

mgr inż. Piotr Tkacz

**OCENA WYTRZYMAŁOŚCI NA CIŚNIENIE
KONSTRUKCJI MUROWYCH
Z UWZGLĘDNIENIEM BADAŃ *IN SITU***

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor:

prof. dr hab. inż. Romuald Orłowicz

SZCZECIN 2015

SPIS TRECI

1. WST P	3
2. STAN WIEDZY	6
2.1. METODY NISZCZ CE	6
2.2. METODY MAŁONISZCZ CE.....	11
2.3. METODY NIENISZCZ CE.....	14
2.4. METODY OPARTE NA BADANIACH SKŁADNIKÓW MURU	19
2.5. METODY TEORETYCZNE.....	22
2.6. CEL I TEZA ROZPRAWY	25
3. ZACHOWANIE SI MURU PRZY CISKANIU	27
3.1. ODKSZTAŁCALNO MURU	27
3.2. MECHANIZMY ZNISZCZENIA MURU	29
3.3. CZYNNIKI WPŁYWAJ CE NA WYTRZYMAŁO MURU.....	33
3.4. UJ CIA NORMOWE.....	40
4. METODY BADA WYTRZYMAŁO CI CEGŁY.....	42
4.1. UWAGI OGÓLNE.....	42
4.2. BADANIA NORMOWE.....	43
4.3. BADANIA SKLEROMETRYCZNE.....	53
4.4. BADANIA ODWIERTÓW WALCOWYCH	60
5. METODY BADA WYTRZYMAŁO CI ZAPRAWY.....	68
5.1. UWAGI OGÓLNE.....	68
5.2. BADANIA ZAPRAWY <i>IN SITU</i>	71
5.3. BADANIA NA PRÓBKACH POBRANYCH Z MURU.....	74
6. NIEKONWENCJONALNE METODY OKRE LANIA WYTRZYMAŁO CI CEGŁY I ZAPRAWY	80
6.1. ZAŁO ENIA WST PNE.....	80
6.2. OKRE LENIE WYTRZYMAŁO CI CEGŁY NA ROZCI GANIE METOD <i>PULL-OFF</i>	81
6.3. BADANIA WYTRZYMAŁO CI CEGŁY NA ROZCI GANIE PRZY ROZŁUPYWANIU	87
6.4. OKRE LENIE WYTRZYMAŁO CI ZAPRAWY NA PRÓBKACH WALCOWYCH.....	91
6.5. OCENA WYTRZYMAŁO CI ZAPRAWY NA PRÓBKACH ZESPOLONYCH	94
6.6. WERYFIKACJA NIEKONWENCJONALNYCH METOD BADAWCZYCH.....	102
7. WNIOSKI	108
8. BIBLIOGRAFIA	110
9. ZAŁ CZNIKI	118

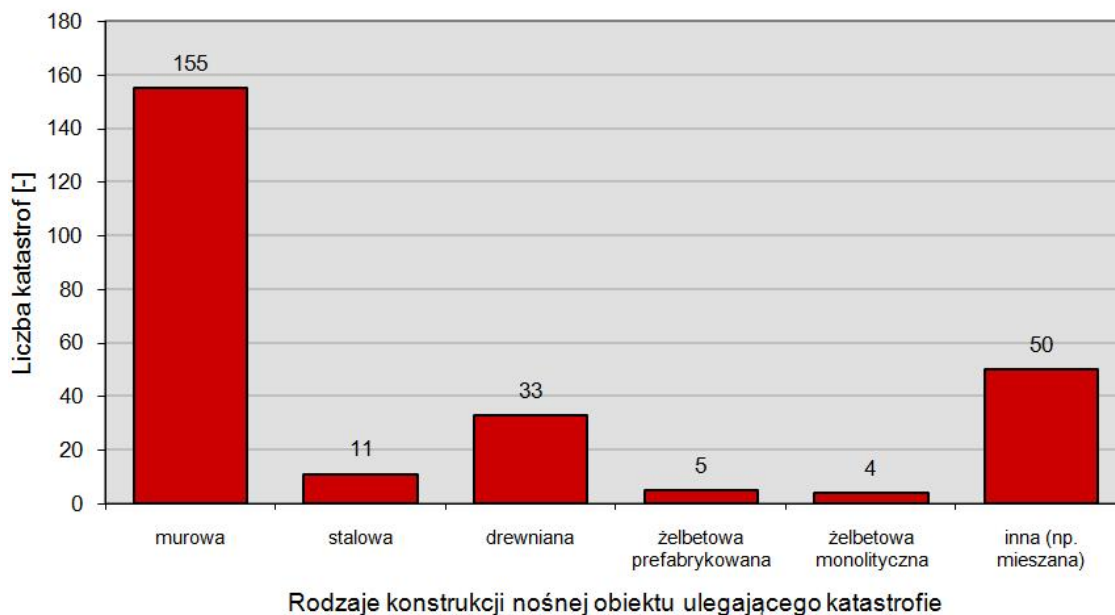
1. WST P

Okrelenie wytrzymało ci muru jako materiału konstrukcyjnego w istniejących obiektach budowlanych jest dotychczas zagadnieniem trudnym i nie w pełni rozwiniętym. Zagadnienie to jest kluczowym przy opracowaniu ekspertyz i projektów obiektów planowanych do przebudowy, modernizacji lub rewitalizacji oraz przy ocenie ich istniejącego stanu technicznego.

Według statystyk Głównego Urzędu Nadzoru Budowlanego Rzeczypospolitej Polskiej liczba wyburzeń z tytułu "nieprawidłowego utrzymania" czyli np. zaniedbań remontowych, przybywa z każdym rokiem. Zdaniem GUNB to dowód na pogarszający się stan najstarszych obiektów budowlanych. Przykładowo ponad 800 tys. domów i kamienic czynszowych pamięta czasy przedwojenne, a połowa z nich - nawet Polskę rozbiorową. Grubo ponad milion rodzin mieszka w budynkach całkowicie wyeksploatowanych.

Uszkodzenia konstrukcji murowych, szczególnie zabytkowych są zjawiskiem niestety do powszechnym. Przyczyny powstawania uszkodzeń są różnorodne i na ogół trudne do ustalenia, jednak ich morfologia, rozmiary oraz przebieg w czasie mogą znacznie ułatwić ich ustalenie. Zagadnienie uszkodzeń konstrukcji murowych nie jest takie proste, a błędne oszacowanie przyczyn i mechanizmów uszkodzenia obiektu może doprowadzić do kosztownych zabezpieczeń i wzmocnień oraz częściowego lub całkowitego wstrzymania eksploatacji budynku. Na nieuzasadnione koszty naraża się wtedy inwestora lub zarządcę nieruchomości. Bywa też, że dochodzi do awarii lub katastrofy budowlanej, z powodu błędnej oceny właściwości wytrzymałościowych konstrukcji murowej lub jej odkształcalności [19], [48], [49].

Informacje o zaistniałych awariach i katastrofach przekazują do Głównego Urzędu Nadzoru Budowlanego powiatowi i wojewódzcy inspektorzy nadzoru budowlanego w ramach zadań i kompetencji określonych w art. 76 ust. 1 pkt 2 ustawy – Prawo budowlane [23]. Z zebranych danych wynika, że np. w 2013 r. 155 katastrof budowlanych objęło obiekty o konstrukcji murowej, co stanowi 60% wszystkich katastrof budowlanych w Polsce w 2013 roku (Rys. 1.1).



Rys. 1.1 Struktura katastrof budowlanych w 2013 roku, z uwagi na konstrukcję nośną obiektu ulegającego katastrofie (na podstawie danych z [23])

W związku z powyższym rozpoznanie cech mechanicznych muru jako konstrukcyjnego materiału dwuskładnikowego (elementu murowego i zaprawy) jest zagadnieniem najważniejszym i najtrudniejszym przy określeniu jego rzeczywistej nośności i trwałości. Problem polega na zróbnicowaniu wytrzymałości i odkształcalności zapraw i różnorodności elementów murowych stosowanych w różnych okresach wznoszenia obiektów [18], [22], [31], [34], [87].

Obecnie w ocenie nośności murów ceglanych stosuje się badania nieniszczące, małoniszczące oraz niszczące, które pozwalają ocenić właściwości zarówno całej konstrukcji, jak i jej poszczególnych komponentów (elementów murowych i zaprawy). W Polsce, głównie ze względów finansowych oraz braku zaleceń normowych w tym zakresie, wiele ze znanych metod badawczych jak na razie jest jeszcze rzadko stosowanych.

Dla rozwoju metod badań istniejących konstrukcji murowych nie bez znaczenia pozostaje fakt, iż wolne przestrzenie w aglomeracjach przeznaczone pod zabudowę małą, natomiast proces związany z adaptacją i remontami istniejących budynków murowanych, ze względu na ich stan techniczny ewoluje. Wiąże się to zwykle ze zmianą sposobu obciążenia obiektów budowlanych, bez względu na to czy jest to zmiana warunków pracy konstrukcji czy przebudowa z uwagi na nowe funkcje użytkowe.

Niniejsza rozprawa dotyczy metod oceny wytrzymałości na ściskanie muru jako materiału konstrukcyjnego na przykładzie obiektów zlokalizowanych głównie na terenie Szczecina. Pośrednią przyczyną podjęcia badań przedstawionych w niniejszej rozprawie były coraz częstsze sygnały o występowaniu zjawisk niekorzystnie wpływających na stan konstrukcji w wielu szczecińskich obiektach z okresu przedwojennego. Analiza informacji

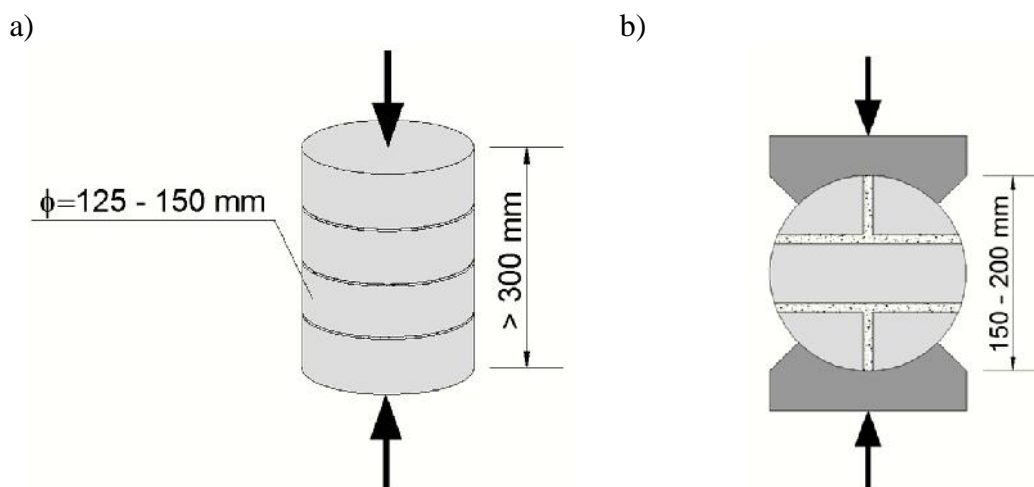
napływających z różnych instytucji wykazała, że podobny problem występuje w całym bloku zachodnim tzw. "poniemieckiej" części Polski. Wzmianki te, były bezpośrednią przyczyną podjęcia obserwacji tych obiektów i przeprowadzenia szczegółowych badań w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie. Prowadzone prace badawcze na bieco koordynowano z zainteresowanymi instytucjami m.in. Szczecińskim Centrum Renowacyjnym, Zakładem Budynków i Lokali Komunalnych, biurami projektowymi itp.

W niniejszej rozprawie wykonano również analizy i syntezy znanych na świecie metod określania wytrzymałości muru na ściskanie w istniejących obiektach budowlanych oraz zaproponowano własne metody badawcze. W takim ujęciu prób rozwiązania rozpatrywanego zagadnienia podjęto po raz pierwszy w kraju.

2. STAN WIEDZY

2.1. Metody niszczenia

W diagnostyce konstrukcji murowych można korzystać z badań laboratoryjnych. W tym celu z muru pobiera się próbki w postaci odwiertów o dużej średnicy [39]. Odwierty te mogą być wykonywane w kierunku pionowym i poziomym - równoległe do spoin wspornych muru. Przykłady pobranych próbek przedstawiono na Rys. 2.1. Walce muru wycina się w takim miejscu, aby ilość zaprawy i elementów murowych były reprezentatywne dla konstrukcji. Trudno stanowi transport wyciętych walców do laboratorium w warunkach zapewniających, że nie zostaną one poluzowane lub zniszczone w drodze. Błędem określenia wytrzymałości tych metod szacuje się na około 30-50% i więcej, w zależności od rodzaju i stanu zaprawy w murze [32], [53].



Rys. 2.1 Próbki walcowe pobrane ze ścian murowych do oceny wytrzymałości muru na ciskanie w poprzek spoin wspornych

Zależności pomiędzy wytrzymałością określoną na próbkach wg schematu przedstawionego na Rys. 2.1b, a wytrzymałością charakterystyczną muru na ciskanie dla kierunku pionowego do spoin wspornych określa się ze wzoru:

$$f_k = (0,75 \div 0,83) f_{k,mean} \quad (2.1)$$

gdzie:

$f_{k,mean}$ - rednia wytrzymała na ciskanie uzyskana z odwiertów,

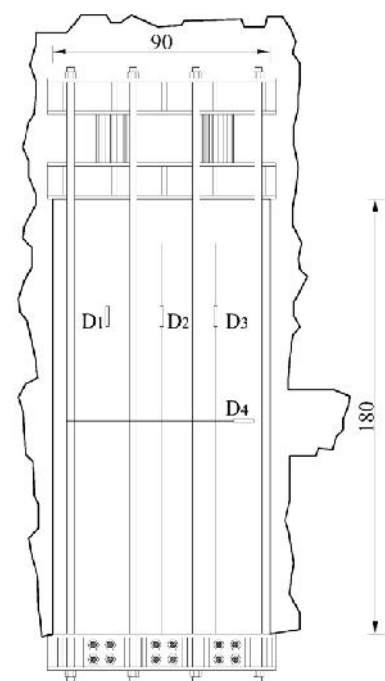
$m \leq 1$ - współczynnik przyjmowany w zależności od aktualnego stanu technicznego konstrukcji mury.

Próby określania wytrzymałości na próbkach rdzeniowych wycinanych z muru w kierunku prostopadłym do spoin wspornych podejmowano rzadziej. W pracy [39] autorzy przedstawili wyniki z przeprowadzonych badań wytrzymałości na ciskanie na próbkach o średnicy 12,5 cm wycinanych z muru w kierunku prostopadłym do spoin wspornych, co w pełni odzwierciedlało kierunek działania obciążenia ciskającego w konstrukcji mury. Próbki pochodziły z budynku o konstrukcji ceglanej wymurowanego w latach 30 XX wieku, na zaprawie cementowo - wapiennej. Z pobranych próbek określono wytrzymałość elementów murowych, zaprawy jak i przygotowanych do badań próbek o wymiarach $w = h = 12,5$ cm zawierających dwie warstwy cegieł i spoin wspornych. Wytrzymałość na ciskanie elementów murowych została określona w sposób normowy [120], a zbadana wytrzymałość na ciskanie muru na próbkach o średnicy 12,5 cm była dwukrotnie niższa niż wytrzymałość określona według zmodyfikowanej zależności L. Oniszczyka opisanej szerzej w punkcie 3.4.

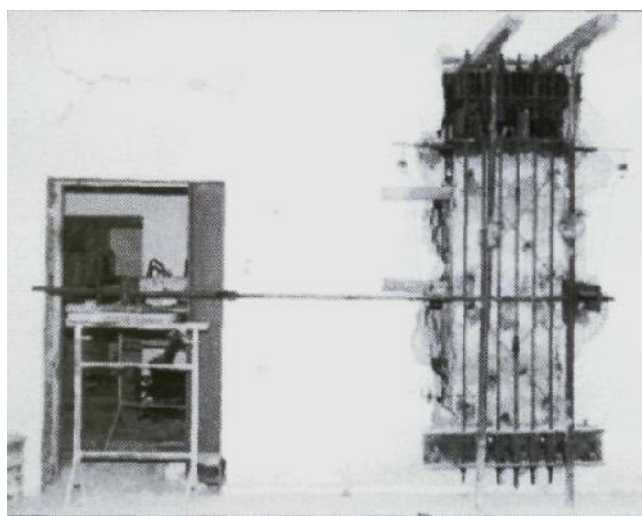
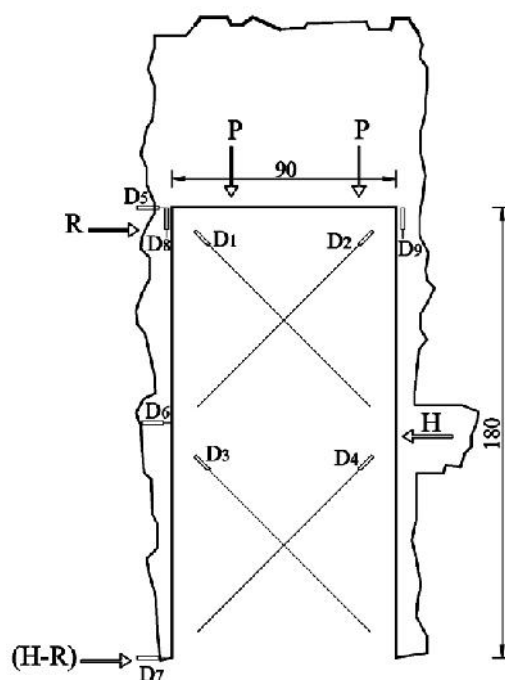
Praktyczny zakres stosowania zaproponowanej w [39] metody jest dość mocno ograniczony, ponieważ w próbce o wysokości 12,5 cm zawierającej jedną spoinę wsporną udział procentowy wytrzymałości cegły w stosunku do wytrzymałości zaprawy, jest zupełnie inny niż w przypadku całej konstrukcji mury. Należałoby, zatem pobrać odwiert rdzeniowy o większej średnicy, zawierający przynajmniej kilka warstw murowych (Rys. 2.1a), jednak pobranie takich próbek z konstrukcji mury jest zadaniem bardzo trudnym, w większości przypadków wręcz niewykonalnym.

W wyjątkowych przypadkach mogłyby przeprowadzone badania *in situ* dużych fragmentów muru za pomocą siłowników hydraulicznych [13]. W tym celu badany fragment muru wyodrębnić się ze ściany poprzez jej przecięcie lub rozkucie w obszarach górnej i pionowych krawędzi fragmentu. Im większe są badane fragmenty murów, czy też filarów, tym reprezentatywność wyników jest większa. Przygotowany w ten sposób fragment muru może być poddany nie tylko pionowemu ciskaniu, ale jednocześnie ścinaniu w płaszczyźnie poziomej (Rys. 2.2).

a)



b)

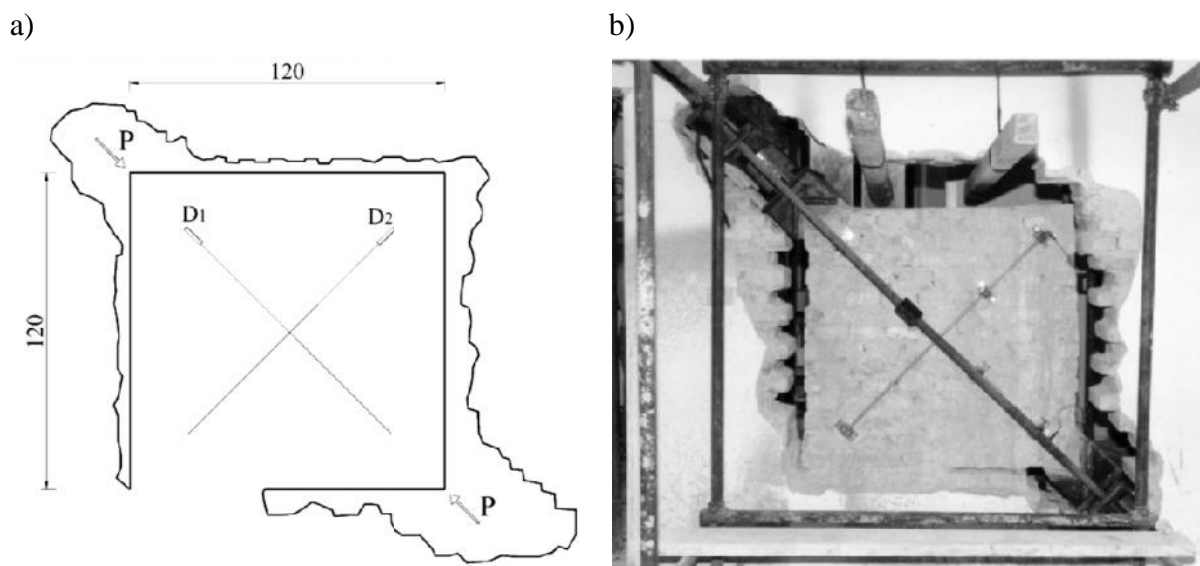


Rys. 2.2 Badanie *in situ* fragmentów cian murowych na ciskanie (a) i ciskanie ze cinaniem (b) [13]

Badanie przeprowadza się w przygotowanej prasie hydraulicznej o odpowiednim zakresie wytrzymałościowym, zawierającej specjalistyczne oprogramowanie komputerowe. Próby ciskania prowadzi się do założonego poziomu obciążenia ciskającego lub ostatecznego zniszczenia wyodrębnionego ze ciany filara stale rejestrując jego odkształcenia.

Na większych fragmentach konstrukcji murowej można również przeprowadzać badanie wytrzymałości muru na rozciąganie pod kątem 45° do spoin wspornych (Rys. 2.3). Badanie przeprowadza się na próbkach o wymiarach 120×120 cm. Podczas badania próbka

zostaje sztywno zamontowana poprzez stalowe obejmy w przeciwległych jej narożnikach. Obie przekrojone próbki do badania wyposażone są w czujniki indukcyjne mierzące przemieszczenia. Szczególną uwagę poświęcono rozkładowi obciążenia w narożnikach próbki w celu uniknięcia nadmiernej koncentracji naprężeń, zatem sztywne stalowe obejmy musiały posiadać odpowiednie proporcje względem badanej próbki. Analizując wyniki wytrzymałości konstrukcji murowej uzyskanej podczas badania przekrojonej ustala się wytrzymałość muru na rozciąganie pod kątem 45° do spoin wspornych. Wartość ta jednak w dużym stopniu zależy od interpretacji badacza [12].



Rys. 2.3 Badanie *in situ* fragmentów cian murowych po przekrojonej [12]

Prowadzone badania opisywaną metodą należą do tych, które uzyskane wytrzymałości murów, są bliskie ich rzeczywistym wartościom, jednakże zakres ingerencji w konstrukcję murów jest bardzo duży i bardzo kosztowny do zaakceptowania tylko w przypadku, gdy planowana jest gruntowna modernizacja obiektu (np. wyburzenie fragmentu istniejącej konstrukcji). Natomiast wycięcie reprezentatywnej próbki i jej dostarczenie do laboratorium badawczego może stanowić zbyt duży problem, ponieważ może ona ulec poluzowaniu podczas transportu, co dyskwalifikuje ją z dalszych badań przy użyciu omawianej metody badawczej. W pracy [106] autor stwierdza, że wytrzymałość zaprawy niezbędna do pobrania reprezentatywnej próbki z konstrukcji murowej powinna wynosić nie mniej niż 0,3 MPa, jednakże badania własne autora niniejszej rozprawy potwierdzają, że nawet w przypadku zapraw murowych o wytrzymałościach równych 1,0 MPa (stare zaprawy wapienne) często pojawia się problem z wycięciem reprezentatywnej próbki. W dalszym ciągu nierozwiązany pozostaje problem wyboru miejsc do pozyskania reprezentatywnej próbki, ponieważ konstrukcje murowe na zaprawach o większej wytrzymałości mają zwykle mniejszą grubość,

zatem pobranie fragmentu muru do badania może mieć znaczący wpływ na dalszą pracę i wytrzymałość całej konstrukcji. Dlatego też, do badania wytrzymałościowych pobiera się prostopadłościenne fragmenty muru pochodzące ze cianek i filarków międzyokiennej przeznaczonej do rozbiórki. Początkowo należy wyodrębnić fragment ciany, nieposiadający uszkodzeń mechanicznych, a następnie równomiernie przekazać na mur obciążenie wygenerowane przez siłowniki hydrauliczne. Jest to pewien problem, szczególnie w przypadku badania murów na słabych zaprawach wapiennych, bardzo wrażliwych na uszkodzenia w trakcie procesu wycinania, a także stanowi zdecydowanie większą trudność w przypadku zabytkowych konstrukcji murowych. Badania przeprowadzane na dużych fragmentach istniejących cian murowych dają miarodajne wyniki, są one jednak bardzo drogie i trudne do wykonania, dlatego są wykonywane niezwykle rzadko. Wprawdzie na świecie istnieją już prace poświęcone opisanej procedurze badawczej [13], [47], jednak w Polsce nie opublikowano dotychczas wyników badań tego typu.

Autor niniejszej rozprawy przeprowadził badania wytrzymałości muru z kamieniem w Szczecinie, które po około 100 latach eksploatacji podlegały rozbiórce (Rys. 2.4). Grubość cianek zewnętrznych wynosiła na parterze 51 cm, natomiast na wyższych kondygnacjach 38 cm. Główny problem polegał na pobieraniu próbek muru ze cianek i dostarczeniu ich do laboratorium. Wycinanie próbek ze cianek o tak dużej grubości wymaga specjalistycznego sprzętu, gdy tradycyjne piły tarczowe do cianek o grubości powyżej 38 cm są nieprzydatne. W związku z tym za pomocą piły tarczowej wycinano fragmenty muru ze cianek działowych o grubości 12 cm i wymiarach 54x50 cm, czyli zbliżonych do normowych próbek murowych (Rys. 2.5).

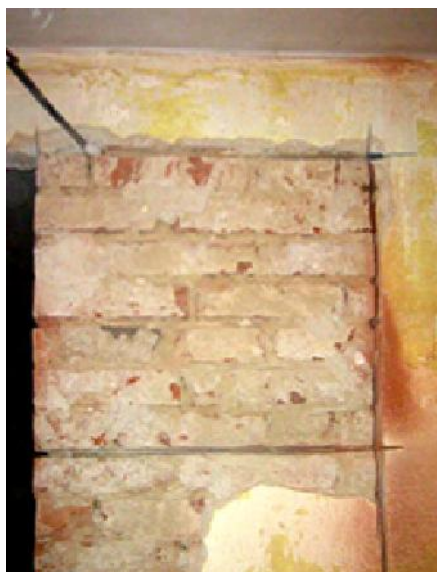


Rys. 2.4 Widok jednej z kamienic Szczecina podczas jej rozbiórki

Warto nadmienić, że po wycięciu i transporcie do badań przydatne było zaledwie 35% próbek. Pozostałe były poluzowane i rozsegregowane.

Fragmenty obciążano w laboratorium w prasie hydraulicznej umożliwiającymi pomiary odkształceń. Ich niszczenie nastąpiło nie poprzez rozłupywanie na poszczególne słupki (mechanizm klasyczny), lecz poprzez rozdrabnianie, któremu towarzyszyły spłaskanie cegieł w wyniku ich rozciągania przy zginaniu. Bardziej szczegółowa analiza powyższych badań jest przedstawiona w rozdziale 6 niniejszej rozprawy.

a)



b)

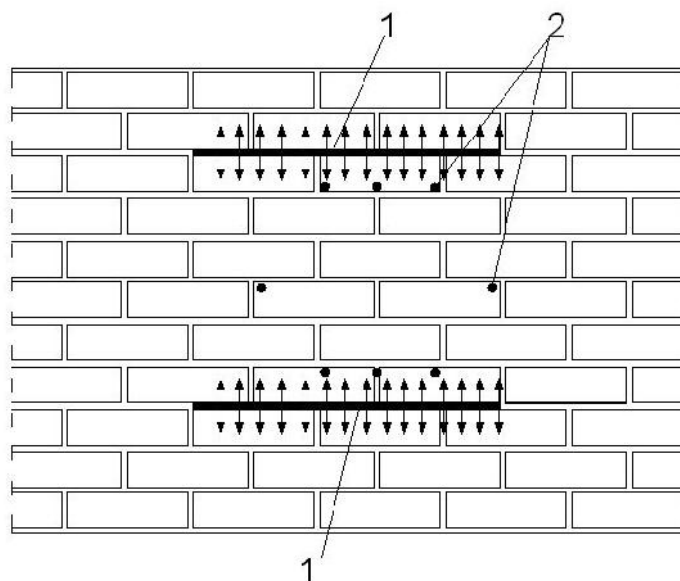


Rys. 2.5 Wycinanie fragmentów muru ze ściany (a) oraz ich przygotowanie do badań wytrzymałościowych na ściskanie (b)

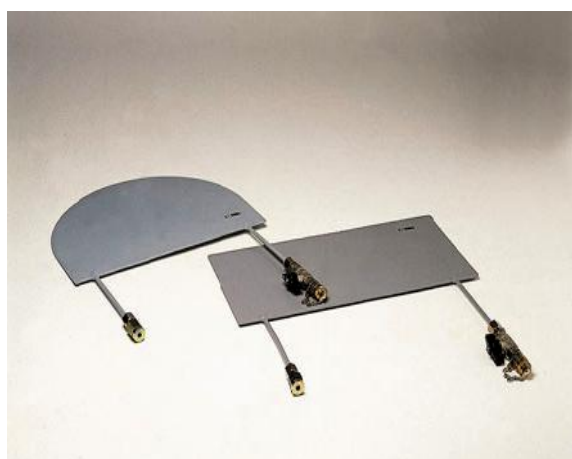
2.2. Metody małoniszczące

W ostatnim czasie w celu oceny bezpieczeństwa istniejących konstrukcji murowych coraz częściej podejmuje się badania muru na ściskanie metodą *flat-jack* za pomocą poduszek ciśnieniowych [83], wprowadzanych w spoiny poziome muru po usunięciu z nich zaprawy (Rys. 2.6). Wydane na początku lat 90. amerykańskie normy [112], [113], [114] określały jednoznacznie poziom naprężeń w konstrukcjach murowych oraz ich odkształcalność w odniesieniu do tej metody. W ten sposób został szerzej opisany, na konferencji RILEM [79], [80]. W Polsce metodę badawczą z zastosowaniem poduszek ciśnieniowych opisano w pracach [71], [56]. Jest to bardzo przydatne narzędzie do oceny właściwości

istniej cego muru bez konieczności jego niszczenia. Badanie może dostarczyć wielu informacji na temat naprężeń w konstrukcji murowej praktycznie w dowolnym jej miejscu. Jest oparte na metodach wywodzących się z geomechaniki i jest dobrze znane w dziedzinie mechaniki skał dla określenia naprężeń oraz odkształcalności materiału w strukturze skały tuneli i w kopalniach [2], [30], [29]. Technologia została zmodyfikowana oraz dostosowana do celów oceny stanu murów kamiennych oraz ceglanych przez włoskich naukowców [83]. W pracy [46] autor mierzył naprężenia ciskające w murze używając metody *flat - jack* do weryfikacji przyjętych rozwiązań w zakresie modelowania obciążeń i nośności konstrukcji.



Rys. 2.6 Badanie odkształcalności muru przy użyciu poduszek ci nieniowych:
1 – poduszki ci nieniowe osadzone w szczeliny wykonane w spoinach wspornych, 2 – czopki dla pomiaru pionowych i poziomych przemieszczeń



Rys. 2.7 Rodzaje i zastosowanie hydraulicznych poduszek ci nieniowych

Metoda polega na tym, że na wstępie ustala się punkty pomiarowe wraz z pomiarem odległości pomiędzy nimi, następnie usuwa się spoiny wsporne za pomocą piły na głębokość nie mniejszą niż $\frac{2}{3}$ grubości muru, co powoduje lokalne odciążenie muru w rejonie nacięcia.

Spoiny oddalone są od siebie od 430 do 500 mm, co odpowiada w przybliżeniu długości poduszki ci nieniowej. Stosowane do badań poduszki ci nieniowe mają kształt prostokątny, o stosunku boków 1:2 lub zaokrąglony, aby lepiej dopasowały się do opróżnionego pól tarczow miejsca w spoinie. Do pomiarów odkształcalności konstrukcji murowej nie zaleca się stosowania poduszek w kształcie wycinka koła, ponieważ dają one najbardziej nierównomierny rozkład naprężeń ścisłych w konstrukcji. Poduszki wykonane są ze stali nierdzewnej grubości 0,8 do 1,0 mm i mają grubość ok. 10 mm (Rys. 2.7). Po wprowadzeniu w spoinę poduszki ci nieniowej wprowadza się takie ci nienie w poduszce, aby odległość pomiędzy punktami pomiarowymi była taka sama, jak przed wykonaniem nacięcia w spoinie. Ocenę poziomą naprężeń ścisłych prowadzi się zwykle do naprężenia w murze odpowiadającego maksymalnemu obciążeniu badanego elementu konstrukcji w przewidywanych warunkach użytkowania obiektu lub niewiele większego. Z reguły jest to naprężenie nieprzekraczające 0,5 szacowanej wytrzymałości muru. Badania można też doprowadzić do naprężenia bliskiego wytrzymałości. Wyraźne odchylenie wykresu σ_p od prostej jest (obok pojawienia się rys w murze) oznaką znacznego wytężenia muru i powoduje zwykle przerwanie badania.

Odmienne omawianej metody w stosunku do klasycznej oceny bezpieczeństwa konstrukcji na podstawie znajomości wytrzymałości muru polega na tym, że tutaj przedmiotem badania nie jest wytrzymałość muru, a możliwość bezpiecznego przeniesienia przez mur określonej siły, odpowiadającej przewidywanemu obciążeniu konstrukcji. Na powierzchni muru wydzielonej przez spoiny, w których umieszczone są poduszki ci nieniowe, nakleja się czopki służące do pomiaru (za pomocą tensometru nasadowego) odkształcenia muru pod działaniem naprężenia σ_p (Rys. 2.6, Rys. 2.7). Obie poduszki ci nieniowe zasilane są przez jedną pompę.

Naprężenia σ_p wywołane w murze wyznacza się ze wzoru:

$$\sigma_p = K_m K_a p \quad (2.2)$$

gdzie:

- K_m - wartość stała uwzględniająca charakterystyk poduszki i sztywność spawanego połączenia blach poduszki na obwodzie (wielkość t wyznacza się skalując poduszkę w prasie wytrzymałościowej),
- K_a - stosunek pola pustej spoiny (po usunięciu zaprawy) do pola poduszki,
- p - ciśnienie wywołane w poduszce przez pompę zasilającą.

Badania metod *flat - jack* należą do najbardziej przydatnych i dostępnych metod oceny właściwości strukturalnych konstrukcji murowych. W przeciwieństwie do innych

badanie nieniszczące, metod *flat - jack* zapewnia bezpośredni pomiar fizyczny właściwości materiałowych potrzebnych do analizy strukturalnej i oceny konstrukcji, niewymagając jakichkolwiek badań i korelacji laboratoryjnych. Wyniki badań laboratoryjnych murów wskazują, że błąd przy szacowaniu naprężeń oraz modułu sprężystości w murze przy zastosowaniu poduszek ciśnieniowych *flat - jack* nie przekracza 20% [64], [96], [97]. Badanie wymaga jednak pewnych umiejętności i doświadczenia. Należy brać pod uwagę fakt, iż zastosowanie poduszek *flat - jack* w terenie jest dużo trudniejsze, niż w warunkach laboratoryjnych, ponieważ regularnie struktur ceglanych w istniejących konstrukcjach jest zdecydowanie mniejsza niż w próbkach laboratoryjnych. Należy również uważać, aby nie uszkodził struktury podczas wycinania rowków oraz zapewni odpowiednie przyleganie poduszek ciśnieniowych do muru. Ze względu na bardzo niskie naprężenia ciskające w ścianach nie wysokich budynków (nieprzekraczające 0,15 MPa) metoda ta znajduje ograniczone zastosowanie, ponieważ błędnie w szacowaniu wytrzymałości mogłoby się nawet 100% [80]. Co więcej, niemożliwe jest uzyskanie odpowiedniego poziomu naprężeń ciskających dla pomiaru odkształcalności konstrukcji przy tak niskich wartościach obciążenia ciskającego. Warto nadmienić, iż obecnie produkowane poduszki ciśnieniowe mają ograniczenia do 7 lub 10 MPa, co dyskwalifikuje tę metodę w przypadku konieczności zbadania konstrukcji murowych o większych wytrzymałościach.

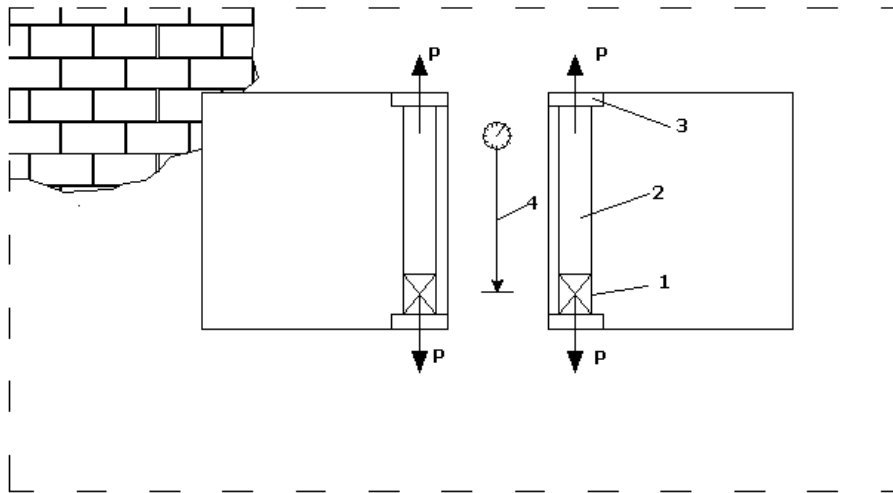
Pomimo wielu niedogodności i ograniczeń omawiana metoda jest często stosowana, a z literatury można przytoczyć liczne przykłady określania naprężeń oraz odkształceń w istniejących konstrukcjach murowych [64], [80], [96], [97].

2.3. Metody nieniszczące

Do metod nieniszczących należy zaliczyć badania obciążeniem próbnym, metody sklerometryczne, ultradźwiękowe i inne [15], [44], [74], [87], [108], [111].

Obciążenia próbne stosuje się dla konstrukcji utykowanych przy braku dokumentacji projektowej i odpowiednich danych w celu obliczeniowego sprawdzenia przydatności konstrukcji do zamierzonego utkowania. Obciążenia próbne dotyczą z reguły elementów zginanych, a tradycyjne kryterium pozytywnej oceny jest stosunek ugięcia trwałego, pozostałego po zdjęciu obciążenia, do ugięcia całkowitego, wiadczy o „sprężystym” zachowaniu się konstrukcji [44]. W budownictwie murowym metoda ta może być wykorzystana do badań stropów, sklepień, nadproży i nawet słupów [74].

Określenie rzeczywistego wytrzymałości muru może być *in situ* poprzez odcięcie filarki międzyokiennej. W tym celu w otworach okiennych po obu stronach filarki umieszcza się słupki podstemplowania z siłownikami, a na filarku mocuje się czujniki zegarowe lub indukcyjne do pomiaru odkształceń (Rys. 2.8).



Rys. 2.8 Schemat odcięcia filarki międzyokiennej siłami P:
1 – siłowniki, 2 – słupki, 3 – podkładki, 4 – czujnik pomiarowy

Metoda sklerometryczna np. młotkiem Schmidta typu *N* pozwala wyznaczyć jedynie wytrzymałość cegły w murze. Zastosowanie tej metody jest ograniczone do elementów murowych pełnych lub z otworami, których objętość nie przekracza 10% objętości elementu. W przypadku elementów o większej zawartości otworów energia uderzenia jest tłumiona w stopniu uniemożliwiającym poprawne oceny wytrzymałości. Ponadto na wyniki badania wpływ ma zawilgocenie cegły oraz stopień degradacji jej powierzchni licowych pod wpływem oddziaływania środowiska, a także rodzaj zaprawy. Zgodnie z [86], [119] badania dla każdego z miejsc pomiarowych należy wykonywać w pięciu punktach. W normie [130] zaleca się przeprowadzenie pomiarów w minimum dziewięciu punktach w ramach każdego z miejsc, co z pewnością jest podejściem bardziej dokładnym w ocenie parametrów wytrzymałościowych konstrukcji. Poszczególne punkty pomiarowe powinny być oddalone od siebie o minimum 25 mm. Odczyty liczby odbicia dokonuje się przy prostym ułożeniu młotka do badanej powierzchni, aby uniknąć konieczności rejestracji kąta nachylenia urządzenia oraz wprowadzania poprawek korygujących na etapie oceny wyników pomiarów.

Metoda sklerometryczna, zawsze miała swoich zwolenników oraz przeciwników. Zwolennicy widzieli w niej możliwość łatwego określenia wytrzymałości, przeciwnicy za dostrzegali bardzo małą jej wiarygodność [41], zatem wyniki badań sklerometrycznych bez wspomagających badań niszczących mogły być mało miarodajne.

Metody ultradźwiękowe polegają na pomiarze prędkości impulsowej w stanie zlokalizowania wady lub dostarczeniu wyników porównawczych z analizy jakości murów, ale nie mogą zapewnić danych ilościowych wymaganych do oceny i analizy technicznej konstrukcji. Zastosowanie metod ultradźwiękowych w badaniach konstrukcji obejmuje przede wszystkim określenie wytrzymałości na ściskanie betonu [40]. Podstawową problematyką przy tej metodzie jest odpowiedni dobór funkcji regresji, wyrażającej zależność pomiędzy prędkością rozchodzenia się fal w betonie, a jego wytrzymałością. Wprowadzenie normy europejskiej dopuszcza stosowanie metody ultradźwiękowej w badaniach diagnostyki konstrukcji [8], [9], jednak dobierane hipotetycznie krzywe regresji muszą być korygowane na podstawie wyników badań próbek walcowych lub kostek sześciennych wyciętych z konstrukcji. Przedmiotem badań ultradźwiękowych poza betonem cementowym, są również inne materiały budowlane. Wprowadzenie badań ma na ogół charakter czysto poznawczy, to oprócz wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie pozwalają określić parametry odkształcalności badanego materiału oraz inne właściwości fizyczne, a zwłaszcza charakter i stopień jego anizotropowości. W pracy [7] autor badań cegły komórkowej wykazał wyraźny wpływ jej wilgotności i anizotropowości związanej z kierunkiem wzrostu masy betonowej na właściwości mechaniczne i ultradźwiękowe. Wykazano również zależność pomiędzy wieloma właściwościami fizycznymi (wytrzymałością na ściskanie, gęstością objętościową i współczynnikiem przenikania ciepła), a prędkością fali podłużnej i poprzecznej. Współczynniki korelacji są rzędu 0,65-0,85 [40].

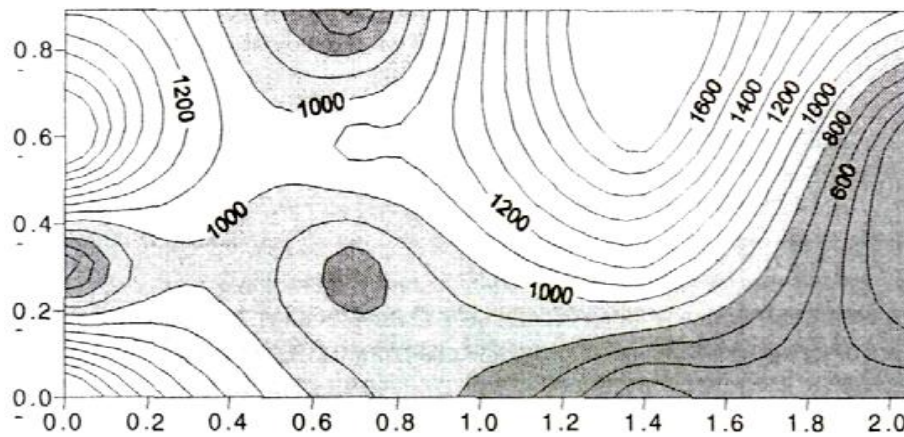
W diagnostyce konstrukcji murowych próby wykorzystywania metod ultradźwiękowych są podejmowane już od ponad 40 lat. Samo badanie polega na odczycie prędkości fali przepływającej przez badany materiał. Do badań wykorzystywanych jest wiele rodzajów głowic oraz schematów badawczych. Najbardziej popularna jest bezpośrednia metoda badawcza, polegająca na umieszczeniu głowic osiowo naprzeciwko siebie, po obu stronach badanej próbki, lub pośrednia, gdzie głowice są przyłożone obok siebie w odpowiedniej odległości.

Zastosowanie metod ultradźwiękowych do badania muru komplikuje się ze względu na jego strukturalną niejednorodność. Metoda ta do chwili obecnej nie znalazła powszechnego praktycznego zastosowania [15], [108], [111]. W Tabelicy 2.1 zgodnie z pracą [108] podano wartości charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie ceglanego muru w zależności od prędkości fali ultradźwiękowych. Dane uzyskano na podstawie ustalenia korelacji między prędkością fali ultradźwiękowych w próbkach murowych z rzeczywistą wytrzymałością na ściskanie tych próbek. W pracy tej przytoczono również wyniki badań słupa ceglanego w budynku zabytkowym. Analiza mapy prędkości fali ultradźwiękowych (Rys. 2.9) i danych przedstawionych w Tabelicy 2.1 pozwoliła wysnuć wnioski, że mur słupa z punktu widzenia

rozkładu wytrzymałości w przekroju jest niejednorodny, a najmniejsza wytrzymałość w prawym dolnym narożniku przekroju wynosi zaledwie 0,5-1,0 MPa.

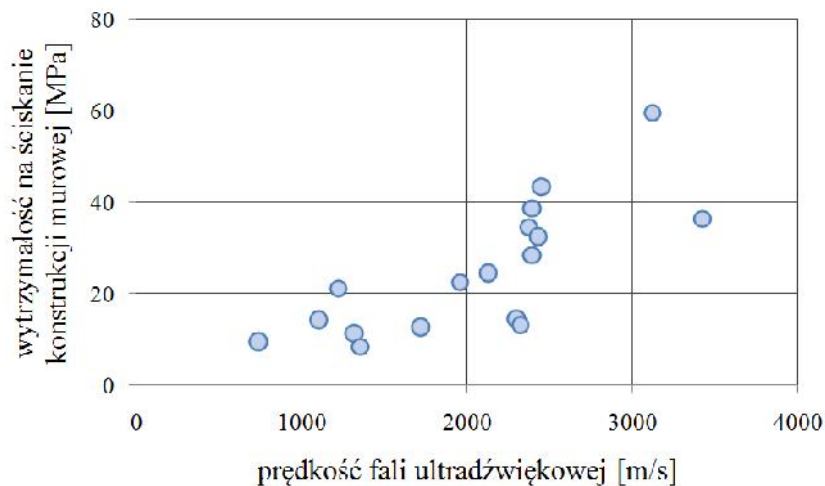
Tablica 2.1 Jakościowa klasyfikacja wytrzymałości na ściskanie f_k muru z cegły ceramicznej w zależności od prędkości V fal ultradźwiękowych [108]

L.p.	Charakterystyka muru	f_k [MPa]	V [m/s]
1	Bardzo mocny	4,0 - 4,5	3000
2	Mocny	3,0 - 4,0	2000 - 3000
3	Obniżona wytrzymałość	2,0 - 3,0	1500 - 2000
4	Niska wytrzymałość	1,5 - 2,0	1000 - 1500
5	Słaby	1,0 - 1,5	500 - 1000
6	Bardzo słaby	0,5 - 1,0	500



Rys. 2.9 Mapa prędkości fal ultradźwiękowych (w m/s) w przekroju słupa ceglanego o wymiarach 0,9x2,05 m [102]

Na Rys. 2.10 przedstawiono wyniki badań ultradźwiękowych dla murów współczesnych [1].



Rys. 2.10 Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie konstrukcji murej, a prędkością przepływu fali [1]

Na podstawie dostępnej literatury można stwierdzić, iż wyszeprdkoci fali uzyskuje się w przypadku badań murów o wyszej wytrzymałości na ciskanie. Związane jest to przede wszystkim ze stopniem degradacji warstw licowych konstrukcji murowej, a także rodzajem zastosowanego materiału murowego, wypełnieniem i strukturą spoin. Biorąc pod uwagę wszystkie parametry mające wpływ na określenie prdkoci fali w murze należy pamiętać, iż chcąc dokładnie określić jego wytrzymałość konieczne jest oszacowanie zależności korelacyjnych z innymi metodami badawczymi, co mocno ogranicza stosowanie metody ultradźwiękowej do bezpośredniej oceny wytrzymałości konstrukcji murowej. Ze względu na bardzo duży rozrzut - podobne wartości prdkoci fal zarejestrowano dla murów wykonanych z cegieł różniących się od siebie wytrzymałością na ciskanie nawet trzykrotnie, można przyjąć, iż średni błąd pomiarowy wynosi do 50%. Prof. L. Runkiewicz w pracach [85], [87] zbadał zależność dla elementów ceramicznych i na ich podstawie sformułował zależność:

$$f_B = 4,3V_B^2 + 1,2V_B + 4,2 \quad (2.3)$$

gdzie:

- V_B - prdkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w elemencie murowym,
- f_B - wytrzymałość na ciskanie określana zgodnie z [121].

Autor w omawianych badaniach [85], [87] sprawdził również zależność pomiędzy wilgotnością cegły, a prdkością rozchodzenia się fali i uzyskał następującą zależność:

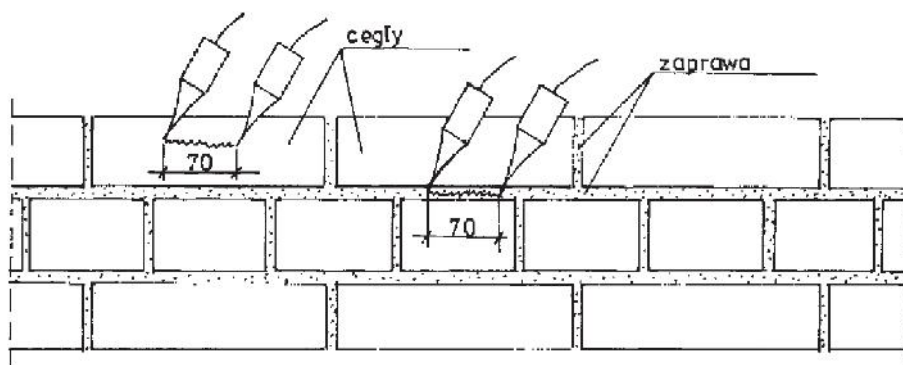
- dla elementów murowych o wilgotności 3 - 15%

$$f_B = 0,3V_B^2 + 11,07V_B + 3,98 \quad (2.4)$$

- dla elementów murowych o wilgotności 15-20%

$$f_B = -5,7V_B^2 + 14,97V_B - 2,63 \quad (2.5)$$

Prdkość fali ultradźwiękowej zwiększa się wraz ze wzrostem wilgotności elementu murowego. Nie bez znaczenia pozostaje również wartość obciążenia ciskającego - wraz z jego wzrostem maleje prdkość przepływu fali ultradźwiękowej. W pracach [94], [95], [101] autorzy szerzej opisali zastosowanie badań ultradźwiękowych ceramicznych elementów murowych. Najdokładniejsze wyniki uzyskali przy użyciu głowic eksponencyjnych rozmieszczonych co 70 mm i przyłożonych do powierzchni muru (Rys. 2.11).



Rys. 2.11 Sposób badania cegieł i zaprawy między nimi za pomocą głowic eksponencyjnych [94]

Zastosowanie metod ultradźwiękowych nie ogranicza się tylko do określenia wytrzymałości, ale i grubości konstrukcji mury, czy też jako ci struktury muru i występowania elementów "obcych" w konstrukcji takich jak stal, czy elbet, a nawet drewno. Można określić również obecność pustek powietrznych w konstrukcji niewypełnionych zapraw, a nawet najdrobniejsze rysy i spękania.

Oprócz metod opisanych powyżej, istnieją również badania, na podstawie których nie można ocenić wprost wytrzymałości czy też odkształcalności muru, jednak są one bardzo pomocne jako badania uzupełniające, dające pogląd na parametry pośrednio mające wpływ na wytrzymałość muru. Są to najmniej inwazyjne z licznej grupy badań niszczących wykorzystujące m. in. videoskop, endoskop, rejestrację prądu elektrycznego i termografię, a nawet pomiary laserem [1], [5], [42], [68]. Metody te pozwalają określić wszelkie uszkodzenia konstrukcji mury, zawartość niewypełnionych przestrzeni wraz ze zmianami materiałowymi w murze, a także jego stopień zawilgocenia wraz z rozkładem wilgotności w całym przekroju konstrukcji. Warto nadmienić, iż liczne wyniki badań niszczących opisanych w punkcie 2.2 oraz niszczących opisanych w punkcie 2.3 przedstawiono w pracy [50] w ramach programu *"On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry"*.

2.4. Metody oparte na badaniach składników muru

Wytrzymałość muru na ściskanie można określić w sposób pośredni na podstawie badania jego poszczególnych składników (elementów murowych i zaprawy). W normie [118] podstawowe znaczenie nadaje się wzorowi potgowanemu w postaci:

$$f_k = K f_b^r f_m^s \quad (2.6)$$

gdzie:

- f_k – charakterystyczna wytrzymałość muru na ciskanie,
- f_b – rednia wytrzymałość elementów murowych,
- f_m – rednia wytrzymałość zaprawy,
- K – współczynnik wyznaczany empirycznie,
- r, s – współczynniki do wiadczalne.

Zgodnie z norm [128] w załączniku krajowym przyjeto $r=0,7$, $s=0,3$, $K=0,45$. Zatem wzór na wytrzymałość na ciskanie murów z cegły ceramicznej według [128] ma postać:

$$f_k = K f_b^{0,7} f_m^{0,3} \quad (2.7)$$

i jest to samo ze wzorem podanym w [118].

W odniesieniu do historycznych murów ceglanych w pracy [56] proponowano stosować współczynnik $K=0,36$ i redukując go współczynnik $0,8$, uwzględniając specyficzne cechy muru zabytkowego, jego struktury (np. stosunek grubości spoin wspornych do wysokości cegieł, imperfekcji cegieł), wpływ długotrwałego działania obciążenia, a także niepewność oszacowania wartości wytrzymałości cegieł i zaprawy. Wzór (2.7) został zmodyfikowany na podstawie wyników obszernych badań wiadczalnych. Podstawowe zastrzeżenia do wzoru wynikają z doboru stałej K oraz z faktu, że wytrzymałość charakterystyczna określana jest na podstawie wartości średnich cegły i zaprawy. Przydatnym do określenia wytrzymałości muru na ciskanie może być również wzór L. Oniszczyka [67]:

$$f_{mean} = A f_b \left[1 - \frac{a}{b + \frac{f_m}{2f_b}} \right] \quad (2.8)$$

gdzie:

- empiryczny współczynnik korekcyjny uwzględniający relacje między wytrzymałością zaprawy i cegły

$$y = \frac{\left(0,03 + 2,25 \frac{f_m}{f_b}\right)}{\left(0,04 + 2 \frac{f_m}{f_b}\right)} \quad \text{przy} \quad f_m < 0,04 f_b \quad (2.9)$$

$$y = 1 \quad \text{przy} \quad f_m \geq 0,04 f_b$$

Współczynnik A w (2.8) określa się ze wzoru:

$$A = \frac{(10 + f_b)}{(10m + n f_b)} \quad (2.10)$$

W przypadku, gdy o wytrzymałości muru decyduje nie wytrzymałość elementów murowych na ciskanie, lecz ich wytrzymałość $f_{b,t}$ na zginanie (rozciąganie przy zginaniu) współczynnik A może być określony ze wzoru:

$$A = 1,2 \left(1 + \frac{f_b}{3f_{b,t}}\right) \quad (2.11)$$

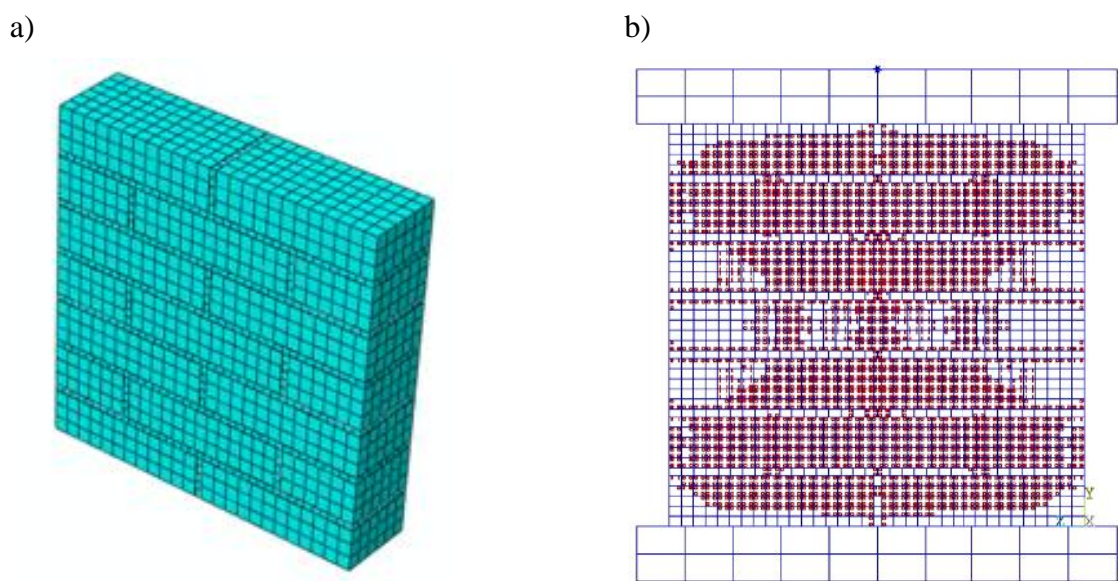
Dla muru z ceramicznych elementów murowych o wysokości 50-100 mm wartości współczynników we wzorach (2.8) i (2.10) według [77] wynoszą: $a = 0,2$, $b = 0,3$, $m = 1,25$, $n = 3$.

Wytrzymałość f_b elementów murowych na ciskanie określa się laboratoryjnie bezpośrednio na próbkach pobranych z konstrukcji z uwzględnieniem ich stanu wilgotności. Badania można wykonać zgodnie z normą [122] na próbkach, będących całymi elementami murowymi wyciętymi z muru lub połówkami tych wyrobów. Wytrzymałość elementów murowych pełnych można również ustalić na podstawie badań próbek walcowych wycinanych z cegły [52]. Trzeba jednak pamiętać, że z uwagi na anizotropię cegły, wytrzymałość na ciskanie walców wyciętych z cegieł w płaszczyznach wozówkowych, główekowych i wspornych mogą różnić się znacząco. Ponadto dotychczas nie określono współczynników korelacji pomiędzy wytrzymałościami uzyskanymi na próbkach walcowych i próbkach badanych zgodnie z normą [125]. Według [43] współczynnik przeliczający wytrzymałość odwiertu walcowego o średnicy 50 mm do wytrzymałości cegły f_b szacuje się na ok. 0,9, a dokładnie oceny wartości f_b do 15%. Dużo trudniej występuje przy ocenie wytrzymałości zaprawy na ciskanie. Pobranie próbek zaprawy z muru, które mogłyby być poddane badaniu wytrzymałości na ciskanie jest uciążliwe. Pomijając niektóre mankamenty

omawianej metody, jest ona najchętniej stosowana w kraju i za granicą przy ocenie wytrzymałości muru na ściskanie.

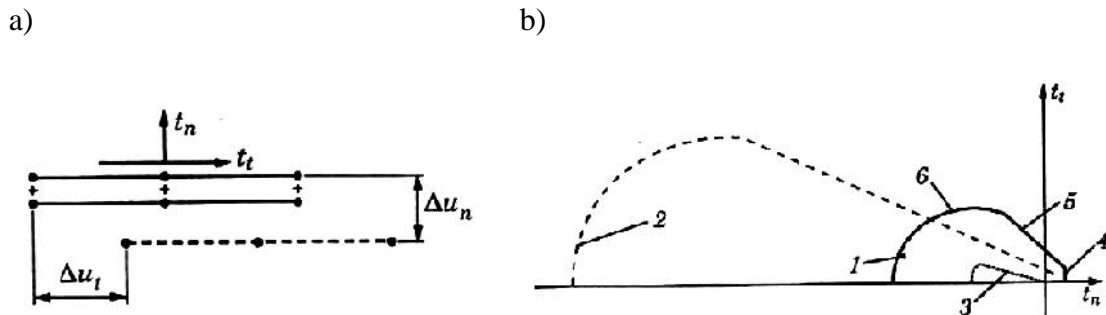
2.5. Metody teoretyczne

Z uwagi na szerokie zastosowanie metod numerycznych, przede wszystkim opartych na metodzie elementów skończonych (MES), coraz częściej podejmuje się próby oszacowania wytrzymałości muru jako materiału dwuskładnikowego w sposób teoretyczny [51], [69], [70]. Na Rys. 2.12 przytoczono model obliczeniowy fragmentu muru wraz z wynikami obliczeń przy jego ściskaniu prostopadłe do spoin wspornych.



Rys. 2.12 Model obliczeniowy MES (a) oraz mapa naprężeń ścisających fragmentu muru poddanego ściskaniu (b) [51]

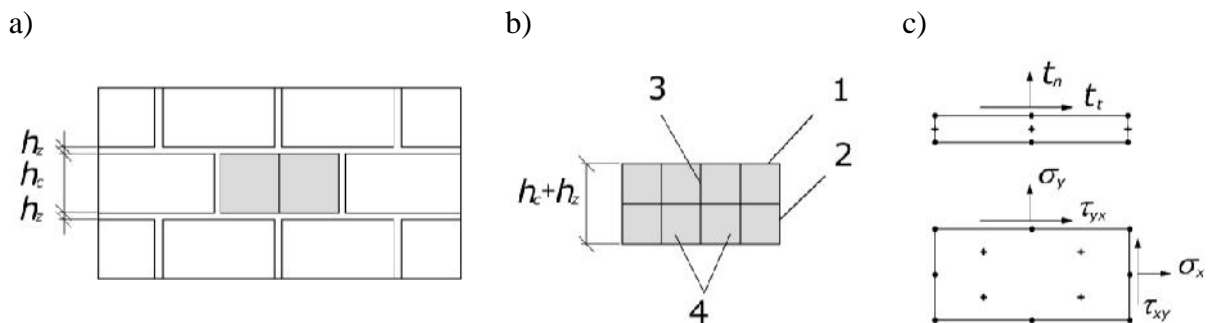
Określenie nośności muru z zastosowaniem znanych kryteriów nie jest możliwe, z uwagi na niejednorodny stan naprężeń występujący w cegle i zaprawie. Kryteria te opracowane głównie dla muru jako materiału anizotropowego homogenicznego nie uwzględniają jego struktury na poziomie mikro [16]. Występowanie na tym poziomie koncentracji naprężeń na styku zaprawy i cegły powoduje ich mikropęknięcia, a co za tym idzie nieliniową pracę muru na ściskanie. W pełni nieliniowa analiza muru metodami elementów skończonych jest możliwa do przeprowadzenia za pomocą specjalnych elementów interfejsowych [51].



Rys. 2.13 Element interfejsowy do szczególnej analizy muru [51]: a) sześciokątowy element liniowy (zerowej grubości) z trzema punktami całkowania, b) kontur graniczny (1-początkowy, 2-pośrodkowy, 3-koncowy, uwzględniający trzy mechanizmy zniszczenia, 4-przez rozciąganie, 5-przez tarcie Coulomba, 6-przez ścisnięcie)

Elementy te o zerowej grubości (Rys. 2.13) umieszczają się w siatce elementów skończonych w miejscach spodziewanych rysów. Do opisu należą normalne (t_n) i styczne (t_t) naprężenia na brzegach elementu, a względnie przemieszczenia jego wzdłuż (Δu_n , Δu_t) wynika z zależności konstytutywnych jak dla modelu ciała sprężysto-plastycznego z osłabieniem. Gdy wartości naprężeń brzegowych pozostają wewnątrz konturu granicznego (Rys. 2.13b), to element zachowuje się liniowo-sprężysto. Gdy wartości naprężeń osiągną kontur graniczny, wówczas powstają względne przemieszczenia wzdłuż mogące modelować takie mechanizmy jak: rozwieranie rysy przy rozciąganiu, gdy $t_n \leq f_t$, poślizg w rysie w skutek działania naprężeń t_n i t_t , a nawet rozkruszenie w spoinie poziomej przy ścisnieniu.

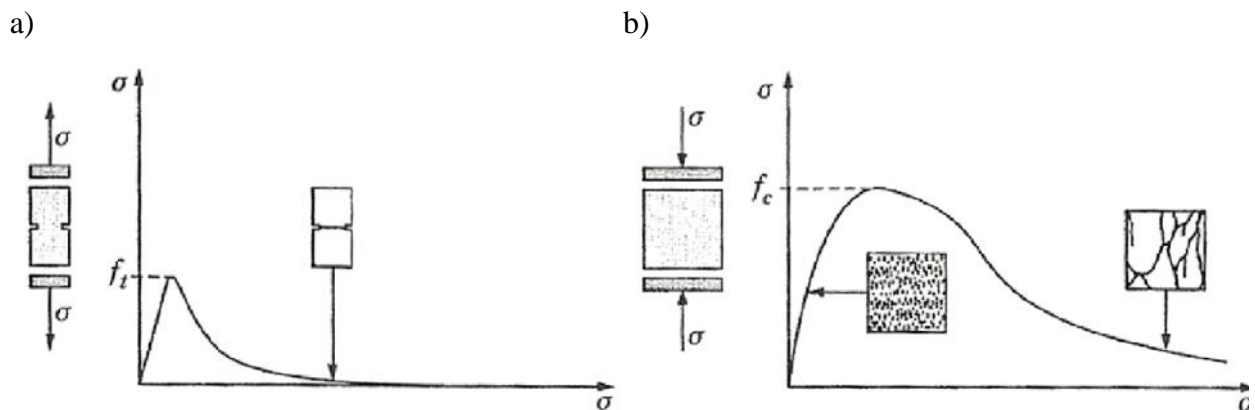
Na Rys. 2.14a pokazano rzeczywisty fragment muru wraz ze sposobem rozmieszczenia (Rys. 2.14b) elementów skończonych oraz ich rodzajem (Rys. 2.14c). W spoinach poziomych elementy interfejsowe opisują zniszczenie według modelu tarcia Coulomba. W spoinie pionowej i w środku cegły następuje rozwój rysy, gdy normalne naprężenia brzegowe t_n osiągną pewną wartość graniczną f_t związaną z techniczną wytrzymałością muru na rozciąganie [51].



Rys. 2.14 Rozmieszczenie elementów interfejsowych w murze [51]: a) fragment muru, b) powiększona cegła wraz z elementami interfejsowymi, c) sześciokątowy element interfejsowy oraz ośmiokątowy element tarczowy z czterema punktami całkowania (1-elementy w spoinie poziomej, 2-elementy w spoinie pionowej, 3-elementy w środku cegły, 4-elementy sprężyste części cegły)

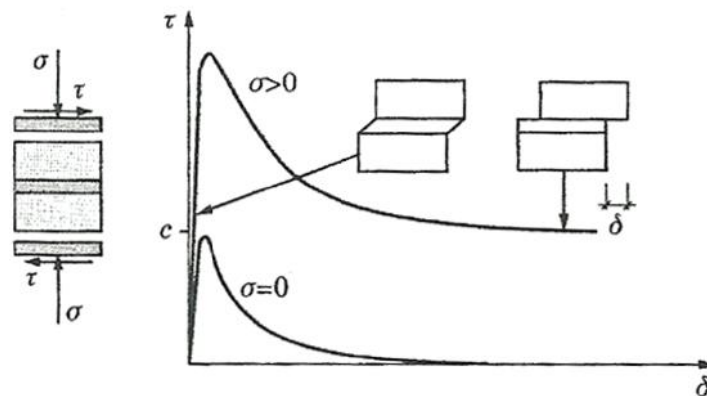
W procesie rozwoju zarysowa kontur graniczny ulega zmianie mierzonej pewnymi wewn trznymi parametrami liczbowymi zwi zanyymi z energiami włai ciwymi dla danego mechanizmu zniszczenia. Energi t mo na oszacowa , wykonuj c badania do wiadczone przedstawione pogl dowo na Rys. 2.15 i Rys. 2.16. Jej warto okre la si polem powierzchni pod wykresami napr enie - przemieszczenie. Wybrane cechy tego typu elementów s dost pne w oprogramowaniu komercyjnym (np. w pakiecie Diana) [51].

Na Rys. 2.15 przedstawiono typowe w jednoosiowych próbkach rozci gania i ciskania zachowanie wyidealizowanego materiału quasi - kruchego, za jaki mo na uwa a wypalan cegł glinian , zapraw , czy beton. Nieodł czn cech takiego materiału jest zniszczenie wskutek post puj cego rozwoju wewn trznych mikrorys zmieniaj cych si w widoczne makrorysy tu przed maksymalnymi napr eniami rozci gaj cymi f_t lub ciskaj cymi f_c [51].



Rys. 2.15 Wykres obci enie - przemieszczenie w jednoosiowych próbkach [51]:
a) rozci ganie, b) ciskanie

Wykresy z Rys. 2.15 nale y uzupełni mechanizmami zniszczenia wyst puj cymi w warstwach spoin poziomych: ich ci ciem lub ewentualnym po lizgiem pod wpływem napr e cinaj cych (Rys. 2.16)



Rys. 2.16 Ideowe zachowanie spoin w murze pod wpływem cinania [51]
(c - kohezja zaprawy)

Warto nadmienić, iż określenie przytoczonych na Rys. 2.15 i Rys. 2.16 cech cegły i zaprawy sprawia spore trudności techniczne, co jest znaczną przeszkodą na drodze teoretycznego określenia wytrzymałości muru. W związku z tym, metoda ta, poza obszarem poznawczym jak na razie nie znalazła praktycznego zastosowania, a wytrzymałość muru określa się powszechnie metodami doświadczalnymi.

2.6. Cel i teza rozprawy

Przeprowadzona analiza metod oceny wytrzymałości muru na ściskanie pokazuje, iż nie można jednoznacznie dobrać uniwersalnej metody badawczej do każdej konstrukcji murej. Co więcej, w wielu przypadkach zastosowanie jednej procedury badawczej nie pozwala jednoznacznie na określenie danych właściwości muru. Każda z analizowanych metod ma swoje wady i zalety. Przykładowo najbardziej miarodajne dane o wytrzymałości muru można uzyskać stosując metody niszcące. Są one jednak związane ze skomplikowanymi i kosztownymi technologiami badań oraz dużym zakresem ingerencji w konstrukcję murów. Metody nieniszczące natomiast dają możliwość określenia wytrzymałości muru w sposób pośredni, a więc przydatne są raczej do jakościowego oszacowania wytrzymałości konstrukcji. Najbardziej rozpowszechnioną metodą oceny wytrzymałości muru jest metoda oparta na badaniach jego składników.

Z analizy stanu wiedzy można stwierdzić, iż nie istnieją jednolite współczynniki korelacji między rzeczywistą wytrzymałością muru, a wynikami badań jego składników uzyskiwanymi różnymi metodami badawczymi.

W celu ich ustalenia, potrzebne jest przeprowadzenie odpowiedniej liczby testów wytrzymałościowych.

Celem niniejszej rozprawy jest analiza możliwości oceny wytrzymałości muru na ściskanie metodami *in situ* ze szczególnym uwzględnieniem metod niekonwencjonalnych. Zakresem opracowania objęto problematykę określenia wytrzymałości muru na ściskanie w kierunku prostopadłym do spoin wspornych, ponieważ w konstrukcjach murej ten stan naprężenia występuje najczęściej.

Przebieg badań do wiadczalnych i rozważa teoretycznych z zakresu badań wytrzymałościowych muru, elementów murowych jak i zaprawy pozwala na postawienie następującej tezy rozprawy:

Miarodajna ocena wytrzymałości na ściskanie konstrukcji murowych może być dokonana na podstawie wiedzy o wytrzymałości cegły i zaprawy określonych badaniami *in situ* w tym metodami niekonwencjonalnymi.

Aby zrealizować wyznaczony cel rozprawy oraz potwierdzić lub zaprzeczyć postawionej tezie konieczne było przeprowadzenie analizy studialnej oraz wykonanie licznych badań do wiadczalnych (zarówno laboratoryjnych jak i terenowych), a także dokonanie analizy merytorycznej uzyskanych wyników badań, co wyznaczyło zakres badań obejmujący następujące zagadnienia:

- analizę zachowania się muru w istniejących konstrukcjach,
- analizę badań do wiadczalnych cegły i zaprawy, pochodzących z różnych obiektów budowlanych,
- zaproponowanie własnych niekonwencjonalnych metod badawczych określania wytrzymałości cegły i zaprawy,
- porównanie wyników badań uzyskanych różnymi metodami badawczymi,
- określenie współczynników korelacji (jako iloraz wytrzymałości uzyskanej dwoma różnymi metodami badawczymi),
- analizę merytoryczną i weryfikację uzyskanych wyników badań,
- opracowanie wniosków.

3. ZACHOWANIE SI MURU PRZY CISKANIU

3.1. Odkształcalność muru

Mur jest materiałem konstrukcyjnym wykonanym z odpowiednio połączonych kamieni naturalnych lub sztucznych, przeznaczonym głównie do przenoszenia naprężeń ciskanych [109]. Podając za definicję przedstawioną w [128] mur jest trwałym układem elementów murowych ułożonych w odpowiedni sposób i połączonych ze sobą zaprawami. Obecnie konstrukcje murowe, po wielu latach stagnacji przeżywają swój renesans, zarówno w budynkach użyteczności publicznej jak i w budownictwie mieszkaniowym, co może być spowodowane coraz większą dostępnością elementów murowych poprzez rozwój technologiczny w produkcji zarówno samych elementów murowych jak i zapraw do ich łączenia.

W obliczeniach istniejących konstrukcji murowych poza wytrzymałością muru niezbędną jest wiedza o jego odkształcalności. Odkształcalność muru zależy od poziomu i czasu trwania obciążenia, kształtu i cech sprężystości elementów murowych, rodzaju i wytrzymałości zaprawy oraz jej procentowego udziału w objętości muru. Stary mur na zaprawie wapiennej z cegły ceramicznej wykazuje odkształcenia około 5 razy większe niż mur współczesny na zaprawie cementowej lub na cienkich spoinach. Mur wykonany na zaprawie cementowej pracuje sprężysto, po odciążeniu praktycznie wraca do pierwotnych rozmiarów. Natomiast mur na zaprawie wapiennej pozostaje w kształcie prawie nieodwracalnym z uwagi na zjawiska reologiczne.

Według ustaleń normowych docelny moduł sprężystości określa się ze wzoru:

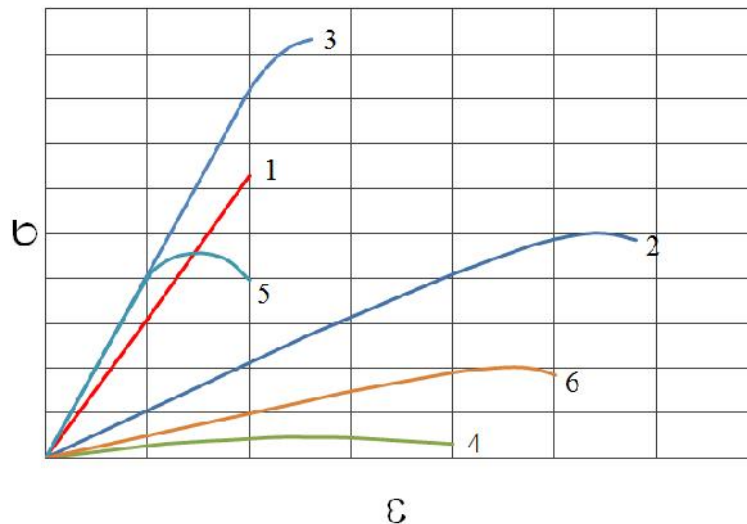
$$E = \gamma_c f_k \quad (3.1)$$

gdzie:

γ_c - cecha sprężystości muru,

f_k - wytrzymałość muru.

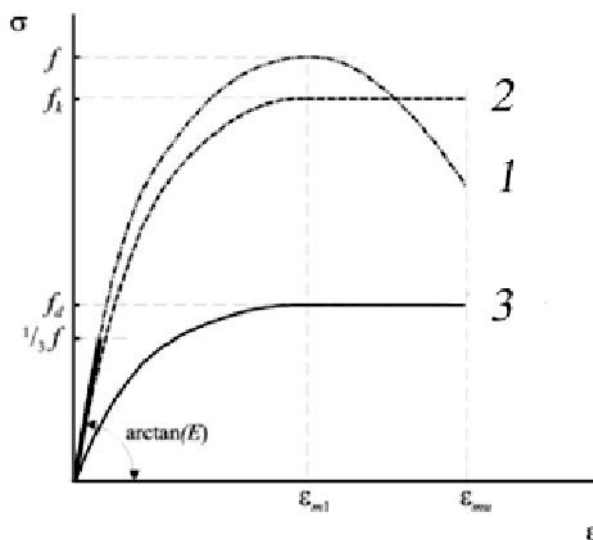
Na Rys. 3.1 dla porównania przytoczono poglądowe wykresy – dla różnych materiałów i murów.



Rys. 3.1 Wykresy σ - ϵ dla różnych materiałów murowych i murów:
 1 – cegła maszynowa, 2 – cegła redniowieczna, 3 – zaprawa cementowa, 4 – zaprawa wapienna, 5 – mur na zaprawie cementowej, 6 – mur na zaprawie wapiennej

Miarodajne dane o rzeczywistej odkształcalności muru można uzyskać na podstawie laboratoryjnych badań normowych próbek (Rys. 6.22) lub badań *in situ* np. metod *flat-jack* (Rys. 2.6). Można również posługiwać się metodą numeryczną MES na podstawie uzyskanych laboratoryjnie cech sprężystości elementów murowych i zaprawy.

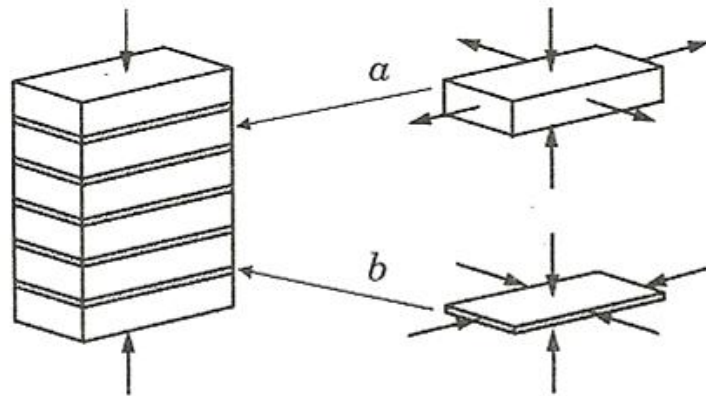
Zgodnie z ustaleniami normowymi [128] zależność naprężenie - odkształcenie muru poddanego ciśnieniu jest nieliniowa, a do obliczeń można ją przyjmować zgodnie z Rys. 3.2. Moduł sprężystości E określony z zależności $\sigma - \epsilon$, dla poziomego obciążenia stanowi około 30% wytrzymałości muru na ciśnienie.



Rys. 3.2 Zależność naprężenie - odkształcenie muru ciśnionego (1 - przebieg rzeczywisty, 2 - wykres idealizowany, 3 - wykres obliczeniowy) [128]

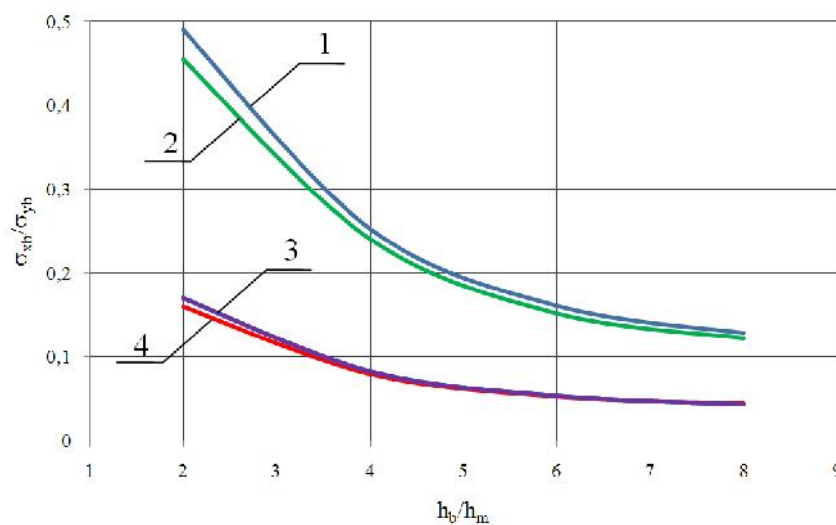
3.2. Mechanizmy zniszczenia muru

Cegły w konstrukcji murowej poddanej ciśnieniu znajdują się w złożonym trójosiowym stanie naprężenia - ciśnienie - rozciąganie - rozciąganie, natomiast zaprawa w spoinach wspornych, której odkształcalność powstrzymywana przez element murowy - jest w stanie trójosiowego ciśnienia. Zagadnienie to przedstawiono na Rys. 3.3.



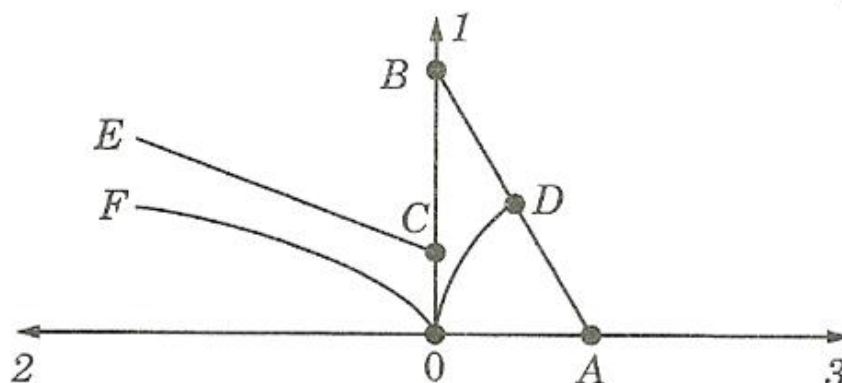
Rys. 3.3 Stany naprężenia w elemencie murowym i zaprawie: a - ciśnienie z rozciąganiem w elemencie murowym, b - stan trójosiowego ciśnienia w spoinie [69]

Im większa różnica w odkształcalności komponentów muru oraz ilorazu wysokości elementu murowego do grubości spoin h_b/h_m , tym wyższy jest poziom naprężenia rozciągających w ceglach τ_{xb}/τ_{yb} (Rys. 3.4). Z analizy danych na Rys. 3.4 wynika, iż poziomy zarysowania murów ceglanych na zaprawach wapiennych są znacznie niższe, niż murów na zaprawach cementowo wapiennych i cementowych.



Rys. 3.4 Wpływ odkształcalności elementów murowych i zaprawy na wielkość poprzecznych naprężenia rozciągających w ceglach [28] (1- $\mu_m=0,5$ $E_b/E_m=5$, 2- $\mu_m=0,5$ $E_b/E_m=10$, 3- $\mu_m=0,25$ $E_b/E_m=50$, 4- $\mu_m=0,25$ $E_b/E_m=10$)

Zaprawa b d ca w trójosiowym stanie napr e jest w stanie przenie wi ksze ciskaj ce napr enia pionowe, ni w stanie jednoosiowego ciskania. Na Rys. 3.5 zgodnie z [28] przedstawiono kryteria zniszczenia muru.



Rys. 3.5 Kryteria zniszczenia ciskanej próbki muru: 1 - pionowe ciskanie, 2 - ciskanie poziome, 3 - rozciąganie poziome [28]

Linia graniczna CE okre la maksymalne warto ci napr e ciskaj cych pionowych i poziomych, przy których mogłoby nast pi zniszczenie zaprawy w spoinie. Krzywa OF natomiast odpowiada rzeczywistym napr eniom w spoinie. Punkt C okre la wytrzymało zaprawy w stanie jednoosiowego ciskania. Linia graniczna elementu murowego mo e by poprowadzona pomi dzy punktem A, oznaczaj cym wytrzymało na rozciąganie, a punktem B oznaczaj cym wytrzymało na ciskanie. Powstrzymywanie odkształcalno ci zaprawy powoduje powstawanie poziomych napr e rozciągaj cych w cegle wraz ze wzrostem obci enia pionowego. cie k zmiany tych napr e mo e przedstawia krzywa OD. Punkt D odpowiadałby stanowi granicznemu, czyli pojawieniu si makrorys w elemencie murowym [69].

Badania przedstawione w pracy [28] miały podstawowe znaczenie w analizie teoretycznej mechanizmu zniszczenia muru. Ró nica w odkształcalno ci cegły w murze przy współdziałaniu sił tarcia i adhezji powoduje powstawanie w cegle napr e rozciągaj cych, powoduj cych p kanie, co ma decyduj cy wpływ na ostateczn no no całej konstrukcji murowej. Na podstawie wykonanych bada laboratoryjnych [28] uzyskano warto ci współczynników jednorodno ci (odpowiadaj cych stosunkowi maksymalnych odkształce cegieł do odkształce rednich) od 1,2 do 2,0. W murach charakteryzuj cych si wi ksz niejednorodno ci zarysowania pojawiały si przy znacznie ni szych warto ciach napr e ciskaj cych. Finalnie H. Hilsforf [28] okre lił wzór na wytrzymało muru na ciskanie w nast puj cej postaci:

$$f = \frac{f_{b1} f_{b2} + r' f_{m1}}{U f_{b2} + r' f_{b1}} \quad (3.2)$$

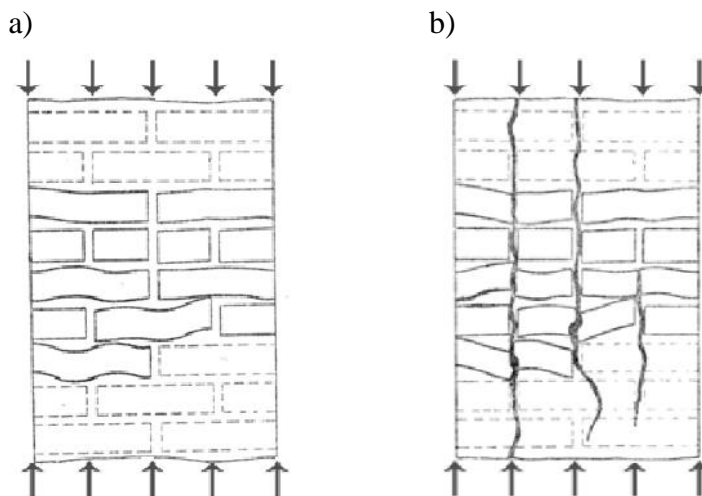
$$r' = \frac{h_m}{4,1h_b}$$

gdzie:

- f_{b1} – wytrzymałość na ściskanie cegieł w stanie jednokierunkowego ściskania,
- f_{b2} – wytrzymałość na ściskanie cegieł w stanie dwukierunkowego rozciągania,
- f_{m1} – wytrzymałość na ściskanie zaprawy w stanie jednokierunkowego ściskania,
- U – współczynnik niejednorodności,
- h_m – grubość spoiny,
- h_b – grubość cegły.

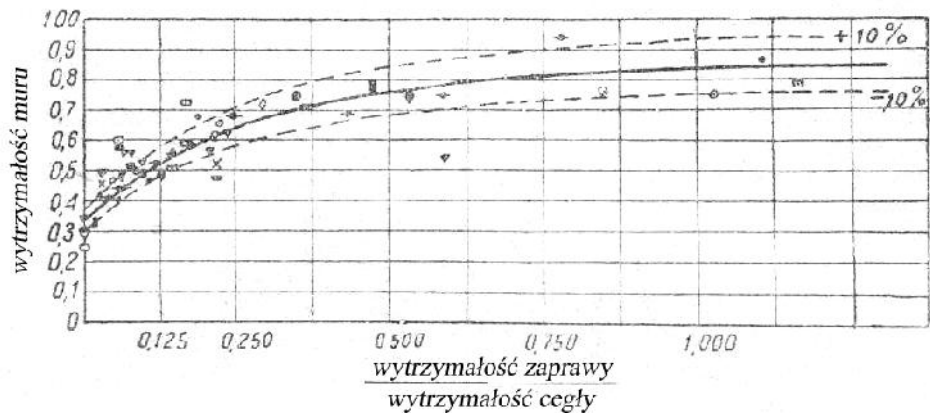
Późniejsze badania do wiadczalne nie potwierdziły przyjętych przez H. Hilsforfa liniowych funkcji granicznych dla cegieł i zaprawy w złożonych stanach naprężenia. Mimo wszystko powyższa teoria stała się podstawą do licznych opracowań odnoszących się do kryteriów zniszczenia muru. Złożone analizy modeli konstrukcji murowych przedstawiono również w pracy [51].

W konstrukcji murowej cegły i zaprawa nie są idealnymi prostokątami, zatem biorąc pod uwagę nierówności wspornych powierzchni cegieł, odchylenia w kierunku wysokości, a przede wszystkim niestaranne wypełnienie spoin, stan naprężenia w elementach murowych nie odpowiada stanom naprężenia zgodnie z Rys. 3.3. Przy dużych imperfekcjach kształtu elementy murowe w konstrukcji są ściskane i zginane, zatem L.J. Oniszczuk w pracy [67] zaproponował sposób powiązania wytrzymałości muru z wytrzymałością cegieł na zginanie. Na Rys. 3.6 zaprezentowano poglądowo mechanizm niszczenia muru na ściskanie w przypadku utraty wytrzymałości cegły przy zginaniu. W fazie końcowej niszczenia powstają pionowe "rozłupki" muru na poszczególne filarki.

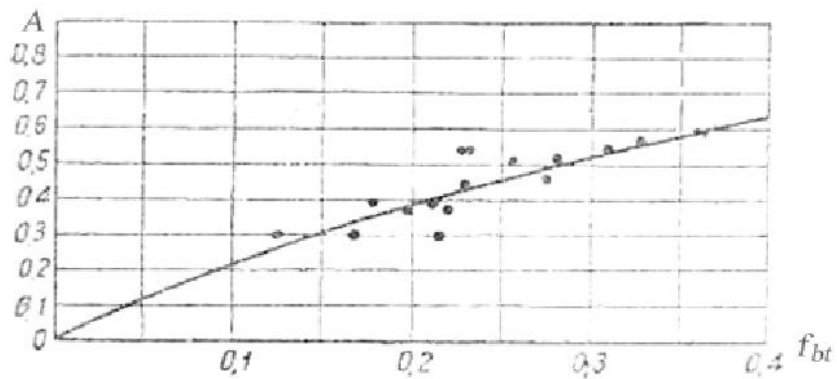


Rys. 3.6 Schemat pracy cegły w murze na zginanie przy jego ściskaniu wg [67]: a) przy poziomie obciążenia $\tau=2,1$ MPa, b) przy poziomie obciążenia $\tau=3,2$ MPa

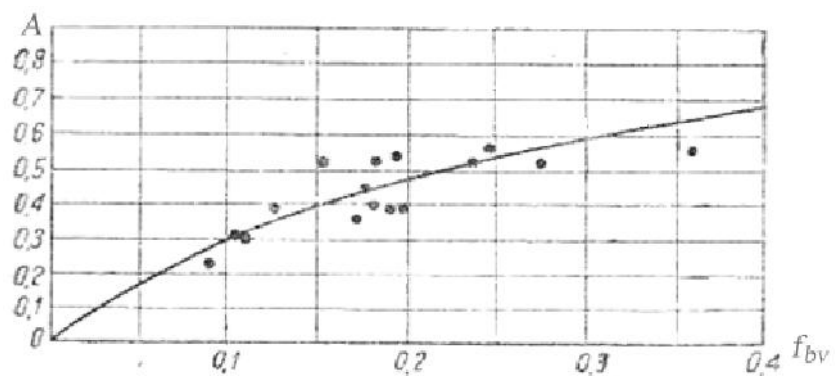
Wyniki tych badań prezentują Rys. 3.7, Rys. 3.8 oraz Rys. 3.9. Podobną koncepcję zasugerowano również w pracy [110].



Rys. 3.7 Zależność wytrzymałości muru od ilorazu wytrzymałości jego komponentów (cegły i zaprawy) [67]



Rys. 3.8 Zależność współczynnika konstrukcyjnego cegły A wg wzoru (2.11) od jej wytrzymałości na zginanie f_{bt} [67]



Rys. 3.9 Zależność współczynnika konstrukcyjnego cegły A od jej wytrzymałości na ściskanie f_{bv} [67]

3.3. Czynniki wpływające na wytrzymałość muru

Dla konstrukcji murowej poddawanej ciśnieniu czynnikami wpływającymi na jej wytrzymałość są [16]:

- wytrzymałość na ciśnienie elementów murowych,
- wytrzymałość na ciśnienie zaprawy,
- odkształcalność zaprawy,
- grubość spoin,
- wymiary elementów murowych,
- absorpcja wody przez elementy murowe,
- imperfekcja geometryczna i materiałowa elementów murowych,
- czas oraz warunki dojrzewania,
- jakość wykonania muru,
- grubość muru,
- kierunek działania obciążenia w stosunku do płaszczyzny spoin wspornych,
- obciążenie skupione.

W konstrukcjach murowych istotnym jest również stopień degradacji muru po wieloletnim użytkowaniu (Rys. 3.10)



Rys. 3.10 Przykład zdegradowanego muru ceglanego

Problem wytrzymałości murów istniejących wynika również z wielu innych przyczyn, które powodują pogorszenie stanu technicznego budynku. Do tych przyczyn można zaliczyć naturalne zużycie muru z uwagi na wiek budynku lub występowanie niekorzystnych oddziaływań jak np. przeciążenia, wstrząsy i drgania komunikacyjne, odkształcenia

termiczne, zanieczyszczenie środowiska, skutki pożaru, niekorzystne warunki gruntowo-wodne itp. Zagadnienie starzenia się materiałów w warstwach powierzchniowych oraz wpływu agresywnego środowiska omówiono między innymi w pracy [33].

Z uwagi na szeroki zakres badań diagnostycznych główną uwagę zwraca się na badania materiałowe, które mogą być wykonywane *in situ* lub w warunkach laboratoryjnych. Rozpoznanie cech mechanicznych muru jako materiału dwuskładnikowego (elementu murowego i zaprawy) jest zagadnieniem najważniejszym i najtrudniejszym przy określeniu jego rzeczywistej nośności i trwałości. Problem polega na zró nicowaniu wytrzymałości i odkształcalności zapraw i różnorodności elementów murowych stosowanych w różnych okresach wznoszenia budynków. Stare budynki wykonywano głównie z cegły ceramicznej na zaprawach wapiennych, a nawet glinianych. Jak na razie brak uniwersalnych i precyzyjnych metod, co do określenia ich cech fizycznych i mechanicznych. Stanowi to duże wymagania odnośnie poziomu wiedzy ekspertów o stosowanych metodach badawczych. W odniesieniu do zabytkowych konstrukcji murowych kluczową sprawą jest reprezentatywność badań materiałowych elementów murowych. Podczas oceny stanu technicznego istniejących konstrukcji murowych istotnym problemem jest oszacowanie wytrzymałości muru na ściskanie w jego zasadniczych elementach: słupach, cianach, sklepieniach i innych fragmentach konstrukcji. Zagadnienie szacowania wytrzymałości starych murów nie jest dotychczas znormalizowane. Problem polega na tym, że wytrzymałość muru na ściskanie określana na podstawie zależności podanych w aktualnych normach dotyczy konstrukcji wznoszonych współcześnie, zgodnie z aktualnie obowiązującymi wymaganiami konstrukcyjnymi i wykonawczymi, z materiałów murowych spełniających wymagania odpowiednich norm w zakresie parametrów geometrycznych i cech fizyko-mechanicznych. W murach starych parametry te zwykle nie są zachowane, zatem określenie wytrzymałości tych murów na podstawie wzorów normowych należy traktować jedynie jako oszacowanie i stosować odpowiednio wysokie współczynniki bezpieczeństwa [22], [31], [32], [34], [38], [43], [45], [102].

Istnieje wiele konstrukcji murowych na słabych zaprawach wapiennych, charakteryzujących się niską jakością wykonania (zwłaszcza warstwy pozalicyowe) i małą regularnością struktury wewnętrznej. Dodatkowo poszczególne fragmenty muru mogą się istotnie różnić stanem technicznym (zarysowania, zawilgocenie, a także destrukcja zarówno elementów murowych jak i zaprawy) spowodowanym wieloletnią eksploatacją. Powoduje to, że w wielu przypadkach nieuzasadnione jest posługiwanie się jedną tylko metodą badawczą określenia wytrzymałości, nawet w obrębie tego samego elementu murowego.

Jak już wspomniano na wytrzymałość istniejących murów mają wpływ jeszcze inne czynniki, których nie da się uwzględnić podczas przeprowadzenia badań według wyżej opisanych metod. Do tych czynników między innymi należy jako wykonania muru (tzw.

„r ka murarza”), grubo spoin wspornych lub prawidłowo wi zania elementów murowych, degradacja pod wpływem oddziaływania rodowiska, po aru itp. W zwi zku z powy szym według zalece [78] wytrzymało ci istniej cego muru proponuje si okre la jako iloczyn:

$$f_k^* = f_k \cdot k_i \quad (3.3)$$

gdzie:

f_k – wytrzymało muru,

k_i – współczynniki korekcyjne, których warto ci podano w Tablicach 3.1 - 3.4.

Tablica 3.1 Warto ci współczynnika k_1 uwzgl dniaj cego jako wykonania muru [78]

L.p.	Wady wykonawstwa	k_1
1	Brak właciwego wi zania elementów murowych:	
	– w 5-8 warstwach (40-50 cm)	1,00
	– w 8-9 warstwach (60-65 cm)	0,90
	– w 10-11 warstwach (75-80 cm)	0,75
2	Brak wypełnienia spoin pionowych	0,90
3	Nadmierna powy ej 2 cm grubo spoin wspornych (3-4 spoiny na 100 cm wysoko ci muru):	
	– przy wytrzymało ci zaprawy 7,5 MPa	1,00
	– przy wytrzymało ci zaprawy 2,5–5,0 MPa	0,90
	– przy wytrzymało ci zaprawy < 2,5 MPa	0,80

Tablica 3.2 Warto ci współczynnika k_2 uwzgl dniaj cego zarysowanie konstrukcji murowych z uwagi na ich przeci enia [78]

L.p.	Charakter zarysowa i sp ka	Mur	
		niezbrojony	zbrojony
1	Rysy w pojedynczych elementach murowych	1,00	1,00
2	Rysy nie wi cej ni dwóch warstwach muru	0,90	1,00
3	Rysy nie wi cej ni w czterech warstwach muru przy liczbie rys nie wi cej ni trzy na 1mb długo ci ciany lub szeroko ci filarka	0,75	0,90
4	Rysy nie wi cej ni w o miu warstwach muru przy liczbie rys nie wi cej ni cztery na 1mb długo ci ciany, szeroko ci filarka lub słu pa	0,50	0,70
5	Rysy nie wi cej ni w o miu warstwach muru przy liczbie rys wi cej ni cztery na 1 mb długo ci ciany, szeroko ci filarka lub słu pa (rozłupywanie muru)	0,00	0,50

Tablica 3.3 Wartości współczynnika k_3 uwzględniającego uszkodzenie muru w miejscach oparcia dźwigarów, nadproży i innych konstrukcji [78]

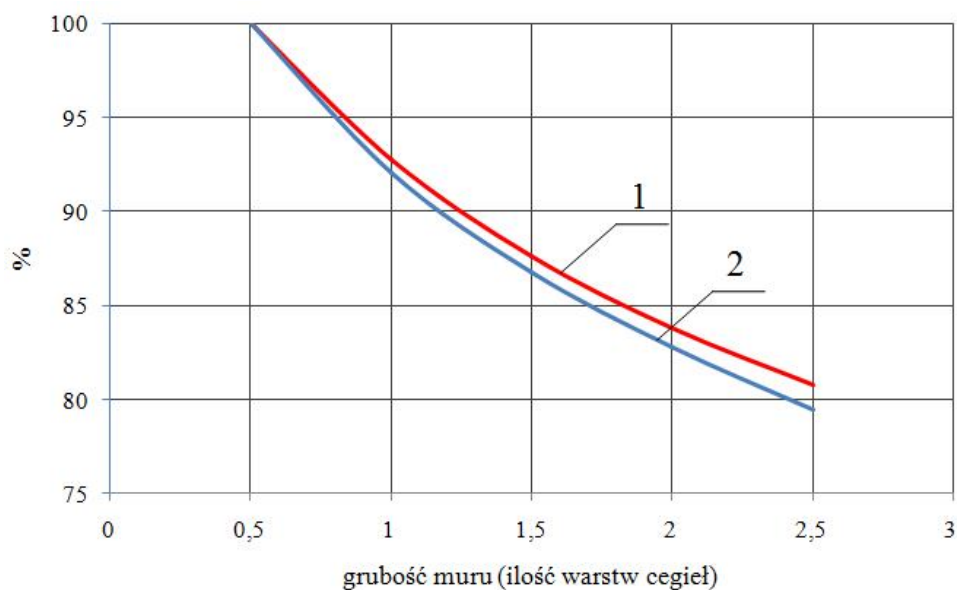
L.p.	Charakter uszkodzenia muru	Mur	
		niezbrojony	zbrojony
1	Spęknięcie, rozdrobnienie muru na głębokość do 2 cm oraz pionowe zarysowanie na długości do 18 cm	0,75	0,90
2	Spęknięcie, rozdrobnienie muru na głębokość do 2 cm oraz pionowe zarysowanie na długości do 35 cm	0,50	0,75
3	Spęknięcie, rozdrobnienie muru na głębokość do 2 cm oraz pionowe lub ukośne zarysowanie na długości powyżej 35 cm	0,00	0,50

Tablica 3.4 Wartości współczynnika k_4 uwzględniającego skutki pożaru [78]

L.p.	Grubość uszkodzonej przez pożar warstwy muru bez uwzględnienia tynku, [cm]	k_4		
		ściany i filarki międzyokienne o grubości $t \leq 38$ cm		Słupy o wymiarach przekroju 38 cm i więcej
		przy jednostronnym nagrzewaniu	przy dwustronnym nagrzewaniu	
1	0,50	1,00	0,95	0,90
2	2,00	0,95	0,90	0,85
3	6,00	0,90	0,80	0,70

Należy zauważyć, że zaprawy nie zawsze są jednorodne na całej grubości muru. Po wielu latach eksploatacji konstrukcje murowe często wymagają ponownego spoinowania, co w konsekwencji doprowadza do jeszcze większego zmniejszenia cech mechanicznych zaprawy w murze. Ma to znaczenie w przypadku braku odpowiedniej wiedzy w kwestii doboru odpowiedniej zaprawy. Przykładowo nadmierna wytrzymałość zapraw użytych do ponownego zaspoinowania konstrukcji może doprowadzić do zniszczenia elementów murowych w strefach zaspoinowania [36].

Nie bez znaczenia dla określenia wytrzymałości muru jest grubość samego muru. Redukcja wytrzymałości na ściskanie muru ceglano-cementowego ze wzrostem jego grubości i obecności spoin podłużnych w jego strukturze została wielokrotnie potwierdzona badaniami [56]. Na Rys. 3.11 podano propozycje O. Graffa dotyczące murów ceglanych na zaprawie wapiennej o wytrzymałościach $f_m=1,0$ MPa oraz $f_m=0,4$ MPa.



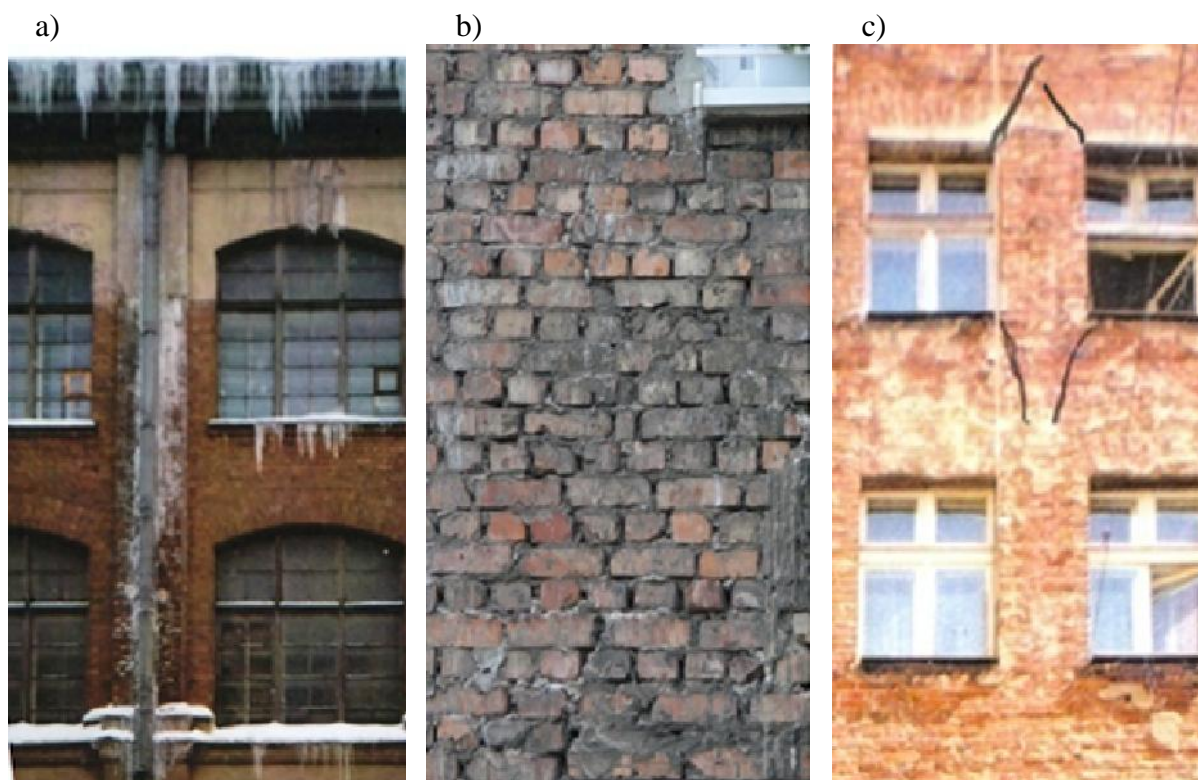
Rys. 3.11 Wzgl dny wpływ (w procentach) grubo ci muru na jego wytrzymało z uwzgl dnieniem wytrzymało ci zaprawy f_m według [25]:
linia 1 - $f_m=1,0$ MPa, linia 2 - $f_m=0,4$ MPa

Analizuj c dane przedstawione na Rys. 3.11 mo na stwierdzi , i redukcja wytrzymało ci o 20% jest bezpiecznym oszacowaniem dla murów ceglanych o grubo ci nie wi kszej ni 2,5 cegły, a wpływ grubo ci muru na jego wytrzymało ro nie wraz ze zmniejszaniem si wytrzymało ci zaprawy.

Równie grubo samej spoiny ma du y wpływ na wytrzymało murów ceglanych. Z. Amin [35] w badaniach murów ceglanych z cegły współcze nie produkowanej o wymiarach 25x12x6,5 cm uzyskał wzrost wytrzymało ci na ciskanie o 35-40% na skutek zmniejszenia grubo ci spoin z 20 do 10 mm, natomiast z bada przeprowadzonych przez Southern California Primate Research Forum wynika, i zwi kszenie grubo ci spoiny z 9 do 18 mm spowodowało zmniejszenie si wytrzymało ci o 40%. Z bada przeprowadzonych przez H. Hilsdorfa, wynika, e zmniejszenie grubo ci spoiny z 22 do 12 mm determinuje zwi kszenie wytrzymało ci muru o ok 35% [28]. W zwi zku z powy szym stwierdzi nale y, i grubo spoin wspornych jest bardzo istotnym parametrem struktury muru ceglanego, który obligatoryjnie nale y bra pod uwag przy okre laniu jego wytrzymało ci na ciskanie.

ciany ceglane wykonane z dobrego materiału i znajduj ce si w sprzyjaj cych warunkach eksploatacji wykazuj wieloletni trwało . Natomiast ulegaj one degradacji, gdy s nara one na ci głe oddziaływania czynników rodowiskowych. rodowisko zewn trzne szczególnie niekorzystnie wpływa na trwało cian w wielkich miastach, okr gach przemysłowych oraz zlokalizowanych w klimacie nadmorskim. Powietrze zewn trzne jest zanieczyszczone szkodliwymi gazami lub pyłami, które w czasie opadów przenikaj do struktury muru. W ród najgro niejszych czynników wpływaj cych destrukcyjnie na mur nale y wymieni działanie soli chlorków, azotanów oraz siarczanu sodu,

potasu, magnezu, wapnia. S to substancje krystaliczne, łatwo rozpuszczalne w wodzie i przenikają z nią w mur. Przy silnym i długotrwałym zawilgoceniu cian, np. na skutek uszkodzonych rynien i rur spustowych zarówno cegła jak i zaprawa murarsza, mianem i rozpadają się. Następuje również odpryski, łuszczenie się warstwowe, pęknięcie i kruszenie cegły (Rys. 3.12).

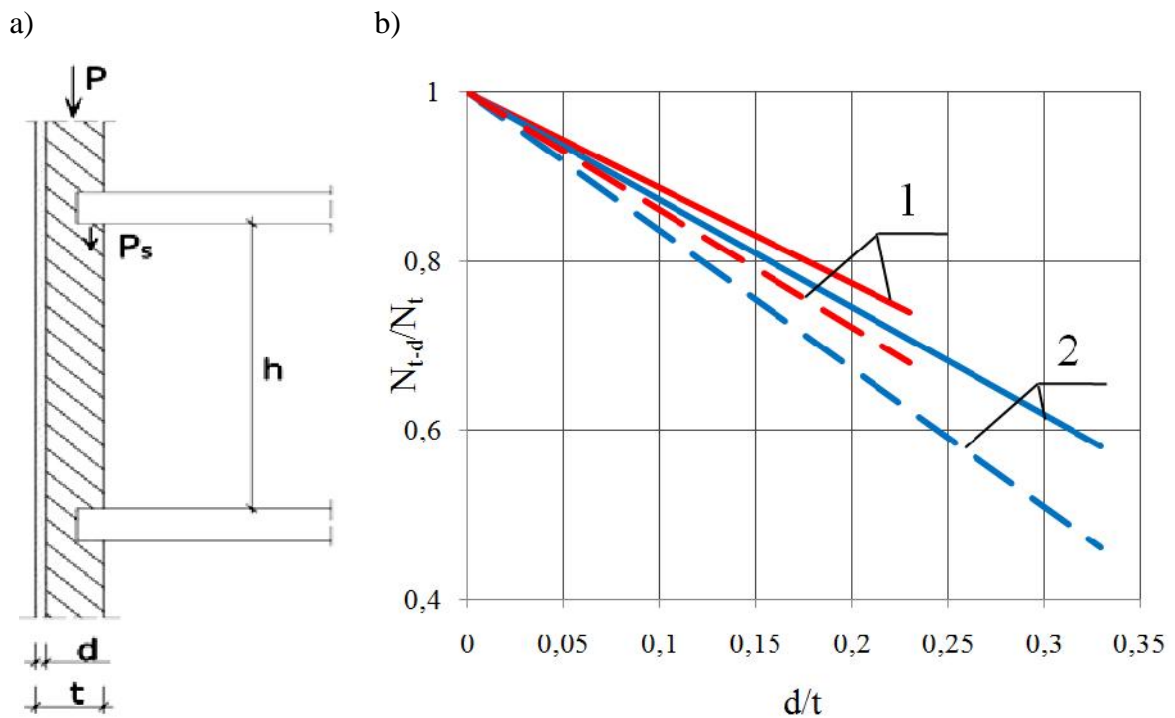


Rys. 3.12 Degradacja lica murowanych cian zewnętrznych w wyniku: a) nawilżenia i przemarzania w obrębie uszkodzonych rur spustowych, b) zwińrzenia spoin, c) oddziaływania zanieczyszczeń środowiska

Degradacja lica cian może być zjawiskiem zamarzania i rozmrażania wody znajdującej się w kapilarach cegły. Zamarzająca woda zwiększa swoją objętość o 9%. Przy spadku temperatury do -11°C następuje ponad 11-krotny wzrost ciśnienia wody w kapilarach. Dalsze obniżenie temperatury do -20°C powoduje ponad 20-krotny wzrost ciśnienia w stosunku do temperatury 0°C . Degradacja warstwy lcowej ciany przyspiesza brak jej zabezpieczenia w postaci tynku.

W przypadku nie podejmowania działań konserwacyjnych i naprawczych procesy te mogą doprowadzić ciany do stanu uniemożliwiającego ich dalsze użytkowanie. Dotyczy to również obniżenia ich nośności, gdy z uwagi na ubytki destrukcyjne warstw lica zmniejsza się efektywne pole przekroju muru i wzrasta smukłość cian. W celu oszacowania stopnia obniżenia nośności zdegradowanych cian przez autora niniejszej rozprawy przeprowadzono analizy liczbowe na podstawie ustalonych normowych [65]. Rozpatrzono ciany

murowe o grubości $t=38$ cm i $t=51$ cm wykonane na cementowej i wapiennej zaprawie. Schemat obliczenia ciany podano na Rys. 3.13a. Przy stałych wartościach obciążenia P od wierzchołka kondygnacji i obciążenia P_s od stropów zmieniono grubość warstwy lica d od 0 do 12 cm, którą z uwagi na degradację lica muru eliminowano z pracy przekroju na ściskanie. Wyniki obliczeniowe ciany dla wszystkich przypadków przyjmowano jednakowo $h=3,1$ m.



Rys. 3.13 Schemat obliczeniowy ciany zewnętrznej (a) i zależność jej względnej nośności N_{t-d}/N_t (b) od względnej grubości d/t zdegradowanej warstwy licy (linie 1 odpowiadają grubości ciany $t=51$ cm, linie 2 - grubości ciany $t=38$ cm; linie ciągłe odpowiadają murowi na zaprawie cementowej, linie przerywane - na zaprawie wapiennej) [65]

Na Rys. 3.13b przedstawiono wyniki obliczeń w postaci zależności stopnia obniżenia nośności N_{t-d}/N_t od względnej grubości t/d zdegradowanej warstwy (N_{t-d} - nośność ciany o grubości $t-d$, N_t - nośność ciany o grubości t). Z analizy przytoczonych zależności widać, że degradacja licy ciany w sposób znaczący (a do 2 razy) może obniżyć jej nośność. Ciany murowe o mniejszej grubości i wykonane na słabszej wapiennej zaprawie są bardziej wrażliwe na ubytki destrukcyjne pod względem obniżenia nośności. Warto nadmienić, że poza obniżeniem nośności degradacja licy ciany prowadzi również do obniżenia ich właściwości termoizolacyjnych i akustycznych.

3.4. Uj c ia normowe

Szeroki zakres bada murów ceglanych przeprowadził w latach 30-tych L.J Oniszczyk [67]. Jego zmodyfikowany wzór był podstawow zale no ci przy projektowaniu konstrukcji murowych w Polsce. Pocz tkowo wzór L.J. Oniszczyka dla murów ceglanych miał nast puj c posta :

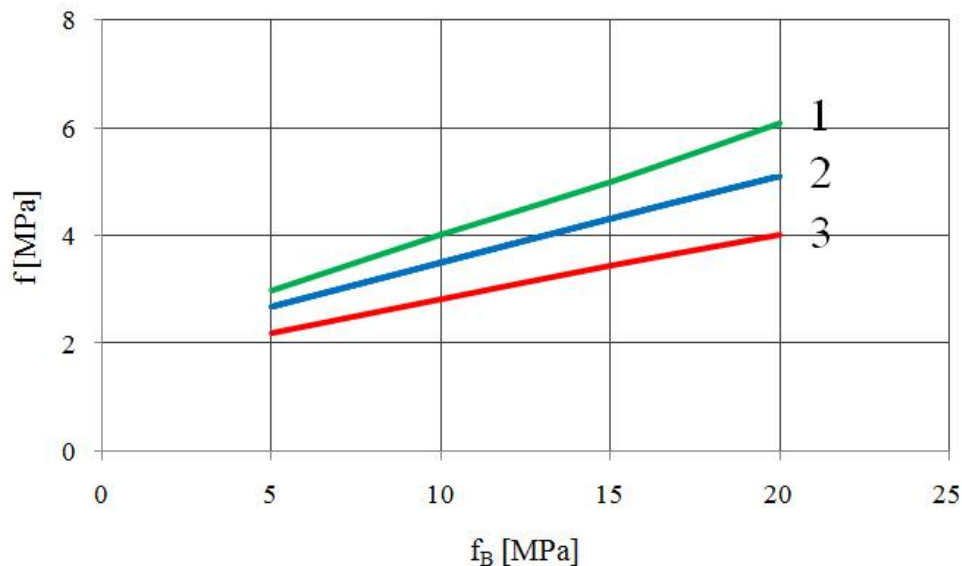
$$f = A f_B \left(1 - \frac{0,2}{0,3 + \frac{f_M}{f_B}} \right) \quad (3.4)$$

gdzie:

A – parametr uwzgl dniaj cy udział wytrzymało ci cegieł w wytrzymało ci muru przy stałym stosunku f_M/f_B wyznaczany ze wzoru:

$$A = 0,33 + \frac{15}{f_B} \quad (3.5)$$

Wytrzymało ci muru okre lone za pomoc wzoru (3.4) przedstawiono na Rys. 3.14



Rys. 3.14 Wytrzymało na ściskanie f murów ceglanych według wzoru L.J. Oniszczyka (3.4): linia 1 - zaprawa o wytrzymało ci 10 MPa, linia 2 - 5 MPa, linia 3 - 2 MPa

W polskich normach dotyczących projektowania konstrukcji dla murów ceglanych przez wiele dziesięcioleci obowiązywał wzór, którego weryfikację badawczą podał mi między innymi Z. Gołbiowski [24]:

$$f_{mean} = f_B \frac{100 + f_B}{100 + 3,3f_B} \left(1 - \frac{0,2}{0,3 + \frac{f_M}{2f_B}} \right) \quad (3.6)$$

Wzór (3.6), który jest modyfikacją wzoru L.J. Oniszczyka, wykorzystywano również w celu analizy istniejących konstrukcji murowych. Dla konstrukcji murowych na słabych zaprawach wapiennych przyjmuje się $f_M = 0$ i wówczas wzór (3.6) przyjmuje uproszczoną postać:

$$f_{mean} = 0,33f_B \frac{100 + f_B}{100 + 3,3f_B} \quad (3.7)$$

W powyższych wzorach (3.6) i (3.7) f_B oznacza średni wytrzymałość na ściskanie cegieł badanych na próbkach złożonych z dwóch połówek cegieł sklejonych ze sobą i wyrównanych zaprawą zgodnie z [120]. Przy założeniu, że $f_{mean} = 1,3f_k$ oraz $f_b = 1,2f_B$ otrzymuje się zależność:

$$f_{mean} = 0,3f_B \frac{100 + 1,2f_b}{100 + 4f_b} \quad (3.8)$$

Z opisanych powyżej zależności wynika, że wytrzymałość na ściskanie cegieł ma duży wpływ na wytrzymałość muru i całej konstrukcji murowej niż wytrzymałość zaprawy. Na tej podstawie, stwierdzić można, że przy oszacowaniu wytrzymałości muru metodami opartymi na badaniach jego składników miarodajność oceny wytrzymałości cegieł ma zdecydowanie większe znaczenie, niż oceny wytrzymałości zaprawy. Z praktycznego punktu widzenia zależność między wytrzymałościami cegieł i zaprawy, a wytrzymałości muru powinny uwzględnić dodatkowe czynniki mające wpływ na ostateczną wytrzymałość całej konstrukcji.

4. METODY BADA WYTRZYMAŁO CI CEGŁY

4.1. Uwagi ogólne

Kluczow spraw jest reprezentatywno bada materiałowych elementów murowych. Zagadnienie szacowania wytrzymało ci elementów murowych ze starych murów nie jest dotychczas znormalizowane. Podstaw w dalszym ci gu pozostaj badania wła ciwo ci cegieł pobranych bezpo rednio z istniej cej konstrukcji. Metodyka tych bada nieustannie jest rozwijana i udoskonalana.

Jak na razie w literaturze technicznej brak uogólnionych danych o rzeczywistej wytrzymało ci cegły w istniej cych budynkach, które wybudowano w ró nych okresach i regionach kraju. Orientacyjne ci ary i wytrzymało ci cegły u ywanych w okresie od XIV do XIX wieku podaje za pracami [6], [34] Tablica 4.1.

Tablica 4.1 Ci ary i wytrzymało ci na ciskanie cegieł stosowanych od XIV do XIX wieku [6], [34]

L.p.	Wiek	XIV		XV		XVI		XVII		XVIII		XIX	
1	Ci ar [kg]	6,1	8,1	4,8	4,9	4,9	5,0	4,1	4,0	3,4	3,4	4,2	5,0
2	Wytrzymało [MPa]	2,7	3,7	4,6	2,0	5,5	7,0	3,9	4,1	5,8	4,7	5,2	6,0

Badania wytrzymało ci cegły mo na wykona metodami niszczeniowymi i nieniszczymi. Do bada wytrzymało ci na ciskanie próbki pobrane z muru nale y oczy ci i oszlifowa , lub wyprawi odpowiedni zapraw . Wpływ sposobu przygotowania próbek do bada wytrzymało ciowych opisano w pracy [58]. Stwierdzono, e wytrzymało na ciskanie próbek wyprawionych zapraw , była około 10% mniejsza od wytrzymało ci próbek szlifowanych. Wszystkie próbki przebadane przez autora niniejszej rozprawy zostały przygotowane do bada poprzez oszlifowanie z tolerancj według normy [125].

4.2. Badania normowe

Wytrzymałość elementów murowych na ściskanie f_b można określić laboratoryjnie bezpośrednio na próbkach pobranych z konstrukcji z uwzględnieniem ich wilgotności. Opisane poniżej badania wykonywane były zgodnie z normami [122], [125] na próbkach, będących całymi elementami murowymi pobranymi z muru. Wielkość znormalizowanej wytrzymałości na ściskanie cegieł f_b wyznacza się ze wzoru (4.1):

$$f_b = \gamma_u f_B \quad (4.1)$$

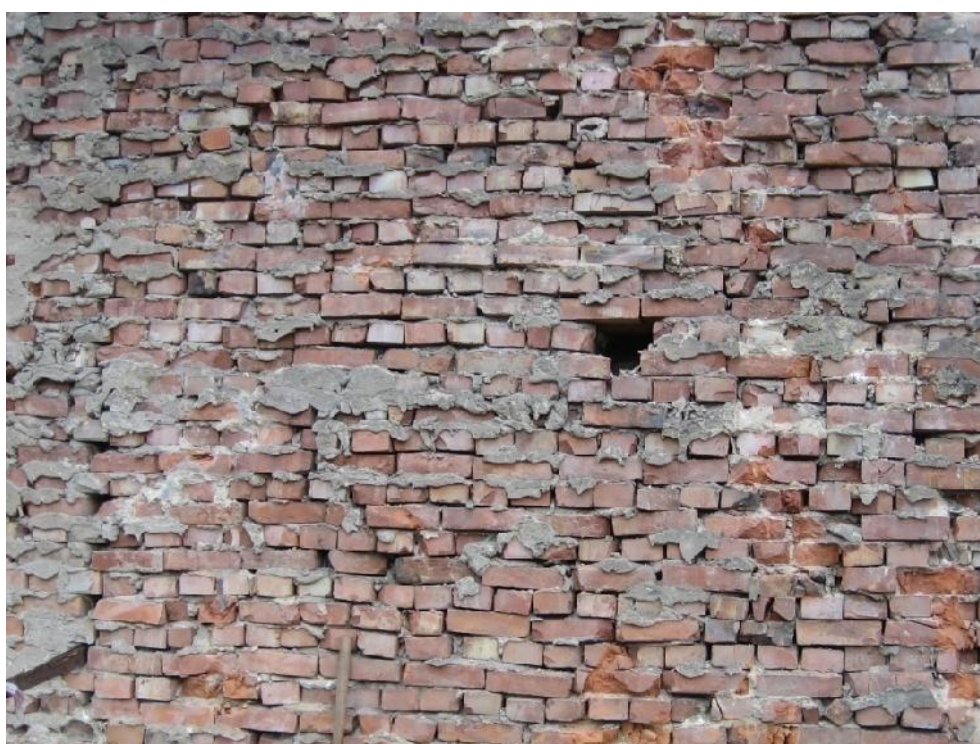
gdzie:

- f_B – średnia wytrzymałość na ściskanie,
- γ – współczynnik uwzględniający stan zawilgocenia badanych elementów (zgodnie z przyjętymi założeniami wykonywania badań laboratoryjnych - badane elementy sezonowano do stanu powietrzno - suchego, zatem $\gamma = 1,0$),
- u – współczynnik uwzględniający wpływ efektu skali badanych elementów.

Do badań wytrzymałościowych wykorzystano elementy murowe pozyskane z jednej ze szczytowych kamienic mieszkalnych w centrum miasta przy ul. Obrońców Stalingradu wybudowanej na początku XX wieku (połacie formy secesyjnej oraz neoklasycystycznej), która po decyzji Powiatowego Inspektora Nadzoru Budowlanego poddana została rozbiórce (Rys. 4.1). Stan techniczny cegieł był zróbnicowany, w większości jednak był dobry. Mury ceglane w zabytkowych obiektach charakteryzują się na ogół znacząco niejednorodnością materiałów i struktury. Podstawowy wpływ na właściwości fizykomechaniczne oraz wygląd cegieł, obok parametrów złoża, z którego czerpany był surowiec miał sposób formowania i wypalania elementów murowych. Konsekwencją technologii produkcji w tym okresie są m.in. znaczne rozrzuty uzyskanych wytrzymałości cegieł pobranych z wyburzonej kamienicy. Na Rys. 4.2 przedstawiono przykładowe struktury muru ceglanoego zabytkowej kamienicy przeznaczonej do rozbiórki.



Rys. 4.1 Kamienica w centrum Szczecina decyzją Powiatowego Inspektora Nadzoru Budowlanego poddana rozbiórce



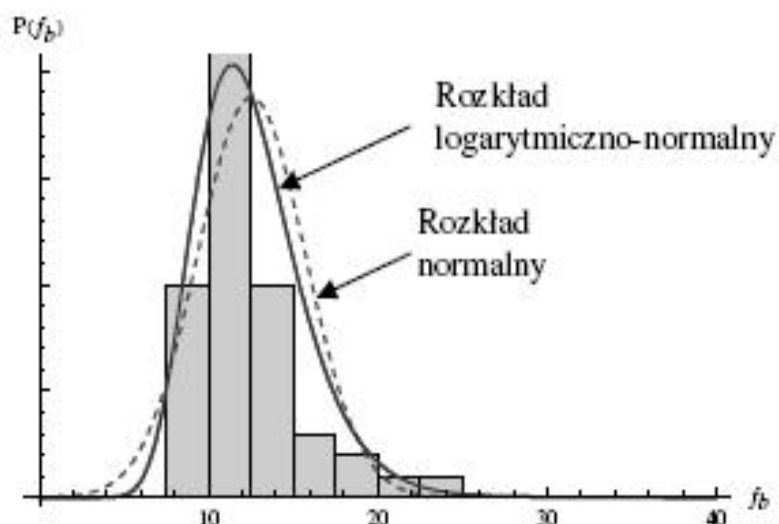
Rys. 4.2 Przykładowa struktura muru ceglanego wyburzanej zabytkowej kamienicy

Elementy murowe pobrane losowo ze ścian zewnętrznych omawianej kamienicy miały wymiary nominalne wynoszące $250 \times 120 \times 65$ mm (Rys. 4.3). Do badań pobrano również zaprawę o grubości 12-18 mm, której dokładne wyniki badań przytoczono w kolejnych rozdziałach niniejszej rozprawy.



Rys. 4.3 Cegła i zaprawa pobrane do badań wytrzymałościowych murów z wyburzanej szkieletowej kamienicy

Otrzymana średnia wytrzymałość na ściskanie (z uwzględnieniem współczynnika skali) według [125] wynosiła $f_{b, mean} = 12,5$ MPa. Natomiast do badania liczba elementów próbnych pozwoliła na dobranie odpowiedniej funkcji rozkładu prawdopodobieństwa [70]. Rys. 4.4 przedstawia histogram oraz dwa rozkłady dwuparametrowe badania cegły na ściskanie: normalny i logarytmiczno-normalny. Dokonując estymacji parametrów metod momentów ustalono, że najbardziej odpowiadającym jest rozkład logarytmiczno-normalny. Na podstawie szacowanych parametrów rozkładu zmiennej losowej f_b otrzymano następujące wartości wytrzymałości średniej cegły $f_{b, mean}$, odchylenia standardowego f_b oraz wytrzymałości charakterystycznej $f_{b, k}$ określonej z 95% prawdopodobieństwem: $f_{b, mean} = 12,2$ MPa, $f_b = 3$ MPa, $f_{b, k} = 8,2$ MPa. Należy podkreślić, że dobranie odpowiedniej funkcji rozkładu prawdopodobieństwa jest oddzielnym zadaniem badawczym, które wymaga odpowiednich testów zgodnie z przeprowadzonymi na ogół w dwóch etapach: stawiania hipotezy na podstawie zebranego materiału, a następnie jej weryfikacji w oddzielnym teście wykorzystującym nowy, niezależny materiał statystyczny.



Rys. 4.4 Histogram oraz rozkłady statystyczne wytrzymałości cegły na ciskanie z wyburzanej kamienicy

W celu określenia wytrzymałości cegły i zaprawy przeprowadzono również badania na innych budynkach o nagannym stanie technicznym. Były Zakłady Celulozowo - Papiernicze wybudowane zostały w latach 1886-1914 (Feldmühle, Papier und Zellstoffwerke Scholwin bei Stettin), zwane później Fabryką Papieru "Szczecin - Skolwin". W latach PRL-u Papiernia Skolwin była jednym z największych producentów papieru w Polsce. W 2007 r. zakład został zamknięty z powodu lat zaniedbań, braku inwestowania w wyeksploatowane i przestarzałe urządzenia oraz infrastrukturę, a także zaległości z kolejnych dekad i rosnącej konkurencji (Rys. 4.5).



Rys. 4.5 Jeden z obiektów byłej Fabryki Papieru "Szczecin - Skolwin"

Z obiektu przedstawionego na Rys. 4.5 do badań wytrzymałościowych pobrano elementy murowe oraz zaprawę (Rys. 4.6).



Rys. 4.6 Materiał z rozbiórki byłej Fabryki Papieru "Szczecin - Skolwin" do bada wytrzymała ciowych cegły i zaprawy

Wyburzane ciany obiektu wykonane były z elementów murowych o wymiarach 250x120x65 mm na zaprawie wapiennej. Cegły pobrane z rozbiórki obiektu (Rys. 4.6) wykorzystano do określenia wytrzymała ci na ciskanie oraz wytrzymała ci na rozciąganie przy zginaniu (dla elementów murowych) według schematów jak na Rys. 4.7, oraz do przeprowadzenia bada z zastosowanie własnych procedur badawczych (dla zaprawy wapiennej), opisanych szerzej w rozdziale 6.

a)



b)



Rys. 4.7 Badanie wytrzymała ci cegły na ciskanie (a) i na rozciąganie poprzez zginanie (b)

Badania cegły rozbiórkowej wykazały redni wytrzymała ci na ciskanie równ 37,8 MPa oraz wytrzymała ci na rozciąganie przy zginaniu równ 5,15 MPa.



Normowym badaniom wytrzymałościowym poddano również partię fabrycznie nowych cegieł ceramicznych pełnych o wymiarach nominalnych 250x120x65 mm dostarczoną przez jednego z wiodących producentów krajowych w branży materiałów budowlanych (Wienerberger Ceramika Budowlana Sp. z o.o.), który deklarował ich znormalizowaną średnią wytrzymałość na ściskanie $f_b=15$ MPa. Na próbkach z dostarczonej partii elementów murowych przeprowadzono badania wytrzymałościowe na ściskanie i uzyskano wartość średnią równą 20,7 MPa oraz badanie wytrzymałościowe na rozciąganie przy zginaniu, gdzie wartość średnia wyniosła 4,2 MPa.

Przebadano również partię cegieł ceramicznych pełnych klinkierowych (od Wienerberger Ceramika Budowlana Sp. z o.o.) o wymiarach 250x120x70 mm oraz 250x120x65 mm. Jak powszechnie wiadomo, cegła klinkierowa charakteryzuje się znacznie większą wytrzymałością na ściskanie od cegły pełnej wypalanej tradycyjnie. Dla przebadanych partii cegieł klinkierowych producent deklarował znormalizowaną średnią wytrzymałość na ściskanie f_b równą 35 MPa, jednakże podczas badań laboratoryjnych średnia wytrzymałość na ściskanie wyniosła około 107 MPa prawie trzykrotnie przekroczyła deklarację producenta. Natomiast wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu wyniosła 14,7 MPa.



Dodatkowo, ze względu na zbyt duże rozbieżności pomiędzy wynikami badań wytrzymałościowych, a deklaracjami producenta zbadano kolejną partię nowej cegły klinkierowej ceramicznej od tego samego producenta. Tym razem były to elementy murowe o deklarowanej wytrzymałości na ściskanie f_b równej 25 MPa. Wyniki badań laboratoryjnych ponownie około trzykrotnie przekroczyły deklarację producenta. Średnia wytrzymałość na ściskanie wyniosła 76,7 MPa, natomiast wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu 8,8 MPa.

Wyniki tych badań przedstawiono w Tablicach 4.2 oraz 4.3.

Tablica 4.2 Podstawowe wyniki bada wytrzymało ciowych partii cegieł pobranych z rozbiórki:
a) kamienicy mieszkalnej, b) zakładu produkcyjnego "Skolwin - Szczecin"

L.p.	Schemat bada	Liczba próbek [szt.]		Wytrzymało rednia [MPa]		Odchylenie standardowe [MPa]		95% przedział ufno ci [MPa]		Współczynnik zmienno ci [%]	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1		30	10	26,9	37,8	4,7	14,7	6,4	26,8	17	39
2		33	10	3,5	5,1	2,0	1,2	2,6	2,1	57	23

Tablica 4.3 Podstawowe wyniki bada wytrzymało ciowych partii fabrycznie nowych cegieł pełnych dostarczonych bezpo rednio od producenta: c) o deklarowanej wytrzymało ci 15 MPa, d) o deklarowanej wytrzymało ci 35 MPa (cegła klinkierowa), e) o deklarowanej wytrzymało ci 25 MPa (cegła klinkierowa)

L.p.	Schemat bada	Liczba próbek [szt.]			Wytrzymało rednia [MPa]			Odchylenie standardowe [MPa]			95% przedział ufno ci [MPa]			Współczynnik zmienno ci [%]		
		c	d	e	c	d	e	c	d	e	c	d	e	c	d	e
1		20	14	15	20,7	107,8	76,7	5,0	22,3	7,8	7,3	35,9	12,3	21	21	10
2		34	15	15	4,2	14,7	8,8	1,6	1,2	1,8	2,0	2,0	2,8	37	8	20

Zakładając rozkład logarytmiczno-normalny wyników badań wytrzymałościowych przeprowadzono ocenę zgodności z tym rozkładem na podstawie testu Kołmogorowa. Założono dwie następujące hipotezy:

- H_0 - rozkład wyników badań jest zgodny z rozkładem logarytmiczno-normalnym,
- H_1 - rozkład wyników badań nie jest zgodny z rozkładem logarytmiczno-normalnym.

Wartość statystyki D odczytano z wykresów wykonanych w programie Statistica, natomiast wartości krytyczne dla testu z tablic matematycznych dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i danej liczby prób n w badaniu. Obszar krytyczny testu jest więc prawostronny $W = \langle D_n; 1 \rangle$. Wnioskowanie jest zatem następujące:

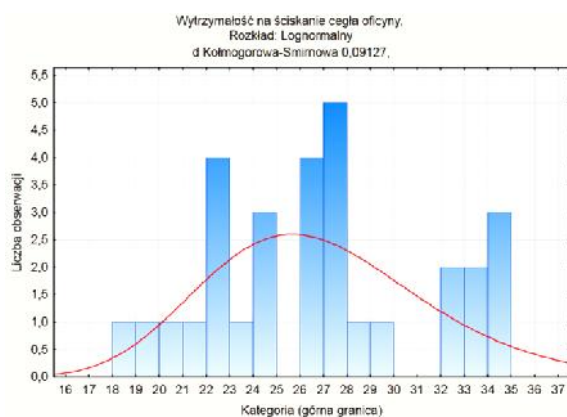
- $D < D_n$ (D nie należy do W) - brak podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 ,
- $D \geq D_n$ (D należy do W) - odrzuca hipotezę H_0 na rzecz hipotezy H_1 .

Wartość statystyki D zaokrąglono do trzech liczb znaczących.

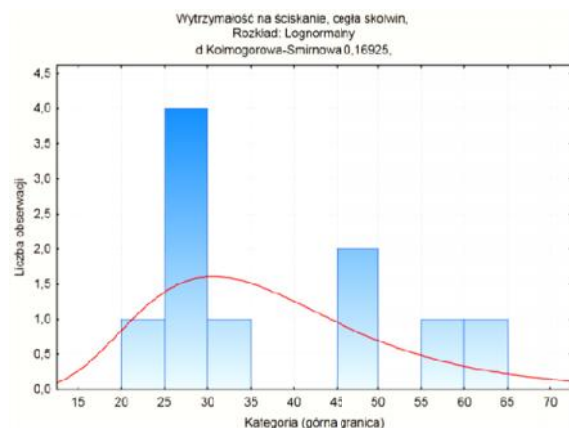
Histogramy rozkładu statystycznego wytrzymałości cegieł pobranej z wyburzanych budynków przytoczono na Rys. 4.8 i Rys. 4.9.

Dla histogramów na Rys. 4.8 wartość statystyki testowej wynosi $D = 0,091$ (a) oraz $D = 0,169$ (b). Wartość krytyczna testu wynosi $D_n(\alpha = 0,05; n = 30) = 0,242$ (a) oraz $D_n(\alpha = 0,05; n = 10) = 0,409$ (b). Ponieważ $D < D_n$, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 zakładającej zgodność rozkładu z rozkładem logarytmiczno-normalnym (przy poziomie istotności równym 0,05).

a)



b)

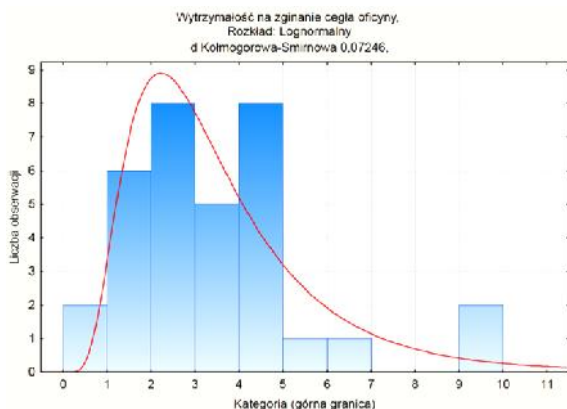


Rys. 4.8 Histogramy i rozkłady statystyczne wyników badań wytrzymałościowych na ciskanie dla cegieł z kamienicy mieszkalnej (a) i zakładu produkcyjnego "Skolwin - Szczecin" (b)

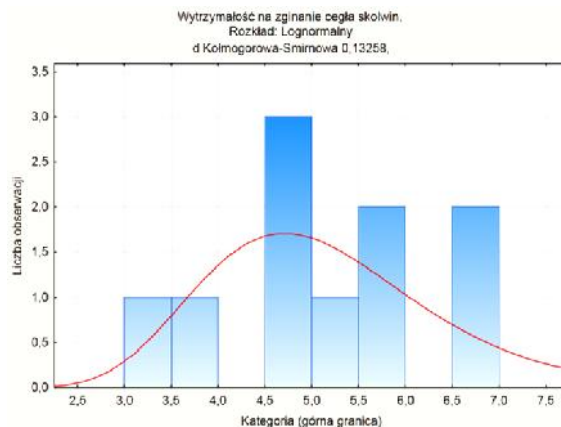
Dla histogramów na Rys. 4.9 wartość statystyki testowej wynosi $D = 0,072$ (a) oraz $D = 0,132$ (b). Wartość krytyczna testu wynosi $D_n(\alpha = 0,05; n = 33) = 0,231$ oraz

$D_n(\alpha=0,05;n=10)=0,409$ (b). Ponieważ $D < D_n$, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 zakładającej zgodność rozkładu z rozkładem logarytmiczno-normalnym (przy poziomie istotności równym 0,05).

a)



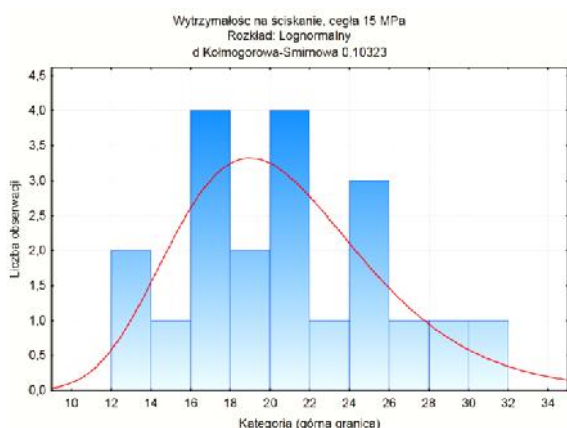
b)



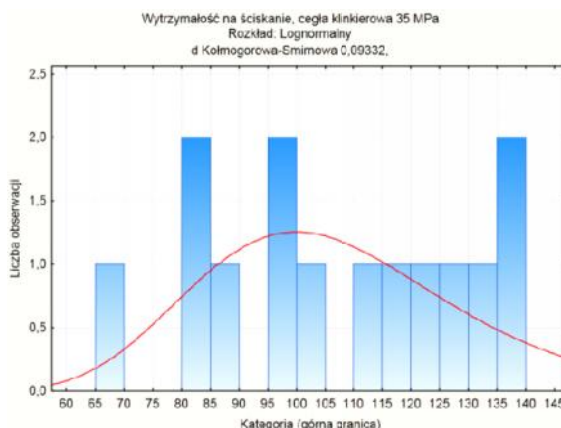
Rys. 4.9 Histogramy i rozkłady statystyczne wyników badań wytrzymałości na zginanie dla cegieł z kamienicy mieszkalnej (a) i zakładu produkcyjnego "Skolwin - Szczecin" (b)

Histogramy rozkładu statystycznego wytrzymałości cegły dostarczonej od producenta przytoczono na Rys. 4.10 i Rys. 4.11. Dla histogramów na Rys. 4.10 wartości testowe wynoszą $D = 0,103$ (a) oraz $D = 0,093$ (b). Wartość krytyczna testu wynosi $D_n(\alpha=0,05;n=20)=0,294$ oraz $D_n(\alpha=0,05;n=14)=0,349$ (b). Ponieważ $D < D_n$, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 zakładającej zgodność rozkładu z rozkładem logarytmiczno-normalnym (przy poziomie istotności równym 0,05).

a)



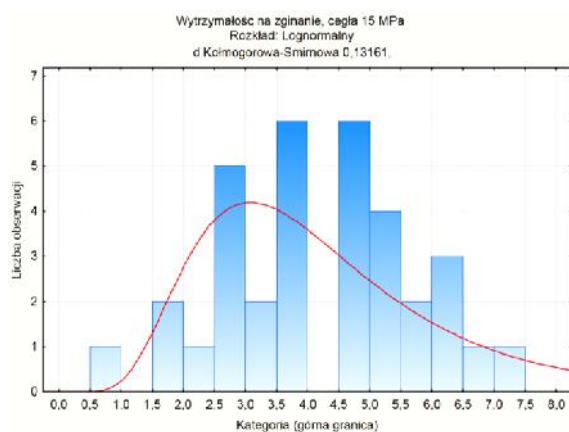
b)



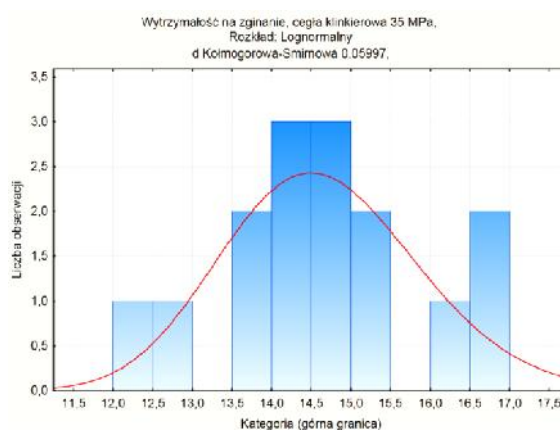
Rys. 4.10 Histogramy i rozkłady statystyczne wyników badań wytrzymałości na ścislenie dla cegieł o deklarowanej wytrzymałości 15 MPa - cegła klinkierowa (a), oraz o deklarowanej wytrzymałości 35 MPa - cegła klinkierowa (b)

Dla histogramów na Rys. 4.11 Wartość statystyki testowej wynosi $D = 0,132$ (a) oraz $D = 0,060$ (b). Wartość krytyczna testu wynosi $D_n(=0,05;n=34)=0,227$, oraz $D_n(=0,05;n=15)=0,338$ (b). Ponieważ $D < D_n$, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 zakładającej zgodność rozkładu z rozkładem logarytmiczno-normalnym (przy poziomie istotności równym 0,05).

a)



b)



Rys. 4.11 Histogramy i rozkłady statystyczne wyników badań wytrzymałości na zginanie dla cegieł o deklarowanej wytrzymałości 15 MPa (a), 35 MPa (b)

Badania cegieł rozbiórkowych wykazały dość wysokie wartości współczynników zmienności. Mogą one wynikać m.in. ze stosowanego w przeszłości sposobu wypału elementów ceramicznych (tzw. stopień wypału) i związanej z nim wytrzymałości elementu, która była ściśle uzależniona od lokalizacji w piecu. Wpływ na rozrzuty wytrzymałości miał również zastosowany stopień degradacji cegieł.

Z porównania wyników badań cegły pobranej z użytkowanych budynków oraz nowo wyprodukowanej cegły można wyciągnąć następujące wnioski (Tablica 4.2 oraz Tablica 4.3):

- współczynniki zmienności dla wytrzymałości na ściskanie dla starej i nowej cegły praktycznie nie różnią się między sobą,
- współczynniki zmienności wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu dla starej cegły są większe niż dla cegły nowej,
- im większa wytrzymałość cegły przy zginaniu, tym mniejsze są współczynniki zmienności,
- wytrzymałość na zginanie starej cegły wynosi średnio 13% jej wytrzymałości na ściskanie, natomiast dla nowej cegły około 16%.

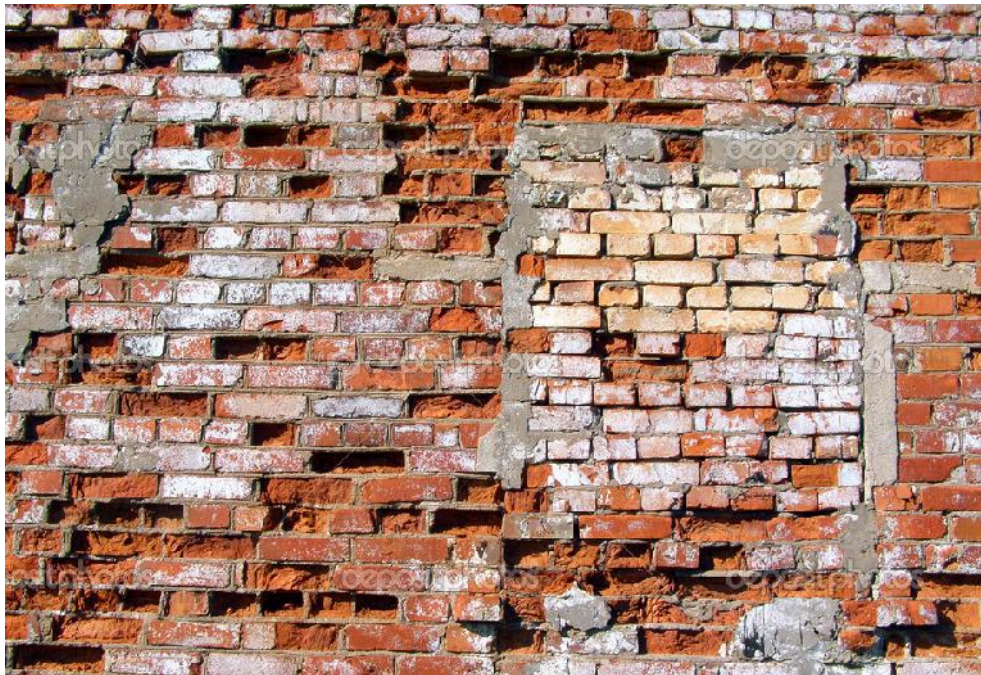
4.3. Badania sklerometryczne

Sklerometria, czyli próba twardości należy do powszechnych sposobów kontroli jakości betonu. Twardość jest to odporność materiału na odkształcenia spowodowane siłami skupionymi, dlatego metody dzieli się w zależności od sposobu wywołania nacisku na metody statyczne i dynamiczne oraz w zależności od sposobu pomiaru odkształceń trwałych na metodę odcisku i odskoku. W metodach odcisku najczęściej stosowane były przyrządy zwane ulepszonymi młotkami Poldiego oraz HPS, a w metodach sklerometrycznych wykorzystujących wielkość odskoku najczęściej wykorzystuje się sklerometry Schmidta [15]. Jak wykazały badania przedstawione w pracy [10] istnieje wiele czynników wpływających na wzajemne korelacyjne między wytrzymałością betonu, a liczbą odbicia. Do najważniejszych czynników mających wpływ na ostateczny wynik zaliczyć można: wilgotność betonu, wiek betonu, nagrzewanie, naprężenia w betonie, konsystencję mieszanki betonowej podczas betonowania a także domieszki chemiczne. Jednak pomimo wielu czynników wpływających na liczbę odbicia w literaturze istnieje wiele krzywych korelacji pozwalających na oszacowanie wytrzymałości betonu *in situ*.

Należy również pamiętać, iż zgodnie z normą [130] metoda sklerometryczna nie stanowi alternatywy dla oznaczania wytrzymałości na próbkach rdzeniowych, ale pozwala jedynie oszacować wytrzymałość, a ponadto może być wykorzystana do oceny jednorodności materiału w większym obszarze konstrukcji i może potwierdzić stopień reprezentatywności miejsc, z których pobrane zostały odwierty. Również w samym urządzeniu (klasycznym młotku Schmidta) wynik w postaci liczby odbicia obarczony jest dużym błędem wynikającym z tarcia mechanizmów wewnętrznych przyrządu [15]. Wprawdzie w normie [131] podjęto próbę normalizacji procedury skalowania liczby odbicia i wytrzymałości na ścisnienie, jednak niezależnie od tego, czy jest to metoda dokładna czy uproszczona, wymaga ona dysponowania parami wyników badań wytrzymałościowych próbek i pomiarów liczby odbicia.

Szacowanie wytrzymałości konstrukcji po przeprowadzeniu badań jedynie metodą sklerometryczną sklerometrem typu *N*, może być obarczone bardzo dużym błędem. Nawet w przypadku elementów betonowych, już sama interpretacja parametrów takich jak np. wiek betonu czy temperatura wilgotności ma wpływ na ostateczny wynik. W literaturze dostępnych jest wiele krzywych korelacji, których ogólny charakter jest zbliżony, jednak różnice między innymi jest doświadczenia i nie pozwala na ustalenie jednej, ogólnej krzywej [15]. Ostateczny wynik może się znacznie różnić, w przypadku wykonywania analizy liczby odbicia przez inną osobę (i doboru odpowiednich parametrów) oraz przy użyciu innych krzywych korelacji.

W przypadku ceramicznych elementów murowych zastosowanie metody sklerometrycznej jest ograniczone do elementów murowych pełnych lub z otworami, których objętość nie przekracza 10% objętości elementu. W przypadku elementów drewnianych o większej zawartości otworów energia uderzenia jest tłumiona w stopniu uniemożliwiającym poprawną ocenę wytrzymałości. Dotyczy to zwłaszcza pustaków ceramicznych. Ponadto na wyniki badania wpływ ma wilgotność cegły oraz stopień degradacji jej powierzchni bocznych pod wpływem oddziaływania środowiska (Rys. 4.12), rodzaj zaprawy w murze, a także sposób badania (rejestracja liczby odbicia dla elementów ceramicznych w murze lub na próbkach w maszynie wytrzymałościowej).

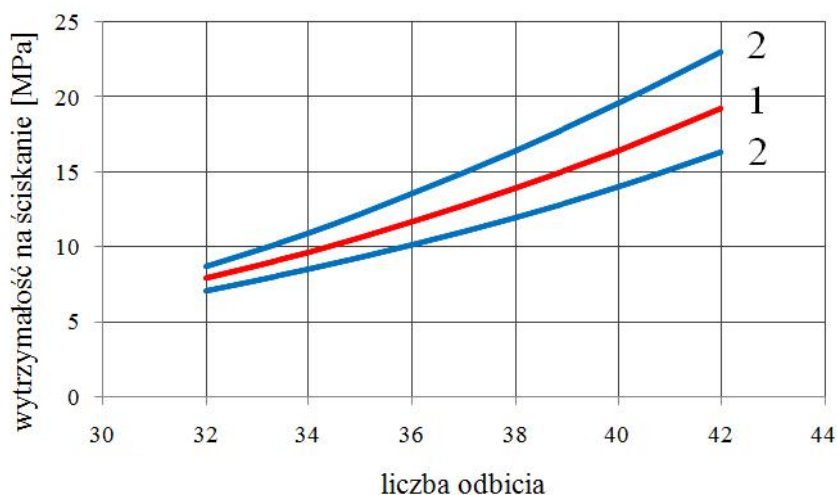


Rys. 4.12 Przykład degradacji powierzchni muru ceglanego

Badania cegieł ceramicznych pełnych z wykorzystaniem sklerometru przedstawiono w pracy [66] już w roku 1997. Zostały one wykonane na elementach murowych ówczesnie nie produkowanych i ogólnie dostępnych. Autorzy podczas przygotowywania próbek, przestrzegali wytycznych obowiązujących wówczas normy [120], nakazujących sklejenie dwóch połówki cegieł zaprawą, a sam pomiar liczby odbicia odbywał się dopiero po wstąpieniu obciążonej próbki. Po wykonaniu pomiaru liczby odbicia zwiększano obciążenie, aż do ostatecznego zniszczenia próbki.

W pracy [66] zaprezentowano zależności pomiędzy liczbą odbicia, a wytrzymałością na ściskanie cegły ceramicznej. Krzywa przedstawiona na Rys. 4.13 (linia 1) została wyznaczona z zależności opisanej wzorem (4.2):

$$f_B(R) = 0,031R^2 - 1,164R + 13,418 \quad (4.2)$$

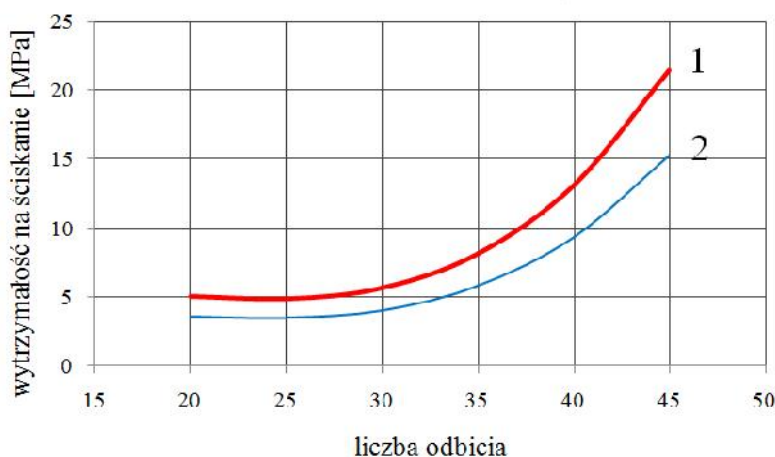


Rys. 4.13 Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie cegły ceramicznej, a liczbą odbicia uzyskaną przy użyciu sklerometru typu N według [66]

W celu oszacowania wytrzymałości na ściskanie oszacowano na poziomie 34% (linie 2), jednak należy pamiętać, że wzrasta on znacznie wraz ze wzrostem liczby odbicia odczytanej na sklerometrze. Badania z wykorzystaniem sklerometru typu N opisano również w pracy [90], w odniesieniu do wytrzymałości cegieł XIX-wiecznych. Wytrzymałość elementów murowych określono zgodnie z normą [115]. Zależność pomiędzy liczbą odbicia, a wytrzymałością cegły na ściskanie opisano funkcją 3-stopnia (Rys. 4.14):

$$f_B(R) = 0,00103R^3 - 0,058R^2 + R \quad (4.3)$$

i przedstawiono na Rys. 4.14 linią 1.




Rys. 4.14 Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie cegły ceramicznej, a liczbą odbicia uzyskaną przy użyciu sklerometru typu N według [90]

Autor pracy [90] zaproponował korektę otrzymanych wyników o prawie 30% (linia 2 na Rys. 4.14) aby zwi kszy poziom ufno ci. Dzi ki temu wszystkie otrzymane wyniki spełniają zaproponowan zale no . Takie "bezpieczne" podej cie do interpretacji wyników jest powszechnie znane i stosowane w przypadku, gdy jest zbyt małe prawdopodobie stwo wyznaczenia krzywej bazowej.

Bior c pod uwag stopie mo liwo zdegradowania warstw licowych elementów murowych pobranych z istniej cych konstrukcji murowych autor niniejszej rozprawy wykonał badania porównawcze, maj ce na celu okre lenie liczby odbicia w zale no ci od badanej płaszczyzny elementów murowych. Wykonano badania sklerometryczne na powierzchni wozówkowej, główkowej oraz podstawie cegieł.

Do bada sklerometrycznych przygotowano dwie partie cegieł ceramicznych pełnych o wymiarach 250x120x65 mm. Pierwsza partia pochodziła ze cian zewn trznych jednej z kamienic w Szczecinie (Rys. 4.1). Jej wytrzymało na ciskanie wynosiła 26,9 MPa (Tablica 4.2). Drug parti cegieł dostarczono od producenta, który deklarował ich znormalizowan redni wytrzymało na ciskanie $f_b=15$ MPa (w rzeczywisto ci, zgodnie z danymi, które przedstawia Tablica 4.3 wytrzymało wynosiła 20,7 MPa). Pomiary sklerometryczne cegły wykonywane były przy prostopadłym poło eniu młotka Schmidta do badanej powierzchni, przy poziomym poło eniu przyrz du, w celu unikni cia stosowania współczynników poprawkowych. Wyniki bada sklerometrycznych przedstawia Tablica 4.4.

Tablica 4.4 Wyniki własnych sklerometrycznych bada młotkiem Schmidta cegieł z wyburzanej kamienicy (a) i zakładu ceramicznego (b) w zale no ci od badanej powierzchni

L.p.	Badana płaszczyzna	Liczba próbek [szt.]		rednia liczba odbicia [L]		Odchylenie standardowe [L]		95% przedział ufno ci [L]		Współczynnik zmienno ci [%]	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1		22	22	24	48	6,1	5,1	8,8	7,3	25	11
2		22	22	22	49	6,0	6,2	8,5	8,9	27	13
3		40	58	23	24	4,6	5,4	5,9	6,6	20	23

Zgodnie z norm [119] przy założeniu 5% poziomu ufności i wartości współczynnika zmienności $v=25\%$ minimalna liczba punktów pomiarowych dla betonu powinna wynosić $n=12$, a dla $v=10\%$ powinna wynosić $n=6$. W obowiązującej normie [130] nie jest określona liczba miejsc pomiarowych. Norma podaje jedynie liczbę pomiarów w jednym miejscu pomiarowym. Powinna ona wynosić $n=9$. Ze względu na dużą zmienność elementów ceramicznych od konstrukcji betonowych, chcąc jak najdokładniej oszacować liczbę odbicia w badaniach każdy pomiar wykonywano na podstawie zmniejszonej liczby uderzeń.

Dla wyników liczby odbicia najbardziej odpowiedni jest rozkład logarytmiczno-normalny, czasami do celów praktycznych przyjmuje się, że wyniki badań sklerometrycznych są rozkładami normalnymi symetrycznymi [15], (co potwierdził również analiza wykresu przedstawionego na Rys. 4.15) scharakteryzowanymi przez:

$$L_{mv} = \frac{\sum_{j=1}^n L_{mvi}}{n_j} \quad (4.4)$$

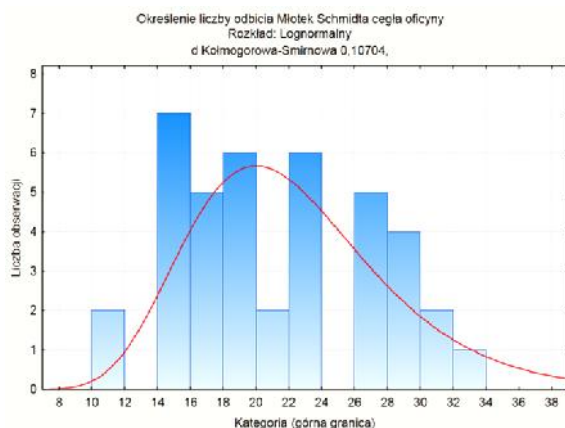
gdzie:

L_{mv} – wartość średnia odczytu liczby odbicia w konstrukcji,

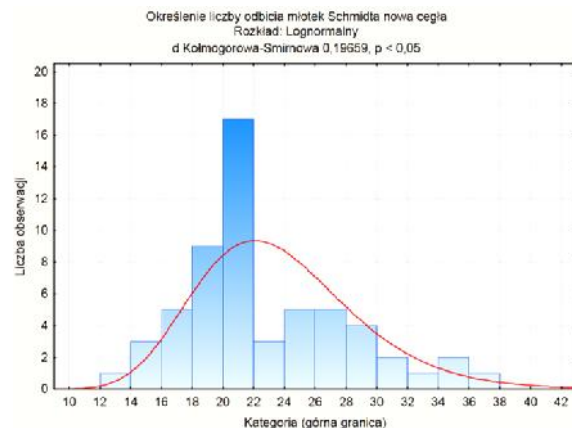
n_j – liczba j -tych punktów pomiarowych.

Należy zwrócić uwagę, że rozrzut wyników badań liczby odbicia jest bardzo duży, co potwierdza również autor pracy [57].

a)



b)



Rys. 4.15 Histogramy i rozkłady statystyczne wyników badań liczby odbicia młotkiem Schmidta dla cegieł z kamienicy mieszkalnej (a) o wytrzymałości na ciśnienie 26,9 MPa, oraz dla cegieł z zakładu ceramicznego o wytrzymałości na ciśnienie 20,7 MPa.

Dla histogramów na Rys. 4.15 wartość statystyki testowej wynosi $D = 0,107$ i $D = 0,197$. Wartość krytyczna testu wynosi $D_n(=0,05;n=40)=0,210$ i $D_n(=0,05;n=58)=0,175$. Ponieważ dla wyników liczby odbicia dla nowej cegły z zakładu ceramicznego $D > D_n$ zatem, istnieje podstawa do odrzucenia hipotezy H_0 zakładającej zgodność rozkładu z rozkładem logarytmiczno-normalnym (przy poziomie istotności równym 0,05). Rozkład dla badanej liczby odbicia dla cegieł z zakładu ceramicznego nie jest rozkładem logarytmiczno-normalnym.

Zestawienie krytycznych wartości statystycznych dla cegły pobranej z wyburzanej kamienicy prezentuje Tablica 4.5.

Tablica 4.5 Zestawienie krytycznych wartości statystycznych dla dopasowania rozkładów logarytmiczno-normalnych dla wszystkich przebadanych płaszczyzn dwóch partii cegieł

L.p.	Płaszczyzna badania	Cegła	n	D	D_n	Cegła	n	D	D_n
1	główka	pobrana z wyburzanej kamienicy	22	0,159	0,281	z zakładu ceramicznego	22	0,105	0,281
2	wozówka		22	0,158	0,281		22	0,165	0,281
3	podstawa		40	0,111	0,210		58	0,171	0,175

Ponieważ dla wszystkich przeprowadzonych badań cegły $D < D_n$, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 zakładającej zgodność rozkładu z rozkładem logarytmiczno-normalnym (przy poziomie istotności równym 0,05).

Z analizy danych, które prezentuje Tablica 4.4 wynika, że liczby odbicia dla cegieł uytkowanych ok. 100 lat są znacznie mniejsze niż dla cegieł nowoczesnych z zakładu produkcyjnego o prawie jednakowej wytrzymałości. Warto nadmienić, że wymienione sklerometryczne badania przeprowadzono na pojedynczych cegłach swobodnie usytuowanych na posadzce betonowej. Zupełnie inne wyniki uzyskano podczas badania cegieł z kamienicy, lecz znajdujących się w murze (Rys. 4.16). W tym przypadku liczba odbicia (średnio 46) była o ok. 2 razy większa w porównaniu do danych, które przedstawia Tablica 4.4. Jest to związane z tym, że energia uderzenia młotka Schmidta o cegłę znajdującą się w murze jest mniej tłumiona niż o cegłę nieutwardzoną. W przypadku tym, relacje między wytrzymałością cegły na ciskanie, a liczbą odbicia różni się od zależności przytoczonych na Rys. 4.13 i Rys. 4.14.



Rys. 4.16 Badanie wytrzymałości na zgniecenie za pomocą młotka Schmidta

Z porównania wyników przeprowadzonych przez autora niniejszej rozprawy badań sklerometrycznych dla dwóch partii cegły na wysnuwane wnioski:

- badania cegły w murze wykazują większe liczby cegieł w stanie niezamocowanym,
- współczynniki zmienności dla cegły rozbiórkowej, niż dla cegły z zakładu ceramicznego,
- badanie przeprowadzone dla płaszczyzn główkowych i wozówkowych cegieł praktycznie nie różni się.

Warto nadmienić, że wyniki badań sklerometrycznych bez wspomagających, prowadzonych równolegle do niszczenia cegły mogą być mało miarodajne [56], a wyciąganie wniosków dotyczących wytrzymałości na ściskanie po przeprowadzeniu badań jedynie metodami sklerometrycznymi, za pomocą młotka Schmidta, może być obarczone bardzo dużym błędem.

W związku z powyższym zdaniem autora niniejszej rozprawy praktyczne zastosowanie metody sklerometrycznej może być jedynie pomocnicze przy oszacowaniu jednorodności cegieł w murze na podstawie współczynników zmienności liczby odbicia.

4.4. Badania odwiertów walcowych

W przypadku konstrukcji betonowych, prowadzących diagnostykę istniejących obiektów jedyną z podstawowych wielkości jest wytrzymałość na ściskanie. Najbardziej wiarygodnym źródłem informacji na jej temat jest zbadanie odwiertów rdzeniowych [61], [62]. Wprawdzie pobrane z konstrukcji rdzenie nie mogą zastąpić próbek normowych wykonanych zgodnie z [123], jednak są dopuszczone, gdy istnieje przypuszczenie, iż otrzymane wyniki badań wytrzymałości są niereprezentatywne. Zgodnie z zapisami normy [131] wytrzymałość konstrukcji betonowych na podstawie badań odwiertów rdzeniowych należy określać w związku z:

- modernizacji i zmian warunków użytkowania konstrukcji,
- ocen bezpieczeństwa konstrukcji w związku z błędami wykonawczymi,
- ocen wytrzymałości na ściskanie podczas wznoszenia konstrukcji,
- ocen bezpieczeństwa konstrukcji, gdy niespełnione są kryteria zgodności wytrzymałości na ściskanie, w odniesieniu do próbek normowych.

Badania próbek rdzeniowych pobranych z cegły w istniejących murach jak na razie nie są powszechnie stosowane. W przypadku pobierania próbek z konstrukcji murowych, wybór miejsca ich wykonania należy poprzedzić szczegółowymi jej oględzinami, aby próbki do badań były jak najbardziej reprezentatywne, jednocześnie pamiętać o tym, aby nie spowodować osłabienia konstrukcji. Probki powinny być pobierane za pomocą wiertnicy wyposażonej w wiertło koronkowe, zamocowanej w sposób trwały, uniemożliwiający jej przemieszczenie się podczas wiercenia, co mogłoby mieć wpływ na ostateczny kształt pobranej próbki rdzeniowej (Rys. 4.17). Mogłoby powstać niedopuszczalne odchyłki od przekroju rdzenia, lub mikropęknięcia, co mogłoby mieć znaczny wpływ na ostateczny wynik badania.



Rys. 4.17 Pobieranie odwiertu rdzeniowego z konstrukcji murowej [134]

Po prawidłowym odwiercieniu próbek rdzeniowych, należy je poddać wstępnym oglądzinom, aby stwierdzić ewentualne nieprawidłowości, po czym trwale opisać i zarchiwizować. Do badań wytrzymałościowych próbki należy oczyścić za pomocą piły mechanicznej do odpowiedniej długości, a czoła oszlifować lub wypełnić odpowiednimi zaprawami (Rys. 4.18).

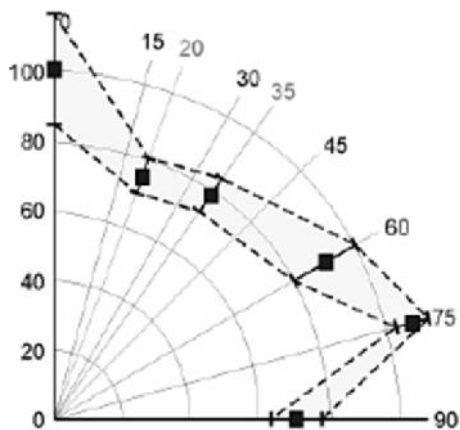


Rys. 4.18 Badanie wytrzymałości na ściskanie próbek walcowych

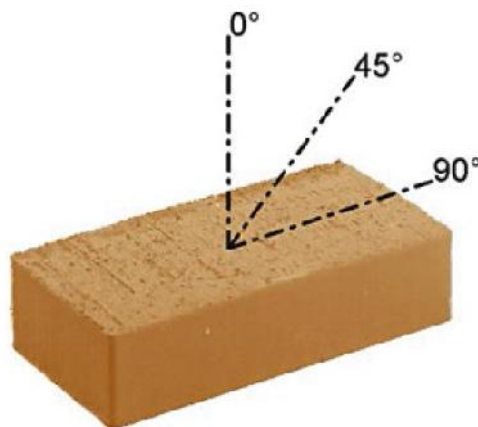
Trzeba jednak pamiętać, że z uwagi na anizotropię technologiczną cegły wytrzymałości na ściskanie walców wyciętych z cegieł w płaszczyznach wozówkowych, główkowych i wspornych mogą różnić się znacząco [52]. W przypadku cegieł historycznych formowanych ręcznie, wytrzymałość na ściskanie w kierunku prostopadłym do płaszczyzn wspornych (czyli zgodnie z kierunkiem działania obciążenia ciskającego cegły w murze) jest zawsze mniejsza od wytrzymałości w płaszczyznach wozówkowych i główkowych, natomiast w przypadku cegieł produkowanych współcześnie nie uzyskano odwrotnego [56]. Zatem chcąc realistycznie ocenić wytrzymałość elementów murowych badanych w płaszczyźnie innej niż zgodna z kierunkiem obciążenia budynków, należałoby określić odpowiednie zależności pomiędzy wynikami otrzymanymi podczas badań próbek wyciętych w różnych płaszczyznach.

Zgodnie z zaleceniami zawartymi w pracy [88] wycinano próbki walcowe o średnicy 52 mm pod różnym kątem do płaszczyzny podstawy cegły. Przebadano cegły pełne o wymiarach 290x150x65 mm pobranych z budynków wznoszonych w XIX wieku poddanych rozbiórce. Na Rys. 4.19 przedstawiono zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie odwiertów rdzeniowych, a kątem ich pobierania.

a)



b)

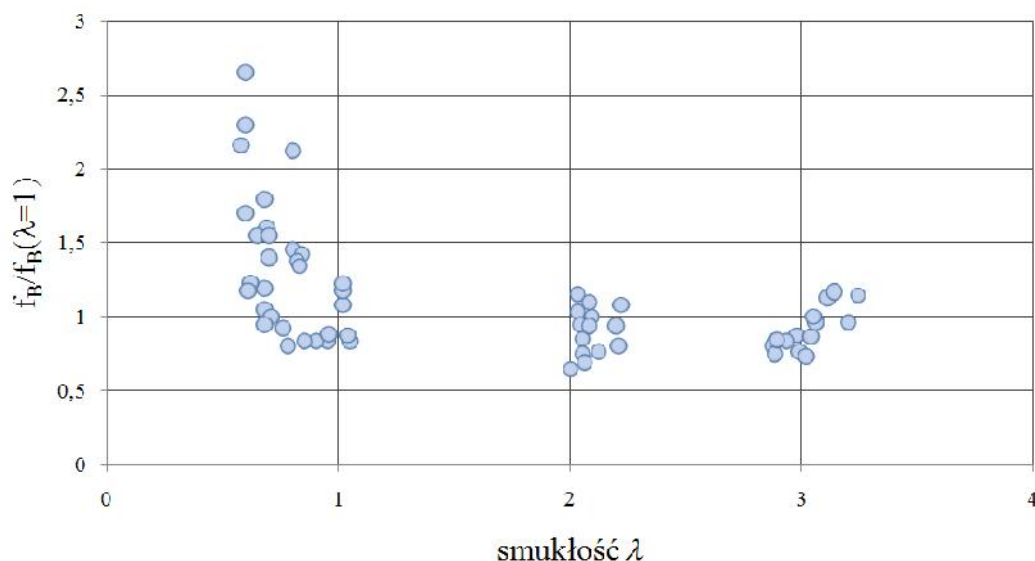


Rys. 4.19 Zależność wytrzymałości na ściskanie (a) od kąta pobierania rdzeniów (b) [88]

Analiza danych przedstawionych na Rys. 4.19 wykazała, że wytrzymałość na ściskanie próbek rdzeniowych w dużym stopniu jest uzależniona od kąta ich pobierania z konstrukcji.

Według [43] współczynnik przeliczający wytrzymałość odwiertu walcowego o średnicy 50 mm do wytrzymałości cegły f_b szacuje się na ok. 0,9, a dokładności oceny wartości f_b do 15%.

Dla próbek o smukłości rdzenia poniżej 1,0 wynik badania ze względu na znaczny wpływ tarcia pomiędzy płytami maszyny wytrzymałościowej, a powierzchni próbki może być obciążony zbyt dużym błędem [84]. Zależność pomiędzy smukłością próbki, a maksymalnymi naprężeniami ciskającymi przedstawiono w pracy [21] badając rdzenie wycięte z cegieł wyprodukowanych do końca XX wieku (Rys. 4.20).



Rys. 4.20 Wpływ smukłości próbki rdzeniowej pobranej z cegły na wartość naprężenia niszczy [21]

Analizując dane przedstawione na Rys. 4.20 zauważyć można niewielkie zmiany wytrzymałości dla próbek o smukłości większej od 1,0. Na podstawie wzoru (4.20) i aproksymacji wyników badań [21] można stwierdzić, że wytrzymałość na ściskanie próbek o smukłości równej 2,0 stanowi niecałe 90% wytrzymałości próbek o smukłości równej 1,0, co daje dużo mniejszą wartość w porównaniu do wyników otrzymywanych podczas badań próbek betonowych. W pracy [106] autor proponuje określić wytrzymałość na ściskanie cegieł na odwiertach rdzeniowych o smukłości około 1,5. Można to jednak skomplikować przy pobraniu próbki, ponieważ sam format cegły mocno ją ogranicza. Chcąc pobrać próbki rdzeniowe o większej długości, należy pamiętać, że ścianki zewnętrzne bardzo często są mocno zdegradowane i nie dają obiektywnych wyników wytrzymałości. W związku z powyższym autor niniejszej rozprawy wykonał badania na próbkach o współczynniku proporcji równym 1,00 i wymiarach $w=h=50$ mm. Badaniom laboratoryjnym własnym poddano dwie partie cegieł ceramicznych pełnych o wymiarach nominalnych 250x120x65 mm. Kształt i wymiary rdzeni oraz format elementów murowych pozwoliły na pobranie trzech próbek z jednej cegły (Rys. 4.21).



Rys. 4.21 Elementy murowe podczas pobierania rdzeni do badań wytrzymałościowych

Następnie próbki docięto do odpowiednich proporcji. Tak docięte rdzenie poddano obróbce mechanicznej, tj. obie płaszczyzny zostały przeszlifowane tak, aby powierzchnie docisku pasowały do tłoka maszyny wytrzymałościowej. Widok wybranych próbek walcowych przygotowanych do badań wytrzymałości na ściskanie przedstawia Rys. 4.22. Jedną z tych partii stanowiły cegły pobrane z wyburzanej kamienicy (Rys. 4.1), o średniej wytrzymałości na ściskanie $f_b=26,9$ MPa. Natomiast druga partia cegieł o średniej wytrzymałości na ściskanie $f_b=76,7$ MPa była dostarczona z zakładu ceramicznego.

a)



b)



Rys. 4.22 Wyci te próbki rdzeniowe z cegły do bada wytrzymało ci na ciskanie:
a) z wyburzanej kamienicy, b) z zakładu ceramicznego

W odniesieniu do obu partii cegieł wykonano równie badania wytrzymało ci na ciskanie na próbkach walcowych o rednicy równej wysoko ci 50 mm, wyci tych z cegieł w płaszczyznach wspornych i główkowych (zgodnie ze schematami, które prezentuje Tablica 4.6). Po wykonanych badaniach próbki poddano ogl dzinom i zaobserwowano dwa podstawowe mechanizmy zniszczenia. Cze próbek niszczyła si w sposób sto kowy analogicznie do próbek betonu badanych na ciskanie (Rys. 4.23a), natomiast pozostała cz poprzez rozłupywanie w kierunku działania siły ciskaj cej (Rys. 4.23b).

a)



b)



Rys. 4.23 Podstawowe mechanizmy zniszczenia próbek rdzeniowych przy ciskaniu

Wytrzymałość na ściskanie ka dej z próbek obliczono ze wzoru

$$f_i = \frac{F_i}{A_i} \quad (4.5)$$

gdzie:

f_i – wytrzymałość na ściskanie i-tej próbki,

F_i – maksymalne obciążenie przy zniszczeniu i-tej próbki,

A_i – pole przekroju poprzecznego i-tej próbki, na które działa siła ściskająca, obliczone na podstawie pomiarów próbki.

Następnie obliczono wytrzymałość średnią oraz odchylenie standardowe z poniższych wzorów:

$$f_{m(n)i} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n} \quad (4.6)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{m(n)i})^2} \quad (4.7)$$

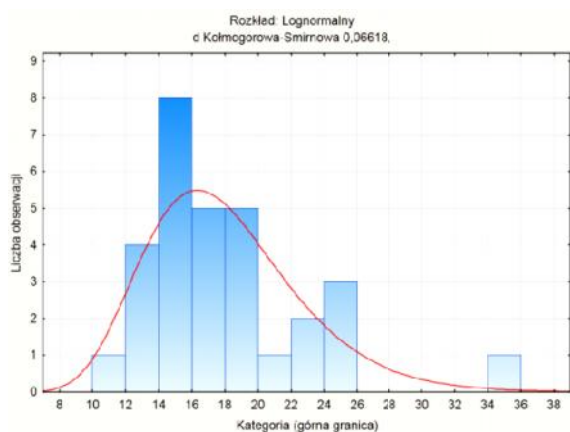
oraz współczynnik zmienności ze wzoru:

$$w_z = \frac{S}{f_{m(n)i}} \cdot 100\% \quad (4.8)$$

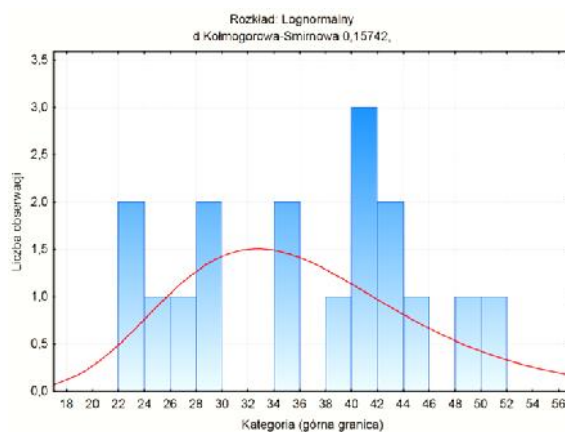
Stwierdzono, że współczynniki zmienności przyjmują zdecydowanie większe wartości w przypadku badań cegieł z wyburzonej kamienicy. Wynika to przede wszystkim ze stosowanej w przeszłości technologii produkcji cegieł. Na właściwości mechaniczne cegły maszynowej miał również wpływ sposób przygotowania surowca do wypału oraz sposób jego formowania pod ciśnieniem. Wypalanie cegieł odbywało się w piecach kręgowych lub tunelowych w temperaturze do 1100°C, a ich konstrukcja determinowała jakość wypalanego materiału. Wpływ na rozrzut uzyskanych wyników wytrzymałości ma również zrośnięty stopień uszkodzeń korozyjnych cegły w murze.

Histogramy i rozkłady statystyczne wyników badań wytrzymałościowych próbek przedstawiono na Rys. 4.24.

a)



b)



Rys. 4.24 Histogramy i rozkłady statystyczne wyników bada wytrzymało ci na ciskanie rdzeni wyci tych z podstawy dla cegieł z kamienicy mieszkalnej (a) oraz zakładu ceramicznego (b)




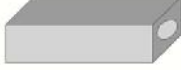
Dla histogramów na Rys. 4.24 warto statystyki testowej wynosi $D = 0,066$ (a) oraz $D = 0,157$ (b). Warto krytyczna testu wynosi $D_n(=0,05;n=30)=0,242$ (a) oraz $D_n(=0,05;n=17)=0,318$. Poniewa $D < D_n$, wi c nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 zakładaj cej zgodno rozkładu z rozkładem logarytmiczno-normalnym (przy poziomie istotno ci równym 0,05).

Podobne histogramy uzyskano dla próbek wyci tych z wozówkowych i główkowych płaszczyzn cegły. Zbiorowe wyniki bada wytrzymało ci próbek walcowych przedstawia Tablica 4.6. Porównuj c wytrzymało ci próbek pobieranych zgodnie ze schematami 1, 2 i 3 mo na stwierdzi zale no ich warto ci od k ta pobierania odwiertów podobnie jak na Rys. 4.19. Najbardziej reprezentatywne z punktu widzenia oszacowania wytrzymało ci cegły na ciskanie powinny by badania próbek pobranych w kierunku prostopadłym do podstawy cegły (schemat 1). Wynika to z faktu, e tak pobrane próbki podczas bada laboratoryjnych ciskane s w tym samym kierunku, co cegła pracuj ca w murze. W praktyce odwierty rdzeniowe pobierane s jednak prostopadle do płaszczyzny wozówkowej lub główkowej cegły (Rys. 4.17). Analiza danych przedstawionych w Tablicy 4.6 wykazała, e wytrzymało ci na ciskanie tak pobranych próbek (schematy 2 i 3) mog znac co ró ni si od wytrzymało ci próbek pobieranych w kierunku prostopadłym do podstawy cegły. Ponadto w przypadku tym, wytrzymało cegły na ciskanie mo e by przeszacowana.

Z analizy danych, które prezentuje Tablica 4.6 wynika równie , e współczynniki zmienno ci dla próbek rdzeniowych pobranych z cegieł wyburzanej kamienicy s znacznie wi ksze, ni z nowych cegieł dostarczonych z zakładu wyrobów ceramicznych. Warto nadmieni równie , i w przypadku bada tych samych cegieł na ciskanie według norm [122] oraz [125] ró nice te były mniejsze (Tablica 4.2 oraz Tablica 4.3). Zwi zane jest to prawdopodobnie z efektem skali, gdy małe walcowe próbki wykazuj mniejsz

wytrzymało , ni cała cegła. Potwierdzeniem tego s warto ci, które prezentuje Tablica 4.6 dla współczynników k_b wyznaczanych jako iloraz wytrzymało ci na ciskanie f_b^* próbek walcowych do wytrzymało ci cegły f_b . Mniejsze warto ci k_b dla cegły z zakładu ceramicznego prawdopodobnie wynikały z faktu, i cegła ta była bardziej niejednorodna z uwagi na jej nierównomierne wypalenie (Rys. 4.22)

Tablica 4.6 Podstawowe wyniki bada próbek walcowych cegieł pobranych z wyburzonej kamienicy (a) i dostarczonych z zakładu wyrobów ceramicznych (b)

L.p.	Schemat pobierania próbek		Liczba próbek [szt.]		Wytrzymało rednia f_b^* [MPa]		Odchylenie standardowe [MPa]		Współczynnik zmienno ci [%]		$k_b = \frac{f_b^*}{f_b}$	
			a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1			30	17	18,1	36,3	5,1	9,1	28	25	0,67	0,47
2			30	27	20,6	22,4	7,5	4,1	36	18	0,77	0,29
3			33	14	17,4	26,9	7,4	5,9	42	22	0,65	0,35

5. METODY BADA WYTRZYMAŁO CI ZAPRAWY

5.1. Uwagi ogólne

W przypadku budynków wznoszonych od czasów starożytnych, a do drugiej połowy XX wieku najpopularniejszym rodzajem spoiwa była zaprawa wapienna, a nawet gliniana. Próbowano poprawiać jej urabialność oraz wytrzymałość poprzez dodawanie rozmaitych dodatków. Jak wiadomo zaprawy wapienne charakteryzują się powolnym i długotrwałym przyrostem wytrzymałości, co może skutkować wielokrotnie większą wytrzymałością po kilku, czy kilkunastu latach od wytrzymałości z okresie powstawania konstrukcji murowej. Jak na razie brak uniwersalnych i precyzyjnych metod, co do określenia ich cech fizycznych i mechanicznych. W murze zaprawy podlegają różnicowanym procesom i oddziaływaniom podczas użytkowania konstrukcji. Przy odpowiednio korzystnych warunkach z czasem zaobserwować można nawet wzrost wytrzymałości zapraw [26]. Jak na razie brak uniwersalnych i precyzyjnych metod, co do określenia ich cech fizycznych i mechanicznych. Kluczową sprawą jest reprezentatywność badań zaprawy. Zagadnienie szacowania wytrzymałości zaprawy ze starych murów jest dotychczas trudnym i nie w pełni rozwiniętym. Należy brać pod uwagę wiele czynników wpływających na wytrzymałość zaprawy np. jej zwietrzenie, degradację, czyli „nabyte” w okresie wieloletniej eksploatacji. Należy również pamiętać, że zaprawy w zabytkowych murach znacznie różniły się składem od zapraw stosowanych współcześnie. Oznacza to, że ekspert (rzeczoznawca) lub projektant poza znajomością metod badań zaprawy powinien posiadać właściwą wiedzę i doświadczenie w zakresie zachowania się starych konstrukcji murowych.

Pobranie próbek zaprawy z muru, które mogłyby być poddane badaniu wytrzymałości na ściskanie jest bardzo uciążliwe. Aktualna polska norma [127], według której określana jest wytrzymałość na ściskanie zapraw jest analogiczna do normy europejskiej i nakazuje określać wytrzymałość na ściskanie na próbkach w kształcie połówek beleczek o wymiarach 40x40x160 mm, uzyskanych podczas badania wytrzymałości na zginanie przy trzypunktowym obciążeniu zgodnie z Rys. 5.1.

Autor niniejszej rozprawy poddał badaniom zgodnie z normą [127] pięć serii zapraw o różnych deklarowanych przez producenta wytrzymałościach na ściskanie. Wszystkie przebadane zaprawy pochodziły z firmy Quick-mix. Pierwsza seria to zaprawa murarska VM01 o wytrzymałości M5, druga to zaprawa murarska M7, trzecia to historyczna wapienna

zaprawa murarska NHL 2 (M2,5), kolejna to zaprawa cementowa Z01 (M10), ostatnia to zaprawa murarsko - tynkarska K01 (M2,5).

a)



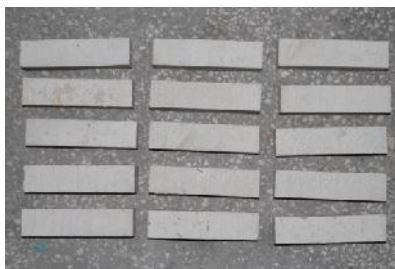
b)



Rys. 5.1 Badanie wytrzymałości na zginanie (a) oraz ciskanie (b) zaprawy zgodnie z norm [127]

Podczas przygotowywania próbek, a następnie ich pielęgnacji powinny być zachowane odpowiednie warunki. Przez pierwsze dni próbki należy przechowywać w odpowiednio wysokiej wilgotności względnej powietrza ($95\% \pm 5\%$ lub w wodzie), po czym próbki należy rozformować i dalszą pielęgnację prowadzić przy wilgotności $65\% \pm 5\%$. Zgodnie z powyższym opisem były pielęgnowane próbki wykonane i zbadane przez autora rozprawy. Historyczną zaprawę murarską wapienną NHL 2 poddano badaniu dopiero po 90 dniach pielęgnacji, ponieważ zgodnie z kartą techniczną producenta, gwarantowana wytrzymałość 2,5 MPa, jest uzyskiwana dopiero po 90 dniach.

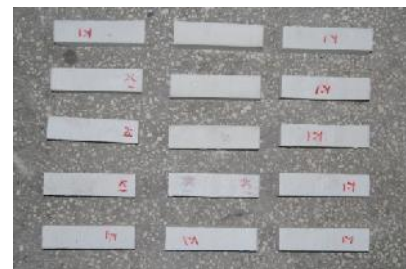
a)



b)



c)

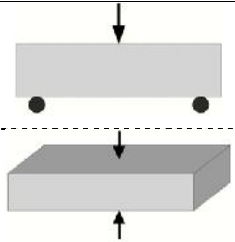


Rys. 5.2 Próbki zaprawy przygotowane do badania wytrzymałościowych zgodnie z norm [127]: a) zaprawa NHL2, b) zaprawa Z01, c) zaprawa K01

Z powyższych zapraw wykonano badania wytrzymałości na zginanie, następnie na otrzymanych połówkach beleczek określono wytrzymałość na ściskanie. Badanie nośności zaprawy na zginanie wykonano na modelu zgodnie z Rys. 5.1a. Rozstaw podpór określono na 10 cm, siła była przyłożona w połowie odległości między podporami.

Półówki próbek zaprawy otrzymane po zginaniu wykorzystano do wykonania badania wytrzymałości zaprawy na ściskanie (Rys. 5.1b). Wymiary powierzchni docisku wynosiły 4x4 cm. Podstawowe wyniki badań zaprawy przedstawia Tablica 5.1, gdzie w liczniku podano wartość dotyczącą zginania, natomiast w mianowniku ściskania próbek zaprawy.

Tablica 5.1 Wyniki badań wytrzymałości zapraw na zginanie oraz ściskanie: VM01 (a), M7 (b), NHL2 (c), Z01 (d) oraz K01 (e)

L.p.		Badana zaprawa				
		a	b	c	d	e
1	Liczba próbek [szt.]	14	41	15	15	15
		30	65	30	30	30
2	Wytrzymałość średnia [MPa]	2,7	5,4	0,7	2,9	11,0
		8,0	24,7	1,3	9,01	29,5
3	Odchylenie standardowe [MPa]	0,4	0,7	0,1	0,3	1,1
		1,4	3,5	0,2	1,5	5,3
4	95% przedział ufności [MPa]	0,7	0,8	0,2	0,5	1,7
		1,9	4,2	0,3	2,0	7,2
5	Współczynnik zmienności [%]	16	12	20	12	10
		18	14	14	17	18

Uzyskane stosunkowo niskie i prawie jednakowe współczynniki zmienności (12–18%) dla wszystkich zbadanych zapraw (znacząco różniących się między sobą wytrzymałością) świadczą o ich dużej jednorodności. Wynika to ze składu chemicznego zapraw, technologii przygotowania próbek oraz metody ich laboratoryjnych badań. Zupełnie odmienna sytuacja może zaistnieć, w przypadku zapraw w murach po ich wieloletniej eksploatacji.

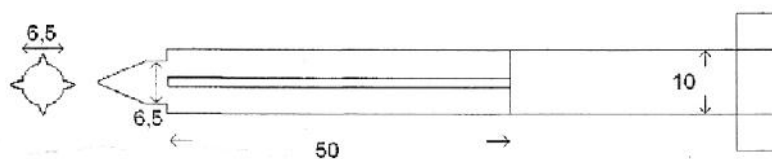
W starych budynkach podstawowymi zaprawami były wapno, niekiedy gips i glina, a od drugiej połowy XIX wieku cement. Analiza składu chemicznego zaprawy w zasadzie pozwala określić ich składniki, na podstawie których można wykonać beleczki normowe i określić wytrzymałość zaprawy. Trzeba jednak brać pod uwagę, że uzyskane wyniki będą obciążone błędami wynikającymi z następujących przyczyn [13], [15], [31], [34]:

- odtwarzanie starych zapraw na podstawie ich składu chemicznego nie uwzględnia technologii ich wykonania, stosowanych dodatków, ilości wody zarobowej, warunków atmosferycznych podczas wykonania muru oraz zjawiska reologicznych,
- na wytrzymałość zaprawy po wieloletniej eksploatacji muru może mieć wpływ ich degradacja związana z wietrzeniem, korozją chemiczną, zasoleniem itp.

W związku z powyższym do badania wytrzymałości zaprawy na ściskanie w istniejących budynkach proponowano różne metody analizowane poniżej.

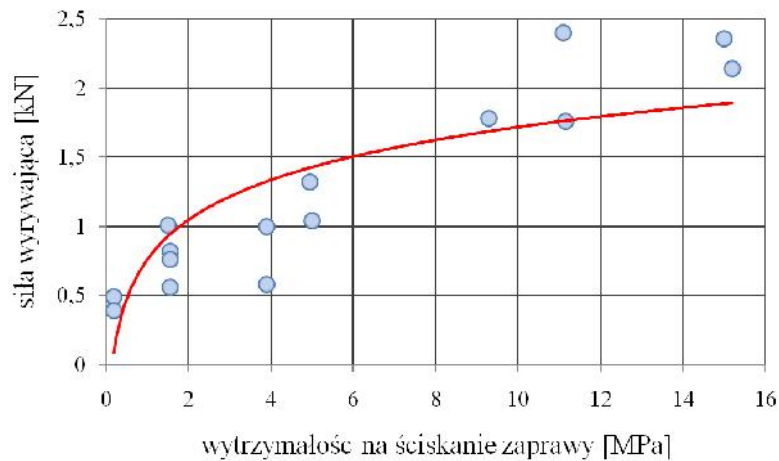
5.2. Badania zaprawy *in situ*

W pracach [11], [27] zaproponowano badanie zaprawy *in situ* za pomocą penetrometru X-drill. Badanie polega na wbijaniu w spoinę stalowego grota z określoną energią. Urządzenie służące do wbijania jest podobne do młotka Schmidta z odpowiednio dobranymi cówkami. Miarą wytrzymałości zaprawy na ściskanie jest wielkość zagłębienia stalowego grota w zaprawie, z określoną energią i poprawką uwzględniającą naprężenia ściskające występujące w spoinie. Do określenia wytrzymałości zaprawy stosuje się również specjalne wiertło o średnicy nie większej niż grubość spoiny (Rys. 5.3). Energia oporu przy wierceniu jest rejestrowana przez komputer, a następnie porównuje się ją z kalibrowanymi próbkami.



Rys. 5.3 Schemat wiertła do pomiaru wytrzymałości spoiny w murze

Podobną metodą określenia wytrzymałości zaprawy na ściskanie zaproponowano w pracy [105]. Metoda polega na wyciągnięciu spiralnej wkładki metalowej typu Helix o średnicy 6 mm zamocowanej w spoinie muru na określony głębokości przy jednoczesnym pomiarze siły, potrzebnej do wyciągnięcia. Dokładny opis metodyki badania wytrzymałości zaprawy opisują zalecenia [81]. Wyniki badania siły wrywaniacej w zależności od wytrzymałości zaprawy na ściskanie wyznaczonej na podstawie badania próbek sześciennych 70x70x70 mm przedstawiono na Rys. 5.4.

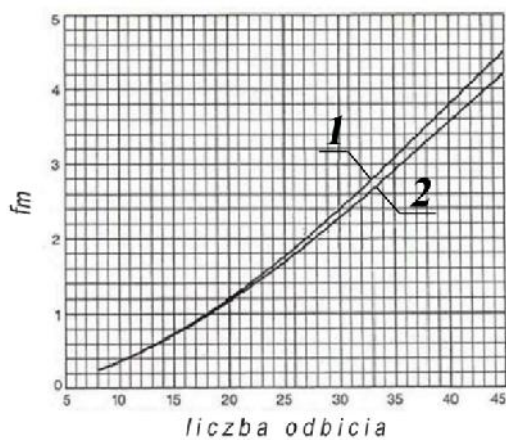


Rys. 5.4 Zależności między wytrzymałością zaprawy, a siłą potrzebną do wyciągnięcia metalowej wkładki spiralnej ze spoiny [105]

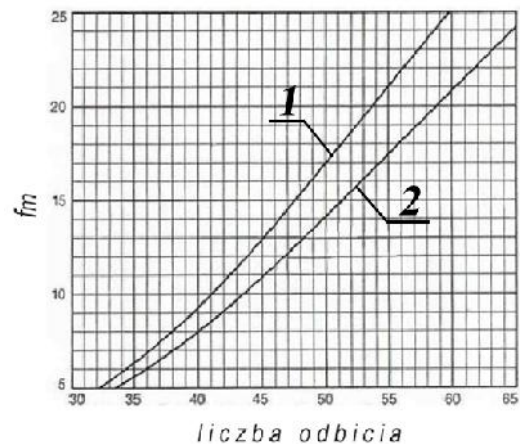
Wytrzymałość zaprawy określana wg tej metody ma największy rozrzut dla zapraw o niskich wytrzymałościach. Nie powinna być ona równie stosowana w badaniach murów o spoinach mniejszych od 8 mm. W literaturze tematu brak jest dotychczas dokładniejszych badań i analiz stwierdzających możliwość określenia wytrzymałości spoin w istniejących konstrukcjach murowych, posiadających zdecydowanie większą niejednorodność materiałów.

Znane są również próby określenia wytrzymałości zaprawy metodami sklerometrycznymi, przy pomocy młotka Schmidta. Najbardziej popularnym metodą jest metoda z wykorzystaniem młotków wahadłowych, gdyż pozwala na określenie liczby odbicia dla zapraw o różnych wytrzymałościach na ściskanie [131]. Na Rys. 5.5 przytoczono zależności między wytrzymałością na ściskanie zaprawy, a średnią liczbą odbicia młotka wg zaleceń [100].

a)



b)

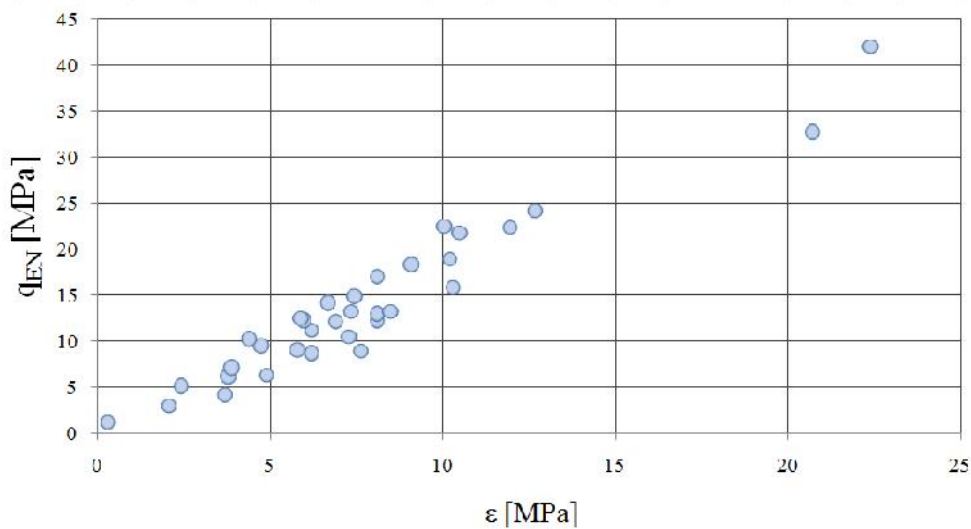


Rys. 5.5 Zależności między wytrzymałością na ściskanie zaprawy f_m [MPa], a liczbą odbicia według zaleceń [100]: 1 - przy poziomym usytuowaniu młotka, 2 - przy pionowym usytuowaniu młotka

Zmodyfikowany metod badawczy zastosowano w pracy [89] przy użyciu młotka Schmidta typu N wyposażonego w końcówki stalowe zamocowane na końcu trzpienia. Podczas badania nie określano liczby odbicia jak w przypadku typowego badania, lecz głębokość penetracji w głębokość spoiny płytki przy 10 uderzeniach młotkiem, a za wynik badania przyjmuje się różnicę zagłębienia pomiędzy pierwszym i ostatnim uderzeniem i przelicza się ją na wytrzymałość na ściskanie zaprawy. Dla murów na zaprawach wapiennych zagłębienie trzpienia w spoinie sięgało nawet 5 mm.

Warto nadmienić, iż wyniki badania sklerometrem (niezależnie od jego typu) są bardzo trudne w interpretacji, ze względu na brak informacji na temat stanu zaprawy, ponieważ badanie odbywa się na powierzchni zdegradowanego przez warunki atmosferyczne oraz uszkodzenia korozyjne spoiny muru. Na odmiennie właściwość warstwy licowej zaprawy wpływa również proces spoinowania muru, zatem chcąc dokładnie określić jednorodność, a w następnym etapie badać wytrzymałość na ściskanie zaprawy na podstawie badań sklerometrycznych powinno się wykonać co najmniej kilka pomiarów na głębokości kilku centymetrów od powierzchni muru.

Ciekawe wyniki badań zaprawy autorzy opisali w pracy [104], gdzie wykazano zależność pomiędzy wytrzymałością zaprawy na ściskanie, a wartością oporu potrzebnego do wydrążenia bruzdy o odpowiedniej głębokości w murze. Badanie *scratch test* jest stosowane głównie do oceny właściwości mechanicznych cienkich warstw i powłok takich jak przyczepność, wytrzymałość na zginanie czy też odkształcalność. Technika polega na kontrolowanym zarysowaniu powierzchni za pomocą ostrego wierzchołka wykonanego z odpowiednio twardego materiału np. diamentu. W krytycznym momencie badania precyzyjne czujniki akustyczne dokonują pomiaru. Wyniki mogą również zostać potwierdzone poprzez obserwacje przy pomocy wbudowanego mikroskopu optycznego. Oprócz emisji akustycznej i pomiaru właściwości adhezyjnych, badania *scratch test* mogą służyć do pomiaru siły tarcia oraz siły i głębokości penetracji w badanej próbce, co przy użyciu różnych metod uzupełniająco sprawia, że może się okazać pomocnym narzędziem do badania, rozwoju i kontroli jakości konstrukcji murowych. Rys. 5.6 przedstawia zależność pomiędzy wytrzymałością określoną na próbkach prostopadłościennych, a oporem pomierzonym podczas wykonywania bruzdy w zaprawie murarskiej.



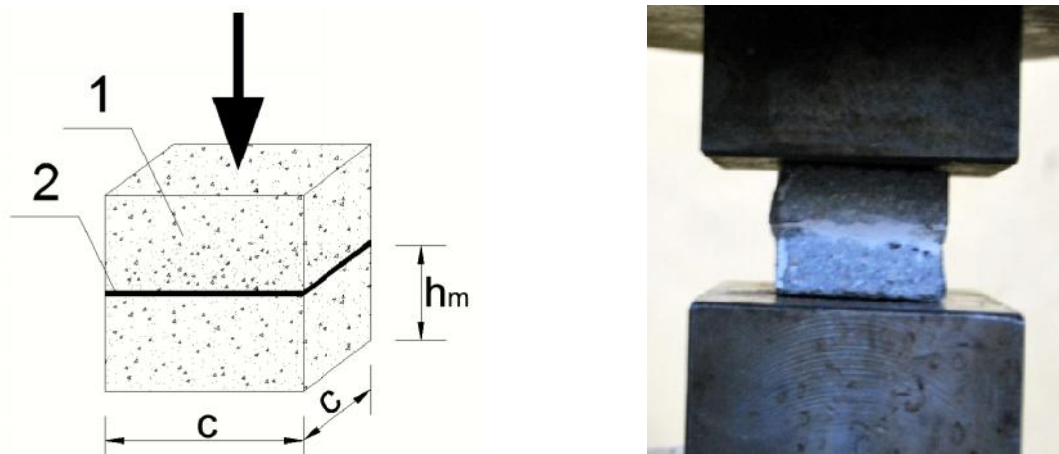
Rys. 5.6 Zależność między wytrzymałością zaprawy q_{EN} , a oporem ϵ uzyskane na podstawie badań zaprawy metod *scratch test* [104]

5.3. Badania na próbkach pobranych z muru

W literaturze technicznej przytaczano różne sposoby badań laboratoryjnych zaprawy na próbkach pobranych z muru, najczęściej (o grubości równej grubości spoiny wspornej). Przykładowo zgodnie z [78] proponuje się próbki wykonane w postaci dwóch połączonych między sobą placków zaprawy o powierzchni kwadratowej (Rys. 5.7).

b)

a)



Rys. 5.7 Badanie zaprawy pobranej ze spoin wspornych o grubości h_m według [78]: a) schemat badania (1 – zaprawa, 2 – spoina łączące), b) przeprowadzane badanie

Cechy mechaniczne spoiwa i cz cego placki powinny by zbli one do cech badanej zaprawy. Według tego sposobu wytrzymało zaprawy zaleca si okre la według wzoru:

$$f_m = k_m \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

gdzie:

F – siła niszcza,

$A = c \times c$ – pole przekroju,

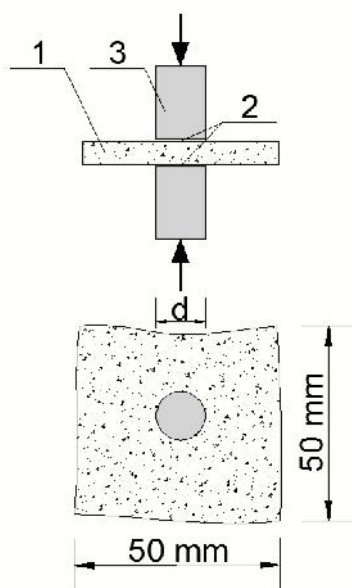
k_m – współczynnik korelacji pomi dzy uzyskan wytrzymało ci ,
a wytrzymało ci na połówkach beleczek 40x40x160 mm (Tablica 5.2).

Tablica 5.2 Współczynnik korelacji k_m do okre lenia wytrzymało ci zaprawy badanej wg schematu przedstawionego na Rys. 5.7 [38]

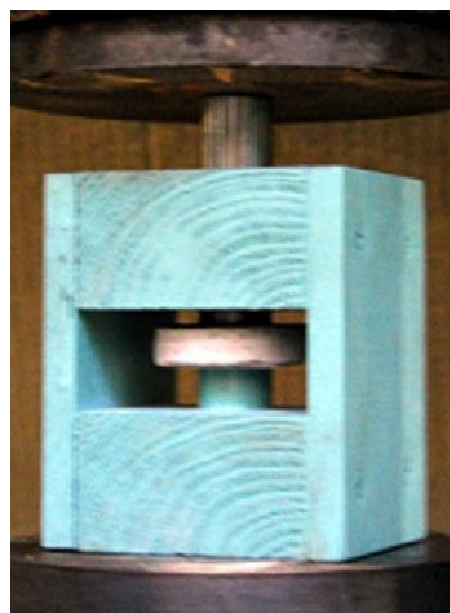
L.p.	Okres murowania	Wymiary próbek c [cm]		
		2	3	4
1	letni	0,56	0,68	0,80
2	zimowy	0,46	0,65	0,75

Na Rys. 5.8 podano schemat bada zaprawy według zalece normy niemieckiej [116]. Wytrzymało okre la si według wzoru (5.1), w którym A jest polem przekroju elementu dociskowego. Oprócz efektu skali na wytrzymało w tym przypadku ma wpływ efekt Bauszyngera, poniewa zaprawa pomi dzy elementami dociskowymi współpracuje z pozostałym nieobci onym obszarem próbki. Współczynnik korelacji dla tego testu szacuje si na około $k_m=0,5$ [39].

a)

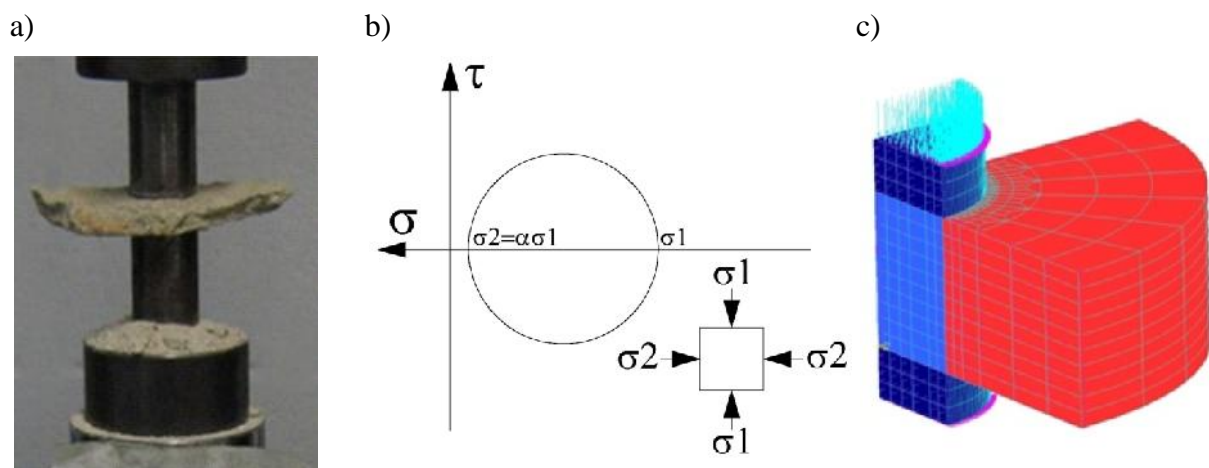


b)



Rys. 5.8 Badanie zaprawy pobranej ze spoin wspornych o grubo ci h_m według normy [116]:
1 – zaprawa, 2 – filc lub gips, 3 – stalowe elementy dociskowe o rednicy 20–25 mm

Badanie *double punch test* jest mo liwe do wykonania w istniej cych murach ze wzgl du na mo liwo pobrania materiału do bada *in situ*. Grubo pobranej próbki jest ograniczona, zwykle od 10 do 20 mm. Nale y mie na uwadze fakt, i odgrywa ona kluczow rol podczas uzyskiwania wyników wytrzymało ci. W pracach [3], [4], [14] wykazano, i wyniki wytrzymało ci uzyskiwane t metod rosn odwrotnie proporcjonalnie do grubo ci badanych próbek. Jest to zwi zane ze stanem napr e w próbce podczas badania. Ze wzgl du na okre lone wymiary próbki (np. próbka wi ksza ni samo pole docisku), stan napr e w niej panuj cy nie mo e by uwa any za jednoosiowy, poniewa stalowe elementy i materiał poza stref bezpo rednio poddan ciskaniu powoduj powstawanie dodatkowych napr e poziomych. Stan napr enia mo e by reprezentowany w płaszczy nie Mohra w sposób pokazany na Rys. 5.9, w którym wykazana jest zale no pomi dzy poziomymi i pionowymi napr eniami wyst puj cymi w próbce [75].



Rys. 5.9 *Double punch test*: a) badanie zaprawy, b) koło Mohra, c) symulacja napr e metod elementów sko czonych [75]

Autor niniejszej rozprawy przeprowadził badania własne wytrzymało ci zaprawy pobieranej ze cian kamienic w Szczecinie, które po ok. 100 latach eksploatacji podlegały rozbiórce oraz z nowo wykonanego muru na zaprawie murarskiej do murowania cegieł z jednoczesnym wykonaniem spoin firmy quick-mix. W próbkach ze cian kamienic okre lono zawarto spoiwa i kruszywa, g sto obj to ciow i nasi kliwo masow . Była to zaprawa na bazie wapna hydraulicznego o g sto ci obj to ciowej ok. 1600 kg/m^3 . Z uwagi na małą przyczepno zaprawy do cegły, mo liwe było wyizolowanie jej do du ych fragmentów (Rys. 5.10).

a)



b)



Rys. 5.10 Próbki zaprawy pobrane do badań wytrzymałości na ściskanie według [116]:
a) z wyburzanej kamienicy, b) z nowo wykonanego muru

Następnie z fragmentów wycięto próbki o średnicy 50 mm, które badano na ściskanie według metody przedstawionej na Rys. 5.8. Poza tym ze spoin wspornych wycinano płytki kwadratowe o wymiarze $c=40$ mm, z których wykonano próbki (Rys. 5.11) i poddano badaniu zgodnie ze schematem jak na Rys. 5.7.

a)



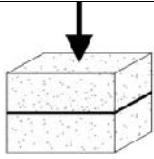
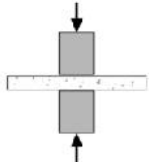
b)



Rys. 5.11 Próbki przygotowane do badań zgodnie ze schematem Rys. 5.7:
a) z wyburzanej kamienicy, b) z nowo wykonanego muru

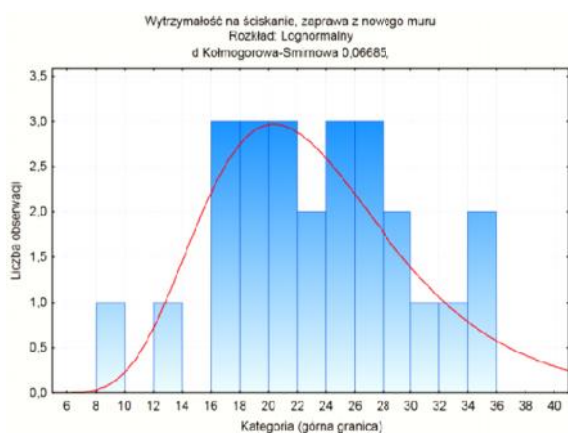
Otrzymane wytrzymałości średnie zapraw przedstawia Tablica 5.3.

Tablica 5.3 Podstawowe wyniki badań na ciskanie próbek zaprawy pobranych z nowo wykonanego muru (a) oraz z wyburzonej kamienicy (b)

L.p.	Schemat bada	Liczba próbek [szt.]		Wytrzymałość rednia [MPa]		Odchylenie standardowe [MPa]		95% przedział ufności [MPa]		Współczynnik zmienności [%]	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1		25	28	23,5	0,7	6,7	0,4	9,3	0,5	28	54
2		30	33	32,6	1,3	9,0	1,4	12,1	1,8	27	103

Na podstawie wyników analizy statystycznej otrzymanych wyników stwierdzona została lewa asymetria statystycznego rozkładu wytrzymałości na ciskanie (Rys. 5.12, Rys. 5.13).

a)



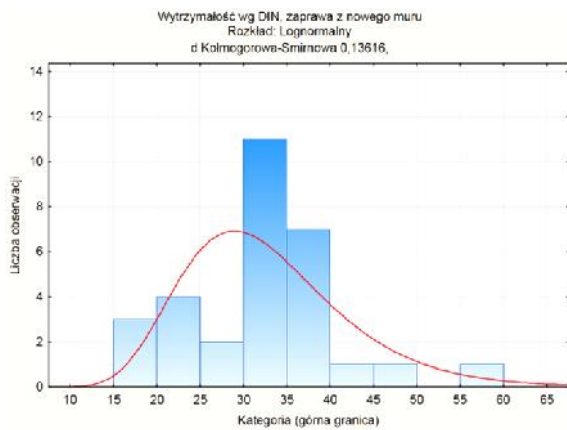
b)



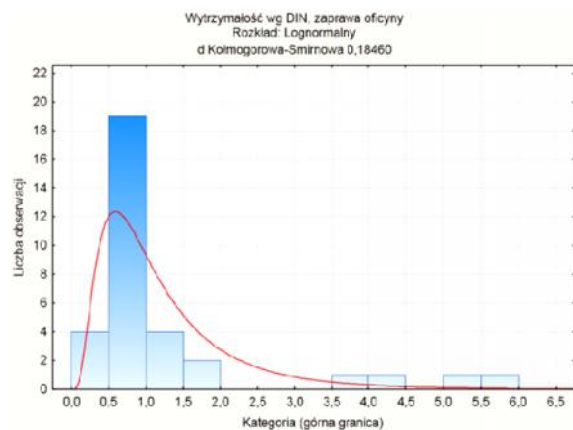
Rys. 5.12 Histogramy i rozkłady statystyczne wyników badań wytrzymałości na ciskanie zaprawy według schematu 1 Tablicy 5.3 z nowo wykonanego muru (a) oraz wyburzonej kamienicy (b)

Dla schematu badania 1 według Tablicy 5.3 wartość statystyki testowej wynosi $D = 0,067$ (a) oraz $D = 0,122$ (b). Wartość krytyczna testu wynosi $D_n(\alpha=0,05; n=25)=0,264$ (a) oraz $D_n(\alpha=0,05; n=28)=0,250$ (b). Ponieważ $D < D_n$, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 zakładającej zgodność rozkładu z rozkładem logarytmiczno-normalnym (przy poziomie istotności równym 0,05).

a)



b)



Rys. 5.13 Histogramy i rozkłady statystyczne wyników bada wytrzymało ci na ciskanie zaprawy według schematu 2 Tablicy 5.3 z nowo wykonanego muru (a) oraz wyburzanej kamienicy (b)

Dla schematu bada 2 według Tablicy 5.3 warto statystyki testowej wynosi $D = 0,136$ (a) oraz $D = 0,185$ (b). Natomiast warto krytyczna testu wynosi $D_n(=0,05;n=30)=0,242$ (a) oraz $D_n(=0,05;n=33)=0,231$ (b). Poniewa $D < D_n$, wi c nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 zakładaj cej zgodnie rozkładu z rozkładem logarytmiczno-normalnym (przy poziomie istotno ci równym 0,05).

Z analizy danych przedstawionych w Tablica 5.3 wynika, e warto ci wytrzymało ci zaprawy otrzymane według schematów 1 i 2 znacz co ró ni si mi dzy sob . Badacze niemieccy [91], [92] stwierdzaj , e dla schematu 2 bezpiecznie jest przyj współczynnik 0,5 którego brak w normie [112].

Istotnym wynikiem bada jest fakt, e w porównaniu z nowoczesnymi zaprawami wytrzymało wapiennych zapraw z wiekowych budynków jest wielokrotnie mniejsza. Ró nica ta w małym stopniu zale y od samej metody badawczej. Przykładowo przy badaniu zaprawy metod według Rys. 5.7 wytrzymało nowej zaprawy była o 32 razy wi ksza ni zaprawy pobranej ze 100-letniej kamienicy. Przy badaniu zapraw metod według Rys. 5.8 ró nica ta wynosiła około 25 razy. Ciekawym z praktycznego punktu widzenia i znacz cym wynikiem omawianych bada jest du a ró nica pomi dzy współczynnikami zmienno ci wytrzymało ci starych i nowych zapraw. Czynniki te nale y uwzgl dnia przy ustalaniu materiałowych współczynników bezpiecze stwa dla zaprawy przy oszacowaniu wytrzymało ci muru w oparciu o wyniki bada jego poszczególnych składników. Ponadto ró nica zale y od metody badawczej. Przykładowo przy okre laniu wytrzymało ci zaprawy zgodnie ze schematem 1 (Tablica 5.3) współczynnik zmienno ci dla wapiennej zaprawy jest o 2 razy wi kszy ni dla zaprawy cementowej. Natomiast przy zastosowaniu metody zgodnie ze schematem 2 (Tablica 5.3) ró nica ta jest prawie 4-krotna.

6. NIEKONWENCJONALNE METODY OKREŚLANIA WYTRZYMAŁO CI CEGŁY I ZAPRAWY

6.1. Założenia wstępne

Według definicji podanej w [132] badanie jest próbą działania lub sprawdzeniem jednej bądź więcej właściwości jednostki poprzez poddanie jej określonemu zespołowi fizycznych, chemicznych, środowiskowych działań i warunków. Za wynik badania norma [133] uznaje wartość właściwości otrzymaną w wyniku zastosowania określonej metody badania. Opis metody badania powinien wyraźnie określać, czy należy wykonać jedną obserwację, czy też pewną liczbę pojedynczych obserwacji i jako wynik badania przyjąć ich wartość średnią lub inną odpowiednią funkcję [15]. Jednakże w przypadku konieczności oceny stanu technicznego obiektu sam wynik badania poszczególnych jego elementów (np. w konstrukcjach murowych - elementów murowych i zaprawy) nie jest wystarczający. Chcąc rozbudować, czy też zmienić przeznaczenie obiektu budowlanego, w przeprowadzonej ocenie konstrukcji należy wykazać, iż będzie ona bezpieczna.

Podczas diagnostyki konstrukcji murowych bardzo często nie jest możliwe pobranie cegły do badań laboratoryjnych, zatem jedynym możliwym jest wykonanie badań *in situ*.

Wytrzymałość na rozciąganie można ustalić poprzez badanie cegły na zginanie [18] (wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $f_{b,t}$) lub poprzez badanie wyciętych próbek walcowych na rozłupywanie. Warto nadmienić, że w tym ostatnim przypadku jak na razie nie określono wartości współczynnika kształtu próbki walcowej z cegły, która przy rozłupywaniu pracuje w złożonym stanie naprężenia [107].

W związku z tym autor niniejszej rozprawy przedstawia alternatywne (uproszczone) metody określania wytrzymałości cegły i zaprawy, które mogłyby powszechnie stosowane, gdy bazując na metodach normowych określania wytrzymałości elementów murowych i zaprawy, a za pomocą wzorów empirycznych lub też uzyskanych na podstawie badań współczynników korelacji pomiędzy różnymi metodami można określić wytrzymałość konstrukcji murowej. Wszystkie badania przeprowadzono na elementach próbnych sezonowanych przez co najmniej 28 dni od momentu ich przygotowania, zachowując wymagania określone w odpowiednich normach. Próbkę wykonywane z nowych elementów murowych oraz zapraw murarskich dostarczonych przez producentów starano się wymurować dokładnie, zwracając uwagę przede wszystkim na dokładne wypełnienie spoin zapraw

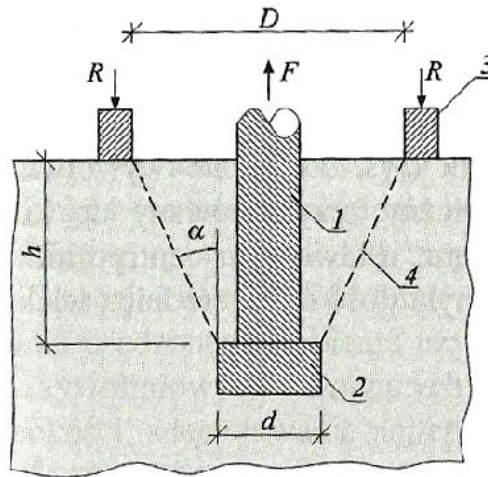
murarski, następnie chroniono przed zbyt szybką utratą wilgotności poprzez przykrycie folią PCV przez pierwsze kilka dni po wymurowaniu. Przez kolejne dni sezonowano w temperaturze $20^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ i wilgotności $60\pm 10\%$ zgodnie z [125].

6.2. Określenie wytrzymałości cegły na rozciąganie metodą *pull-off*

Istotną cechą wytrzymałości cegły decydującą o nośności konstrukcji murowych jest wytrzymałość na rozciąganie według badań L. Oniszczyka [67]. Ma ona duży wpływ na wytrzymałość muru zwłaszcza w starych budynkach (patrz rozdział 3). Wyznaczenie tych wartości mogłoby być dokonane za pomocą metod stosowanych przy diagnozowaniu konstrukcji belbetonowych. W konstrukcjach tych od dawna stosowana jest metoda *pull-out* [15]. Pierwszy raz do określenia wytrzymałości betonu *in situ* została ona zastosowana już w 1938 roku [93]. Istotną metodą *pull-out* (Rys. 6.1) jest pomiar wartości siły potrzebnej do wyrwania z betonu stalowej kotwy wcześniej zabetonowanej w konstrukcji (*Lok-Test*) lub osadzonej w nawierconych otworach (*Capo-Test*). Sposób zniszczenia betonu podczas wyrwania kotwy pozwala na wyznaczenie ścisłej korelacji pomiędzy siłą wyrwania kotew, a wytrzymałością na ściskanie betonu cementowego. Korelacja ta ma związek liniowy, co oznacza, iż w przeciwieństwie do metod nieniszczących metoda *pull-out* jest niezależna od wpływu parametrów technologicznych oraz materiałowych takich jak wskaźnik w/c , rodzaj cementu, wiek betonu oraz zawartość dodatków (np. pyłów, włókien oraz mikrokrzemionki).

Omawiana metoda stosowana jest najczęściej w trakcie wznoszenia konstrukcji betonowych do kontroli przyrostu wytrzymałości betonu i jest pomocna przy podejmowaniu decyzji o rozszalowaniu, obciążeniu elementów nośnych konstrukcji. Znalazła ona uznanie w wielu krajach skandynawskich, a także w USA i Wielkiej Brytanii, gdzie jest powszechnie stosowana do dnia dzisiejszego [15].

Na skutek działania siły niszczącej oderwany zostaje fragment betonu w kształcie koła o wysokości h , i średnicy wijskiej podstawy równej ramce oporowej D (głównie stalowy pierścień), a mniejszej średnicy trzpienia klinującego kotew - d .



Rys. 6.1 Schemat badania metod *pull - out*: 1 - trzpie , 2 - głowica, 3- pier cie oporowy, 4 - powierzchnia zniszczenia [15]

K t pochylenia sto ka jest ograniczony geometrycznymi wymiarami kotwy i pier cienia kotwi cego i wyznacza si go ze wzoru:

$$r = \arctan\left(\frac{D-d}{2h}\right) \quad (6.1)$$

gdzie:

d – rednica kotwy,

D – wewn trzna rednica pier cienia oporowego,

h – odlego od powierzchni betonu do podstawy trzpienia kotwi cego.

W przypadku ceramicznych elemento murowych metoda ta mo e si okaza nieodpowiednia ze wzgl du na ograniczenia wymiarowe cegieł. Zwykle cegła pełna ma grubo 6,5 cm, a zagł bienie trzpienia głowicy w przypadku metody badawczej *pull - out* wynosi około 5 cm, co w poł czeniu z wła ciwo ciami elemento ceramicznych (krucho) mo e mie znacz cy wpływ na charakter zniszczenia, a w konsekwencji na ostateczny wynik badania.

W zwi zku z ograniczeniami zastosowania powy szej metody dla elemento murowych pełnych, na uwag zasługuje okre lenie wytrzymało ci cegły na rozci ganiu *in situ* metod *pull - off*. Metoda ta stosowana jest do okre lania wytrzymało ci betonów oraz do sprawdzania napraw elemento betonowych. Ocena wytrzymało ci na odrywanie metod *pull - off* polega na pomiarze siły niezbdnej do oderwania kr ka od badanej powierzchni [99]. W badanym elemencie nawierca si rdze , nast pnie na wierzch wywierconego rdzenia nakleja si aluminiowy kr ek, do którego mocuje si urz dzenie dynamometryczne, którym wykonuje si badanie wytrzymało ci na odrywanie ze stał sił . Urz dzenie jest skalibrowane w taki sposób, aby stosuj c kr ki o rednicy 50 mm mo na było uzyska bezpo rednio

wytrzymałość na odrywanie w MPa. Metoda ta po raz pierwszy została zastosowana przez autora niniejszej rozprawy do badania cegły komina murowanego *in situ* (Rys. 6.2).

a)



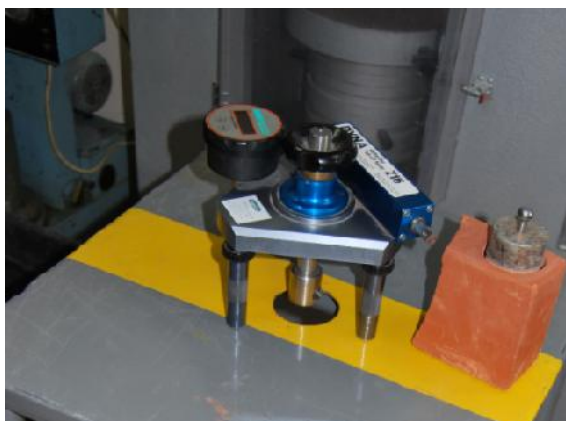
b)



Rys. 6.2 Badanie wytrzymałości cegły na odrywanie *in situ* metodą *pull - off* na kominie zlokalizowanym na terenie Zakładu Gazowniczego w Szczecinie

Badaniu wytrzymałości na odrywanie metodą *pull - off* poddano również kilka partii cegieł ceramicznych pełnych o wymiarach 250x120x65 mm. Pierwsze dwie partie (*a* i *b*) to omawiany we wcześniejszych rozdziałach materiał rozbiórkowy: pierwsza partia pochodziła ze cian zewnętrznych szczecińskiej kamienicy (Rys. 4.1), druga z byłej Fabryki Papieru "Szczecin - Skolwin" (Rys. 4.5). Kolejne partie cegieł to nowe elementy murowe dostarczone bezpośrednio od producenta. Partia *c* to cegła pełna (zgodnie z opisem przedstawionym w punkcie 4.2), natomiast partie *d* i *e* to cegły pełne klinkierowe o deklarowanej przez producenta wytrzymałości na ściskanie zdecydowanie większej od pozostałych cegieł. W celu wykonania badania powierzchnie cegieł zostały wcześniej oczyszczone, następnie za pomocą wiertła koronkowego o średnicy wewnętrznej równej średnicy naklejanego krążka (50 mm) nawiercono wysepki na głębokość 15–30 mm od lica cegły. Badanie na odrywanie dla powyższych partii cegieł wykonano na specjalnie przygotowanym stanowisku badawczym (Rys. 6.3)

a)




b)



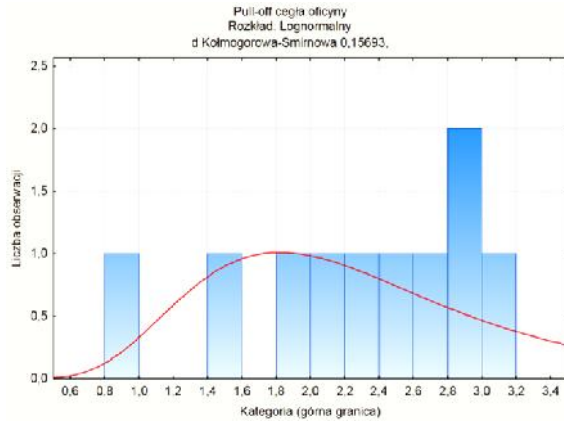
Rys. 6.3 Stanowisko laboratoryjne do określania wytrzymałości cegły na odrywanie metodą *pull - off*

Badanie na odrywanie wykonano za pomoc urz dzenia Dyna-Test, daj cego mo liwo bezpo redniego uzyskania wytrzymało ci f_t^* w MPa. Uzyskane podczas bada podstawowe wyniki wytrzymało ci na odrywanie przedstawia Tablica 6.1, a zale no ci statystyczne przedstawia Rys. 6.4 i Tablica 6.1.

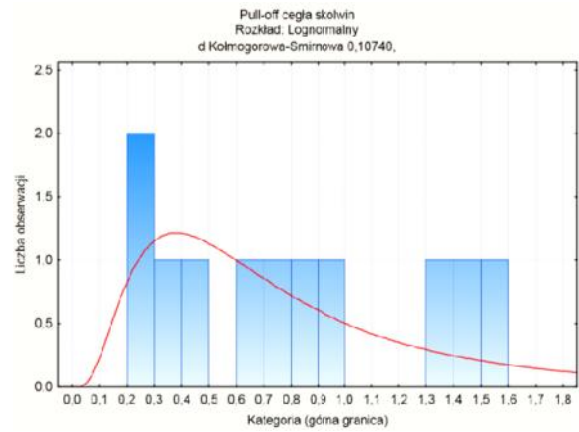
Tablica 6.1 Wyniki bada wytrzymało ci na odrywanie próbek cegieł pobranych z wyburzonej kamienicy (a), wyburzanej byłej Fabryki Papieru "Szczecin - Skolwin (b), oraz dostarczonych z zakładu wyrobów ceramicznych (c, d oraz e)

L.p.		Badany element ceramiczny				
		a	b	c	d	e
1	Liczba próbek [szt.]	10	11	9	26	36
2	Wytrzymało rednia na odrywanie f_t^* [MPa]	2,3	0,8	4,5	6,6	1,9
3	Odchylenie standardowe [MPa]	0,7	0,5	0,6	0,7	0,4
4	95% przedział ufno ci [MPa]	1,3	0,9	1,1	1,0	0,6
5	Współczynnik zmienno ci [%]	31	62	13	10	23
6	Wytrzymało rednia na ciskanie f_b wg Tablic 4.2 i 4.3 [MPa]	26,9	37,8	20,7	107,8	76,7
7	Wytrzymało rednia na rozci ganie przy zginaniu f_t wg Tablic 4.2 i 4.3 [MPa]	3,5	5,1	8,9	14,7	4,2
8	$k_b = \frac{f_t^*}{f_b}$	0,08	0,02	0,21	0,06	0,03
9	$k_t = \frac{f_t^*}{f_t}$	0,64	0,16	0,50	0,45	0,46

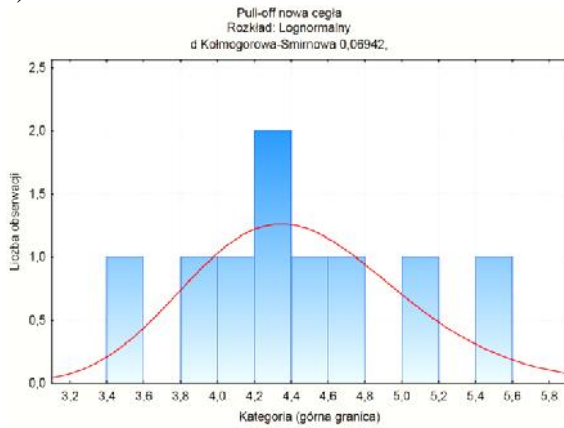
a)



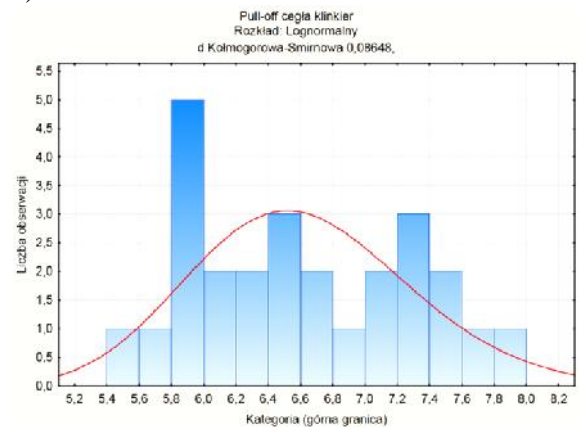
b)



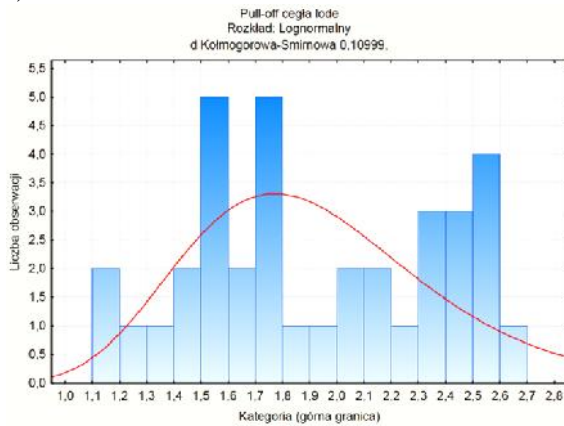
c)



d)




e)



Rys. 6.4 Histogramy i rozkłady statystyczne wyników bada wytrzymało ci na odrywanie próbek metod *pull - off* dla cegieł z wyburzanej kamienicy (a), Papierni "Szczecin - Skolwin" (b) oraz nowych cegieł ceramicznych od producenta (c, d, e)

Tablica 6.2 Zestawienie krytycznych wartości statystycznych dla dopasowania rozkładów logarytmiczno-normalnych dla wszystkich przebadanych zapraw

L.p.	Element ceramiczny	Badanie	n	D	D_n
1	a		10	0,157	0,409
2	b		11	0,107	0,391
3	c		9	0,069	0,430
4	d		26	0,087	0,259
5	e		36	0,110	0,221

Ponieważ dla wszystkich przeprowadzonych badań wytrzymałości na odrywanie $D < D_n$, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 zakładającej zgodnie analizowanego rozkładu z rozkładem logarytmiczno-normalnym (przy poziomie istotności równym 0,05).

Analiza wyników badań wykazała, że stosunek wytrzymałości cegły na odrywanie metod *pull-off* do wytrzymałości na ściskanie $k_b = f_t^*/f_b$ waha się w granicach 0,02–0,08 (Tablica 6.1). Jedynie dla jednej partii cegieł uzyskano wartość znacznie odbiegającą od pozostałych. Najmniejszą wartość współczynnika k_b uzyskano dla cegieł partii b.

Natomiast wyniki badań wskazują, że stosunek wytrzymałości cegły na odrywanie metod *pull-off* do wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $k_t = f_t^*/f_t$ daje bardzo dobre wartości współczynników korelacji się w granicach 0,45–0,64 (Tablica 6.1). Podobnie jak w przypadku zależności wytrzymałości na odrywanie metod *pull-off* próbek cegieł w odniesieniu do wyników wytrzymałości na ściskanie dla jednej partii cegieł uzyskano wartość znacznie odbiegającą od pozostałych. Najmniejszą wartość współczynnika k_t uzyskano dla cegieł partii (b) równą 0,16. Prawdopodobnie wynika to z tego, że po wieloletniej eksploatacji w warunkach agresywnego środowiska zakładów papierniczych warstwy licowe cegły zostały mocno zdegradowane, co ma znaczący wpływ na ostateczny wynik badania.

W celu wyeliminowania tego czynnika w praktyce można dokonać dokładniejszych badań wytrzymałościowych poprzez nawierzenie wysepek na powierzchni bocznej etapami: na początku na głębokość 15–30 mm wraz z odrywaniem, następnie wyrównanie pozostałości wysepek za pomocą frezu czołowego oraz ponowne nawierzenie wysepek na powierzchni bocznej i wykonanie badania na odrywanie.

6.3. Badania wytrzymałości cegły na rozciąganie przy rozłupywaniu

W pracy [106] badanie wytrzymałości cegieł na rozciąganie przy rozłupywaniu przyjęto jako podstawowe przy szacowaniu wytrzymałości na ściskanie muru ceglanego. Poza tym, udowodniono, że wytrzymałość cegieł określona tym sposobem odpowiada dopuszczalnym naprężeniom w murze podanym w normach DIN dla murów na słabych zaprawach wapiennych. Należy pamiętać, że w przypadku próbki badanej na rozłupywanie zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 6.5 kierunek ściskania sił P pokrywa się z kierunkiem ściskania cegły w istniejącej konstrukcji. Analizując wyniki uzyskane w pracy [60] mówi się o tym, że w zależności od kierunku badania wytrzymałość na ściskanie otrzymane wyniki mogą się od siebie różnić ponad dwukrotnie, powyższa informacja może okazać się znacząca. Nie bez znaczenia również pozostaje fakt, że podczas wycinania odwiertu rdzeniowego z konstrukcji murowej mamy do dyspozycji próbki o długości 120 mm równ szerokości cegły lub 250 mm równ długości cegły. Nawet gdy warstwy licowe muru są mocno zdegradowane tak duża próbka daje możliwość otrzymania dwóch, a w najgorszym przypadku jednej próbki rdzeniowej o parametrach rzeczywistych elementu murowego (wyniki otrzymane na próbkach zawierających zdegradowane warstwy licowe mogą okazać się mało miarodajne).



Rys. 6.5 Badanie wytrzymałości na rozłupywanie próbek walcowych

Autor niniejszej rozprawy poddał badaniu próbki rdzeniowe wycięte z cegieł pobranych z wyburzonej kamienicy (Rys. 4.3). Do badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wycięto 30 próbek (Rys. 6.6). Badaniom poddano również próbki rdzeniowe wycięte z serii nowych cegieł z zakładu ceramicznego.



Rys. 6.6 Próbki rdzeniowe przygotowane do badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu pobrane z materiału pozyskanego podczas wyburzania kamienicy

Wytrzymałość próbek rdzeniowej na rozciąganie przy rozłupywaniu została wyliczona ze wzoru [106]:

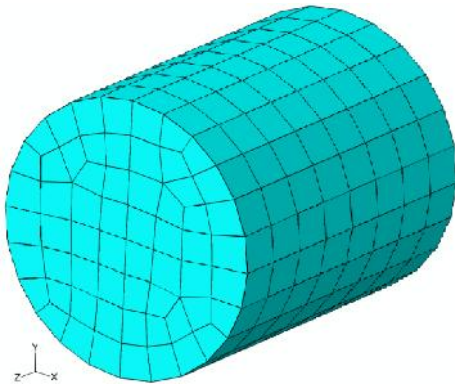
$$f_{t,core} = \frac{2P}{fdl} \quad (6.2)$$

gdzie:

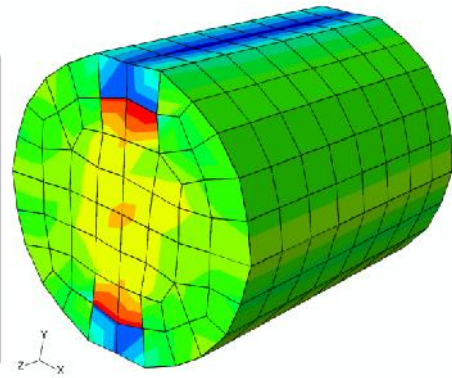
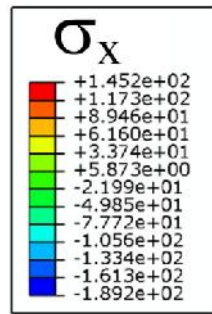
- $f_{t,core}$ – wytrzymałość próbek rdzeniowej na rozciąganie przy rozłupywaniu,
- P – maksymalne obciążenie niszczące,
- d – wymiar przekroju poprzecznego,
- l – długość linii styku próbki.

Warto nadmienić, iż wzór (6.2) w sposób przybliżony odzwierciedla stan naprężeń rozciągających powstających w przekroju pionowym przy ścisnieniu próbek walcowych wzdłuż linii tworzącej. Na Rys. 6.7 podano rozkład naprężeń rozciągających. Dane naprężeń σ_x działających w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rozłupywania uzyskano przez autora za pomocą obliczeń numerycznych z wykorzystaniem programu Abaqus. Analiza wykazała, że rozkład naprężeń rozciągających w przekroju pionowym (w płaszczyźnie rozłupywania według Rys. 6.8) jest nierównomierny, a ich maksymalne wartości koncentrują się w środkowej części przekroju. Wyniki badań próbek walcowych przedstawia Tablica 6.3, a wyniki testów statystycznych wykresy na Rys. 6.9.

a)



b)



Rys. 6.7 Schemat obliczeniowy MES (a) oraz rozkład naprężenia σ_x (b) w próbkach rdzeniowych obciążonych wzdłuż tworzącej równoległej do płaszczyzny yz



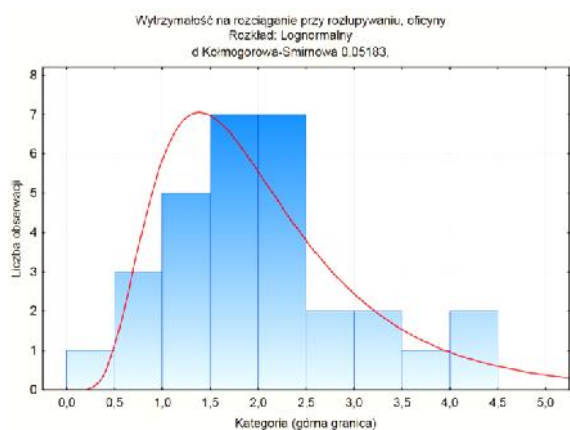
Rys. 6.8 Mechanizm niszczenia próbek podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

Tablica 6.3 Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu dla cegieł: a) pobranych z wyburzanej kamienicy, b) nowej cegły klinkierowej

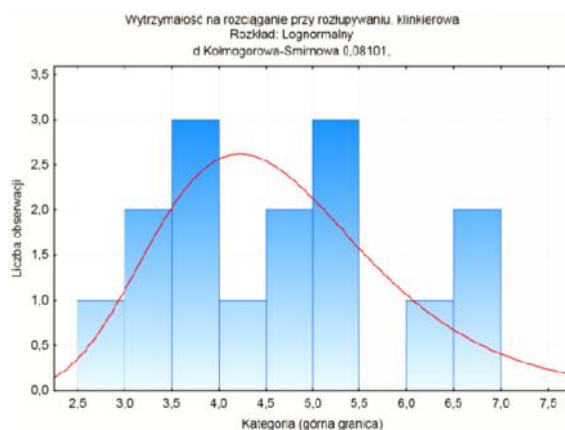
L.p.	Schemat badania	Liczba próbek [szt.]		Wytrzymałość średnia [MPa]		Odchylenie standardowe [MPa]		95% przedział ufności [MPa]		Współczynnik zmienności [%]	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1		30	15	2,1	4,7	0,9	1,2	1,3	1,9	46	26

Dla histogramu na Rys. 6.9 warto statystyki testowej wynosi $D = 0,052$ (a) oraz $D = 0,081$ (b). Warto krytyczna testu wynosi $D_n(=0,05;n=30)=0,242$ (a) oraz $D_n(=0,05;n=15)=0,338$ (b). Ponieważ $D < D_n$, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 zakładającej zgodność rozkładu z rozkładem logarytmiczno-normalnym (przy poziomie istotności równym 0,05).

a)



b)



Rys. 6.9 Histogramy i rozkłady statystyczne wyników badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu dla cegieł pobranych z wyburzanej kamienicy (a) oraz nowej cegły klinkierowej (b)

W Tabelicy 6.4 przytoczono porównanie uzyskanych wyników pomiarów $f_{t,core}$ oraz wytrzymałości cegły na rozciąganie przy zginaniu f_t oraz wytrzymałości na rozciąganie metodą *pull-off*.

Tablica 6.4 Stosunek wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości na rozciąganie metodą *pull-off* dla cegieł pobranych z wyburzanej kamienicy (a) oraz nowej cegły klinkierowej (b)

L.p.	Badany element ceramiczny	Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu		Wytrzymałość na zginanie wg ustaleń normowych		Wytrzymałość na rozciąganie metodą pull-off		$k_b = \frac{f_{t,core}}{f_t}$	$k_b = \frac{f_{t,core}}{f_t^*}$
		liczba próbek	$f_{t,core}$ [MPa]	liczba próbek	f_t [MPa]	liczba próbek	f_t^* [MPa]		
1	a	30	2,1	33	3,5	30	2,1	0,60	0,91
2	b	15	4,7	34	4,2	15	4,7	1,12	1,04

Porównując otrzymane wyniki współczynników korelacji, stwierdzić należy, iż w tym przypadku również nie można jednoznacznie określić współczynników korelacji dla porównywanych wytrzymałości $f_{t,core}$ oraz f_t i f_t^* , a analiza uzyskanych wyników badania może być obciążona dużym błędem. Reasumując autor niniejszej rozprawy uważa, że metoda określenia wytrzymałości cegły na rozciąganie poprzez rozłupywanie próbek walcowych ze względu na otrzymywane wyniki badania może być stosowana w praktyce.

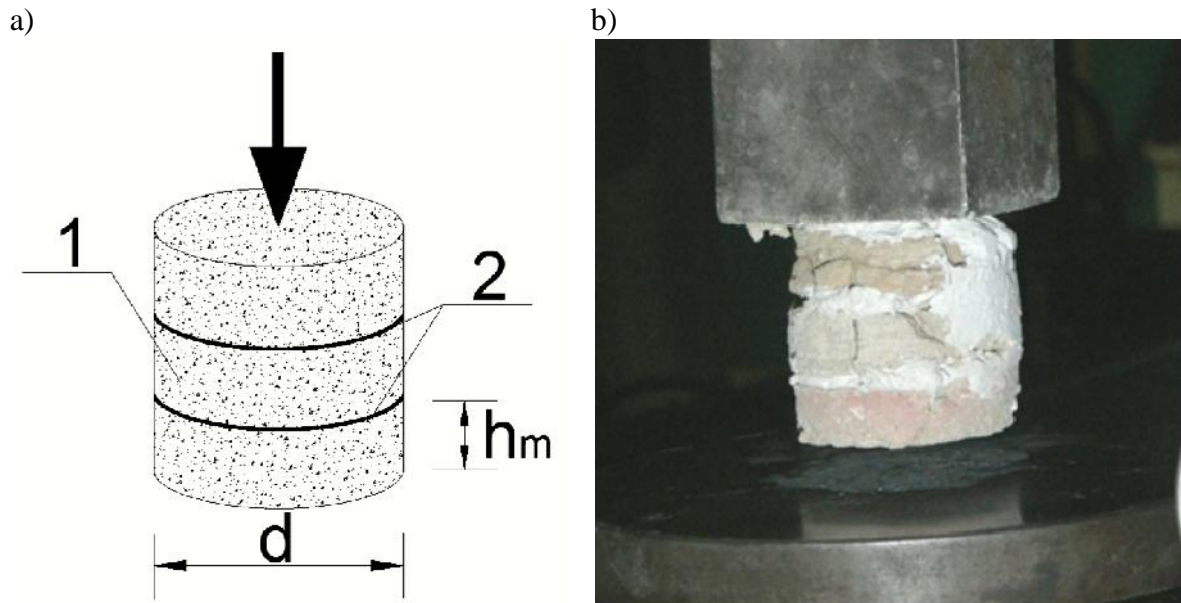
6.4. Określenie wytrzymałości zaprawy na próbkach walcowych

Warunki dojrzewania i twardnienia zaprawy w konstrukcji murej są odmienne od warunków podanych w zaleceniach normowych, zatem wytrzymałości zaprawy w murze nie można ustalić z wytrzymałości określonej na próbkach normowych [127]. Zaprawa podczas wznoszenia konstrukcji murej, po ułożeniu zostaje dociśnięta kolejnymi warstwami cegieł, charakteryzującymi się różnymi właściwościami do absorbowania wody.

Należy pamiętać, iż odniesienie wyników badania wytrzymałościowych przeprowadzonych na próbkach słabszych zapraw (o wytrzymałości ok 1,0 MPa) wyciągniętych ze spoin istniejących konstrukcji do wytrzymałości normowej zgodnie z [127] może okazać się niemożliwe. Nie ma bowiem możliwości określenia jak wytrzymałość f_m miała zaprawa ułożona kilkadziesiąt, czy kilkaset lat temu.

Przytoczone w rozdziale 5 metody badania zaprawy mają liczne mankamenty, w związku z czym autor niniejszej rozprawy podjął próby udoskonalenia tych metod. Nawigując do badania według schematu przedstawionego na Rys. 5.7, autor stwierdza, iż objętość próbki jest za mała w porównaniu z próbkami normowymi (Rys. 5.1). Zjawisko to (efekt skali) może mieć znaczny wpływ na miarodajność otrzymywanych wyników w odniesieniu do rzeczywistej wytrzymałości zaprawy na ściskanie (Tablica 5.2).

W związku z powyższym autor niniejszej rozprawy proponuje badanie próbki w postaci walców wykonanych z wyciągniętych z zaprawy 3–4 kręgów o średnicy 50–60 mm i połączonych między sobą własiwym spoiwem (Rys. 6.10). Tego typu próbki są łatwiejsze w wykonaniu, posiadają bardziej stabilne i jednolite wymiary niż podobne im próbki przedstawione na Rys. 5.7.



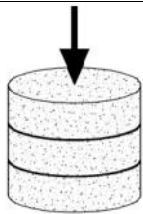
Rys. 6.10 Badania próbek walcowych wykonanych z połączonych między sobą kręgów zaprawy o grubości h_m : a) schemat badania (1 – zaprawa, 2 – spoiwo łączące), b) przeprowadzane badanie



Rys. 6.11 Próbki zaprawy przygotowane do badania wytrzymałości według metody własnej

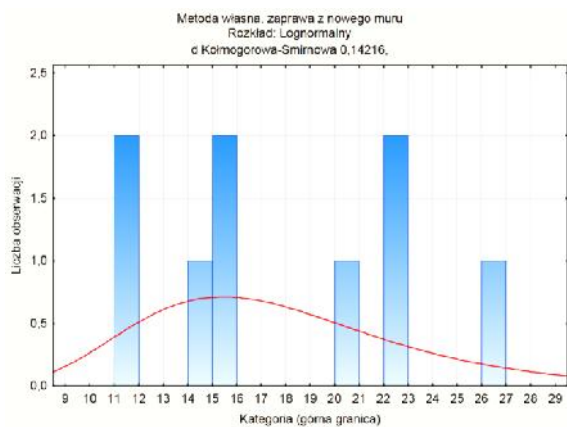
Warto nadmienić, że skala tak przygotowanych próbek jest zbliżona do skali normowych próbek zaprawy (połówek beczek 40x40x160 mm). Badaniom według opisywanej metody poddano dwie serie różnych zapraw. Pierwsza pochodziła ze specjalnie wykonanego muru, kolejna została pobrana podczas wyburzania szpecińskiej kamienicy (Rys. 4.3). Wyniki badań przedstawia Tablica 6.5, a wyniki analiz statystycznych Rys. 6.12.

Tablica 6.5 Badanie wytrzymałości na ciśnienie metodą własną zaprawy: z nowo wykonanego muru (a) oraz z wyburzonej kamienicy (b)

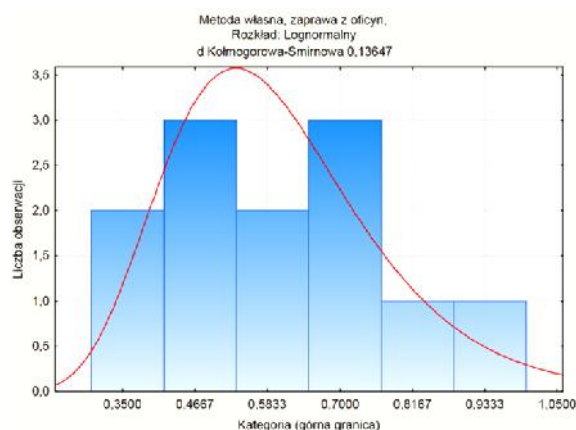
L.p.	Schemat badania	Liczba próbek [szt.]		Wytrzymałość średnia [MPa]		Odchylenie standardowe [MPa]		95% przedział ufności [MPa]		Współczynnik zmienności [%]	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1		9	12	17,8	0,6	5,4	0,17	10,3	0,3	30	28

Dla histogramów na Rys. 6.12 wartość statystyki testowej wynosi $D = 0,142$ (a) oraz $D = 0,136$ (b). Wartość krytyczna testu wynosi $D_n(\alpha=0,05;n=9)=0,430$ (a) oraz $D_n(\alpha=0,05;n=12)=0,375$ (b). Ponieważ $D < D_n$, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 zakładającej zgodność rozkładu z rozkładem logarytmiczno-normalnym (przy poziomie istotności równym 0,05).

a)



b)

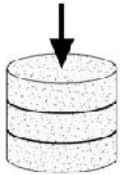
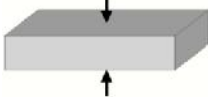


Rys. 6.12 Histogramy i rozkłady statystyczne wyników badania wytrzymałości na ciśnienie według schematu przedstawionego na Rys. 6.13 dla zaprawy z nowo wykonanego muru (a) oraz z wyburzonej kamienicy (b)

Porównując wartości wytrzymałości zaprawy uzyskane na próbkach walcowych (Rys. 5.10) i próbkach sześciennych (Rys. 5.7) można stwierdzić, że w pierwszym przypadku wytrzymałość była średnio o 25% mniejsza. Dla próbek walcowych również rozrzut statystyczny wyników był mniejszy. Dotyczy to zwłaszcza starej wapiennej zaprawy, dla której współczynnik zmienności wynosił 28 (Tablica 6.5), a dla próbek sześciennych 54

(Tablica 5.3). Prawdopodobnie wynika to z kształtu próbek walcowych i ich bardziej dokładnych wymiarów. Tablica 6.6 przedstawia wyniki badań zaprawy według ustaleń normowych [127] oraz tej samej zaprawy badanej na próbkach według schematu przedstawionego na Rys. 6.10. Próbkę tę wykonano z wyizolowanych placków zaprawy ze spoin poziomymi specjalnie wykonanych murków.

Tablica 6.6 Porównanie wyników badań próbek zaprawy z nowo wykonanych murków z wynikami badań zaprawy według ustaleń normowych

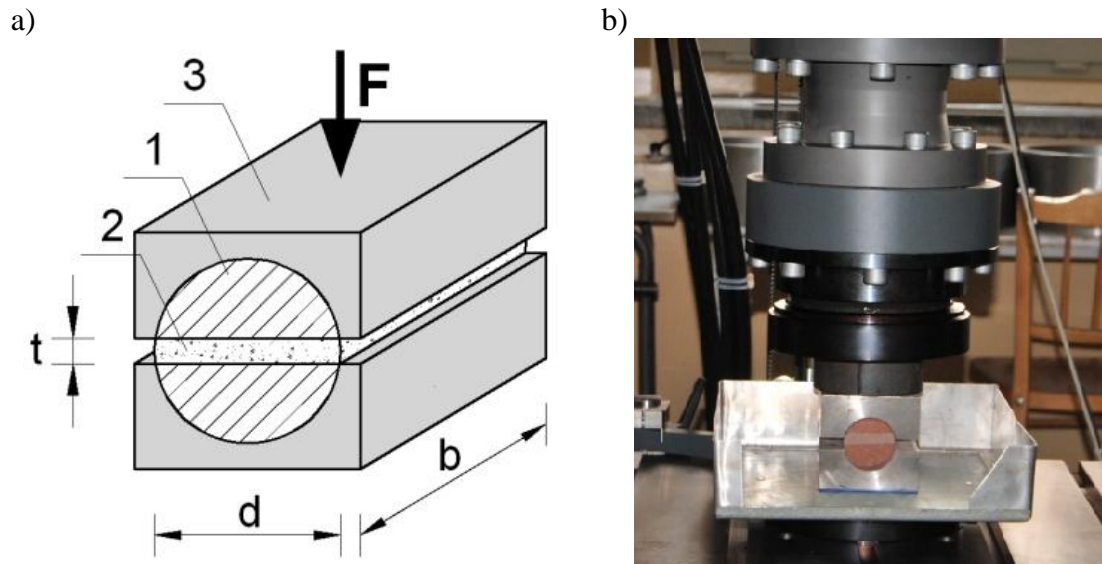
L.p.	Schemat badania	Liczba próbek [szt.]	Wytrzymałość średnia [MPa]	Odchylenie standardowe [MPa]	95% przedział ufności [MPa]	Współczynnik zmienności [%]
1		9	17,8	5,4	10,3	30
2		30	8,0	1,4	1,9	18

Z porównania otrzymanych wyników badań wartości współczynnika korelacji pomiędzy metodami badawczymi 1 i 2 (Tablica 6.6) można ustalić na poziomie około 0,45.

6.5. Ocena wytrzymałości zaprawy na próbkach zespolonych

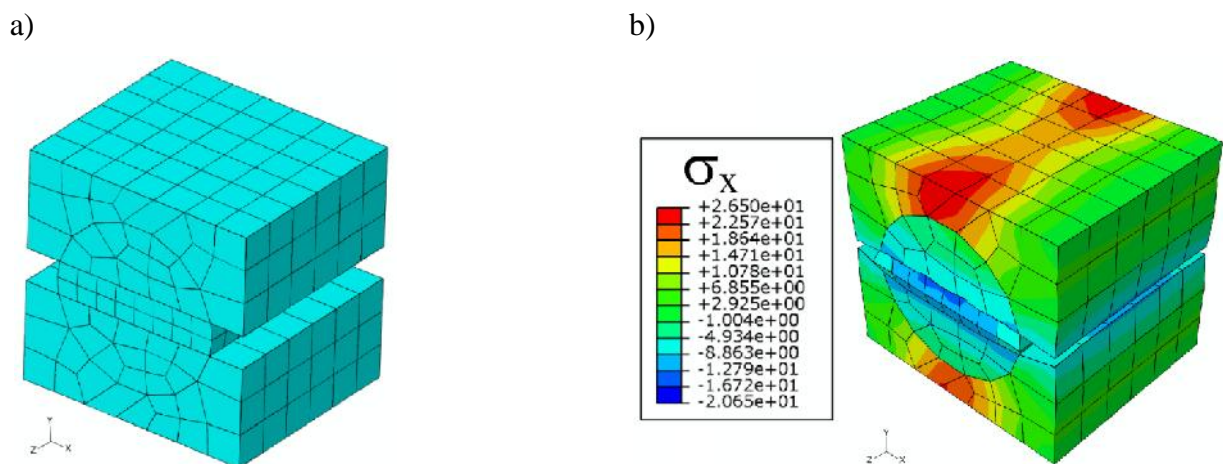
Mankamentem opisywanej w punkcie 6.4 metody, jak również według metod przedstawionych na Rys. 5.7 oraz Rys. 5.8 może być utrudnienie pobrania próbek zaprawy z muru oraz ich przygotowanie do badań niszczących. Dotyczy to zwłaszcza słabych wapiennych zapraw o wytrzymałości poniżej 1,0 MPa lub zapraw posiadających duże przyczepności do elementów murowych. W przypadkach tych może być przydatna opracowana przez autora niniejszej rozprawy metoda badań na próbkach zespolonych [99]. Próbkę za pomocą wiertnicy koronkowej wycina się prostopadle do lica muru tak, aby jej przekrój zawierał dwa segmenty cegły ze spoiną wspornymi [76]. Badanie

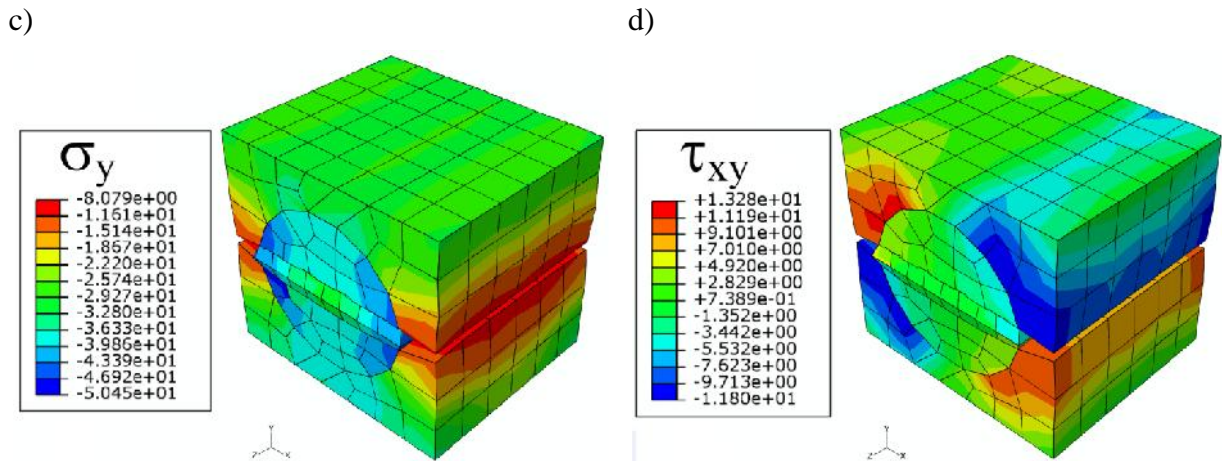
wykonuje się w sztywnych obejmach stalowych o wewnętrznej średnicy d równej średnicy próbki walcowej (Rys. 6.14). Tej metodzie decyzją Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej został udzielony patent na wynalazek [103] - Załącznik Z1 niniejszej rozprawy.



Rys. 6.14 Badanie zaprawy na wyciętych z muru próbkach zespolonych:
1 - cegła, 2 - spoina o grubości t , 3- obejmę stalowe

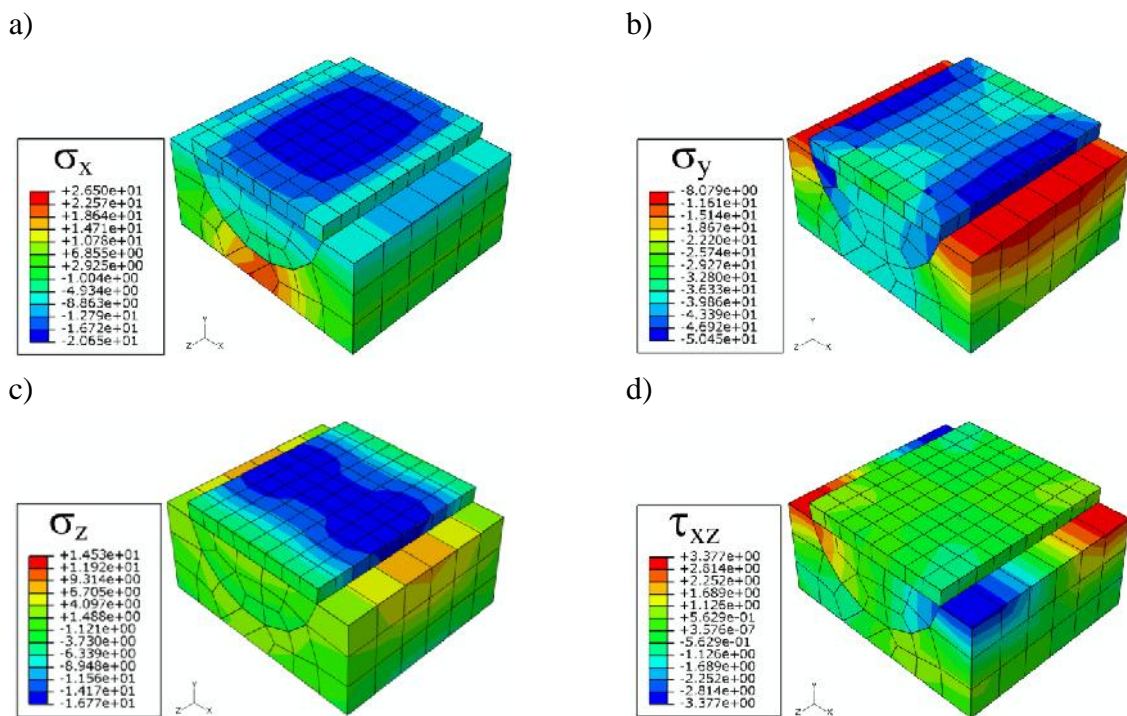
Podczas obciążania zachowanie się zaprawy zbliżone jest do jej pracy w spoinach poziomych, gdy w zaprawie występuje trójosiowy stan ciskania z uwagi na jej przyczepność i tarcie między segmentami cegły (Rys. 3.3). Natomiast wielkość poprzecznych naprężeń ciskających zależy w tym przypadku od grubości spoiny, odkształcalności zaprawy, odkształcalności elementu murowego oraz sił tarcia na styku cegła - zaprawa. Na Rys. 6.15 przedstawiono wyniki badań numerycznych próbki zespolonej, wykonane przez autora z wykorzystaniem oprogramowania Abaqus.





Rys. 6.15 Schemat obliczeniowy MES (a) próbki zespolonej w objętości stalowej według Rys. 6.14a wraz z rozkładem napr e τ_x (b), τ_y (c) oraz τ_{xy} (d)

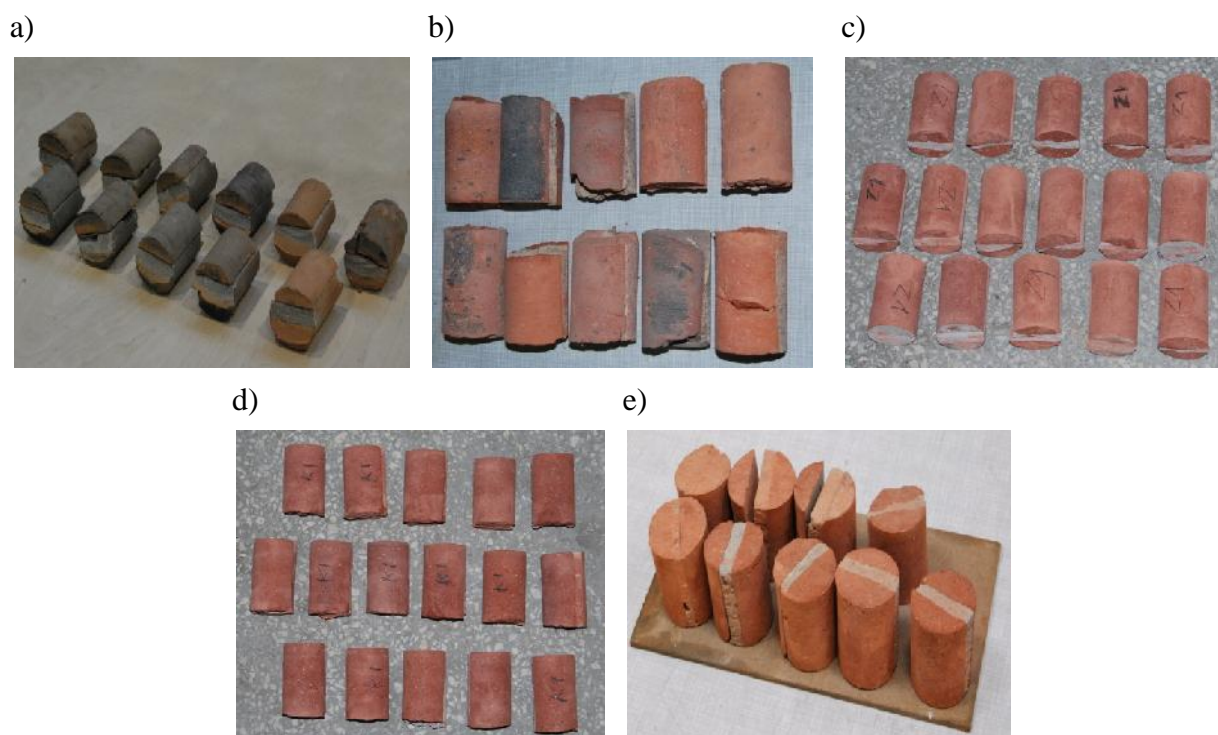
Z analizy rozkładu napr e τ_y , τ_x , oraz τ_{xy} w czołowej cz ci próbki zespolonej w płaszczy nie xy wynika, e zaprawa pracuje w dwuosiowym stanie ciskania. Natomiast na kraw dziach próbki w miejscach styku segmentów cegły z zaprawą powstają napr enia styczne τ_{xy} . Ponieważ segmenty cegły znajdują się w stalowych obejmach, które ograniczają ich odkształcenia w kierunku x i y , w segmentach tych w płaszczy nie xy powstaje dwuosiowy stan ciskania. Na Rys. 6.16 przytoczono stan napr e w zaprawie panującej w jej poziomej płaszczy nie rodkowej xz (prostopadłej do kierunku obciążenia według Rys. 6.14a.



Rys. 6.16 Stan napr e w płaszczy nie rodkowej xz zaprawy w próbce zespolonej: a) napr enia τ_x , b) napr enia τ_y , c) napr enia τ_z , d) napr enia, oraz τ_{xz}

Z analizy rozkładów napr σ_x , σ_z oraz, τ_z wynika, że zaprawa na całej swej objętości pracuje w stanie trójosiowego ściskania tzn. podobnie jak w murze (Rys. 3.3). W celu weryfikacji przyjętych założeń autor niniejszej rozprawy przeprowadził badania zaprawy na próbkach zespolonych.

Próbki do badań do wiadczalnych pobrano za pomocą wiertła koronkowego o średnicy 50 mm w kierunku prostopadłym do łoża specjalnie przygotowanych murków na zaprawach, które różniły się deklarowaną przez producenta wytrzymałością na ściskanie. Konstrukcje starano się wykonać, tak aby grubość spoiny wspornej była jednakowa w każdym z nich i wynosiła ok. 10 mm. Próbki udało się pobrać również ze ścian murowych wyburzanego obiektu byłej Fabryki Papieru "Szczecin - Skolwin" (Rys. 4.5). Próbki rdzeniowe odwiercono za pomocą wiertnicy mechanicznej wyposażonej w wiertło koronkowe o średnicy 50 mm, następnie przewieziono do laboratorium i pielęgnowano do stanu powietrzno - suchego. Prawie we wszystkich próbkach spoina pozioma usytuowana między segmentami cegły została zachowana bez naruszania struktury zaprawy i przyczepności do cegły (Rys. 6.17). Próbki poddano badaniu na automatycznej prasie hydraulicznej wyposażonej w oprogramowanie Zwick/Roell TestXpert II (Rys. 6.14b). Podczas badań rejestrowano odkształcenia pionowe pomiędzy obejmami stalowymi.



Rys. 6.17 Próbki rdzeniowe zespolone pobrane z muru do badań wytrzymałości zaprawy na ściskanie według metody własnej: a) z murków wykonanych na zaprawie VM01, b) ze ścian murowych Papierni "Szczecin - Skolwin", c) z murków wykonanych na zaprawie Z01, d) z murków wykonanych na zaprawie K01, e) z murków wykonanych na zaprawie M7

Wytrzymałość zaprawy w próbkach walcowych określono ze wzoru:

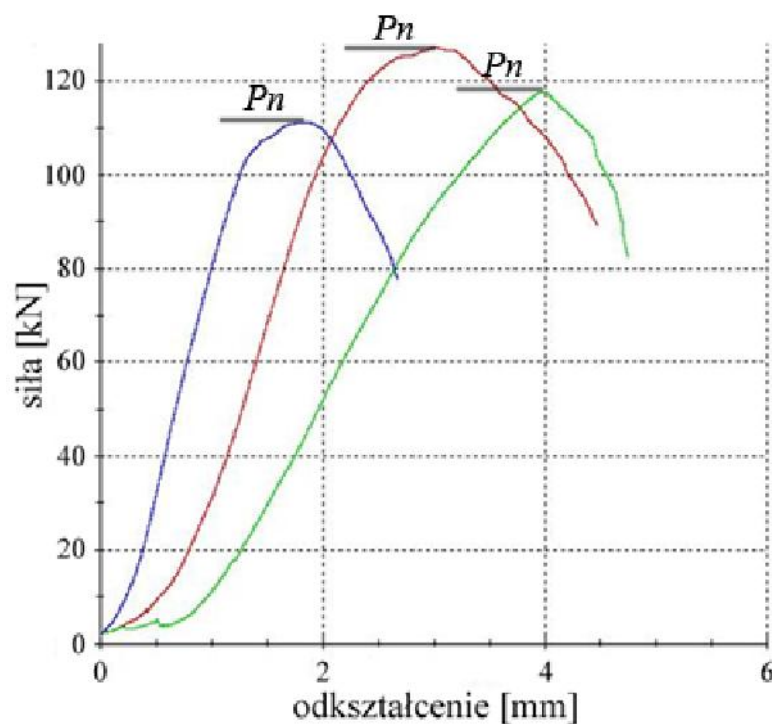
$$f_m^* = \frac{P_n}{db} \quad (6.3)$$

gdzie:

P_n – maksymalne obciążenie niszczeniowe wyznaczone z wykresu przedstawionego na Rys. 6.18,

d – wymiar przekroju poprzecznego,

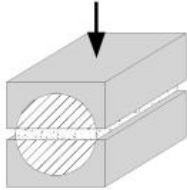
b – długość linii styku próbki.



Rys. 6.18 Wybrane zależności pomiędzy siłami ścisającymi P_n , a odkształceniami pionowymi dla obejmami stalowymi według schematu przedstawionego na Rys. 6.14

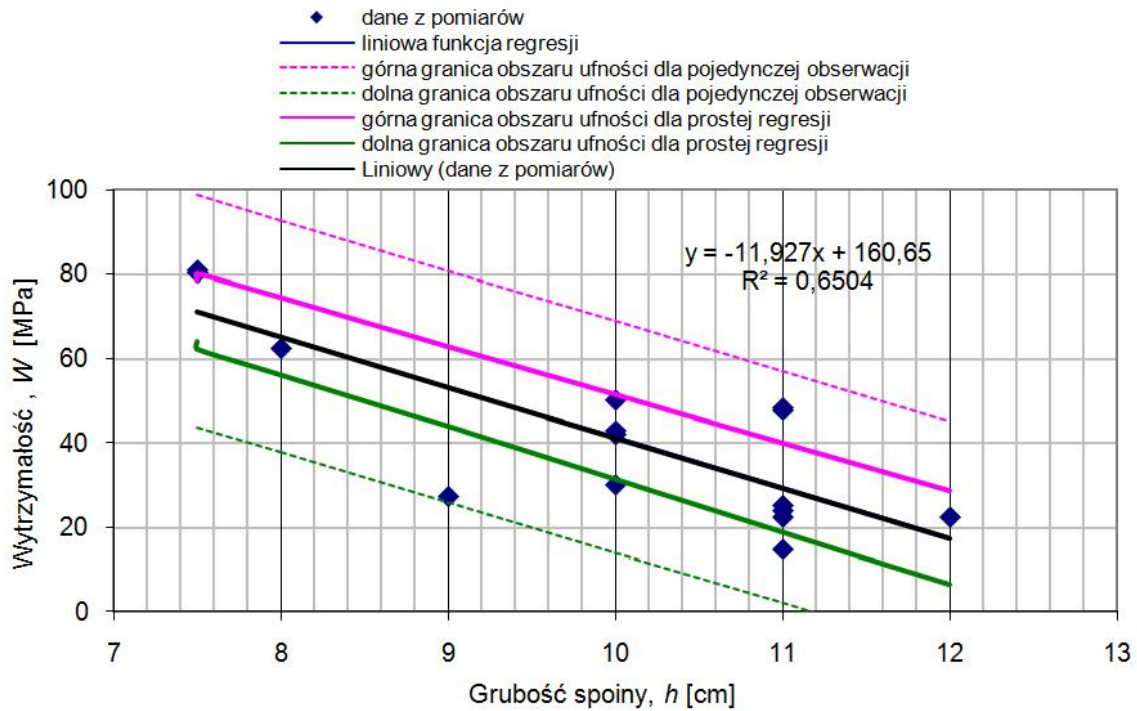
Uzyskane wytrzymałości zaprawy obliczone wg omawianej metody ze wzoru (6.3) przedstawiono w Tablicy 6.7.

Tablica 6.7 Wyniki bada wytrzymało ci zapraw na ciskanie na próbkach zespolonych: z murków wykonanych na zaprawie VM01 (a), ze cian murowych Papierni "Szczecin - Skolwin" (b), z murków wykonanych na zaprawie Z01 (c), z murków wykonanych na zaprawie K01 (d), z murków wykonanych na zaprawie M7 (e)

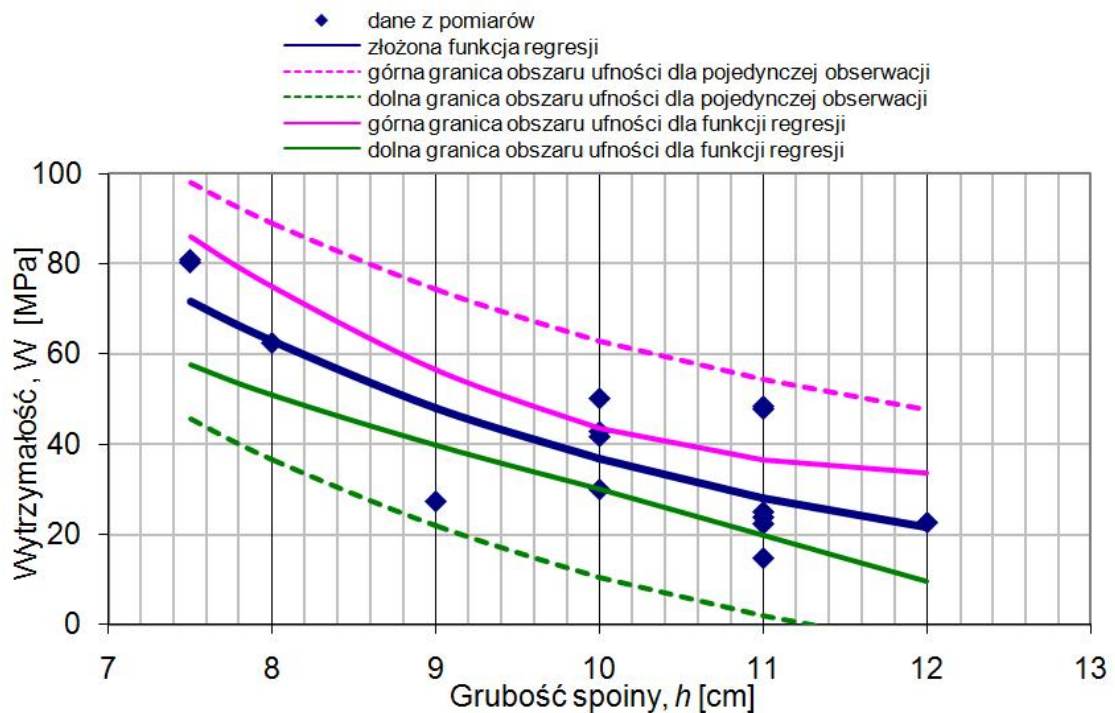
L.p.		Badana zaprawa				
		a	b	c	d	e
1	Liczba próbek [szt.]	15	10	16	16	10
2	Wytrzymało rednia [MPa]	41,4	49,7	75,7	60,8	71,9
3	Odchylenie standardowe [MPa]	20,7	36,9	20,6	17,9	12,9
4	95% przedział ufno ci [MPa]	32,7	67,3	32,0	27,8	26,6
5	Współczynnik zmienno ci [%]	50	74	27	30	18

Podczas bada stwierdzono, e zaprawy wapienne o mniejszych wytrzymało ciach ni cementowe posiadaj zupełnie inny mechanizm zniszczenia - zdecydowanie bardziej plastyczny.

Uzyskane wyniki bada wytrzymało ci zaprawy na próbkach walcowych uzale nione były od jej grubo ci. Potwierdzono t zale no w analizach statystycznych. Test serii potwierdził, e zale no wytrzymało ci od jej grubo ci mo e by zale no ci liniow . W danym przypadku otrzymano najwy szy współczynnik determinacji równy $R^2=0,65$ (Rys. 6.19). W danym przypadku wszystkie dane otrzymane w trakcie bada mieszcz si w obszarze ufno ci dla pojedynczej obserwacji. W dalszych analizach otrzymano tak e zale no wykładnicz o mniejszym współczynniku determinacji równym $R^2=0,55$ (Rys. 6.20, krzywa dla zaprawy partii a - Tablica 6.7). W odniesieniu do obu zale no ci przeprowadzono badania redniokwadratowego bł du aproksymacji i otrzymano, e przy zale no ci liniowej s znacznie wi ksze warto ci odchylenia standardowego, warto ci redniej i maksymalnej redniokwadratowego bł du aproksymacji ni przy zale no ci wykładniczej, co pozwoliło ostatecznie przyj zale no w postaci $W = 534,12e^{-0,2675d}$.



Rys. 6.19 Wyniki analizy statystycznej wpływu grubości spoiny na wytrzymałość zaprawy dla partii a (zależność liniowa)



Rys. 6.20 Wyniki analizy statystycznej wpływu grubości spoiny na wytrzymałość zaprawy dla partii a (zależność wykładnicza)

Tablica 6.8 Porównanie wyników badań wytrzymałości zaprawy na próbkach zespolonych w odniesieniu do wyników wytrzymałości na ściskanie na próbkach normowych: z murków wykonanych na zaprawie VM01 (a), z murków wykonanych na zaprawie Z01 (c), z murków wykonanych na zaprawie K01 (d), z murków wykonanych na zaprawie M7 (e)

L.p.	Schemat badań	na próbkach standardowych		na próbkach wg Rys. 6.14		$k_m = \frac{f_m^*}{f_m}$
		liczba próbek	f_m [MPa]	liczba próbek	f_m^* [MPa]	
1	a	30	8,0	15	41,4	5,2
2	c	30	9,0	16	75,7	8,4
3	d	30	29,5	16	60,8	2,1
4	e	65	24,7	10	71,9	2,9

Porównanie wyników badań w postaci zależności współczynnika korelacji k_m , z którego wynika, iż uzyskana na próbkach zespolonych wytrzymałość zaprawy jest średnio o 4,65 razy większa niż wytrzymałość próbek normowych.

Największą wytrzymałość uzyskano podczas badań odwiertów pobranych z muru, (których wyniki przedstawiono w punkcie 6.4). Uzyskane wartości wytrzymałości dla obu zapraw są średnio o 4,3 razy większe od wytrzymałości otrzymanej z badań próbek według schematu jak na Rys. 6.10. Natomiast wytrzymałość zaprawy uzyskana na próbkach według Rys. 5.7 była średnio o 1,4 razy większa niż na próbkach według Rys. 6.10.

Warto zaznaczyć, że relacje wytrzymałości dla starej wapiennej i nowej cementowej zaprawy mało różniły się między sobą. Znacznie większe zróżnicowanie zaobserwowano między wytrzymałościami obu zapraw (w odniesieniu do próbek Rys. 6.10) badanych według schematu przedstawionego na Rys. 5.8). W przypadku tym, wytrzymałość cementowej zaprawy była o 1,8 razy, a wapiennej o 4,3 razy większa w porównaniu z wytrzymałościami próbek (przedstawionych na Rys. 6.14). Współczynnik zmienności wytrzymałości wapiennej zaprawy w tym testie był równie największy (103%). Mogło to być skutkiem zróżnicowania grubości wyizolowanych z muru płytek zaprawy: grubość spoin z zaprawy cementowej wynosiła $h_m=10\pm 1$ mm, natomiast z zaprawy wapiennej 12–20 mm. Poza tym, mechanizm niszczenia próbek z cementowej zaprawy był bardzo kruchy, natomiast z zaprawy wapiennej był lepko-plastyczny.

6.6. Weryfikacja niekonwencjonalnych metod badawczych

Najbardziej wiarygodne i najbliższe rzeczywistości wyniki badań uzyskuje się na podstawie wytrzymałości muru określonej w badaniach bezpośrednich, a różnice w otrzymywanych wynikach mogą być konsekwencją specyfiki zastosowanej metody badawczej.

Analizując wyniki otrzymywane jedynie na podstawie badań elementów murowych, stwierdza się, iż różnice w oszacowaniu nośności muru. Dużym błędem jest niepewność w oszacowaniu wytrzymałości elementów murowych i zaprawy oraz zastosowanie szacowanych zależności określających koligacje pomiędzy wytrzymałością muru, a tymi wielkościami. Pamiętajcie o dużej niejednorodności materiału w murze, analizując nośność konstrukcji murowej jako uzupełnienie dla badań niszczących powinno się równocześnie prowadzić badania nieniszczące. Autor [53] proponuje przyjmowanie współczynnika bezpieczeństwa materiałowego χ_M w analizie istniejących konstrukcji murowych, uwzględniając zakres i metody podjętych badań, ponieważ decyduje to o wielkości błędów w ostatecznej ocenie wytrzymałości muru. Optymalnym rozwiązaniem byłoby użycie zastosowania różnych metod badawczych, co pozwoliłoby na zminimalizowanie błędów w ostatecznej ocenie nośności konstrukcji (Tablica 6.9).

Tablica 6.9 Proponowane wartości współczynnika χ_M w obliczeniach istniejących konstrukcji murowych [53]

L.p.	Metoda badania wytrzymałości muru	χ_M
1	Badania na prostopadłościennych próbkach murów	1,8
2	Badania flat - jack	2,2
3	Ocena wytrzymałości muru na podstawie badań cegieł i zaprawy oraz pomiarów geometrii struktury wewnętrznej muru):	
	– wytrzymałość cegieł i zaprawy ustalana jest w badaniach bezpośrednich w laboratorium na próbkach pobranych z konstrukcji, – wytrzymałość cegieł i zaprawy ustalana na podstawie badań niszczących.	2,5 3,0

Z analizy danych, które prezentuje Tablica 6.9 wynika, że najbardziej miarodajne są wyniki badań uzyskane na próbkach wyciętych bezpośrednio z muru jak np. na Rys. 2.5. Metoda ta jednak jest kosztowna i związana ze zniszczeniem istniejących konstrukcji murowych. Najtańszą jest metoda oparta na badaniach niszczących składników muru, lecz

jej wyniki są mniej miarodajne, co w konsekwencji prowadzi do konieczności wprowadzenia dodatkowych (prawie o 2 razy) współczynników bezpieczeństwa. Z tego wynika wybór właściwej metody badawczej wiąże się z dokonaniem pewnego kompromisu pomiędzy kosztami badań, a ich miarodajnością.

Autor niniejszej rozprawy przeprowadził badania wytrzymałości fragmentów muru z kamienicy w Szczecinie, które po około 100 lat eksploatacji podlegały rozbiórce (Rys. 2.4). Ze ścian działowych o grubości 12 cm za pomocą piły tarczowej wycięto fragmenty o wymiarach 54x50 cm, czyli zbliżonych do normowych próbek murowych (Rys. 2.5). Następnie próbki przygotowano do badań wytrzymałościowych poprzez wyrównanie powierzchni styku z prasą. Tak przygotowane fragmenty muru poddano badaniu wytrzymałości na ściskanie na prasie hydraulicznej z siłownikiem sterowanym ręcznie. W celu rzetelnego odczytu wartości w czasie rzeczywistym zastosowano siłomierz we współpracy z mostkiem tensometrycznym. Widok stanowiska badawczego przedstawia Rys. 6.23.

a)



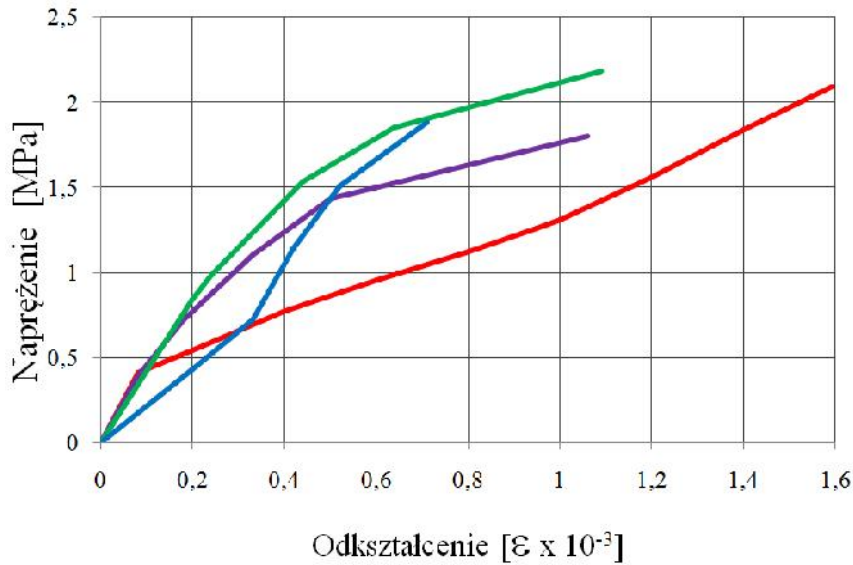
b)



Rys. 6.21 Badanie wytrzymałości na ściskanie fragmentu muru próbki pobranej z wyburzanej kamienicy

Niszczenie fragmentów muru nastąpiło nie poprzez rozłupywanie na poszczególne słupki (mechanizm klasyczny), lecz poprzez rozdrabnianie, któremu towarzyszyło spkanie cegieł w wyniku ich rozciągania przy zginaniu (Rys. 3.1). Wartość średnia wytrzymałości badanych próbek wyniosła $f_{k,mean} = 2,0$ MPa, natomiast modułu sprężystości E ok. 2600 MPa.

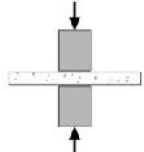
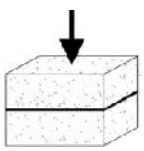
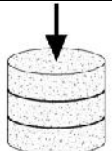
Na Rys. 6.22 przedstawiono wykresy odkształceń pionowych omawianych próbek murowych podczas ich ściskania aż do finalnego zniszczenia.



Rys. 6.22 Wykresy odkształce wybranych próbek murowych poddanych ciskaniu według schematu przedstawionego na Rys. 6.21

Tablica 6.10 przedstawia wyniki określenia wytrzymałości muru f_k według wzorów (2.7) i (2.8) oraz ich porównanie z wytrzymałości $f_{k,mean}$ badanych próbek murowych (Rys. 6.21). We wzorach tych stosowano wartości wytrzymałości cegły wg danych Tablicy 4.2 oraz wytrzymałości zaprawy uzyskane wg różnych schematów badań podanych w Tablicy 6.10.

Tablica 6.10 Wyniki określenia wytrzymałości muru na podstawie laboratoryjnych badań wytrzymałości cegły i zaprawy oraz ich porównanie z wytrzymałości $f_{k,mean}$ próbek murowych wyciętych z ciał działowych kamienicy

Schemat badania	Wytrzymałość zaprawy na ciskanie $f_{m, mean}$ [MPa]	Wytrzymałość muru na ciskanie f_k wg wzoru (2.7) [MPa]	$\frac{f_k}{f_{k,mean}}$	Wytrzymałość muru na ciskanie f_k wg wzoru (2.8) [MPa]	$\frac{f_k}{f_{k,mean}}$
	1,3	2,9	1,4	2,4	1,2
	0,7	2,4	1,2	2,2	1,1
	0,6	2,3	1,1	2,2	1,1

Z analizy danych Tablicy 6.10 widać, że wartość wytrzymałości zaprawy różnymi metodami różni się między sobą. Natomiast jak wynika z zależności (2.7) błęd w ocenie wytrzymałości zaprawy ma znacznie mniejszy wpływ na wytrzymałość muru niż błęd w ocenie wytrzymałości cegły.

Największe błędności wytrzymałości próbek murowych, a wynikami obliczeń uzyskano przy zastosowaniu wzoru (2.8). Lepsze wyniki otrzymano przy obliczeniach z zastosowaniem wytrzymałości zaprawy uzyskanej z badań próbek o zaproponowanym przez autora niniejszej rozprawy kształcie (Rys. 6.10). Warto nadmienić, że rzeczywista wytrzymałość muru była mniejsza niż określona ze wzorów (2.7) i (2.8). Może to być związane z wpływem innych czynników na wytrzymałość muru ciał działowych wyburzanej kamienicy, z których pobierano próbki murowe (np. mikrospłaskanie, różnica grubości, zróżnicowanie grubości spoin itp.).

Na wytrzymałość pobranych z murków próbek z pewnością miały wpływ również czynniki związane z technologią pobierania i ich przygotowania do badań. Według pracy [59] na zmniejszenie wytrzymałości muru uzyskiwanej podczas badań próbek pobranych z murów istniejących mają: efekt odcięcia próbki podczas pobierania oraz uszkodzenia powstałe podczas samego pobierania materiału do badań.

Na potrzeby niniejszej rozprawy weryfikacji metod badawczych wykonano również na podstawie wyników badań wytrzymałościowych specjalnie przygotowanych próbek murowych o wymiarach normowych 50x50x12 cm. Murki te wykonano z nowej cegły dostarczonej z zakładu ceramicznego na gotowej zaprawie cementowej (Rys. 6.23). Następnie przeprowadzono analogiczne badania jak dla wymienionych wyżej fragmentów muru z wyburzanej kamienicy.

Rzeczywista średnia wytrzymałość na ściskanie próbek murowych była większa od wytrzymałości f_k określonej wzorem zarówno (2.7) jak i (2.8). Wartość średnia wytrzymałości badanych próbek murowych wyniosła $f_{k,mean} = 11,8$ MPa. Tablica 6.11 przedstawia zestawienie wyników otrzymanych badań.

a)

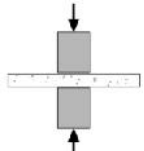
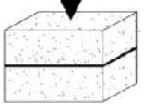
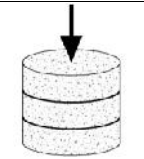
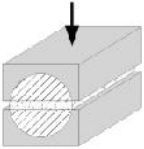


b)



Rys. 6.23 Badanie wytrzymałości na ciśnienie fragmentów nowo wykonanego muru

Tablica 6.11 Wyniki określenia wytrzymałości muru na podstawie laboratoryjnych badań wytrzymałości cegły i zaprawy oraz ich porównanie z wytrzymałości $f_{k,mean}$ dla nowo wykonanych fragmentów muru

Schemat badania	Wytrzymałość zaprawy na ciśnienie $f_{m, mean}$ [MPa]	Wytrzymałość muru na ciśnienie f_k wg wzoru (2.7) [MPa]	$\frac{f_k}{f_{k,mean}}$	Wytrzymałość muru na ciśnienie f_k wg wzoru (2.8) [MPa]	$\frac{f_k}{f_{k,mean}}$
	32,6	10,7	0,9	7,0	0,6
	23,5	9,7	0,8	6,6	0,6
	17,8	8,9	0,8	6,2	0,5
	71,9	13,6	1,2	7,7	0,7

Analizując wyniki wytrzymałości zaprawy uzyskane różnymi metodami badawczymi oraz wartości współczynników korelacji wytrzymałości muru określonej dwoma

przytoczonymi wzorami (2.7) i (2.8) w odniesieniu do wytrzymałości $f_{k,mean}$ dla nowo wykonanych fragmentów muru, można stwierdzić, iż najlepsze wartości uzyskano w zależności ze wzorem (2.8). Uzyskano bardzo zbliżone wartości współczynników korelacji od 0,52 do 0,65. Biorąc pod uwagę niejednorodność materiałów użytych do wykonania murków, uzyskane wyniki współczynników korelacji można uznać za dobre, natomiast sama procedura badawcza za bardzo pomocne narzędzie w określaniu wytrzymałości konstrukcji murowych.

7. WNIOSKI

Przedstawione w rozprawie analizy i badania pozwalają na sformułowanie następujących jednoznacznych wniosków i spostrzeżeń.

Udowodniono postawioną w rozprawie tezę, iż miarodajna ocena wytrzymałości na ściskanie konstrukcji murowych może być dokonana na podstawie wiedzy o wytrzymałości cegły i zaprawy określonych badaniami *in situ* w tym metodami niekonwencjonalnymi.

Na podstawie obszernej i wszechstronnej analizy stanu wiedzy w literaturze tematu wykazano, iż brak jest jednolitych i uniwersalnych metod oceny wytrzymałości muru jako materiału konstrukcyjnego w eksploatowanych obiektach budowlanych.

Metody małoniszczące i nieniszczące określania wytrzymałości muru mogłyby stosowane do orientacyjnego jej oszacowania. Bardziej miarodajne wyniki dają metody niszczące, które jednak związane są z uszkodzeniem konstrukcji i znacznymi kosztami badań.

Najbardziej przydatna jest metoda określania wytrzymałości muru oparta na badaniach składowych muru - elementów murowych i zaprawy. Jej zakres powinien być uzależniony przede wszystkim od wymaganej dokładności oszacowania parametrów charakteryzujących wytrzymałość konstrukcji.

Zastosowanie metody sklerometrycznej może być jedynie pomocnicze przy oszacowaniu jednorodności elementów murowych w murze, a nie brano pod uwagę przy określaniu faktycznej ich wytrzymałości.

Metody określania wytrzymałości cegły na rozciąganie poprzez rozłupywanie i na ściskanie próbek walcowych ze względu na zbyt duży rozrzut otrzymywanych wyników badań nie są zalecane do praktycznego stosowania.

Zaproponowano własne metody badawcze określania wytrzymałości elementów murowych i zaprawy - na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, iż mogą to być bardzo przydatne narzędzia do badań w tym i badań *in situ*.

Przedstawione przez autora rozprawy wyniki różnymi metodami pozwalają na dobranie odpowiedniej metody do oceny nośności konstrukcji murowych. Należy jednak

pamięta, i każda konstrukcja należy analizować indywidualnie, gdy nie ma rozwiązań uniwersalnych pozwalających jednoznacznie ocenić ich wartość.

Praktycznie zastosowano wyniki badań przy określaniu wytrzymałości murów na potrzeby modernizacji i przebudowy kilku kamienic z okresu międzywojennego w Szczecinie.

Decyzją Urzędu Patentowego RP wdrożono w życie dwa patenty na wynalazek (nr ew. 33-S-11 oraz 15-S-13).

Program dalszych badań

W dalszych badaniach autor planuje:

- rozszerzy badania dla wielu kombinacji elementów murowych i zapraw, co w połączeniu z dokładnymi analizami statystycznymi pozwoli na odpowiednie skalibrowanie zaproponowanych metod,
- oszacować wpływ czynników środowiskowych na wytrzymałość muru,
- oszacować wpływ skażenia środowiska na szybkość procesu degradacji murów.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Atkinson R.H.; Noland J.L.; Kingsley G.R., *Application of NDE to Masonry Structures*. Conservation of Historic Brick Structures, Donhead Publishing Ltd, 1998.
- [2] Baria, G., Rossi, P.P., *Stress Measurements in Tunnel Linings*. ISMES Publication No. 190, 1983.
- [3] Benedetti A., Pela L., Aprile A. *Masonry Property Determination via Splitting Tests on Cores with a Rotated Mortar Layer*. In: Proc. 8th International Seminar on Structural Masonry Istanbul, 647-655 2008.
- [4] Benedetti A., Pela L. *Experimental characterization of mortar by testing on small specimens*. In: Proc. 15th International Brick and Block Masonry Conference Florianopolis 2012.
- [5] Binda L., Saisi A., Tiraboschi C. *Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries*. Construction and Building Materials 14 (4) 199-233 2000.
- [6] Borusiewicz W. *Budownictwo murowane w Polsce. Zarys sztuki strukturalnego kształtowania do ko ca XIX wieku*. PWN, Kraków 1985.
- [7] Brunarski L., *Badania ultradźwiękowe i wytrzymałość ciowa gazobetonów*. Archiwum Inżynierii Lądowej 1960, t. VI, vol. 1, s. 117 - 145
- [8] Brunarski L. *Diagnostyczne metody badań budowli*. W: XXXVIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1992, t.5, s. 11 - 20
- [9] Brunarski L.: *Ewolucja normowych kryteriów oceny wytrzymałości betonu na ściskanie*. Prace Instytutu Techniki Budowlanej 1990, z. 1 - 2, s. 3 - 14
- [10] Brunarski L., Runkiewicz L., *Podstawy i przykłady stosowania metod nieniszczących w badaniach konstrukcji z betonu*. Prace naukowe Instytutu Techniki Budowlanej. Seria Monografie, rok XXXVIII, Warszawa 1983.
- [11] Christiansen P.D.V. *In situ determination of the compressive strength of mortar joints using an X-drill*. Masonry International 31-38 2011.
- [12] Corradi M., Borri A. Vignoli A. *Experimental study on the determination of strength of masonry walls*, Construction and Building Materials 17 (2003) 325–337.
- [13] Corradi M., Borri A., Vignoli A.: *Strengthening techniques tested on masonry structures struck by the Umbria-Marche earthquake of 1997 – 1998*. "Construction and Building Materials" Nr 16/2002, str. 229-239.
- [14] Drdacky M. *Non-standard testing of mechanical characteristics of historic mortars*. International Journal of Architectural Heritage 5: 383-394 2011.
- [15] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., *Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych. Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [16] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., *Konstrukcje murowe według Eurokodu 6 i norm związanych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013, T1,2
- [17] Drobiec Ł. *Mur poddany ściskaniu: właściwość ciowa i wytrzymałość ciowa muru poddanego ściskaniu, konstrukcje obciążone głównie pionowo*. Seminarium Naukowe. Rozszerzenie podstaw naukowych ustaleń Eurokodu 6: "Projektowanie konstrukcji murowych" ITB, Warszawa 2008, s. 37-56.

- [18] Drobiec Ł. *Przyczyny uszkodze murów*. XII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk 2007. T1, s. 105-147.
- [19] Drobiec Ł., *Stan techniczny zabytkowych budynków zabudowy miejskiej w Bytomiu*, VII Konferencja naukowo-techniczna "REW-IN . 2006", Kraków, 2006. T.1 s.59-67
- [20] Egermann, R.: *Materialkennwerte, Trag und Vervormungsverhalten, in-situ-Prufverfahren*. In: Arbeitshefte des SFB 315, Sonderheft 1990: Bauwerksdiagnostik, Baureileitung des Tragverhaltens bei historischem Mauerwerk, Universität Karlsruhe, 1989.
- [21] Egermann R. *Zur Nachträglichen Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Mauerziegeln*. SFB 315, Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1990, Berlin: Ernst & Sohn.
- [22] Gajownik R., Jarmontowicz R., Sieczkowski J.: *Diagnostyka i metody oceny bezpiecze stwa konstrukcji murowych*. XXII Ogólnopolska Konferencja „Warsztaty pracy projektanta konstrukcji”. Szczyrk 2007.
- [23] Główny Urz d Nadzoru Budowlanego, *Katastrofy Budowlane w 2013 roku*, Warszawa, 17 marca 2014.
- [24] Goł biewski Z. *Badania wytrzymało ciowe obci onych mimo rodowo konstrukcji murowych z cegły*. In ynieria i Budownictwo 10/1964, str.354-358
- [25] Graff O. *Über die Tragfähigkeit von Mauerwerk, insbesondere von stockwerkhohe Wände, Fortschritte und Forschungen im Bauwesen*. Reihe D, Heft 8, Stuttgart, 1952
- [26] Gruszczy ski M.; Matysek P. *Ocena wytrzymało ci murów ceglanych na podstawie bada odwiertów rdzeniowych*. Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 3-B/2011, str. 57-69.
- [27] Gucci N., Barsotti R. *A non-destructive technique for the determination of mortar load capacity in situ*. Materials and Structures 28(179) 276-283 1995.
- [28] Hilsdorf H. *Untersuchungen über die Grundlagen der Mauerwerkfestigkeit*. Bericht nr. 40, Materialprüfungsamt für das Bauwesen der Technischen Hochschule München, 1965.
- [29] International Society for Rock Mechanics, *Suggested Method for Deformability Determination Using a Large Flat Jack Technique*. ref unknown.
- [30] International Society for Rock Mechanics, *Suggested Methods for Rock Stress Determination*. Int. J. Rock Mech. Nfin. Sci. & Geomech. Abstr., Vol 24, No. 1, pp. 53-73, 1987.
- [31] Janowski Z.: *Cechy spr yste i wytrzymało murów w obiektach zabytkowych poddanych obci eniu statycznym*. V Konferencja Naukowo-Techniczna. „REW-IN .- 2000 In ynierijne problemy odnowy Staromiejskich Zespołów Zabytkowych”. Kraków 2000.
- [32] Janowski Z.: *Metody wykonywania analiz technicznych w konstrukcjach murowych*. VI Konferencja Naukowo-Techniczna Problemy Rzeczoznawstwa Budowlanego, Kielce 2000.
- [33] Janowski Z. *No no i trwało konstrukcji murowych w obiektach zabytkowych*. Materiały IV Konferencji Naukowo-Technicznej REW.-IN ., Kraków 1998.
- [34] Janowski Z.: *Współczesne narz dzia i metodyka pracy przy opracowaniu ekspertyz z zakresu budownictwa zabytkowego*. XI Konferencja Naukowo – Techniczna „Problemy rzeczoznawstwa budowlanego” Warszawa – Miedzeszyn 2010, str. 185 – 207.

- [35] Janowski Z., Amin Z., *Analiza no no ci i odkształcalności cian ceglanych w ujęciu norm i badań do wiadczalnych*, X Toruńska Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna PZITB, Toruń 1986.
- [36] Janowski Z. *Zagadnienia konstrukcyjne przy modernizacji budynków murowanych*. Materiały XXVI Ogólnopolskich Warsztatów Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 2011, str.379-413.
- [37] Jarmontowicz R.: *Wytrzymałość na ściskanie ceramicznych elementów murowych* (cz. 1, 2). Ceramika budowlana nr 2, 3 / 2006.
- [38] Jasieko J., Engel L., Kondolewicz A.: *Problemy konstrukcyjno-konserwatorskie w stabilizacji i ekspozycji ruin obiektów kamiennych na przykładzie Zamku „Lenno” we Włeniu*. „Wiadomości Konserwatorskie” Wrocław Nr 26/2009.
- [39] Kaczmarczyk S., Mierzwa J.: *Ocena wytrzymałości muru na podstawie badań próbek rdzeniowych*. Konferencja „Inżynierskie problemy odnowy staromiejskich zespołów zabytkowych”. Kraków 1998.
- [40] Kaszyński J.: *Ultradźwiękowe badania betonu z uwzględnieniem strefy zbrojenia i zarysowania*, Prace naukowe Politechniki Szczecińskiej KK iTB, Szczecin 2003.
- [41] Kowalewski J.: *Ocena wytrzymałości betonu na podstawie badań sklerometrycznych*, Inżynier Budownictwa 9/2010
- [42] Kwiecień A., Chelmecki, J., Matysek, P. *Non-destructive tests of brick columns using change in frequency and inertancy response. Structural Analysis of Historical Constructions* - Jerzy Jasieko (ed), Wrocław 2012.
- [43] Lewicki B.: *Diagnostyczna wytrzymałość obliczeniowa betonu i muru*. ITB. Warszawa 2002.
- [44] Lewicki B.: *Obciążenia próbne konstrukcji istniejących budynków*. ITB. Warszawa 1997.
- [45] Lewicki B.: *Ocena bezpieczeństwa istniejących konstrukcji murowych*. ITB. Warszawa 1998.
- [46] Lewicki B. *Ocena bezpieczeństwa konstrukcji budynków zabytkowych w świetle przepisów i ustaleń normowych*. Materiały V Konferencji Naukowo-Technicznej REW.-IN., Kraków 2000.
- [47] Li X., Gu X.L., Gao Z.N., Ouyang, Y., Liu N.K. *Determination of mechanical properties of historical brick masonry materials*. Structural Analysis of Historical Constructions – Jerzy Jasieko (ed), 2012 DWE, Wrocław, Poland.
- [48] Ligza W.; Matysek P. *Specyfika oceny wytrzymałości na ściskanie muru w obiekcie zabytkowym*. Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Techniczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Budownictwo Ogólne, Bydgoszcz 2009.
- [49] Ligza W.; Matysek P.; Płachecki M. *Analiza przyczyn katastrofy ciany nośnej przy adaptacji zabytkowego obiektu przemysłowego*. Materiały XXIV Konferencji Naukowo-Technicznej Awaryjne Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje 2009.
- [50] Maierhofer, Ch. *Zerstörungsfreie Prüfung zur Beurteilung von Mauerwerk. Instandsetzung und Ertüchtigung von Mauerwerk. Teil 3, Mauerwerk - Kalender 2007*.
- [51] Małyszko L. *Modelowanie zniszczenia w konstrukcjach murowych z uwzględnieniem anizotropii*. Rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińskiego-Mazurskiego, Olsztyn 2005.
- [52] Marzahn G., König G.: *Materialuntersuchungen an Mauersteinen aus heutiger Produktion*. Mauerwerk - Kalender 2003, s. 841-864.

- [53] Matysek P. *Identyfikacja wytrzymałości na ciskanie i odkształcalności murów ceglanych w obiektach istniejących*, Politechnika Krakowska, Kraków 2014.
- [54] Matysek P. *Konstrukcje murowe*, Politechnika Krakowska, Kraków 2001.
- [55] Matysek, P. *Metody określania wytrzymałości na ciskanie murów ceglanych w obiektach zabytkowych*. Materiały V Konferencji Naukowo-Technicznej REW.-IN., Kraków 1998.
- [56] Matysek P.: *Uwagi o szacowaniu wytrzymałości murów zabytkowych na podstawie wytrzymałości cegły i zaprawy*. Materiały Budowlane Nr 9/2010, str. 44-51.
- [57] Matysek P., Łtka D. *Comments on the application of the sclerometric method in the diagnostics of brick masonry*. Structural Analysis of Historical Constructions – Jerzy Jasieko (ed), DWE 2012, Wrocław.
- [58] Matysek P.; Witkowski M. *Badania porównawcze wytrzymałości cegieł*. Inżynieria i Budownictwo 2011.
- [59] Matysek P.; Witkowski M. *Badania wytrzymałości i odkształcalności XIX-wiecznych murów ceglanych*. Materiały XXVI Konferencji Naukowo-Technicznej Awarie Budowlane, Szczecin - Międzyzdroje 2013.
- [60] Mc Burney J.W. *The compressive and transverse strength of brick*. Bureau of Standards Journal of Research, Vol. 2/1929, pp. 821 – 835.
- [61] Moczko A., *Badania odwiertów rdzeniowych w świetle aktualnych unormowań prawnych. Część 1 - Pobieranie odwiertów z konstrukcji oraz badania makroskopowe*. Budownictwo, technologie, architektura, 2004.
- [62] Moczko A., *Badania odwiertów rdzeniowych w świetle aktualnych unormowań prawnych. Część 2 - Badania wytrzymałościowe i interpretacja uzyskiwanych wyników*. Budownictwo, technologie, architektura, 2004.
- [63] MSJC. *Commentary on specification for masonry structures (ACI 530.1-02/ASCE 6-02/TMS 602-02)*. 2002.
- [64] Noland, J.L., Atkinson, R.H., Schuller, M.P. *A review of the flatjack method for nondestructive evaluation*. Proceedings Conference Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials, University of Colorado 1990.
- [65] Nowak R., Gil Z., Tkacz P.: *Degradacja i naprawy łciany zewnętrznych cian murowanych*. „Płyty warstwowe, dachy i łciany” Nr 3/2010, str. 20-21.
- [66] Olek J.; liwski J. *Możliwość badania pełnych cegieł ceramicznych metodami nieniszczącymi*. Czasopismo Techniczne 1/1977.
- [67] Oniszczyk, L.I. *Kamiennyje konstrukcje*. Strojizdat 1939.
- [68] Orban, Z., Balogh, T. *Assessment of masonry arch bridges using non-destructive testing methods*. Proceedings 7th International Conference on Arch Bridges, Trogir-Split 2013.
- [69] Orłowicz R., Małyszko L. *Konstrukcje murowe, Zarysowania i naprawy*. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko - Mazurskiego, Olsztyn 2000
- [70] Orłowicz R., Małyszko L., Bilko P.: *Ocena wytrzymałości muru podczas modernizacji kamienic komunalnych*. Wiadomości Konserwatorskie. Wrocław, 2009.
- [71] Orłowicz R., Tkacz P., Bilko P: *Metody badania wytrzymałości muru w budynkach istniejących*. XXVI Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczecin 2011.
- [72] Orłowicz R., Tkacz P. *Określenie wytrzymałości zaprawy w istniejących budynkach murowych*, Przegląd Budowlany Nr 1/2012, ISSN 0033- 2038.

- [73] Orłowicz R., Tkacz P., Nowak R. *Wybrane zagadnienia określenia wytrzymałości cegły w istniejących budynkach murowych*, Przegląd Budowlany Nr 4/2011, ISSN 0033-2038.
- [74] Orłowicz R., Wójcik R., Małyszko L. *Ocena stanu technicznego murowych filarów hali z wykorzystaniem obciążenia próbnego*. XX Konferencja Naukowo-Techniczna. „Awarie Budowlane” Międzyzdroje 2001.
- [75] Pela L., Benedetti A., Marastoni D. *Interpretation of experimental tests on small specimens of historical mortars*. Structural Analysis of Historical Constructions 2012.
- [76] Pech A., Zach F.: *Mauerwerksdruckfestigkeit - Bestimmung bei Bestandsobjekten*. „Mauerwerk” Nr 13/2009, s. 135-139.
- [77] Rajzer V.D., *Raszczet i normirovanije nade nosti stroitelych konstrukcji*. „Stroizdat”. Moskwa 1995.
- [78] *Rekomendaczi po obsledowaniju i ocenke tiechniczieskogo sostojanija krupnopanielných i kamienných zdanių*. CHIISK, Moskwa 1988.
- [79] RILEM RECOMMENDATION MDT.D.4. *In-situ stress tests based on the flat - jack*. Materials and Structures 08-09/2004.
- [80] RILEM RECOMMENDATION MDT.D.5. *In situ stress - strain behaviour tests based on the flat jack*. Materials and Structures 08-09/2004.
- [81] RILEM RECOMMENDATION MS.D.9. *Determination of mortar strength by the screw (helix) pull - out method - 1st draft*. 1997
- [82] Roca P., Cervera M., Gariup G., Pela L. *Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches*. Archives of Computational Methods in Engineering 17: 299-325 2010.
- [83] Rossi, P.P. *Analysis of mechanical characteristics of brick masonry tested by means of non-destructive in-situ tests*. ISMES Publication no. 167, Bergamo Italy, 1982, also: Proceedings 6th International Brick Masonry Conference, Rome 1982.
- [84] Runkiewicz L., *Diagnostyka i wzmacnianie konstrukcji elbetowych*, Wyd. Politechniki w tokrzyskiej, Kielce 1999.
- [85] Runkiewicz L. *Ocena jakości materiałów w obiektach zabytkowych*. Materiały V Konferencji naukowo-Technicznej REW.-IN., Kraków 1998.
- [86] Runkiewicz L., Brunarski L.: *Instrukcja stosowania młotków Schmidta do nieniszczącej kontroli jakości betonu w konstrukcji nr 148*. ITB, Warszawa, 1973
- [87] Runkiewicz L., Rodzik W.: *Badania nieniszczącej wytrzymałości murowych obiektów zabytkowych*. „Inżynieria i Budownictwo” Nr 2/1990.
- [88] Krawtschuk, A., Zeman, O., Schellander, J., Zimmermann, T., Strauss, A., Bergmeister, K. *Einfluss der Belastungsrichtung auf die einaxiale Druckfestigkeit von Proben aus Vollziegeln*. Mauerwerk, 18: 98–104. doi: 10.1002/dama.201400615.
- [89] Schmiedmayer R. *Nondestructive in-situ determination of mortar load capacity using a modified Schmidt rebound hammer*. Proceedings of the 11th International Brick/Block Masonry Conference, Shanghai 1997.
- [90] Schrank R. *Materialeigenschaften historischen Ziegelmauerwerks im Hinblick auf Tragfähigkeitsberechnungen am Beispiel der Leipziger Bundwand*. Das Mauerwerk. Zeitschrift für Technik i Architektur, 10/2002.
- [91] Schubert P. *Bauerteilung der Druckfestigkeit von ausgeführten Mauerwerk aus künstlichen Steinen und Natursteinen*, Mauerwerk Kalender 1995.

- [92] Schubert, P. *Eigenschaftswerte von Mauerwerk, Mauersteinen und Mauer Mörtel*. Mauerwerk-Kalender 2001.
- [93] Skramtajew B.G. *Determining concrete strength for control of concrete structures*, Journal of ACI, , vol. 34, 285, 1938.
- [94] Stawiska, N., Stawiski, B. *Rewaloryzacja murów w obiektach zabytkowych*. Wiadomości Konserwatorskie 18/2005.
- [95] Stawiski B. *Ultradźwiękowe badania betonów i zapraw głowicami punktowymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.
- [96] Steffens K., Burkert T.: *Experimentelle Bestimmung der Tragfähigkeit von Mauerwerk - Belastungsversuche an Mauerwerksbauten in situ*. Mauerwerk-Kalender. Berlin 2009, str. 243 - 270.
- [97] Szwaranowicz A. *Metoda badania wytrzymałości ciałych konstrukcji murowych in situ za pomocą poduszek ciśnień nieniosących*. ITB - kwartalnik, 4/2002.
- [98] Tkacz P. *Metody określania wytrzymałości zaprawy w istniejących murach*, Praca zbiorowa – monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2012.
- [99] Tkacz, P., Orłowicz, R. *Niekonwencjonalne sposoby określania wytrzymałości cegieł i zaprawy w istniejących murach*. Materiały Budowlane 3/2013.
- [100] UIC – *International Union of Railways: UIC Code*. Recommendations for the inspection, assessment and maintenance of masonry arch bridges. Final draft 2008.
- [101] Ulybin A. V.; Zubkov S. V. *Control methods for strength of ceramic bricks in the inspection of buildings*. Saint-Petersburg. Magazine of Civil Engineering 03, pp. 29-34., 2012.
- [102] Urban T.: *Rewitalizacja XIX – wiecznych obiektów fabrycznych*. 56 Konferencja Naukowa KILiW PAN. Kielce – Krynica 2010, str. 369-387.
- [103] Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Patent na wynalazek pt. Sposób badania wytrzymałości na ściskanie zaprawy z murów istniejących, zgłoszenie nr P.395189 z dnia 09.06.2011 r.
- [104] Van Parys L., Dagrain F., Descamps T., Couduzer C. *Scratching test for compressive strength determination: method and preliminary results on historic mortars*. Proceedings of 7th International Masonry Conference, Londyn, 2006.
- [105] Vekey, R.C. *In-situ test for masonry*. Proceedings of the 9th International Brick/Block Masonry Conference, Berlin 1991.
- [106] Wenzel F. *Mauerwerksinstandsetzung bei historisch bedeutsamen Bauwerken*. Mauerwerk-Kalender, 1995.
- [107] Yu. Y., Yin I., Zhong Z.: *Shape effects in the Brazilian tensile strength test and a 3D FEM correction*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Nr 43/2006, str. 623-627.
- [108] Zarenkow W.A. i in.: *Sowriemennyje metody techniczeskoj diagnostyki stroitelnych konstrukcji, zdaniy i sooru enij*. Sankt-Petersburg 2000.
- [109] enczykowski W., *Budownictwo ogólne (Tom II), Konstrukcje i wznoszenie murów i sklepień*, Warszawa 1956.
- [110] enczykowski W., *Podstawy wytrzymałości ciał oblicz statycznych konstrukcji murowanych z cegły*. Polska Akademia Nauk. Instytut Podstawowych Problemów Techniki. Rozprawy Inżynierskie XIV, 1954.
- [111] ółtowski M.: *Badania elementów murowych z wykorzystaniem analizy modalnej*. Praca doktorska pod promotorstwem prof. R. Orłowicza. ZUT. Szczecin 2009.

WYKORZYSTANE NORMY:

- [112] ACI 318-08 *Building Code Requirements for Structural Concrete*.
- [113] ASTM STANDARD C 1196-91. *In-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat - jack measurements*. 1991.
- [114] ASTM STANDARD C 1197-91. *In-situ measurement of masonry deformability properties using flat - jack method*. 1991.
- [115] DIN 105-100 *Mauerziegel mit besonderen Eigenschaften*.
- [116] DIN 18555:9:1999-09 *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln - Teil 9: Festmörtel; Bestimmung der Fugendruckfestigkeit*.
- [117] EN 1015-11 *Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*.
- [118] PN-B-03002:1999/2007 *Konstrukcje murowe niezbrojone. Projektowanie i obliczanie*.
- [119] PN-B-06262:1974 *Nieniszczące badania konstrukcji z betonu. Metoda sklerometryczna badania wytrzymałości betonu na ciśnienie za pomocą młotka Schmidta typu N*.
- [120] PN-B-12001:1970 *Wyroby ceramiki budowlanej. Badania techniczne*.
- [121] PN-B-12001:1975 *Cegła pełna wypalana z gliny – zwykła*.
- [122] PN-B-12016:1970 *Wyroby ceramiki budowlanej. Badania techniczne*.
- [123] PN-EN 206-1:2003 *Beton. Cz. 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*.
- [124] PN-EN 771-1:2003 *Wymagania dotyczące elementów murowych. Cz. 1: Elementy murowe ceramiczne*.
- [125] PN-EN 772-1:2001 *Metody badania elementów murowych. Cz. 1: Określenie wytrzymałości na ciśnienie*.
- [126] PN-EN 988-2:2004 *Wymagania dotyczące zapraw do murów. Zaprawa murarska*.
- [127] PN-EN 1015-11 *Metody badania zapraw do murów. Cz. 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ciśnienie stwardniałej zaprawy*.
- [128] PN-EN 1996-1-1 Eurokod 6. *Projektowanie konstrukcji murowych. Cz. 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych*.
- [129] PN-EN 12504-1:2002 *Badania betonu w konstrukcjach. Cz. 1: Odwierty rdzeniowe. Wycinanie, ocena i badanie wytrzymałości na ciśnienie*.
- [130] PN-EN 12504-2:2002 *Badania betonu w konstrukcjach. Cz. 2: Badanie nieniszczące. Oznaczenie liczby odbicia*.
- [131] PN-EN 13791:2008 *Ocena wytrzymałości betonu na ciśnienie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych*.
- [132] PN-ISO 3534-1:2002 *Statystyka. Terminologia i symbole. Cz. 1: Ogólne terminy z zakresu rachunku prawdopodobieństwa i statystyki*.
- [133] PN-ISO 3534-2:1994 *Statystyka. Statystyczne sterowanie jakością. Terminologia i symbole*.

STRONY INTERNETOWE:

- [134] www.acivilengineer.com (data dost pu 22.10.2014 r.).
- [135] www.bmrl.com.au (data dost pu 03.06.2014 r.).
- [136] www.cescentist.com (data dost pu 26.02.2015 r.).
- [137] www.civilblog.org (data dost pu 11.05.2014 r.).
- [138] www.diagnostykabudowli.pl (data dost pu 30.09.2014 r.).
- [139] www.ebuilder.pl (data dost pu 17.03.2012 r.).
- [140] www.imbitb.pl (data dost pu 27.09.2013 r.).
- [141] www.itb.pl (data dost pu 27.09.2013 r.).
- [142] www.rzeczoznawca.biurokonstruktor.com.pl/diagnostyka-budynkow
(data dost pu 20.03.2014 r.).
- [143] www.theconstructor.org (data dost pu 22.02.2014 r.).
- [144] www.topbuilding.pl (data dost pu 02.04.2013 r.).
- [145] www.sgs.com (data dost pu 20.07.2014 r.).

9. ZAŁĄCZNIKI

[Z1]: Decyzja Urz du Patentowego RP o udzieleniu patentu na wynalazek (nr ew. 33-s-11).

[Z2]: Decyzja Urz du Patentowego RP o udzieleniu patentu na wynalazek (nr ew. 15-s-13).