

dr hab. inż. Maciej Dutkiewicz, prof. PBS^{1)*}

ORCID: 0000-0001-7514-1834

dr inż. Vadim Griniov¹⁾

ORCID: 0000-0003-1212-1996

mgr inż. Paweł Majkowski¹⁾

ORCID: 0000-0002-2645-9448

Analiza numeryczna i eksperymentalna prefabrykowanych płyt betonowych ze zbrojeniem wysokiej wytrzymałości w szczególnych warunkach podparcia

Numerical and experimental analysis of the precast concrete slabs reinforced with high grade steel bars with special supporting conditions

DOI: 10.15199/33.2024.02.05

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki analiz eksperymentalnych i numerycznych opisujących odpowiedź prefabrykowanych płyt z betonu zbrojonego prętami stalowymi wysokiej wytrzymałości na działanie sił wywołujących zginanie elementu. Przedmiotem badań eksperymentalnych było 45 płyt żelbetonowych umiejscowionych na specjalnie przygotowanym stanowisku. Badano wpływ grubości płyt oraz ich stopnia zbrojenia na nośność i odkształcalność elementu. Badano strefę środkową płyty, w której jest stały moment zginający. Stwierdzono, że płyty o grubości 120 mm wykazywały bardziej kruche zniszczenie, podobne do zniszczenia ściskanych elementów betonowych, podczas gdy charakter zniszczenia płyt cienkich 80 mm był bardziej łagodny. W wyniku analiz numerycznych i eksperymentalnych stwierdzono, iż zastosowanie stali B600B pozwala na oszczędniejsze wykorzystanie stali zbrojeniowej. W badaniach eksperymentalnych zastosowano system diagnostyczny pomiaru przemieszczeń i odkształceń, który w łatwy sposób można zaimplementować w warunkach użytkowania rzeczywistej konstrukcji. Uzyskane wyniki eksperymentalne porównano z wynikami z analizy modelu numerycznego.

Słowa kluczowe: odpowiedź na zginanie; płyta żelbetowa; płyta tunelowa; specjalne mocowanie.

Abstract. The paper presents experimental and numerical studies to determine the main characteristics of bent reinforced concrete precast slabs. We tested 45 reinforced concrete slabs with a constant load, in a specially made steel stand. The main purpose of the test is to study the effect of the thickness and percentage of reinforcement of slabs on strength and deformability. The zone of a slab with a constant moment was studied. It was revealed that slabs with a thickness 120 mm showed a more brittle fracture similar to the destruction of compressed concrete elements, while thin plates 80 mm collapsed in a quieter nature. As a result of numerical and experimental analyses, it was found that the use of B600B steel allows for more economical use of reinforcing steel. In the experimental research, a diagnostic system for measuring displacements and strains was used, which can be easily implemented in the conditions of use of the real structure. The obtained experimental results were compared with the results obtained from the analysis of the numerical model.

Keywords: bending behavior; reinforced concrete slab; fence slab; special fastening.

W zależności od warunków geotechnicznych, charakteru i kierunku obciążenia w wyrobiskach górniczych mogą być stosowane prefabrykowane konstrukcje betonowe o różnym przekroju: prostoliniowym (rysunek 1a), prostoliniowym i krzywoliniowym (rysunek 1b), krzywoliniowym (rysunek 1c). Obudowy wyrobisk z prefabrykatów żelbetonowych charakteryzu-

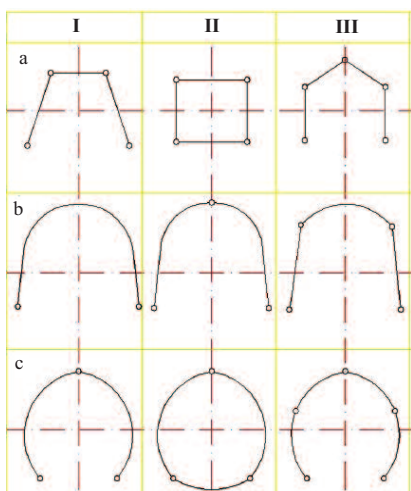
ją się trwałością, ognioodpornością oraz kilkakrotnie mniejszym zużyciem stali w porównaniu z obudowami stalowymi [1, 2, 3]. Jako zbrojenie badanych płyt zastosowano nową termomechanicznie wzmocnioną stal zbrojeniową klasy B600B. Badania laboratoryjne potwierdziły bardzo dobre właściwości tego rodzaju stali: granicę plastyczności $f_y > 650 \text{ N/mm}^2$; wytrzymałość na zerwanie $f_t > 740 \text{ N/mm}^2$; wydłużenie względne $\epsilon > 14\%$. Zastosowanie takiego zbrojenia zoptymalizuje zużycie stali zbrojeniowej podczas projektowania płyt, co potwierdzają prace [4, 5].

W celu określenia rzeczywistego naprężenia w stali zbrojeniowej konieczne jest przeanalizowanie pracy elementów zginanych i określenie rozkładu odkształceń na wysokości przekroju. Pozwoli to określić optymalne zbrojenie badanych płyt.

Naprężenie i odkształcenie [6, 7, 8, 9] jest uważane za cechę materiału i zależy od wielkości przekroju, geometrii, zbrojenia, warunków obciążenia i zamocowania. Odkształcenie betonu w strefie ściskanej elementów zginanych może mieć szeroki zakres. W badaniach [10] odkształcenia ściskania

¹⁾ Politechnika Bydgoska, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

^{*} Adres do korespondencji: maciej.dutkiewicz@pbs.edu.pl



Rys. 1. Schematy statyczne i kontury prefabrykatów betonowych obudowy
 Fig. 1. Static diagrams and contours of prefabricated concrete elements of the casing

zmieniały się od 2,6‰ do 9,7‰ w zależności od kształtu przekrojów. Z badań [11] wynika, że maksymalne odkształcenia betonu ściskanego elementów zginanych przekraczają 1,75 razy odkształcenia ściskanych osiowo próbek betonu. W pracy [12] zaleca się ostrożne stosowanie schematu „naprężenie-odkształcenie” uzyskanego podczas badania osiowo ściskanych próbek podczas analizy ściskanego betonu w elementach giętych, ponieważ odkształcenie odpowiadające zniszczeniu kostki lub cylindra nie może być kryterium wytrzymałości betonu w elementach zginanych.

Rzeczywisty rozkład naprężeń w strefie ściskania określonych elementów zginanych jest trudny do zmierzenia i odpowiedniego modelowania. Badania nad rozkładem naprężeń w elementach zginanych opisano w pracy [13]. Znajomość zależności „naprężenie-odkształcenie” jest niezbędna do badania zginanych elementów żelbetowych. Badania wytrzymałości betonu na ściskanie i jego wpływ na nośność elementów zginanych są w dalszym ciągu przedmiotem wielu analiz [14].

Cel i program badań

W artykule badano odpowiedź na zginanie płyt żelbetowych, znajdujących się w szczególnych warunkach podparcia. Analizowano płyty o różnej grubości i różnym stopniu zbrojenia. Badano odkształcenia betonu i charakter pęka-

nia w strefie stałego momentu. Badania miały na celu analizę zachowania się ściskanego betonu w elementach zginanych zbrojonych prętami B600B.

Założenia. Przedmiotem badań były wąskie płyty żelbetowe o przekroju prostokątnym, szerokości 0,50 m, wysokości przekroju 0,08, 0,10, 0,12 m oraz długości 2,00 m. Analizowano trzy grupy płyt, łącznie 45 sztuk (tabela 1). Każdą grupę stanowią płyty z trzech serii. W każdej serii wykonano po pięć płyt. Pierwsza grupa (I), to płyty: S80-1; S80-2; S80-3, druga (II): S100-1; S100-2; S100-3, a trzecia (III): S120-1; S120-2; S120-3. Płyty są zbrojone wzdłuż długiego boku prętami podłużnymi $\varnothing 10$ i $\varnothing 12$ mm ze stali klasy B600B, równomiernie rozmieszcz-

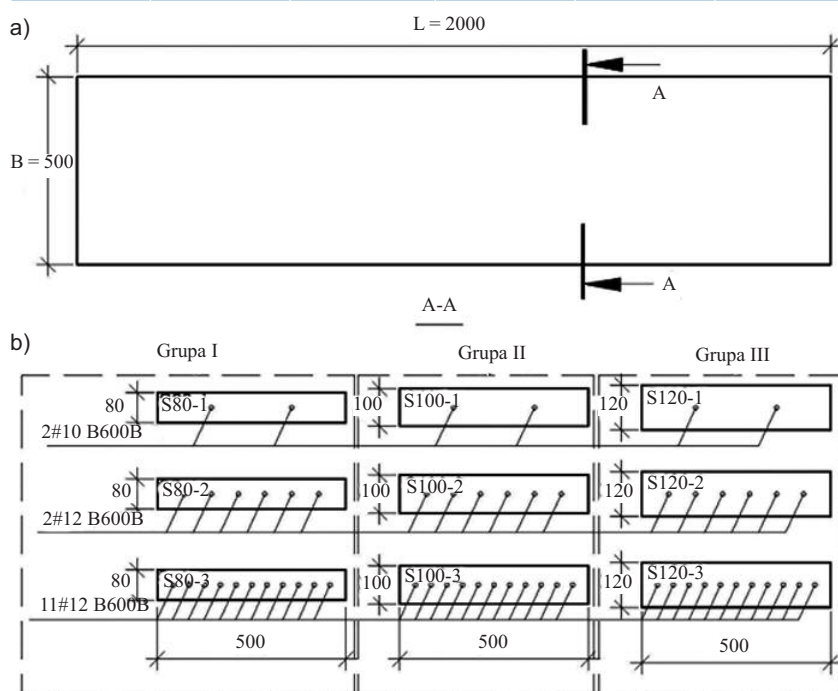
onymi na szerokości płyty. Możliwość wykorzystania płyt jako ścian w tunelach może wiązać się z pojawieniem się momentów zginających różnych znaków, a zastosowanie ich w środowisku korozyjnym z koniecznością zwiększenia otuliny, dlatego też środek ciężkości zbrojenia podłużnego znajduje się w połowie wysokości elementu. Geometrię płyt przedstawiono na rysunku 2.

Krótsze boki płyt są zakończone ceownikami o wysokości równej wysokości płyty oraz półkami skierowanymi do wewnątrz. Podłużne pręty zbrojenia są przyspawane do ceowników spoiną pachwinową. We wszystkich elementach zastosowano jednakowy beton i jednakową stal zbrojeniową. Określono na podstawie badań charakterystycz-

Tabela 1. Dane badanych płyt

Table 1. Data of the tested slabs

Grupa	Płyta	LxBxh [mm]	Liczba sztuk	Zbrojenie	Zbrojenie ρ [%]
I	S80-1	2000x500x80	5	2 $\varnothing 10$ B600B	0,79
	S80-2	2000x500x80	5	6 $\varnothing 12$ B600B	3,40
	S80-3	2000x500x80	5	11 $\varnothing 12$ B600B	6,22
II	S100-1	2000x500x100	5	2 $\varnothing 10$ B600B	0,63
	S100-2	2000x500x100	5	6 $\varnothing 12$ B600B	2,72
	S100-3	2000x500x100	5	11 $\varnothing 12$ B600B	4,98
III	S120-1	2000x500x120	5	2 $\varnothing 10$ B600B	0,52
	S120-2	2000x500x120	5	6 $\varnothing 12$ B600B	2,26
	S120-3	2000x500x120	5	11 $\varnothing 12$ B600B	4,15

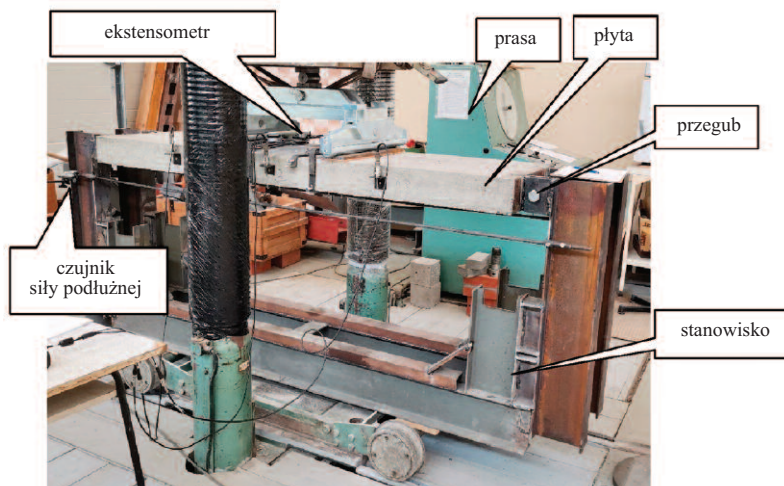


Rys. 2. Geometria (a) i zbrojenie zastosowanych płyt (b)

Fig. 2. Geometry (a) and reinforcement of the slabs (b)

na wytrzymałość betonu na ściskanie wynosiła 46,8 MPa a charakterystyczna granica plastyczności stali 666,7 MPa. W przypadku 45 płyt zbadano: 10 próbek prętów o każdej ze średnic oraz 195 kostek betonu z rozrzutem wyników 0,57 MPa.

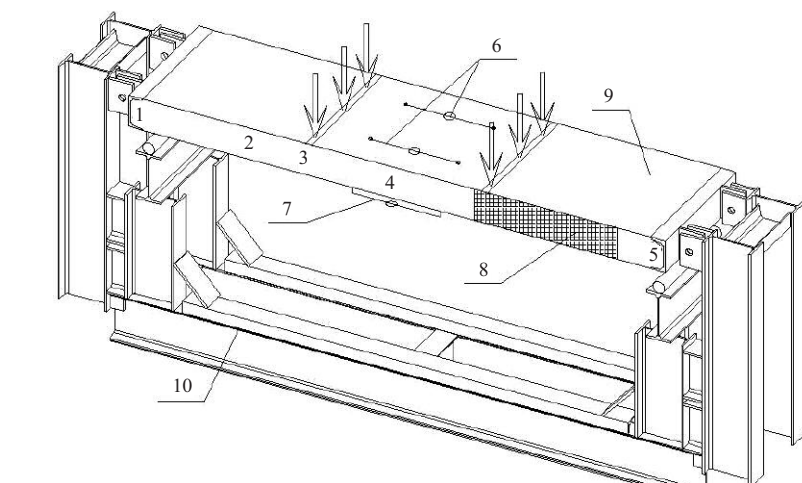
Procedura badań. Płyty żelbetowe poddane zostały zginaniu, ze stałym momentem na szerokości 1/3 przęsła. Płyty miały rozpiętość 2 m i były obciążane dwiema siłami pasmowymi za pomocą prasy hydraulicznej. Obciążenie dobrano w taki sposób, aby zniszczenie płyt nastąpiło po 10 – 15 krokach po kolejnym obciążeniu. Każdy etap obciążania trwał ok. 10 min. Widok stanowiska z badaną płytą oraz schemat wyposażenia przedstawiono na fotografii 1 oraz rysunku 3.



Fot. 1. Ogólny widok stanowiska z płytą
Photo 1. General view of the stand with the slab

W badaniach zastosowano prasę o zakresie do 6000 kN oraz stanowisko badawcze jak na fotografii 1. Płyty zostały przymocowane do stanowiska przegubowo za pomocą specjalnych uchwytów. Takie mocowanie zakładało brak momentów zginających i stworzyło efekt rozciągania i ściskania w badanych elementach.

W analizowanym elemencie badano ugięcia (punkty 1 – 5, rysunek 3) oraz odkształcenia w strefie ściskanej (punkt 6, rysunek 3) i rozciąganej (punkt 7, rysunek 3). Szerokość rys i moment rysujący określono odpowiednio za pomocą mikroskopu optycznego i na podstawie wykresu „moment-ugięcie”. Siły podłużne w płytach badano za



Oznaczenia: 1 – 5) czujniki ugięcia płyty, 5 sztuk; 6) ekstensometry odkształceń ściskanych powierzchni płyty, 2 sztuki; 7) ekstensometry odkształceń rozciąganych powierzchni płyty, 2 sztuki; 8) CKO; 9) płyta; 10) stanowisko badawcze

Rys. 3. Geometria i układ obciążenia płyt
Fig. 3. Geometry and load on slabs

osiągnęło granicę plastyczności (fotografia 2). Płyty z grup I, II i III o maksymalnym stopniu zbrojenia (11 Ø12) różniły się charakterem zniszczenia od płyt o minimalnym stopniu zbrojenia – beton został zmiążdżony (fotografia 3). Wynika to z faktu, że przekrój jest silnie zbrojony, a 11 prętów nie osiąga granicy plastyczności. To potwierdza, że mniej zbrojenia prowadzi do większego jego odkształcenia, większego ugięcia płyt, zwiększenia wysokości zasięgu rys, a w efekcie zmniejszenia wysokości strefy ściskanej betonu.

Zależność nośności płyt od stopnia zbrojenia i grubości płyt przedstawiono na rysunku 4. Z analizy wynika, że większy stopień zbrojenia nie zawsze powoduje zwiększenie nośności. Płyty o grubości 120 mm z maksymalnym stopniem zbrojenia 4,15% uzyskują maksymalny moment zginający $M_{E, \max} = 38,9$ kNm, a płyty o grubości 80 mm o maksymalnym stopniu zbrojenia 6,22% uzyskują moment zginający $M_{E, \max} = 18,4$ kNm. Widać więc, że ze wzrostem stopnia zbrojenia o 50% nośność zmniejszyła się o 53%, co potwierdza zasadę optymalnego projektowania: **ilość zbrojenia powinna odpowiadać objętości betonu ściskanego.**

Odkształcenia betonu. Na podstawie rysunku 4 stwierdzono, że ekstrema względnych odkształceń skrajnych powierzchni ściskanych i rozciąganych mieszczą się w zakresie: $-\varepsilon = 4 \dots 12 \times 10^{-3}$; $+\varepsilon = 5 \dots 14 \times 10^{-3}$ (odkształcenia strefy

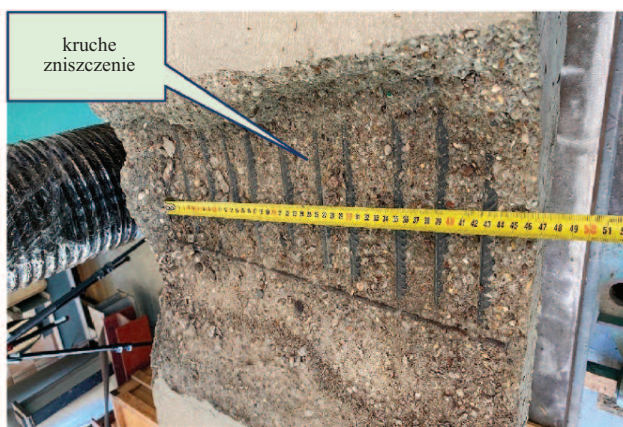
pomocą czujników zamontowanych na stanowisku badawczym, które zostało skalibrowane za pomocą elektronicznego dynamometru. Dodatkowo do określenia odkształceń powierzchni betonowej zastosowano metodę cyfrowej korelacji obrazu (CKO) przy użyciu aparatu cyfrowego i oprogramowania „GOM Correlate 2020” (punkt 8, rysunek 3).

Wyniki i dyskusja

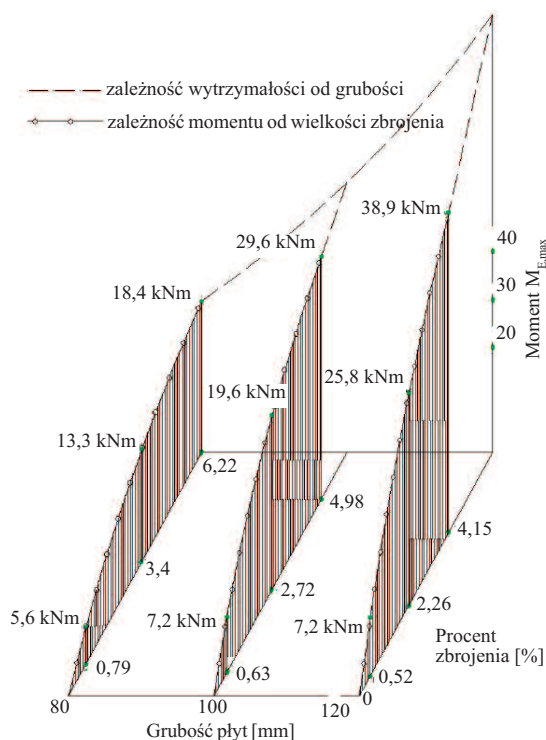
Charakter zniszczenia i nośność płyt. Płyty grupy I, II i III z minimalnym stopniem zbrojenia (2 Ø10) charakteryzują się łagodnym wzrostem odkształceń ściskanych i łagodnym zniszczeniem betonu strefy ściskanej. Zbrojenie



Fot. 2. Zniszczenie płyty o małym stopniu zbrojenia
Photo 2. Damage of the slab with a low degree of reinforcement



Fot. 3. Zniszczenie płyty o dużym stopniu zbrojenia
Photo 3. Damage of the slab with a high degree of reinforcement



Rys. 4. Zależność nośności płyt od grubości i stopnia zbrojenia

Fig. 4. Dependence of the ultimate limit state of the slabs on the thickness and degree of reinforcement

rozciąganej obejmują szerokość rys). Wraz ze wzrostem grubości płyt i przy stałym stopniu zbrojenia, moduł sprężystości betonu badanych płyt nieznacznie wzrasta ($E_2 < E_5$ i $E_3 < E_6$ na wykresach 2, 3, 5, 6, rysunek 5). Wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia i przy stałej grubości płyt, wzrasta moduł sprężystości betonu badanych płyt ($E_2 < E_3$ i $E_5 < E_6$ na wykresach 2, 3, 5, 6, rysunek 5).

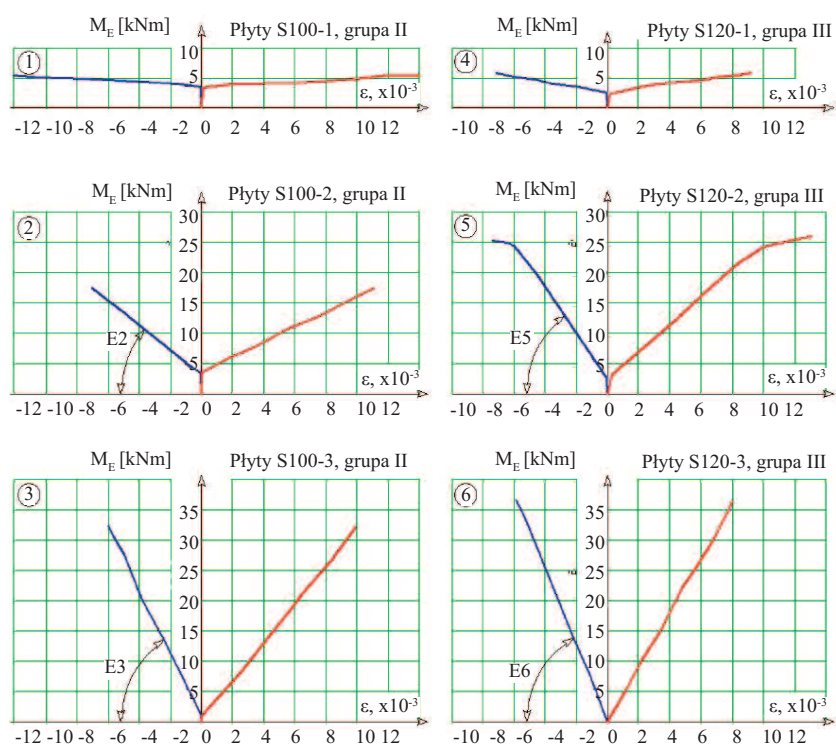
Wysokość strefy ściskanej betonu (X) została przedstawiona na fotografii 4.

Rozkład naprężenia ściskającego na wysokości jest paraboliczny, co widać na rysunku 6. Przy wartości odkształceń $\epsilon \leq 3,5 \times 10^{-3}$ w górnym punkcie (A) naprężenia ściskające są maksymalne w punkcie A. Przy przekroczeniu odkształceń $\epsilon \leq 3,5 \times 10^{-3}$ maksymalne naprężenia przesuwają się do środka przekroju. Zniszczenie betonu następuje po osiągnięciu naprężeń f_c .

Porównanie wyników modelu numerycznego z wynikami doświadczalnymi. W analizie numerycznej za-

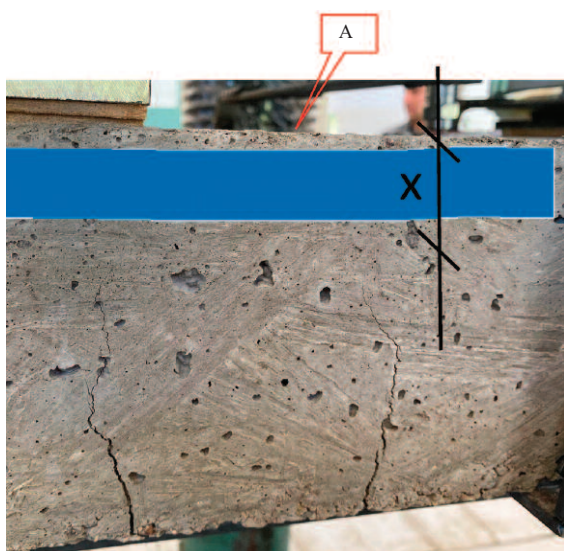
stosowano program BETA, który wykorzystuje metodę elementów skończonych [15, 16]. Zasada obliczeń bazuje na metodzie odkształceń. Obliczenia uważa się za zakończone, gdy naprężenia w materiałach osiągną wartości graniczne wytrzymałości betonu lub stali.

Uwzględniając wytrzymałość betonu i stali w płycie S80-2, uzyskano dokładność obliczeń 1,5% (tabela 2). Analiza pozostałych płyt wymaga indywidualnego przyjęcia wytrzymałości betonu

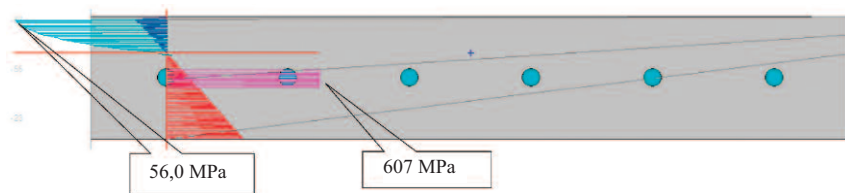


Rys. 5. Zależności „ $M_{Ed} - \epsilon$ ” w przypadku płyt grupy II i III

Fig. 5. “ $M_{Ed} - \epsilon$ ” relationships for slabs’ group II and III



Fot. 4. Wydzielona ściskana strefa betonu
Photo 4. Compressed concrete zone



Rys. 6. Rozkład naprężeń na wysokości przekroju płyty 80-2 ze zbrojeniem B600B
Fig. 6. Stress distribution at the height of the cross-section of 80-2 slab with B600B reinforcement

Tabela 2. Porównanie wyników eksperymentalnego i numerycznego w przypadku płyty S80-2

Table 2. Comparison of experimental and numerical results for the S80-2 slab

Grupa	Płyta	Moment doświadczalny $M_{E,max}$ [kN·m]	moment M_R [kN·m]	Analiza numeryczna		Różnica k.3/k.4 [%]
				warunkowo przyjęta wytrzymałość:		
				betonu [MPa]	stali [MPa]	
I	S80-2	13,3	13,1	56,0	666,0	1,5

i stali w celu uzyskania zbliżonych wyników z eksperymentalnymi. Możliwe jest zniszczenie elementu przez osiągnięcie wartości naprężeń granicznych w zbrojeniu lub w betonie. Rysunek 6 przedstawia przekrój płyty S80-2 z sześcioma prętami. Maksymalny moment, który przeniesie element, to $M_R = 13,1$ kNm. Obliczenia zostały zakończone, gdy naprężenia w betonie osiągnęły wartość maksymalną równą 56 MPa.

Różnica między obliczonymi i eksperymentalnymi wartościami momentów zginających jest skutkiem nieuwzględniania przez program wzrostu naprężeń betonu ściskanego. Praca betonu poza zakresem odkształcenia

ca płyt ze zbrojeniem B600B różni się pod względem wyężenia, naprężeń w stali, postaci wyężenia oraz rys od pracy płyt ze zbrojeniem B500B.

Badanie i numeryczne obliczenia płyt ze zbrojeniem B500B i B600B pokazują, że stal i beton zachowują się tak jak w przypadku stali B500B. Zastosowanie zbrojenia B600B powoduje oszczędność stali. Uzyskane wyniki nośności płyt o różnym stopniu zbrojenia wysokiej wytrzymałości pozwalają na projektowanie płyt z wykorzystaniem zbrojenia ze stali B600B. Wyniki eksperymentalne i numeryczne wskazują na potrzebę dalszych prac nad udoskonaleniem modelu numerycznego.

$\epsilon \geq 0,25\%$ nie jest brana pod uwagę w obliczeniach.

Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badań płyt żelbetonowych na stanowisku badawczym modelującym pracę płyty jako części konstrukcji obudowy górniczej. Wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych potwierdziły rezerwy nośności w modelu numerycznym wynikające z niewykorzystania pełnej wytrzymałości betonu w przedskrajnych włóknach strefy ściskanej. Pra-

Literatura

- [1] PN-G-06002:1997. Podziemne wyrobiska korytarzowe i komorowe – Obudowa betonowa monolityczna – Wymagania i badania.
- [2] <https://helpiks.org/7-9366.html>.
- [3] Petraroia DN, Mark P. Variable, full-scale tester for tunnel linings. *Structural Concrete*. 2021; <https://doi.org/10.1002/suco.202000806>.
- [4] Mohammad SH, Erick AB, Rémy DL, Andrés L. High-Strength Steel Bars in Earthquake-Resistant Reinforced Concrete T-Shaped Walls. *ACI Structural Journal*. 2021; <https://doi.org/10.14359/51728091>.
- [5] Chiew SP, Zhao M, Cai Y. Towards the Use of High Strength Steel for Construction Productivity. *Australasian Structural Engineering Conference: ASEC 2016*. <https://hdl.handle.net/10356/80597>.
- [6] Berger J. Effects of flexural stiffness on constraints of imposed deformations in reinforced concrete structures. *Engineering Structures*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114973>.
- [7] Berger J, Pfeiffer M, Feix J. Extended experimental and numerical investigations on constraint forces from imposed deformations. *Structural Concrete*. 2020; <https://doi.org/10.1002/suco.201900450>.
- [8] Yi ST, Kim JHH, Kim JK. Effect of Specimen Sizes on ACI Rectangular Stress Block for Concrete Flexural Members. *ACI Structural Journal*. 2002, pp. 701-708.
- [9] Ibrahim HHH, MacGregor JG. Modification of the ACI Rectangular Stress Block for High-Strength Concrete. *ACI Structural Journal*, V. 94, No. 1, January-February 1997, pp. 40-48.
- [10] Sakanov KT. Limiting deformations of concrete in elements with a non-rectangular shape of the compressed zone. *Science and technology of Kazakhstan №1*, 2010. pp. 93-96.
- [11] Nikulin AI. On clarifying the limiting relative strains of concrete in the compression area of bending reinforced concrete elements *Промышленное и гражданское строительство [Industrial and Civil Engineering]*. 2014, no. 8, pp. 12-15.
- [12] Shkurupiy OA. Ultimate concrete compressibility in reinforced concrete elements. *Modern industrial and civil construction. ...* 4, N4, 2008, pp. 207-212.
- [13] Kim JK, Yi ST, Yang EI. Size Effect on Flexural Compressive Strength of Concrete Specimens. *ACI Structural Journal*, V. 97, No. 2, March-April 2000, pp. 291-296.
- [14] Borges JUA, Subramaniam KV, Weiss WJ, Shah SP, Bittencourt TN. Length Effect on Ductility of Concrete in Uniaxial and Flexural Compression. *ACI Structural Journal*, V. 101, No. 6, November-December 2004, pp. 765-772.
- [15] Repin V, Grinyov V. International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021. The Experience in Automating Scientific Research to Identify Dangerous Zones in the Near-Support Sections of Wooden Beams. pp 1230-1238. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96383-5_137.
- [16] Program BETA 4.0. PSU. Petsold TM, Lazowski DN, Gluchow DO.

Przyjęto do druku: 31.01.2024 r.