ARKADIUSZ KWIECIEŃ, akwiecie@pk.edu.pl BOGUSŁAW ZAJĄC, bz@limba.wil.pk.edu.pl JAROSŁAW CHEŁMECKI, jchelmec@gmail.com BARTŁOMIEJ CZADO, bczado@gmail.com Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

ZASTOSOWANIE ZŁĄCZY PODATNYCH W DYLATACJACH POSADZEK BETONOWYCH

awarie budowlane 2013

APPLICATION OF FLEXIBLE JOINTS IN DILATATION OF CONCRETE FLOOR TOPPING

Streszczenie W pracy przedstawiono sposób naprawy błędnie wykonanej dylatacji posadzki w laboratorium. Polegały one na niewykonaniu szczelin dylatacyjnych, których celem było wprowadzenie ochrony antywibracyjnej aparatury pomiarowej wrażliwej na drgania. Zastosowana naprawa przy użyciu polimerowego złącza podatnego okazała się skuteczna. Uzyskany poziom redukcji drgań został oceniony jakościowo i ilościowo przy użyciu dwóch metod diagnostyki dynamicznej.

Abstract In the paper, there is presented repair method of a badly executed laboratory floor. Errors resulted in lack of dilatation, introducing antivibration protection of measurement apparatuses vulnerable to vibrations. The applied repair using polymer flexible joint was efficient. The obtained level of vibration reduction was assessed using two methods of dynamic diagnostics.

1. Wstęp

Eliminacja błędów wykonawczych w praktyce inżynierskiej jest jednym z trudniejszych zadań. Błędy te mogą pociągać za sobą skutki, które są trudne do wyeliminowania lub ich usunięcie generuje dodatkowe koszty. Z takim przypadkiem mieli do czynienia autorzy niniejszego referatu podczas wykonywania prac remontowych w przyziemiu budynku głównego Politechniki Krakowskiej, gdzie przewidziano utworzenie nowego Laboratorium Mechaniki Gruntów Zakładu Współdziałania Budowli z Podłożem. Zostało ono zaprojektowane pod kątem prowadzenia w nim szeregu prac badawczych z wykorzystaniem aparatury wrażliwej na drgania. Pomieszczenie to zagrożone jest oddziaływaniem wibracji pochodzących ze źródeł wewnętrznych od pracujących w laboratorium urządzeń (wzbudniki dynamiczne, ubijaki, kompresor) – [1] i [2]. Do tych ostatnich generujących największe wibracje, należy samobieżna sonda statyczna CPT (Pagani TG-63 150 kN) o masie 1100 kg, napędzana silnikiem spalinowym o mocy 18 kW i poruszająca się na gumowych gąsienicach, której wprowadzenie do pomieszczeń laboratorium (przejazd po posadzce) jest wymagane z uwagi na kalibrację urządzenia i prowadzenie prac modelowych w skali rzeczywistej (rys. 1).

W celu maksymalnego ograniczenia wpływu drgań na pracę precyzyjnej aparatury, zaprojektowane zostały w posadzce laboratorium oddylatowane pola dla stanowisk badawczych, z izolacją antywibracyjną w dylatacjach. Osobne, oddylatowane pole stanowi także ciąg komunikacyjny przebiegający wzdłuż głównego pomieszczenia laboratorium, po którym porusza się sonda samobieżna (rys. 1). Zaprojektowany antywibracyjny układ funkcjonalny posadzki nie został zrealizowany z uwagi na błędy i zaniedbania wykonawcze.



Rys. 1. Widok laboratorium z poruszającą się sondą CPT i lokalizacją stanowiska badawczego

2. Opis błędów wykonawczych i przyjęty sposób naprawy

Przewidziany w projekcie dwuwarstwowy układ posadzki (rys. 2) został zrealizowany w pomieszczeniu laboratorium, ale bez wykonania zaprojektowanych szczelin dylatacyjnych dzielących posadzkę. Było to niedopatrzenie wykonawcy, wykryte podczas odbioru prac końcowych wykończonej posadzki i zweryfikowane badaniami dynamicznymi przeprowadzonymi przez akredytowane Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej (IMB PK) w ramach prac diagnostycznych prowadzonych przez prof. J. Kaweckiego z IMB PK.

Likwidacja powstałych błędów wykonawczych polegała na przecięciu wszystkich warstw (rys. 2) wykonanej już posadzki (monolitycznej) w miejscach zaprojektowanych dylatacji. Poważną komplikacją była konieczność przecięcia instalacji ułożonych pod wylewką betonową i ponowne przywrócenie ich ciągłości. Ponacinanie układu nośnego posadzki podłogowej zapewniało przywrócenie pierwotnego stanu projektowego i odizolowanie antywibracyjne wrażliwej aparatury pomiarowej od źródeł drgań, ale spowodowało równocześnie zagrożenie niestabilności układu konstrukcyjnego podłogi pod obciążeniem.

Odseparowane fragmenty płyt byłyby podatne na nierównomierne osiadania, dlatego konieczne było zastosowanie sprężystego elementu trwale łączącego płyty posadzki, umożliwiającego przenoszenie obciążeń ścinających, aby zapewnić współpracę pomiędzy płytami podczas osiadania. Ponadto, materiał wypełniający szczelinę dylatacyjną musiał zapobiegać dostawaniu się do jej wnętrza cząstek podłoża gruntowego, których transport następowałby pod wpływem dynamicznego obciążenia. Wypełnienie szczelin dylatacyjnych gruntem groziło utratą właściwości wibroizolacyjnych dylatacji. Z tego samego powodu, materiał wypełniający szczelinę dylatacyjną musiał posiadać odpowiednie właściwości tłumiące, a ponadto jego cechy podczas aplikacji musiały zapewnić szczelne wypełnienie szczeliny na jej dnie, które zabezpieczyłoby dylatacje przed penetracją wód gruntowych. Wymagania te spełniła technologia polimerowego złącza podatnego (opatentowana na rzecz Politechniki Krakowskiej) wdrażana przez Konsorcjum PK-NTB, w której do połączenia elementów posadzki w szczelinie dylatacyjnej wykorzystano polimer PM. Złącze podatne zostało zaprojektowane (rys. 2) i wbudowane w szczeliny dylatacyjne, dzięki płynnej konsystencji polimeru PM umożliwiającej wypełnienie szczeliny o szerokości 7÷15 mm. Złącze polimerowe stanowiło trwałe połączenie płyt betonowych, przenoszące duże deformacje i naprężenia ścinające, przy zapewnieniu szczelności połączenia oraz wibroizolacyjnych cech połączenia wymaganych przez użytkownika. Więcej informacji na temat polimerowych złączy podatnych można znaleźć w pracy [3].



Rys. 2. Przekrój przez warstwy posadzki i schemat wypełnienia szczeliny dylatacyjnej oraz widok powierzchni posadzki z wykończeniem szczeliny dylatacyjnej

3. Ocena skuteczności naprawy przy użyciu diagnostyki dynamicznej

Diagnostyka dynamiczna posadzki w laboratorium została wykonana przez akredytowane Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli IMB PK w trzech etapach: przy braku szczelin dylatacyjnych (Etap 1), przy wykonanych szczelinach dylatacyjnych bez ich wypełnienia (Etap 2) oraz przy wykonanym polimerowym złączu podatnym w dylatacji (Etap 3). Badania dynamiczne prowadzono przy wymuszeniu przejazdem samobieżnej sondy CPT po posadzce oraz przy wzbudzeniu drgań młotkiem modalnym PCB086D500 masie 5,5 kg i końcówce wzbudzającej drgania do 250 Hz. Drgania rejestrowano przy użyciu dwóch trój-składowych akcelerometrów PCB356B18 (usytuowanych po obu stronach szczeliny dylatacyjnej oznaczonych, jako: al po stronie wymuszenia dynamicznego i a2 po stronie stanowiska badawczego z wrażliwą na drgania aparaturą) i systemu pomiarowego LMS SCADAS MOBILE (rys. 3).

Ocenę wibroizolacyjnej skuteczności przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych dokonano dwoma metodami diagnostyki dynamicznej. W pierwszej, odniesiono się do zaleceń normowych [4], w których ocenie podlegają wypadkowe wartości skuteczne prędkości zmierzone w trzech kierunkach. W normie [4] zaleca się porównanie wartości uzyskanych z przebiegu czasowego z dopuszczalną wartością prędkości wypadkowej (0,1 mm/s), jednak to podejście nie umożliwia dokonania pełnej oceny wibroizolacji w szerokim paśmie częstotliwości. Z tego względu, zarejestrowane przyspieszenia na kierunkach x, y i z (przetransformowane do dziedziny częstotliwości szybką transformatą Fouriera) zostały przeliczone na wartości skuteczne prędkości w dziedzinie częstotliwości zgodnie z formułą (1), a wartości wypadkowe zgodnie z (2) - [4].



Rys. 3. Pomiar drgań przy wymuszeniu: przejazdem sondy CPT (a) i młotkiem modalnym (b)

$$RMS \ FFT(v) = \frac{FFT(a)}{2\pi f} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$
(1)

$$v_d = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$
(2)

Porównanie obliczonych wypadkowych wartości skutecznych prędkości w dziedzinie częstotliwości dla dwóch punktów pomiarowych (1 i 2) po obu stronach planowanej dylatacji oraz dla trzech etapów diagnostycznych zostało przedstawione na rys. 4. Wskazuje ono, że poziom drgań po obu stronach niewykonanej dylatacji jest podobny (Etap 1), a niewielka redukcja w punkcie 2 wynika z różnej odległości czujników od źródła drgań. Wykonanie dylatacji w postaci nacięcia i pozostawienia pustki powietrznej skutkuje zwiększeniem poziomu drgań zarejestrowanych w punkcie 1 i ich znaczną redukcją w punkcie 2 (Etap 2). Wykonanie złącza podatnego w dylatacji zachowuje niski poziom drgań w punkcie 2, a jednocześnie obniża poziom wibracji w punkcie 1, co wynika z właściwości tłumiących polimeru PM (Etap 3). Widoczne są także niewielkie przesunięcia w pasmach częstotliwości.



Rys. 4. Zmiany poziomów drgań w punktach 1 i 2 dla trzech etapów diagnostycznych, wyrażone wypadkowymi wartościami skutecznymi prędkości w dziedzinie częstotliwości



Rys. 5. Przebiegi czasowe z akcelerometru i młotka modalnego, odpowiadające im spektra FFT oraz obliczona inertancja na podstawie wzoru (3) – wyznaczone w punkcie 1 dla drgań pionowych (Etap 1)

Posłużenie się zaprezentowaną metodą nie umożliwia określenia stopnia redukcji poziomu drgań w całym zakresie częstotliwości, gdyż samobieżna sonda CPT generuje drgania jedynie w wybranych dominujących pasmach, stąd taka ocena redukcji wibracji może być jedynie jakościowa. Dokonanie ilościowej oceny umożliwia druga metoda wykorzystująca funkcję inertancji, która jest zdefiniowana formułą (3) oraz opisana wraz z przykładami zastosowań w [5] i [6]. Wyznacza się ją z sygnałów przyspieszenia i siły (generowanej młotkiem modal-nym) zarejestrowanych w dziedzinie czasu, które po transformacji do dziedziny częstotliwości umożliwiają obliczenie funkcji inertancji także przedstawionej w dziedzinie częstotliwości. Przykład procedury wyznaczania inertancji zobrazowano na rys. 5 dla sygnałów zarejestrowanych w punkcie 1 (Etap 1). Do dalszej analizy porównawczej zostały wybrane jedynie drgania pionowe na kierunku z, gdyż były one o rząd wielkości większe od tych zarejestrowanych na kierunkach poziomych x i y.

$$I(f) = \frac{a(f)}{F(f)} = \frac{FFT(a)}{FFT(F)}$$
(3)

Wyznaczone w punktach 1 i 2 funkcje inertancji dla trzech etapów diagnostycznych zostały przedstawione na rys. 6. Porównanie zmian wielkości poziomów drgań wyrażonych na rys. 4 i 6 wskazuje na zbieżność ocen dokonanych obiema metodami. Tak jak poprzednio zmiany funkcji inertancji pokazują, że poziom drgań po obu stronach niewykonanej dylatacji jest podobny dla Etapu 1, a wykonanie pustej dylatacji skutkuje zwiększeniem poziomu drgań w punkcie 1 i znaczną redukcją w punkcie 2 (Etap 2), natomiast wykonanie złącza podatnego w dylatacji zachowuje niski poziom drgań w punkcie 2, a jednocześnie obniża poziom wibracji w punkcie 1, co wynika z właściwości tłumiących polimeru PM (Etap 3).

Skuteczność wykonanej wibroizolacji może być oceniona ilościowo w punkcie 2 na podstawie współczynnika redukcji drgań określonego, jako stosunek inertancji wyznaczonych dla przypadków z dylatacjami (Etapy 2 i 3) do inertancji wyznaczonej dla przypadku bez dylatacji (Etap 1). Porównanie takie przedstawiono na rys. 7, gdzie wynosi on ok. 0,2÷0,3 w paśmie częstotliwości poniżej 100 Hz dla dylatacji wypełnionej złączem polimerowym i jest on zbliżony do współczynnika redukcji dla dylatacji niewypełnionej.



Rys. 6. Zmiany funkcji inertancji w punktach 1 i 2 dla trzech etapów diagnostycznych



Rys. 7. Zmiana współczynnika redukcji drgań w dziedzinie częstotliwości

4. Wnioski

Zaprezentowany sposób naprawy błędów wykonawczych przy użyciu polimerowego złącza podatnego spełnił postawione wymagania, eliminując wady błędów wykonawczych. Duża skuteczność zastosowanej wibroizolacji została wykazana dwoma metodami diagnostyki dynamicznej w sposób jakościowy i ilościowy. Potwierdzona została także przydatność funkcji inertancji do oceny redukcji poziomu drgań występującego przed naprawą i po naprawie. Widoczne na rys. 7 wzmocnienie drgań w paśmie częstotliwości poniżej 5 Hz wynika z błędów numerycznych (dzielenie przez wartości bliskie 0), co potwierdzono inną metodą (rys. 4). Prowadzona jest stała obserwacja przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego.

Literatura

- Ciesielski R., Kwiecień A., Stypuła K.: Propagacja drgań w warstwach przypowierzchniowych podłoża gruntowego. Badania doświadczalne in situ. Monografia 263, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1999.
- Kawecki J., Stypuła K.: Badanie doraźne i monitorowanie drgań w diagnostyce dynamicznej budynków. Czasopismo Techniczne, Z. 1-M/2008, 117-126.
- Kwiecień A.: Polimerowe złącza podatne w konstrukcjach murowych i betonowych. MONOGRAFIA 414. Seria Inżynieria Lądowa. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2012.
- 4. PN-85/B-02170 Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- 5. Kwiecień A., Zając B.: Dynamic response of the cracked masonry building repaired with the Flexible Joint Method an innovative earthquake protection. 7th International Conference of EASD EURODYN'2008, Southampton 2008.
- 6. Kwiecień A., Chełmecki J., Matysek P.: Non-destructive test of brick masonry columns using change in frequency and inertancy response. Structural Analysis of Historical Constructions SAHC'2012, DWE, Wrocław 2012.