



## **NAPRAWA I ZABEZPIECZENIE MURÓW PODDANYCH OBCIĄŻENIOM DYNAMICZNYM I DUŻYM DEFORMACJOM PRZY UŻYCIU KOMPOZYTÓW MOCOWANYCH NA PODATNYCH WARSTWACH ADHEZYJNYCH**

ARKADIUSZ KWIECIEŃ, *akwiecie@pk.edu.pl*

BOGUSŁAW ZAJĄC

Instytut Mechaniki Budowli, Politechnika Krakowska

MATIJA GAMS

Section for Building Structures, Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Ljubljana

**Streszczenie:** W pracy zostały przedstawione wyniki badań eksperymentalnych ukierunkowanych na zwiększenie odporności ścian murowych na działania o charakterze sejsmicznym, w tym wstrząsów wywołanych eksploatacją górniczą. Przebadane zostały dwie ściany poddane obciążeniu cyklicznemu, z których jedna była niewzmocniona, a druga wzmocniona siatkami z włókien szklanych, mocowanych na podatnej poliuretanowej warstwie adhezyjnej, po wystąpieniu uszkodzeń. Wyniki pokazały, że przyklejenie materiałów kompozytowych do powierzchni bocznych ścian przy użyciu złącza podatnego jest efektywną metodą naprawy i wzmocnienia, gdyż znacząco zwiększa odporność sejsmiczną i nośność konstrukcji murowej w stopniu znacząco przewyższającym własności ściany niewzmocnionej.

**Słowa kluczowe:** wstrząsy górnicze, obciążenia cykliczne, wzmacnianie murów kompozytami, złącza podatne.

### **1. Wstęp**

Budynki murowane, zlokalizowane na terenach pod którymi odbywa się eksploatacja górnicza narażone są na działanie wstrząsów indukowanych tą eksploatacją [1] oraz działanie dużych deformacji powierzchni [2]. Oba te czynniki mogą oddziaływać w sposób cykliczny, powodując powstanie uszkodzeń konstrukcyjnych, wymagających naprawy [3–4]. Elementem murowym szczególnie narażonym na powstanie uszkodzeń są filarki międzyokienne. Uszkodzone elementy murowe powinny być naprawione i wzmocnione, w przypadku ich dalszego użytkowania na terenach eksploatacji górniczej. Wzmocnienia te powinny zwiększać nośność uszkodzonego elementu, i co ważne, powinny wprowadzać dodatkowy zapas energii odkształcenia, związany ze zwiększeniem ciągliwej pracy konstrukcji. Aspekt ten jest szczególnie ważny w odniesieniu do obiektów poddanych działaniu obciążeń dynamicznych i cyklicznych oraz dużych deformacji. Nie spełnia tego wymogu wiele dotychczas stosowanych sposobów naprawy uszkodzonych budynków. Nie zawsze są one skuteczne, szczególnie przy trwającej dłuższy czas eksploatacji górniczej [5], co potwierdzają nowe uszkodzenia w postaci zarysowań i pęknięć elementów konstrukcji oraz wykończenia, często ujawniające się w miejscach wcześniej wykonanych napraw.

Jednym ze standardowych podejść, stosowanym dotychczas w przypadku wzmacniania ścian ceglanych, jest wykonanie na powierzchniach bocznych plastra żelbetowego, połączonego ze ścianą stalowymi kotwami. Metoda ta wykazała się skutecznością przy wielu działaniach dynamicznych, także sejsmicznych, jednak stwarza trudności wykonawcze, z uwagi na

długi czas wiązania betonu i „brudzące” wykonawstwo (torkretowanie), ograniczające zastosowanie tej metody. Ponadto, zwiększenie masy wzmacnianego obiektu powoduje niekorzystny wzrost sił bezwładności w przypadku oddziaływań dynamicznych, dlatego materiały kompozytowe na bazie włókien węglowych (CFRP) lub szklanych (GFRP) wypierają tradycyjnie używaną we wzmocnieniach stal, a zaprawy polimerowe lub epoksydowe wypierają zaprawy cementowe i beton. Różne techniki wzmacniania ścian murowych przy użyciu materiałów kompozytowych (FRP) były testowane w laboratoriach [6–10]. Problemy związane z zastosowaniem sztywnych warstw adhezyjnych, w tym utrata zespolenia, powodująca wypaczanie wzmocnienia pod wpływem sił pionowych, zostały omówione w [11]. Jest to powód, dla którego praktykowane są metody pełnego opasania ścian [12] lub znaczącego zwiększenia ilości kotew [11].

W niniejszej pracy zastosowano polimerowe złącze podatne [5, 13-14] wykonane z dwuskładnikowego poliuretanowego polimeru PS, mocującego wzmocnienie kompozytowe do bocznych powierzchni ścian. Wysoka skuteczność tego systemu wzmocnienia w ujęciu pracy statycznej została wykazana w [15].

## **2. Badanie cykliczne ścian murowych wzmocnionych siatką z włókien szklanych**

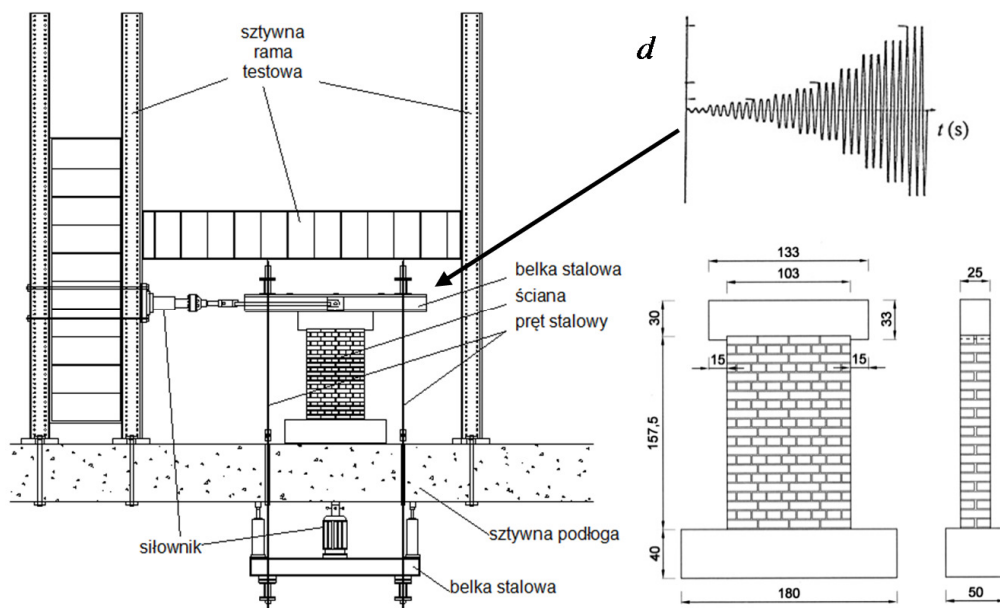
Typowym testem badania odporności sejsmicznej ścian murowych jest cykliczny test ścinania (obciążenie cyklicznie zmienne i duże przemieszczenia). Ściana o wysokości  $h = 157,5$  cm, utwierdzona w dolnej części w podłożu, była obciążona statyczną siłą pionową (naprężenie ściskające o poziomie 30% wytrzymałości muru na ściskanie), a górna (utwierdzona przesuwnie) cyklicznie zmienną siłą poziomą w płaszczyźnie ściany.

### **2.1. Stanowisko badawcze**

Schemat stanowiska badawczego do badań cyklicznych w Ljubljanie (Słowenia) w Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG) [9], pokazano na rys. 1, wraz z geometrią badanych ścian. Warunki utwierdzenia u podstawy zapewniała sztywna podłoga, natomiast u góry układ złożony z dwóch belek stalowych połączonych prętami stalowymi i siłownikami sterowanymi komputerowo (korygujących położenie belek). Siłę poziomą generował sterowany komputerowo siłownik hydrauliczny, a pomiary przemieszczeń poziomych  $d$ , odkształceń postaciowych  $d/h$  i odkształceń powierzchniowych realizowano przy użyciu czujników drogi i systemu optycznego.

### **2.2. Zastosowane materiały**

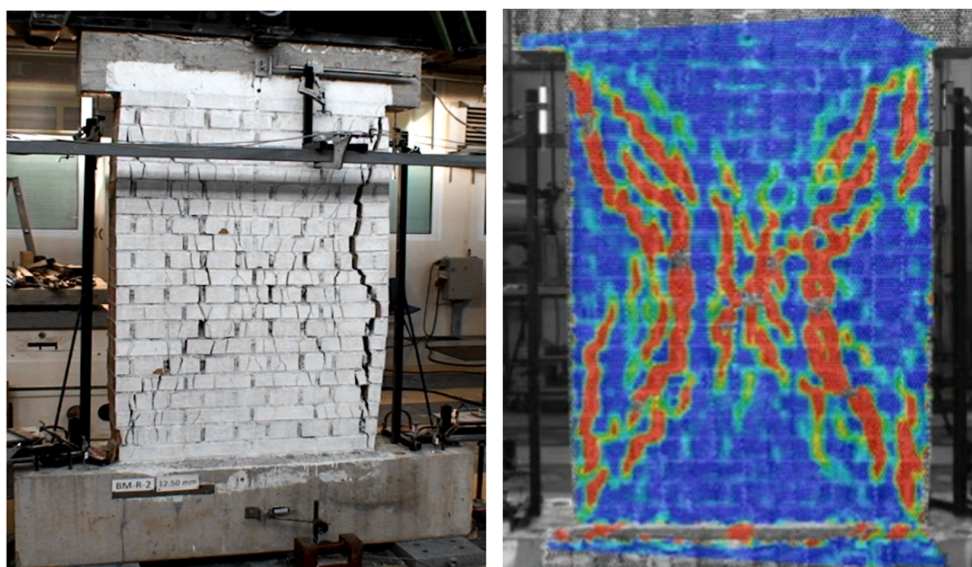
Ściany o wymiarach podanych na rys. 1 zostały wykonane ze słoweńskich cegieł dostępnych na rynku, o wymiarach 250/125/60 mm i nominalnej wytrzymałości na ściskanie 20 MPa (zbadana 37 MPa), połączonych zaprawą cementowo-wapienno-piaskową (0,25:1:8) o wytrzymałości na ściskanie 0,97 MPa. Wytrzymałość muru na ściskanie, określona na małych ściankach, zgodnie z normą EN 1052-1, wyniosła 6,43 MPa, a moduł Younga 1100 GPa. Do wzmocnienia ściany użyto 4 warstw siatki GFRP [15], powszechnie używanej do wykonywania elewacji zewnętrznych, o oczkach siatki 4/4 mm i ciężarze 145 g/m<sup>2</sup>. Jej wytrzymałość na rozciąganie wynosi ok. 20 kN/m. Jako warstwy adhezyjnej, mocującej włókna do bocznych powierzchni ścian, użyto podatnego polimeru PS o module Younga 8 MPa, wytrzymałości na rozciąganie i ścinanie 2,2 MPa i 0,8 MPa odpowiednio oraz wydłużeniu przy zerwaniu 45% [13].



Rys. 1. Szkic stanowiska badawczego w ZAG w Słowenii do cyklicznego badania ścian (po lewej) i schemat badanej ściany z blokami żelbetowymi (po prawej)

### 2.3. Zastosowane rodzaje wzmocnienia

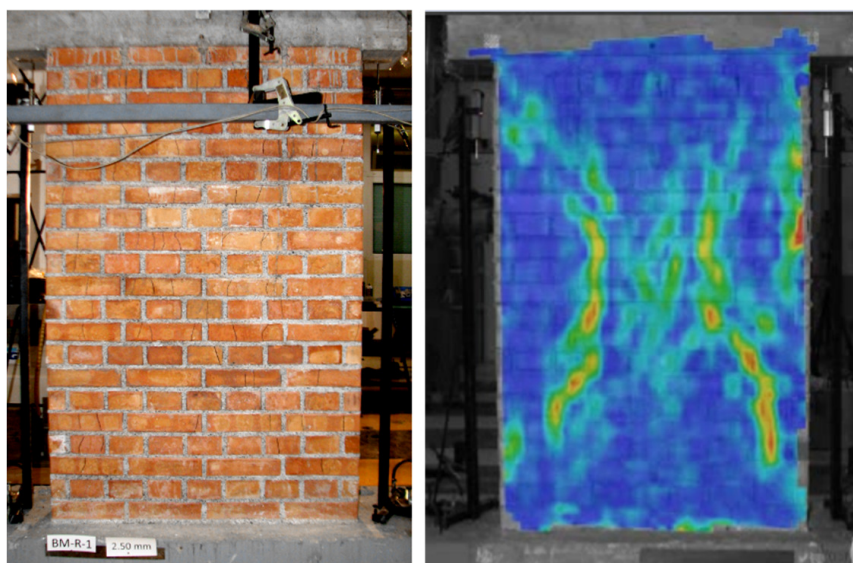
Niewzmocniona ścianka referencyjna (świadek) oznaczona jako BM-R-2, której schemat podano na rys. 1, była obciążona cyklicznie zmienną siłą poziomą, generującą przemieszczenie poziome  $d$  odpowiadające zarejestrowanemu podczas trzęsienia ziemi [11]. Każdy poziom przemieszczenia poziomego obejmował trzy cykle i był następnie zwiększany (rys. 1). W przypadku BM-R-2 test był prowadzony aż do zniszczenia ściany, przy jednoczesnej optycznej rejestracji zmian poziomu odkształceń na jej powierzchni (rys. 2).



Rys. 2. Ściana referencyjna BM-R-2 popękana w wyniku działania obciążenia cyklicznego (po lewej) i mapa rozkładu odkształceń na powierzchni ściany przy odkształceniu postaciowym 0,4% (po prawej)

Kolejna ściana oznaczona jako BM-R-1 została obciążona tak samo jak BM-R-2, lecz proces cyklicznego obciążania został zatrzymany w momencie pojawienia się pierwszych

widocznych uszkodzeń w postaci zarysowań (rys. 3) i zaobserwowania degradacji sztywności ściany. Stan ten symulował początkowe stadium uszkodzenia elementu konstrukcyjnego, wymagające wzmocnienia. Następnie, powierzchnie boczne uszkodzonej ściany zostały pokryte specjalnym środkiem gruntującym, a po jego wyschnięciu (15 minut) zamocowano 4 warstwy siatki z włókien szklanych, używając podatnego polimeru PS (rys. 4). Pierwsza i trzecia warstwa siatki została ułożona diagonalnie, natomiast druga i czwarta poziomo. Całkowita grubość warstwy wzmacniającej na każdej stronie wyniosła ok. 3 mm. Naprawa została wykonana pod obciążeniem pionowym w ciągu niecałej godziny, a ścianka BR-R-1, po wzmocnieniu oznaczona jako BM-R-1-QR, została ponownie obciążona cyklicznie aż do zniszczenia już po 20 godzinach od aplikacji wzmocnienia.



Rys. 3. Zarysowana ściana BM-R-1 przed przyklejeniem wzmocnienia (po lewej) i mapa rozkładu odkształceń na powierzchni ściany przy odkształceniu postaciowym 0,15% (po prawej)



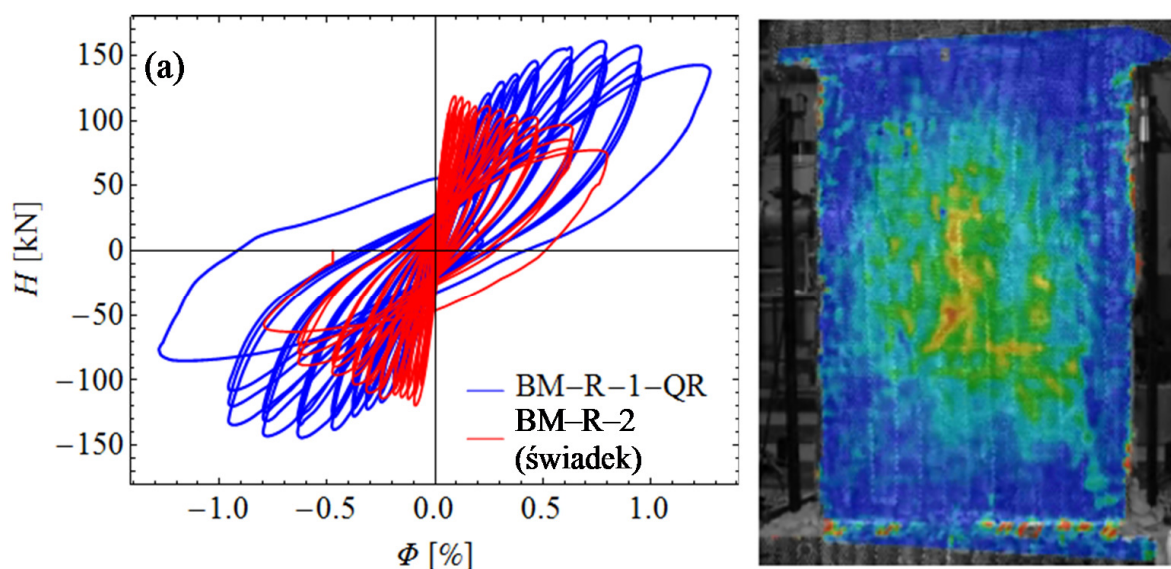
Rys. 4. Ściana BM-R-1 podczas gruntowania przed aplikacją wzmocnienia (po lewej) i ta sama ściana (jako BM-R-1-QR) w trakcie aplikacji wzmocnienia (po prawej)

Była to symulacja szybkiej naprawy uszkodzonej ściany murowej zaraz po pierwszym wstrząsie (sejsmicznym lub górniczym), a przed wystąpieniem wstrząsu wtórnego, skutkującego najczęściej pogłębieniem stopnia uszkodzenia konstrukcji lub jej zawaleniem.

### 3. Otrzymane wyniki badań

#### 3.1. Praca ściany po wzmocnieniu i jej postać zniszczenia

Pętłe histerezy zarejestrowane dla ściany BM-R-1-QR zostały porównane graficznie na rys. 5 z pętlami histerezy zarejestrowanymi dla ściany referencyjnej (świadka) BM-R-2. Pętłe te przedstawione są jako zależność poziomej siły wymuszającej działającej w płaszczyźnie ściany w funkcji kąta obrotu (odkształcenia postaciowego  $\Phi = d/h$ ). Obok pętli histerezy przedstawiono mapy odkształceń, zarejestrowane na powierzchni wzmocnionej ściany przy kącie obrotu  $\Phi = 1\%$ . Porównanie pętli histerezy wskazuje na dużą skuteczność zastosowanego wzmocnienia, zwłaszcza w aspekcie zwiększenia ciągłości elementu konstrukcyjnego oraz przyrostu nośności. Charakter pracy wzmocnienia wskazuje na dominującą rolę podatnej warstwy adhezyjnej w systemie wzmacniającym.



Rys. 5. Pętli histerezy BM-R-2 porównane z BM-R-1-QR (po lewej) oraz mapy rozkładu odkształceń na powierzchni bocznej ściany BM-R-1-QR przy odkształceniu postaciowym 1,0% (po prawej)

Należy zaznaczyć, że aplikacja wrażliwych na ścinanie włókien szklanych bezpośrednio na uszkodzoną ścianę (występowanie efektu karbu) prowadziłyby do nieefektywności wzmocnienia w przypadku zastosowania sztywnych (epoksydowych lub mineralnych) warstw adhezyjnych [11]. Zastosowanie podatnego polimeru PS jako warstwy adhezyjnej, doprowadziło do redukcji koncentracji naprężeń i ich bardziej równomiernego rozkładu na całą powierzchnię ściany (rys. 5), nawet gdy porówna się go z rozkładami odkształceń na ścianach niewzmocnionych (rys. 2 i 3). Na ścianie BM-R-1-QR odkształcenia mają mniejszą amplitudę niż na ścianach niewzmocnionych, nawet przy znacząco większym kącie odkształcenia postaciowego, towarzyszącego większemu obciążeniu siłą poziomą. Przedstawione porównanie wskazuje, że dla skuteczności wzmocnienia mniejsze znaczenie ma wytrzymałość kompozytu (słaba siatka z włókna szklanego), a większe podatność warstwy adhezyjnej, zapewniająca redukcję i redystrybucję naprężeń w połączeniu.

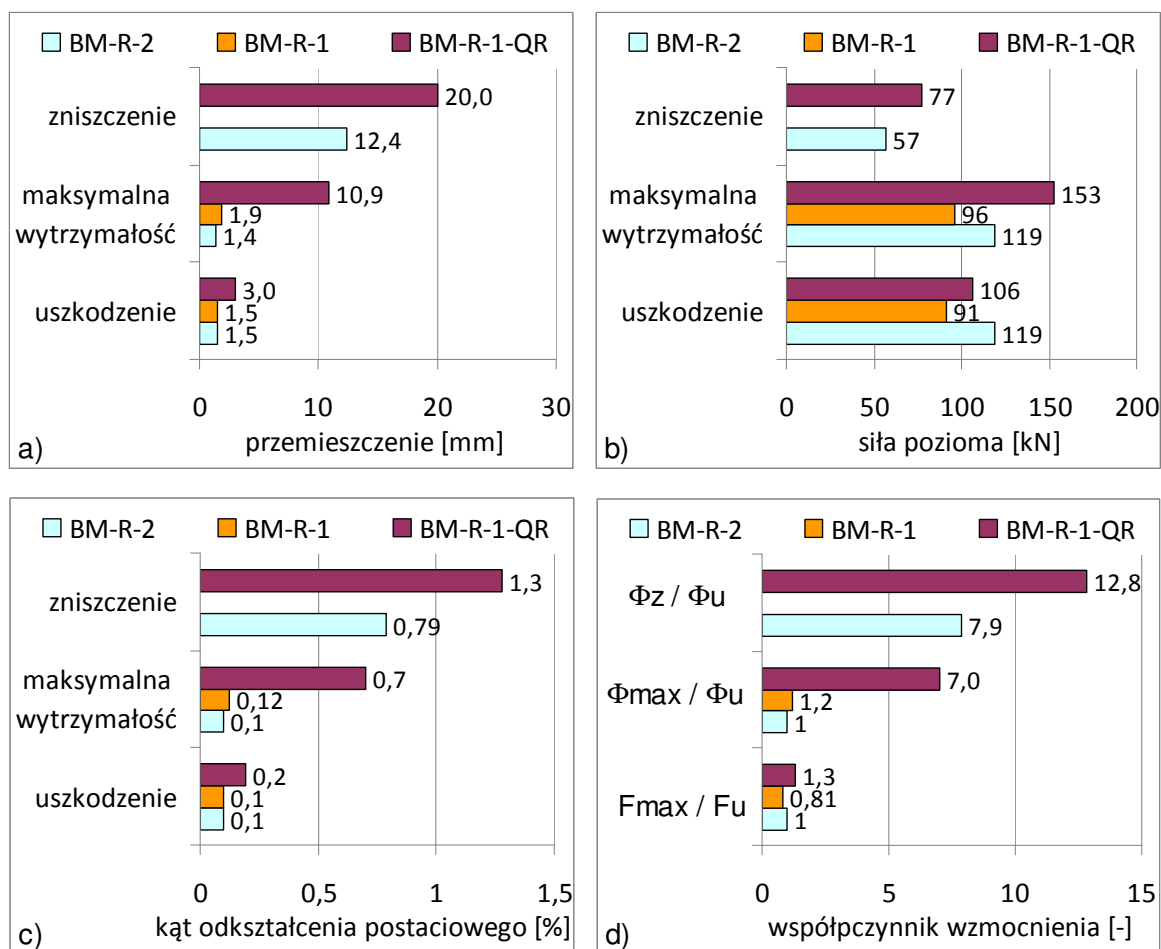
W przypadku ściany wzmocnionej, zniszczenie przebiegało wewnątrz ścian i było charakterystyczne dla ścinania. Powstające początkowo pod warstwą wzmacniającą pęknięcia generowały odkształcenia i mikropęknięcia na powierzchni kompozytu, ale nie były one przyczyną zniszczenia, gdyż w żadnym przypadku nie doszło do przerwania lub znaczącego uszkodzenia włókien szklanych, ani oderwania elementu wzmacniającego od podłoża murowego, obserwowanego przy sztywnych warstwach adhezyjnych [11]. Postacią zniszczenia było rozłupanie ściany w jej płaszczyźnie symetrii (równoległej do płaszczyzn wzmocnienia), powstałe w mechanizmie ścinania oraz wykruszania cegieł i zaprawy wewnątrz ściany. Wyboczenie jej obu płaszczyzn zewnętrznych wzmocnionych kompozytem było skutkiem utraty spójności w płaszczyźnie wewnętrznej ściany (rys. 6). W chwili całkowitej destrukcji ściany, kompozyt na podatnej warstwie adhezyjnej całkowicie zabezpieczał zniszczone fragmenty muru przed wypadnięciem na zewnątrz.



Rys. 6. Postać zniszczenia wzmocnionej ściany

### 3.2. Porównanie wyników badań

Wyniki badań zostały opracowane w trzech grupach, w których wyznaczono wartości graniczne parametrów: przemieszczenia górnej krawędzi ściany  $d$ , poziomej siły wymuszającej  $F$  oraz kąta obrotu (odkształcenia postaciowego)  $\Phi$ . Rozważane grupy dotyczyły następujących przypadków: chwili uszkodzenia ściany z redukcją jej sztywności, maksymalnej wytrzymałości i chwili zniszczenia. Dodatkowo obliczono współczynnik wzmocnienia dla wymienionych parametrów, odniesiony do parametrów ściany referencyjnej w chwili uszkodzenia. Zarejestrowane w poszczególnych grupach wartości granicznych parametrów dla badanych ścian przedstawiono oraz porównano ze sobą graficznie na rys. 7. Porównanie to wskazuje, że wzmocnienie (przy użyciu siatek z włókna szklanego mocowanych na podatnej warstwie adhezyjnej wykonanej z polimeru PS) pracuje skutecznie pod obciążeniami cyklicznymi symulującymi działanie wstrząsów sejsmicznych lub górniczych. Zanotowano znaczący przyrost (ok. 30%) maksymalnej wytrzymałości ściany wzmocnionej, w stosunku do wartości maksymalnej wytrzymałości ściany referencyjnej, podobnie jak w pracy [15]. Przyrost ciągłości (wyrażony kątem obrotu  $\Phi$ ) był ok. 7-mio i 13-to krotnie większy dla ściany wzmocnionej przy maksymalnej wytrzymałości i w chwili zniszczenia (odpowiednio), w porównaniu do kąta na ścianie referencyjnej zarejestrowanego w chwili uszkodzenia (rys. 7d).



Rys. 9. Porównanie graficzne wartości granicznych parametrów: przemieszczenia górnej krawędzi ściany  $d$  (a), poziomej siły wymuszającej  $F$  (b), kąta obrotu  $\Phi$  (c) oraz współczynnika wzmocnienia (d)

## 5. Podsumowanie

Zaprezentowane w niniejszej pracy wyniki badań doświadczalnych świadczą o bardzo wysokiej skuteczności zastosowanego wzmocnienia (siatki z włókien szklanych mocowane na podatnym polimerze PS), zwłaszcza w odniesieniu do konstrukcji murowych poddanych działaniu sił dynamicznych i dużych deformacji, w których zwiększenie ciągliwości jest bardziej istotne dla jej bezpiecznej pracy niż zwiększenie nośności konstrukcji. Zaproponowana metoda wzmocnienia jest także szybka w wykonaniu i przejęciu obciążeń. Pracuje skutecznie w niecałą dobę po aplikacji, co zostało wykazane badaniami laboratoryjnymi w skali naturalnej, i jest szczególnie przydatna, gdy trzeba wzmocnić osłabioną konstrukcję murową natychmiast po pojawieniu się uszkodzeń.

## Literatura

1. Tataro T. 2012: Odporność dynamiczna obiektów budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, s. 258.
2. Klabis L., Kowalski A. Deformacje powierzchni spowodowane eksploatacją pojedynczej ściany z zawalem stropu. Przegląd Górniczy 8/2013, 62–70.
3. Kawulok M. Szkody górnicze w budownictwie. Prace naukowe ITB. Warszawa 2010.

4. Szojda L. 2001: Analiza współdziałania murowanych budynków ścianowych z deformującym się podłożem. Politechnika Śląska, Gliwice.
5. Kwiecień A. 2012: Polimerowe złącza podatne w konstrukcjach murowych i betonowych. Monografia nr 414, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Seria Inżynieria Lądowa, Kraków, s. 250.
6. Konthesingha, C., Masia M., Petersen R., Mojsilović N., Simundic G., Page A. 2010: Cyclic In-plane Shear Behaviour of Unreinforced Masonry Panels Retrofitted with Fibre Reinforced Polymer Strips. 8th International Masonry Conference,.
7. Papanicolaou C., Triantafillou T., Lekka M. 2011: Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels. *Construction and Building Materials* 25 (2011), 504–514.
8. Schwegler, G. 1994: Masonry Construction Strengthened with Fiber Composites in Seismically Endangered Zones. 10th European Conference on Earthquake Engineering.
9. Tomažević, M., Gams M., Berset, T. 2011: Strengthening of historic brick masonry walls with GFRP coating. 11th North American Masonry Conference.
10. Triantafillou, T.C., Fardis M.N. 1997: Strengthening of Historic Masonry Structures With Composite Materials. *Materials and Structures* 30:2, 1997, 486–496.
11. Gams M., Kwiecień A., Zajac B., Tomažević M. Seismic strengthening of brick masonry walls with flexible polymer coating. *Proceedings of the 9th International Masonry Conference 2014 in Guimarães*, ID\_1502.
12. Mika W., Muszyński L. 2011: Wpływ wielokrotnej eksploatacji górniczej na budynek o rozległym rzucie pionowym. *Materiały XI Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych, Prace Naukowe GIG – kwartalnik, Górnictwo i Środowisko nr 2/1/2011, Katowice-Hucisko k/Włodowic*, 332–340.
13. Kwiecień A. 2012: Stiff and flexible adhesives bonding CFRP to masonry substrates – investigated in pull-off test and Single-Lap test. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 12 (2) 2012, 228–239.
14. Zajac B. 2013: 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 Ustron, Poland, Volume: O21
15. Kubica J., Kwiecień A., Zajac B. Repair and strengthening by use of superficial fixed laminates of cracked masonry walls sheared horizontally – laboratory tests. *Seismic Engineering International Conference MERCEA'08, Villa San Giovanni Reggio Calabria 2008. American Institute of Physics, AIP Conf. Proc. 1020, 1546 (2008); pp. 1546–1553.*

## **REPAIR AND PROTECTION OF MASONRIES AGAINST MINING SHOCKS USING COMPOSITES BONDED ON FLEXIBLE ADHESIVES**

**Abstract:** Dynamic loads and high deformations influence buildings in mining areas, causing even serious structural damages. Such objects have to be repaired and strengthened using methods improving masonry strength and particularly ductility. In the paper there were presented results of research carried out on masonry wall strengthened using composites made of glass fiber grids, bonded to masonry substrate using flexible adhesives. There were tested cyclically masonry walls not strengthened up to damage and repaired after damage. The tested strengthening system manifested very good efficiency, increasing the masonry strength up to 30% and ductility up to 1200%. This method of strengthening is also fast in constructing as well as in starting of carrying loads; required time is lower than 20 hours.

**Keywords:** mining shocks, cyclic loads, strengthening of masonries with composites, flexible joints.