

Analiza zespolenia elementów ceramicznych i żelbetowych w murach ściskanych

Analysis of the combination of ceramic and reinforced concrete elements in compressed walls

mgr inż. Aleksandra Mazurek (ORCID 0000-0002-7027-9612), dr hab. inż. Artur Piekarczyk, prof. instytutu (ORCID 0000-0003-0988-4511), dr inż. Jarosław Szulc (ORCID: 0000-0002-4498-8829), Zakład Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki i Betonu, Instytut Techniki Budowlanej

DOI 10.5604/01.3001.0053.6987

Streszczenie: W konstrukcjach obiektów budowlanych w szczególnych przypadkach stosuje się betonowe wzmocnienia ścian wykonanych z elementów murowych. Tradycyjny sposób polega na wprowadzeniu zbrojenia i zabetonowaniu (na całej wysokości ściany) pionowej przerwy między fragmentami muru, po uprzednim jej zaszalowaniu. Istnieje również alternatywna metoda, polegająca na zastosowaniu dedykowanych pustaków ceramicznych z otworem, które dodatkowo pełnią funkcję szalunku traconego dla wprowadzonego słupka żelbetowego. W laboratorium Instytutu Techniki Budowlanej (ITB) podjęto próbę doświadczalnej i numerycznej weryfikacji przypadku oraz określenia ilościowych różnic nośności na ściskanie murów wzmocnionych słupkiem żelbetowym w porównaniu do muru bez takiego wzmocnienia. Wyniki badań doświadczalnych i analiz numerycznych wykazały ok. 12% zmniejszenie wygięcia muru ze wzmocnieniem, przy jednoczesnych zmianach jakościowych rozkładu naprężeń w odniesieniu do modelu bez takiego wzmocnienia.

Słowa kluczowe: konstrukcje zespolone ceramiczno-żelbetowe, mur ściskany, współpraca ceramiki i żelbetu.

Summary: In the construction of buildings, in special cases, concrete reinforcement of walls made of masonry elements is used. The traditional method consists in introducing reinforcement and concreting (over the entire height of the wall) the vertical gap between the fragments of the wall, after prior boarding it. There is also an alternative method involving the use of dedicated ceramic hollow bricks with a hole, which additionally act as permanent formwork for the introduced reinforced concrete post. In the ITB laboratory, an attempt was made to verify the case experimentally and numerically, and to determine the quantitative differences in the compressive load capacity of walls with a reinforced concrete column compared to a wall without such reinforcement. The results of experimental tests and numerical analyzes showed an approx. 12% reduction in the deflection of the wall with reinforcement, with simultaneous qualitative changes in the stress distribution in relation to the model without such reinforcement.

Keywords: ceramic-reinforced concrete composite structures, compressed masonry, cooperation of ceramics and reinforced concrete.

1. Opis zagadnienia

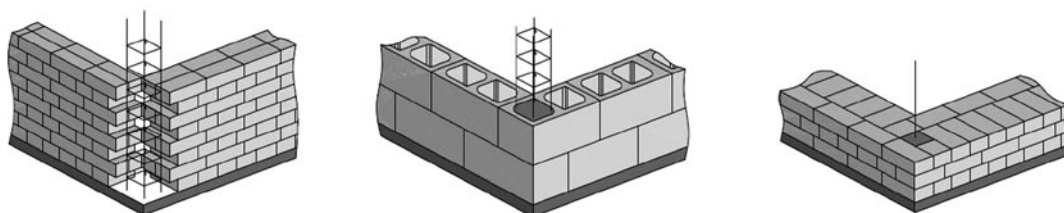
Konstrukcje zespolone ceramiczno-żelbetowe to konstrukcje utworzone z elementów ceramicznych, betonu i prętów stalowych połączonych ze sobą w taki sposób, aby pracowały zasadniczo jak jednorodny element.

Instrukcja ITB 391/2003 [1] rozróżnia następujące sposoby kształtowania połączenia muru z żelbetem: wykonanie w ścianie żelbetowego słupka (rdzenia), usytuowanie zbrojenia w drążeniach elementów murowych lub wykształcenie w murze możliwości przeprowadzania pojedynczego pręta (rys. 1).

Przesłanki stosowania zbrojenia w konstrukcjach murowych są takie same jak w przypadku konstrukcji betonowych, to znaczy, że zbrojenie wprowadza się w strefach, gdzie potencjalnie mogą wystąpić naprężenia rozciągające lub tam, gdzie nośność przekroju ściskanego jest niewystarczająca.

Zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 1996-1-1 [2] zbrojenie powinno być tak usytuowane i skonstruowane, aby występowała pełna współpraca z murem w przenoszeniu sił wewnętrznych. Stal zbrojeniową należy również dobrać z uwagi na trwałość konstrukcji, w zależności od klasy ekspozycji

Rys. 1. Sposoby połączenia muru z żelbetem [1]



i rodzaju materiału, w którym układane jest zbrojenie.

Po obciążeniu konstrukcji murowych i wywołaniu stanu ściskania, zginania lub ścinania, minimalny przekrój zbrojenia nie powinien być mniejszy niż 0,05% pola przekroju efektywnego muru.

W normie [2] zalecono tak dobierać zbrojenia, aby zapewnić odpowiednie jego zakotwienie w zaprawie lub betonie wypełniającym. Średnica prętów zbrojeniowych powinna być nie mniejsza niż 5 mm, przy jednoczesnym spełnieniu wymagań dotyczących grubości otulenia.

Beton stosowany jako wypełnienie powinien być zgodny z normą PN-EN 206-1:2003 [3], w szczególności jego klasa nie powinna być niższa niż C12/15.

Obliczenia inżynierskie zbrojonego podłużnie przekroju muru wzmocnionego nie różnią się zasadniczo od sprawdzenia nośności analogicznie obciążonych elementów żelbetowych. W konstrukcjach murowych, w przeciwieństwie do konstrukcji żelbetowych, wprowadza się zbrojenie w miejscach, gdzie jest to możliwe. Położenie zbrojenia uzależnione jest więc od lokalizacji drążen w elemencie murowym lub nieprzewiązanych elementami murowymi pionowych obszarów spoin.

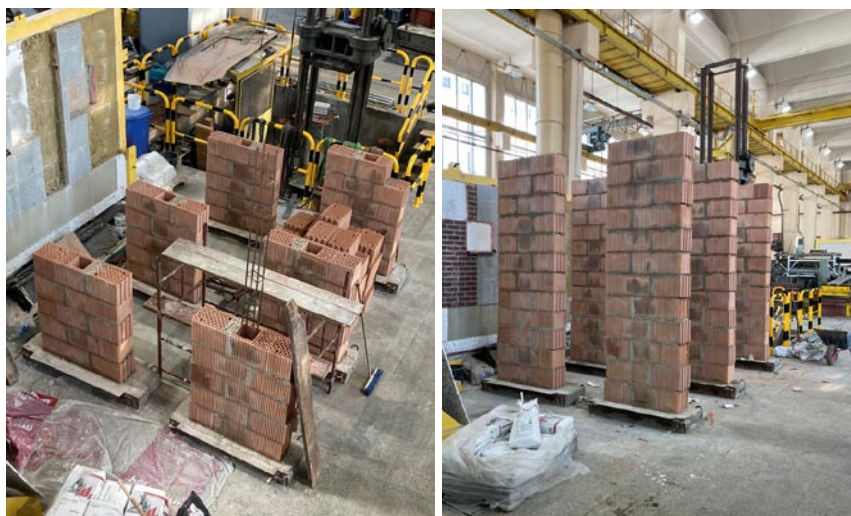
W odniesieniu do elementów murów obciążonych głównie pionowo norma [2] zaleca stosowanie dokładnej metody obliczeniowej, w której siły wewnętrzne są obliczane z uwzględnieniem parametrów materiałów, połączeń i podstawowych zasad mechaniki konstrukcji. Metoda ta wymaga stosowania teorii nieliniowych, które opierają się na specjalnych związkach konstytutywnych. Norma dopuszcza stosowanie teorii liniowo-sprężystych, które zakładają liniową zależność między naprężeniami i odkształceniami o nachyleniu równym modułowi sprężystości. Wykorzystanie teorii nieliniowych wymaga prowadzenia obliczeń z zastosowaniem złożonych, najlepiej przestrzennych modeli budowanych w programach bazujących na metodzie elementów skończonych.

2. Materiały i metody

2.1. Próbkki do badań laboratoryjnych

Badania doświadczalne przeprowadzono w laboratorium ITB na elementach murowych (3 szt.) o wymiarach 3,06x1,00x0,25 m. Wysokość elementów odpowiadała dwunastu warstwom pustaków na zaprawie zwykłej, a grubość muru była równa grubości pustaka.

Przygotowano elementy próbne w postaci fragmentu ściany, wprowadzając w środku rząd pustaków ceramicznych Porotherm (PTH) 25 K P+W (rys. 2), z otworem o przekroju 0,17x0,17 cm; wytrzymałość pustaków na ściskanie wynosiła



Fot. archiwum ITB

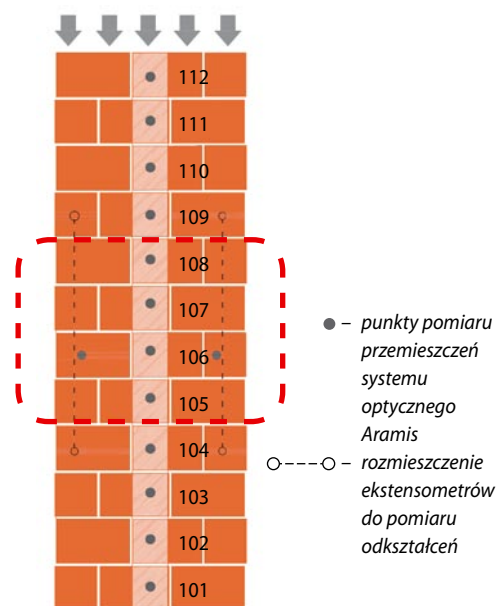
Rys. 2. Widok elementów próbnych do badań wytrzymałościowych

14,8 MPa, a zaprawy 5 MPa; szerokość elementu próbnego odpowiadała 2,5 długościom pustaka [4].

Słupki elementów próbnych zostały wykonane z betonu towarowego klasy C20/25, średnia wytrzymałość próbek kontrolnych wynosiła 26,3 MPa. Zbrojenie składało się z 4 podłużnych prętów #12 ze stali B500B, a ich otulina wynosiła 20 mm.

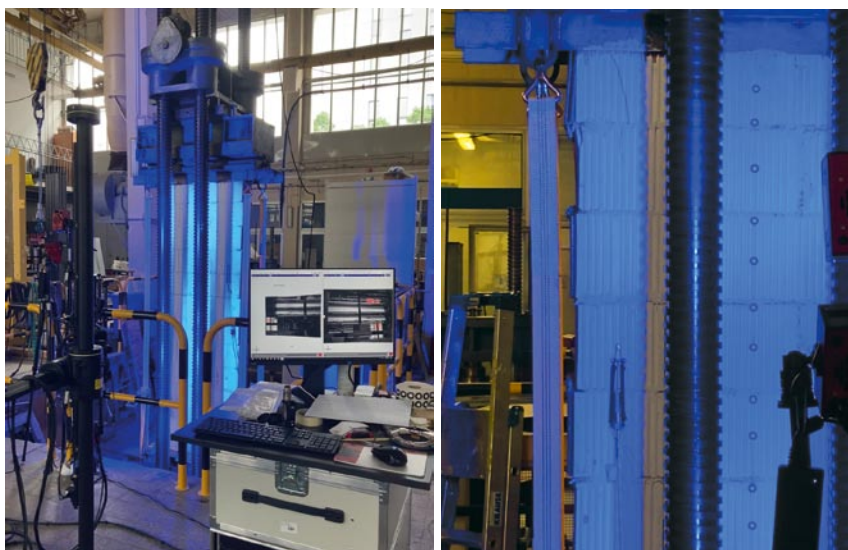
2.2. Metoda badawcza

Do badań wykorzystano maszynę wytrzymałościową o zakresie pomiarowym 2500 kN i 1 klasie dokładności wskazań. Obciążenie przykładano na mimośrodku równym 30 mm, skierowanym prostopadle do płaszczyzny muru (rys. 3). Badania wszystkich elementów przeprowadzane były po upływie min. 28 dni od daty betonowania słupów.



Rys. 3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na elementach próbnych z oznaczeniem fragmentu muru przyjętego do analizach numerycznych

Fot. archiwum ITB

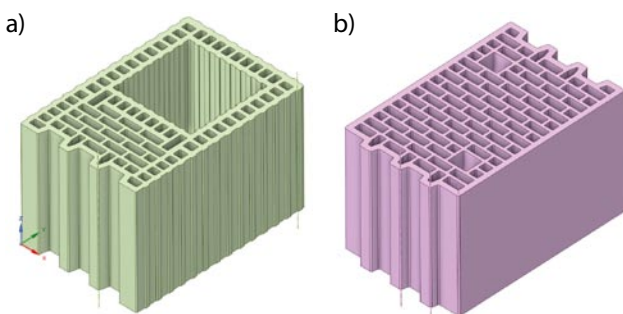


Rys. 4. Widok elementu próbnego podczas badań z wykorzystaniem optycznego systemu pomiarowego Aramis Adjustable 12M

Pomiary przemieszczeń i odkształceń wykonano za pomocą optycznego systemu pomiarowego Aramis Adjustable 12M działającego na zasadzie Cyfrowej Korelacji Obrazu (rys. 4).

2.3. Metoda obliczeniowa

W celu porównania wyników badań doświadczalnych z analizami numerycznymi sporządzone zostały modele muru wzmocnionego słupem żelbetowym z zastosowaniem pustaków PTH 25 K P+W i rzeczywistym (pełnowymiarowe modele 3D) odwzorowaniem geometrii wszystkich elementów murowych (rys. 5).



Rys. 5. Widok modeli numerycznych elementów murowych: a) pustak Porotherm 25 K P+W, b) pustak Porotherm 25 P+W

Celem obliczeń była ilościowa i jakościowa ocena wpływu interakcji ceramiki i żelbetowego wzmocnienia muru na nośność i sztywność elementu. Obliczenia zrealizowano numerycznie z wykorzystaniem metody MES w programie Ansys.

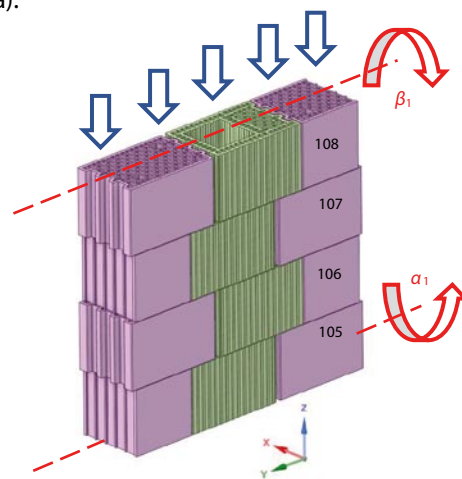
Do budowy siatki elementów skończonych w modelu numerycznym zastosowano elementy 20-węzłowe, objętościowe typu Solid186. Elementy takie umożliwiają analizę plastyczności, hipersprężystości, pełzania, usztywnień naprężeniowych oraz dużych ugięć i odkształceń.

Do obliczeń przyjęto ograniczony model muru przedstawiony na rysunku 6, składający się z czterech środkowych warstw pustaków. Wprowadzenie tego ograniczenia wynikało głównie z objętości zadania numerycznego i możliwości technicznych realizacji obliczeń. Zastosowane uproszczenie może prowadzić do powstania osobliwości i nieciągłości rozwiązania w miejscach zmiany gęstości siatki i uniemożliwia zastosowanie połączeń kontaktowych. Pewnym rozwiązaniem byłoby zastosowanie analizy substruktur, ale w rozpatrywanym przypadku wcześniej należałoby przeprowadzić analizę wrażliwości ich oddziaływań, co w konsekwencji jest dosyć kłopotliwe i czasochłonne.

Pomiędzy pustakami zastosowano połączenia kontaktowe odpowiadające charakterystyce trwałego połączenia spoinowego.

Analizy numeryczne wykonano w dwóch wariantach:

- wariant 1: z ceramiką i wypełnieniem betonem drążenia pustaka typu K,
- wariant 2: model bez wypełnienia betonem (wyłącznie ceramika).



Rys. 6. Widok modelu numerycznego analizowanego fragmentu muru z oznaczeniem obciążenia i warunków brzegowych

Ponieważ pełnowymiarowy obiekt testowy ma 12 warstw ceramiki, a model obliczeniowy 4 warstwy (rys. 3), konieczne jest odwzorowanie warunków brzegowych odpowiedzialnych za ciągłość struktury i sposób obciążenia.

W analizach numerycznych przyjęto następujące założenia:

- zadanie dotyczy małych odkształceń,
- obowiązuje zasada przekrojów Bernoulliego oraz sił de Saint-Venanta,
- parametry materiałowe betonu i ceramiki przyjmowane są w zakresie obowiązywania prawa Hooke'a,

Rys. 7. Oznaczenie parametrów brzegowych modelu pomiarowego

- siła mimośrodowa znajduje się w rdzeniu przekroju (w przekroju występuje wyłącznie ściskanie o różnych wartościach skrajnych względem osi bezwładności),
- stosuje się obciążenie o sile odpowiadającej wynikowi badań obiektu testowego i na mimośrodku zapewniającym zgodność kątów obrotu α, β . Zgodność dotyczy kątów obrotu podpór modelu obliczeniowego w miejscu podparcia i obiektu testowego w miejscu przecięcia struktury (α_1, β_1).

Z danych pomiarowych wyznaczono kąty obrotów, strzałkę wygięcia oraz wartość siły przy maksymalnym obciążeniu (tuż przed niszczeniem próbki) – rysunek 7. W modelu numerycznym wariant 1 (element z wypełnieniem betonowym) wykonano parametryzację, w której wyznaczono kąty obrotów i siłę ścisającą. Wyniki porównania zestawiano w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie parametrów brzegowych

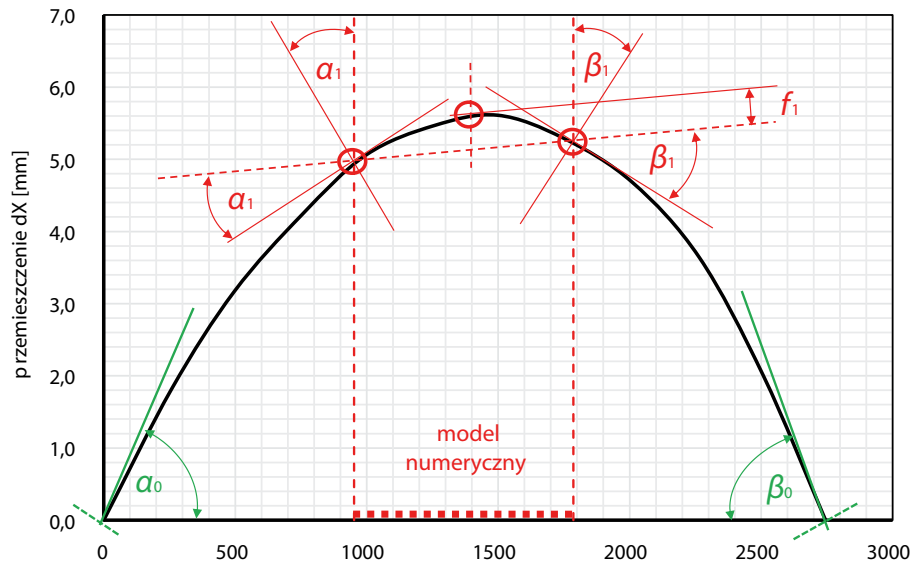
Parametr	Element testowy	Model numeryczny	Błąd
N	1146,8 kN	1081,9 kN	6,0%
f_1	0,43 mm	0,39 mm	10,3%
α_0	0° 24' 12"	-	-
β_0	0° 29' 06"	-	-
α_1	0° 03' 18"	0° 3' 36"	8,3%
β_1	0° 02' 07"	0° 3' 12"	4,4%

Założono ogólne kryterium rozbieżności wyników obliczeń i badań na poziomie około 10%. Ostatecznie przyjęto, że parametry kontrolne spełniają wymagania i mogą być użyte do kontroli poprawności warunków brzegowych.

Parametry materiałowe przyjęte w analizach numerycznych zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Podstawowe właściwości materiałowe komponentów analizowanego muru

		Beton C20/25	Ceramika Porotherm
Gęstość	kg/mm ³	2,4x10 ⁻⁶	8,0x10 ⁻¹⁶
Moduł sprężystości podłużnej	MPa	3000	13400
Współczynnik Poissona	-	0,18	0,22
Moduł sprężystości poprzecznej	MPa	12712,0	5491,8



3. Rezultaty

3.1. Wyniki badań doświadczalnych

Wszystkie przeprowadzone próby wytrzymałościowe miały charakter niszczący. Przykładowy mechanizm niszczenia ściany – niszczenie osłony słupa z pustaków ceramicznych i odspojenie otuliny betonowej przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Widok zniszczonej ściany murowanej po badaniu wytrzymałościowym

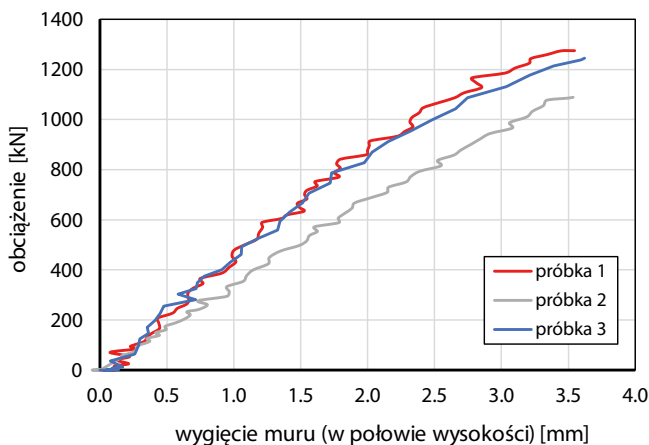
Wyniki badań wytrzymałościowych elementów próbnych ścian murowanych [5] zamieszczono w tabeli 3.

Przykładowe wykresy wygięcia murów (przemieszczeń poziomych) w środku wysokości, w zależności od poziomu ich obciążenia przedstawiono na rysunku 9. Na rysunku 10 zaprezentowano wygięcia elementów, uzyskane na podstawie wyników przemieszczeń poziomych w 10 punktach pomiarowych na wysokości (rys. 3). Deformacje rejestrowane były na wysokości ściany w sześciu różnych zakresach obciążenia. Ostatni zakres ($N = 1156$ kN) oznacza maksymalne obciążenie, przy którym nie odnotowano zniszczenia.

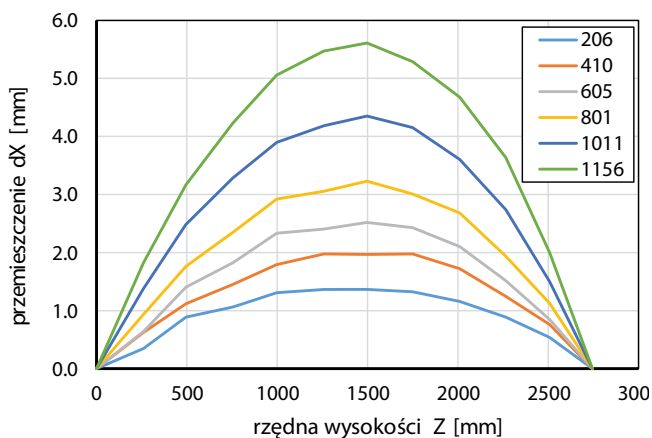
Tabela 3. Podstawowe wyniki badań wytrzymałościowych elementów ścian murowanych

Nr próbki	Mimośród	Max. obciążenie	Średnie obciążenie	Pole przekroju poprzecznego	Wytrzymałość na ściskanie	Przemieszczenie poziome*
	[m]	[kN]	[kN]	[m ²]	[MPa]	[mm]
1	0,03	1269,0	1221,9	0,233125	5,2	3,6
2		1146,8				5,6
3		1250,7				3,6

*prostopadle do płaszczyzny ściany



Rys. 9. Wykres zależności wygięcia muru od jego obciążenia



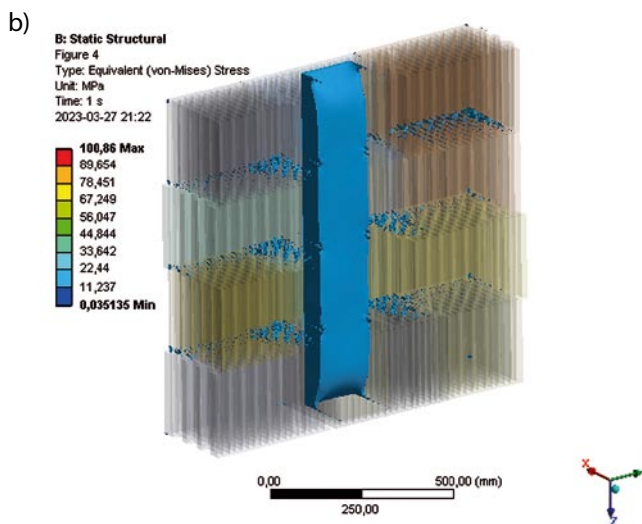
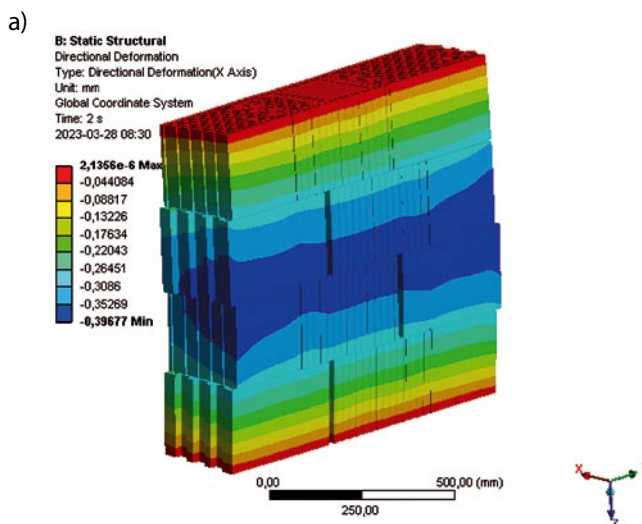
Rys. 10. Strzałka wygięcia muru na wysokości przy wybranych poziomach jego obciążenia [6]

3.2. Wyniki obliczeń

Wyniki obliczeń modelu ze wzmocnieniem betonowym (wariant 1) przedstawiono na rysunku 11, natomiast modelu bez wzmocnienia (wariant 2) – na rysunku 12.

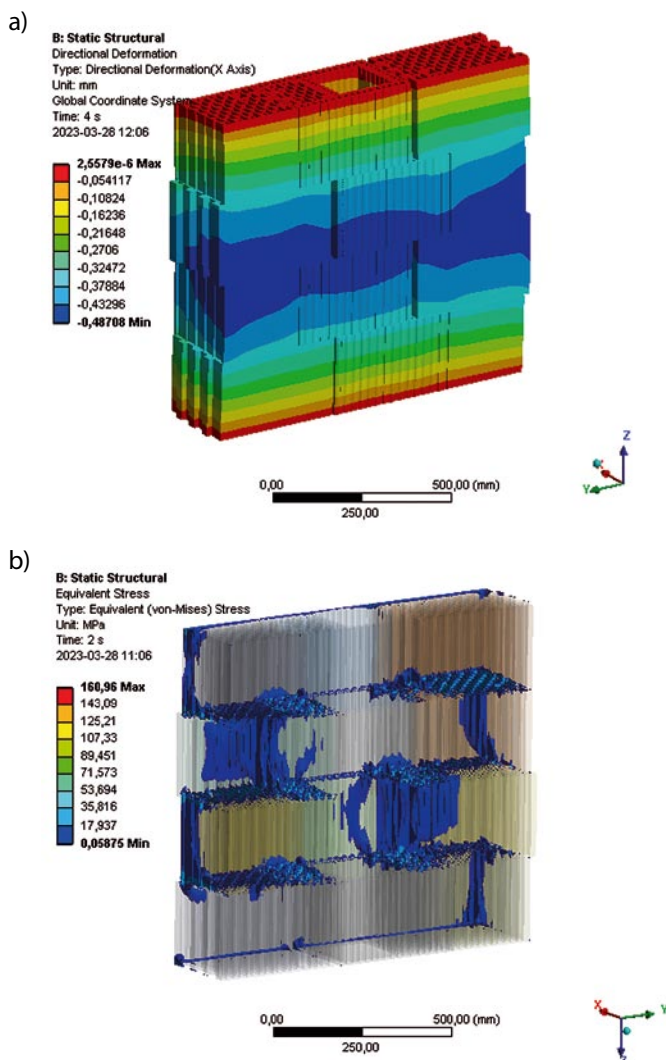
4. Podsumowanie

Przedmiotem analizy była ocena jakościowa i ilościowa wpływu wzmocnienia (słupków żelbetonowych wbudowanych w pustakach PTH K P+W) na nośność i sztywność elementu murowego. Oczywiście wydaje się stwierdzenie, że elementy wzmocnione słupem betonowym mają



Rys. 11. Wyniki analiz numerycznych (przy obciążeniu 1081,9kN) – wariant 1: a) mapa wygięć f_r , b) zasięg naprężeń o wartości $\sigma \leq 15$ MPa

większą nośność i sztywność, ale pytanie zostaje otwarte w kwestii ilościowej i jakościowej oceny tego wpływu. Badania wykazały, że średnia wartość siły niszczącej ściany murowanej wzmocnionej słupkiem żelbetonowym ukształtowanym w pustaku 25 K P+W przy ściskaniu mimośrodowym (mimośród 3 cm) wynosi 1221,9 kN. W celu oszacowania wpływu współpracy ceramiki i betonu na nośność i sztywność ściany przeprowadzono analizy numeryczne.



Rys. 12. Wyniki analiz numerycznych (przy obciążeniu 1081,9kN) – wariant 2: a) mapa wygięć f_r , b) zasięg naprężeń o wartości $\sigma \leq 15$ MPa

Obliczenia przeprowadzono dla elementu ze wzmocnieniem słupem betonowym, który stanowił model referencyjny. Kalibrację modelu wykonano na podstawie odpowiednio przygotowanych danych eksperymentalnych. Ostatecznie uzyskano model, który w pewnym zakresie umożliwia ocenę nośności i sztywności elementów murowych z pustaków ceramicznych typu K. Wyniki obliczeń wykazują, że przy ściskaniu mimośrodowym i identycznych parametrach brzegowych, wygięcia modelu bez wzmocnienia są większe o około 12% w porównaniu do modelu referencyjnego. Znacznie większa różnica występuje przy ilościowej i jakościowej propagacji naprężeń (rys. 11 i 12). W modelu ze słupem betonowym większość naprężeń o wartości do 15 MPa (wytrzymałość na ściskanie ceramiki) przejmie słupek betonowy. Pozostałe naprężenia rozpraszają się na pustaki ceramiczne na styku bloczków w pobliżu słupa (rys. 11b). Inaczej wygląda rozkład naprężeń w modelu bez słupa betonowego (rys. 12b). W tym przypadku strefy naprężeń sięgają całej wysokości bloczka oraz nieregularnej części na jego szerokości i w spoinach. Tworzą się obszary naprężeń, które mogą powodować uszkodzenia zewnętrznych ścianek pustaka. Jest to znacząca jakościowa różnica w porównaniu do modelu referencyjnego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Instrukcja nr 391/2003. Projektowanie budynków podlegających wpływowi wstrząsów górniczych. Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie, Warszawa, 2003
- [2] PN-EN 1996-1-1: Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych
- [3] PN-EN 206-1:2003/A2:2006P: Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [4] Raport z badań nr LZK00-01424/21/R142NZK, ITB, Warszawa, 2021
- [5] Praca badawcza. Analiza parametrów konstrukcyjnych słupów żelbetonowych o przekroju 25 x 25 cm oraz słupów wykonanych przy użyciu pustaków Porotherm 25K- 01424/21/R142NZK, ITB Warszawa, 2021
- [6] Szulc J., Sieczkowski J., Mazurek A., Ocena nośności murów ceramicznych wzmocnionych, Inżynier Budownictwa 12/2021, str. 62–65

68. Krynicka Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB Gliwice, 24–28 września 2023 r.



Konferencja Krynicka 2023



Wydział Budownictwa
 Politechniki Śląskiej

Tradycyjnie konferencja składać się będzie z dwóch części: problemowej i ogólnej. Myślą przewodnią części problemowej 68. edycji konferencji będą **Wyzwania budownictwa na terenach górniczych, pogórnich i zdegradowanych**. To szeroki temat, obejmujący nie tylko zagadnienia projektowania i wykonawstwa budynków i budowli w takich warunkach, ale także zagrożenia wynikające ze specyfiki terenów przemysłowych lub zdegradowanych w wyniku sposobu ich użytkowania oraz sposoby i możliwości efektywnego i bezpiecznego sposobu ich wykorzystania.

Przedmiotem części ogólnej konferencji będą następujące problemy naukowe:

Budownictwo hydrotechniczne • Budownictwo ogólne • Fizyka budowli • Geotechnika • Inżynieria materiałów budowlanych
 • Inżynieria przedsięwzięć budowlanych • Inżynieria komunikacyjna: drogi, koleje, mosty • Inżynieria środowiska
 • Konstrukcje betonowe • Konstrukcje metalowe • Mechanika konstrukcji i materiałów • Niezawodność konstrukcji

Biuro Konferencji: mgr inż. Marzena Gaura, mgr Małgorzata Lach – Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa
<https://www.polsl.pl/rb/krynica-gliwice-2023>, e-mail: konferencjakrynica2023@polsl.pl