

ARKADIUSZ KWIECIEŃ\*, BOGUSŁAW ZAJĄC\* ANDRZEJ BUDZIKOWSKI\*\*

POWSTRZYMANIE PROCESU DESTRUKCJI  
USZKODZONEGO MURU OPOROWEGO  
NA AKTYWNYM OSUWISKU  
Z UŻYCIEM POLIMEROWYCH ZŁĄCZY PODATNYCH

DESTRUCTION PROCESS RESTRAINT OF DAMAGED  
RETAINING WALL LOCALIZED ON ACTIVE LANDSLIP  
USING OF POLYMER FLEXIBLE JOINTS

Streszczenie

W artykule przedstawiono dwie metody naprawy polimerowymi złączami podatnymi. Powstrzymały one proces destrukcji uszkodzonego muru oporowego zlokalizowanego na aktywnym osuwisku. Opisana interwencja pozwoliła powstrzymać ruch podłoża gruntowego przez dwa tygodnie do momentu jego ustabilizowania.

*Słowa kluczowe: aktywne osuwisko, naprawa ściany oporowej, polimerowe złącze podatne*

Abstract

There is presented in the paper the use of two repair methods using of polymer flexible joint. They were utilized in stopping of destruction process of a damaged retaining wall localized on active landslide. The described intervention allowed restraining the movement of soil foundation for two weeks up to the moment of soil stabilization.

*Keywords: active landslide, repair of retaining wall, polymer flexible joint*

\* Dr inż. Arkadiusz Kwiecień, dr inż. Bogusław Zajac, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

\*\* Inż. Andrzej Budzikowski, NTB Grupa, Sp. z o.o.

## 1. Wstęp

Obfite długotrwałe opady deszczu są przyczyną powodzi i powstawania osuwisk. Podłoże gruntowe, stanowiące ośrodek retencyjny dla wód opadowych, traci właściwości przyjmowania wody po przekroczeniu nasiąkliwości właściwej dla danego materiału. Powstały nadmiar wód opadowych spływa do zlewni, a ograniczenia w jego odprowadzaniu powodują lokalne podtopienia lub powodzie. Nadmiernie nasączone wodą podłoże gruntowe pęcznieje, co powoduje zmniejszenie jego wytrzymałości na ścinanie, a jednocześnie zwiększa się ciężar objętościowy masy gruntowej. Oba te czynniki powodują, że zostaje naruszona równowaga pomiędzy naprężeniami ścinającymi i oporem gruntu na ścinanie, co w konsekwencji prowadzi do powstania osuwisk. Zjawiska takie obserwowane są najczęściej w górach oraz na sztucznie usypanych ziemnych budowlach inżynierskich i powstają w wyniku działania szerokiej gamy czynników opisanych w pracy [1], jednak najszybsze i najgroźniejsze zmiany wywołuje woda, ona też jest przyczyną większości katastrof [2].

Jednym ze sposobów zapobiegania osunięciom gruntu jest budowa ścian oporowych. Budowle te odpowiednio zaprojektowane wprowadzają dodatkowe siły oporu pozwalające na przejęcie naporu gruntu [3]. Najczęściej są one obliczane na parcie gruntu o określonej wilgotności, a przypadki nadmiernych obciążeń wynikających z parcia hydrostatycznego wody są eliminowane poprzez zastosowanie drenażu [4]. Prawidłowo zaprojektowane i wykonane ściany oporowe z drenażem pracują bez zarzutu do momentu jego zatkania, którego następstwem może być zniszczenie przeciążonej ściany oporowej, zwłaszcza gdy wykonana jest niezgodnie z prawdami sztuki budowlanej. Z taką sytuacją autorzy niniejszego artykułu mieli do czynienia.

## 2. Opis obiektu

Przedmiotowy mur oporowy stanowił obudowę ogródka przydomowego, wykonanego na południowym stoku w sąsiedztwie budynku mieszkalnego w Konarach (rys. 1). Przejmował on siły parcia bocznego pochodzące od gruntu nasypowego nie budowlanego, wyrównującego teren po południowej stronie budynku. Wysokość muru dochodziła do 4,5 m ponad poziom terenu (w narożniku południowo-zachodnim), zmniejszając się do poziomu terenu w części północnej, a jego grubość wynosiła 25 cm. Ściany narożnika południowo-zachodniego były wzmocnione kłami stalowymi na widocznych (wcześniej powstałych) pęknięciach, co sugerowało pewne nieprawidłowości w pracy muru w przeszłości. Warunki gruntowo-wodne przedstawiono na rys. 1 za ekspertyzą geotechniczną [5].

Mur oporowy posadowiony był w warstwach glin pylastych wilgotnych i mokrych znajdujących się w stanach twardoplastycznym, plastycznym i miękkoplastycznym, tworzących stok naturalny. Najniekorzystniejszymi parametrami geotechnicznymi cechuje się warstwa IIc na rys. 1: stopień plastyczności  $I_L = 0,6$ ; kąt tarcia wewnętrznego  $\phi_u = 8,5^\circ$ ; kohezja  $C_u = 8$  kPa. Stok naturalny został dociążony nasypem budowlanym o miąższości dochodzącej do 4 m, który ograniczony był na swoim obwodzie betonowym murem oporowym.



zadnych prętów zbrojenia pionowego (w trakcie prac rozbiórkowych muru po ustaniu procesu osuwiskowego), co wskazuje na ewidentny błąd projektowy lub wykonawczy. U podstawy przełomów widoczna była sącząca się woda, a całe podłoże gruntowe wokół podstawy ściany było silnie nasiąknięte wodą (przypominało gąbkę). Istniejący drenaż był zatkany i nie odprowadzał wody z wnętrza ogródka, natomiast na ścianach bocznych muru (wschodniej i zachodniej) woda sączyła się przez istniejące w murze pęknięcia.

Z wywiadu przeprowadzonego z właścicielem wynika, że pierwszym sygnałem świadczącym o uszkodzeniu muru był silny odgłos pękającego muru (zrywania prętów zbrojenio- wych), słyszany w domu (odnotowany w niedzielę po południu 16 maja). Przeprowadzone przez właściciela oględziny muru (godzinę później) wykazały istnienie dwóch pionowych pęknięć na wskroś o szerokości 2–3 mm, przez które sączyła się woda. W trakcie ponownych oględzin dokonanych wieczorem (kilka godzin po zerwaniu zbrojenia) stwierdzono poszerzenie pęknięć, z których wypływała woda z cząstkami gruntu. Dokonane nad ranem oględziny muru i jego otoczenia wykazały powstanie niewielkiej niecki w ogródku z widoczną deformacją muru oporowego oraz jeszcze większe pęknięcia (szerokości kilku milimetrów) bez wzajemnych przemieszczeń krawędzi szczelin, wypełnione błotem i sącząca się woda. Dopiero po kilkunastu godzinach stwierdzono powstanie zapadliska w ogródku i znaczącą deformację muru oporowego z występowaniem przełomów, z których wypływała woda z gruntem. W ciągu kolejnych trzech dni doszło do dalszych odkształceń powierzchni terenu otaczającego budynek mieszkalny, natomiast przełomy w murze uległy dalszemu poszerzeniu, a lico muru południowego zdeformowało się do stanu (dynamicznie postępującego), który zastali autorzy artykułu.

Obserwacja otoczenia posesji wykazała, że budynek wraz z otaczającym go murem leżą w strefie osuwiskowej. W odległości ok. 200 m od budynku obsunęło się zbocze wraz z fragmentem nasypu drogowego, obejmującego połowę jezdni na drodze powiatowej. Na powierzchni ogródka ograniczonej murem utworzyła się niecka zapadliska o głębokości ponad 0,5 m, z widocznymi granicami płaszczyzn poślizgu klina odłamu (rys. 1). Wokół kolumn podtrzymujących taras od strony ogródka widoczne były osiadania gruntu dochodzące do kilkunastu centymetrów, co mogło świadczyć o zagrożeniu posadowienia budynku. Na budynku nie zaobserwowano żadnych uszkodzeń, zarysowań, ani wychyleń konstrukcji świadczących o naruszeniu jej bezpieczeństwa. Istniało jednak zagrożenie, że dalsze obsuwanie się gruntu otaczającego budynek może doprowadzić do naruszenia jego stabilnej pracy w strefie fundamentowej.

O dynamice postępującego procesu osuwiskowego (zaobserwowanego podczas wizji lokalnej 21 maja wieczorem) świadczyły odgłosy przesuwającego się muru i widok osypującej się ziemi z przełomów muru. Możliwy do zaobserwowania postęp deformacji pękniętego muru (szacowany na ok. 5 mm/h) nie pozwalał na przeprowadzanie szczegółowej i rozwlekłej w czasie diagnostyki pomiarowej opisaną w pracy [6], lecz wymuszał podjęcie natychmiastowych działań powstrzymujących, a właściwie ograniczających destrukcję i dalszą deformację muru na aktywnym osuwisku (ze względu na bezpieczeństwo budynku mieszkalnego). Z powodu wieczornej pory wizji lokalnej, nie było możliwe sporządzenie przedwykonawczej dokumentacji fotograficznej.

Dodatkowe niebezpieczeństwo dla zagrożonego obiektu stwarzało istnienie wąwozu (niecki terenu stanowiącego zlewnię) o dużym nachyleniu dna, zlokalizowanego w odległości 1 m od narożnika południowo-zachodniego muru. Obsunięcie się gruntu wraz z murem w ten

wąwóz spowodowałoby gwałtowny ubytek dużej ilości masy gruntowej stabilizującej posadowienie budynku mieszkalnego. W zaistniałych warunkach zespolenie rozdzielonych przełomami fragmentów muru było najszybszym i jedynym możliwym do podjęcia działaniem, pozwalającym na natychmiastowe ograniczenie obsuwania się gruntu wokół budynku.

Konieczność podjęcia natychmiastowej interwencji nie pozwoliła na przeprowadzenie dogłębnych analiz przyczyn powstania awarii przed przystąpieniem do prac wzmacniających. Z przeprowadzonych oględzin obiektu wynika, że jedną z głównych przyczyn awarii było wypełnienie zasypu muru oporowego wodą opadową po zatkaniu się drenażu. Wytrzymałość gruntu na ścinanie uległa zmniejszeniu po nawodnieniu, a dodatkowy wzrost parcia na mur oporowy wynikał z redukcji kąta tarcia wewnętrznego i spójności gruntu oraz dodatkowego działania parcia hydrostatycznego. W tych warunkach mur oporowy wykonany niezgodnie ze sztuką budowlaną musiał utracić swoją nośność. Zbyt mała ilość dostępnych informacji na temat konstrukcji muru oraz parametrów i geometrii otoczenia gruntowego uniemożliwiła przeprowadzenie analizy statyczno-wytrzymałościowej.

#### **4. Praca zastosowanych systemów bazujących na polimerowym złączu podatnym wzmacniających uszkodzony mur oporowy**

W celu powstrzymania dynamicznie rozwijającej się dalszej destrukcji muru i jego nadmiernych deformacji przystąpiono do wzmocnienia uszkodzonej konstrukcji muru (w nocy 21/22 maja). Zastosowano dwa rodzaje naprawy z użyciem polimerowych złączy podatnych [7]. Pierwszym, było utworzenie kompozytów polimerowo-szklanych wykonanych z układu wielowarstwowych siatek z włókna szklanego nasączonych polimerem PS i przyklejonych do muru w miejscach występowania pęknięć niewykazujących wysunięcia z płaszczyzny muru. Metoda ta była testowana wcześniej przy naprawie pękniętego muru ceglanego, wykazując wysoką skuteczność [8]. Duża energia zniszczenia i zdolność do przeniesienia znacznych sił rozciągających przy dużych deformacjach oraz szybkość wykonania i krótki czas przejęcia obciążeń były czynnikami decydującymi o zastosowaniu tej metody (rys. 2).

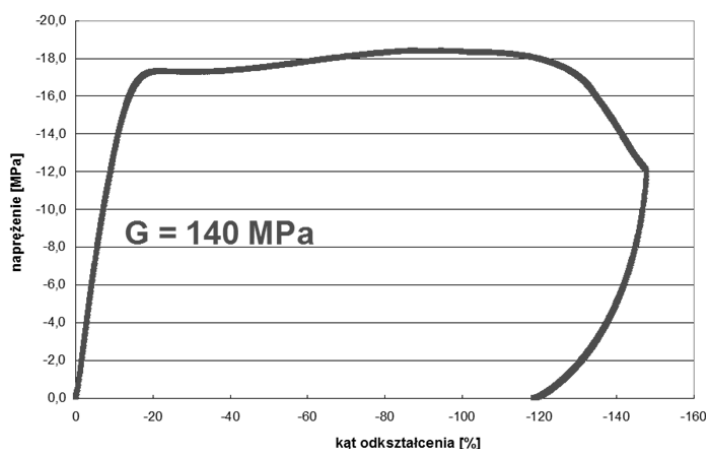
Drugim rodzajem naprawy było zastosowanie prętów stalowych A-II  $\phi 12$  o długości 3 m, wygiętych na końcach pod kątem prostym, wklejonych w mur końcami o długości 10 cm i zamocowanych na polimerze PT. Pręty wklejone w mur po obydwu stronach przełomów były dopasowane kształtem do deformacji muru i jego krawędzi w celu szybszego przejęcia obciążeń. Szybko postępująca deformacja muru spowodowała, że już po pół godzinie od aplikacji wszystkie świeżo zamocowane pręty były „napięte jak struna”, ograniczając dalsze przemieszczenia zniszczonego muru.

Ten rodzaj mocowania prętów w ścianie został wybrany ze względu na: szybkość wiązania polimeru (przenosił obciążenia już po 10 minutach od aplikacji), niewrażliwość na zawilgocenie muru (czynnik dyskwalifikujący żywice epoksydowe), zdolność do dyssypacji dużej ilości energii odkształcenia oraz umożliwienie włączenia się do współpracy wszystkich zakotwionych prętów dzięki podatności polimeru (odkształcalność polimeru PT jest o ponad rząd wielkości większa od żywic epoksydowych).



Rys. 2. Dwa systemy wzmacniające zdeformowany mur oporowy – po lewej, oraz widok układu prętów stalowych zszywających przełom w murze, wklejonych na polimerze PT – po prawej

Fig. 2. Two systems strengthening the deformed retaining wall – on the left hand side; view of the steel bar system stitching the wall breakthrough, bonded in on polymer PT – on the right hand side

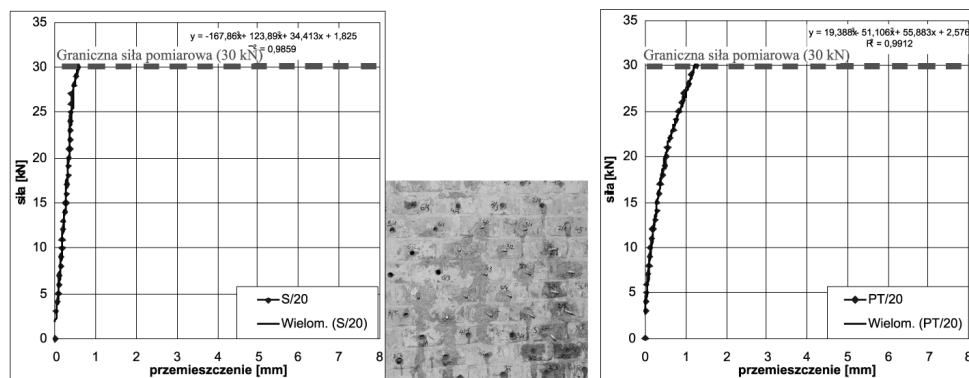


Rys. 3. Wykres naprężeń ścinających w funkcji odkształcenia kąowego, zarejestrowany dla polimeru PT podczas prostego ścinania

Fig. 3. Graph of shear stress versus shear strain, obtained for polymer PT during the simple shear test

Korzystne właściwości polimeru PT były uprzednio testowane przy mocowaniu kotew wklejanych w betonowe nawierzchnie lotniskowe, służące do zabezpieczania samolotów wojskowych na płycie lotniska w Balicach. Nośność tych kotew przekraczała 50 kN, a odkształcalność polimeru powodowała redukcję koncentracji naprężeń w warstwie adhezyjnej [9], obniżając wielkość naprężeń w betonie. To samo zjawisko zostało wykorzystane w zakotwieniach prętów w murze oporowym. W porównaniu z warstwami adhezyjnymi wykonanymi z żywic epoksydowych, polimer PT nie ulega kruchemu zniszczeniu, lecz ma

duży zakres ciągliwości (rys. 3), co przekłada się na wielkość energii zniszczenia (pole pod krzywą). Właściwość ta umożliwia lokalną redystrybucję naprężeń na długości zakotwienia, nie powodując utraty nośności i powstawania mikropełnięć w betonie, jak to ma miejsce w otoczeniu pręta wklejonego na żywicę epoksydową [9].



Rys. 4. Wykresy siła–przeszczenie dla kotwy stalowej wyrywanej z muru ceglanego [10] – kotwa wklejona na żywicy epoksydowej (po lewej) i wklejona na polimerze PT (po prawej)

Fig. 4. Graphs force–displacement for the steel anchor pulling out from the masonry wall [10] – the anchor bonded in on epoxy resin (on the left hand side) and on polymer PT (on the right hand side)

Wprowadzenie podatności połączenia, czyli umożliwienie większej odkształcalności przy tej samej sile powoduje, że zwiększa się energia, jaką jest w stanie pochłonąć odkształcający się pod obciążeniem układ nośny. Dopuszczenie stosunkowo niewielkich odkształceń w konstrukcji jest praktycznie bez znaczenia ze względu na jej graniczne warunki użytkowania, natomiast odgrywa istotną rolę w zapewnieniu warunków nośności. Przykładem może być badanie kotew wyrywanych z muru ceglanego [10], wklejonych na żywicę epoksydową i polimer PT (rys. 4). Warstwa adhezyjna wykonana z polimeru PT absorbowала trzykrotnie większą energię odkształcenia niż żywica epoksydowa dzięki dopuszczeniu niewiele większych odkształceń pod tym samym obciążeniem.

Zastosowane dwa sposoby wzmocnienia muru, bazujące na polimerowych złączach podatnych, okazały się skutecznym rozwiązaniem powstrzymującym destrukcję muru oporowego na czynnym osuwisku. Dzięki dopuszczeniu stosunkowo niewielkich deformacji systemu wzmacniającego dokonano dyssypacji energii odkształcenia generowanej przez napierający grunt. W ciągu 2 tygodni zabieg ten umożliwił ustabilizowanie położenia uszkodzonego muru i zalegającego za nim gruntu, co zapobiegło przemieszczeniu masy gruntowej stabilizującej posadowienie budynku mieszkalnego.



Rys. 5. Praca muru w stadium deformacji 2 tygodnie po awarii (2 pręty wyrwane) – po lewej i w środku, oraz końcowa faza pracy zespolenia przełomu przed rozebraniem muru – po prawej

Fig. 5. Work of the wall in the deformation stadium 2 weeks after failure (2 bars pulled out) – on the left hand side and in the middle; final phase of the joint work before demounting of the wall) – on the right hand

W rozciągniętym w czasie procesie deformacji pręty wiążące mur w górnej części przełomów (najbardziej wyteżone) ulegały stopniowemu wysuwaniu w miejscach polimerowych zakotwień bez spadku siły spajającej mur (ze względu na ciągłą pracę polimeru – rys. 3). Dzięki temu deformujący się mur powodował obniżenie parcia czynnego gruntu i stopniową stabilizację sił równowagi w wysychającym gruncie zasypowym. Rozwieranie się przełomów powodowało stopniowe wyrywanie kolejnych prętów poczynając od góry, aż do zatrzymania procesu destrukcji muru przy wyschniętym gruncie (rys. 5). Pierwszy pręt odpadł po 8 dniach, a kolejny 4 dni po nim. Pozostałe pręty utrzymywały wciąż konstrukcję po 2 tygodniach od zamontowania, jednak ograniczony i spowolniony proces deformacji muru wciąż postępował. Po miesiącu wszystkie pręty uległy wyrwaniu z zakotwień w murze, ale wtedy osuwisko było wyschnięte i ustabilizowane.

Ostatecznie właściciel zdecydował się na rozebranie dużej części uszkodzonego muru (od południa i wschodu), a pozostały fragment muru oporowego po stronie zachodniej wzmocnił stalową konstrukcją wsporczą. Nasyp niebudowlany dociążający podłoże podatne na procesy osuwiskowe został usunięty, aby w przyszłości ponownie nie wystąpiło zagrożenie podobne do opisanego.

Tak jak w przypadku pierwszego sposobu wzmocnienia, także skuteczny okazał się system powierzchniowego zespolenia pęknięć w murze (bez zastosowania iniekcji) z użyciem maty wykonanej z warstw siatki szklanej naklejonej na polimerze PS. Mechanizm działania tego układu naprawczego był podobny do obserwowanego w trakcie badań wzmocnienia pękniętego muru ceglanego [8] – rys. 6. Warstwy siatki szklanej deformujące się i przemieszczające się wzajemnie w podatnej matrycy polimerowej dyssypowały energię odkształcenia w trakcie rozwierania się pęknięć. Proces lokalnego zrywania włókien szklanych był powolny (podobnie jak w przypadku wzmacnianego muru ceglanego – rys. 6), a towarzysząca mu redystrybucja naprężeń w macie umożliwiała stałe przenoszenie obciążeń podczas jej

powolnego odkształcania, aż do zakończenia deformacji muru. Postać uszkodzeń widoczna na murze oporowym (rys. 7) jest identyczna z tą obserwowaną w pracy [8] (rys. 6), której powstaniu towarzyszyła bardzo duża energia zniszczenia.



Rys. 6. Badanie wzmocnienia pękniętego muru ceglanego wykonanego z kilku warstw siatki szklanej mocowanej na polimerze PS [8]

Fig. 6. Research on strengthening of cracked masonry wall, constructed of several layers of glass net bonded on polymer PS [8]



Rys. 7. Mata kompozytowa szklano-polimerowa – 2 tygodnie po aplikacji. Wzmocnienie wciąż spajało pęknięty mur pomimo lokalnie występujących uszkodzeń siatki szklanej

Fig. 7. Glass-polymer composite mat – 2 weeks after the application. The strengthening was jointing the wall, despite locally appearing damages of the glass net



Rys. 8. Rozebrany fragment muru z widocznymi, rzadko rozmieszczonymi prętami zbrojenia

Fig. 8. Demolished part of the wall and visible the rarely located reinforcing bars

W trakcie rozbiórki muru odkryte zostały pręty zbrojenia, których liczba i średnica była niewystarczająca oraz ich rozkład był niezgodny ze sztuką budowlaną (rys. 8). Przy takim zazbrojeniu muru oporowego jego konstrukcja nie była w stanie przenieść dodatkowych obciążeń, wynikających z naporu nawodnionego gruntu zasypowego.

## 5. Podsumowanie

Powstrzymanie procesu destrukcji uszkodzonej konstrukcji budowlanej usytuowanej na aktywnym osuwisku jest trudne, a w wielu przypadkach niemożliwe do zrealizowania. Tam, gdzie procesy osuwiskowe przebiegają szybko, niszcząc obiekty budowlane w krótkim czasie, konieczne jest zastosowanie metod naprawy lub zabezpieczenia umożliwiających natychmiastowe powstrzymanie (lub ograniczenie) procesu deformacji. Czynne osuwisko cechuje się dużą energią zniszczenia, której nie są w stanie przyjąć bez uszkodzeń obiekty budowlane wykonane z materiałów kruchych w technologiach tradycyjnych.

Z powyższego względu konieczne jest poszukiwanie metod zabezpieczenia i naprawy, które pozwolą zdysypować energię odkształcenia, jaką niesie ze sobą ruch podłoża gruntowego. Przedstawiony przykład interwencji naprawczej z użyciem dwóch technologii wykorzystujących polimerowe złącza podatne obrazuje skuteczność nowego podejścia energetycznego testowanego w warunkach rzeczywistych. Odpowiednio dobrane polimery w połączeniu z tradycyjnymi materiałami budowlanymi tworzą systemy zdolne do współpracy z konstrukcjami budowlanymi poddanymi dużym deformacjom. Co istotne, wykonanie takiego systemu jest szybkie w realizacji i w krótkim czasie zaczyna on współpracować z deformującym się obiektem budowlanym oraz przy odpowiednio dobranej technologii wykonania jest stosunkowo mało wrażliwy na warunki aplikacji. Cechy te powodują, że polimerowe złącza podatne będą znajdowały coraz szersze zastosowanie w naprawach awaryjnych.

## Literatura

- [1] Furtak K., Sala A., *Stabilizacje osuwisk komunikacyjnych metodami konstrukcyjnymi*, t. II, WPPK'2005, Wisła-Ustroń 2005.
- [2] Wysokiński L., *Zabezpieczanie stateczności skarp i zboczy*, t. II, WPPK'2001, Ustroń 2001.
- [3] Rybak C., Rybak J., *Wybrane zagadnienia projektowania konstrukcji oporowych*, t. I, WPPK'2005, Wisła-Ustroń 2005.
- [4] Kania M., *Odwodnienia konstrukcji podziemnych. Błędy w rozwiązaniach projektowych – sposoby zapobiegania i usuwania skutków*, t. II, WPPK'2001, Ustroń 2001.
- [5] Geomix Biuro Geologiczne Jarosław Garecki., *Ekspertyza geotechniczna dotycząca określenia warunków gruntowo-wodnych na działce w Konarach*, Kraków 2010.
- [6] Naborczyk J., Wolski B., *Monitoring przemieszczeń i deformacji obiektów geotechnicznych*, t. II, WPPK'2005, Wisła-Ustroń 2005.
- [7] Kwiecień A., *Koncepcja zastosowania podatnego złącza polimerowego w mostach*, Inżynieria i Budownictwo 5/2009.
- [8] Kubica J., Kwiecień A., Zając 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.
- [9] Nemes O., Lachaud F., Mojtabi A., *Contribution to the study of cylindrical adhesive joining*, International Journal of Adhesion & Adhesives, 26, 2006.

- [10] Kwiecień A., *Praca kotew stalowych wklejonych w mur zabytkowy na sztywnych i podatnych warstwach adhezyjnych*, IX Konferencja Naukowo-Techniczna „Rew-Inż 2011”, Kraków 2011.