

dr inż. Rafał Nowak<sup>1\*)</sup>

prof. dr hab. inż. Romuald Orłowicz<sup>1)</sup>

dr hab. inż. Walerij Dierkacz<sup>2)</sup>

mgr inż. Antoni Galuk<sup>2)</sup>

# Wpływ obciążenia skupionego pod kątem do spoin wspornych na wytrzymałość muru na ściskanie

## *Influence of point force at angle to horizontal joints on masonry compressive bearing capacity*

DOI: 10.15199/33.2019.02.10

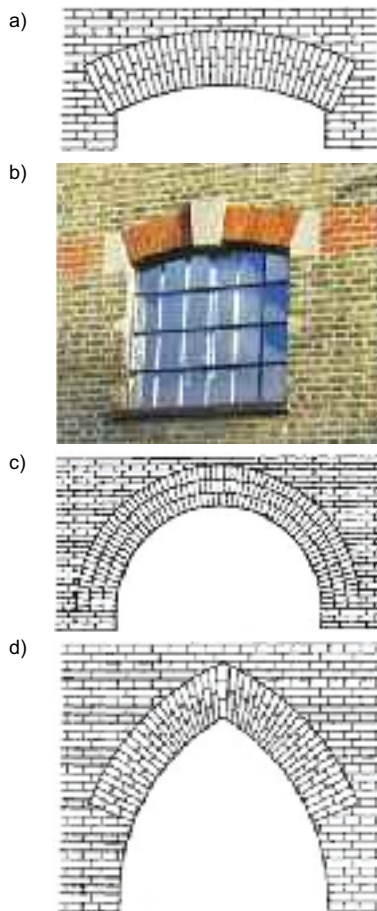
**Streszczenie.** Na podstawie badań własnych i dostępnych w literaturze przeanalizowano wytrzymałość muru na ściskanie pod kątem do płaszczyzny spoin wspornych. Z przeprowadzonych badań własnych wynika, że największy wzrost wytrzymałości obserwuje się przy miejscowym ścisaniu równoległym do płaszczyzny spoin wspornych, a najmniejszy pod kątem  $45^\circ - 65^\circ$  do ich płaszczyzny.

**Słowa kluczowe:** wytrzymałość muru, spoiny wsporne, obciążenie skupione.

**Abstract.** Compressive bearing capacity at angle to horizontal joints was investigated on bases on own and other research. Own research showed that biggest bearing capacity is connected with local compression parallel to horizontal joints and the lowest for angle of  $45^\circ - 65^\circ$  to horizontal joints.

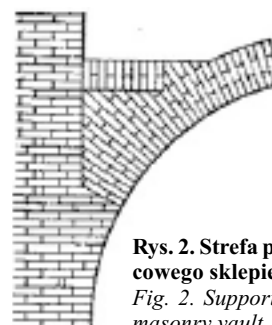
**Keywords:** masonry bearing capacity, horizontal joints, point force.

Większość konstrukcji murowych (ściany, filary, sklepienia) pracuje na ściskanie w poprzek spoin spornych. Wytrzymałość muru w tym kierunku określa się wytrzymałością na ściskanie elementów murowych i wytrzymałością zaprawy, co zostało ujęte w [6]. Ściany usztywniające lub ściany poddane nierównomiernym deformacjom podłoża pracują na ściskanie pod kątem do spoin wspornych. W takich ścianach powstaje złożony stan naprężeń, gdy oś naprężeń głównych jest nachylona pod kątem zbliżonym do  $45^\circ$  do płaszczyzny spoin wspornych. W tym przypadku o nośności i rysoodporności ścian decydują nie naprężenia ściskające, lecz główne naprężenia rozciągające [2, 3]. Są również przypadki gdy o nośności muru decydują wyłącznie naprężenia ściskające nachylone do płaszczyzn spoin wspornych. Dotyczy to np. stref podporowych nadproży i sklepień murowych (rysunki 1 i 2, fotografia). Kąt nachylenia linii ciśnienia w tych strefach zależy od kształtu konstrukcji, stosunku jej rozpiętości do wyniosłości i waha się w granicach  $10^\circ - 40^\circ$ . W związku z tym,



**Rys. 1. Kształtowanie ceglanych nadproży murowych: a, b) odcinkowych; c) półlukowych; d) ostrolukowych**

*Fig. 1. Shaping of brick arched masonry lintels: a, b) segmental; c) semi-circular; d) gothic arched*



**Rys. 2. Strefa podporowa walcowego sklepienia murowego**  
*Fig. 2. Support zone of barrel masonry vault*

że wytrzymałość muru na ściskanie prostopadle do spoin wspornych jest większa niż pod kątem [1, 3, 4, 5], to w strefach oparcia konstrukcji łukowych niekiedy stosowano elementy kamienne o większej wytrzymałości niż wytrzymałość muru (fotografia). W przypadku ich braku, w budynkach historycznych, z uwagi na zużycie techniczne muru lub zwiększenie obciążenia podczas ich modernizacji, nośność stref podporowych konstrukcji łukowych może być niewystarczająca. Konsekwencją tego są uszkodzenia konstrukcji łukowych lub ich stref podporowych.

W [4] podano wyniki badań trzech rodzajów murów wykonanych: z bloczków betonowych (pionowo drażonych – 20% i 40%); bloczków silikatowych (drażonych – 20%) oraz ceramicznych elementów drażonych (pionowo drażonych 20% i 40%) na typowych zaprawach cementowo-wapiennych. Uzyska-

<sup>1)</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

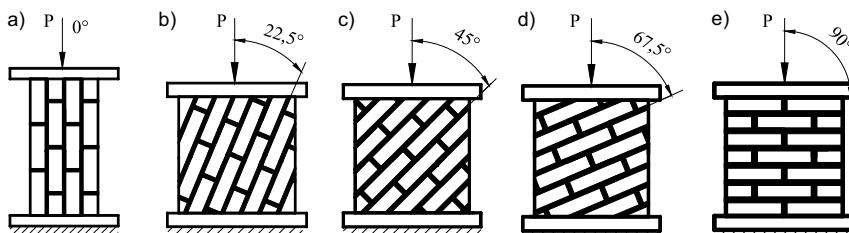
<sup>2)</sup> Naukowo-badawczy Instytut Budownictwa (BełNIIS, Białoruś)

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji: rnowak@zut.edu.pl



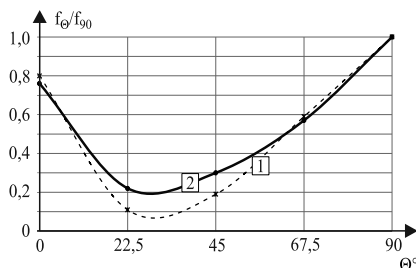
**Uszkodzenia strefy podporowej walcowego sklepienia murowego**  
Mechanism of damage to the support zone of the cylindrical stone wall

no następujące stosunki wytrzymałości dla kierunków równoległego i prostopadłego do spoin wspornych: w przypadku murów z bloczków betonowych i silikatowych  $f_0/f_{90} = 0,71$ , zaś murów z drażonych pustaków ceramicznych  $f_0/f_{90} = 0,37$ . W badaniach murów z pełnej cegły ceramicznej, najczęściej stosowanej w budynkach historycznych, ustalono, że  $f_0/f_{90} = 0,75$  [1, 4]. W [1] opisano poddane ścisłaniu próbki murowe, w których nachylenie płaszczyzny spoin wspornych w stosunku do kierunku obciążenia wynosiło odpowiednio  $\Theta = 0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ$  oraz  $90^\circ$  (rysunek 3). Ustalono, że sposób niszczenia próbek zależy od nachylenia płaszczyzn spoin wspornych. Gdy obciążenie działało prostopadłe do spoin wspornych ( $\Theta = 90^\circ$ ), zniszczenie miało charakter pionowych rys wydzielających słupki. W przypadku kąta  $67,5^\circ$  oraz  $45^\circ$  zniszczenie nastąpiło na skutek poślizgu zaprawy w spoinach wspornych, zaś kąta  $0^\circ$  – rozerwanie spoin wspornych. Natomiast gdy obciążenie i płaszczyzny spoin wspornych tworzyły kąt  $22,5^\circ$ , zaobserwowano zarówno poślizg zaprawy w spoinach wspornych, jak i zarysowanie tych spoin. Na rysunku 4 podano aproksymację wyników badań [4], które są podobne do zamieszczonych w [3, 5]. Z analizy wynika, że najmniejszą wytrzymałość na ścisłanie muru uzyskuje się przy jego ob-



**Rys. 3. Schemat badań próbek muru na ścisłanie pod kątem do płaszczyzn spoin wspornych [1]: a)  $\Theta = 0^\circ$ ; b)  $\Theta = 22,5^\circ$ ; c)  $\Theta = 45^\circ$ ; d)  $\Theta = 67,5^\circ$ ; e)  $\Theta = 90^\circ$**   
Fig. 3. Experimental test scheme of compression masonry walls samples with force at an angle to horizontal joints [1]: a)  $\Theta = 0^\circ$ ; b)  $\Theta = 22,5^\circ$ ; c)  $\Theta = 45^\circ$ ; d)  $\Theta = 67,5^\circ$ ; e)  $\Theta = 90^\circ$

ciążeniu pod kątem  $\Theta = 20^\circ - 30^\circ$ . Temu kątowi odpowiada nachylenie linii ciśnienia N (rysunek 4) nadproża i sklepien o stosunku rozpiętości do wyniosłości  $L/f = 6 \div 12$ . Oznacza to, że w tych przypadkach najczęściej obserwuje się uszkodzenie stref oparcia konstrukcji łukowych.



**Rys. 4. Aproksymacja wyników badań doświadczalnych: krzywa 1 wg [1]; krzywa 2 wg [4]**  
Fig. 4. Approximation of obtained experimental results: line 1 according to [1], line 2 according to [4]

Warto nadmienić, że siła N od nadproża i sklepien przekazywana jest na ściany w postaci obciążenia skupionego. Nośność muru w tym przypadku określa się ze wzoru [6]:

$$N_{Rdc} = \beta A_b f_{go} \quad (1)$$

w którym  $1 < \beta < 2$  – współczynnik zwiększający przy obciążeniu skupionym

$$\beta = [1 + 0,3 \cdot (a_1/h_c)] \cdot [1,5 - 1,1 (A_b/A_{ef})] \quad (2)$$

gdzie:

$a_1$  – odległość od krawędzi ściany do najbliższej krawędzi obciążonej powierzchni;

$h_c$  – wysokość ściany o grubości t do płaszczyzny obciążenia;

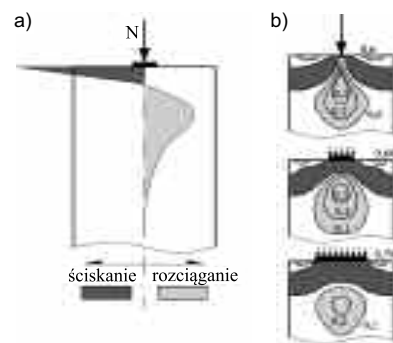
$A_b$  – pole powierzchni ściany, na którą przekazywane jest obciążenie;

$A_{ef} = l_{efm} t$  – efektywna powierzchnia przekroju oparcia;

$l_{efm}$  – efektywna długość pola dystrybucji obciążenia skupionego mierzona w podstawie trapezu na połowie wysokości ściany.

Wzrost wytrzymałości muru na ścisłanie przy obciążeniu skupionym związany jest z ograniczeniem odkształceń bezpośrednio obciążonych stref z uwagi na ich współpracę z powierzchnią nieobciążoną. Ograniczenie odkształceń występuje jedynie w bezpośrednim sąsiedztwie obciążenia i w tej strefie mur jest ścisłany w kierunku poprzecznym. W niższej części, bezpośrednio pod obciążeniem, pojawiają się naprężenia rozciągające (rysunek 5a). W [7] podano układ typowych izobar naprężeń w zależności od powierzchni lokalnego docisku ściany (rysunek 5b). Największy zakres naprężeń ścisłających występuje w przypadku obciążenia rozłożonego na największej powierzchni, a największe rozciąganie przy punktowym przyłożeniu siły. W przypadku, gdy siła znajduje się na krawędzi ściany, może dojść do wyłamania jej fragmentu.

Zarówno wzór (1), jak i przytoczone badania [7] odzwierciedlają zachowanie się muru przy obciążeniu skupio-



**Rys. 5. Stan naprężeń w murze obciążonym siłą skupioną na podstawie [7]: a) wykres poprzecznych (poziomych) naprężeń; b) izobary naprężeń w zależności od powierzchni przyłożenia siły**

Fig. 5. Stress state beneath a concentrated load [7]: a) lateral (horizontal) stress diagram; b) typical isobars of stress depending on load area

nym prostopadle do płaszczyzny spoin wspornych. Natomiast w literaturze i normach nie ma danych dotyczących wytrzymałości muru obciążonego siłą skupioną pod kątem do spoin wspornych. Taki przypadek obciążenia występuje w strefach oparcia konstrukcji łukowych (rysunek 1, 2). W związku z tym wykonano analizy numeryczne fragmentów muru za pomocą programu ANSYS, które modelowano w skali mikro w postaci elementów murowych połączonych między sobą spoinami pionowymi i wspornymi. Obciążenie skupione przekazywano na powierzchnię muru za pomocą stempla o długości równej długości cegły, co odpowiada minimalnej grubości nadproża lub sklepienia murowego. Obliczenia wykonywano przy obciążeniu

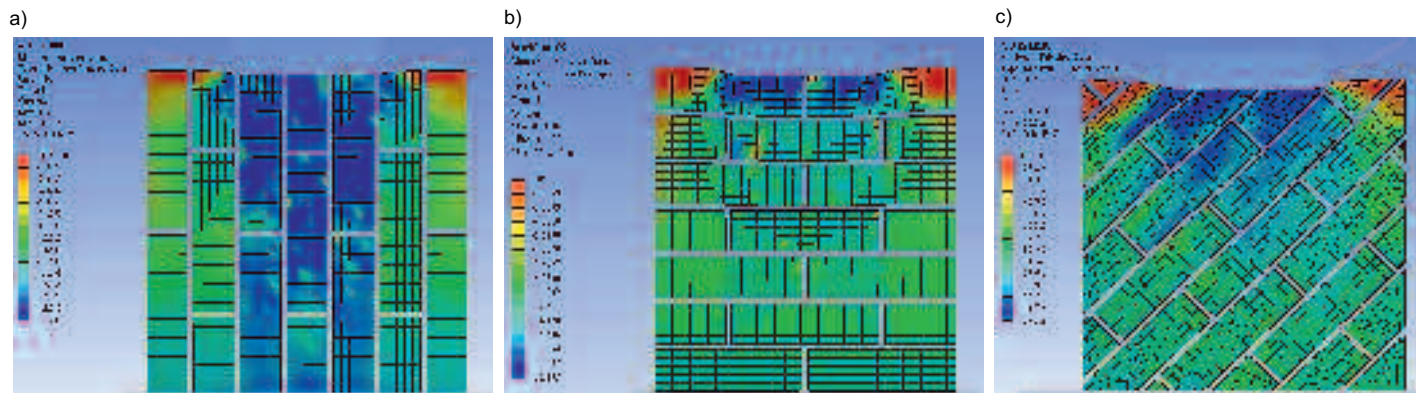
murowych i zaprawy określano w sposób doświadczalny [1].

Ustalono, że przy obciążeniu skupionym pod kątem  $0^\circ < \Theta < 90^\circ$  decydujący wpływ na wytrzymałość muru mają naprężenia styczne i rozciągające działające w płaszczyznach spoin wspornych. W wyniku ich oddziaływania następuje zarysowanie spoin. Przy obciążeniu pod kątem  $\Theta = 90^\circ$  decydujący wpływ na wytrzymałość mają naprężenia zginające w elementach murowych usytuowanych bezpośrednio pod obciążeniem skupionym (rysunek 6b). Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 7 w postaci zależności  $f_\Theta/f_{90}$  i kąta  $\Theta$ . Z analizy wynika, że efekt zwiększenia wytrzymałości muru przy miejscowym ściskaniu jest największy w przypadku kąta  $\Theta = 0^\circ$ .

skaniu muru prostopadle do spoin wspornych, a najmniejsza pod kątem  $20^\circ - 30^\circ$ . W przypadku ściskania miejscowego siłami skupionymi największą wytrzymałość muru w porównaniu z obciążeniem równomiernym uzyskuje się w kierunku spoin wspornych, a najmniejszą pod kątem  $45^\circ - 60^\circ$  do ich płaszczyzn. Zależności te należy uwzględniać przy sprawdzeniu nośności stref oparcia nadproży łukowych i sklepień na ścianach murowych.

### Literatura

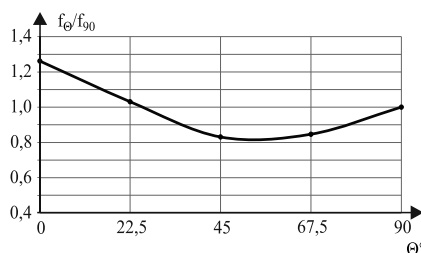
- [1] Dierkacz Walerij N. 2011 „Anizotropia wytrzymałości muru przy ściskaniu.” *Научно-техническое ведомости СПбГПУ – Наука и образование.* №3 (130). С. 181 – 186.  
 [2] Geniev Georgij A., Leszek Małyszko. „Selected strength and plasticity problems of anisotropic structural materials.” *Proceedings of the inter-*



Rys. 6. Odształcenie i izobary naprężeń głównych ściskających w murze przy obciążeniu skupionym pod kątem do spoin wspornych: a)  $\Theta = 0^\circ$ ; b)  $\Theta = 90^\circ$ ; c)  $\Theta = 45^\circ$

Fig. 6. Deflection and stress maps of principia compressive stresses in masonry for point load at angle to horizontal joints: a)  $\Theta = 0^\circ$ ; b)  $\Theta = 90^\circ$ ; c)  $\Theta = 45^\circ$

niu fragmentu siłą ściskającą pod kątem  $\theta = 0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ$  i  $90^\circ$  do spoin wspornych. Warunki brzegowe modelu uwzględniały możliwość jego odształcenia pionowego. Ograniczono odształcenia poziome krawędzi pionowych wycinka z długiej ściany. Elementy murowe i spoiny modelowano objętościowymi elementami skończonymi typu SOLID 65 uwzględniającymi zarysowanie i rozdrobnienie materiału. Nieliniowe zagadnienia rozwiązywano z uwzględnieniem przyczepności i tarcia występującego między elementami murowymi a zaprawą. Współczynniki tarcia i przyczepności w obliczeniach przyjmowano na podstawie badań wg norm PN-EN 1052-3 i PN-EN 1052-5. Wytrzymałość i odształcalność (rysunek 6) elementów



Rys. 7. Zależność  $f_\Theta/f_{90}$  od wielkości kąta  $\Theta$  między obciążeniem skupionym a spoinami wspornymi

Fig. 7. Relation of  $f_\Theta/f_{90}$  from angle amount between point forces and horizontal joints

### Wnioski

Wytrzymałość muru na ściskanie zależy od kierunku działania sił ściskających względem spoin wspornych. W przypadku równomiernego obciążenia największą wytrzymałość uzyskuje się przy ści-

national symposium IASS Polish Chapter, Warsaw, Poland, 2002. 8 p.

[3] Kubica Jan. *Mechanika muru obciążonego w swej płaszczyźnie.* Gliwice 2012.

[4] Mojsilović Nikola. 2005. „A Discussion of masonry characteristics derived from compression tests.” *Proceedings of the 10th Canadian Masonry Symposium, Banff, Alberta, Canada, and June 8 – 12, 2005/University of Calgary, Department of Civil Engineering.* – Calgary, 2005. pp. 242 – 250.

[5] Page Arthur W., Arnold W. Hendry. 1988. „Design rules for concentrated loads on masonry”. *The Structural Engineer.* Vol. 66.– № 17/6.– pp. 273 – 281.

[6] PN-EN 1996-1-1. *Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.*

[7] Senthivel Rajachitra, Satyendra Narayan Sinha, Alok Madan. „Influence of bed joint orientation on the stress-strain characteristics of sand plaster brick masonry under uniaxial compression and tension.” *Proc. of the 12th Int. Brick/Block Masonry Conf. Madrid, Vol. 3, 2000 pp. 1655–1666.*

Przyjęto do druku: 15.11.2018 r.