

Behavior of external clay brick façade walls made of lime-based mortars - experiments and simulation approach of irregular settlements and seismic type cyclic shear loads

(Zachowanie się zewnętrznych, ceglanych ścian fasadowych wykonanych na zaprawach na bazie wapna – podejście eksperymentalne i symulacje nieregularnych osiadań i cyklicznych obciążeń ścinających typu sejsmicznego)

MSc Eng. Armando Zagaroli

Rozszerzone streszczenie

Rozprawa doktorska dotyczy badań związanych zachowaniem się oraz mechanicznymi parametrami niezbrojonych murowanych ścian fasadowych wykonanych z ceramicznych cegieł pełnych na zaprawach z zawartością wapna powietrznego w składzie spoiwa, ze szczególnym uwzględnieniem ich nośności i odkształcalności postaciowej w przypadku obciążenia w płaszczyźnie. Obciążenia tego typu generowane są na skutek działania na konstrukcję budynku nieregularnych osiadań pionowych (wywołanych czynnikami geotechnicznymi lub działalnością górniczą) oraz obciążeń cyklicznych działających w płaszczyźnie poziomej, które z kolei są reprezentatywne dla oddziaływań sejsmicznych, ale także oddziaływaniami wiatru na cały budynek. Badania eksperymentalne przeprowadzono w ramach projektu Horyzont 2020 Marie Skłodowska-Curie ITN SUBLime („Zrównoważone zastosowania wapna budowlanego poprzez gospodarkę o obiegu zamkniętym i podejścia biomimetyczne”), którego celem było zbadanie roli materiałów na bazie wapna powietrznego w budownictwie murowanym nowej generacji.

Podstawowa motywacja pracy wynika ze wzrastającego znaczenia środowiskowego, kulturowego i technicznego materiałów na bazie wapna powietrznego w branży budowlanej. Sektor budowlany przechodzi obecnie znaczącą transformację w odpowiedzi na wyzwania środowiskowe, wyczerpywanie się zasobów i rosnącą potrzebę zachowania dziedzictwa historycznego i kulturowego. W szczególności rosnąca świadomość śladu środowiskowego materiałów budowlanych (dążenie do ograniczenia emisji CO₂) spowodowała, że budownictwo na bazie cementu, a w szczególności używanie w konstrukcjach murowych zapraw ze znacznym udziałem cementu portlandzkiego staje się przedmiotem dość dużej krytyki. Wśród alternatyw dla materiałów na bazie cementów, materiały na bazie wapna powietrznego ponownie pojawiły się jako obiecujące rozwiązanie. Historycznie rzecz biorąc, zaprawy na bazie wapna powietrznego były głównymi materiałami wiążącymi w konstrukcjach murowanych, szeroko stosowanymi przez stulecia przed pojawieniem się nowoczesnego cementu portlandzkiego. Oferują one szereg zalet technicznych i środowiskowych: niższą energię ucieleśnioną, częściową reabsorpcję CO₂ poprzez karbonatyzację i lepszą zgodność

z historycznymi podłożami oraz dobrą kompatybilność z murami obiektów zabytkowych. W przeciwieństwie do cementu, który ulega nieodwracalnej hydratacji, wapno powietrzne wiąże poprzez proces karbonatyzacji, umożliwiając materiałowi stopniową reabsorpcję części CO₂ uwalnianego podczas jego produkcji. Badania wykazały, że ta reabsorpcja może stanowić do 33% początkowych emisji, w zależności od zastosowania i warunków środowiskowych. Z perspektywy ochrony środowiska naturalnego zaprawy na bazie wapna powietrznego są preferowane ze względu na ich paroprzepuszczalność i zdolność do akomodacji ruchów w murze bez powodowania jego pęknięcia. Cechy te są szczególnie cenne w przypadku zabytkowych konstrukcji, w których sztywne zaprawy na bazie lub z dużym udziałem cementu mogą powodować niezgodności mechaniczne, które prowadzą do przyspieszonego pogorszenia stanu technicznego konstrukcji poprzez generowanie zarysowań lub niszczenie powierzchni na skutek transportu wilgoci z muru na zewnątrz poprzez elementy murowe, co prowadzi do ich uszkodzenia. Ponadto wysoka przepuszczalność pary wodnej zapraw wapiennych przyczynia się do regulacji wilgoci w ścianach, zmniejszając ryzyko wewnętrznej kondensacji i rozkładu biologicznego.

Głównym celem badań przeprowadzonych na potrzeby rozprawy doktorskiej jest zbadanie zachowania mechanicznego niezbrojonych ścian murowanych (URM) zbudowanych z cegieł pełnych ceramicznych i zapraw na bazie wapna powietrznego, szczególnie w warunkach obciążenia w płaszczyźnie, które są reprezentatywne dla różnicowych osiadań i oddziaływań sejsmicznych. Podczas gdy zaprawy wapienne są powszechnie stosowane w kontekstach renowacji istniejących budynków (głównie zabytkowych), ich zastosowanie w murach konstrukcyjnych pozostaje ograniczone, głównie z powodu braku skodyfikowanych danych i znormalizowanych kryteriów oceny. Celem tych badań było zniwelowanie tej luki poprzez wykonanie szerokich badań eksperymentalnych, jak i numerycznych, których wyniki mogą być przydatne do opracowania zarówno przyszłych wytycznych, jak i zasad praktycznych zastosowań. Aby osiągnąć główny cel, badania opierały się na trzech głównych hipotezach, z których każda została sformułowana w celu rozwiązania konkretnego pytania technicznego dotyczącego zachowania i zastosowania zapraw z użyciem wapna powietrznego jako składnika spoiwa do wznoszenia także nowych konstrukcji, w tym, ścian osłonowych (fasadowych) lub zewnętrznych warstw ścian szczelinowych. Tezy brzmią następująco:

- Zaprawy bogate w wapno powietrzne, nawet o niższej wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z zaprawami cementowymi lub cementowo-wapiennymi o większej wytrzymałości, mogą zapewnić zadowalające parametry konstrukcyjne ścian elewacyjnych, w szczególności w zewnętrznych warstwach systemów murów szczelinowych lub przeponowych.
- Modyfikacja składu zaprawy, w szczególności poprzez zwiększenie zawartości wapna powietrznego w składzie spoiwa, znacząco wpływa na zachowanie mechaniczne ścian

murowanych pod względem wytrzymałości, odkształcalności, degradacji sztywności i mechanizmów zniszczenia.

- Istniejące modele analityczne i narzędzia do symulacji numerycznych można dostosować do przewidywania reakcji konstrukcyjnych elementów murowych wzniesionych z użyciem zapraw na bazie wapna powietrznego, pod warunkiem zastosowania odpowiednich strategii kalibracji i danych eksperymentalnych.

Aby przetestować te hipotezy, wdrożono kompleksową metodologię badawczą łączącą eksperymenty laboratoryjne i modelowanie numeryczne. Program eksperymentalny opracowano w oparciu o podejście kompleksowe, obejmujące testy na poziomie materiałów (zaprawy, cegieł i interfejsów) oraz symulacje zachowania się ścian w pełnej skali.

Pierwszy etap prac badawczych obejmował charakterystykę fizyczną i mechaniczną materiałów składowych, w tym cegieł ceramicznych i dwóch uniwersalnych zapraw o różnych proporcjach objętościowych wapna powietrznego do cementu w składzie spoiwa. Przygotowano dwie zaprawy wapienno-cementowe o objętościowych proporcjach mieszanki cementu:wapna:piasku równych odpowiednio 1:1:6 oraz 1:2:9. Te typy mieszanek wybrano tak, aby odzwierciedlały tradycyjne stosowanie zapraw bogatych w wapno, przy jednoczesnym zachowaniu umiarkowanej ilości cementu, aby zapewnić wczesną wytrzymałość i ułatwić obsługę. Dodatkowo, jedną z mieszanek był 1:1:6, czyli najpowszechniej stosowana w konstrukcjach murowych prawie na całym świecie zaprawa klasy wytrzymałościowej M5 (wytrzymałość na ściskanie 5,0 MPa). Drugą (1:2:9) przyjęto o zawartości wapna dwukrotnie większej i klasie wytrzymałościowej M2,5, czyli dwukrotnie mniejszej, bardzo często stosowaną w renowacji obiektów zabytkowych. Zaprawy przygotowano i utwardzono w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. Wytworzono standardowe próbki beleczkowe (40×40×160 mm), sześciennie i walcowe w celu oceny ich wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na zginanie i wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupaniu, zgodnie z odpowiednimi normami EN (np. EN 1015-11 dla badań wytrzymałości na zginanie i ściskanie zapraw). Szczególną uwagę poświęcono monitorowaniu temperatury i wilgotności utwardzania, o których wiadomo, że wpływają na rozwój wytrzymałości i karbonatyzację zapraw wapienno-powietrznych. Wyniki tych testów wykazały znaczącą różnicę w wytrzymałości na ściskanie między dwiema mieszankami. Zaprawa 1:2:9 wykazała, zgodnie z oczekiwaniami około 50% niższą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu do mieszanki 1:1:6. Pomimo tego jej urabialność i zachowanie podczas wiązania uznano za odpowiednie do praktycznego zastosowania w konstrukcjach także nośnych, ponieważ była w stanie osiągnąć wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach bliską nawet 5 MPa. Do badań wybrano cegły ceramiczne, pełne wykonywane ręcznie (firmy Wienerberger) o klasie wytrzymałościowej 12 MPa, które są przeznaczone do napraw obiektów zabytkowych, ale także do wykonywania ścian fasadowych nowych budynków z centrach zabytkowych miast. W przypadku cegieł pełnych, to testy przeprowadzono testy w celu określenia ich wytrzymałości na ściskanie,

ciężaru, nasiąkliwości i początkowego współczynnika absorpcji (IRA). Właściwości te są niezbędne do oceny wiązania cegły z zaprawą i długoterminowej trwałości muru. Cegły wykazały spójne właściwości mechaniczne, zapewniając stabilną podstawę do izolowania efektów zmiennego składu zaprawy w kolejnych testach murarskich. W szczególności stwierdzono, że czas wstępnego zwilżania wynoszący około 2 minuty jest akceptowalny do budowy próbek murarskich zgodnie z zaleceniami ASTM C-67. Na poziomie zespołu, małe próbki murowe, takie jak triplety i małe modele ścian, były testowane w różnych warunkach obciążenia, aby ocenić wytrzymałość na ścinanie, charakterystykę wiązania i zachowanie przy ściskaniu. Aby ocenić zachowanie interfejsów cegła-zaprawa i mechaniczną interakcję w obrębie jednostek murowych, przeprowadzono serię testów na tripletach murowych. Próbki z trzema cegłami związanymi zaprawą były testowane przy ścinaniu ze wzrastającym poziomem wstępnego ściskania. Testy te dostarczyły wglądu w wytrzymałość wiązania przy ścinaniu i mechanizmy pękania na poziomie spoiny. Wyniki wskazały, że takie próbki zbudowane z zaprawy 1:2:9 wykazywały niższą wytrzymałość na ścinanie w porównaniu do tych wykonanych z mieszanki 1:1:6. Niemniej jednak, dla obu rodzajów zapraw i w całym zakresie testowanych klas wytrzymałości (od 2,5 MPa do 9 MPa), współczynnik kohezji stale przekraczał próg 0,2 MPa zalecany przez Eurokod 6, co podkreśla ogólnie zadowalającą wydajność mieszanek zapraw.

Równolegle przeprowadzono testy ściskania na murze w celu określenia globalnej wytrzymałości na ściskanie muru dla każdego rodzaju muru, zbudowanego z elementów glinianych i dwóch mieszanek zaprawy. W praktyce próbki zbudowano z tych samych elementów ceglanych, tak aby wpływ zaprawy mógł być wyraźnie wyizolowany. Zgodnie z oczekiwaniami, pryzmaty z zaprawą o niższej zawartości wapna (1:1:6) osiągnęły wyższe wartości wytrzymałości na ściskanie. Jednak te wykonane z mieszanki 1:2:9 wykazały korzystniejszą zdolność do odkształcania osiowego, ze zwiększoną odkształcalnością i rozproszonym pękaniem. Konkretnie, wzrost osiowego odkształcenia szczytowego muru wykonanego z wyższą zawartością wapna powietrznego osiągnął około 40% odpowiedniej wartości muru zbudowanego z niższą zawartością wapna. Jeśli chodzi o sztywność materiałów przy ściskaniu, wartości stosunku modułu sprężystości muru do jego wytrzymałości na ściskanie wynoszą odpowiednio 294 i 310 dla muru wykonanego z zaprawy o niższej i wyższej zawartości wapna. Ta rozbieżność z zalecaną wartością 1000 określoną w Eurokocie 6 stanowi o przeszywnianiu materiału (modułu sprężystości muru) przy projektowaniu nowych konstrukcji i została już potwierdzona licznymi badaniami eksperymentalnymi.

Dodatkowe testy ściskania diagonalnego przeprowadzono na portfelach murowych, aby ocenić wytrzymałość na rozciąganie w płaszczyźnie, zgodnie z zaleceniami RILEM. Testy te symulują działanie sił ścinających działających diagonalnie na ścianie i są szeroko stosowane jako uproszczona metoda charakteryzowania odpowiedzi sejsmicznej muru. Wyniki wykazały stopniowy spadek wytrzymałości na rozciąganie w próbie ukośnego ścinania wraz ze wzrostem

zawartości wapna w spoiwie. Jednak nie zaobserwowano znaczących różnic w sztywności ścinania lub ciągliwości przed osiągnięciem wartości maksymalnych. Należy zauważyć, że testy przeprowadzono w warunkach kontrolowanego obciążenia, co ograniczyło możliwość uchwycenia odpowiedzi po wartości maksymalnej. W rezultacie kluczowe informacje na temat zachowania zmiękczenia po szczycie, potencjalnie wskazujące na zwiększoną ciągliwość z powodu wyższej zawartości wapna, nie mogły zostać w pełni ocenione. To ograniczenie mogło ukryć korzystne efekty dodatku wapna pod względem rozpraszania energii i zdolności do odkształcania. Rdzeń kampanii eksperymentalnej koncentrował się na wielkoskalowych ścianach murowanych poddanych dwóm typom oddziaływań w płaszczyźnie: (1) statycznemu ścinaniu pionowemu w celu symulacji skutków różnicowych osiadań lub ruchu gruntu wywołanego przez działalność górniczą oraz (2) cyklicznemu obciążeniu bocznemu reprezentatywnemu dla scenariuszy wpływów sejsmicznych.

W testach ścinania pionowego cztery modele badawcze zamontowano na uginających się elementach stalowych (blachach o grubości 10 mm), stosując kontrolowane obciążenia pionowe na górnej powierzchni ściany, w dwóch różnych odstępach – schemat cztero-punktowego zginania. Początek i rozwój zarysowań i pęknięć ukośnych zostały zarejestrowane i wykorzystane do określenia krytycznych progów odkształceń kątowych i degradacji sztywności. Ponadto, ugięcia w punkcie środkowym zostały również zarejestrowane podczas testów zgodnie z rzeczywistym zaleceniem ograniczającym ugięcie elementów murowanych wznoszonych na deformujących się elementach konstrukcji podpierającej (uginające się stropy lub belki). Uzyskane wyniki pokazały podobne wartości krytyczne kątów odkształcenia postaciowego przy tworzeniu się pęknięć dla obu typów murów z bardziej redystrybuowanym wzorem pęknięć w przypadku zniszczenia muru zbudowanego z zapraw o wyższej zawartości wapna powietrznego. Ściany zbudowane z zaprawy o proporcjach składników 1:2:9 wykazywały bardziej rozproszone pęknięcia, podczas gdy wykonane z użyciem mieszanki 1:1:6 wykazywały bardziej zlokalizowane, kruche pęknięcia, na ogół skoncentrowane po jednej stronie ściany. Świadczy to o pozytywny wpływ materiałów na bazie wapna powietrznego pod względem przewidywalności postaci zarysowania muru oraz jego odporności na pęknięcia (rysoodporności). Z drugiej strony, mur wykonany z niższą zawartością wapna powietrznego miał lepszą sztywność ścinającą w porównaniu z murem z wyższą zawartością wapna.

Cykliczne testy obciążenia ścinania poziomego przeprowadzono zgodnie z protokołami quasi-statycznymi opartymi na zaleceniach FEMA, ze wzrastającymi amplitudami przemieszczeń proporcjonalnymi do wysokości ścian przyłożonymi na górze ściany, podczas gdy przemieszczenia modelu badawczego u podstawy były ograniczone. Układ testowy został zaprojektowany tak, aby odtworzyć w jak największym stopniu warunki podwójnego poziomego ścinania, zmniejszając w ten sposób obrót górnej stalowej belki obciążającej do zera. Protokół obciążenia obejmował realizację wielu cykli obciążenia na każdym poziomie amplitudy, umożliwiając obserwację degradacji sztywności, rozpraszania energii i ciągliwości

po osiągnięciu wartości szczytowej. Ściany testowano z pionowym wstępnym ściskaniem (każdorazowo na poziomie 15% oraz 30% wytrzymałości muru na ściskanie osiowe) oraz dwóch różnych współczynnikach kształtu, aby zbadać, w jaki sposób geometria i warunki brzegowe wpływają na odpowiedź typu sejsmicznego muru. Przeprowadzono łącznie osiem testów poziomego ścinania, po cztery dla każdego rodzaju zaprawy, które, zgodnie z oczekiwaniami, ujawniły wzrost maksymalnej poziomej siły ścinającej dla ścian murowanych poddanych wyższemu pionowemu wstępnemu ściskaniu i wykazujących niższe współczynniki kształtu, niezależnie od różnic w składzie zaprawy. Z punktu widzenia materiału ściany murowane bogate w wapno powietrzne ogólnie wykazywały większe wartości poziomych przemieszczeń w porównaniu do ich odpowiedników o niskiej zawartości wapna powietrznego, gdy postaci zniszczenia ścian były takie same, w postaci pęknięć ukośnych i podwyższonego obrotu podstawy. Ponadto, wyniki przeprowadzonych badań pokazały, że zaprawy bogate w wapno powietrzne, pomimo wykazywania około 50% niższej wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do mieszanek o niższej zawartości wapna, zapewniały porównywalną sztywność i wartości graniczne maksymalnych odkształceń. Zaobserwowano jednak zmniejszenie się nośności na ścinanie, w zakresie od 7% do 26%. Niewątpliwie ściany o wyższej zawartości wapna powietrznego wykazywały bardziej stopniową degradację sztywności, zwiększoną ciągliwość po osiągnięciu szczytu i niższe ryzyko kruchego zawalenia.

Aby uzupełnić badanie eksperymentalne i umożliwić szerszą analizę parametryczną wykraczającą poza to, co jest wykonalne w warunkach laboratoryjnych, opracowano serię symulacji metodą elementów skończonych (FEM). Symulacje te miały na celu odtworzenie zachowania konstrukcyjnego testowanych ścian niezbrojonych i ocenę niezawodności narzędzi numerycznych i modeli analitycznych w przewidywaniu odpowiedzi muru wykonanego z użyciem zapraw cementowo-wapiennych z różnym udziałem wapna powietrznego w składzie spoiwa pod obciążeniem w płaszczyźnie muru. Przyjęto strategię makromodelowania, w której mur murowany modelowano jako jednorodne kontinuum o rozmytych właściwościach reprezentujących łączne zachowanie elementów murowych i spoin zaprawy. To podejście wybrano ze względu na jego wydajność obliczeniową i przydatność do symulacji globalnego zachowania ściany pod obciążeniem monotonicznym i cyklicznym, szczególnie w badaniach parametrycznych na dużą skalę. Analizy FEM przeprowadzono przy użyciu oprogramowania DIANA FEM, powszechnie uznawanego za zaawansowane nieliniowe analizy strukturalne i szczególnie dobrze nadającego się do zastosowań w analizach numerycznych konstrukcji murowych. Całkowity model pęknięć oparty na odkształceniu (TSC) został użyty w celu uchwycenia zachowania się zmiękczającego muru pod wpływem rozciągania i ściskania, z parametrami definiującymi kształt paraboliczny dla ściskania osiowego i liniowy z wykładniczą gałęzią zmiękczenia przy rozciąganiu. W szczególności kluczowe parametry materiału: moduł sprężystości, wytrzymałość na rozciąganie, energia pęknięcia przy ściskaniu i rozciąganiu oraz wytrzymałość na ściskanie zostały skalibrowane przy użyciu danych

z eksperymentalnych testów na mniejszą skalę z wykorzystaniem wallettes. Szczególną uwagę poświęcono modelowaniu warunków brzegowych i protokołów obciążeń, aby jak najdokładniej dopasować je do konfiguracji eksperymentalnych. W symulacjach ścinania pionowego obciążenie pionowe było przykładane na górze modelu w malejących przyrostach, podczas gdy w analizach cyklicznych obciążenia poziome obciążenie boczne kontrolowane przemieszczeniem były stosowane przyrostowo na górze ściany, w celu zmniejszenia obciążenia obliczeniowego podczas analizy w odniesieniu do osiągnięcia nieliniowości materiału. Modele wykazały ogólnie rozsądne wyniki w przewidywaniu globalnego zachowania ścian murowanych pod względem obciążenia pionowego i ugięcia w punkcie środkowym dla testów ścinania pionowego oraz odpowiedniego obciążenia bocznego i przemieszczeń poziomych dla testów cyklicznych poziomych. Ogólnie rzecz biorąc, przewidywania pod względem obciążenia szczytowego i sztywności były wystarczająco dokładne, w każdym razie prostota modelu nie pozwoliła uchwycić zachowania zmiękczenia po osiągnięciu wartości szczytowej i ciągliwości przemieszczenia. Rzeczywiście, podczas gdy strategia makromodelowania okazała się skuteczna w przypadku symulacji odpowiedzi globalnej, z natury brakuje jej rozdzielczości, aby uchwycić lokalne zjawiska interfejsu, takie jak pęknięcie wiązania zaprawy z cegłą lub poślizg spoin. Z tego powodu wyniki najlepiej interpretować w kategoriach ogólnej wydajności strukturalnej, a nie szczegółowej mechaniki zniszczenia. Przyszłe prace mogłyby obejmować techniki mikromodelowania, w których cegły i spoiny są modelowane jako odrębne jednostki, co umożliwiłoby bardziej szczegółową analizę lokalnych mechanizmów uszkodzeń. Pomimo tych ograniczeń, symulacje numeryczne posłużyły jako solidne narzędzie weryfikacyjne dla wyników eksperymentalnych i umożliwiły szersze zrozumienie wydajności muru na bazie wapienia przy złożonym obciążeniu. Wykazały również, że przy odpowiedniej kalibracji istniejące ramy modelowania można pomyślnie dostosować do symulacji zachowania muru zbudowanego z zapraw zrównoważonych, wspierając projektowanie i ocenę zarówno nowych, jak i modernizowanych konstrukcji murowych.

Przeanalizowano także możliwość stosowania istniejących modeli analitycznych i półanalitycznych do przewidywania zachowania mechanicznego ścian murowanych zbudowanych z zapraw z udziałem wapna powietrznego w składzie spoiwa. Przeprowadzono kompleksowe porównanie wyników eksperymentalnych z przewidywaniami norm projektowych, takich jak Eurokod 6, Eurokod 8 i polska norma PN-B-03002:2006. Po pierwsze, granice odkształceń przy ugięciu pionowym oceniono na podstawie literatury w odniesieniu do nienośnych elementów murowych w konstrukcjach żelbetowych. Podczas gdy większość norm międzynarodowych oferuje konserwatywne progi (oparte na współczynnikach δ/S), wyniki eksperymentalne dla obu typów zapraw wykazały znacząco większe ugięcia niż dopuszczone normowo, ujawniając trudności w odzwierciedlaniu przepisów zawartych w normach konstrukcji żelbetowych do stosowania jako dopuszczalne także w sytuacji ścian murowanych

opartych na takich elementach. Ponadto, uwidocznił się dość jasno brak znormalizowanych metod badania zachowania ścinania pionowego w stanie granicznym użyteczności. Graniczne wartości kąta odkształcenia postaciowego (Θ_{adm}) zalecane przez polską normę PN-B-03002:2006 zostały przekroczone we wszystkich badanych próbkach, szczególnie w przypadku mieszanek bogatych w wapno, co podkreśla lepszą zdolność takich materiałów do akomodacji pęknięć i niedoszacowanie ich nośności przez tę ostatnią normę, co jest oczywiście po stronie bezpiecznej.

Oceniono również wzory normowe do wyznaczania nośności muru na ścinanie poziome i modelu jego zniszczenia. Korzystając ze standardowych wyrażeń bez współczynników bezpieczeństwa, badanie potwierdziło, że podczas gdy modele oparte na Eurokodzie rozsądnie przewidują mechanizmy zniszczenia, mają jednak tendencję do przeceniania wartości maksymalnych, szczytowych wartości ścinających sił poziomych, szczególnie w przypadku smukłych ścian i wysokiego wstępnego poziomu naprężeń ściskających murze (powyżej 30% wytrzymałości muru na osiowe ściskanie). Dane eksperymentalne sugerowały możliwość dostosowania współczynnika redystrybucji ścinania do przewidywania mechanizmów awarii pęknięcia ścinania ukośnego zgodnie z propozycją Turnšeka i Čačoviča, aby lepiej dopasować wyniki testów. Na koniec oceniono maksymalne wartości poziomego przesunięcia górnej krawędzi ściany (horizontal drift) dla poziomego ścinania. Wartości eksperymentalne stale przekraczały progi podane w Eurokodzie 8 zarówno dla stanów granicznych DLS (Damage Limitation State - reprezentujących stany użyteczności), jak i NCLS (Near Collapse Limit State - reprezentujących stan nośności), szczególnie w ścianach, które wykazywały ciągłe zachowanie pod obciążeniem cyklicznym. Potwierdza to ideę, że mur na bazie wapienia oferuje zwiększoną nośność na odkształcenia, która nie została jeszcze uwzględniona w istniejących przepisach normowych. Ogólnie rzecz biorąc, wyniki przemawiają za podejściami opartymi na wydajności i dostosowanymi wzorami i metodami analitycznymi, aby uwzględnić osobliwości mechaniczne zrównoważonych systemów murowych o niskiej wytrzymałości. Kluczowe wyniki przeprowadzonych badań, analiz numerycznych oraz obliczeń analitycznych można podsumować następująco:

- Zaprawy na bazie wapna, jeśli są odpowiednio opracowane i stosowane, mogą z powodzeniem spełniać zarówno cele zrównoważonego rozwoju, jak i wymagania dotyczące wytrzymałości konstrukcyjnej w budownictwie murowanym. Ich właściwości mechaniczne, chociaż o niższej wytrzymałości w porównaniu do odpowiedników cementowych lub z większym udziałem cementu w składzie spoiwa, są zrównoważone przez zwiększoną odkształcalność. Te cechy sprawiają, że są one szczególnie odpowiednie do stosowania w zewnętrznych warstwach systemów ścian szczelinowych, fasadach nienośnych i innych elementach, w których pożądane są akomodacja pęknięć i paroprzepuszczalność.

- Skład zaprawy odgrywa kluczową rolę i wpływa nie tylko na wytrzymałość mechaniczną ściany, ale także na mechanizmy jej uszkodzenia, zachowanie pęknięcia i ogólną zdolność do odkształcania. Zwiększenie zawartości wapna powietrznego zwykle skutkuje bardziej plastyczną reakcją, rozproszonym pękaniem i lepszą tolerancją na odkształcenia. Są to bardzo korzystne cechy w obszarach podatnych na obciążenia sejsmiczne, osiadanie gruntu lub zapadanie się spowodowane górnictwem, gdzie konstrukcje muszą rozpraszać energię i odkształcać się bez całkowitego lub częściowego zawalenia się.
- Symulacje numeryczne metodą elementów skończonych, skalibrowane za pomocą wyników eksperymentalnych, okazały się skutecznym i niezawodnym narzędziem do analizy odpowiedzi w płaszczyźnie muru wapiennego w różnych scenariuszach obciążeń. Zwłaszcza w kontekście ocen wymagających równowagi między określeniem niewielu wyników eksperymentalnych, obciążeniem obliczeniowym i dokładnością wprowadzanych danych. Jednak istniejące wzory i metody obliczeniowe (normowe), zwłaszcza te z Eurokodu 6 i Eurokodu 8, mają tendencję do przeceniania wytrzymałości i niedoceniańa zdolności do odkształcania się muru, szczególnie gdy są stosowane do materiałów bogatych w wapno. Dlatego też stosowanie tych uproszczonych modeli powinno być uzupełnione o współczynniki korekcyjne lub alternatywne formuły w celu zapewnienia dokładnego projektu i bezpiecznej oceny konstrukcyjnej.

Z szerszej perspektywy, niniejsza rozprawa oferuje multidyscyplinarny wkład do zrównoważonego budownictwa, ochrony dziedzictwa kulturowego i inżynierii budowlanej. Poprzez integrację charakterystyki materiałów, badań laboratoryjnych i modelowania obliczeniowego, buduje ona pomost między historycznymi praktykami budowlanymi a nowoczesnymi podejściami projektowymi opartymi na wydajności. Wyniki są szczególnie istotne dla inżynierów, architektów i konserwatorów, którzy chcą rozwijać lub modernizować konstrukcje murowe, które stawiają na pierwszym miejscu zarówno odpowiedzialność środowiskową, jak i odporność konstrukcyjną.

Na koniec, badanie identyfikuje kilka ważnych kierunków przyszłych prac i badań. Obejmują one opracowanie znormalizowanych protokołów eksperymentalnych dostosowanych do zapraw z większym udziałem wapna powietrznego w składzie spoiwa i systemów murowych, aby ułatwić bardziej spójne porównania między badaniami i wesprzeć formułowanie wytycznych projektowych. Długotrwałe badania trwałości są również niezbędne do oceny wpływu narażenia środowiskowego, takiego jak wilgotność, cykle zamrażania i rozmrażania na właściwości mechaniczne, zachowanie się na skutek wpływu skurczu, pęcznienia i procesy karbonatyzacji w czasie. Ponadto zaleca się rozszerzenie ram modelowania numerycznego w kierunku bardziej wyrafinowanych strategii mikromodelowania, zdolnych do symulacji interakcji jednostka-zaprawa, inicjacji pęknięć i mechanizmów propagacji na poziomie mezoskopowym. Badania na poziomie budynku z zastosowaniem trójwymiarowych geometrii,

przejściowych warunków brzegowych i analizy dynamicznej mogłyby dodatkowo zwiększyć zdolność predykcyjną tych modeli, szczególnie w scenariuszach obejmujących obciążenie sejsmiczne, interakcję gleba-konstrukcja lub degradację w czasie. Wreszcie interdyscyplinarne badania łączące inżynierię budowlaną, materiałoznawstwo i ocenę cyklu życia zrównoważonego rozwoju mogą pomóc w szerszym wdrażaniu murów wapiennych zarówno w kontekście obiektów zabytkowych, jak i nowego budownictwa.

Armando Zagaroli