

# Systemy PUFJ i FRPU jako zabezpieczenie przed trzęsieniami ziemi konstrukcji żelbetowych ze ścianami wypełniającymi

ARKADIUSZ KWIECIEN\*

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Lądowej

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań cyklicznych, dynamicznych na stole sejsmicznym oraz dynamicznych z harmoniczną siłą wymuszającą działającą w rezonansie, dotyczące innowacyjnych systemów PUFJ i FRPU dedykowanych ochronie antysejsmicznej konstrukcji z ramami żelbetowymi wypełnionymi ścianami murowymi. Potwierdziły one wysoką skuteczność zaproponowanych rozwiązań, które równocześnie spełniają ostre wymagania współczesnych norm sejsmicznych.

**Słowa kluczowe:** ramy żelbetowe ze ścianami wypełniającymi, polimerowe złącza podatne, PUFJ, FRPU, badania dynamiczne na stole sejsmicznym, badania cykliczne i rezonansowe, zabezpieczenia antysejsmiczne

## 1. Uszkodzenia budynków przez trzęsienie ziemi (Pertinja Earthquake 2020)

Trzęsienia ziemi należą do jednych z najbardziej katastroficznych wydarzeń niezależnych od człowieka, w których konstrukcje budowlane ulegają awariom oraz zniszczeniom, przyczyniając się często do wzrostu liczby ofiar wśród ludności. Zadaniem inżynierów jest takie projektowanie konstrukcji zgodnie z aktualnymi normami, aby były one odporne na działanie obciążeń wyjątkowych, do których zaliczamy trzęsienia ziemi. Niestety, wiele budynków zostało wykonanych w ostatnich stuleciach bez wystarczających zabezpieczeń antysejsmicznych. Są to zwłaszcza obiekty o konstrukcji murowej. Siły bezwładności, generowane przez ruch podłoża gruntowego w trakcie trzęsienia ziemi, prowadzą do różnych mechanizmów uszkodzeń w budynkach, które były szeroko opisywane w literaturze światowej w ostatnich dziesięcioleciach. Ostatnie silne trzęsienia ziemi w Europie wystąpiły na Bałkanach w 2020 roku, a wywołane nimi uszkodzenia i ich przyczyny zostały bardzo dobrze udokumentowane w [1].

Historycznie Bałkany są terenem sejsmicznym, na którym w okolicach Zagrzebia odnotowano wcześniej silne trzęsienie ziemi w 1880 roku [1], o magnitudzie  $M = 6,4$  – opartej na momencie sejsmicznym, odpowiadającej intensywności o poziomie VIII w Europejskiej Skali Makrosejsmicznej. Jego skutkiem były liczne ofiary śmiertelne oraz znaczące uszkodzenia murowanych budynków mieszkalnych i zabytkowych katedr. Współcześnie, 22 marca 2020 roku rano dwa wstrząsy w Zagrzebiu o magnitudzie  $M = 5,4-5,5$  (następujące po sobie w odstępie pół godziny) doprowadziły do licznych uszkodzeń budynków, w tym do zawalenia

---

\*Autor do korespondencji: akwiecie@pk.edu.pl

się sklepień i części wież w kościołach zabytkowych. Na szczęście nie było ofiar śmiertelnych [1]. W południe 29 grudnia 2020 roku, znacząco poważniejsze w skutkach trzęsienie ziemi nawiedziło miasteczko Petrinja (ok. 47 km od Zagrzebia), którego ofiarami było 7 osób. Jego magnituda  $M = 6,4$  była podobna do tej w 1880 roku. Zniszczenia w miasteczku były znaczące, z uwagi na niską jakość wykonania zabudowy, w większości murowanej (rys. 1).



Rys. 1. Centrum Petrinji zaraz po trzęsieniu ziemi w grudniu 2020 roku (po lewej) i po usunięciu gruzów w październiku 2021 (po prawej).

Uszkodzenia konstrukcji murowych wielu budynków w Petrinji były charakterystyczne dla terenów sejsmicznych, z wyszczególnieniem pęknięć w płaszczyźnie ścian (in-plane – rys. 2) oraz uszkodzeń polegających na odpadnięciu całych fragmentów muru od konstrukcji (poza ich płaszczyznę – tzw. out-of-plane), głównie w obrębie górnej części ścian szczytowych (rys. 3).



Rys. 2. Uszkodzenia ścian (in-plane) w centrum Petrinji (październik 2021).

Te ostatnie uszkodzenia powstały w wyniku braku powiązania ścian szczytowych zamykających poddasza (utworzone przez drewniane więźby dachowe) z usztywniającymi elementami konstrukcyjnymi, prostopadłymi do tych ścian. Często za zniszczenia out-of-plane tych elementów były odpowiedzialne drewniane elementy więźby dachowej [2], uderzające w te ściany podczas przemieszczania się pod wpływem sił bezwładności generowanych przez trzęsienie ziemi (rys. 4).

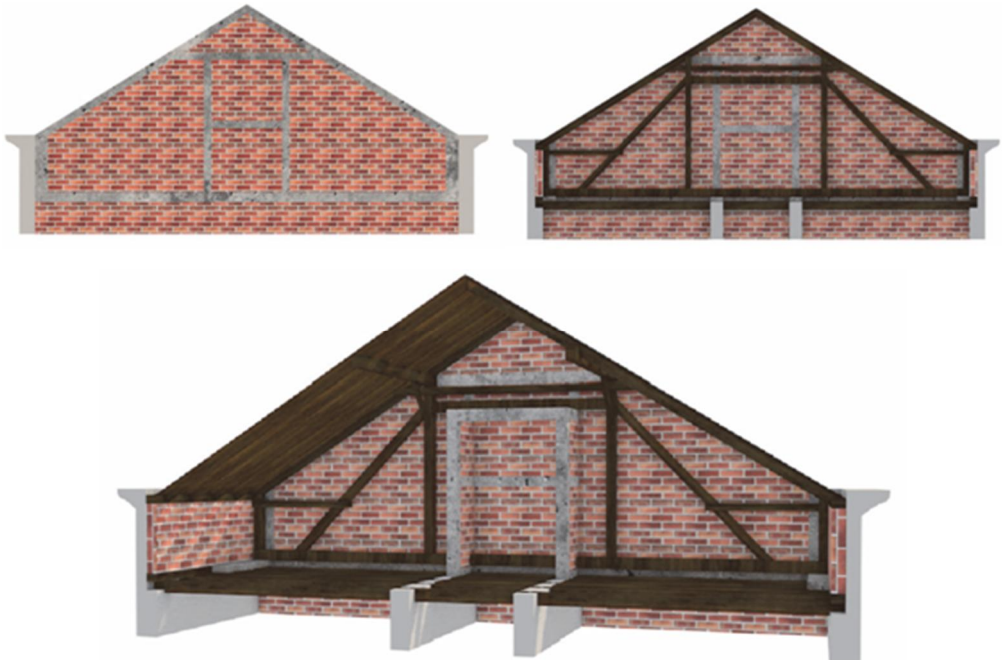


Rys. 3. Budynek zamkniętej szkoły w centrum Petrinji z uszkodzeniami ścian szczytowych typu out-of-plane (październik 2021).



Rys. 4. Zniszczone ściany szczytowe (out-of-plane) po trzęsieniu ziemi w Zagrzebiu (marzec 2020), spowodowane uderzeniami elementów drewnianej więźby dachowej [2].

Zaproponowane przez inżynierów chorwackich rozwiązania rekonstruujące zniszczone ściany szczytowe [2] bazują na wykorzystaniu technologii bardzo popularnej na terenach sejsmicznych – ram żelbetowych ze ścianami wypełniającymi (ang. *infills*) – rys. 5. Konstrukcje tego typu bazują na żelbetowym szkielecie jako konstrukcji nośnej przenoszącej obciążenia, w której murowana ściana wypełniająca jest elementem niekonstrukcyjnym.



Rys. 5. Propozycja odbudowy zniszczonej ściany szczytowej z wykorzystaniem ram żelbetowych z murowanymi ścianami wypełniającymi [2].

## 2. Zachowanie ścian wypełniających podczas trzęsienia ziemi

Koncepcja budowy żelbetowej konstrukcji szkieletowej z wypełnieniem murowymi elementami blokowymi lub ceglanymi jest powszechna na całym świecie na terenach sejsmicznych (rys. 6). W pierwszej kolejności konstruowane są w nich nośne elementy żelbetowe (fundamenty, słupy, belki i płyty), a następnie wykonywane są wypełnienia. Wypełnienia te nie są traktowane jako elementy nośne podczas projektowania, natomiast w rzeczywistości są one lekko obciążone dodatkowymi pionowymi obciążeniami ruchomymi. W pracy dynamicznej takiej konstrukcji podczas trzęsień ziemi odgrywają one jednak rolę jako elementy drugorzędowe, zwłaszcza w usztywnianiu całego budynku [3].

Inspekcje po trzęsieniach ziemi wykazują, że schemat uszkodzeń ścian wypełniających charakteryzuje się zwykle ukośnymi pęknięciami pochodzącymi od ścinania w płaszczyźnie ściany (in-plane) lub zawaleniem się ich poza płaszczyznę (out-of-plane), ślizganiem się połączeń na złączu z ramą żelbetową (rys. 7) lub kombinacją powyższych [4, 5, 6], prowadząc do ich wypadania z ram. Ogólnie rzecz biorąc, niekonstrukcyjne ściany wypełniające są bardziej podatne na uszkodzenia i szybciej ulegają uszkodzeniom w porównaniu z elementami nośnymi żelbetowymi. W niektórych przypadkach wypełnienia mogą powodować szkodliwe zniszczenie słupów żelbetowych, a nawet zawalenie się budynku (tzw. *Soft-story*). Ponadto, nawet w przypadku umiarkowanych trzęsień ziemi, koszt naprawy wypełnień jest bardzo wysoki, co prowadzi do pilnej potrzeby uwzględnienia wpływu niekonstrukcyjnych ścian wypełniających na ogólne zachowanie konstrukcji oraz stosowania innowacyjnych rozwiązań zabezpieczających je przed zniszczeniem w trakcie wielokrotnie się powtarzających silnych trzęsień ziemi [7].





Rys. 6. Konstrukcje budynków na terenach sejsmicznych wykonanych z ram żelbetowych z murowanymi ścianami wypełniającymi (Bhaktapur, Nepal – rok 2016).



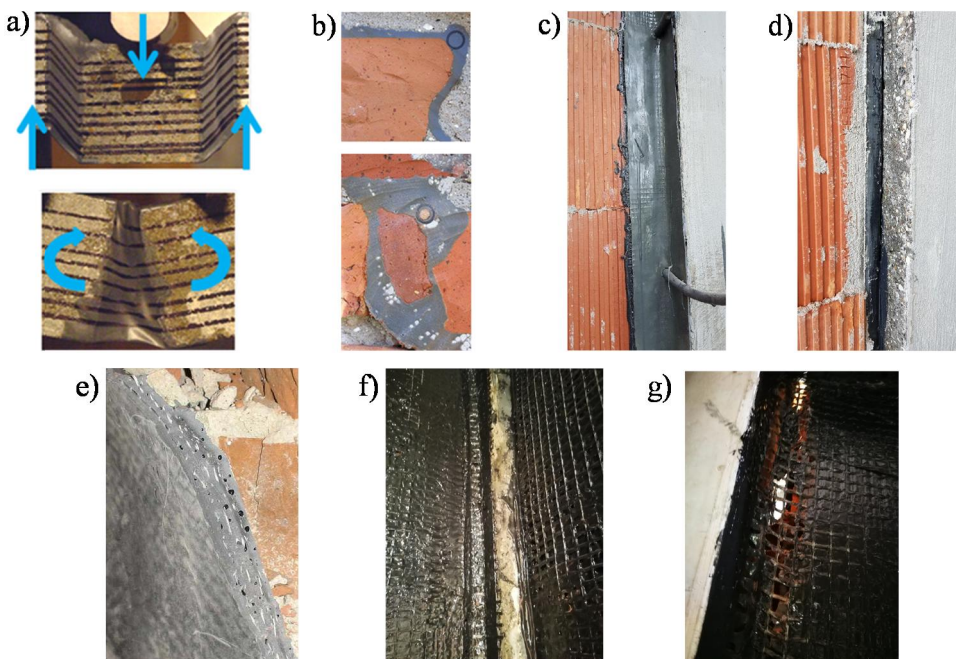
Rys. 7. Odspojenia na styku ściany wypełniającej i ramy żelbetowej oraz uszkodzenia narożników ściany (szkoła w Pertinji po trzęsieniu ziemi w grudniu 2020 roku).

Główną przyczyną uszkodzenia wypełnienia jest niewystarczająca zdolność elementów sztywnych do przenoszenia sił z powodu stosunkowo dużego przemieszczenia narzuconego przez słupy żelbetowe. Koncentracje naprężeń na styku elementów żelbetowych ze ścianami wypełniającymi powodują uszkodzenia już przy bardzo małych poziomych wychyleniach międzykondygnacyjnych (ang. drift), poniżej 0,5% [8].

### 3. Podatne złącza poliuretanowe PUFJ i FRPU jako skuteczne zabezpieczenie ścian wypełniających przed trzęsieniami ziemi

Technologia Poliuretanowych Złączy Podatnych (PZP) została opracowana na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej [9], które są zdolne do równoczesnego przeniesienia dużych obciążeń i dużych deformacji (rys. 8a) oraz do dyssypacji energii z uwagi na ich lepko-sprężysto-plastyczne cechy. Na ich bazie powstały podatne złącza do zabezpieczania konstrukcji na terenach sejsmicznych, opracowane we współpracy z partnerami zagranicznymi. Są to PolyUrethane Flexible Joints (PUFJ) i Fiber Reinforced PolyUrethanes (FRPU). Ich wysoka skuteczność została zweryfikowana badaniami doświadczalnymi w testach cyklicznych *push-over* [3, 8, 10], badaniami na stole sejsmicznym [11, 12] oraz wymuszeniami rezonansowymi harmoniczną siłą dynamiczną [7]. Zachowanie konstrukcji zabezpieczonych PUFJ i FRPU było także analizowane przy użyciu modeli numerycznych [3, 13, 14].

Podatne złącza PUFJ są wykonane z dwukomponentowej masy poliuretanowej z rodziny Sika P, która może być aplikowana w postaci iniekcyjnej, np. przy naprawie pęknięć w konstrukcjach murowych (rys. 8b) lub jako element interfejsowy w połączeniu ram żelbetowych ze ścianami wypełniającymi (rys. 8c), który to interfejs może także zostać wykonany jako złącze prefabrykowane PUFJ (rys. 8d). Kompozyt FRPU jest konstruowany z siatki z włókien szklanych zatopionych w matrycy poliuretanowej (rys. 8e, f, g).

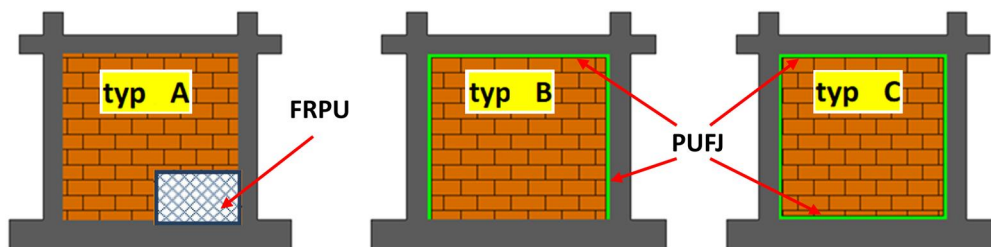


Rys. 8. Różne postacie PUFJ i FRPU (opis w tekście).

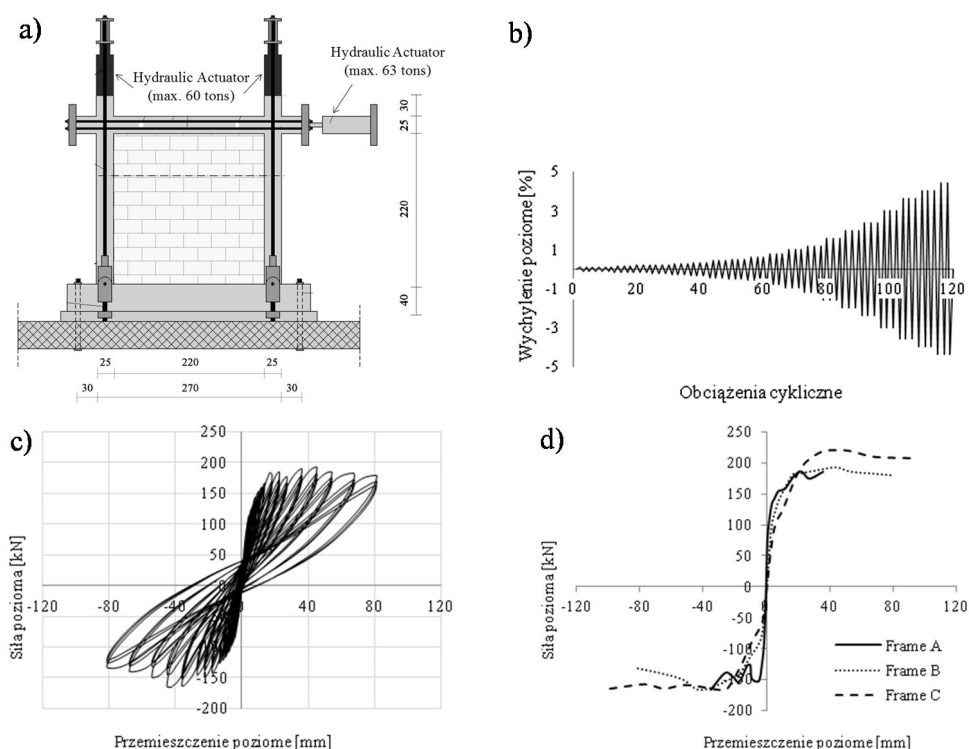
#### 3.1. Testy cykliczne push-over ram z wypełnieniami oraz z PUFJ i FRPU

Testy cykliczne push-over (ściananie cykliczne) zostały zrealizowane w Laboratorium ZAG w Ljubljanie (Słowenia) na ramach żelbetowych wypełnionych murem wykonanym z pustaków ceramicznych. Testowano 4 rodzaje układów przedstawionych na rys. 9. Na stanowisku badawczym (rys. 10a) wymuszano cykliczne ściananie zgodnie z protokołem

pokazanym na rys. 10b. Przykładowe pętle histerezy ramy typu B przedstawia rys. 10c, natomiast porównanie obwiedni tych pętli dla typów ram A, B i C przedstawia rys. 10d.



Rys. 9. Schematy testowanych ram żelbetowych ze ścianami wypełniającymi: typ A (sztywne połączenie zaprawą) bez i ze wzmocnieniem FRPU (po lewej), typ B z iniekcyjnym PUFJ na 3 krawędziach (w środku), typ C z prefabrykowanym PUFJ na 4 krawędziach (po prawej).



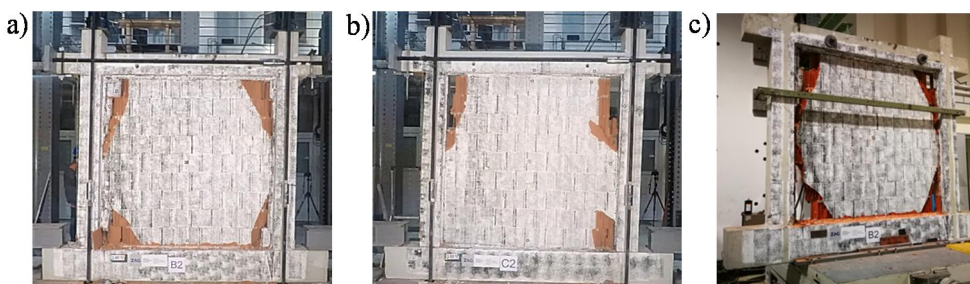
Rys. 10. a) stanowisko badawcze w ZAG do testów cyklicznego ścinania wraz z wymiarami badanego elementu, b) protokół obciążenia cyklicznego, c) przykładowe pętle histerezy dla ramy typu B, d) obwiednie pętli histerezy dla testowanych ram typu A, B i C [10].

Klasyczna rama połączona z murem za pomocą sztywnej zaprawy (typ A) była testowana do momentu odspojenia muru od ramy na całym obwodzie (zagrożenie zniszczeniem *out-of-plane*), a następnie mur został wzmocniony obustronnie FRPU (wzmocnienie ratunkowe) i testowany do maksymalnego wychylenia. Typ B został utworzony poprzez wycięcie 3 bruzd o szerokości 2 cm na górnej i bocznych krawędziach muru, które następnie zostały wypełnione iniekcyjnie PUFJ (symulacja zabezpieczenia ściany w istniejącym budynku). W typie C wewnątrz ramy zostało najpierw wyklejone prefabrykowanym PUFJ o grubości 2 cm,



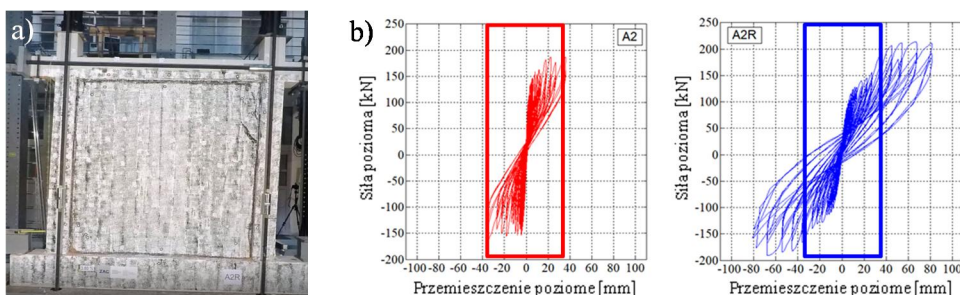
a następnie ściana została wymurowana (symulacja zabezpieczenia ściany w nowo budowanym budynku). Szczegółowy opis badanych elementów i wykonanych testów został przedstawiony w [10].

Ramy typu B i C, ze ścianami mocowanymi przy użyciu złączy PUFJ, wykazały się bardzo dużą odpornością na obciążenia cykliczne o dużych przemieszczeniach poziomych (do 100 mm) i wychyleniach (do 4%) oraz zachowały zdolność dalszego przenoszenia obciążeń pionowych i poziomych (osiągnięto granicę zakresu pracy siłownika) bez zagrożenia wypadnięcia z płaszczyzny ramy, a ich praca pozostała ciągła (rys. 10d). Uszkodzenia naroży (rys. 11a, b) wskazują na redystrybucję koncentracji naprężeń przez PUFJ, a przeprowadzony na stole sejsmicznym test *out-of-plane* uszkodzonych ram typu B i C, poddanych dynamicznym wymuszeniom harmonicznym w rezonansie (przez 10 minut), nie spowodował wypadnięcia uszkodzonych ścian z płaszczyzny ramy (rys. 11c).



Rys. 11. Uszkodzone ramy po testach cyklicznego ścinania w płaszczyźnie ramy (*in-plane*): a) typ A, b) typ B oraz c) brak dodatkowych uszkodzeń w ramie typu B po działaniu dynamicznych obciążeń harmonicznymi *out-of-plane* w rezonansie – przez 10 minut.

Dla porównania, ściana typu A uległa całkowitemu odspojeniu od ramy przy wychyleniu 0,5% oraz wykruszeniu krawędzi przy 1,6%, które groziło wypadnięciem muru z płaszczyzny ramy. Test zatrzymano w celu instalacji wzmocnienia FRPU – rys. 8g i 12a).



Rys. 12. a) maksymalne wychylenie (3,6%) w płaszczyźnie ramy (*in-plane*) elementu A2R wzmocnionego FRPU, b) porównanie pętli histerezy elementów bez FRPU – A2 i z FRPU – A2R.

Rama typu A wzmocniona FRPU (A2R) wykazała dodatkowy znaczący przyrost nośności i ciągłości (rys. 12c), w porównaniu do uszkodzonej ramy typu A bez wzmocnienia FRPU (A2) – rys. 12b. Ponadto nawet znaczące wychylenie ramy po wzmocnieniu FRPU (rys. 12a) nie spowodowało istotnych uszkodzeń, zagrażających wypadnięciem muru z płaszczyzny ramy (rys. 8g). Potwierdziły to także oględziny po badaniu cyklicznym przy próbie usunięcia wzmocnionej ściany z ramy żelbetowej [8].

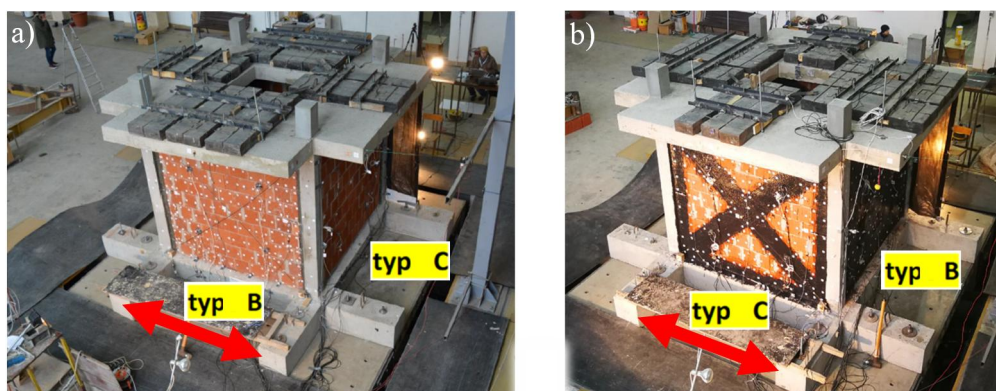
Należy zaznaczyć, że wszystkie ramy z wypełnieniami zaopatrzone w systemy PUFJ lub FRPU były w stanie przenosić znaczące wielkości sił ścinających (190–220 kN), nawet przy



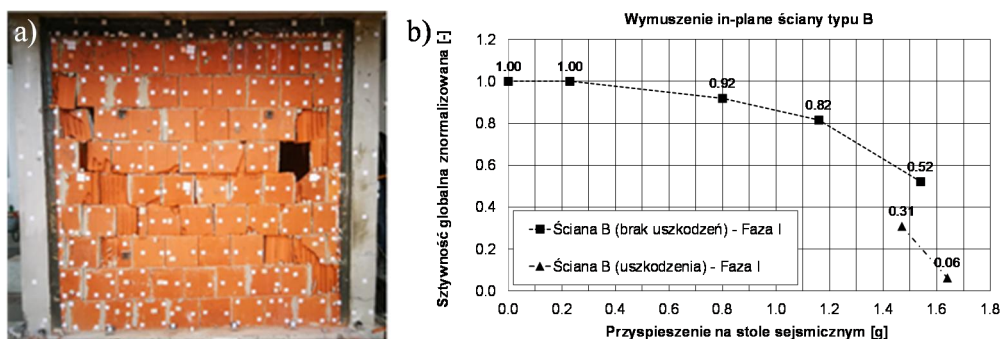
bardzo dużych wychyleniach konstrukcji (3,5–4,0%) powtarzanych cyklicznie (rys. 10d, 12b), bez utraty zespolenia ramy ze ścianą wypełniającą. Ten ostatni warunek jest wymogiem w projektowaniu zgodnie z [15 i 16], przy czym w Turcji dodano warunek zapewnienia możliwości bezpiecznego wychylenia konstrukcji do poziomu co najmniej 2%. Technologie PUFJ i FRPU wypełniają te warunki z istotnym zapasem. Co więcej, w każdym cyklu są w stanie dyssypować znaczne ilości energii przy zachowaniu nośności.

### 3.2. Testy dynamiczne na stole sejsmicznym budynku z ramami z wypełnieniami oraz z PUFJ i FRPU

Badania dynamiczne ścian z wypełnieniami oraz z PUFJ i FRPU przeprowadzone w laboratorium w IZIIS Skopje w Macedonii Północnej w ramach projektu H2020 SERA. Budynek symetryczny ze ścianami typu B i C badano w 4 fazach (rys. 13). Najpoważniejsze uszkodzenia (in-plane) wystąpiły w ścianach B (ich strukturze) na końcu Fazy I (rys. 14a).



Rys. 13. Widok budynku ze ścianami wypełniającymi oraz z PUFJ i FRPU na stole sejsmicznym: a) faza I–B (in-plane) i C (out-of-plane), b) faza IV–B\_FRPU (out-of-plane) i C\_FRPU (in-plane).



Rys. 14. Faza I: a) końcowe uszkodzenia ściany typu B, b) stopniowa degradacja sztywności budynku.

Kolejne fazy badania na stole sejsmicznym, wraz z maksymalnymi wartościami zarejestrowanymi w trakcie badań przedstawiono w Tabeli 1. Pomiędzy Fazą II i III dokonano obrotu budynku o 90 stopni, z uwagi na jednokierunkowe wymuszenie stołu. Zarejestrowane wartości wskazują, że złącze PUFJ utrzymało bardzo silnie uszkodzoną ścianę typu B w płaszczyźnie ramy przy przyspieszeniach powyżej 1,5 g i wychyleniu budynku 3,7% (znacznie powyżej wymagań normowych 2%) – Faza I. W tej samej fazie ściana typu C wytrzymała wymuszenie

out-of-plane o tym samym poziomie bez żadnych uszkodzeń. Globalna sztywność badanego budynku uległa degradacji do poziomu 6% sztywności wyjściowej (rys. 14b), co było spowodowane pracą w rezonansie w paśmie 2,5–4,0 Hz, dominującym w zadanym skalowanym wymuszeniu sejsmicznym Kefallonia 2014.

Tabela 1. Maksymalne wartości zarejestrowane w trakcie badań na stole sejsmicznym

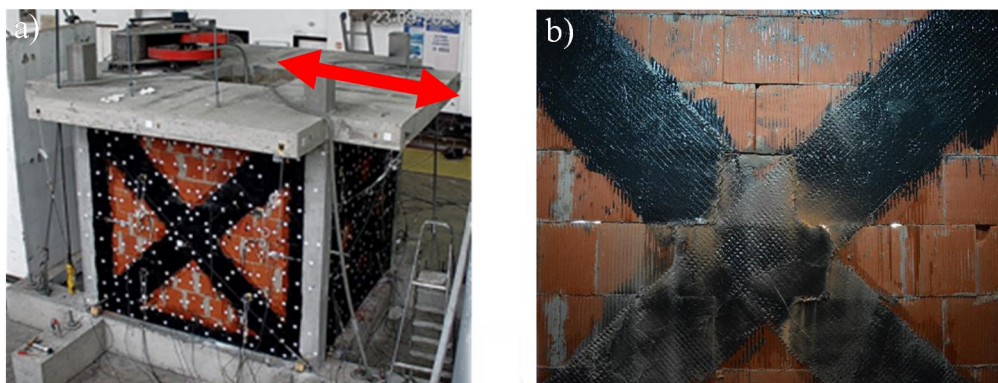
Faza badania	Typ ściany (kierunek wymuszenia)	przysp. stołu [g]	przysp. stropu [g]	przem. stropu [mm]	wychylenie budynku [%]
I	B (in-plane) C (out-of-plane)	1.64	1.52	88.9	3.7
II	B_FRPU (in-plane) C (out-of-plane)	0.39	0.89	38.9	1.6
III	B_FRPU (out-of-plane) C (in-plane)	0.35	0.48	16.0	0.7
IV	B_FRPU (out-of-plane) C_FRPU (in-plane)	0.95	1.25	21.0	0.9

Po zakończeniu Fazy I, silnie uszkodzone ściany typu B zostały wzmocnione FRPU obustronnie i powtórzono zakres badania w Fazie II, ale do poziomu bezpiecznego dla budynku. Po obróceniu budynku o 90 stopni, badano ściany typu C in-plane do momentu rozpojenia wiązań w spoinach pomiędzy blokami w murze – Faza III. Po wzmocnieniu FRPU ściany C kontynuowano badania w Fazie IV aż do maksymalnej nośności stołu sejsmicznego (ograniczenie spowodowane awarią siłownika). Po instalacji wzmocnień FRPU i po zakończonych badaniach we wszystkich fazach, budynek utrzymał swoją sztywność globalną na poziomie 52%, pomimo wystąpienia przegubów plastycznych na końcach słupów żelbetowych, dzięki współpracy ze ścianami murowymi z PUFJ i FRPU.

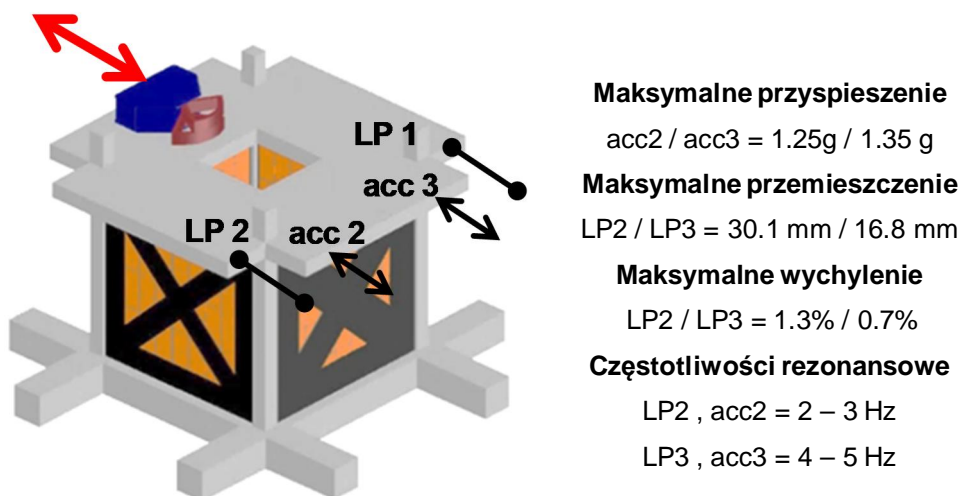
Więcej szczegółów można znaleźć w pracach [11, 12].

### 3.3. Testy dynamiczne budynku z ramami z wypełnieniami oraz z PUFJ i FRPU wymuszanego siłą harmoniczną w rezonansie

Budynek z PUFJ i FRPU, zachowany w dobrej kondycji po badaniach na stole sejsmicznym, poddano wymuszeniom siłą harmoniczną zmienną w rezonansie. Pomimo kilkunastominutowych ciągłych wzbudzeń dynamicznych (sweepów) z różnymi zadanymi częstotliwościami rezonansowymi (łącznie ponad 2 godziny pracy w rezonansie) i redukcji globalnej sztywności do poziomu ok. 10–15%, budynek zachował sprężysty charakter pracy i globalną stabilność, bez jakichkolwiek oznak możliwości wypadnięcia ścian wypełniających z płaszczyny ram żelbetowych (rys. 15a). Jedynymi znaczącymi uszkodzeniami było przecięcie włókien szklanych w kompozycie FRPU w środku ściany typu C (rys. 15b). Utrata symetrii sztywności w budynku i jej znacząca redukcja nie wpłynęły negatywnie na jego odporność sejsmiczną, co pokazują zarejestrowane wyniki pomiarów na końcu badania (rys. 16), gdyż systemy PUFJ i FRPU pomogły zachować jego integralność do końca badań.



Rys. 15. a) Budynek po zakończonym badaniu, b) obraz uszkodzeń FRPU w środku ściany typu C.



Rys. 16. Zarejestrowana odpowiedź dynamiczna budynku o niesymetrycznej sztywności.

#### 4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań, dotyczące innowacyjnych systemów PUFJ i FRPU mocujące ściany wypełniające w ramach żelbetowych, potwierdziły ich wysoką skuteczność jako trwałych zabezpieczeń antysejsmicznych. Jednorazowe zainstalowanie tych systemów jest w stanie chronić mienie i życie ludzkie w trakcie wielokrotnie powtarzających się trzęsień ziemi, co potwierdzili także eksperci od inżynierii antysejsmicznej [7, 12, 14].

#### Literatura

1. Atalić J., Todorčić M., Uroš M., Šavor-Novak M., Cmogorac M., Lakušić S.: Potresno inženjerstvo, obnova zidanih zgrada. Građevinski fakultet Zagreb, ISBN: 978-953-8168-43-7, Zagreb 2021.
2. Crnogorac M., Todorčić M., Uroš M., Atalić J.: URGENTNI PROGRAM POTRESNE OBNOVE UPPO. Građevinska tehnička rješenja. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu Hrvatska komora inženjera građevinarstva. ISBN 978-953-8168-41-3, Zagreb 2020.
3. Akyildiz A.T., Kowalska-Koczwara A., Hojdis Ł., Krajewski P.: Change in stiffness of damaged RC frame with masonry infills connected with stiff and flexible interfaces. Brick and Block Masonry

- From Historical to Sustainable Masonry – Kubica, Kwiecień & Bednarz (eds) ©2020 Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-367-56586-2, London 2020, pp. 546–552.
4. Hermanns L., Fraile A., Alarcón E., Álvarez R.: Performance of buildings with masonry infill walls during the 2011 Lorca earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, (2014) vol. 12, no. 5, pp. 1977–1997.
  5. Ricci P., De Luca F., Verderame G.M.: 6th April 2009 L’Aquila earthquake, Italy: reinforced concrete building performance. *Bulletin of Earthquake Engineering*, (2011) vol. 9, no. 1, pp. 285–305.
  6. Varum H., Furtado A., Rodrigues H., Dias-Oliveira J., Vila-Pouca N., Ar?de, A.: Seismic performance of the infill masonry walls and ambient vibration tests after the Ghoroka 2015, Nepal earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, (2017) vol. 15, no. 3, pp. 1185–1212.
  7. Kwiecień A., Rakicevic Z., Bogdanovic A., Manojlovski F., Poposka A., Shoklarovski A., Rousakis T., Ilki A., Gams M., Viskovic A.: PUFJ and FRPU earthquake protection of infills tested in resonance. 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering 1CroCEE, 22–24 March 2021, Zagreb, Croatia, pp. 465–475.
  8. Triller P., Kwiecień A., Bohinc U., Zając B., Rousakis T., Viskovic A.: Preliminary in-plane shear test of damaged infill strengthened by FRPU. 10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2020/2021), Istanbul 8–10 Dec. 2021.
  9. Kwiecień A.: Polimerowe złącza podatne w konstrukcjach murowych i betonowych. Monografia nr 414, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Seria Inżynieria Lądowa, Kraków 2012, ISSN 0860-097X, stron 250
  10. Akyildiz A.T., Kwiecień A., Zając B., Triller P., Bohinc U., Rousakis T., Viskovic A.: Preliminary in-plane shear test of infills protected by PUFJ interfaces. *Brick and Block Masonry – From Historical to Sustainable Masonry : proceedings of the 17th International Brick and Block Masonry Conference (17th IB2MAC 2020)*, Kraków, Poland, 5–8 July 2020, CRC Press / Balkema Taylor & Francis Group, pp. 968–975.
  11. Rousakis T., Papadoulis E., Sपालidis A., Vanian V., Ilki A., Halici O.F., Kwiecień A., Zając B., Hojdys Ł., Krajewski P., Tekieli M., Akyildiz A.T., Viskovic A., Rizzo F., Gams M., Triller P., Ghiassi B., Benedetti A., Colla C., Rakicevic Z., Bogdanovic A., Manojlovski F., Soklarovski A.: Flexible Joints between RC frames and masonry infill for improved seismic performance – shake table tests. *Brick and Block Masonry – From Historical to Sustainable Masonry : proceedings of the 17th International Brick and Block Masonry Conference (17th IB2MAC 2020)*, Kraków, Poland, 5–8 July 2020, CRC Press / Balkema Taylor & Francis Group, pp. 499–507.
  12. Rousakis T., Ilki A., Kwiecień A., Viskovic A., Gams M., Triller P., Ghiassi B., Benedetti A., Rakicevic Z., Colla C., Halici O.F., Zając B., Hojdys Ł., Krajewski P., Rizzo F., Vanian V., Sपालidis A., Papadoulis E., Bogdanovic A.: Deformable polyurethane joints and fibre grids for resilient seismic performance of reinforced concrete frames with orthoblock brick infills. *Polymers* 2020, 12, 2869; doi:10.3390/polym12122869, pp. 1–20.
  13. Akyildiz A.T., Kowalska-Koczwara A., Hojdys Ł.: Seismic Protection of RC Buildings by Polymeric Infill Wall-Frame Interface. *Polymers*. 2021; 13(10):1577.
  14. Rousakis T, Vanian V, Fanaradelli T, Anagnostou E.: 3D FEA of Infilled RC Framed Structures Protected by Seismic Joints and FRP Jackets. *Applied Sciences*. 2021; 11(14):6403.
  15. EN 1998-1 2004. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part I: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings.
  16. Turkish Seismic Design Code 2018. Turkish Ministry of Interior, Disaster and Emergency Management Presidency.

## **PUFJ and FRPU systems as earthquake protection of reinforced concrete structures with infills**

**Key words:** RC frames with infills, polymer flexible joints, PUFJ, FRPU, dynamic tests on shake table, cyclic and resonance loading, antiseismic protection