W przypadku realizacji inwestycji komunikacyjnych z zakresu transportu szynowego służby ochrony środowiska wymagają wykonania po zrealizowaniu inwestycji pomiarów kontrolnych drgań w celu sprawdzenia czy spełnione są wymagania normowe dotyczące wpływu drgań na budynki i na ludzi przebywających w tych budynkach. Pomiary takie pozwalają również ocenić skuteczność przeprowadzonych prognoz i zastosowanych środków redukujących drgania. Poniżej przedstawiamy przykłady doświadczalnej weryfikacji prognoz i projektów wibroizolacji wykonanych w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej. („Przykłady doświadczalnej weryfikacji prognozowanych wpływów drgań od transportu szynowego na budynki i ludzi w budynkach” to referat z III seminarium „WIBROSZYN – 2008”, zorganizowanego przez Instytut Mechaniki Budowli Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej.)

Nawierzchnia kolejowa w tunelu średnicowym

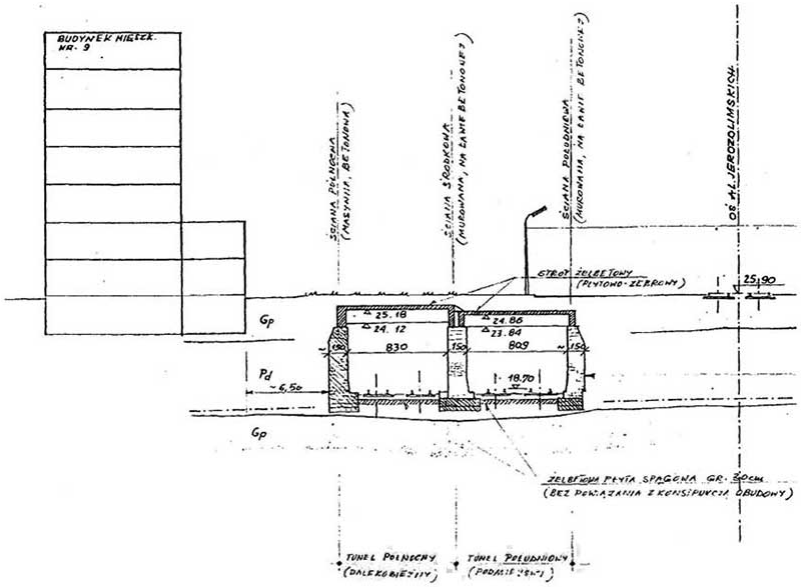
Pierwsza w Polsce realizacja nawierzchni kolejowej z dwustopniową wibroizolacją w postaci systemu podpór blokowych w otulinie EBS firmy Edilon oraz mat wibroizolacyjnych firmy Phoenix miała miejsce w 2007 r. w tunelu średnicowym w Warszawie*, znajdującym się pod jezdnią Alej Jerozolimskich.

Przygotowania do modernizacji nawierzchni w tunelach linii średnicowej rozpoczęto od wykonania pomiarów tła dynamicznego, tj. poziomu dotychczasowych drgań jakim podlegały sąsiadujące z tunelem budynki. Źródłami tych drgań były:

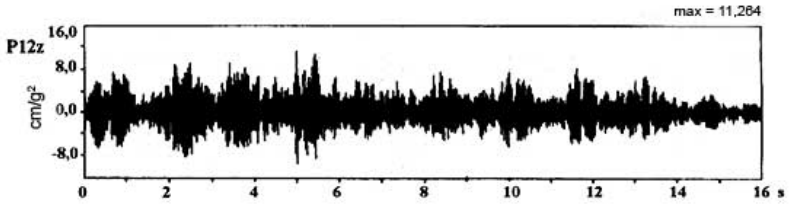
- ruch pojazdów samochodowych wzdłuż Alej Jerozolimskich,
- przejazdy tramwajów wzdłuż Alej Jerozolimskich,
- ruch pociągów po starej nawierzchni w obu tunelach: podmiejskim (południowym) i dalekobieżnym (północnym) - rys. 1.

Phoca PDF

Do badań tła dynamicznego wybrano 8 budynków reprezentatywnych dla zabudowy znajdującej się wzdłuż trasy tunelu średnicowego. Pomiary wykazały, że w przypadku wszystkich badanych budynków drgania komunikacyjne z innych źródeł są pomijalnie małe, a głównym źródłem drgań mających wpływ na budynki są przejazdy pociągów w obu tunelach linii średnicowej. Drgania te były co prawda nieodczuwalne dla konstrukcji budynków, natomiast miały istotny wpływ na mieszkańców budynków usytuowanych w północnej pierzei Alej Jerozolimskich. Szczególnie dotyczyło to położonego najbliżej tunelu budynku S9 - rys. 1. Dla przykładu na rys. 2 przedstawiono przebieg czasowy drgań pionowych stropu budynku S9, wywołanych przejazdem pociągu EZT po torze 4 (tunel podmiejski), a na rys. 3 wyniki analizy wpływu tych drgań na ludzi w porównaniu z krzywymi dopuszczalnego komfortu. Krzywe zaznaczone linią przerywaną dotyczą drgań pionowych (wzdłuż podłużnej osi ciała człowieka), a linią ciągłą oznaczono progi komfortu w przypadku drgań poziomych (prostopadłych do podłużnej osi ciała człowieka). Krzywe najniższe, reprezentują progi odczuwalności przez ludzi drgań pionowych (linia przerywana) i poziomych (linia ciągła).

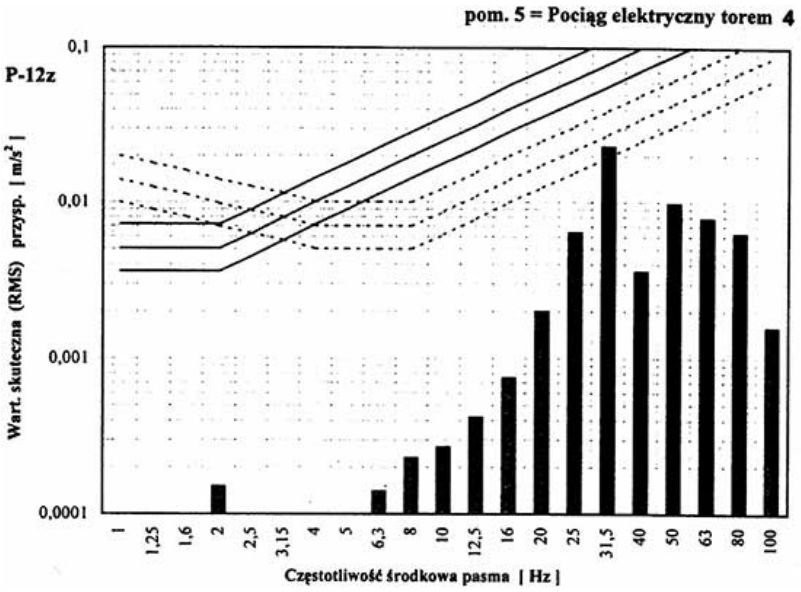


Rys. 1. Fragment poprzecznika w sąsiedztwie budynku S9 [4]



Rys. 2. Przebieg czasowy drgań pionowych stropu parteru budynku S9 [1]

Phoca PDF



Rys. 3. Wpływ drgań pionowych stropu budynku S9 wywołanych przejazdem pociągu EZT po torze 4 w 2003 r. (tradycyjna nawierzchnia tłuczniowa) na ludzi przebywających na parterze budynku [1]

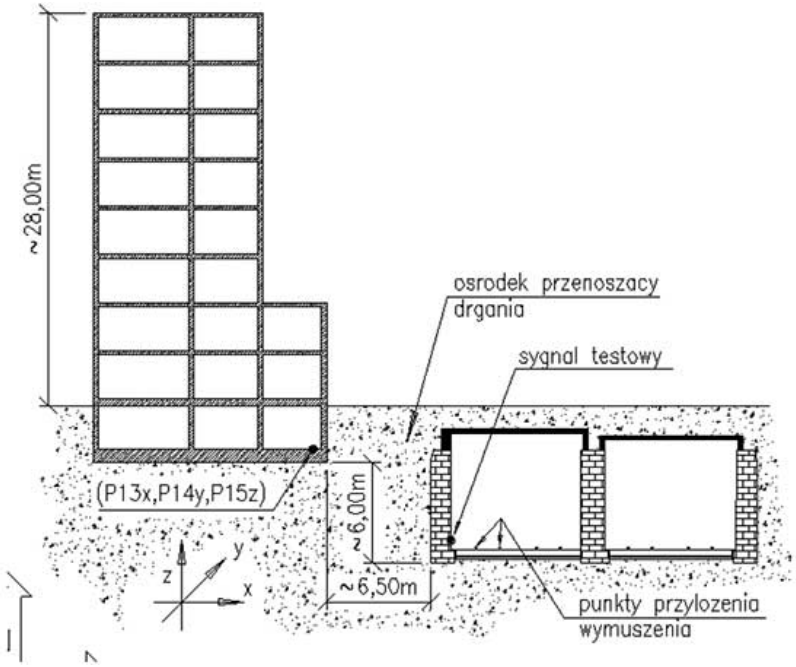
Obliczenia symulacyjne przeprowadzono na modelu budynku S9, przyjmując jako kryterium skuteczności wibroizolacyjnej obniżenie poziomu wpływu drgań na ludzi w tym budynku poniżej progu odczuwalności drgań przez ludzi. Obliczenia przeprowadzono dla różnych wariantów rozwiązań, przyjmując maty wibroizolacyjne dwu różnych firm i zmieniając grubość i sztywność oraz właściwości tłumiące tych mat aż do uzyskania założonej skuteczności. W przypadku każdego wariantu rozwiązania obliczenia wykonywano dwuetapowo.

W I etapie obliczeń najpierw przyjęto i przetestowano (na podstawie wykonanych wcześniej pomiarów drgań) model przedstawiony schematycznie na rys. 4, a następnie wykorzystując ten model analizowano propagację drgań od tunelu do fundamentów budynku i określano prognozowane przebiegi czasowe drgań fundamentu budynku.

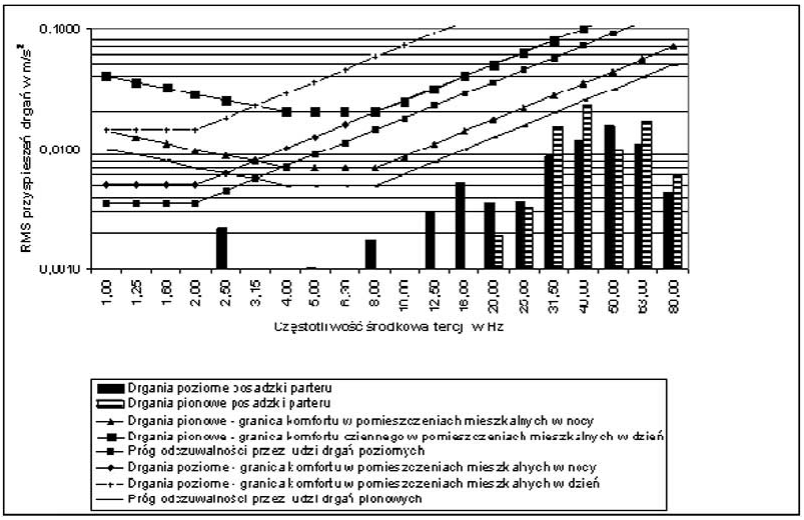
Uzyskane w I etapie przebiegi czasowe drgań przykładano jako wymuszenie do fundamentu w przestrzennym modelu budynku i analizowano wpływ prognozowanych drgań na ludzi przebywających na poszczególnych kondygnacjach, w szczególności na parterze, gdzie wpływ ten był największy.

Podstawą obliczeń symulacyjnych były dane materiałowe dostarczone przez producentów EBS i mat wibroizolacyjnych. Prognozowane efekty wpływu drgań na ludzi, otrzymane z obliczeń symulacyjnych w przypadku przyjętego do realizacji wariantu rozwiązania zamieszczono na rys. 5.

Phoca PDF



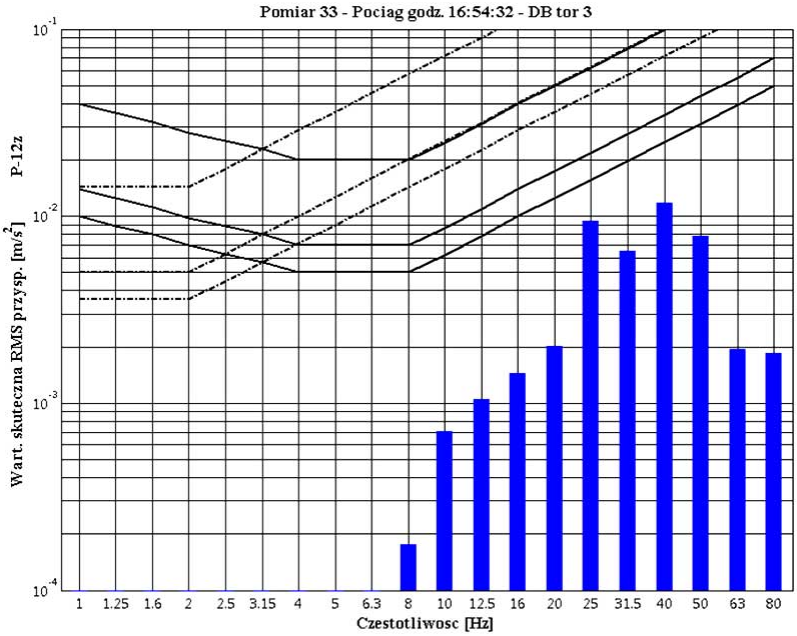
Rys. 4. Model do obliczeń propagacji drgań z tunelu do fundamentów budynku S9 [2]



Rys. 5. Prognozowany wpływ drgań na ludzi w budynku S9 w przypadku docelowo zaprojektowanej konstrukcji nawierzchni z wibroizolacją [2]

Po wykonaniu nowej nawierzchni przeprowadzono w budynku S9 pomiary kontrolne. Najbardziej niekorzystne wyniki tych pomiarów podano na rys. 6

Phoca PDF



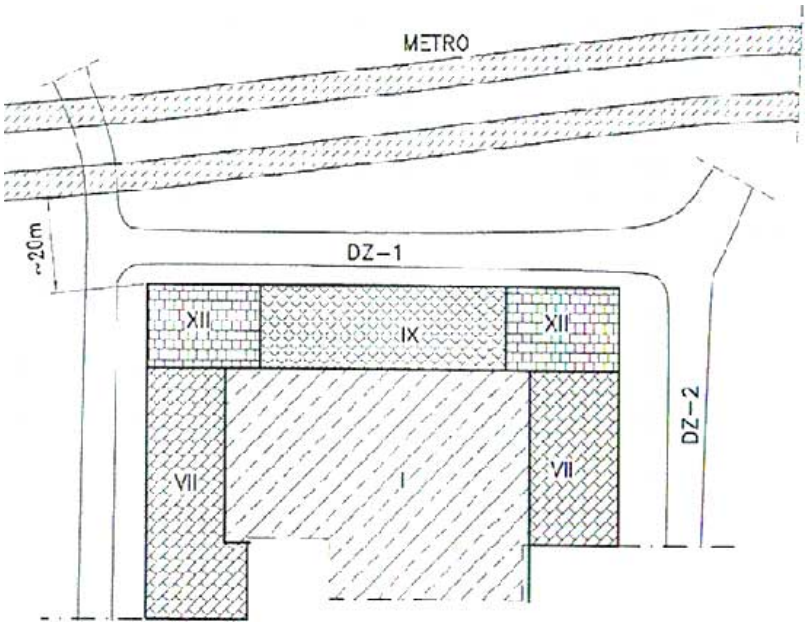
Rys. 6. Zarejestrowany podczas pomiarów kontrolnych w budynku S9 wpływ na ludzi drgań pionowych wywołanych przejazdem pociągu dalekobieżnego po torze 3 (nawierzchnia z EBS i matą wibroizolacyjną) [3]

Jak widać z przytoczonych rezultatów pomiary kontrolne potwierdziły skuteczność zastosowanych rozwiązań wibroizolacyjnych.

Budynki projektowane w strefie wpływów dynamicznych metra linii kolejowych

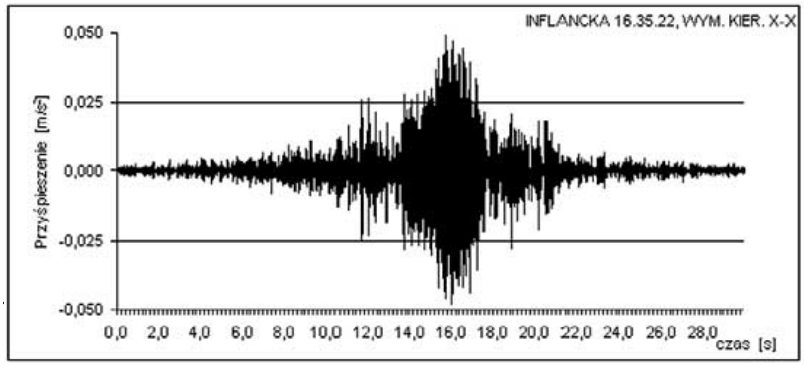
Przedstawiony poniżej przykład dotyczy zespołu budynków mieszkalnych (o VII, IX i XII kondygnacjach) projektowanych w strefie wpływów dynamicznych metra – rys. 7.

Phoca PDF



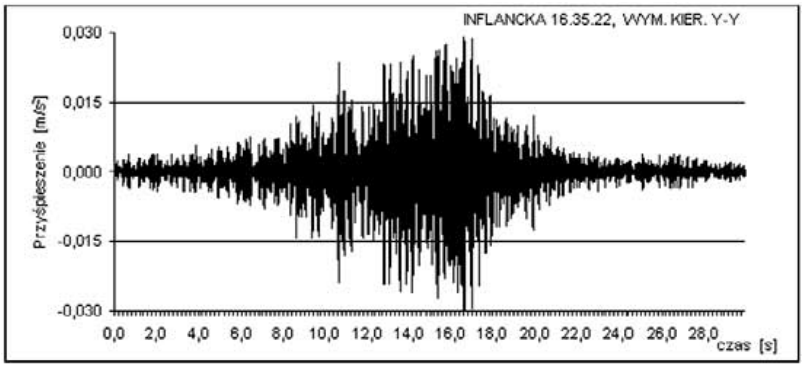
Rys. 7. Plan usytuowania budynków względem linii metra [5]

Przeprowadzono całodobowe pomiary drgań w miejscu przyszłego posadowienia budynków. Z zarejestrowanych przebiegów czasowych drgań wybrano najbardziej niekorzystne (rys. 8, 9, 10) i na ich podstawie określono prognozowane wymuszenie.

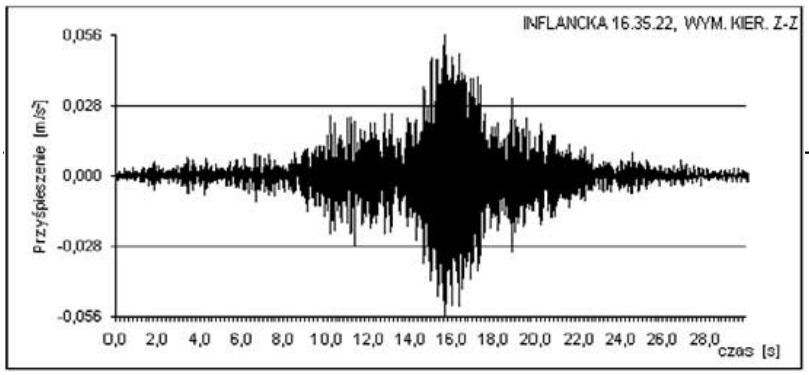


Rys. 8. Wymuszenie w kierunku x (składowa pozioma, prostopadła do osi tunelu metra) [5]

Phoca PDF



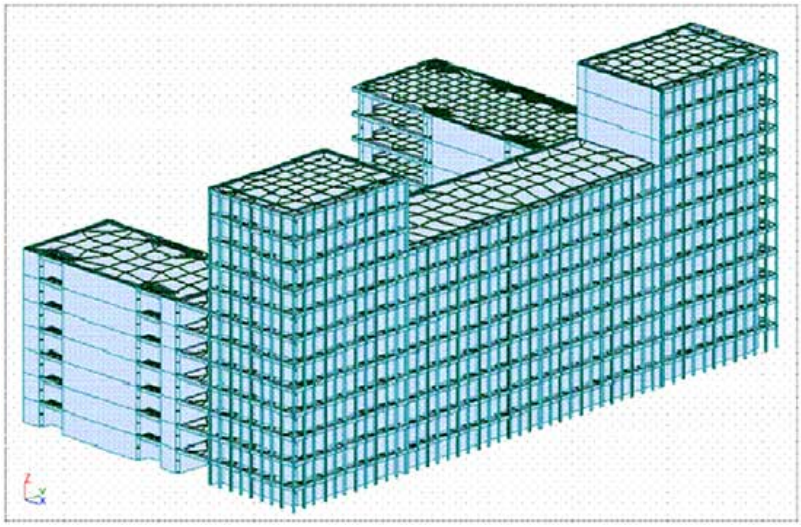
Rys. 9. Wymuszenie w kierunku y (składowa pozioma, równoległa do osi tunelu metra) [5]



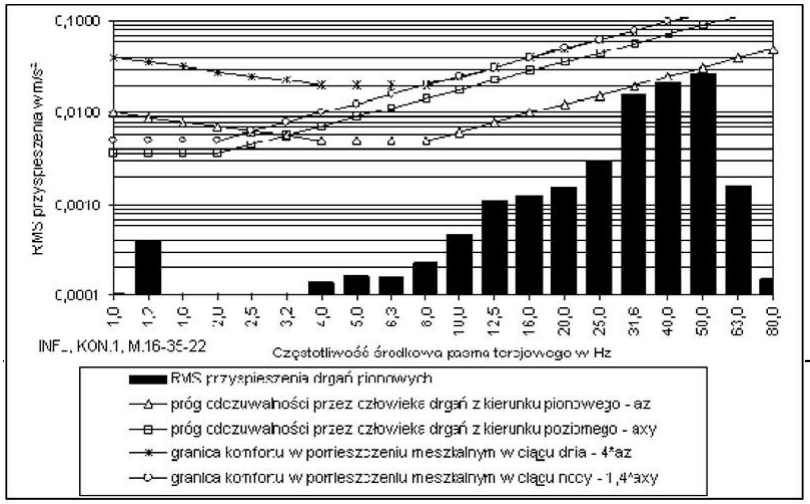
Rys. 10. Wymuszenie w kierunku z (składowa pionowa) [5]

Sporządzono model obliczeniowy obiektu (rys. 11) i obliczono siły dynamiczne obciążające konstrukcje budynków oraz wprowadzono zmiany konstrukcyjne (w tym zmiany sztywności płyt stropowych) w celu uzyskania możliwych do zaakceptowania wyników prognozy wpływu drgań na ludzi w budynkach. Osiągnięty po tych zmianach prognozowany poziom wpływu drgań na ludzi przebywających na parterze obiektu przedstawiono na rys. 12.

Phoca PDF



Rys. 11. Model obliczeniowy analizowanej konstrukcji [5]

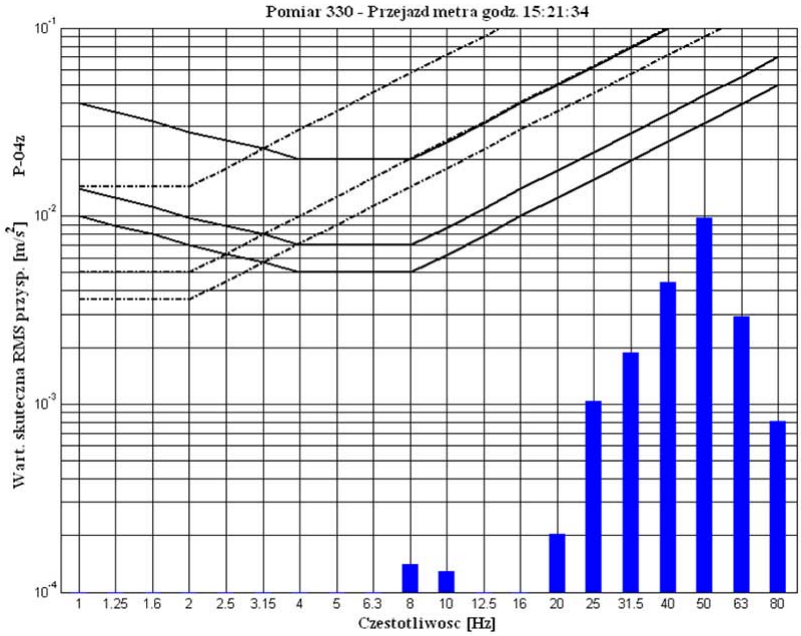


Rys. 12. Prognozowany wpływ drgań pionowych wywołanych przejazdami metra w tunelu na ludzi przebywających na parterze budynku [5]

Jednym z warunków pozwolenia na budowę było przeprowadzenie całodobowych kontrolnych pomiarów drgań w trakcie budowy (po wybudowaniu dolnych kondygnacji) w celu ewentualnej korekty konstrukcji, gdyby zaprojektowane zabezpieczenia przed drganiami okazały się niewystarczające. Pomiary te zostały wykonane. Stan budowy podczas pomiarów przedstawia rys. 13, a otrzymane wyniki badania wpływu drgań na ludzi uzyskane z pomiaru drgań na parterze budynku zamieszczono na rys. 14. Poziom tego wpływu jest niższy od prognozowanego (jest to uzasadnione, gdyż prognoza dotyczy przypadku najbardziej niekorzystnego). Ostateczne pomiary kontrolne przewidziano po zakończeniu budowy obiektu.

Phoca PDF

Rys. 13. Stan zaawansowania budowy podczas pomiarów kontrolnych [6]

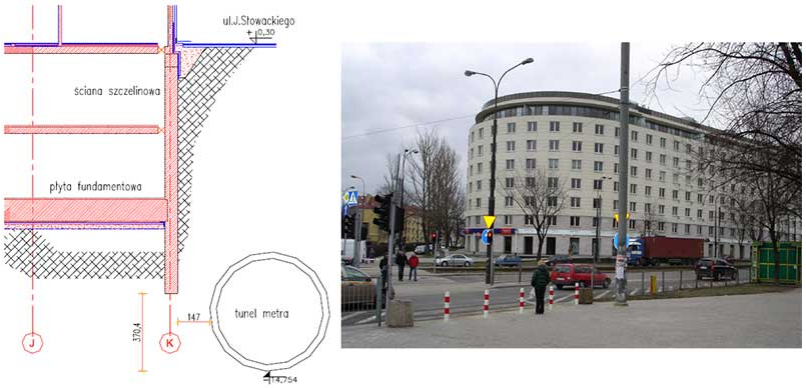


Rys. 14. Uzyskane z pomiarów najniekorzystniejsze wyniki analizy wpływu drgań pionowych na ludzi przebywających na parterze budynku (pomiar 330) [6]

Często inwestorzy nowych budynków odkładają wykonanie pomiarów kontrolnych do momentu pojawienia się po wykonaniu obiektu skarg użytkowników. Brak skarg świadczy wówczas o poprawności wykonanych prognoz i rozwiązań redukujących wpływ drgań. Taki test przeszło kilkadziesiąt obiektów, z których jako przykłady można wymienić warszawskie obiekty:

Phoca PDF

- budynek WAN wybudowany w odległości ok. 1,5 m od ściany tunelu metra (rys. 15),
- budynek hotelowy przy ul. Towarowej w odległości kilkunastu metrów od torów kolejowych,
- budynek BTC przylegający do stacji metra (rys. 16),
- budynki mieszkalne w pobliżu metra przy al. KEN.



Rys. 15. Budynek WAN – usytuowanie względem tunelu metra [7] i widok obiektu

Rys. 16. Budynek biurowca BTC przy al. Niepodległości w Warszawie

***

Obszerne bazy danych pomiarowych będące w dyspozycji Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej oraz opracowana metodyka obliczeń symulacyjnych pozwalają na wiarygodne prognozowanie wpływu drgań na budynki i ludzi w budynkach oraz na projektowanie poprawnych rozwiązań obniżających te wpływy. Badania kontrolne potwierdzają skuteczność rozwiązań zastosowanych w poszczególnych przypadkach.

Sporządzenie wiarygodnych prognoz chroni inwestora przed skutkami niewykonania zabezpieczeń przed drganiami, jeśli są one konieczne, a także przed zastosowaniem rozwiązań nieskutecznych lub zbyt kosztownych.

dr hab. inż. Krzysztof Stypuła, prof. Politechniki Krakowskiej

Instytut Mechaniki Budowli

* Projekt wykonało Biuro Projektów METROPROJEKT Sp. z o.o., a obliczenia wibroizolacji Instytut Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej.

Literatura:

[1] „Badania wpływu na otoczenie (budynki) drgań wywołanych przejazdami pociągów w tunelu średnicowym w Warszawie (część dalekobieżna i podmiejska) dla dotychczasowego rozwiązania konstrukcji nawierzchni kolejowej”, Instytut Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej, Kraków 2003.

[2] Ciesielski R., Stypuła K., Kozioł K., „Analiza zastosowania wibroizolacji w konstrukcji nawierzchni kolejowej w tunelu średnicowym w Warszawie z uwagi na konieczność ograniczenia wpływu drgań mechanicznych na ludzi w budynkach położonych w sąsiedztwie tunelu”, Kraków 2004.

[3] „Badania kontrolne drgań powodowanych przejazdami pociągów po kompleksowej naprawie tunelu średnicowego w Warszawie ze szczególnym uwzględnieniem budynków przy ul. Smolnej 9 i Al. Jerozolimskich 28”, Instytut Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej, Kraków 2007.

[4] Dokumentacja projektowa modernizacji tunelu średnicowego w Warszawie, wykonana przez Biuro Projektów METROPROJEKT Sp. z o.o.

[5] „Analiza prognozowanych wpływów dynamicznych metra na projektowany zespół usługowo-mieszkaniowy przy ul. Inflanckiej w Warszawie. Etap I”, Instytut Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.

Phoca PDF

[6] „Analiza prognozowanych wpływów dynamicznych metra na projektowany zespół usługowo-mieszkaniowy przy ul. Inflanckiej w Warszawie. Etap II. Całodobowe pomiary kontrolne drgań w trakcie realizacji inwestycji”, Instytut Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej, Kraków 2007.

[7] Ciesielski R., Stypuła K., Kozioł K., „Prognoza wpływów dynamicznych metra na projektowany budynek u zbiegu ul. J. Słowackiego i ul. Ks. J. Popiełuszki wraz z oceną wpływu drgań na ludzi przebywających w budynku”, Kraków 2003.

[8] Kawecki J., Stypuła K., Kozioł K., „Ekspertyza w zakresie oceny narażenia na drgania projektowanego obiektu hotelowego przy ul. Towarowej – Srebrnej w Warszawie. Etap II. Pomiary i prognozowanie oddziaływania drgań na obiekt”. Kraków 2002.

Phoca PDF