mgr inż. Jakub Zając[1)*)]
ORCID: 0000-0001-6080-2994
dr hab. inż. Łukasz Drobiec, prof. PŚ[1)]
ORCID: 0000-0001-9825-6343
dr hab. inż. Radosław Jasiński, prof. PŚ[1)]
ORCID: 0000-0003-4015-4971
dr inż. Mirosław Wieczorek[1)]
ORCID: 0000-0002-6002-5221
dr inż. Artur Kisiołek[2)]
ORCID: 0000-0002-8815-6776

Badania doświadczalne stropu panelowego Vector III pod obciążeniem doraźnym oraz długotrwałym

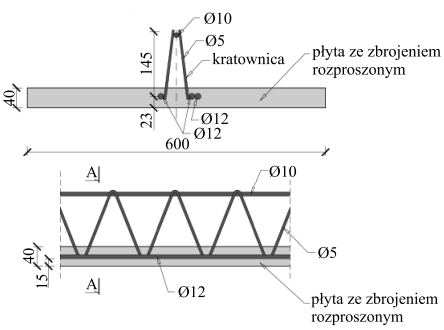
Field test research of Vector III slabs under short-term and long-term load

DOI: 10.15199/33.2020.04.01

Streszczenie. Przeprowadzono badania polowe modelu stropu w skali naturalnej o wymiarach 6,30 × 6,30 m, wykonanego z paneli Vector III tj. częściowo prefabrykowanych płyty betonowych z kratownicą oraz włóknami polimerowymi zamiast zbrojenia rozdzielczego. Cały strop zmonolityzowany został nadbetonem układanym na budowie. Model obciążano sekwencyjnie, prowadząc automatyczny i geodezyjny pomiar względnych przemieszczeń prefabrykatów oraz ugięcia. W trakcie ostatniego kroku obciążenie przyłożono nierównomiernie w celu uwypuklenia tzw. zjawiska klawiszowania. Obciążenie stropu na jednej połowie wynosiło 1,7 kN/m^2, a na drugiej 7,7 kN/m^2. Maksymalna różnica przemieszczeń między panelami to 0,3 mm, natomiast ugięcie krótkotrwałe 2,7 mm. Po zakończeniu badań polowych pozostawiono obciążenie w celu weryfikacji wpływów długotrwałych. Maksymalne ugięcie po 12 miesiącach wyniosło 19 mm.
Słowa kluczowe: stropy panelowe; stropy zespolone; jednokierunkowe; zbrojenie włóknami; klawiszowanie.

Abstract. Field test of a full-scale model of slabs with dimensions of 6,30 x 6,30 m, built of Vector III panels were carried out. Vector panels are semi precast, concrete plates with lattice girders and polymer fibres instead of distribution reinforcement. The slab is monolithized with in-situ topping. Vector panels are used in one way spanning slabs. The load was applied sequentially, measurements were made by LVDT sensors and geodetic. In the last of the stages, the load was applied to one half of the slab to examine the possibility of faulting. The floor load was 1,7 kN/m^2 in one half and 7,7 kN/m^2 in the other. The values of vertical displacements at the panel joints (in the middle of the slab) were measured. The difference of displacements between panels was less than 0,3 mm and vertical displacements have reached a value of 2,7 mm. After the field test, the load was left to verify long-term effects. After 12 months, a maximum displacement of 19 mm was achieved.
Keywords: panel slabs; composite slabs; one-way; iber reinforcement; faulting.

Przeprowadzono badania polowe stropu Vector III należącego do rodziny,, stropów panelowych", które charakteryzują się tym, że: prefabrykowana płyta dolna pełni rolę deskowania traconego i zawiera główne zbrojenie nośne (rysunek 1); panele mają szerokość modularną np. 600 mm; masa elementów jest niewielka, a do ich montażu wystarczy lekki dźwig HDS [1]. Konstrukcja stropów Vector nawiązuje do rozwiązań częściowo prefabrykowanych np. stropów gęstożebrowych czy płyt Filigran [2, 3]. Stropy Vector to konstrukcje pracujące jednokierunkowo, ale istnieje możliwość uzyskania pracy dwukierunkowej dzięki ułożeniu na prefabrykowanej płycie zbrojenia w drugim kierunku. Znaczna grubość nadbetonu w stosunku



Rys. 1. Przekrój poprzeczny panelu Vector III [1]
Fig. 1. Cross-section of Vector III panel [1]

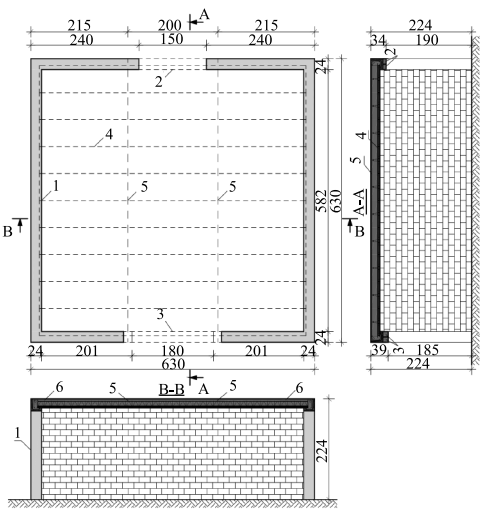
do prefabrykatu pozwala na przejmowanie sił ścinających między panelami bez konieczności dozbrajania ich styków. Umożliwia to włączenie do współpracy sąsiednich płyt tak, jak w innych rozwiązaniach prefabrykowanych [3, 7, 8]. Badania przeprowadzono na panelu typu Vector III, w którym prętowe zbrojenie rozdzielcze zastąpiono polimerowym zbrojeniem rozproszonym. Taki zabieg miał pozwolić na rezygnację ze zbrojenia rozdzielczego na etapie produkcji oraz poprawić rysoodporność prefabrykatu.

Opis badań

Celem prowadzonych badań doświadczalnych było określenie zachowania się stropu Vector III poddanego obciążeniu doraźnemu oraz długotrwałemu. Analizowano przemieszczenia pionowe, w tym wzajemne przemieszczenia płyt tzw. efekt klawiszowania oraz morfologię zarysowań. Badania prowadzono na pełnowymiarowym stropie Vector III wykonanym na ścianach murowanych z bloczków z autoklawizowanego betonu komórkowego o grubości 240 mm, na których ułożono prefabrykowane kształtki wieńcowe. W ścianach wykonano dwa otwory przekryte strunobetonowymi nadprożami systemowymi SBN 7,2/12/180 oraz SBN 12/12/210. Wymiary stropu w rzucie wynosiły 6,30 × 6,30 m, a grubość

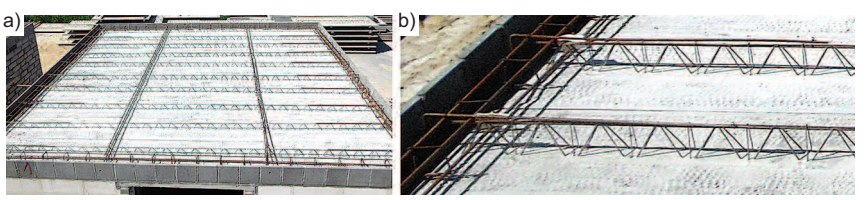
[1)] Politechniika Śląska; Wydział Budownictwa
[2)] Wielkopolska Wyższa Szkoła Społeczno-Ekonomiczna; Wydział Ekonomiczny
[*)] Adres do korespondencji: jakub.zajac@polsl.pl

200 mm, przy czym 160 mm stanowił nadbeton. Z kolei wysokość całkowita obejmująca wysokość ścian, grubość części wkładki wieńcowej oraz stropu była równa 2,24 m (rysunek 2). Konstrukcja stropu Vector III 20/60 4,52 została przyjęta zgodnie z wytycznymi producenta. Zarówno prefabrykat, jak i nadbeton wykonano z betonu klasy C20/25. W stropie znajdowały się dwa żebra rozdzielcze składające się z dwóch prętów: górnego i dolnego ø10 mm (klasy C) oraz strzemion typu S ø6 mm w rozstawie co 300 mm. Zbrojenie żeber umieszczono na płycie prefabrykowanej (fotografia 1). Dolne zbrojenie podłużne składało się z czterech prętów ø12 mm o łącznym polu powierzchni 4,52 cm^2, a zamiast siatki zbrojenia przeciwskurczowego zastosowano dodatek do betonu w postaci włókien polimerowych klasy II (włókna konstrukcyjne zgodnie z [4]). W osiach kratownic wykonano górne zbrojenie podporowe z jednego pręta ø10 mm zakończonego w wieńcu hakiem prostym.



Rys. 2. Geometria modelu: 1 – ściana z ABK; 2 – nadproże 2×SBN 7,2/12/12/210; 3 – nadproże 2×SBN 12/12/180; 4 – panel Vector; 5 – żebra rozdzielcze; 6 – zbrojenie strefy podporowej

Fig. 2. Geometry of model: 1 – wall of AAC; 2 – lintel 2 × SBN 7,2/12/12/210; 3 – lintel 2 × SBN 12/12/180; 4 – Vector panel; 5 – distribution ribs; 6 – support reinforcement



Fot. 1. Strop przed ułożeniem nadbetonu: a) zbrojnie paneli i żeber poprzecznych; b) zbrojenie podporowe i zbrojenie wieńca

Poto. 1. The ceiling before laying the upper layer of concrete: a) reinforcement of panels and transverse ribs; b) support reinforcement and ring beam reinforcement

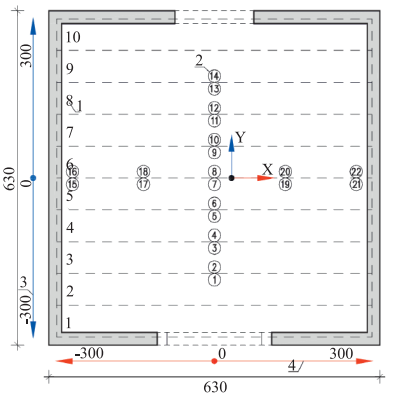
Przemieszczenia doraźne rejestrowano za pomocą indukcyjnych przetworników przemieszczeń (LVDT) typu PJX-20 o dokładności wskazań 0,002 mm. Czujniki mocowano do stalowego stelaża (fotografia 2) opartego na żelbetowej

Fot. 2. Rozmieszczenie czujników indukcyjnych i geodezyjnych

Photo 2. Inductive and geodetic sensors arrangement

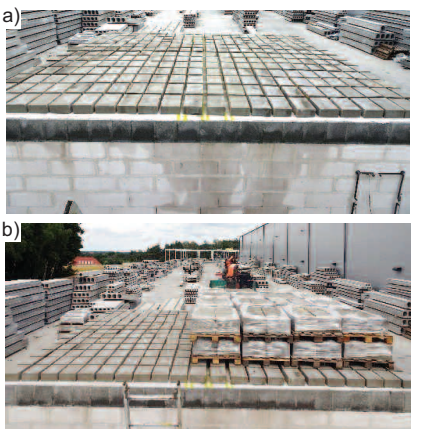
posadzce. Pomiaru przemieszczeń dokonywano w odległości ok. 25 mm od styku paneli i w rozstawie 50 mm. Obok czujników zainstalowano znaczniki do pomiarów geodezyjnych. Na rysunku 3 pokazano rozmieszczenie czujników wzdłuż osi otworów drzwiowych oraz wzdłuż styku płyt środkowych (nr 5 oraz 6).

Obciążenie modelu badawczego realizowano w sposób grawitacyjny wg ustalonego harmonogramu. Zastosowano pojedyncze bloczki betonowe (350x250x120 mm) oraz bloczki na paletach (fotografia 3). Całkowite obciążenie ponad ciężar własny stropu wynoszące 4,7 kN/m^2 podzielono na dwie części: 1,7 kN/m^2 (bloczki betonowe na górnej powierzchni stropu) oraz 3,0 kN/m^2 (bloczki betonowe na paletach układane na bloczkach betonowych). Sekwencje obciążenia pokazano na rysunku 4. Automatycznego odczytu przemieszczeń dokonywano po 15 s od chwili przyłożenia obciążenia. Schematy F



Rys. 3. Rozmieszczenie czujników przemieszczeń: 1 – numer płyty; 2 – numer czujnika; 3 – kierunek pomiaru w osi otworów (oś Y); 4 – kierunek pomiaru w linii styku płyt środkowych (oś X)

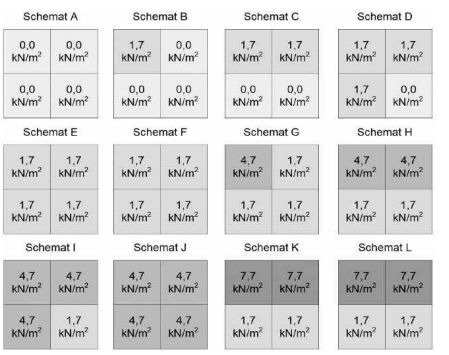
Fig. 3. Arrangement of inductive sensors: 1 – plate number; 2 – sensor number; 3 – measurement direction in the hole axis (axis Y); 4 – measurement direction in the middle panel joint (axis X)



Fot. 3. Schematy obciążenia: a) E; b) K, L

Photo. 3. Load schemes: a) E; b) K, L

oraz L były kontynuacją wcześniejszych sekwencji obciążenia E raz K, przy czym odczyt przemieszczeń prowadzono w godzinnym odstępie czasowym. Schemat L analizowano pod obciążeniami długotrwałymi, a badanie prowadzono przez 12 miesięcy.



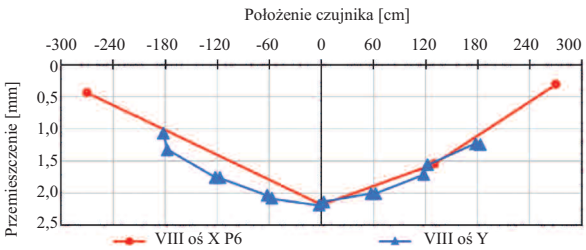
Rys. 4. Schematy obciążenia

Fig. 4. Load schemes

Wyniki badań

Wyniki badań przemieszczeń w miejscach pomiarowych pokazano na rysunku 5. Wraz ze wzrostem obciążenia następował ich systematyczny przyrost. Pomimo znacznego odciążenia płyt 1-5 (wartość 3 kN/m^2) i przełożenia części obciążenia (schemat K, L) na płyty 6-10, nie stwierdzono zmniejszenia przemieszczeń w pierwszej części stropu. W ostatnim schemacie obciążenia przemieszczenia wynosiły 2,7 mm. Różnica przemieszczeń pomiędzy sąsiednimi czujnikami Δu to maksymalnie 0,30 mm (rysunek 6) i w przypadku większości par czujników przyrastała systematycznie podczas badań pod obciążeniem doraźnym. Jedynie w przypadku pary 1-2 (styk płyty 2-3) zanotowano nagły przyrost przemieszczeń po przełożeniu obciążenia. Dalszą obserwację analizowanego styku prowadzono podczas badań długotrwałych.

Na rysunku 7 porównano przemieszczenia w osi X oraz Y (płyta nr 6) w przypadku schematu J z obciążeniem równomiernie rozłożonym na całej powierzchni o wartości 4,7 kN/m^2. Charakter przemieszczeń w dwóch prostopadłych kierunkach niewątpliwie wskazywał na dwukierunkową pracę stropu pod obciążeniem krótkotrwałym, nawet przy braku zbrojenia poprzecznego paneli oraz styków. Efekt taki tłumaczyć należy sprężystą pracą styku i brakiem zarysowania nadbetonu.

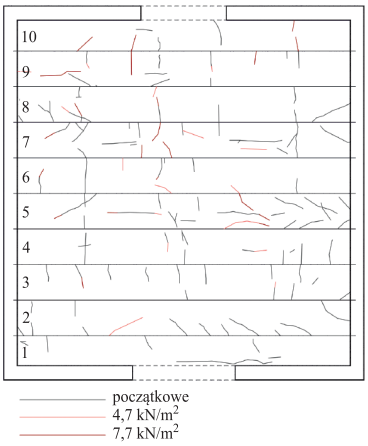


Rys. 7. Porównanie przemieszczeń w osi X oraz Y (płyta 6) – schemat J
Fig. 7. Comparison of displacements for X and Y axes (plate 6) – scheme J

Przed przystąpieniem do badań stwierdzono liczne zarysowania skurczowe (o szerokości do 0,05 mm) na dolnej powierzchni paneli Vector III (rysunek 8). W przypadku obciążenia 1,7 kN/m^2 nie zaobserwowano zmian na dolnej powierzchni stropu. Po zwiększeniu obciążenia (schemat J) zarysowania wydłużyły się i pojawiły nowe, głównie w środku rozpiętości stropu. Ostatnią kontrolę przeprowadzono po przyłożeniu obciążenia (schemat L) na połowie stropu (płyty 6-10) i zaobserwowano rozwój oraz powstanie nowych zarysowań w strefie najbardziej obciążonej.

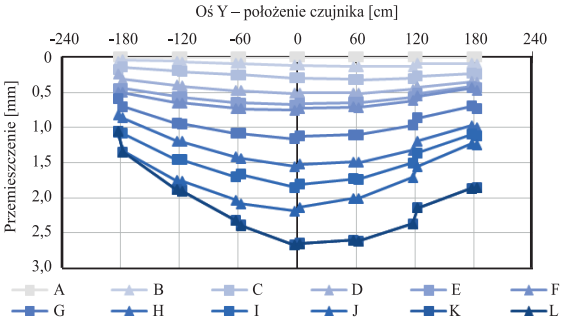
W żadnym z paneli nie wystąpiły zarysowania większe niż 0,3 mm, a ugięcie nadproży nie przekroczyło 0,1 mm. Nie stwierdzono wpływu otworów w ścianach podpierających strop na lokalny układ zarysowań stropu.

Długotrwałe badania stropu pod obciążeniem stałym odpowiadającym schematowi L (7,7 oraz 1,7 kN/m^2 – rysunek 4) prowadzono przez 12 miesięcy. Pomiarów przemieszczeń dokonywano co 30 – 45 dni. Na rysunku 9 pokazano wybrane wyniki pomiarów przemieszczeń pod obciążeniem długotrwałym, zaczynając od wykonanego po 24 h od rozpoczęcia badań. Maksymalne przemieszczenie stropu po dwunastu miesiącach wyniosło 19,0 mm (1/320)l_{eff}. Panele 6-10 obciążone grawitacyjnie do wartości 7,7 kN/m^2 ponad ciężar własny wykazały o 50% większy przyrost maksymalnych przemieszczeń niż panele nr 1-5 (pod obciążeniem 1,7 kN/m^2). Wzrost ugięcia wszystkich paneli może świadczyć o zmianie sposobu pracy poprzecznej płyt. Na skutek efektów długotrwałych utracona została sztywność (nadbetonu) w kierunku poprzecznym, a schemat współpracy poprzecznej płyt był zbliżony do przegubowego połączenia na krawędziach, analogicznie jak w schemacie obliczeniowym płyt kanałowych [5].

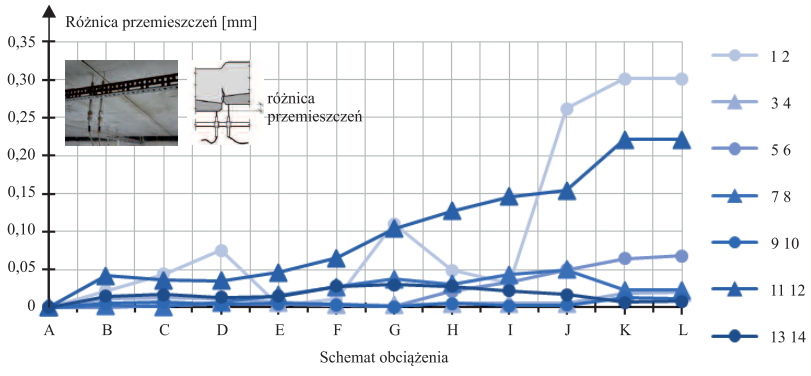


Rys. 8. Zarysowania powierzchni dolnej
Fig. 8. Bottom surface cracks

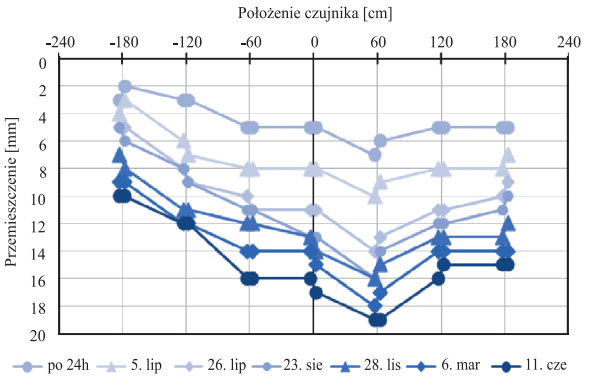
Niezależnie od kroku obciążenia oraz wybranej pary czujników różnica przemieszczeń Δu między dwoma sąsiednimi czujnikami wzrosła, ale nie przekroczyła 1,0 mm. Wartość ta mieściła się w granicach błędu pomiarowego meto-



Rys. 5. Przemieszczenia od obciążeń doraźnych – oś Y
Fig. 5. Displacement for short-term load – axis Y



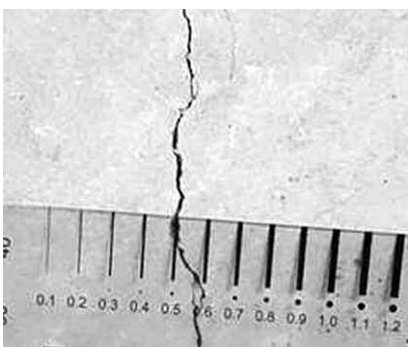
Rys. 6. Różnica przemieszczeń pomiędzy parami czujników
Fig. 6. The displacement difference between the sensor pairs



Rys. 9. Przemieszczenia od obciążeń długotrwałych
Fig. 9. Displacement for long-term load

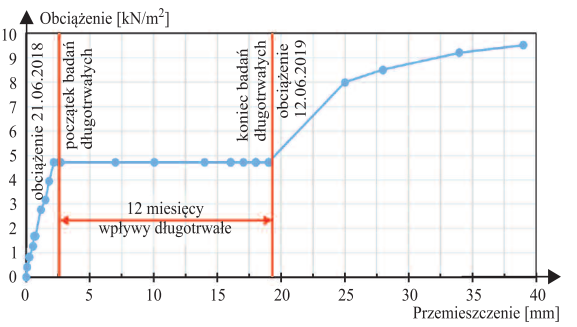
dy. Kontrola zarysowań po dwunastu miesiącach wykazała zwiększenie rozwartości rys do 0,3 – 0,5 mm, głównie w strefie płyt 6-8 (fotografia 4).

Po zinwentaryzowaniu modelu zdecydowano o jego dodatkowym obciążeniu, aż do zniszczenia. W pierwszym etapie rozłożono palety z bloczkami na całej szerokości stropu do uzyska-



Fot. 4. Zarysowanie powierzchni dolnej
Photo 4. Bottom surface cracks

nia obciążenia 4,7 kN/m^2. Następnie dodano 10 pełnych palet, uzyskując obciążenie 8 kN/m^2, a w trzecim etapie dodano kolejne 4 palety z mniejszą liczbą bloczków, osiągając 9,2 kN/m^2. Ostatnim krokiem było dodanie jednej palety o ciężarze 12 kN, co dało sumaryczne obciążenie rozłożone na stropie 9,5 kN/m^2. Ze względu na duże zarysowania ścian nie prowadzono dalszego obciążania. Na rysunku 10 przedstawiono zależność przemieszczenia punktu pomiarowego nr 9 od wartości obciążenia, wraz ze wskazaniem okresu oddziaływania długotrwałego. Na tej podstawie pracę stropu podzielono na cztery etapy. W pierwszym, przy obciążeniach doraźnych, strop charakteryzował się dużą sztywnością. Następnie przez dwanaście miesięcy obserwowano rozwój zarysowań oraz pełzanie degradujące moduł sprężystości betonu. Ostatnie dwa etapy zależne były od wartości przyłożonego obciążenia dodatkowego o granicznej wartości 8 kN/m^2. Przy większym obciążeniu nastąpił znaczny spadek sztywności stropu, a tym samym nieproporcjonalny przy-



Rys. 10. Przemieszczenie czujnika nr 9 w zależności od czasu przyłożenia i wartości obciążenia
Fig. 10. Displacement of sensor No. 9 depending on the duration and value of the load

rost przemieszczeń. Ostatni pomiar pokazał przemieszczenie maksymalne 39 mm. Płyty 5 – 7 wykazały zbliżone całkowite ugięcie o wartości 37 – 39 mm, a różnica przemieszczeń pomiędzy nimi nadal wynosiła ok. 1 mm.

Wraz ze wzrostem obciążenia zauważono coraz wyraźniejszy efekt unoszenia naroży płyty stropowej na szerokości ok. 100 cm w wyniku utraty kontaktu płyty stropowej oraz wieńca z murem. Przy obciążeniu 8,5 kN/m^2 płyta podniosła się o 11 mm, a przy 9,5 kN/m^2 o 18 mm (fotografia 5).

Fot 5. Podniesienie naroży płyty o 18 mm
Photo 5. Lifting the corners of the slab by 18 mm

Wnioski

Badania stropu Vector III wykazały, że panele stropowe bez dodatkowego zbrojenia styków nie uległy nadmiernemu tzw. klawiszowaniu pod obciążeniem doraźnym. Maksymalna różnica przemieszczeń między sąsiednimi płytami nie przekroczyła 0,3 mm w przypadku obciążenia doraźnego oraz 1,0 mm pod obciążeniem długotrwałym. Zaobserwowano unoszenie naroży płyt świadczące o ich swobodnym oparciu na ścianach oraz przestrzennej pracy stropu.

Charakterystyka ugięć wskazała na wzajemną współpracę paneli w przejmowaniu obciążeń. Zastosowane zbrojenie rozproszone w panelu Vector III nie było równoważne tradycyjnemu zbrojeniu przeciwskurczowemu stosowanemu w panelach Vector II i nie zabezpieczało przed zarysowaniami technologicznymi. Wyniki badań, a szczególnie niekorzystne zarysowania, były podstawą do modyfikacji stropu Vetor III, w którym obecnie stosuje się niemetaliczne siatki z włókna szklanego zamiast zbrojenia włóknami.

Literatura

[1] Drobiec Łukasz. 2018. STROPY VECTOR. Koncepcja, kształtowanie, obliczanie, wykonawstwo. Gliwice. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

[2] Gromszy Krzysztof. 2010. Stropy, belki i ściany zespolone typu beton – beton. XXV WPPK.

[3] Kisiołek Artur. 2017. Rynek systemów stropowych w Polsce. Analiza wybranych rozwiązań na przestrzeni lat 2015-2016. Środa Wielkopolska. Wydawnictwo WSSE.

[4] PN-EN 14889-2:2007 Włókna do betonu – Część 2: Włókna polimerowe – Definicje, wymagania i zgodność.

[5] PN-EN 1168:2007 Prefabrykaty z betonu – Płyty kanałowe.

[6] Song Jong-Young, Kim S Elliott, Ho Lee, Hyo-Gyoung Kwak. 2009. „Load Distribution Factors for Hollow Core Slabs with In-situ Reinforced Concrete Joints". International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol. 3, p. 63-69.

[7] Starosolski Włodzimierz. 2016. Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych Tom 2. Gliwice. Wydawnictwo naukowe PWN.

[8] Starosolski Włodzimierz. 1998. „Praca poprzeczna stropów zespolonych typu 2K i innych". XVI Konferencja Naukowo-Techniczna „Jadwisin 98", Tom. 2, s. 235-242.

Przyjęto do druku: 17.03.2020 r.