

SZYBKIE WZMOCNIENIA KONSTRUKCJI MATERIAŁAMI KOMPOZYTOWYMI MOCOWANYMI NA ZŁĄCZU PODATNYM

BOGUSŁAW ZAJĄC, *e-mail: bozajac@pk.edu.pl*
Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

STEFANO DE SANTIS
Università Degli Studi Roma Tre, Rome, Italy

JOSE SENA-CRUZ
University of Minho, Guimarães, Portugal

MATIJA GAMS
Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Ljubljana, Slovenia

ARKADIUSZ KWIECIEŃ
FlexAndRobust Systems Sp. z o.o.

Streszczenie: W pracy zostały przedstawione wyniki badań laboratoryjnych i obserwacji *in situ*, określające skuteczność wzmocnienia konstrukcji murowych i betonowych materiałami kompozytowymi, mocowanymi na sztywnych i podatnych warstwach adhezyjnych. Badania prowadzone były na elementach oryginalnie wzmocnionych oraz naprawianych po oderwaniu wzmocnienia kompozytowego. Zaprezentowane rezultaty, otrzymane przez różne laboratoria w Polsce i za granicą, potwierdziły wysoką skuteczność polimerowych złączy podatnych, jako warstw adhezyjnych mocujących kompozyty do kruchych podłoży. Ich dodatkową zaletą jest niska wrażliwość na zmiany temperatury otoczenia, co odróżnia je od epoksydowych warstw adhezyjnych, wrażliwych na podwyższone temperatury. Dodatkową zaletą podatnych warstw adhezyjnych jest ich niska wrażliwość na nierówności podłoża i działanie koncentracji naprężeń towarzyszących pęknięciom, co czyni je skutecznym elementem konstrukcyjnym, mocującym wzmocnienia kompozytowe do zdegradowanych uszkodzeniami podłoży murowych i betonowych. Szybkość mocowania kompozytów na złączach podatnych i ich krótki czas osiągnięcia wymaganej nośności, czyni te systemy skutecznym narzędziem do wykonywania szybkich napraw awaryjnych, co przedstawiono także na przykładach wzmocnień obiektów w skali naturalnej.

Słowa kluczowe: trzęsienia ziemi, obciążenia cykliczne, uszkodzenia budynków, wzmacnianie murów kompozytami, złącza podatne

1. Wstęp

Konstrukcje murowe i betonowe cechują się dużą sztywnością i niewielką ciągliwością oraz kruchą postacią zniszczenia. Z uwagi na powyższe cechy i relatywnie dużą masę, są one wrażliwe na działanie sił dynamicznych pochodzących od drgań komunikacyjnych, robót budowlanych, wstrząsów górniczych, czy trzęsień ziemi. Te ostatnie należą do najbardziej destrukcyjnych [1]. Budynki uszkodzone w wyniku działania wstrząsu głównego często nie są w stanie przenieść wstrząsów wtórnych [2], gdy nie są w porę zabezpieczone (rys. 1). Ich bardzo osłabiona konstrukcja (rys. 2) wymaga natychmiastowej interwencji wzmacniającej.



Rys. 1. Uszkodzenie ściany kościoła San Francesco w Mirandoli (Włochy) spowodowane głównym wstrząsem sejsmicznym (po lewej) i zniszczony kościół po wstrząsie wtórnym (po prawej) [2]

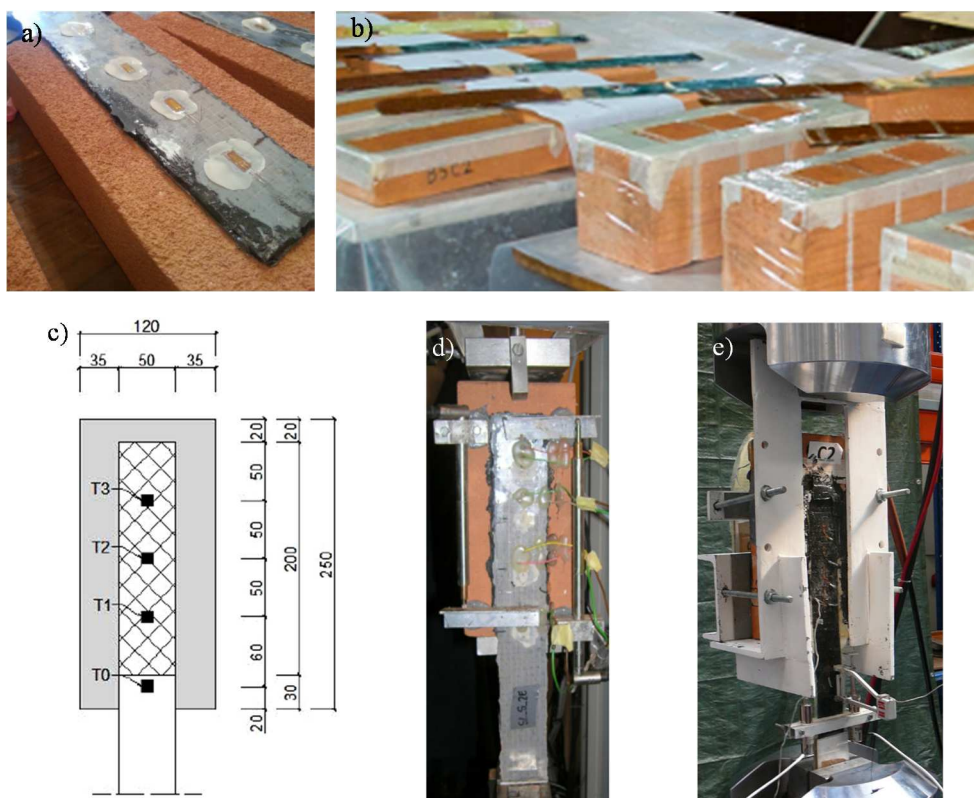


Rys. 2. Uszkodzone budynki mieszkalne po trzęsieniu ziemi w Nepalu: w Patan (po lewej) i w Katmandu (po prawej)

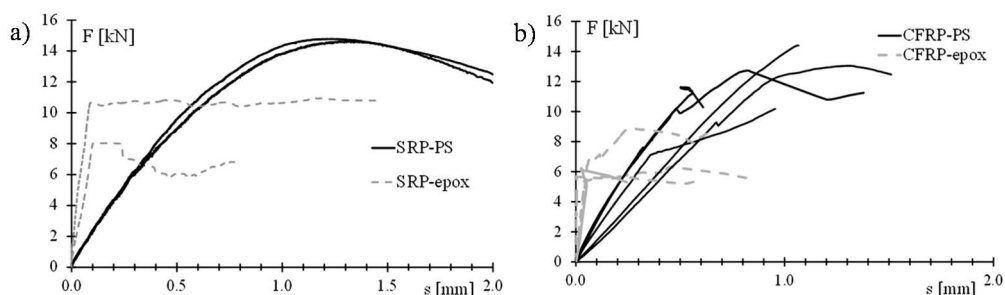
Wzmocnienie tak uszkodzonych konstrukcji w szybkim czasie (przed wystąpieniem wstrząsów wtórnych) są możliwe przy użyciu polimerowych złączy podatnych [3]. Cechują się one zdolnością do przenoszenia dużych deformacji pod obciążeniem i dyssypacji energii podczas drgań. Mogą być one stosowane w postaci iniekcji spajającej pęknięte ściany [4] lub jako podatne warstwy adhezyjne mocujące wzmocnienia kompozytowe do podłoża [5]. Użycie materiałów kompozytowych do wzmacniania konstrukcji stało się powszechną praktyką inżynierską, zwłaszcza na terenach sejsmicznych [6]. Stosowane są różne systemy bazujące na włóknach szklanych, bazaltowych, węglowych, aramidowych lub stalowych. Do ich mocowania wykorzystuje się sztywne warstwy adhezyjne wykonane z żywicy epoksydowych [7] lub mineralnych [8], a także podatne warstwy adhezyjne wykonane z mas poliuretanowych (np. polimeru PS) [9]. Te ostatnie mogą być stosowane jako matryca bezpośrednio klejąca kompozyt do podłoża [10–14] (rys. 3a), lub jako system naprawczy mocujący oderwany kompozyt dla ponownego wykorzystania (rys. 3b).

2. Sztywne i podatne warstwy adhezyjne w teście ścinania na elementach murowych

Test ścinania SLST (ang. *Single Lap Shear Test*) jest powszechnie używany do badania nośności wzmocnień kompozytowych [7–9] – rys. 3c, 3d i 3e. Do mocowania kompozytów do podłoża kruchych najczęściej stosowane są żywice epoksydowe, cechujące się dużą sztywnością (moduł Younga wynosi od kilku do kilkudziesięciu GPa) i niewielką odkształcalnością graniczną (poniżej 2%) [7]. Sztywne warstwy adhezyjne generują we wzmocnianym podłożu duże koncentracje naprężeń i pracują na niewielkiej długości skleiny (rys. 5c). Podatne warstwy adhezyjne (o module Younga od kilku do kilkuset MPa i odkształcalności granicznej powyżej 10%), rozwijane i badane w ostatnich latach w Politechnice Krakowskiej (PK) oraz w laboratoriach europejskich (np. w University Roma Tre – UNIRM3), redukują piki koncentracji naprężeń i rozkładają je na większej powierzchni (rys. 5c), dzięki czemu są w stanie przenosić większe obciążenia, przy znacząco większych deformacjach [9]. Uzyskane z badań wyniki potwierdziły, że mocowanie różnych włókien kompozytowych bezpośrednio do podłoża słabego (murowego) jest korzystniejsze na podatnych warstwach adhezyjnych (polimer PS), niż na sztywnych epoksydowych. Porównanie pracy wysokowytrzymałych włókien węglowych CFRP i stalowych SRP, mocowanych na żywicy epoksydowej i polimerze PS [10, 11] przedstawiono na rys. 4. Pokazane wykresy wskazują na większą nośność i ciągliwość podatnego mocowania włókien polimerem PS, w porównaniu do sztywnego mocowania żywicą epoksydową.

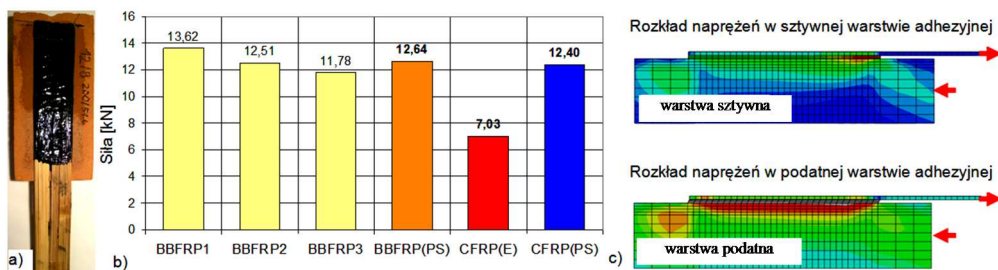


Rys. 3. Test pojedynczego ścinania (SLST): a) CFRP mocowane bezpośrednio do cegły na polimerze PS, b) kompozyt oderwany od podłoża murowego – przygotowany do naprawy polimerem PS, c) wymiary warstwy adhezyjnej, d) naprawiona próbka ceglana w trakcie badania w PK, e) naprawiona próbka murowa w trakcie badania w UNIRM3 [14]



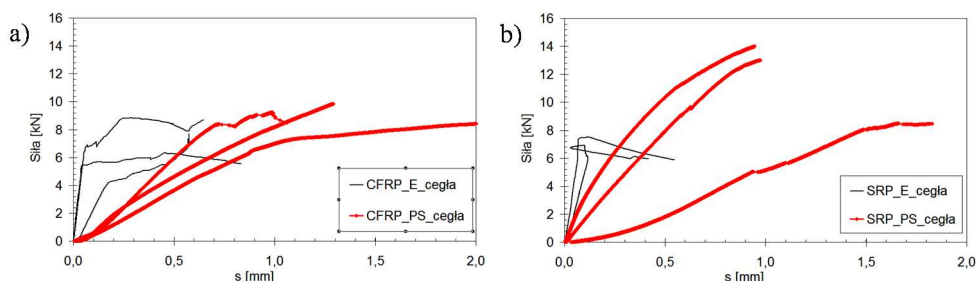
Rys. 4. Zależności siła-poślizg w SLST dla kompozytów przyklejonych do cegły na żywicy epoksydowej (epox) i polimerze PS: a) włókna węglowe CFRP i b) włókna stalowe SRP [2]

Wyniki badań przedstawione w pracy [15] wykazały, że nie wysoka wytrzymałość kompozytu decyduje o nośności połączenia, ale zdolność warstwy adhezyjnej do redukcji pików koncentracji naprężeń i ich redystrybucji na większą powierzchnię skleiny (rys. 5c), co przekłada się na mniejsze naprężenia w kruchym podłożu i tym samym na większą zdolność do przenoszenia obciążeń. Zastosowanie we wzmocnieniu cegły (rys. 5a) słabych włókien bambusowych BBFRP(PS) zamiast węglowych CFRP(PS), mocowanych na tym samym polimerze PS, nie spowodowało obniżenia nośności wzmocnienia (rys. 5b), lecz w obu przypadkach znacząco przewyższyło nośność otrzymaną dla włókien węglowych mocowanych na epoksydzie CFRP(E).

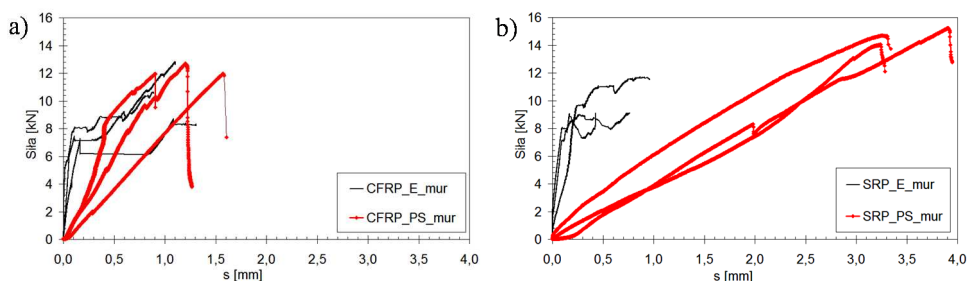


Rys. 5. a) włókna bambusowe BBFRP przyklejone do cegły na polimerze PS, b) porównanie wartości średnich sił niszczących w SLST dla BBFRP(PS), CFRP(E) i CFRP(PS) [15], c) porównanie rozkładu naprężeń dla sztywnej i podatnej warstwy adhezyjnej [9]

Poliuretan PS może być też stosowany jako warstwa naprawcza, ponownie mocująca oderwany od podłoża kompozyt. Testy ścinania, przeprowadzone w różnych laboratoriach [7, 9, 13, 14] na ceglach i murkach wzmocnionych kompozytami klejonymi do podłoża za pomocą żywic epoksydowych, pokazały, że zachowanie połączenia adhezyjnego jest sztywne, z kruchym i gwałtownym modelem zniszczenia. Widoczny na wykresach (rys. 6 i 7) pokrytyczny zapas ciągliwości jest jedynie odzwierciedleniem procesu niszczenia (krótkiego w czasie), niedającego zapasu bezpieczeństwa. Zniszczone próbki ceglane i murowe (rys. 3b) zostały naprawione poprzez ponowne doklejenie oderwanego kompozytu na polimerze PS i jeszcze raz zbadane w SLST. Przykładowe wyniki badań porównawczych dla CFRP i SRP na cegle (PK) i na murze (UNIRM3) pokazano na rys. 6 i 7. Połączenie podatne po naprawie wprowadziło dodatkowo znaczącą ciągliwość (przekładającą się na bezpieczeństwo), ale jednocześnie istotnie zwiększyło nośność wzmocnienia po jego naprawie. Współczynniki wzmocnienia podane w [14] wynosiły: odpowiednio na cegle 1,37 i 2,01 dla CFRP i SRP oraz na murze 1,29 i 1,55 dla CFRP i SRP.



Rys. 6. Zależności siła-poślizg w SLST (PK) dla kompozytów przyklejonych do cegły na żywicy epoksydowej (E) i polimerze PS: a) włókna węglowe CFRP i b) włókna stalowe SRP

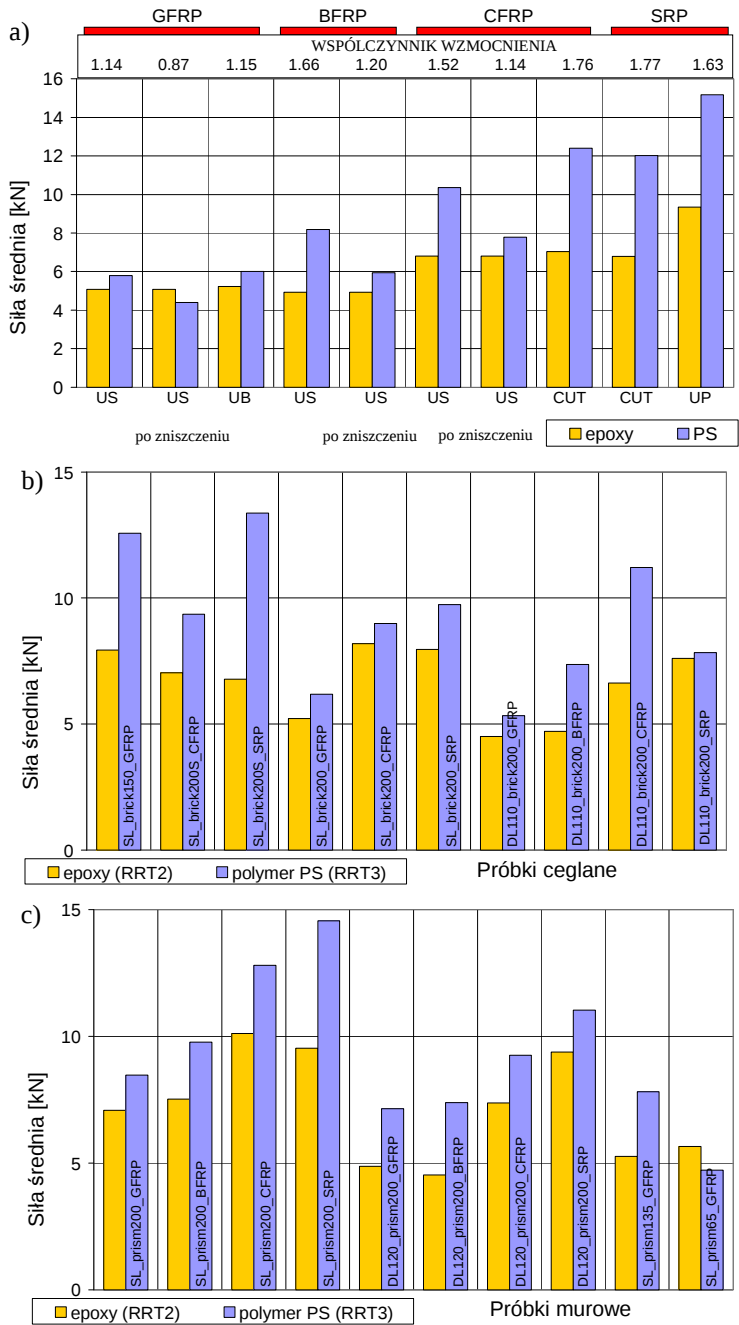


Rys. 7. Zależności siła-poślizg w SLST (UNIRM3) dla kompozytów przyklejonych do muru na żywicy epoksydowej (E) i polimerze PS: a) włókna węglowe CFRP i b) włókna stalowe SRP

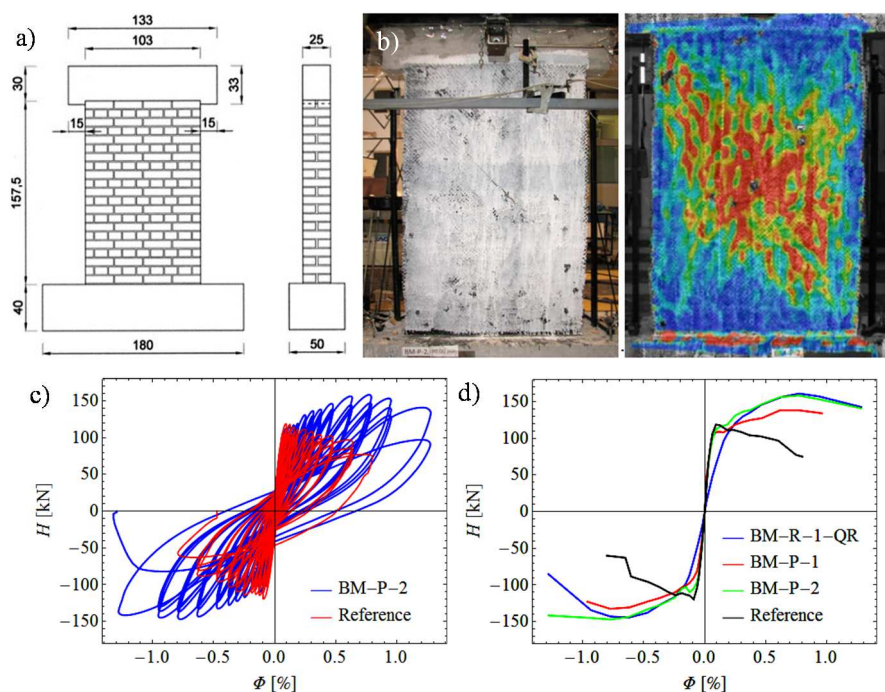
Przedstawione powyżej zależności zostały także potwierdzone badaniami przez inne laboratoria europejskie (z Włoch i Portugalii). Porównanie średnich wartości sił maksymalnych uzyskanych w SLST dla różnych kompozytów (GFRP – szkło, BFRP – bazalt, CFRP i SRP) przyklejonych bezpośrednio do podłoża murowego na żywicy epoksydowej i polimerze PS pokazano na rys. 8a. Praktycznie we wszystkich przypadkach zanotowano większą nośność po zastosowaniu podatnej warstwy adhezyjnej (PS). Podobny wynik zanotowano dla próbek ceglanych (rys. 8b) i murowych (rys. 8c) po naprawie polimerem PS.

Korzystne właściwości podatnej warstwy adhezyjnej, znacząco lepsze od sztywnych [16], zostały także potwierdzone w badaniach laboratoryjnych w skali naturalnej, przeprowadzonych w Słowenii na ścianach ceglanych (rys. 9a) wzmocnionych obustronnie siatkami GFRP mocowanymi na polimerze PS, poddanych cyklicznemu ścinaniu (rys. 9b). Zarówno w przypadku wzmocnienia ściany nieuszkodzonej jak i uszkodzonej [5, 17], widoczna jest korzystna redystrybucja odkształceń (w obrazie DIC – ang. *Digital Image Correlation* – rys. 9c) i naprężeń na większej powierzchni (redukcja pików koncentracji naprężeń), przy jednoczesnym znaczącym wzroście nośności i ciągliwości, a braku przyrostu sztywności globalnej ściany (w porównaniu do ściany niewzmocnionej) – rys. 9d. Podobne rezultaty uzyskano dla ścian wzmocnionych przed obciążeniem, jak i po wystąpieniu uszkodzeń, co potwierdza obwiednia dla pętli histerezy (rys. 9d).

Właściwości te czynią zaprezentowany system wzmocnienia bardzo skutecznym w przypadku naprawy i zabezpieczenia konstrukcji poddanych dużym deformacjom (trzęsienia ziemi, szkody górnicze, osuwiska). Potwierdza to naprawa betonowej ściany oporowej na aktywnym osuwisku, uszkodzonej po ulewnych deszczach. Rozwieranie się jej pęknięć zostało powstrzymane przez siatki GFRP mocowane na polimerze PS (rys. 10) [18].



Rys. 8. Porównanie średnich wartości sił maksymalnych uzyskanych w różnych laboratoriach w SLST dla kompozytów przyklejonych do podłoża murowego na żywicy epoksydowej (epoxy) i polimerze PS: a) włókna przyklejane do cegły na epoksydzie i polimerze PS [11], b) włókna przyklejane do cegły na epoksydzie i po oderwaniu naprawione na polimerze PS [14], c) włókna przyklejane do muru na epoksydzie i po oderwaniu naprawione na polimerze PS [14]



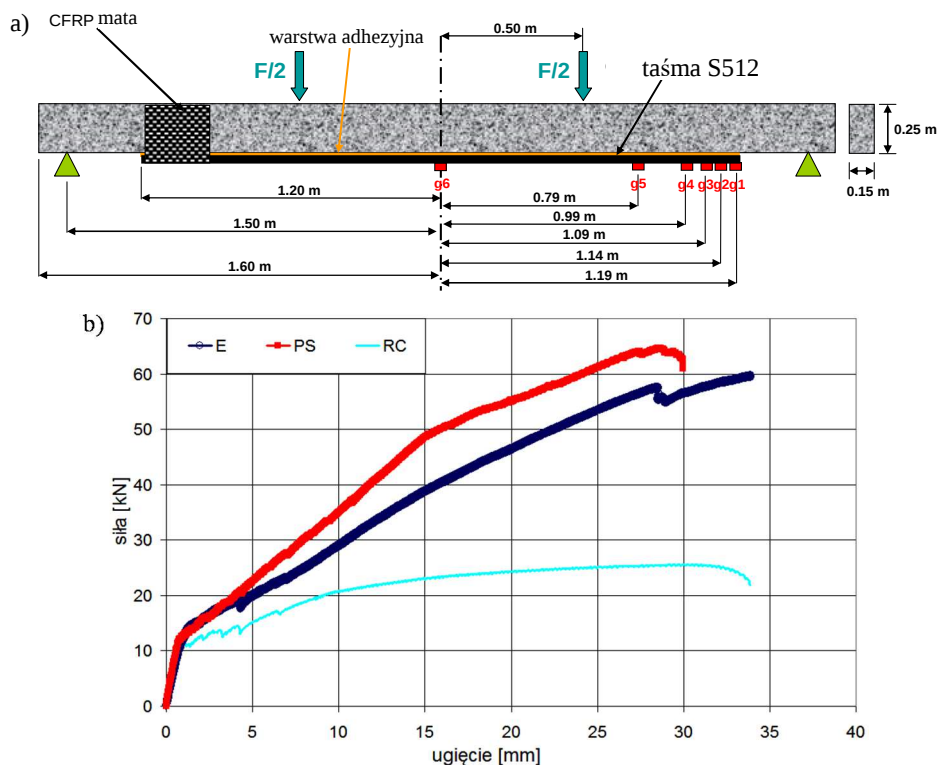
Rys. 9. Badanie cykliczne na ścinanie muru wzmocnionego obustronnie siatką z włókna szklanego, przyklejoną na polimerze PS [17]: a) wymiary ściany w [cm], b) widok wzmocnionej ściany i obraz mapy odkształceń w DIC, c) porównanie charakterystyki siła-kąt dla ściany niewzmocnionej (Reference) i wzmocnionej (BM-P-2), d) porównanie obwiedni dla krzywych histerezy ściany niewzmocnionej i 3 ścian wzmocnionych



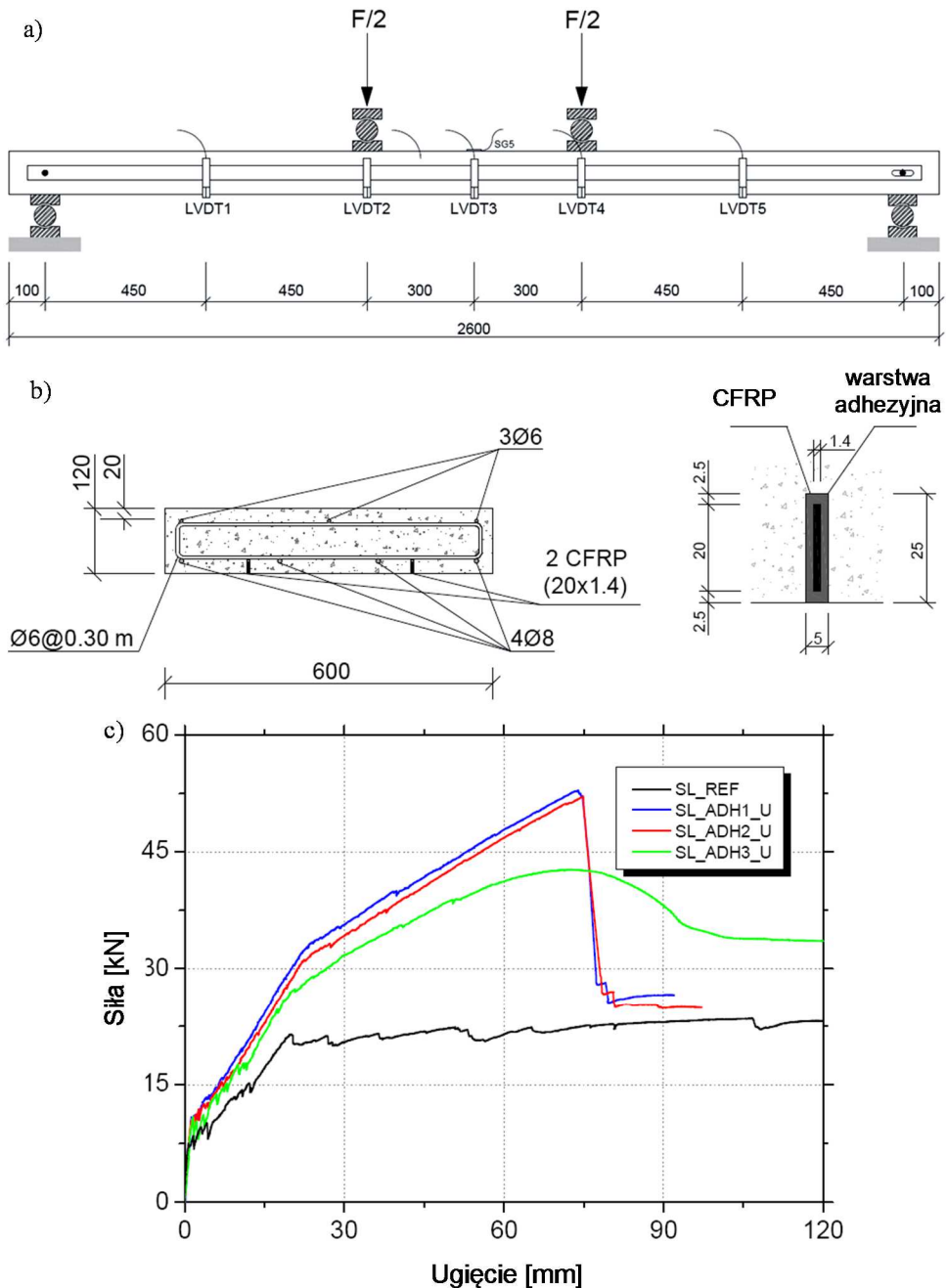
Rys. 10. Pęknięta ściana betonowa na aktywnym osuwisku, zabezpieczona w trybie awaryjnym wklejonymi prętami stalowymi i siatkami z włókna szklanego przyklejonymi na polimerze PS [18]

3. Wzmacnianie dźwigarów żelbetowych kompozytami mocowanymi na sztywnych i podatnych warstwach adhezyjnych

Wzmacnianie żelbetowych dźwigarów materiałami kompozytowymi jest stosowane od lat w budownictwie. Stosowane są różne techniki mocowania wzmocnienia. Do najczęściej używanych metod należy przyklejanie kompozytów na zewnętrznych powierzchniach elementów konstrukcyjnych (rys. 11a), znane jako EBR (ang. *Externally Bonded Reinforcement*) [12, 19, 20] lub wklejenie zbrojenia kompozytowego w betonową otulinę (rys. 12b) [21, 22], znane jako NSMR (ang. *Near Surface Mounted Reinforcement*). Coraz popularniejsze w aplikacji jest także sprężanie materiałów kompozytowych przed włączeniem ich do współpracy [19, 20, 22, 23]. Wszystkie wymienione wzmocnienia bazują najczęściej na zastosowaniu sztywnych warstw adhezyjnych wykonanych z żywicy epoksydowych, których jedną z podstawowych mankamentów jest brak odporności na podwyższone temperatury, z uwagi na tzw. temperaturę szklenia, przy osiągnięciu której epoksydy obniżają poziom swoich parametrów wytrzymałościowych o kilka rzędów wielkości. Niektóre epoksydy cechują się temperaturą szklenia mieszczącą się w zakresie temperatur eksploatacyjnych [24]. Rozwiązaniem tego problemu mogą być poliuretanowe warstwy adhezyjne, pracujące stabilnie w szerokim zakresie temperatur eksploatacyjnych i podwyższonych [25]. Podatne warstwy adhezyjne wykazują swoją skuteczność także w aplikacjach na żelbetowych dźwigarach wzmocnionych kompozytami, co zostało przedstawione w [12] dla EBR i w [26] dla NSMR.



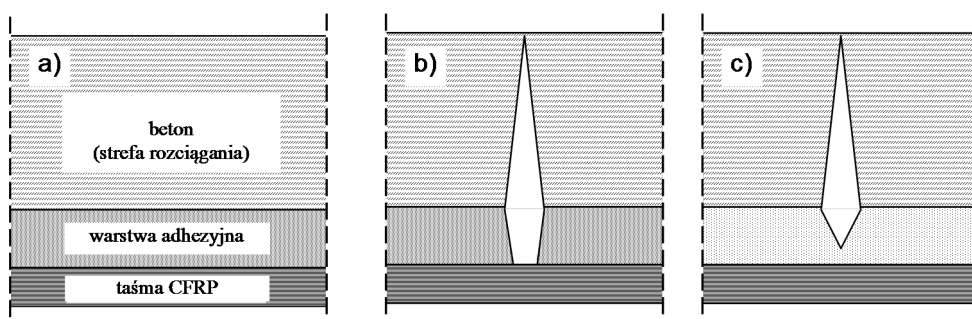
Rys. 11. Badanie belki żelbetowej na zginanie wzmocnionej taśmą CFRP (S512), doklejaną zewnętrznie do spodu belki na sztywnej żywicy epoksydowej (E) i podatnym polimerze PS: schemat obciążenia (a), porównanie charakterystyki siła-ugięcie dla belki niewzmocnionej (RC) oraz wzmocnionej ze sztywną (E) i podatną (PS) warstwą adhezyjną (b) [12]



Rys. 12. Badanie płyty żelbetowej na zginanie wzmocnionej 2 wkładkami CFRP, wklejanymi wewnątrz na jej spodzie w otulinie zbrojenia na sztywnej żywicy epoksydowej (ADH1 i ADH2) oraz na podatnym polimerze PS (ADH3): a) schemat obciążenia, b) przekrój przez płytę i wzmocnienie, c) porównanie charakterystyki siła-ugięcie dla płyty niewzmocnionej (REF) oraz wzmocnionej ze sztywną (ADH1 i ADH2 – epoksydy) i podatną (ADH3 – polimer PS) warstwą adhezyjną [26]

Porównanie skuteczności wzmocnienia belek żelbetowych taśmami CFRP (EBR) w przypadku zastosowania sztywnej (epoksyd E o module Younga 12800 MPa) i podatnej (polimer PS o module Younga 8 MPa) warstwy adhezyjnej zostało przedstawione w [12] dla testu czteropunktowego zginania (rys. 11a). Charakterystyka siła-ugięcie (rys. 11b) pokazała, że oba typy wzmocnienia (E i PS) zwiększają nośność badanej belki ponad dwukrotnie w stosunku do belki niewzmocnionej (RC). CFRP klejone na polimerze PS pozwoliło na uzyskanie większej nośności od CFRP klejonego na epoksydzie o ok. 9% i znacząco mniejszego ugięcia przy tym samym poziomie obciążenia. W strefie pracy elementu zarysowanego obserwuje się większą sztywność belki wzmocnionej na warstwie podatnej (PS) w porównaniu do (E), wynikającą z redukcji efektu karbu i redystrybucji naprężeń w kompozycie (rys. 13).

Podobnie ponad dwukrotny przyrost nośności (rys. 12c) obserwowany jest w teście czteropunktowego zginania płyty żelbetowej (rys. 12a) wzmocnionej wkładkami CFRP w technologii NSMR (rys. 12b) w stosunku do płyty niewzmocnionej (REF) [26]. Zastosowanie podatnej warstwy adhezyjnej z polimeru PS (ADH3 o module Younga 12 MPa) skutkuje podobną charakterystyką siła-ugięcie, co w przypadku zastosowania sztywnych warstw adhezyjnych z epoksydów (ADH1 i ADH2 o modułach Younga 11600 MPa i 7500 MPa, odpowiednio) – rys. 12c. Polimer PS zabezpiecza konstrukcję przed kruchym zniszczeniem i wprowadza w stanie podkrytycznym dodatkową ciągliwość i pewien zapas nośności (zwiększający bezpieczeństwo).



Rys. 13. Redukcja efektu karbu w miejscu pęknięcia belki: a) przed zarysowaniem (E), b) po zarysowaniu (E) i (c po zarysowaniu (PS) [12]

5. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań doświadczalnych wskazują na wysoką skuteczność wzmocnienia elementów murowych i żelbetowych materiałami kompozytowymi mocowanymi na podatnej warstwie adhezyjnej (z polimeru PS), zwłaszcza w porównaniu do sztywnych (epoksydowych). Kompozytowe systemy wzmocnień z podatnym mocowaniem mogą być skutecznym narzędziem do szybkiej (awaryjnej) interwencji zabezpieczającej uszkodzoną konstrukcję przed zawaleniem, zwłaszcza tam, gdzie duże deformacje, koncentracje naprężeń w miejscu pęknięć lub podwyższone temperatury uniemożliwiają wykorzystanie epoksydowych warstw adhezyjnych. Kompozyty mocowane na polimerze PS dedykowane są wzmocnieniom, naprawom lub zabezpieczeniu konstrukcji na terenach trzęsień ziemi, działania szkód górniczych, osuwisk i występowania źródeł drgań. Ich podstawową zaletą jest szybki przyrost nośności (kilka godzin), możliwość dyssypacji energii, zdolność panoszenia obciążeń przy dużych deformacjach oraz redukcja koncentracji naprężeń, która umożliwia ich współpracę ze słabymi podłożami budowlanymi.

Systemy wzmacniające z polimerem PS są obecnie objęte procesem komercjalizacji, jako rozwiązania opatentowane na rzecz Politechniki Krakowskiej.

Literatura

1. Jasieńko J., Kwiecień A., Skłodowski M.: New flexible intervention solutions for protection, strengthening and reconstruction of damaged heritage buildings. International Conference on Earthquake Engineering and Post Disaster Reconstruction Planning (ICEE-PDRP 2016), Bhaktapur 2016, Nepal.
2. Kwiecień A., Gams M., Viskovic A., Zajac B.: Temporary and removable quick seismic protection of weak masonry structures using highly deformable adhesives. 10th International Conference SAHC 2016, Leuven, Belgium, pp. 1528–1535.
3. Kwiecień A. 2012: Polimerowe złącza podatne w konstrukcjach murowych i betonowych. Monografia nr 414, Wyd. PK, Seria Inżynieria Lądowa, Kraków, s. 250.
4. Kwiecień A., Zajac B., Stecz P., Ciurej H., Chelmecki J.: Badania dynamiczne budynku o popękanych ścianach sklejonych polimerową masą trwale sprężysto-plastyczną. Czasopismo Techniczne, Budownictwo, z. 2-B/2007, Zeszyt 6 (rok 104), s. 91–98.
5. Kwiecień A., Zajac B., Gams M.: Naprawa i zabezpieczenie murów poddanych obciążeniom dynamicznym i dużym deformacjom przy użyciu kompozytów mocowanych na podatnych warstwach adhezyjnych. XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane 2015, s. 799–806.
6. Papanicolaou C., Triantafillou T., Lekka M.: Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels. Construction and Building Materials 25 (2011), 504–14.
7. Valluzzi M.R., Oliveira D., Caratelli A., Castori G., Corradi M., de Felice G., Garbin E., Garcia D., Garmendia L., Grande E., Ianniruberto U., Kwiecień A., Leone M., Lignola G.P., Lourenço P.B., Malena M., Micelli F., Panizza M., Papanicolaou C.G., Prota A., Sacco E., Triantafillou T.C., Viskovic A., Zajac B., Zuccarino G.: Round Robin Test for composite-to-brick shear bond characterization, Materials and Structures, 45(2012): 1761–1791.
8. Ascione L., de Felice G., De Santis S. A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) reinforcement systems. Compos Part B-Eng. 78(2015), pp. 497–506.
9. Kwiecień, A.: Shear bond of composites-to-brick applied with highly deformable, in relation to resin epoxy, interface materials. Materials and Structures (2014)47:2005–2020.
10. Garbin E.; Kwiecień A.; Panizza M.; Zajac B.; Nardon F.; Valluzzi M.R.: Testing of bond solutions for UHTS steel strand composites applied to extruded bricks. 16th International Brick and Block Masonry Conference, Padova 2016, Italy, pp. 395–402.
11. Ceroni F., Kwiecień A., Mazzotti C., Bellini A., Garbin E., Panizza M., Valluzzi M.R.: The role of adhesive stiffness on the FRP-masonry bond behavior: A round robin initiative. 10th International Conference SAHC 2016, Leuven, Belgium, pp. 1061–1068.
12. Derkowski W., Kwiecień A., Zajac B.: CFRP strengthening of bent RC elements using stiff and flexible adhesives, Technical Transactions 1-B/2013, pp. 37–52.
13. Ghiassi, B., Xavier, J., Oliveira, D.V., Kwiecień, A., Lourenço, P.B., Zajac, B. 2015. Evaluation of the bond performance in FRP-brick components re-bonded after initial delamination, Composite Structures, 123: 271–281.
14. Kwiecień, A., De Felice, G., Oliveira, D.V., Zajac, B., Bellini, A., Ghiassi, B., Lignola, G.P., Lourenço, P.B., Mazzotti, C., Prota, A., De Santis, S. 2015. Repair of composite-to-masonry bond using flexible matrix, Materials and Structures 49(2016)7, pp. 2563–2580.
15. Kwiecień A., Hebel D.E., Wielopolski M., Javadian A., Heisel F.: Bamboo Fibre Reinforced Polymers as Highly Flexible Reinforcement of Masonry Structures in Seismic Areas. FRPRCS-12 & APFIS-2015 Joint Conference, Nanjing 2015, China.
16. Tomaževič, M., Gams M., Berset, T. 2011: Strengthening of historic brick masonry walls with GFRP coating. 11th North American Masonry Conference.
17. Gams M., Kwiecień, A., Zajac, B., Tomaževič, M.: Seismic strengthening of brick masonry walls with flexible polymer coating, 9th International Masonry Conference, Guimarães 2014, Portugalia, ID_1502.
18. Kwiecień A., Zajac B., Budzikowski A.: Powstrzymanie procesu destrukcji uszkodzonego muru oporowego na aktywnym osuwisku przy użyciu polimerowych złączy podatnych. Czasopismo Techniczne, Środowisko, z. 3-Ś-B/2011, Zeszyt 21 (rok 108), s. 111–122.
19. Kałuża M., Ajdukiewicz A., Comparison of behaviour of concrete beams with passive and active strengthening by means of CFRP strips. Architecture Civil Engineering Environment, Vol. 1 2008 (2), pp. 51–64.

20. Kotynia R.: Przyczepnościowe metody wzmocniania konstrukcji żelbetowych przy użyciu naprężonych kompozytów polimerowych. *Przegląd Bud.* 7–8/2015, s. 49–56.
21. Kotynia R.: Strain efficiency of near-surface mounted CFRP-strengthened reinforced concrete beams, Third international conference composites in construction, Lyon, 2005. pp. 35–42.
22. Barros J.A.O.: Pre-stress Technique for the Flexural Strengthening with NSM-CFRP Strips, Proc. 9th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, Sydney 2009, Australia.
23. Siwowski T., Michałowski J., Błazewicz S.: Nowy system sprężania taśm kompozytowych CFRP do wzmocniania mostów. XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane'2015, s. 947–960.
24. Turkowski P.: Odporność ogniowa belek żelbetowych wzmocnionych CFRP, zabezpieczonych i niezabezpieczonych ogniochronnie. XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane 2015, s. 711–718.
25. Zajac B.: Potentials of using PU in structural joints in civil engineering considering aspect of thermal work. Science and Technology Conference „Polyurethanes 2013 – current development trends”, 10/2013 Ustroń, Poland, Volume: O21
26. Cruz J., Borojevic A., Sena-Cruz J., Silva P., Fernandes P. and Kwiecień A.: Influência do tipo de adesivo no comportamento à flexão de faixas de laje reforçadas com sistemas NSM-CFRP. Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL – BE2016 FCTUC – Coimbra 2016, Portugalia.

QUICK STRENGTHENING OF STRUCTURES USING COMPOSITES BONDED ON FLEXIBLE ADHESIVES

Abstract: This paper presents the results of laboratory and in-situ tests, indicating the composite strengthening effectiveness of masonry and concrete structures, when rigid and flexible adhesives are applied. Tests were conducted on originally reinforced elements and repaired ones after composite detachment. Results obtained by different laboratories in Poland and abroad confirmed the high efficiency of flexible adhesives bonding composites to brittle substrates. Their advantage is the low sensitivity to surface irregularities and to changes in ambient temperature, which distinguishes them from epoxy adhesive layers, sensitive to high temperatures. They reduce effect of stress concentration accompanying cracks, making them effective in structural strengthening of masonry and concrete elements. Short time to achieve the required capacity, makes these systems an effective tool for making quick emergency repairs.

Keywords: earthquakes, cyclic loads, damages of buildings, composite-to-masonry strengthening, flexible joints