

**Andrzej Szwaranowicz\***

## **METODA BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH KONSTRUKCJI MUROWYCH „IN SITU” ZA POMOCĄ PODUSZEK CIŚNIENIOWYCH**

W pracy przedstawiono zasady pomiaru naprężeń i odkształceń murów za pomocą poduszek ciśnieniowych. Opisano aparaturę, podano sposób i wyniki jej zastosowania w warunkach laboratoryjnych.

### **1. Wstęp**

Przystępując do naprawy lub unowocześnienia budynków murowanych, inżynier stoi przed problemem oceny wytrzymałościowej konstrukcji, głównie wytrzymałości i odkształcalności muru, jak też określenia stanu naprężenia, jaki panuje w murze, co w konsekwencji prowadzi do określenia stopnia wykorzystania nośności muru. Wiąże się to ze znacznym nakładem pracy i nie obywa się bez miejscowego uszkodzenia konstrukcji, powstałego na skutek wycięcia fragmentu muru do badań.

Poszukiwania metod nieniszczących doprowadziły do wykorzystania poduszek ciśnieniowych (flatjack) jako przyrządu pomiarowego. Poduszki ciśnieniowe były już wykorzystywane w pomiarach parcia górotworu. Do oceny murów zaczęto je stosować w połowie lat osiemdziesiątych we Włoszech, gdzie przeprowadzono pierwsze badania nad ich zastosowaniem. Dalsze badania i próby zastosowania przeprowadzano w Stanach Zjednoczonych. Szczególnie duże zaangażowanie w wykorzystaniu poduszek ciśnieniowych wykazali J.L. Noland, R.H. Atkinson i M.P. Schuller [1]. Intensywna działalność tego zespołu doprowadziła do powstania dwu norm:

- ASTM STANDARD C 1196-91 – pomiar naprężeń w murach [2],
- ASTM STANDARD C 1196-91 – pomiar odkształceń w murach [3].

Metoda badań murów za pomocą poduszek ciśnieniowych wydawała się techniką stosunkowo prostą w zastosowaniu. W Zakładzie Konstrukcji i Badań Wytrzymałościowych ITB podjęto próbę wprowadzenia tej techniki jako normalnej procedury badawczej konstrukcji murowych. Realizacja tego zadania polegała na zapoznaniu się z zasadami pomiaru, wykonaniu aparatury pomiarowej, wzorcowaniu jej oraz przeprowadzeniu cyklu badań testujących, zakończonych opracowaniem procedur badawczych.

---

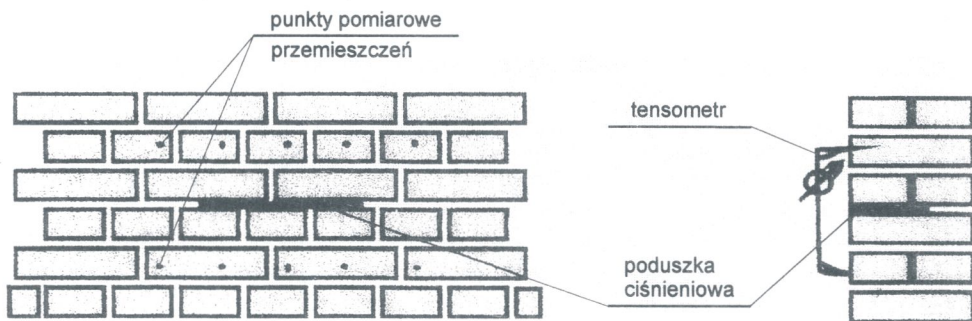
\* mgr inż. – adiunkt w ITB, kierownik laboratorium w Zakładzie Konstrukcji i Badań Wytrzymałościowych

## 2. Zasady pomiaru

Poduszki ciśnieniowe są wykorzystywane do pomiarów dwojakiego rodzaju:

- pomiaru naprężeń w murze za pomocą pojedynczej poduszki ciśnieniowej,
- pomiaru odkształcalności muru i ewentualnie jego wytrzymałości za pomocą dwu poduszek ciśnieniowych.

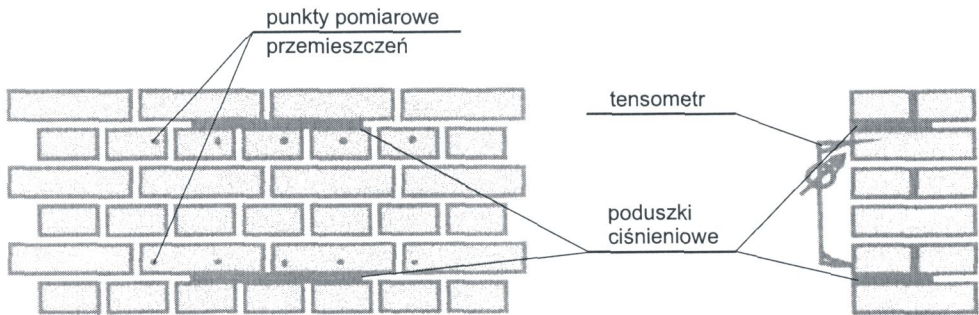
Zasada pomiaru naprężeń w murze za pomocą pojedynczej poduszki ciśnieniowej jest oparta na zjawisku częściowego miejscowego odciążenia konstrukcji za pomocą jej przecięcia w płaszczyźnie prostopadłej do działania sił (metoda półtrepanacji). W badanym murze usuwamy w pewnym obszarze zaprawę między cegłami. Panujące w nim naprężenia powodują przesunięcie górnej i dolnej krawędzi tak powstałego otworu. W wyciętym otworze zostaje ściśle umieszczona poduszka ciśnieniowa, która poddana działaniu wzrastającego ciśnienia wewnętrznego przekazuje je na mur (rys. 1).



Rys 1. Schemat pomiaru naprężeń w murze za pomocą pojedynczej poduszki ciśnieniowej  
Fig. 1. Setup for the in-situ stress test with one flatjack

Ciśnienie jest zwiększane – aż do momentu gdy zostanie zredukowane przesunięcie krawędzi wywołane wybraniem spoiny. Przesunięcie krawędzi jest mierzone za pomocą tensometru. Przyjmuje się, że naprężenia w murze są w przybliżeniu równe ciśnieniu oleju w poduszce ciśnieniowej skorygowanemu współczynnikami wynikającymi z cechowania poduszki i stosunku powierzchni działania poduszki ciśnieniowej do powierzchni wykonanego otworu w murze.

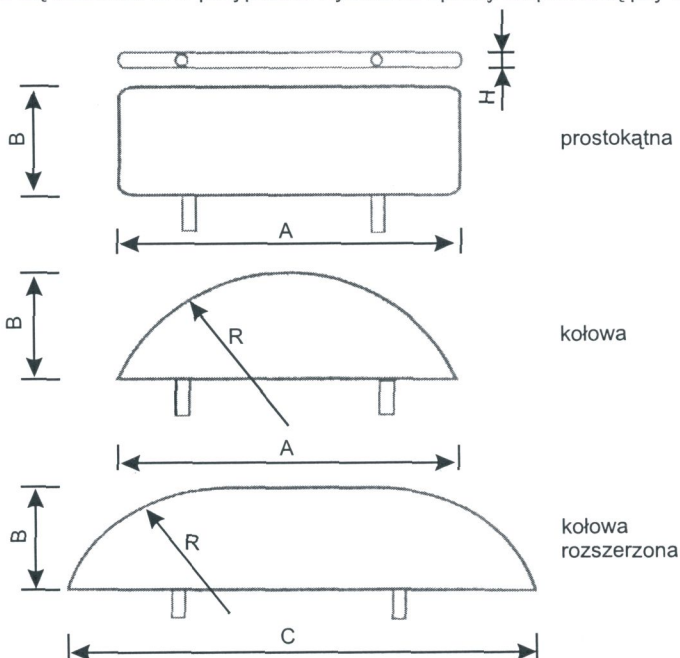
Zasada pomiaru odkształceń muru za pomocą zestawu dwu poduszek ciśnieniowych jest oparta na zjawisku miejscowego całkowitego odciążenia konstrukcji za pomocą jej przecięcia w dwu równoległych płaszczyznach prostopadłych do działania sił (metoda trepanacji). Jeśli w badanym murze usuniemy w pewnym obszarze zaprawę między cegłami w dwu równoległych spoinach, obszar między powstałymi otworami zostanie odciążony od obciążeń prostopadłych do spoin. Przyłożone obciążenie za pomocą dwu poduszek ciśnieniowych umiejscowionych w wykonanych otworach spowoduje odkształcenia muru zawartego między nimi (rys. 2). Przy stopniowym przyroście obciążeń prowadzi się pomiar odkształceń, w wyniku czego jest możliwe określenie zależności naprężenie-odkształcenie dla tego fragmentu muru. W niektórych przypadkach (słabsze mury) jest możliwe określenie również wytrzymałości muru.



Rys. 2. Schemat pomiaru odkształceń muru za pomocą zestawu dwu poduszek ciśnieniowych  
 Fig. 2. Setup for the in-situ deformability test with two flatjacks

### 2.1. Przyrządy pomiarowe

Poduszka ciśnieniowa jest to płaska koperta składająca się z dwu arkuszy cienkiej blachy zespalanych na brzegach. Między arkusze blachy wstawiono dwie rurki umożliwiające dopływ oleju pod ciśnieniem i odpowietrzenie poduszki. Poduszki mogą mieć różny kształt, wymiary i grubość, zależnie od grubości spoiny w murze i kształtu otworu wyciętego w spoinie. Przykładowe kształty pokazano na rysunku 3. Zalecane są poduszki prostokątne o wymiarach w planie (150 × 300) mm i grubości od 1 mm do 6 mm. Poduszki półokrągłe są stosowane w przypadku wycinania spoiny za pomocą piły tarczowej.



Rys. 3. Stosowane kształty poduszek ciśnieniowych  
 Fig. 3. An example of typical flatjack configurations

Przed przystąpieniem do badań poduszki powinny być poddane testowaniu w celu określenia zależności między wprowadzonym ciśnieniem oleju a przekazywaną na mur siłą. Konieczność określenia tej zależności jest spowodowana zarówno przekazywaniem przez odkształconą poduszkę obciążenia nie całą powierzchnią (brzegi nie pracują), jak też wpływem określonej sztywności samej poduszki, zależnym od grubości blachy i rodzaju materiału, z jakiego poduszka została wykonana.

W procesie wzorcowania określa się współczynnik  $K_m$  jako stosunek przekazywanego ciśnienia do ciśnienia oleju wewnątrz poduszki.

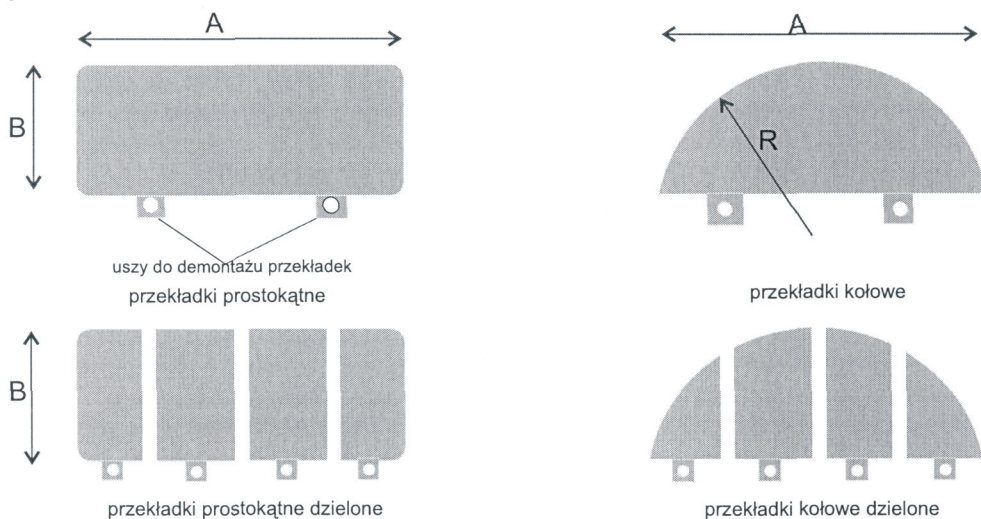
Ciśnienie jest realizowane za pomocą pompy olejowej zaopatrzonej w zawory – przewody ciśnieniowe, łączące ją z poduszkami, oraz manometru pomiarowego. Zestaw pomiarowy powinien być dość szczelny, tak aby spadki ciśnienia nie były większe niż 1% maksymalnego ciśnienia w ciągu 5 min.

Pomiar odkształceń jest dokonywany za pomocą tensometrów nasadowych lub innych o dokładności nie mniejszej niż 0,005% długości bazy tensometru.

## 2.2. Montaż poduszek ciśnieniowych w ścianie

W celu umiejscowienia poduszki ciśnieniowej w murze wykonuje się otwory w spoinach o wymiarach zgodnych z wymiarami zastosowanych poduszek ciśnieniowych. W przypadku wykonywania dwu otworów powinny być one równoległe i umieszczone pionowo nad sobą w odległości nie większej niż 150% długości poduszki.

Otwory wykonuje się za pomocą wiertarki, wybierając całkowicie zaprawę w spoinie, tak aby ciśnienie z poduszki ciśnieniowej było przykładane bezpośrednio do powierzchni oczyszczonej cegły. Można tego dokonać również za pomocą piły tarczowej, dzięki czemu uzyskuje się gładką powierzchnię docisku i wysokość otworu odpowiadającą grubości poduszki ciśnieniowej.



Rys. 4. Przykładowe kształty stosowanych przekładek  
Fig. 4. An example of typical shims



Jeżeli wysokość otworu jest większa niż grubość poduszki, należy zastosować przekładki dystansowe o odpowiedniej grubości w celu zapobieżenia nadmiernym odkształceniom poduszek. Przekładki spełniają również zadanie ochronne, zapobiegając miejscowym uszkodzeniom delikatnej poduszki, a także ułatwiają jej wyjęcie po badaniu. Zazwyczaj przekładki są wykonane z jednego kawałka blachy. W przypadku gdy wysokość otworu nie jest jednakowa lub istnieje konieczność użycia grubych przekładek o znacznej sztywności, stosuje się przekładki dzielone (rys. 4). Przekładki są zaopatrzone w „uszy”, dzięki którym można je usunąć z otworu. Można stosować również jako przekładki dodatkowe poduszki ciśnieniowe napełnione olejem pod niewielkim ciśnieniem.

### 2.3. Procedura pomiaru

Procedura pomiaru za pomocą poduszek ciśnieniowych ma następujący przebieg:

- wyznaczenie miejsca pomiaru,
- zamocowanie reperów lub tensometrów w miejscu pomiarów,
- dokonanie wstępnych odczytów tensometrycznych,
- wykonanie otworów w murze w odpowiedniej odległości od otworów lub końca muru,
- włożenie poduszek ciśnieniowych wraz z dopasowanymi przekładkami w przygotowane otwory w murze,
  - połączenie układu hydraulicznego i jego odpowietrzenie,
  - wstępne obciążenie do 50% przewidzianego obciążenia pomiarowego w celu dopasowania poduszek do otworu, a następnie zmniejszenie ciśnienia do zera w celu dokonania odczytu zerowego,
  - zwiększanie ciśnienia w poduszkach z jednoczesnym pomiarem odkształceń.

W przypadku słabego muru istnieje możliwość zwiększania ciśnienia aż do zniszczenia muru.

### 2.4. Określenie wyników badań

Na podstawie pomiarów określamy naprężenia w murze za pomocą zależności

$$f_m = Q K_m K_a$$

gdzie:  $Q$  – ciśnienie w poduszce ciśnieniowej,  
 $K_m$  – stała z wzorcowania poduszek ciśnieniowych,  
 $K_a$  – stosunek powierzchni poduszki ciśnieniowej do powierzchni otworu, w jakim została umieszczona.

Przy pomiarze odkształceń przyjmuje się średnią wartość odkształcenia z punktów pomiarowych w obszarze poduszek ciśnieniowych.

Moduł sprężystości muru określa się z zależności

$$E_t = \frac{\Delta f_m}{\Delta \varepsilon_m}$$

gdzie:  $\Delta f_m$  – zmierzony przyrost naprężenia,  
 $\Delta \varepsilon_m$  – zmierzony przyrost odkształcenia średniego.

## 2.5. Dokładność pomiaru

Według dotychczasowych doświadczeń otrzymane wyniki pomiarów za pomocą poduszek ciśnieniowych mogą być obarczone błędem w granicach do 33%

## 3. Realizacja badań za pomocą poduszek ciśnieniowych w ITB

Realizacja badań za pomocą poduszek ciśnieniowych wymagała wykonania aparatury pomiarowej i zastosowania jej w praktyce. Ze względu na możliwość oszacowania ograniczeń metody, badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych na elementach próbnych wykonanych w laboratorium.

### 3.1. Aparatura pomiarowa

Wykonano dwie poduszki o wymiarach w planie (150 × 300) mm ze stalowej blachy nierdzewnej o grubości 0,5 mm. Poduszkę taką pokazano na rysunku 5.



Rys. 5 . Widok poduszki ciśnieniowej  
Fig. 5 . View of the flatjack

Ciśnienie realizowano za pomocą ręcznej pompy olejowej. Do pomiaru ciśnienia użyto manometru klasy 1 o zakresie 10 MPa.

Do pomiaru odkształceń zastosowano tensometr nasadowy Huggenbergera o bazie pomiarowej 250 mm i dokładności odczytu 0,001 mm. Po naklejeniu czopików i przeprowadzeniu próbných pomiarów okazało się, że błąd wynikły z niejednakowego przyłożenia

tensometru może wynosić do 0,005 mm. Przy niewielkich przewidywanych odkształceniach stosowano również w obszarze poduszek dokładniejsze tensometry własnej konstrukcji, zaprojektowane i wykonane we własnym zakresie, o dokładności odczytu 0,001 mm.

Wzorcowanie poduszek ciśnieniowych przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej w specjalnie przygotowanym stanowisku badawczym.

W celu dopasowania poduszek ciśnieniowych do przygotowanych otworów w murze wykonano dwa komplety stalowych przekładek dystansowych o grubości od 0,5 mm do 3,0 mm i wymiarach w planie identycznych jak poduszki (rys. 6).



Rys. 6. Przekładki dystansowe chroniące poduszkę ciśnieniową  
Fig. 6. Flatjack covered with shims

### 3.2. Elementy próbne

Badania przeprowadzono na dwu różnych typach muru – na murze o wysokiej wytrzymałości, wykonanym z cegły klinkierowej ( $f_{B,PN} = 55$  MPa) na zaprawie również wysokiej wytrzymałości ( $f_m = 33,4$  MPa), oraz na murze z założenia słabym, wykonanym z cegły ceramicznej pełnej i słabej zaprawy cementowo-wapiennej.

Z cegły klinkierowej wykonano murki o grubości jednej cegły, długości 3,25 cegły, składające się z 10 warstw cegły. Miały one w przybliżeniu wymiary (250 × 800 × 800) mm. Z cegły ceramicznej wykonano murki dwójakiego rodzaju: cienkie, o grubości jednej cegły i długości 3,5 cegły, oraz tzw. grube, o szerokości półtorej cegły i długości 3 cegły (w celu określenia  $E$ ). Oba rodzaje składały się z 10 warstw cegły. Wymiary murków cienkich wynosiły (250 × 900 × 800) mm, szerokich – (380 × 765 × 800) mm. Murki zostały ustawione na zaprawie na sztywnych belkach żelbetowych i były przykryte takimi samymi belkami w celu równomiernego rozłożenia obciążenia z pojedynczego siłownika na całą powierzchnię przekroju elementu.

### 3.3. Stanowisko badawcze

Zaszła konieczność wykonania specjalnego stanowiska badawczego, które umożliwiłoby swobodny dostęp do badanego elementu w celu wykonania szczelin i pomiaru



odkształceń. Stanowisko wybudowano na płycie stendu. Do obciążania murków zastosowano siłownik hydrauliczny o nośności 100 T. Widok stanowiska przedstawiono na rysunku 7.



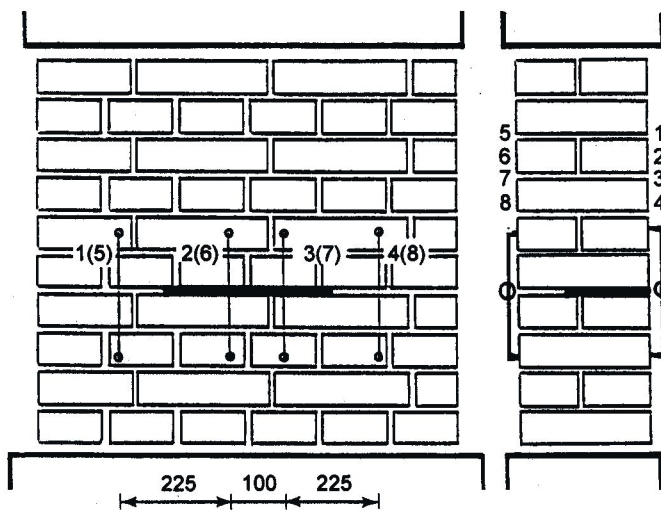
*Rys. 7. Stanowisko badawcze*  
*Fig. 7. Testing stand*

## **4. Pomiary weryfikujące metodę pomiarową**

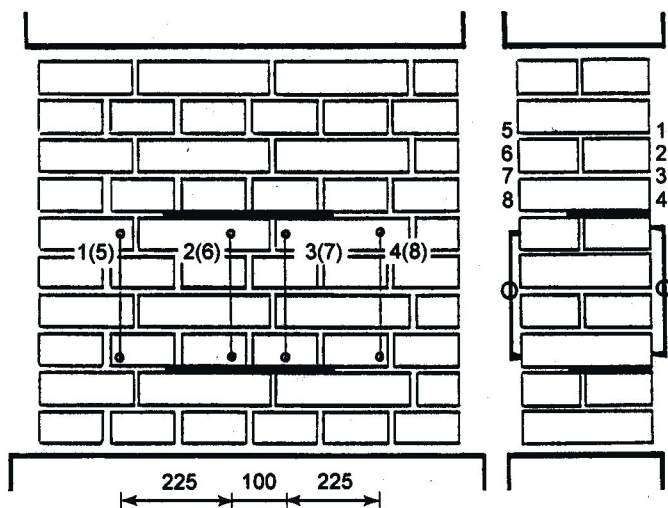
### **4.1. Pomiar przemieszczeń**

Rozmieszczenie punktów pomiarowych we wszystkich badaniach było jednakowe, zgodnie z rysunkami 8 i 9.





Rys. 8. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w badaniach naprężeń  
Fig. 8. Gage points for the stress test



Rys. 9. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w badaniach odkształceń  
Fig. 9. Gage points for the deformability test

#### 4.2. Pomiar naprężeń w ścianach

Pomiary naprężeń w ścianach przeprowadzono zgodnie z uprzednio opisaną procedurą, z wykorzystaniem jednej poduszki ciśnieniowej. Przykładowe wyniki pomiarów zestawiono w tablicach 1–3 oraz na wykresach (rys. 10–12). W tablicach podano:

- wartości obciążenia równomiernego realizowanego w stanowisku badawczym,

- wartość ciśnienia wywieranego na otwór w ścianie za pomocą poduszki ciśnieniowej

$$f_m = Q K_m K_a$$

gdzie:  $Q$  – ciśnienie w poduszce,

$K_m$  – stała z wzorcowania poduszki,

$K_a$  – stosunek powierzchni otworu do rzeczywistej powierzchni docisku poduszki);

- wartości odkształceń w poszczególnych punktach pomiarowych,
- wartości średnie odkształceń ze wszystkich punktów pomiarowych.

Tablica 1. Naprężenia w ścianie klinkierowej. Table 1. Stresses in the clinkier bricks wall

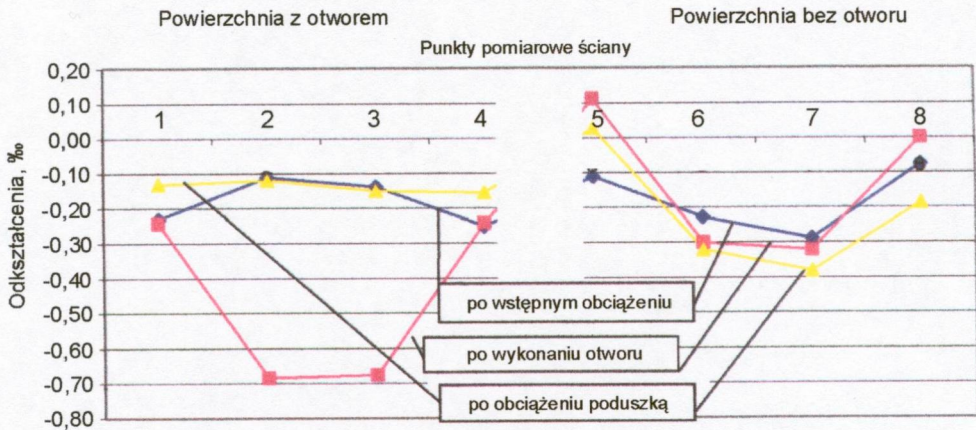
Etapy pomiaru	Obciążenie ściany	Ciśnienie wywierane przez poduszkę	Odształcenia ściany w trakcie pomiaru naprężeń								
			powierzchnia z poduszką ciśnieniową				powierzchnia przeciwna				średnie ściany
			1	2	3	4	5	6	7	8	
MPa	MPa	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	
Po wstępnym obciążeniu ściany	4,00	0,00	-0,23	-0,11	-0,14	-0,25	-0,11	-0,23	-0,29	-0,08	-0,18
Po wykonanym otworze pomiarowym	4,00	0,00	-0,24	-0,68	-0,68	-0,24	0,11	-0,30	-0,32	0,00	-0,29
Po obciążeniu poduszką ciśnieniową	4,00	3,89	-0,13	-0,12	-0,15	-0,16	0,03	-0,32	-0,38	-0,19	-0,18

Tablica 2. Naprężenia w ścianie ceramicznej 1. Table 2. Stresses in the common bricks wall 1

Etapy pomiaru	Obciążenie ściany	Ciśnienie wywierane przez poduszkę	Odształcenia ściany w trakcie pomiaru naprężeń								
			powierzchnia z poduszką ciśnieniową				powierzchnia przeciwna				średnie ściany
			1	2	3	4	5	6	7	8	
MPa	MPa	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	
Po wstępnym obciążeniu ściany	0,89	0,00	-0,56	-0,72	-0,46	-0,28	-0,29	-0,48	-0,64	-0,34	-0,47
Po wykonanym otworze pomiarowym	0,89	0,00	-0,64	-1,34	-0,98	-0,36	-0,27	-0,43	-0,65	-0,32	-0,63
Po obciążeniu poduszką ciśnieniową	0,89	0,84	-0,58	-0,71	-0,22	-0,26	-0,33	-0,46	-0,70	-0,35	-0,45

Tablica 3. Naprężenia w ścianie ceramicznej 2. Table 3. Stresses in the common bricks wall 2.

Etapy pomiaru	Obciążenie ściany	Ciśnienie wywierane przez poduszkę	Odształcenia ściany w trakcie pomiaru naprężeń									
			powierzchnia z poduszką ciśnieniową				powierzchnia przeciwna				średnie ściany	
			1	2	3	4	5	6	7	8		
	MPa	MPa	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00
Po wstępnym obciążeniu ściany	1,33	0,00	-0,75	-1,18	-0,79	-0,53	-0,48	-0,77	-1,06	-0,46	-0,75	
Po wykonaniu otworze pomiarowym	1,33	0,00	-0,82	-0,95	-1,32	-0,50	-0,36	-0,64	-0,96	-0,38	-0,74	
Po obciążeniu poduszką ciśnieniową	1,33	1,23	-0,76	-1,18	-0,59	-0,42	-0,40	-0,68	-0,97	-0,42	-0,68	



Rys. 10. Odkształcenia ściany klinkierowej w trakcie pomiaru naprężeń  
Fig. 10. Strains of the clinker bricks wall during stress test

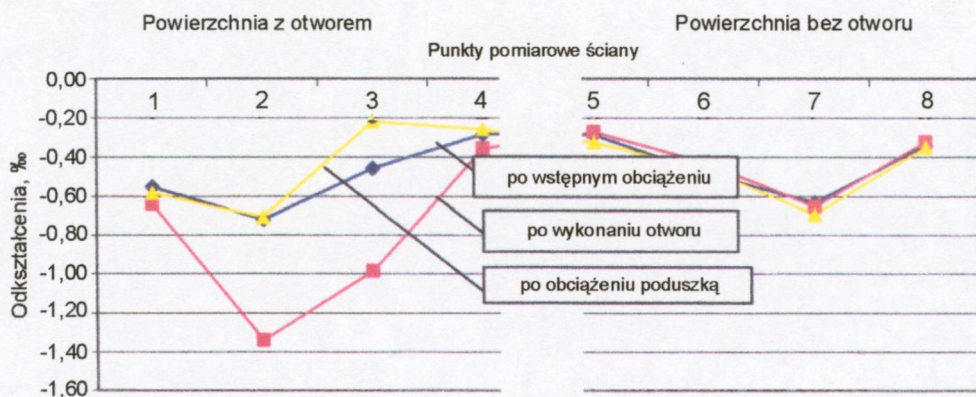
Na rysunkach 10–12 przedstawiono odkształcenia ściany w poszczególnych punktach pomiarowych wywołanych obciążeniem wstępnym, wykonaniem otworu i reakcją na działanie poduszki ciśnieniowej.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że:

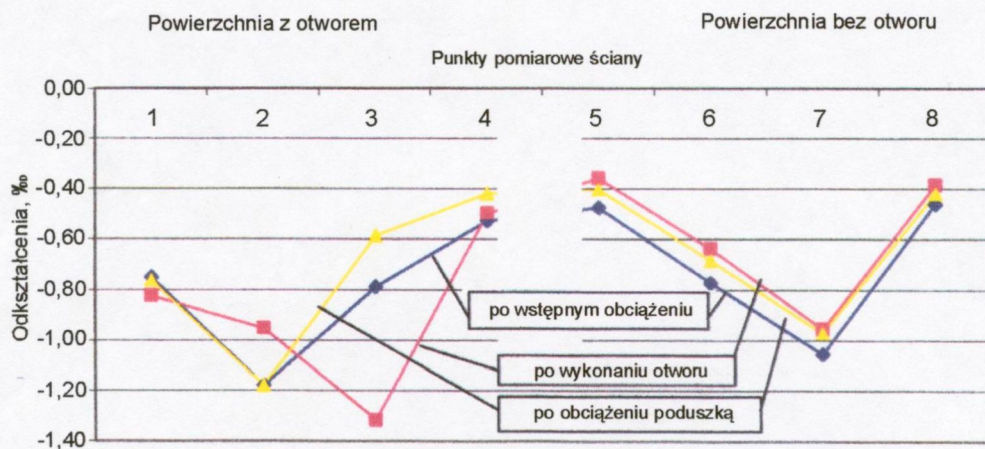
- Przeprowadzone pomiary odkształceń we wszystkich ściankach, na których wykonano badania, wykazały że nie istnieje równomierny rozkład odkształceń w przekroju muru. Wynika to zarówno ze sposobu przyłożenia siły do górnej powierzchni murku za pomocą sztywnej belki, jak i niejednorodności muru. Różnice sięgają około 50% w stosunku do wartości średniej ze wszystkich punktów pomiarowych.



- Wycięcie otworu do pomieszczenia poduszek powodowało 2–7-krotne zwiększenie odkształceń w obszarze otworu, w pozostałych punktach również nastąpił wzrost odkształceń wskazujący na redystrybucję naprężeń.
- Wprowadzenie obciążenia za pomocą poduszki ciśnieniowej, powodującego przywrócenie odkształceń w obszarze poduszki sprzed wykonania otworu, powoduje również zmiany – w przybliżeniu takie same, w innych punktach pomiarowych.
- Wyniki pomiarów naprężeń za pomocą poduszki ciśnieniowej są nadspodziewanie zgodne, co ilustruje tablica 4. Różnice wynoszą od 1% do 8%, co trzeba uznać za wynik bardzo dobry.



Rys. 11. Odkształcenia ściany ceramicznej 1 w trakcie pomiaru naprężeń  
 Fig. 11. Strains of the common bricks wall 1 during stress test



Rys. 12. Odkształcenia ściany ceramicznej 2 w trakcie pomiaru naprężeń  
 Fig. 12. Strains of the common bricks wall 2 during stress test

Tablica 4. Błędy pomiaru naprężeń. Table 4. Errors of stress tests

Element badany	Naprężenie w ścianie wywołane obciążeniem zewnętrznym, MPa	Naprężenie w ścianie zmierzone za pomocą poduszki, MPa	Różnice między naprężeniami, %
Ściana klinkierowa	4,00	3,90	-1
Ściana ceramiczna 1	0,89	0,84	-1
Ściana ceramiczna 2	1,33	1,23	-8

### 4.3. Określenie modułu sprężystości ściany

Pomiary przeprowadzono zgodnie z uprzednio opisaną procedurą, z wykorzystaniem dwu poduszek ciśnieniowych.

Sposób osadzenia poduszek i rozmieszczenie reperków przy pomiarach za pomocą tensometru nasadowego przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Sposób osadzenia poduszek i rozmieszczenie reperków tensometru nasadowego w badaniu odkształcalności muru

Fig. 13. Application of the flatjacks in strains test of masonry

Wall

Tablica 5. Pomiar odkształceń w ścianie ceramicznej w celu określenia  $E$   
 Table 5. Strains of the masonry wall during deformability test for  $E$  determination

Etapy pomiaru	Poziom obciążenia	Obciążenie ściany	Ciśnienie wywierane przez poduszkę	Odkształcenia ściany								$E$ (średnie)	
				powierzchnia z poduszką ciśnieniową				powierzchnia przeciwna				średnie ściany	punktów 2 i 3
				1	2	3	4	5	6	7	8		
				MPa	MPa	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00
Obciążanie ściany przed wykonaniem otworów na poduszki	1	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
	2	0,3	0,00	-0,07	-0,06	-0,07	-1,10	-0,14	-0,23	-0,15	-0,24	25,8	
	3	0,7	0,00	-0,20	-0,18	-0,18	-0,25	-0,32	-0,46	-0,37	-0,47	22,6	
	4	1,0	0,00	-0,40	-0,32	-0,32	-0,48	-0,56	-0,67	-0,62	-0,67	20,4	
	5	1,4	0,00	-0,56	-0,48	-0,49	-0,69	-0,76	-0,82	-0,79	-0,88	20,1	
Wykonanie otworu	6	1,4	0,00	-0,06	-0,34	-0,14	-1,03	-0,80	-0,92	-0,82	-0,77		
Obciążanie ściany za pomocą poduszek	7	1,4	0,88	-1,10	-0,58	-0,47	-0,99	-0,79	-0,89	-0,79	-0,77		23,6
	8	1,4	1,35	-0,94	-0,85	-0,79	-0,95	-0,80	-0,92	-0,84	-0,78		23,2
	9	1,4	2,03	-0,93	-1,09	-0,91	-0,92	-0,82	-0,94	-0,85	-0,82		26,6
	10	1,4	2,70	-0,88	-1,24	-1,06	-1,87	-0,84	-0,97	-0,86	-0,82		29,5



Wyniki pomiarów zestawiono w tablicy 5 oraz na wykresach (rys. 19 i 20). W tablicy podano:

- kolejny poziom obciążenia,
- wartości obciążenia równomiernego realizowanego za pomocą maszyny wytrzymałościowej,
- wartość ciśnienia wywieranego na otwór w ścianie za pomocą poduszki ciśnieniowej

$$f_m = Q K_m K_a$$

gdzie:  $Q$  – ciśnienie oleju w poduszce,

$K_m$  – z wzorcowania poduszki,

$K_a = 1$  (przyjęto rzeczywistą powierzchnię docisku poduszek);

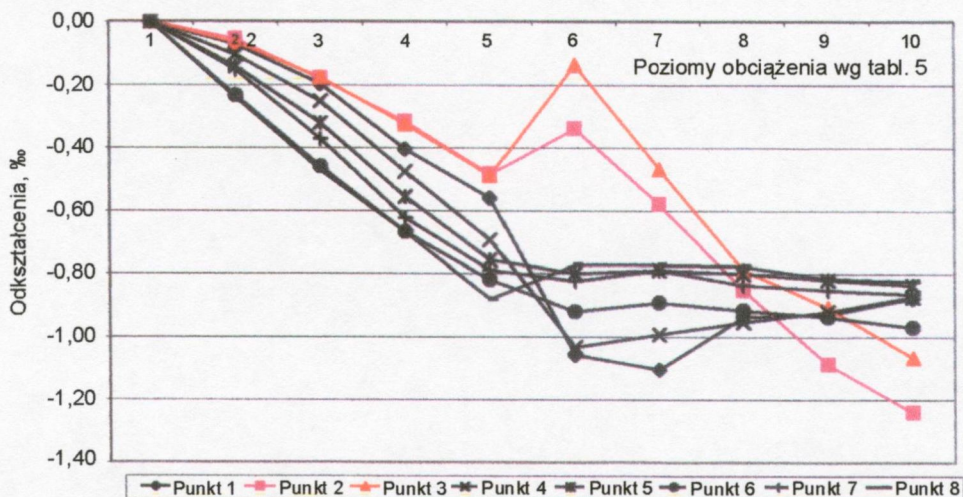
- wartości odkształceń w poszczególnych punktach pomiarowych,
- obliczone wartości modułu sprężystości  $E$  określone przy poszczególnych poziomach obciążeń ściany, uzyskane przed wykonaniem otworów na poduszki,
- obliczone wartości modułu sprężystości  $E$  określone dla punktów pomiarowych 2 i 3 z odkształceń wywołanych działaniem poduszki ciśnieniowej.

Na podstawie otrzymanych wyników można sformułować następujące wnioski:

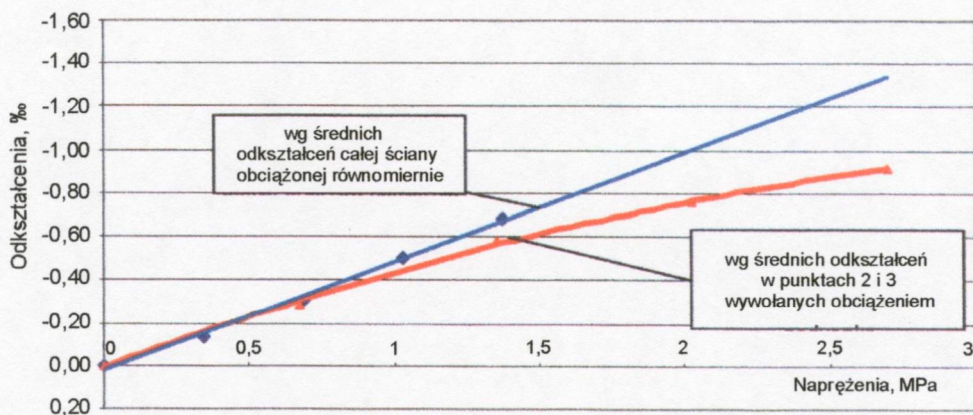
- Przeprowadzone pomiary odkształceń potwierdziły, że nie istnieje równomierny rozkład odkształceń w przekroju muru. Różnice sięgają około 25% w stosunku do wartości średniej ze wszystkich punktów pomiarowych (tab. 5 i rys. 14; poziom obciążenia 5 – obciążenie zewnętrzne 1,4 MPa).
- Zwiększanie obciążenia ściany powoduje w przybliżeniu proporcjonalny przyrost odkształceń, lecz różny w przypadku różnych punktów pomiarowych (tab. 5 i rys. 14; poziom obciążenia od 1 do 5). Należy przyjąć, że jedynie wartość średnia ze wszystkich punktów jest reprezentatywna dla ściany.
- W konsekwencji do powyższego obliczone wartości modułu sprężystości całej ściany i punktów 2 i 3 są różne, a różnica wynosi około 25%.
- Wykonanie otworu spowodowało odciążenie danego fragmentu muru (punkty 2 i 3), lecz odciążenie nie było całkowite. Pozostały odkształcenia rzędu 50%. Powodem tego jest zwiększenie obciążenia i w konsekwencji odkształcenia pozostałych fragmentów muru, szczególnie skrajnych (w punktach 1 i 4 o 66%), które przez przemieszczenie i obrót sztywnych elementów muru, jakimi są cegły, powodują przemieszczenia punktów pomiarowych w obszarze trepanacji. Powyższa obserwacja odnosi się szczególnie do filarków o niezbyt dużych przekrojach (jakie były badane). Należy przypuszczać, że w murach o większych przekrojach efekt odciążenia w strefie trepanacji będzie większy.
- Mimo powyższych obserwacji obliczone wartości modułu sprężystości z obciążonego fragmentu muru za pomocą poduszek ciśnieniowych są zgodne (co przedstawiono w tabl. 6 i na rys. 15), a różnice wynoszą przy tych samych poziomach naprężeń od 4% do 15%.

Analiza wykresu zależności  $\sigma$ - $\epsilon$  fragmentu muru obciążonego za pomocą poduszki ciśnieniowej (rys.15) pozwala zauważyć istnienie obszaru naprężeń około 1,5 MPa, do którego wykres ma charakter prostoliniowy, powyżej którego następuje zmiana zależ-

ności na krzywoliniową. Można to uznać za początek wyczerpywania nośności przez konstrukcję. Pozostaje niewyjaśniony problem, jaki jest udział w tym pozostałości naprężeń po wykonaniu szczelin (brak całkowitego odciążenia). Mimo tej niedogodności, wobec braku innych możliwości można uznać tę metodę za próbne obciążenie fragmentu muru, przyjmując, że nieznaną wartość pozostałych po trepanacji naprężeń spełnia rolę dodatkowego współczynnika bezpieczeństwa.



Rys. 14. Odształcenia ściany w poszczególnych punktach pomiarowych w trakcie pomiaru za pomocą pary poduszek ciśnieniowych  
 Fig. 14. Strains in each points of the wall during test with two flatjacks



Rys. 15. Zależność  $\sigma$ - $\epsilon$  otrzymana z pomiaru za pomocą pary poduszek ciśnieniowych  
 Fig. 15. A stress - strain curve obtained during test with two flatjacks

Tablica 6. Błędy określenia  $E$ . Table 6. Errors of  $E$  determinacios

Cała ściana		Fragment ściany obciążony poduszkami		Różnice $E$
Naprężenie	$E$	naprężenie	$E$	
MPa	GPa	MPa	GPa	%
0,7	22,6	0,68	23,6	4
1,4	20,1	1,35	23,2	15

## 8. Wnioski

Badania przeprowadzone w Zakładzie Konstrukcji i Badań Wytrzymałościowych ITB wykazały, że opisane pomiary sił wewnętrznych i odkształceń ścian murowanych za pomocą poduszek ciśnieniowych mogą być metodą stosunkowo prostą w wykonaniu i o nadspodziewanie dużej dokładności (10–15)%. Do otrzymanych dokładności pomiarów należy jednak podchodzić ostrożnie, ze względu na przeprowadzanie badań w idealnych warunkach laboratoryjnych, z możliwością kontrolowania procesu pomiarowego. Analiza odkształceń ścian w poszczególnych punktach pomiarowych wskazuje na duży stopień niejednorodności konstrukcji murowych, co dopuszcza możliwość pojawienia się nawet 30-procentowego błędu pomiaru (jest to sygnalizowane w literaturze dotyczącej metody).

Pomiar odkształcalności muru i określenie modułu sprężystości za pomocą dwu poduszek ciśnieniowych jest metodą o dość dużej dokładności (4–15)%. Pomiar wytrzymałości muru tą metodą wydaje się problematyczny wobec niemożności całkowitego odciążenia muru między dwoma równoległymi otworami na poduszki (po wykonaniu otworów pozostało 50% odkształceń początkowych), natomiast uwzględniając powyższe uwarunkowania, metoda ta może być traktowana jako pewnego rodzaju obciążenie próbne muru.

Pod względem technicznym najtrudniejszym problemem okazało się wykonanie otworów w murze i poprawne osadzenie w nich poduszek ciśnieniowych. Wymaga to specjalnego oprzyrządowania i dużego doświadczenia personelu wykonującego pracę.

## Bibliografia

- [1] Noland J.L., Atkinson R.H., Schuller M.P.: A review of the flatjack method for nondestructive evaluation, University of Colorado 1990
- [2] ASTM Standard C 1196-91: In situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flatjack measurements:1991
- [3] ASTM Standard C 1197-91: In situ measurement of masonry deformability properties using the flatjack method:1991



- [4] Lewicki B.: Ocena bezpieczeństwa istniejących konstrukcji murowych. Prace Instytutu Techniki Budowlanej – Kwartalnik, 4, 1998
- [5] RILEM LUMD 2: In-situ stress tests on masonry based on the flat jack: 1991
- [6] RILEM LUMD 3: In-situ strength/elasticity tests on masonry based on the flat jack: 1991

## THE METHOD OF IN SITU STRENGTH TESTING MASONRY STRUCTURES BY MEANS OF FLATJACKS

### Summary

This paper deals with test methods for determining stress and strains in masonry structure with flatjacks. Description of testing equipment used and results of their usage in laboratory tests is described.

*Praca wpłynęła do Redakcji 23 X 2002*