



Dr inż. Arkadiusz KWIECIEN
Mgr inż. Bogusław ZAJĄC
Instytut Mechaniki Budowli, Politechnika Krakowska

NAPRAWA PĘKNIĘTYCH BUDYNKÓW MUROWANYCH METODĄ ZŁĄCZA PODATNEGO

REPAIR OF CRACKED MASONRY BUILDINGS BY USE OF THE FLEXIBLE JOINT METHOD – INVESTIGATIONS AND PRACTICAL APPLICATIONS

Streszczenie W pracy przedstawiono praktyczne zastosowanie metody złączy podatnych, na przykładzie dwóch uszkodzonych budynków murowanych, naprawionych przy użyciu specjalnej masy polimerowej. Pierwszy z budynków, uszkodzony w wyniku nierównomiernych osiadań, był poddany po naprawie oddziaływaniom statycznym. Drugi silnie spękany, został po naprawie poddany oddziaływaniom dynamicznym.

Abstract In the paper practical application of the Flexible Joint Method is presented. Two cracked masonry buildings were repaired by use of special polymer. The first building, damaged by an irregular settlements, was examined statically just after repair. The second one, strongly cracked, was excited dynamically just after repair.

1. Wstęp

Pęknięcia w budynkach mogą powstać w wyniku jednorazowego oddziaływania czynników destrukcyjnych, których bezpośredni wpływ na budynek jest stosunkowo krótkotrwały w czasie lub czynników negatywnych występujących wielokrotnie oraz permanentnie w dłuższym okresie czasu. Do pierwszej grupy w ramach oddziaływań statycznych należy zaliczyć osiadania spowodowane m.in. istotną zmianą stosunków wodnych w podłożu gruntowym (np. w wyniku suszy lub powodzi) lub przebudową zmieniającą schemat statyczny konstrukcji i rozkład naprężeń pod fundamentami, a także zmiany termiczne w wyniku pożaru. Natomiast czynnikami dynamicznie oddziałującymi mogą być trzęsienia ziemi [1], wstrząsy górnicze czy wybuchy gazu. Do drugiej grupy w ramach oddziaływań statycznych trzeba zaliczyć osiadania spowodowane osuwiskami i działalnością górniczą oraz działanie zmiennych cyklicznie pól termicznych, a w ramach oddziaływań dynamicznych wpływy drgań komunikacyjnych.

W przypadku pierwszej grupy, przyczyny powstania uszkodzeń ustępują samoczynnie nie wymagając interwencji, natomiast pozostają skutki w postaci pęknięć elementów konstrukcyjnych, zwłaszcza w konstrukcjach murowych. Pęknięty budynek pracuje w nowym stanie równowagi statycznej po wystąpieniu uszkodzenia, wynikającym z redystrybucji sił wewnętrznych w konstrukcji. Jest on mniej odporny na działanie dodatkowych obciążeń, na które był odporny przed uszkodzeniem. Nawet stosunkowo nieduże oddziaływania dynamiczne związane z trzęsieniami ziemi (np. aftershock) lub z drganiami parasejsmicznymi

(np. wstrząsy górnicze, drgania komunikacyjne), czy inne oddziaływania o charakterze statycznym (osiadania przy zmianie poziomu wód gruntowych, zmiany pól termicznych) mogą doprowadzić do powstania nowych uszkodzeń, a w efekcie końcowym do utraty stateczności lub nawet do zawalenia się konstrukcji. Przy naprawie konstrukcji murowych powinno się unikać nadmiernej interwencji [2], a szczególnie jak tylko jest to możliwe, należy ograniczać zmiany w schemacie pracy statycznej. Spełnienie tego warunku wymaga przeprowadzenia inwentaryzacji budynku oraz ustalenia wszystkich przyczyn i mechanizmów związanych z powstaniem uszkodzeń, a także rozpoznania nowopowstałych warunków pracy uszkodzonej konstrukcji.

Przykłady napraw dwóch pękniętych budynków murowanych, zachowujących stan naprężeń po redystrybucji, przeprowadzono przy użyciu metody złączy podatnych opisanej w [3]. Przed naprawą budynki te znajdowały się w bardzo złym stanie technicznym, natomiast w wyniku wykonania prac zabezpieczających została zwiększona odporność konstrukcji na działanie czynników zewnętrznych, co pozwala na ich dalszą eksploatację.

2. Opis metody złączy podatnych

Metoda złączy podatnych, rozwijana w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej, jest obecnie badana pod kątem wykorzystania jej do zabezpieczenia i naprawy pękniętych konstrukcji murowanych. Polega ona na wypełnieniu pęknięć w konstrukcji specjalnie dobraną masą polimerową trwale sprężysto-plastyczną [4], cechującą się dużą odkształcalnością i specjalnie dobranymi parametrami wytrzymałościowymi, która skleja elementy konstrukcyjne rozdzielone pęknięciem (rys. 1).



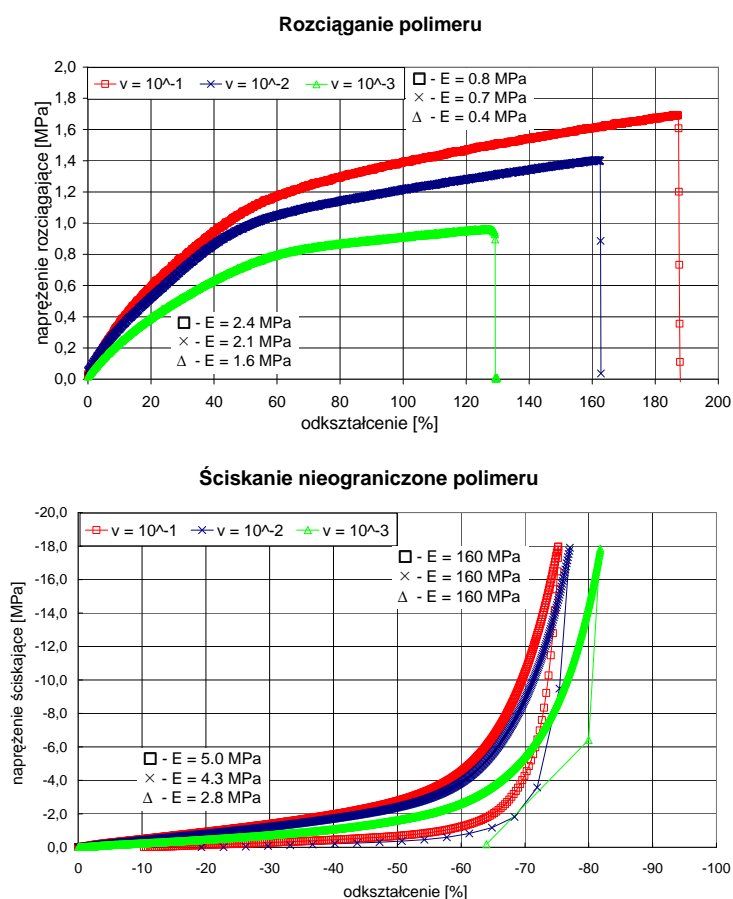
Rys.1. Rozdzielone pęknięciem elementy konstrukcyjne sklezione specjalnie dobraną masą polimerową.

Polimer jest elastyczną dwuskładnikową zaprawą wytworzoną na bazie żywicy poliuretanowej, która może być aplikowana ręcznie lub mechanicznie. Jest to redukującym drgania materiałem o dużej sprężystości powrotnej i o dużej odporności na starzenie, jest niewrażliwy na wilgoć przy aplikacji. Wykazuje odporność na promieniowanie UV i może pracować w zakresie temperatur od -40°C do $+80^{\circ}\text{C}$ (krótkotrwale do $+150^{\circ}\text{C}$). Przebadane laboratoryjnie cechy wytrzymałościowe polimeru oraz złącza w elementach małogabarytowych przedstawiono w pracy [2]. Szczegółowy opis metody złączy podatnych wraz z założeniami oraz opis zachowania złącza pod obciążeniami statycznymi i dynamicznymi, uzyskany z badań laboratoryjnych na elementach małych i wielkogabarytowych, można znaleźć w pracach [3], [5], [6].

3. Dobór polimeru i technologia utworzenia złącza podatnego

Dobór odpowiedniego sposobu naprawy uszkodzonej konstrukcji murowej wymaga gruntownego rozpoznania przyczyn powstania pęknięć oraz ustalenia czy oddziaływanie destrukcyjne ustało czy powoduje dalsze niszczenie konstrukcji. Konieczne jest zrozumienie mechanizmu pracy uszkodzonej konstrukcji i jej zachowanie pod działaniem dodatkowych obciążeń potencjalnie mogących wpływać na obiekt.

Wybór parametrów polimeru zależy od materiału konstrukcji, jego wytrzymałości, szerokości pęknięć oraz spodziewanych wielkości odkształceń towarzyszących pracy uszkodzonej budowli pod wpływem oddziaływania dodatkowych obciążeń. Należy tak dobierać właściwości polimeru, aby złącze miało odpowiednio niższą nośność niż materiał konstrukcji, a odkształcalność wystarczająco dużą dla przeniesienia spodziewanej energii odkształcenia. (por. [2]). Istotny jest rodzaj obciążeń jakie będzie przenosiło złącze (statyczne lub dynamiczne), gdyż parametry wytrzymałościowe polimeru i jego graniczna odkształcalność zależy od prędkości obciążenia, co pokazano na rys. 2 dla jednego z wybranych polimerów.



Rys.2. Zmiana charakterystyki polimeru w zależności od prędkości obciążenia

Pęknięcia można wypełnić polimerem w sposób grawitacyjny lub iniekcyjny pod ciśnieniem. Ze względu na pewną lepkość polimeru (konsystencja płynnego miodu), można go aplikować pod ciśnieniem w pęknięcia większe od 2 mm. Przed wypełnieniem pęknięć polimerem wymagane jest oczyszczenie szczelin sprężonym powietrzem i zagruntowanie w celu związania luźnych cząstek pozostałych na powierzchni kontaktu. W szczelinach należy osadzić pakery i zabezpieczyć powierzchnie pęknięć przed wypłynięciem polimeru. Iniekcję rozpoczyna się od dołu, wypełniając pęknięcia ku górze. Po wymieszaniu składników

polimeru przed aplikacją, lepkość polimeru pozwalająca na iniekcję utrzymuje się przez 5-7 minut. Po tym czasie rozpoczyna się proces wiązania, w trakcie którego szybko wzrasta lepkość polimeru. Stąd pęknięcia należy wypełniać porcjami dostosowanymi do wielkości szczelin i możliwości aplikacyjnych lub przy użyciu specjalnej maszyny (z końcówką iniekcyjną), umożliwiającą wymieszanie składników tuż przed podaniem.

4. Naprawa budynku uszkodzonego w wyniku nierównomiernych osiadań

Budynek naprawiony metodą złącza podatnego zlokalizowany jest w województwie świętokrzyskim. Jest to jednokondygnacyjny dom jednorodzinny wybudowany w 1935 roku w technologii tradycyjnej, lecz w sposób odbiegający od zasad sztuki budowlanej. Konstrukcję nośną stanowi mur warstwowy złożony z kamiennego muru cyklopowego wykonanego z piaskowca łączonego na zaprawie wapiennej o grubości 40 cm, oddzielonego 6 cm pustką powietrzną od ściany wewnętrznej wykonanej z muru ceglanego o grubości 12 cm. Ściany nośne ułożone są wyłącznie na obwodzie budynku, z niewłaściwie wykonanym połączeniem ścian szczytowych ze ścianami podłużnymi w narożach (brak przewiązania w układzie kamieni – ściany praktycznie doklejone na zaprawie). Ściany wykonane bez wieńca powiązane były drewnianymi belkami stropowymi w układzie poprzecznym, na których oparto dwuspadowy dach o drewnianej konstrukcji krokwiowej wzmocnionej jętkami. Budynek posadowiony jest na kamiennych ławach, o poziomie posadowienia 1,2 m poniżej poziomu terenu. W trakcie inwentaryzacji obiektu rozpoznano warunki gruntowe w podłożu do głębokości 4 m. Na nieprzewierconej warstwie piasku gliniastego zalega warstwa iltu twaroplastycznego (głębokość 3,10 – 3,90 m ppt), ponad nią pod północną częścią budynku występuje wyłącznie pył. Z kolei pod częścią południową na warstwie iltu zalega warstwa piasku pylastego o miąższości ok. 0,5 m przykryta pyłem, którego grubość wynosi 2,5 m. W trakcie badania nie natrafiono na wodę gruntową, natomiast w studni usytuowanej 30 m od budynku poziom wody stabilizował się na głębokości 10 – 12 m ppt. Grunty zalegające pod budynkiem były małowilgotne i wilgotne, w stanie półzwałnym i zwałnym.

Dobre warunki posadowienia pozwoliły na bezawaryjną eksploatację budynku o tak słabej konstrukcji przez ponad 60 lat. Pierwsze zarysowania pionowe i ukośne na ścianach (przebiegające głównie przez otwory okienne) pojawiły się pod koniec roku 2001. Istotną informacją jest fakt, że w lipcu 2001 roku po nawalnych deszczach okoliczne grunty były silnie nasycone wodą. Na pobliskiej rzece Świślinie wystąpiła powódź, a fala powodziowa doprowadziła do rozmycia tymczasowej grodzy ziemnej i przerwania budowanej zapory „Wióry” w sąsiedztwie miejscowości Kałków. Jej skutkiem było zalanie poniżej zlokalizowanych miejscowości Nietulisko i Kunów. Dwa miesiące przed wystąpieniem tych katastrofalnych w skutkach anomalii pogodowych, do omawianego budynku została doprowadzona woda, przyłączem wodociągowym ułożonym w wykopie o głębokości ok. 1,3 – 1,5 m, przebiegającym wokół budynku w odległości 2 – 3 m od południowej ściany szczytowej.

Te właśnie roboty ziemne w powiązaniu z zaburzeniem stosunków wodnych pod fundamentami były bezpośrednią przyczyną powstania osiadań, których następstwem były uszkodzenia budynku. Grunt usunięty z wykopu, a następnie ułożony ponownie po położeniu wodociągu wykazywał znacznie mniejszy stopień skonsolidowania niż grunt pod fundamentami. Stąd przy naruszeniu równowagi parć bocznych w gruncie poniżej poziomu posadowienia w tak niewielkiej odległości od fundamentów, doszło do przemieszczenia się cząstek gruntu spod fundamentów w kierunku wykopu i powstania dodatkowych osiadań. Transport cząstek gruntu powodujący osiadania uległ nasileniu przy silnym nawodnieniu gruntu, a następnie w trakcie jego osuszania. Na powiększenie skali nierównomiernych

osiadań podczas osuszania gruntu miała także wpływ obecność warstwy filtracyjnej z piasku pylastego, szybciej odprowadzająca wodę spod południowej części budynku niż spod pozostałej jego części. Ten mechanizm osiadań potwierdza obraz osiadań słupka bramowego, pierwotnie przylegającego do narożnika budynku (rys. 3), a obecnie odsuniętego od ściany na odległość ok. 4 cm. Proces nierównomiernych osiadań ustał po kilku latach po wyrównaniu naprężeń w podłożu.

Po przekroczeniu wytrzymałości muru na rozciąganie w wyniku nierównomiernych osiadań powstały początkowe niewielkie zarysowania, które ulegały znacznemu powiększaniu w kolejnych latach, zwłaszcza w miejscu połączenia ścian podłużnych z południową ścianą szczytową oraz na samej ścianie szczytowej. Pęknięcia widoczne na tynku w postaci rys, dochodące do 4 mm szerokości, przechodziły wyłącznie przez słabą zaprawę łączącą kamienie. W rzeczywistości były one znacznie większe przed naprawą (o szerokości dochodzącej do 40 mm), gdyż w trakcie prac przygotowawczych słaba zaprawa uległa usunięciu podczas oczyszczania szczelin przy użyciu sprężonego powietrza (rys. 3).



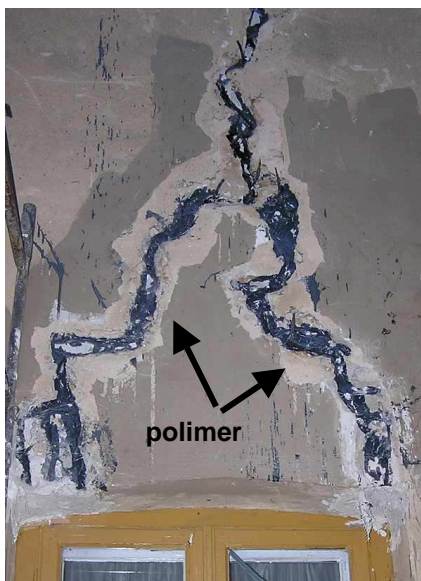
Rys.3. Uszkodzenia południowej ściany szczytowej przebiegające przez zaprawę łączącą kamienie oraz obraz przemieszczeń słupka bramowego w południowo-wschodnim narożniku budynku

Jako metodę naprawy przyjęto metodę złączy podatnych, pozwalającą na zespolenie oddzielonych pęknięciami fragmentów ścian przy użyciu specjalnie dobranej masy polimerowej. Przyjęty sposób naprawy nie wprowadza dodatkowych sił mogących naruszyć istniejącą równowagę statyczną budynku, o tak osłabionej konstrukcji. Uprzednio rozkute i oczyszczone sprężonym powietrzem pęknięcia zostały zagruntowane, osadzono w nich specjalne pakery do aplikacji polimeru i zabezpieczono powierzchnię pęknięć przed wpływem iniektu. W tak przygotowane szczeliny został wprowadzony pod ciśnieniem polimer, który połączył ze sobą elementy kamienne budujące mur.

Po 6 godzinach od aplikacji polimeru, na części naprawionych pęknięć usunięto pokrywające polimer zabezpieczenia (rys. 4a) i skontrolowano stopień wypełnienia szczelin oraz jakość wykonanego połączenia. W celu kontroli skuteczności zastosowanego połączenia polimerowego zainstalowano elementy kontrolne z placków gipsowych (rys. 4b). Po półrocznych obserwacjach nie pojawiły się żadne zarysowania na gipsie, co świadczy o należytej pracy złączy podatnego.

Testem skuteczności zastosowanego złączy była wymiana okna. Widoczny na rys. 3 fragment muru opierający się tylko na framudze okiennej został związany z pozostałą częścią muru tak, że po usunięciu starego okna zawisł wyłącznie na masie polimerowej bez jakiegokolwiek podparcia (rys. 5). Po zamontowaniu nowego okna sprawdzono kontrolne placki gipsowe i nie stwierdzono obecności żadnych rys.

a)



b)



Rys.4. Pęknięcia po wypełnieniu polimerem wraz z zamontowanymi elementami kontrolnymi



Rys.5. Widok naprawionego fragmentu południowej ściany szczytowej w trakcie i po wymianie okna

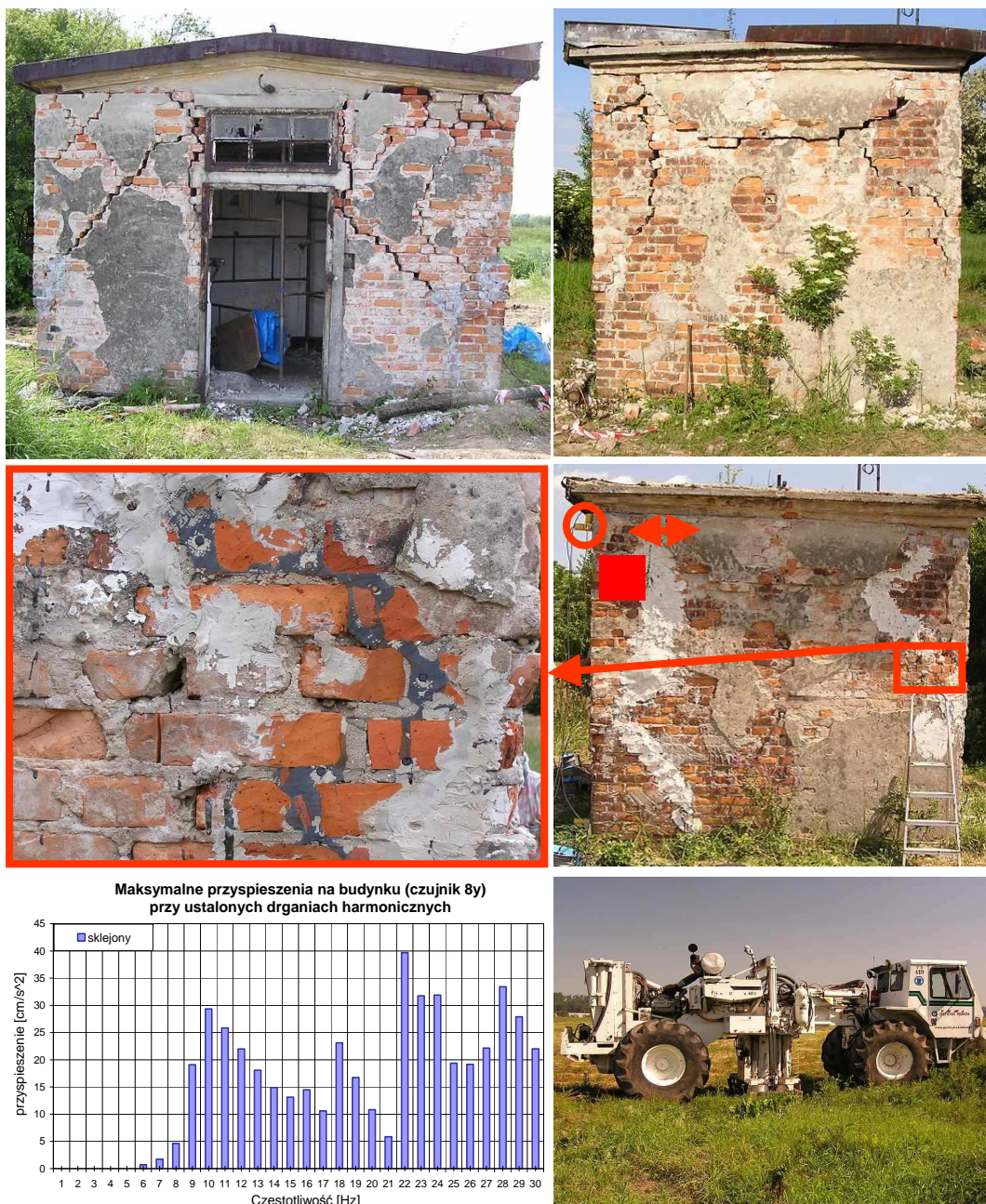
Zastosowana metoda złączy podatnych okazała się skuteczna w przypadku naprawy budynku murowanego o bardzo słabej konstrukcji, uszkodzonego w wyniku nierównomiernych osiadań, zabezpieczając go przed dalszą postępującą degradacją.

5. Odporność dynamiczna budynku naprawionego masą polimerową

Złącze podatne wprowadza w pękniętym budynku nową odporność na oddziaływania dynamiczne. Pokazały to badania, przeprowadzone na silnie uszkodzonym budynku ceglany (przez uderzenia koparki), który został naprawiony przy użyciu specjalnej masy polimerowej.

Po wypełnieniu pęknięć polimerem budynek poddano stacjonarnym drganiom harmonicznym w paśmie częstotliwości 6 – 30 Hz, generowanym na powierzchni terenu przez wibrorejser o masie 20 T, ustawionym w odległości 15 m od budynku. Zarejestrowany pod dachem naprawionego budynku poziom drgań był bardzo duży jak na tak uszkodzony budynek, a mimo to konstrukcja przetrwała bez pojawienia się nowych uszkodzeń (gips pokrywający złącze polimerowe nie uległ nawet zarysowaniu). Maksymalne przyspieszenie w

trakcie odpowiedzi rezonansowej budynku przy częstotliwości 10 Hz wyniosło 30 cm/s^2 . Uszkodzenia budynku, widok sklejonego muru oraz urządzenie wymuszające wraz z maksymalnymi wartościami przyspieszeń zarejestrowanymi na budynku w poszczególnych pasmach częstotliwości przedstawiono na rys. 6.



Rys.6. Uszkodzenia badanego budynku ceglanoego, widok złącza podatnego w naprawionym murze, wibrorejs MARK IV oraz wykres z maksymalnymi wartościami przyspieszeń zarejestrowanymi na budynku w poszczególnych pasmach częstotliwości

Więcej szczegółów dotyczących dynamicznych właściwości złącza podatnego, uzyskanych z badań dynamicznych na zaprezentowanym budynku ceglanoego można znaleźć w pracy [7]. Badania te potwierdziły skuteczność złącza polimerowego jako metody zabezpieczenia popękanych budynków poddanych wymuszeniu dynamicznemu.

4. Podsumowanie

Przedstawione praktyczne zastosowania metody złączy podatnych pokazały, że może ona być przydatna do zabezpieczenia i naprawy popękanych budynków murowanych. Badania in situ oraz dotychczasowe badania laboratoryjne na elementach mało- i wielkogabarytowych wskazują na istnienie korzystnych właściwości podatnej masy polimerowej. Wprowadzenie specjalnie dobranej masy polimerowej w pęknięcia uszkodzonej konstrukcji murowanej powoduje zwiększenie odporności obiektu na działanie dodatkowych obciążeń statycznych i dynamicznych, które w przypadku pozostawienia uszkodzonej konstrukcji bez naprawy mogłyby doprowadzić do awarii wyłączającej ją z eksploatacji lub nawet do jej całkowitej destrukcji. Naprawiona przedstawionym sposobem konstrukcja może być dalej eksploatowana, a koszty takiej naprawy są stosunkowo nieduże.

Metoda złączy podatnych stanowi uzupełnienie dotychczas stosowanych metod naprawy i wzmocnienia, a jej zastosowanie wymaga uprzedniego gruntownego rozpoznania przyczyn powstania uszkodzeń i warunków pracy uszkodzonej konstrukcji. Metoda ta jest dedykowana zwłaszcza do obiektów zlokalizowanych w strefie oddziaływań dynamicznych, zagrażających ich dalszej eksploatacji.

Literatura

1. Zembaty Z., Jankowski R., Cholewicki A., Szulc J.: Trzęsienie ziemi 30 listopada 2004 r. na Podhalu oraz jego wpływ na obiekty budowlane. *Inżynieria i Budownictwo* 2005, R.61, nr 9, s. 507-511
2. Modena C.: Design approaches of investigations for the safety and conservation of historic buildings. 4th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions. Padwa 2004.
3. Kwiecień A., Kubica J., Zając B.: Pilotażowe badania statyczne wielkogabarytowego modelu pękniętego muru ceglanego sklejonego polimerowa masą trwale sprężysto-plastyczną. VII Konferencja Naukowo-Techniczna REW-INŻ'2006, Kraków 2006.
4. Heinzmann R., Koch S., Thielemann H. C., Wolf J.: Elastic bonding in the construction industry. Verlag Moderne Industrie. Die Bibliothek der Technik, 2001.
5. Kwiecień A., Zając B., Ciurej H., Pęcherski R.: Application of flexible joints in dynamically excited structure of damaged buildings. 6th European Conference on Structural Dynamics EUROLYN'2005, Paryż 2005.
6. Kwiecień A., Zając B., Stecz P., Kubica J.: Flexible Joint Method (FJM) - a new approach to protection and repair of cracked masonry. 1th European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (1st ECEES), Genewa 2006.
7. Kwiecień A., Zając B., Stecz P., Ciurej H., Chełmecki J.: Badania dynamiczne in situ pękniętego budynku sklejonego polimerowa masą trwale sprężysto-plastyczną. XI Sympozjum Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle, Kraków 2006.

Podziękowanie

Zaprezentowana praca jest częściowo finansowana z Grantu KBN nr 4 T07E 052 27. Autorzy składają podziękowanie SIK A Poland, NTB Grupa Sp. z o.o. oraz dowództwu i pracownikom JW 1155 za udzieloną pomoc.