated in Fig. 6b. It can be seen that the signals are characterized by a relatively wide frequency spectrum in a range up to 100 Hz.

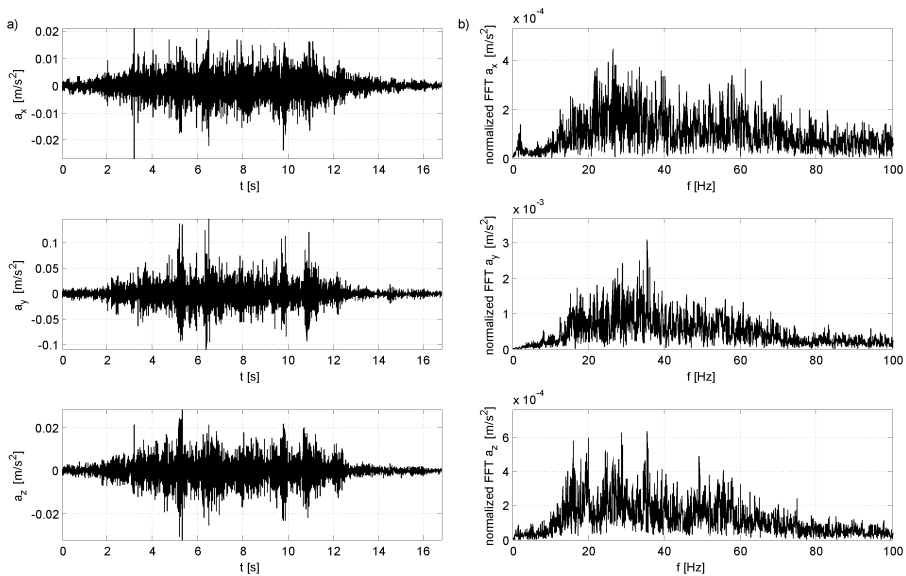


Fig. 6. Acceleration signals registered during train movement in three directions X , Y , Z :
a) in time domain, b) in frequency domain

4. NUMERICAL SIMULATIONS

Dynamic simulations of the structural behaviour of Forum Gdańsk were carried out in a linear-elastic range using the finite element method (FEM) [15] through the use of Sofistik software [16]. The geometric parameters, material characteristics, and ground conditions were adopted on the basis of technical documentation provided by the project's architects. Analysis was carried out in two variants: as an object with buildings placed on the slab covering railway tracks, and as one without. The example models of section No. 3 are presented in Fig. 7.

The FEM model of the sections was derived using shell and beam elements. Under the terms of the correct application of FEM formalism, solution convergence was checked. This analysis included the influence of mesh density and the effect of boundary condition modelling, i.e. simplifications in foundation modelling and interactions of individual sections on each other at the global and individual (local) dynamic response. Due to the lack of complete information about the expansion systems in the structures above the tunnel, the assumption was made that the worst possible outcome from the structural behaviour point of view is to be analysed. Dilatations of the tunnel are also the dilation lines fitting the entire structure.

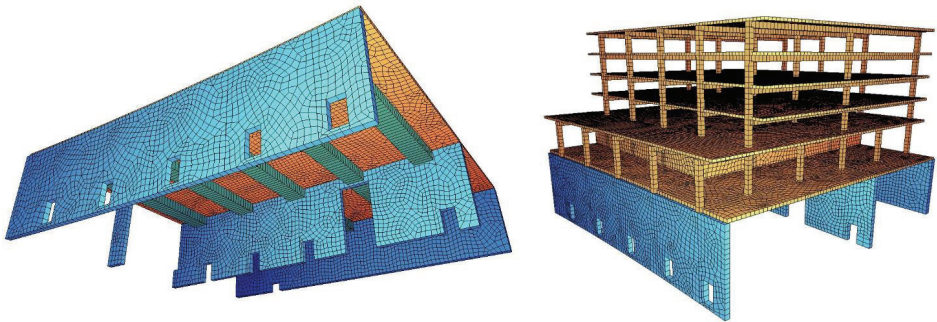


Fig. 7. Models of section no 3 without (left) and with (right) buildings placed on the slab

The use of detailed computational FEM models allowed us to take into account spatial mass distribution and stiffness of the objects. Simulations were performed adequately with regard to the measurements. Ground vibrations were forced in three directions X , Y , and Z , using the measurement acceleration signals (kinematic load) recorded in situ. Calculations in the time domain were performed using the Newmark method, with a time step of 0.001 s taking into account Rayleigh's proportional damping.

5. INFLUENCE OF VIBRATION ON THE STRUCTURE

In order to identify the influence of vibrations on the structure of Forum Gdańsk, the method described in [17] was used. It is based on determining the dynamic coefficient, defined as the ratio of the maximum dynamic displacement to a static deflection. The problem is analysed via applying small vibrations caused by passing trains on the static deformation induced by permanent loads. The authoritative coefficient is assumed to be one which is calculated for the slab wherein extreme accelerations occur.

The highest values of the dynamic coefficient at the point of extreme accelerations and corresponding displacements were obtained for section No. 2. The results of static deformation and deflections from the equilibrium position due to train movement are shown in Fig. 8.

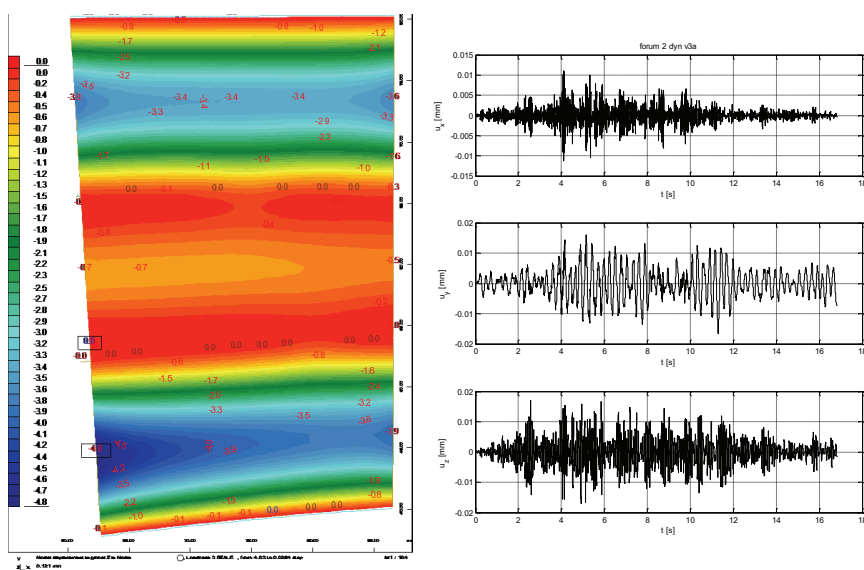


Fig. 8. Static deformation of the slab in section No. 2 (left) and deflections from the equilibrium position due to train movement in the extreme point in X, Y, Z directions (right)

Analysis of displacement changes in the system excited by the measured signals indicates that the values of the ϕ dynamic coefficient are within the range of $1.00042 \div 1.02429$. Finally, it has been accepted that the dynamic factor of $\phi = 1.1$ for the static analysis of the entire system.

6. INFLUENCE OF VIBRATION ON PEOPLE

Evaluation and forecasts of the influence of vibrations on the people inside the buildings in question were performed based on acceleration signals from the FEM simulations [18]. Examples of calculated time histories are shown in Fig. 9 for both considered models (i.e. models with and without buildings placed on the slab). The root mean square (RMS) values of accelerations were analysed at the third-octave band and then compared against the limit values defined in the Polish standard [19]. Figure 10 shows the forecast of vibration influence. The curves denote acceptable levels of vibrations stated by coefficient n . It was found that in the case of the structure without additional buildings the requirements for human comfort are satisfied for both daytime and night hours, for objects such as offices ($n \leq 4$). The value of the coefficient decreased after taking into account buildings placed on the slab.

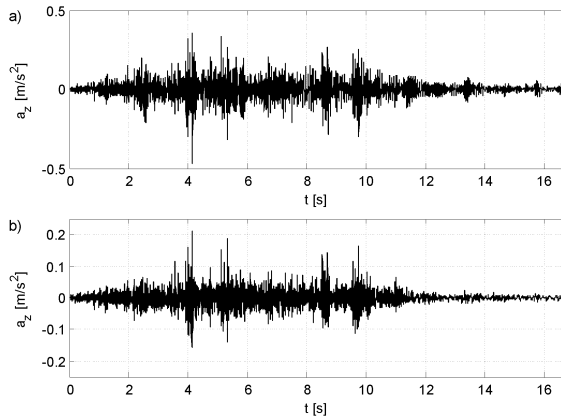


Fig. 9. Vertical accelerations calculated using the FEM model without (a) and with (b) buildings placed on the slab

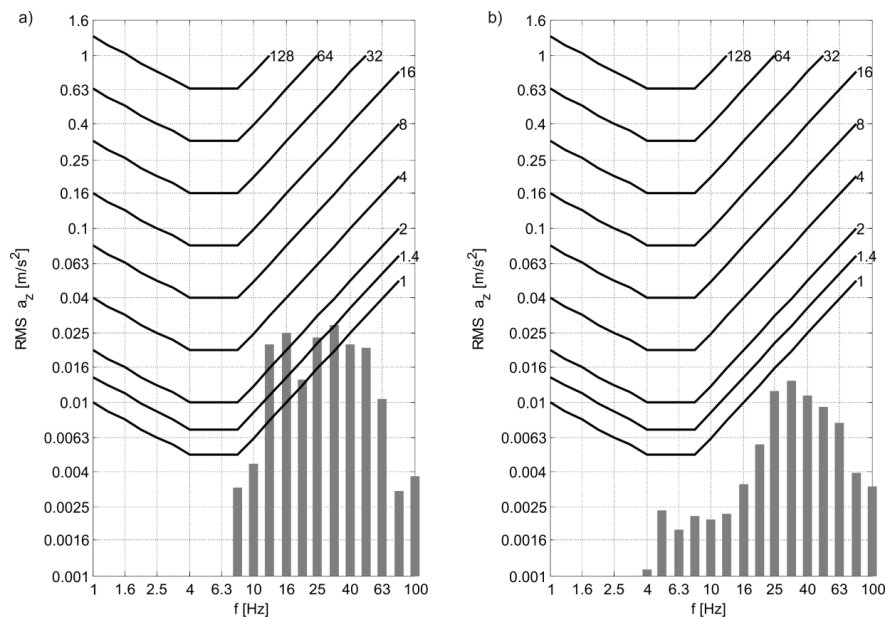


Fig. 10. Vibration influences on people based on vertical accelerations calculated using the FEM model without (a) and with (b) buildings placed on the slab

7. CONCLUSIONS

Dynamic measurements supplemented by FEM simulations of the Forum Gdańsk structure which is currently under construction indicate that dynamic impacts associated with railway traffic do not pose a direct threat to the safety of the structure or to the comfort of the people inside it. Analysis of in situ data gathered from foundation level shows that significant frequency components of the acceleration signal are in the range of 10 to 60 Hz. Small amplitudes of the recorded vibrations indicate that the under-ballast mats used for railway track vibration-isolation effectively protect the structure against dynamic excitations. The determined values of the effective vertical accelerations (in their respective frequency bands) for assessing vibration comfort of the people located inside the buildings above the tunnel indicate that all practical functions foreseen for Forum Gdańsk are fulfilled.

The analysis presented within this paper is as an example of successful cooperation between universities and industry. This case, along with others, may be found in [20,21].

REFERENCES

1. K. Gnyp, „Wpływ przejeżdżających pociągów w sąsiedztwie projektowanego obiektu na obiekt oraz na przebywających w nim ludzi i urządzenia techniczne”, *Budownictwo i Architektura* 13(1): 29-40, 2014.
2. J. Kawecki, K. Stypuła, „Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływanie komunikacyjne”, *Politechnika Krakowska*, Kraków, 2013.
3. J. Vega, A. Fraile, E. Alarcon, L.Hermanns. “Dynamic response of underpasses for high-speed train lines” *Journal of Sound and Vibration* 331: 5125-5140, 2012.
4. A. Zbiciak, Z. Kozyra “Dynamic analysis of a soft-contact problem using viscoelastic and fractional-elastic rheological models” *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 15, iss. 1: 286-191, 2015.
5. J. Korzeb, A. Chudzikiewicz “Evaluation of the vibration impacts in the transport infrastructure environment” *Arch Appl Mech* 85:1331–1342, 2015.
6. M. Superczyńska, K. Józefiak, A. Zbiciak “Numerical analysis of diaphragm wall model executed in Poznań clay formation applying selected fem codes” *Achives of Civil Engineering* LXII, iss. 3: 207-224, 2016.
7. J. Kawecki, K. Stypuła, „Badanie wpływu zastosowania mat wibroizolacyjnych w konstrukcji toru kolejowego na poziom drgań emitowanych do otoczenia”, *TTS*, 2-3/2013.
8. C. Kraśkiewicz, C. Lipko, M. Płudowska, W. Oleksiewicz, A. Zbiciak “Static and dynamic characteristics of resilient mats for vibration isolation of railway tracks” *Procedia Engineering* 153: 317 – 324, 2016.
9. S.K. Au, Y.C. Ni, F.L. Zhang, H.F. Lam. „Full-scale dynamic testing and modal identification of a coupled floor slab system” *Engineering Structures* 37: 167-178, 2012.
10. A. De Sortis, E. Antonacci, F. Vestroni. “Dynamic identification of a masonry building using forced vibration tests” *Engineering Structures* 27: 155-165, 2005.
11. Ł. Pyrzowski, M. Miśkiewicz, J. Chróscielewski “The effect of fishing basin construction on the behaviour of a footbridge over the port channel” *Polish Maritime Research Special Issue 2017 S1* (93), vol. 24: 182-187, 2017.
12. T. Chmielewski, Z. Zembaty, „Podstawy dynamiki budowli”, *Arkady*, Warszawa, 1998.
13. M. Rucka, K. Wilde, „Dynamika budowli z przykładami w środowisku MATLAB®”, *Politechnika Gdańska*, Gdańsk, 2008.
14. Instytut Techniki Budowlanej. Instrukcja 348/98, „Diagnostyka dynamiczna i zabezpieczenia istniejących budynków mieszkalnych przed szkodliwym działaniem drgań na właściwości użytkowe budynków”, Warszawa 1998.
15. J. Chróscielewski, J. Makowski, W. Pietraszkiewicz, “Statyka i dynamika powłok wielopłatowych: Nieliniowa teoria i metoda elementów skończonych” *Biblioteka Mechaniki Stosowanej*, IPPT PAN, Warszawa, 2004.
16. J. Chróscielewski, M. Miśkiewicz, Ł. Pyrzowski, “Wprowadzenie do modelowania MES w programie SOFISTIK” *Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej*, Gdańsk, 2016.
17. P. Paultre, O. Chaallal, J. Proulx, “Bridge dynamics and dynamic amplification factor - a review of analytical and experimental findings” *Canadian Journal of Civil Engineering* 19: 260-278, 1992.
18. J. Kawecki, K. Stypuła. Application of measurement database in dynamic diagnostics and design. *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures – EVACES '09*, Wrocław 2009.
19. PN-88/B-02171: Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach, 1988.
20. M. Miśkiewicz, R. Okraszewska, Ł. Pyrzowski, “Cooperation areas between universities and industry - case studies in the area of civil engineering”, *ICERI2016 Proc.*: 4631–4638, 2016.
21. J. Chróscielewski, M. Miśkiewicz, Ł. Pyrzowski, K. Wilde “Composite GFRP U-shaped footbridge” *Polish Maritime Research Special Issue 2017 S1* (93) Vol. 24: 25-31, 2017.

Received 31.01.2017

Revised 04.06.2017

LIST OF FIGURES AND TABLES:

- Fig. 1. Architectural vision of Forum Gdańsk [urbanity.pl]
Rys. 1. Wizja architektoniczna Forum Gdańsk [urbanity.pl]
- Fig. 2. Structure above the railway tracks – top view
Rys. 2. Konstrukcja przykrycia linii kolejowej – widok z góry
- Fig. 3. Tunnel walls at the construction stage at time of analysis
Rys. 3. Aktualny na okres opracowania analizy stan konstrukcji
- Fig. 4. Cross-section of the tunnel covering the railway tracks and the parking deck above
Rys. 4. Przekrój poprzeczny tunelu linii kolejowej oraz parking
- Fig. 5. Data acquisition system LMS SCADAS (left) and accelerometer PCB model 356B18 (right)
Rys. 5. System pomiarowy LMS SCADAS (z lewej) i akcelerometr PCB model 356B18 (z prawej)
- Fig. 6. Acceleration signals registered during train movement in three directions X, Y, Z : a) in time domain, b) in frequency domain
Rys. 6. Sygnały przyspieszeń zarejestrowane podczas przejazdu pociągu w trzech kierunkach X, Y, Z : a) w dziedzinie czasu, b) w dziedzinie częstotliwości
- Fig. 7. Models of section no 3 without (left) and with (right) buildings placed on the slab
Rys. 7. Modele sekcji 3 bez nadbudowy (z lewej) i z nadbudową (z prawej)
- Fig. 8. Static deformation of the slab in section no 2 (left) and deflections from the equilibrium position due to train movement in the extreme point in X, Y, Z directions (right)
Rys. 8. Mapa deformacji statycznej płyty pokrycia sekcji 2 od obciążeń stałych (z lewej) oraz zmiany przemieszczeń w punkcie, gdzie występują ekstremalne reprezentatywne wartości przyspieszeń (z prawej)
- Fig. 9. Vertical accelerations calculated using the FEM model without (a) and with (b) buildings placed on the slab
Rys. 9. Przyspieszenia pionowe obliczone w modelu MES bez (a) oraz z (b) nadbudową
- Fig. 10. Vibration influences on people based on vertical accelerations calculated using the FEM model without (a) and with (b) buildings placed on the slab
Rys. 10. Wpływ drgań na ludzi na podstawie przyspieszeń pionowych obliczonych w modelu MES bez (a) oraz z (b) nadbudową

ODPOWIEDŹ DYNAMICZNA KONSTRUKCJI FORUM GDAŃSK WYWOŁANA RUCHEM KOLEJOWYM

Słowa kluczowe: dynamika konstrukcji, analiza MES, wpływ drgań na konstrukcję

STRESZCZENIE:

Analizowana konstrukcja to Wielofunkcyjny Kompleks Urbanistyczny „Forum Gdańsk” zlokalizowany w Gdańsku w rejonie Targu Siennego i Rakowego. W ramach budowy kompleksu modernizowany jest układ drogowy i torowy w samym centrum miasta z nadbudową nad torowiskiem płyty stropowej o wymiarach $\sim 400 \times (30 \div 50)$ m. Na płycie mają być zlokalizowane m. in.: parking, hotel, biurowiec i galeria handlowa. Poszczególne sekcje obiektu oddzielają dylatacje, zaś strop zaprojektowano, jako układ płytowy lub płytowo-żebrowy.

Ze względu na ryzyko wzbudzenia drgań konstrukcji przez poruszający się pod nią w nawierzchniowym tunelu tabor kolejowy wykonano analizy zachowania się obiektu. Jej celem było określenie wpływu ruchu kolejowego na konstrukcję przekrycia torowiska i budynki usytuowane na nim oraz na użytkowników tych budynków. Zakres prac obejmował przeprowadzenie identyfikacji wzbudzenia drgań od przejazdu pociągów na istniejącej części konstrukcji oraz stworzenie modeli obliczeniowych (MES) płyty stropowej wraz z obiektami, które mają na niej powstać.

Dynamiczne symulacje obliczeniowe zachowania się konstrukcji przeprowadzono w zakresie liniowo-sprężystym w środowisku metody elementów skończonych (MES). Parametry geometryczne i materiałowe obiektu oraz dane dotyczące warunków gruntowych i posadowienia przyjęto na podstawie dostarczonej dokumentacji technicznej. Symulacje i analizy odpowiedzi dynamicznej układu uwzględniały dwa stany pracy konstrukcji, tj. bez zabudowy oraz z budowlami przewidzianymi do wzniesienia na płycie stropowej.

W opracowanych modelach obliczeniowych stosowano powłokowe i belkowe elementy skończone. Pod kątem poprawności stosowania formalizmu MES prowadzono analizę zbieżności rozwiązań. Badano wpływ gęstości siatki dyskretyzacyjnej, modelowania warunków brzegowych z odniesieniem do rzeczywistego sposobu fundamentowania oraz wpływ poszczególnych, zdylatowanych między sobą, sekcji konstrukcji na ich globalną i indywidualną (lokalną) odpowiedź dynamiczną. Z uwagi na brak danych, co do rzeczywistego systemu i układu dylatacji całego ustroju, skoncentrowano się na analizie najniekorzystniejszego przypadku z punktu widzenia pracy konstrukcji, tj. układu, gdy dylatacje na płycie stropu pokrycia są jednocześnie linią dylatacji całej konstrukcji zabudowy.

Wykorzystując szczegółowe modele obliczeniowe MES uwzględniono przestrzenną charakterystykę rozkładu masy i sztywności obiektu. Symulacje wykonano adekwatnie do przeprowadzonych pomiarów, wymuszając drgania podłoża sygnałem uzyskanym z bezpośrednich pomiarów in situ w trzech kierunkach X , Y i Z w trakcie ruchu taboru. Obliczenia w dziedzinie czasu przeprowadzono metodą bezpośredniego całkowania równań ruchu wykorzystując schemat Newmarka z krokiem czasowym $0,001$ s z uwzględnieniem tłumienia proporcjonalnego Rayleigha.

Do identyfikacji wpływu drgań na konstrukcję Forum Gdańsk wykorzystano metodykę bazującą ona na wyznaczeniu wartości współczynnika wzmocnienia dynamicznego φ definiowanego, jako iloraz maksymalnej wartości przemieszczenia dynamicznego danego elementu układu do jego przemieszczenia statycznego. Zagadnienie sformułowane jest, jako superpozycja małych drgań spowodowanych ruchem pod obiektem taboru kolejowego i statycznych deformacji konstrukcji od oddziaływań stałych. Za miarodajną wartość współczynnika przyjmuje się tę,

która pojawia się w układzie (płytcie, nadbudowie) w miejscu rejestracji ekstremalnych wartości przyspieszeń i sprzężonych wartości przemieszczeń statycznych.

Analiza zmian przemieszczeń układu wymuszanego kinematycznie na podstawie wyników obliczeń wskazuje, że wartości φ dynamicznego współczynnika wzmocnienia mieszczą się w przedziale $1,00042 \div 1,02429$. Ostatecznie zdecydowano o przyjęciu do analizy całego ustroju współczynnika dynamicznego na poziomie $\varphi=1,1$.

Oceniano również wpływ drgań, uzyskanych z symulacji numerycznych, w trzech kierunkach X , Y i Z , zlokalizowanych w reprezentatywnych punktach konstrukcji. Norma PN-88/B-02171 określa zakresy wartości parametrów oddziaływań dynamicznych, które spełniają wymagania związane z zapewnieniem komfortu przebywania ludziom w pomieszczeniach. Podstawą oceny są wyniki analizy częstotliwościowej drgań w miejscu ich docierania do człowieka. Oznaczone wartości skuteczne przyspieszeń drgań tzw. RMS (*Root Mean Square*) w terejowych pasmach częstotliwości porównuje się z wartościami dopuszczalnymi w kontekście spełnienia komfortu przebywania ludzi w pomieszczeniach i wyraża się za pomocą współczynnika n .

Wyznaczone wartości n wskazują, że ustrój w wersji bez zabudowy na płycie nakrywającej torowisko, spełnia warunki do przebywania ludzi, zarówno w dzień jak i w nocy w obiektach typu biura, urzędy itp. Dodatkowo oceniono, że uzyskane na podstawie symulacji wartości RMS dla pomieszczeń typu mieszkania, internaty itp., są spełnione w ciągu dnia i nieznacznie przekroczone w nocy. Ekstremalne wartości współczynnika n zmniejszają się znacznie po uwzględnieniu zabudowy. Stąd można postulować, że po zakończeniu wznoszenia Forum Gdańsk, drgania tam występujące będą w większości przypadków nieodczuwalne przez ludzi przebywających w nadbudowanych nad tunelem obiektach.

Przeprowadzone badania na wznoszonym obiekcie Forum Gdańsk, uzupełnione symulacjami MES, wskazują, że oddziaływania dynamiczne związane z ruchem kolejowym nie stanowią bezpośredniego zagrożenia dla bezpieczeństwa konstrukcji Forum Gdańsk, jak i dla ludzi w nim przebywających. Analiza danych pomiarowych in situ, występujących na poziomie fundamentów, wykazała, że istotne komponenty częstotliwościowe sygnałów przyspieszeń zawierają się w przedziale $10 \div 60$ Hz. Wyznaczone wartości skuteczne przyspieszeń pionowych, w odpowiednich pasmach częstotliwościowych oznaczane z uwagi na ocenę komfortu wibracyjnego ludzi przebywających w obiekcie wskazują, że wszystkie funkcje użytkowe przewidziane dla Forum Gdańsk, zarówno bez zabudowy jak i z zabudową biurową, mogą zostać dopuszczone.