

WIT DERKOWSKI*

NOWE ROZWIĄZANIE STROPU SPRĘŻONEGO
DLA BUDYNKU HOTELOWO-KONFERENCYJNEGONEW SOLUTION FOR PRESTRESSED
FLOOR IN CONFERENCE BUILDING

Streszczenie

Choć w ostatnich dziesięcioleciach, na świecie obserwuje się dynamiczny rozwój konstrukcji z betonu sprężonego w budownictwie kubaturowym, to w Polsce realizacje kablobetonowych stropów dużych rozpiętości są niezwykle rzadko spotykane. W artykule skrótkowo przedstawiono zalety stosowania płyt sprężonych i opisano typowe rozwiązania konstrukcyjne stropów kablobetonowych. Opisano pierwszą w Polsce realizację kablobetonowego stropu gęstożebrowego w budynku hotelowo-konferencyjnym w Krakowie. Wieloprzęsłowe żeberka stropu sprężone zostały ciągłymi cięgnami bez przyczepności, a odciążenie konstrukcji uzyskano przez wypełnienie lekkimi wkładami styropianowymi. Na przykładzie tej realizacji podkreślono również wagę problemu kształtowania otworów w tego typu konstrukcjach.

Słowa kluczowe: płyta sprężona, strop gęstożebrowy, cięgna bez przyczepności, nowe rozwiązanie, otwory

Abstract

Although in recent decades, the world observed a dynamic development of prestressed concrete structures in cubature civil engineering, the realization of large span prestressed floor slabs is extremely rare in Poland. The article summarizes the advantages of using prestressed slabs and describes the typical design solutions for PC floors. The first implementation in Poland of prestressed rib-and-rib slab floor in the conference building in Krakow is presented. Multi-span slab's ribs were prestressed with continuous unbonded tendons, and the relief of the structure was obtained by filling it with light polystyrene inserts. On the example of that realization, the importance of the problem of making openings in such structures was also highlighted.

Keywords: prestressed slab, rib-and-slab floor, unbonded tendons, new solution, openings

* Dr inż. Wit Derkowski, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Ładowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój betonowych konstrukcji sprężonych rozpoczął się w Stanach Zjednoczonych w latach 50. ubiegłego wieku. W ostatnim okresie, na całym świecie, wiele czynników zarówno ekonomicznych, jak i technicznych, spowodowało gwałtowną ekspansję betonu sprężonego w budownictwo kubaturowe. Choć w ostatnich kilkudziesięciu lat w USA oraz w wielu krajach europejskich, powszechnie wykonuje się kablobetonowe stropy monolityczne dużych rozpiętości, to w Polsce to rozwiązanie jest wciąż niezwykle rzadko wybierane przez architektów i konstruktorów. Stropy kablobetonowe są rosnącą popularnością w dużej mierze zawdzięczają prostocie kształtowania, co odgrywa istotną rolę w przypadku złożonego obrysu płyty czy też nieregularnej siatki słupów.

Umiejętne wprowadzanie sił podłużnych w elementy konstrukcyjne, na etapie ich realizacji, może przynieść niebagatelne korzyści. Sprężenie umożliwia projektantowi znaczne ograniczenie ugięć i zarysowań konstrukcji, a także wpływanie na rozkład sił wewnętrznych w konstrukcji, co przekłada się na optymalizację przekroju. Całkowita eliminacja lub znaczne ograniczenie wysuniętych poniżej dolnej powierzchni stropu elementów belkowych ma wpływ na względy funkcjonalne pomieszczeń. Istotne znaczenie ma to w budynkach użyteczności publicznej, gdzie konstrukcja powinna zapewniać, bez dodatkowych ograniczeń, mobilność podziałów pionowych przestrzeni użytkowej. Dodatkowo, brak zbędnych przeszkód umożliwia łatwe prowadzenie instalacji między stropem a sufitem podwieszonym, co zmniejsza wysokości kondygnacji, a to z kolei prowadzi do ograniczenia kosztów zewnętrznych okładzin elewacyjnych oraz redukcji długości poszczególnych instalacji. Zastosowanie sprężenia umożliwia redukcję wysokości przekroju nawet o 20–30%, a co za tym idzie, znaczne ograniczenie zużycia materiałów (dla betonu do 20%, a dla stali zbrojeniowej nawet do 60%). Stropy kablobetonowe charakteryzują się mniejszym ciężarem własnym niż ich odpowiedniki żelbetowe.

Płyta stropowa po sprężeniu jest konstrukcją samonośną, co umożliwia szybsze jej rozszalowanie. Dodatkowymi atutami w przypadku tego typu rozwiązania, ograniczającymi czas jego wykonania są redukcja i uproszczenie zbrojenia zwykłego [1].

Przy kształtowaniu stropów o dużych wymiarach rzutu poszukuje się takich rozwiązań konstrukcyjnych, które pozwolą na wyeliminowanie dylatowania konstrukcji. Istotnym problemem w tego typu konstrukcjach są niekorzystne efekty zjawisk termiczno-skurczowych zachodzących w pierwszym etapie twardnienia betonu. W tym wypadku bardzo pomocne okazuje się zastosowanie wstępnego sprężenia, realizowanego już nawet po 12 godzinach od zabetonowania konstrukcji. Zabieg ten powoduje wprowadzenie niewielkich naprężeń ścisających, które przeciwdziałają powstawaniu wczesnego zarysowania betonu. Początkowo wprowadzone do ciągnięć sprężających siły obarczone są znacznymi stratami reologicznymi, jednak straty te nie mają większego znaczenia, ponieważ po osiągnięciu przez beton odpowiedniej wytrzymałości realizowany jest drugi etap sprężania, w którym to dopiero wprowadza się siły docelowe.

2. Powszechne rozwiązania stropów kablobetonowych

Rozwiązania konstrukcyjne stropów kablobetonowych różnią się między sobą zarówno kształtem, jak i sposobem rozmieszczeniem ciągnięć. Możliwa jest realizacja stropów jedno- i dwukierunkowo sprężanych. Najczęściej stosuje się poniżej opisane typy:

Stropy płaskie (o rozpiętości do 13 m)

Ten typ konstrukcji przekrycia jest idealny dla wielopiętrowych budynków o regularnej siatce słupów (o zbliżonych rozpiętościach w obu kierunkach). Jego zaletą jest płaska dolna powierzchnia stropu oraz zoptymalizowana wysokość konstrukcyjna. Rozwiązanie to zapewnia bezproblemowe prowadzenie poziomych instalacji. Dodatkowo w porównaniu z innymi rozwiązaniami ma stosunkowo mały ciężar własny. Grubość płyty stropowej wynika zazwyczaj z warunków nośności na przebiegu strefy przysłupowej oraz z ograniczenia ugięć. Odpowiednie trasowanie cięgien sprężających pozwala na znaczną redukcję ugięcia, a także poprawę nośności stref przypodporowych poprzez zmniejszenie niekorzystnych sił ścinających występujących w tym obszarze. Ograniczenie rozpiętości tego typu stropów zmniejsza ciężar własny stropu, wynikający bezpośrednio z coraz większej wymaganej wysokości konstrukcyjnej, a to skutkowałoby zwiększeniem przekrojów poprzecznych słupów i wpłynęłoby na znaczne zużycie materiałów.

Stropy z pasmami belkowymi (o rozpiętości do 20 m)

W przypadku siatki podpór, w której rozpiętość w jednym kierunku znacznie przewyższa rozpiętość w drugim kierunku, częstym rozwiązaniem jest ukształtowanie szerokiego pasma belkowego o nieco zwiększonej wysokości w stosunku do wysokości płyty. W paśmie tym uzyskuje się większy mimośród cięgien sprężających, znacznie ograniczając ugięcia stropu. Taki układ konstrukcyjny sprawia, że płyta oparta na pasmach belkowych pracuje jako jednokierunkowo zginana. Dopuszczalne rozpiętości płyty mogą sięgać nawet do 10 m.

Podobne rozwiązania stosowane są także w przypadku, gdy rozpiętości w obydwu kierunkach są porównywalne, a zastosowanie sprężonych stropów płaskich jest nieuzasadnione ekonomicznie. Wtedy w pasmach słupowych kształtuje się sprężone podciągi (o większej wysokości), na których opiera się płyty stropowe dwukierunkowo zginane. Zbrojenie zwykle znajdujące się w płytach może być znacznie ograniczone poprzez zastosowanie dodatkowych cięgien sprężających w płytach, szczególnie przy dużych rozpiętościach przeseł.

Stropy żebrowe (o rozpiętości do 18 m)

Ograniczenie ciężaru własnego płyty stropowej o dużej rozpiętości i dużych dopuszczalnych obciążeniach użytkowych można uzyskać poprzez wykonanie układu żeber, analogicznie do tradycyjnych stropów żelbetowych. Sprężone żebra z reguły opierane są na prowadzonych w pasmach słupowych podciągach, które także mogą być sprężone. Rozwiązanie to charakteryzuje niezwykła różnorodność kształtów, a także sposobów prowadzenia cięgien (związanych z rozmieszczeniem żeber).

Z punktu widzenia technologii sprężenia konstrukcji, która nie pozostaje bez wpływu na sposób pracy, a zatem i algorytmy obliczeniowe, wyróżnia się podział konstrukcji na dwa typy, w zależności od rodzaju cięgien używanych do sprężania konstrukcji stropowych:

– konstrukcje z cięgnami z przyczepnością

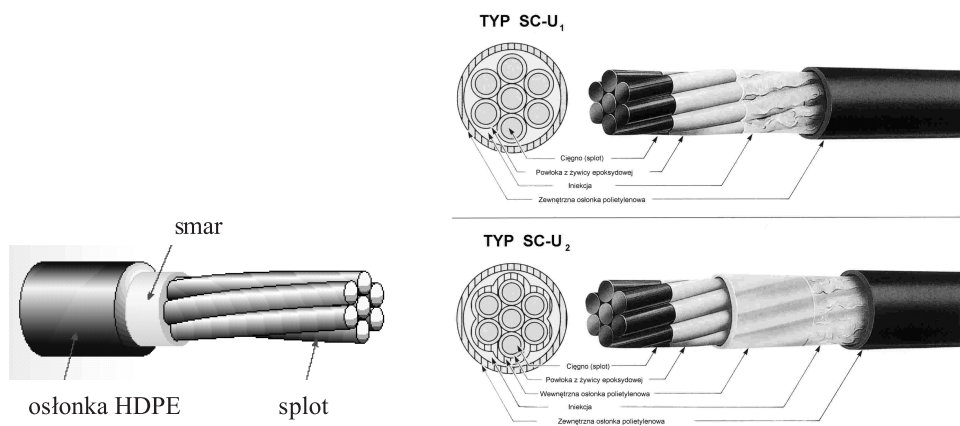
W konstrukcjach tych sploty sprężające umieszcza się bezpośrednio w kanałach. Zakotwienia cięgien oraz osłonki kanałów mają z reguły kształt spłaszczony, aby zwiększyć wartość mimośrodu siły sprężającej w płycie. Powierzchnia osłonek kanałów jest dodatkowo karbowana w celu zapewnienia lepszej przyczepności do betonu, co jednak zwiększa współczynnik tarcia splotów o osłonkę – norma PN-EN 1992-1-1 zaleca przyjmowanie współczynnika tarcia równego 0,19. Wymaga się, aby osłonki były odpowiednio sztywne (tak, aby

nie uległy zgnieceniu w trakcie betonowania) i szczelne na całej swojej długości. Wodoszczelność połączeń poszczególnych odcinków osłonek zapewniają taśmy uszczelniające lub tuleje termokurczliwe.

Istotną cechą tej technologii jest fakt, że po sprężeniu kanały wypełniane są cementowym iniektm, który zapewnia zarówno ochronę antykorozyjną stali sprężającej, jak i wytwarza więzy przyczepności między cięgnami a resztą przekroju. Iniekt chroni również cięgna przed miejscowymi uszkodzeniami mechanicznymi, a także sprawia, że trwałość konstrukcji w mniejszym stopniu zależy od stanu technicznego zakotwień. Należy jednak podkreślić, że czynności związane z układaniem kanałów kablowych, późniejszym wkładaniem do nich cięgien sprężających, naciąganiem cięgien i ich iniektowaniem wydłużają proces budowlany w stosunku do technologii związanych ze stosowaniem cięgien bez przyczepności.

– konstrukcje z cięgnami bez przyczepności

Kable sprężające wykonywane są w systemie bezkanałowym. W zależności od siły, jaką trzeba wprowadzić do konstrukcji, pojedyncze sploty stosowane są indywidualnie lub grupowane w taśmach (najczęściej po 2 lub 4 sploty). Bezprzyczepnościowe cięgno sprężające prefabrykuje się poprzez umieszczenie splotu w osłonce polietylenowej (HDPE) o niewielkiej średnicy, a przestrzeń między splotem a osłonką jest wypełniona są warstwą smaru lub wosku, która zmniejsza tarcie kabla o osłonkę – patrz il. 1. Takie rozwiązanie zapewnia dobrą ochronę antykorozyjną cięgna i jednocześnie umożliwia efektywny naciąg nawet bardzo długich cięgien. W przypadku konstrukcji pracujących w szczególnie groźnych warunkach można stosować specjalne rozwiązania zwiększające ochronę antykorozyjną, polegającą na powlekaniu stali warstwami epoksydowymi i stosowaniu dodatkowych osłonek – il. 2 [2].



II. 1. Typowe cięgno bez przyczepności

III. 1. Typical unbounded tendon

III. 2. Cięgna o specjalnych zabezpieczeniach

III. 2. Tendons with special anticorrosion protection [2]

Dzięki niewielkim średnicom cięgien (najczęściej stosowane cięgna bez przyczepności mają średnicę poniżej 20 mm) możemy uzyskać znaczne wartości mimośrodowej siły sprężającej. Duża elastyczność osłonek znacznie ułatwia trasowanie kabli. W porównaniu z cięgnami z przyczepnością są one nieco podatniejsze na wszelkie uszkodzenia mechaniczne. Współczynnik tarcia wynosi, w zależności od rodzaju smaru, od 0,05–0,10.

Pierwsze wytyczne dotyczące stosowania cięgien bez przyczepności pojawiły się w 1958 r., kiedy to ACI-ASCE Joint Committee 323 opublikował pracę pt.: *Tentative Recommendations for Prestressed Concrete*. Dokument ten zawierał informacje na temat otuliny zbrojenia, dopuszczalnych naprężeń rozciągających oraz ochrony splotów lub drutów. Sugerował on, aby stal sprężająca była pokrywana warstwą smaru, wosku lub innego materiału impregnowanego asfaltem, a następnie umieszczana w osłonie [3].

Zalety cięgien bez przyczepności sprawiły, że są one obecnie bardzo często stosowane w realizacjach płaskich stropów monolitycznych. Panuje powszechne przekonanie, że płyty stropowe sprężone cięgnami bez przyczepności będą stwarzały niebezpieczeństwo podczas rozbiórki, a także, że lokalne uszkodzenie konstrukcji prowadzić będzie bezpośrednio do zniszczenia całego ustroju. Szczegółowe analizy zachowań takich płyt wykazały, że przy spełnieniu odpowiednich standardów projektowych i starannym wykonaniu elementów opisane wyżej zagrożenia są bezpodstawne. Monitoring pracy istniejących obiektów, w których wykorzystano cięgna bez przyczepności, jak również badania laboratoryjne pokazują, że gdy cięgna zostaną zerwane wskutek np. częściowego uszkodzenia konstrukcji, poziom zniszczeń będzie zbliżony do tego, jaki wystąpiłby w analogicznym elemencie niesprężonym [9].

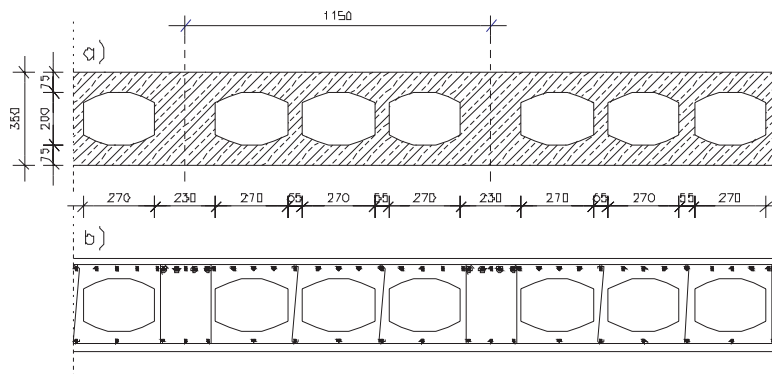
3. Nowe rozwiązanie lekkiego stropu, sprężonego cięgnami bez przyczepności

W przypadku ustrojów jednokierunkowo sprężonych płyty stropowe można projektować także jako kablobetonowe stropy gęstożebrowe. Takie rozwiązanie zastosowano po raz pierwszy w Polsce, w budynku hotelowo-konferencyjnym w Krakowie. Wzorowane ono było na systemie opracowanym przez Tsinghua University of China (Prestressed Cast-in-Situ Concrete Hollow Slab Filled with Light Weight Material Composite Unit).

Przedmiotowy strop znajduje się w dwukondygnacyjnej części konferencyjnej, w której powierzchnia użytkowa każdej z kondygnacji wynosi ok. 2600 m². Zgodnie z założeniami projektowymi należało zagwarantować swobodę dzielenia powierzchni użytkowej – stąd, poza słupami i jedną ścianą oddzielającą strefy pożarowe, nie przewidziano żadnych innych podpór. Ścianki działowe zaprojektowano jako ściany kurtynowe podwieszane do konstrukcji stropu. Strop zaprojektowano na obciążenia użytkowe w wielkości 5,0 kN/m² oraz obciążenia stałe dodatkowe wynikające z ciężaru warstw posadzkowych, podwieszonych instalacji (głównie – klimatyzacji), stropów podwieszonych oraz ścianek kurtynowych (w miejscach garażowania ścianek obciążenie wynosi 15,0 kN/m²).

Strop ma długość 109,08 m i skokowo zmienną szerokość: od 14,21 m do 36,10 m (wymiar podano w osiach budynku). Żelbetowe słupy monolityczne tworzą siatkę podpór o rozstawie 12×12,0 m. Strop został dwukrotnie zdylatowany poprzecznie w miejscach zmiany jego szerokości, tworząc trzy wieloprześłowe płyty o wymiarach: 24,0×36,10 m, 48,0×25,88 m oraz 36,0×14,21 m. Płyty stropowe oparto na żelbetowych, monolitycznych ryglach poprzecznych i miejscami na obwodowych belkach podłużnych.

Opisywany strop gęstożebrowy, o całkowitej wysokości 350 mm, wykonany został na miejscu budowy w technologii kablobetonu. Zastosowano wkłady odciążające o wysokości 200 mm, tak więc dolna i górna płytka stropu miała grubość 75 mm. Taka wysokość pozwalała na zachowanie wymaganych zgodnie z warunkami ppoż. otuleń, a także umożliwiała montaż stropów i instalacji podwieszanych na krótkich kołkach wstrzeliwanych do płytki dolnej. Typowy przekrój poprzeczny stropu pokazano na il. 3.

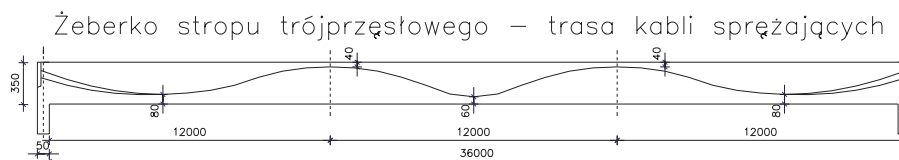


Il. 3. Przekrój poprzeczny stropu: a) szalunek, b) zbrojenie w przekroju przęsłowym

Ill. 3. Cross-section of the slab: a) shuttering, b) reinforcement at the span cross-section

Zastosowanie przedstawionego rozwiązania stropu gęstożebrowego skutkuje uzyskaniem różnej sztywności konstrukcji w poszczególnych kierunkach, stąd pomimo kwadratowej siatki podpór celowe było sprężenie stropu jedynie w kierunku równoległym do żeber. W kierunku prostopadłym do żeber siły wewnętrzne są znacznie mniejsze, a spełnienie stanów granicznych nośności i użytkowości zagwarantowane zostało przez umieszczenie siatek ze zbrojenia zwykłego w górnej i dolnej płytce stropu.

Wieloprzęsłowe żeberka stropu sprężone zostały ciągłymi cięgnami wykonanymi z typowych splotów bez przyczepności T15 – trasy kabli w żeberku trójprzęsłowej płyty pokazano na il. 4. Przyjęto podstawowy osiowy rozstaw żeber nośnych stropu 1,15 m, który w rejonach zwiększonego wyężenia w okolicy słupów wewnętrznych zmniejszony został do 82 cm. Żeberka, o szerokości 23 cm, sprężone zostały czterema splotami. Każdy ze splotów naciągnięto siłą 200 kN. We wszystkich cięgnach naciąg realizowany był jednostronnie. Od strony biernej i czynnej zastosowano po cztery zakotwienia szczękowe dla pojedynczych splotów T15, oparte we wnękach na jednej płycie stalowej.



Il. 4. Trasy kabli sprężających w żeberku trójprzęsłowego stropu

Ill. 4. Location of prestressing tendons in three-span slab's rib

W obszarach między żebrami stropu ułożone zostały po dwa lub trzy rzędy lekkich wkładów styropianowych, zabezpieczonych folią przed zawilgoceniem. W obszarach przewidzianych lokalizacji podwieszanych ścianek kurtynowych oraz miejscach ich „parkowania” przewidziano płytę pełną (bez wkładów odciążających). Na il. 5. pokazano widok stropu w trakcie realizacji.



Il. 5. Realizacja stropu: a) przed zabetonowaniem, b) podczas naciągu cięgien

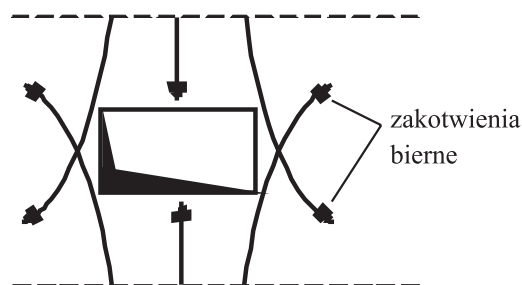
Ill. 5. Realization of the slab floor: a) before concrete casting, b) during tensioning of the tendons

4. Kształtowanie otworów w płytach sprężonych

W kablobetonowych płytach stropowych osiągnięcie wymaganych właściwości wytrzymałościowych ustroju możliwe jest przy różnych wariantach rozmieszczenia cięgien na rzucie stropu. Niezwykle istotne jest zaplanowanie wszystkich otworów na etapie projektowania, tj. w czasie, kiedy dobierana jest lokalizacja kabli sprężających. Po wykonaniu stropu wykonanie nowych perforacji jest bardzo utrudnione, o ile nie niemożliwe, i częstokroć wiąże się z dużymi kosztami ze względu na konieczność użycia specjalistycznego sprzętu.

W kablobetonowych płytach stropowych unika się sytuowania otworów w osiach słupów, gdyż większość cięgien prowadzona jest w pasmach słupowych. Perforacja pionowa powinna być wykonywana także w odpowiedniej odległości od strefy zakotwień kabli ze względu na złożony stan naprężenia w tym obszarze. Otwory o niewielkich wymiarach (do ok. 30 cm) mogą być kształtowane bez większych przeszkód praktycznie w każdym miejscu płyty (pomiędzy cięgnami). Perforacja o większych wymiarach wymaga lokalnej zmiany rozmieszczenia kabli w sąsiedztwie otworu. Cięgna, których trasy przechodzą blisko środka otworu kończone są bezpośrednio przed jego krawędzią. Natomiast trasy pozostałych kabli przechodzących przez otwór są odginane, a same cięgna przedłużane poza przeciwległą krawędź otworu i kotwione w pewnej odległości od niej – patrz il. 6 [4]. Zabieg ten ma na celu zapobieganie pojawieniu się zarysowań w strefach naroży otworu.

W stropach żebranych otwory kształtuje się pomiędzy żebrami. W przypadku większych wymiarów otworu lokalnie zmienia się rozstaw żeber lub, jeśli zachodzi taka potrzeba, żebra przechodzące przez planowany otwór dzielone są na dwie niezależnie pracujące części. W tym przypadku sąsiednie żebra muszą przenieść dodatkowe siły powstające od kotwienia cięgien w sąsiedztwie otworu.



II. 6. Trasowanie kabli w sąsiedztwie projektowanego otworu [4]

III. 6. Locating of the tendons by the opening [4]

W omówionym w niniejszym artykule stropie, na etapie projektowania przewidziano jedynie jeden otwór na windę kuchenną, o wymiarach 880 mm×1320 mm. Otwór ten zlokalizowano między żebrami sprężonymi, tak więc nie kolidował on z przebiegiem cięgien sprężających. Po wykonaniu stropu, a jeszcze przed oddaniem obiektu do użytkowania, inwestor stwierdził konieczność znacznego (około dwukrotnego) powiększenia otworu istniejącego oraz wykonania dwóch mniejszych otworów, o wymiarach nieprzekraczających 500 mm. Wykonanie mniejszych otworów nie stanowiło większych problemów – warunkiem ich realizacji była lokalizacja między żebrami nośnymi stropu, a same otwory wycinane miały być wiertnicą o średnicy koronki 100 mm. Pożądane zwiększenie szerokości istniejącego otworu windowego musiałoby się wiązać z wycięciem fragmentu trójprzęsłowego żebra sprężonego. Zakres prac wzmacniających strop przy takiej ingerencji w konstrukcję, z punktu widzenia ekonomicznego, praktycznie przekreślał sens ich wykonywania. Stąd podjęto decyzję o zwiększeniu jedynie długości otworu, bez jego poszerzenia (nowe wymiary otworu: 880 mm×2530 mm) i zamówieniu nowej, specjalnej windy o konstrukcji samonośnej i wymiarach dopasowanych do wymiarów otworu. Takie powiększenie otworu wiązało się jedynie z koniecznością lokalnego wzmocnienia stref przykrawędziowych z zastosowaniem przyklejanego zbrojenia kompozytowego z włókien węglowych.

Literatura

- [1] Ajdukiewicz A., Golonka K., *Plaskie stropy sprężone kablami bez przyczepności – specyfika projektowania*, Inżynieria i Budownictwo, 06/2007, 300-309.
- [2] Dyduch K., Derkowski W., *Zagadnienia technologiczne i materiałowe w konstrukcjach sprężonych*, XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń, 2002, 79-110
- [3] Kelley G.S., *A Short History Of Unbounded Post-Tensioning Specifications*, Concrete Repair Bulletin, 07/08/2001, 10-13.
- [4] Stevenson A.M., *Post-tensioned concrete floors in multi-storey buildings*, British Cement Association, 1994.