

Kablobetonowe stropy transferowe

Stosowanie transferowych stropów kablobetonowych pozwala na znaczne oszczędności w zakresie gabarytów przekrojów oraz ilości zużytej stali i betonu.

dr inż. **Rafał Szydłowski**
mgr inż. **Barbara Łabuzek**
Politechnika Krakowska
TCE Structural Design & Consulting

STRESZCZENIE

Kablobetonowe stropy transferowe są szeroko stosowane w świecie do przenoszenia dużych obciążeń w budynkach, w sytuacjach gdy podpory z kondygnacji wyższych nie mają kontynuacji do fundamentu. W Polsce, z powodu braku umiejętności projektowania takich konstrukcji, wykonano ich zaledwie kilka. W artykule przybliżono zasadę pracy kablobetonowych stropów transferowych, omówiono najważniejsze zagadnienia obliczeniowe, przedstawiono dwa przykłady realizacji zagranicznych oraz autorskie rozwiązanie zrealizowane w budynku w Warszawie.

ABSTRACT

Post-tensioned transfer slabs are widely used all over the world to carry heavy loads in buildings, particularly when the upper floor support is not continued through the lower floors to the foundation. In Poland, due to the lack of relevant design skills, only a few such structures have been developed. This paper provides an insight into how post-tensioned concrete slabs work, as well as presents the main design problems. It also shows two examples of foreign projects as well as a proprietary solution implemented in Warsaw.

Idea i potrzeba konstruowania stropów transferowych

Obecne trendy architektoniczne w projektowaniu obiektów użyteczności publicznej wymuszają lokalizację w dolnych kondygnacjach budynków dużych, wolnych od podpór przestrzeni przy gęstej zabudowie konstrukcyjnej kondygnacji wyższych. Zróżnicowane funkcje kondygnacji, a przez to różne układy konstrukcyjne, powodują konieczność przeniesienia obciążeń pionowych z wyższych kondygnacji na niższe bez kontynuacji wszystkich podpór do fundamentów. Stosuje się wówczas płyty, belki bądź ruszty transferowe.

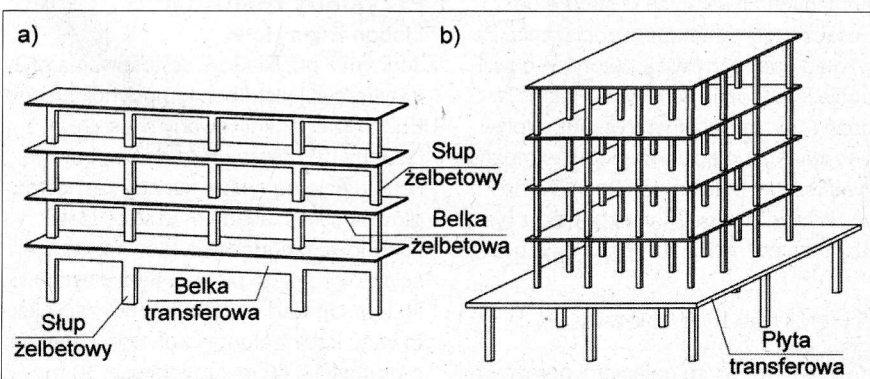
Przekazywanie obciążeń od ścian czy słupów nieposiadających kontynuacji do fundamentów wymaga stosowania elementów konstrukcyjnych o odpowiednio wysokiej sztywności i wytrzymałości. Typ projektowanych elementów transferowych uwarunkowany jest układem konstrukcyjnym wyższych kondygnacji. W przypadku układów słupowych wyższych kondygnacji przy regularnej siatce słupów zasadne może być kształtowanie belek i ram transferowych (rys. 1a). W przypadku gęstej siatki słupów bądź słupów o nieuporządkowanym położeniu lepszym rozwiązaniem będą transferowe płyty (rys. 1b).

Żelbetowe stropy transferowe

Stropy transferowe w budynkach często projektowane są jako żelbetowe. Znaczne obciążenia pionowe przekazywane przez konstrukcje transferowe wymagają odpowiednio dużych grubości płyt bądź przekrojów belek, a także sporych ilości zbrojenia. Grubości płyt transferowych zaczynają się od kilkudziesięciu centymetrów i uzależnione są od rozpiętości stropu oraz poziomu obciążenia. Górna granica grubości płyt nie jest określona. Wykonywanie płyt o grubości przekraczającej 1,5–2,0 m wydaje się już mało uzasadnione ekonomicznie. Ciężar stropu transferowego staje się wówczas dominującym obciążeniem na fundamenty. Konstrukcje takie pochłaniają ponadto duże ilości stali zbrojeniowej.

Kablobetonowe stropy transferowe

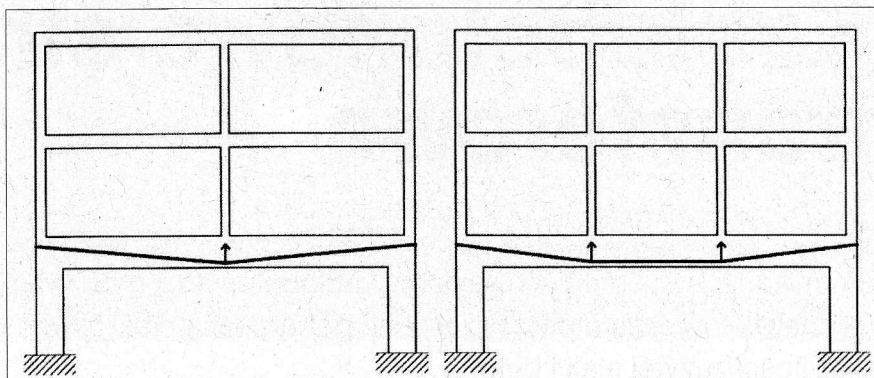
Dzięki zastosowaniu sprężenia możliwe jest znaczne zredukowanie przekrojów elementów i ilości stali zbrojeniowej. Wprowadzenie wstępnych naprężeń ściskających skutecznie redukuje zarysowania elementów i wywołuje odwrotne ugięcie elementu, redukujące ugięcie od ciężaru konstrukcji i dodatkowych obciążeń zewnętrznych.



Rys. 1. Belka (a) i płyta transferowa (b)

Kształtowanie sprężenia

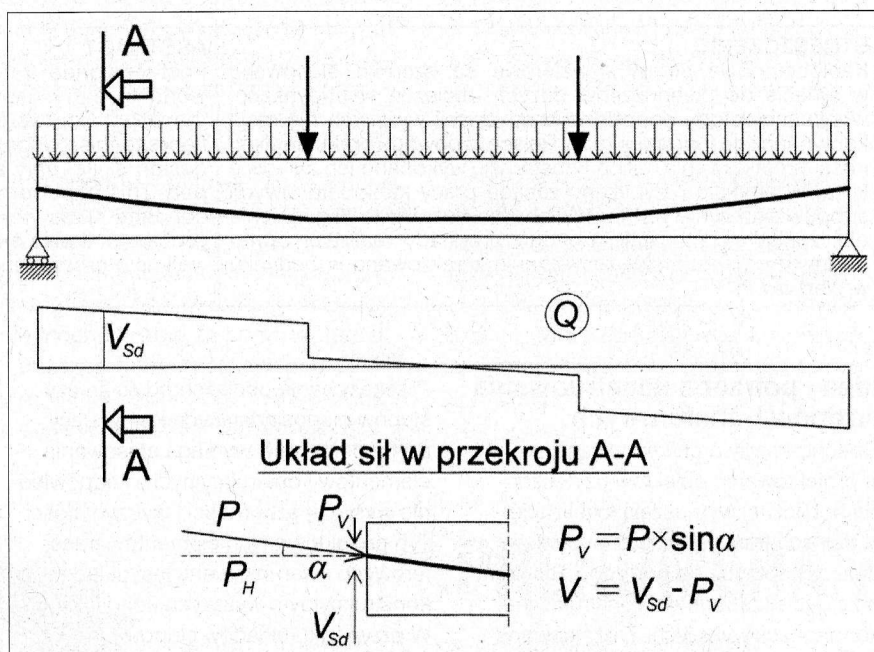
Sprężenie może być realizowane kablami prostymi usytuowanymi dołem w przęsłach bądź górną nad podporami. Znacznie lepsze efekty można jednak osiągnąć, kształtując zakrzywione trasy ciągnięć prowadzone po liniach momentów zginających. Ponieważ obciążenie elementów transferowych ma najczęściej charakter skupiony (słupy, ściany), dobrym rozwiązaniem jest wówczas stosowanie tras załamanych (rys. 2), wytwarzających przeciwne siły skupione w miejscach załomu (pod słupami).



Rys. 2. Prowadzenie kabli w elementach transferowych

Redukcja sił poprzecznych

Korzystnym czynnikiem przy sprężaniu kablami zakrzywionymi jest redukcja sił ścinających w wyniku działania pionowej składowej sprężenia. Trasy kabli w pobliżu podpór zwykle podrywane są ku górze (rys. 3). Zakrzywienie cięgna w okolicach podpór wprowadza pionowy składnik siły sprężającej P_V w przekrojach przy podporach, który redukuje siłę ścinającą V_{sd} . W analizie przyjmować należy obliczeniową wartość siły sprężającej P_d zgodnie z [1].



Rys. 3. Redukcja sił poprzecznych w wyniku zakrzywania kabli sprężających (opis w artykule)

Etapowe wprowadzanie sprężenia

W przypadku stropów kablobetonowych dodatkowe oszczędności w przekrojach elementów można osiągnąć stosując etapowe wprowadzanie sprężenia. Wprowadzenie mocnego sprężenia w jednym etapie często nie jest możliwe w elementach o niewielkiej wysokości. Brak obciążenia docelowego (przeciwko któremu projektowane jest sprężenie) może doprowadzić do zniszczenia elementu sprężeniem. Jednym ze sposobów rozwiązania problemu jest stosowanie dużych przekrojów stanowiących „akumulator” naprężeń ściskających. Innym sposobem, pozwalającym ograniczyć wymiary przekrojów, jest wprowadzanie sprężenia etapami. Etapowanie sprężania pozwala regulować na bieżąco poziom naprężeń w konstrukcji. Z tego względu większość stropów transferowych sprężana jest etapami, zazwyczaj dwuetapowo. Ewentualnym jest opisany dalej projekt autorów stropu nad tunelem Trasy W-Z. Dzięki zastosowaniu 4-etapowego sprężenia (oraz 2-etapowego betonowania) udało się skonstruować bardzo smukłe belki transferowe utrzymujące pięć kondygnacji.

Stan graniczny ugięć

Etapowe przykładanie obciążenia zarówno od ciężaru konstrukcji, jak i sprężenia (rys. 4a) wywołuje superpozycję odkształceń (rys. 4b), a tym samym ugięć doraźnych powstałych w stropie od poszczególnych etapów obciążania. Ze względu na różny wiek betonu w chwili obciążenia różne są również intensywność i zakres pełzania (rys. 4c). Wpływ pełzania na ugięcia uwzględniać można, zwiększając ugięcia doraźne o wartość współczynnika pełzania, zgodnie z rys. 4b. Ostateczne ugięcie przyjmuje postać:

$$u = u_1 (1 + \phi_1) + u_2 (1 + \phi_2) + \dots + u_i (1 + \phi_i)$$

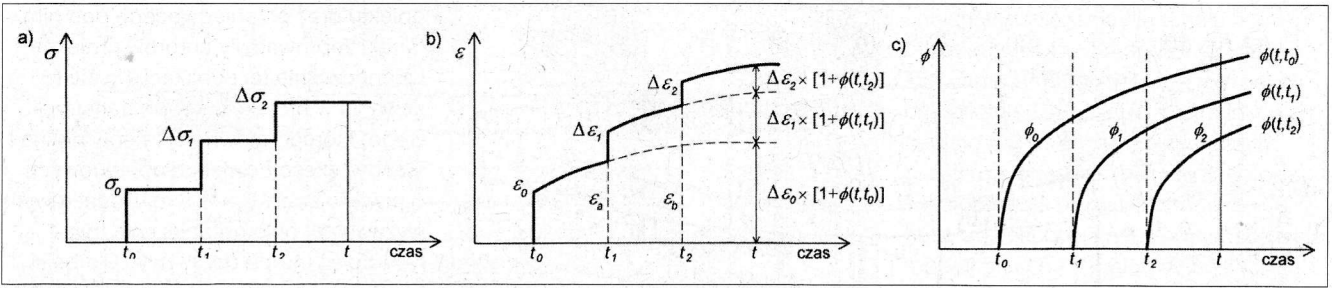
gdzie: u_1, u_2, \dots, u_i są ugięciami doraźnymi od poszczególnych etapów obciążenia

(uwzględniającego sprężenie), ϕ_1, ϕ_2, \dots ϕ_i to współczynniki pełzania dla poszczególnych etapów obciążenia uwzględniające wiek betonu w chwili ich przyłożenia.

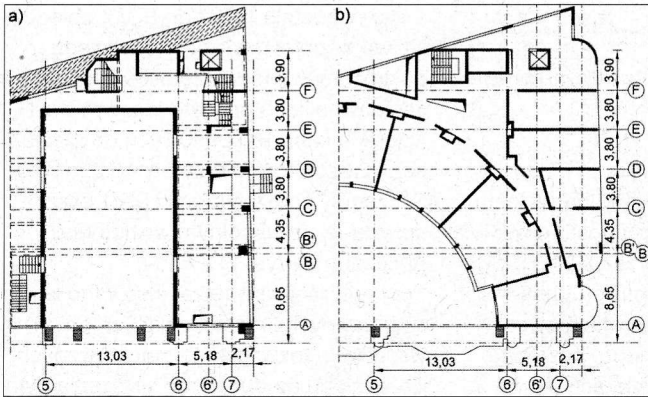
Przykłady realizacji

Lisbon Eden Hotel

Jednym z przykładów zastosowania płyty transferowej jest obecny budynek Lisbon Eden Hotel zlokalizowany w centrum Lizbony [2]. Zaprojektowano żelbetonową konstrukcję budynku, tak aby zachować główną część fasady oraz stare klatki schodowe biegnące od głównego wejścia do drugiego piętra, między osiami 5 i 6 (rys. 5). Nad drugim piętrzem zaprojektowano kablobetonową płytę transferową o grubości 0,60 m i rozpiętości 13 m, na której posadowiono osiem nowych



Rys. 4. Rozwój odkształceń w betonie pod naprężeniem wzrastającym w czasie: a) superpozycja naprężeń, b) superpozycja odkształceń, c) współczynnik pełzania zależny od wieku betonu w chwili obciążenia



Rys. 5. Układ konstrukcyjny fragmentu drugiego piętra (a) oraz kondygnacji wyższych (b) budynku Lisbon Eden Hotel

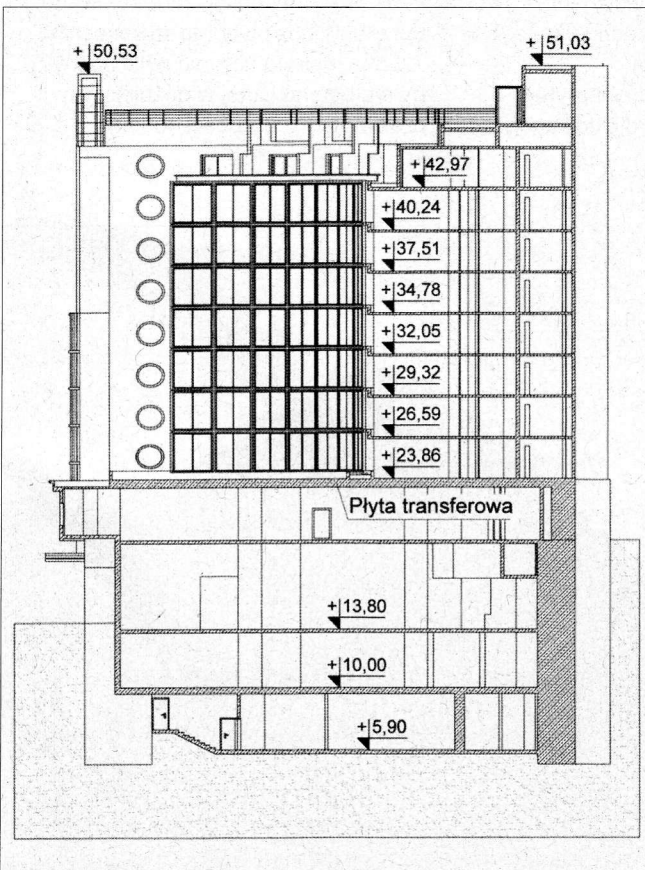
kondygnacji (rys. 6). Na całym obszarze stropu zastosowano sprężenie w obu kierunkach kablami złożonymi z trzech splotów 15,2 mm. Pierwszy etap sprężenia zrealizowano po zabetonowaniu płyty transferowej, drugi po ukończeniu piątego piętra, czyli trzech kondygnacji zalegających na stropie transferowym.

Funchal Crown Plaza Hotel w Portugalii

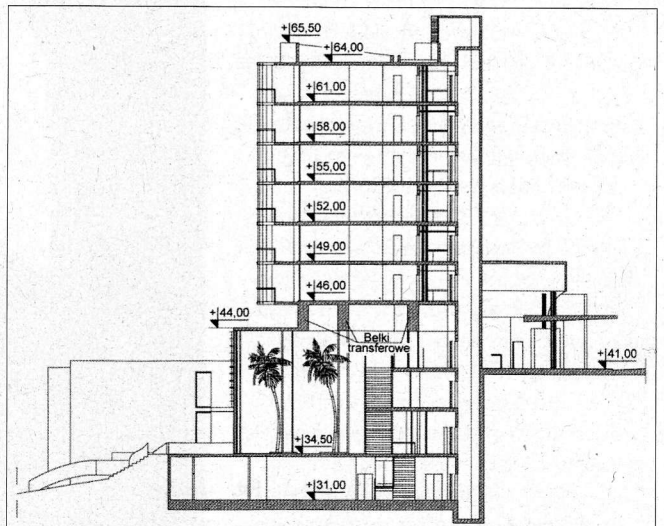
Budynek tworzy sześć kondygnacji powyżej i trzy poniżej poziomu terenu (rys. 7).

Ze względów architektonicznych konieczne było zachowanie przestrzennego holu głównego o rozpiętości 18 m bez żadnych podpór. Wymagania te doprowadziły do zaprojektowania sprężonych belek transferowych przenoszących obciążenie z sześciu wyższych kondygnacji. Zaprojektowano trzy ciągłe belki trójprzęsłowe o środkowym przęśle rozpiętości 18 m i znacznie krótszych przęsłach skrajnych (rys. 8).

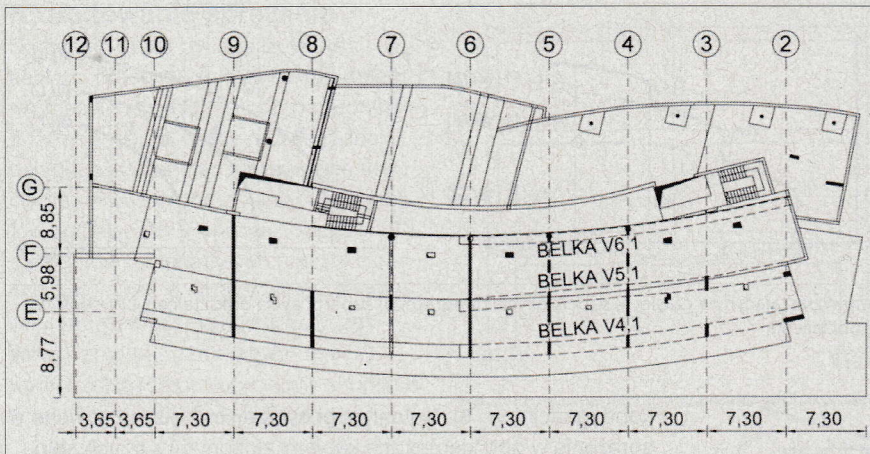
Przyjęto sprężenie w postaci czterech kablów w każdej belce, o zróżnicowanej liczbie od 7 do 12 splotów 15,2 mm. Naciąg kablów realizowano w dwóch etapach. W pierwszym etapie po wzniesieniu jednej kondygnacji napięto po dwa kable w belce, natomiast w etapie drugim, po wzniesieniu czterech kondygnacji, napięto pozostałe dwa.



Rys. 6. Przekrój pionowy budynku Lisbon Eden Hotel [2]



Rys. 7. Przekrój pionowy budynku Funchal Crown Plaza Hotel [2]



Rys. 8. Układ konstrukcyjny kondygnacji wejściowej Funchal Crown Plaza Hotel z belkami transferowymi [2]

Strop nad tunelem Trasy W-Z w budynku na warszawskiej Starówce

Prócz wielu zagranicznych realizacji transferowych stropów kablobetonowych można przytoczyć kilka przykładów krajowych realizacji. Dużym osiągnięciem jest strop zaprojektowany i zrealizowany w budynku przy placu Zamkowym na warszawskiej Starówce [3–5], przy skrzyżowaniu ulic Miodowej i Senatorskiej (fot.). W rejonie budynku pod fragmentem Starego Miasta zlokalizowano podziemny tunel drogowy trasy

W-Z. Obecność tunelu pod budynkiem zrodziła trudność w jego posadowieniu. Problem rozwiązano przez skonstruowanie kablobetonowego stropu transferowego. Budynek zaprojektowano w kształcie nieregularnego, powycinanego prostokąta o wymiarach ok. 82 × 27,5 m. Budynek stanowią dwie kondygnacje podziemne (przerwane tunelem) oraz trzy kondygnacje nadziemne (rys. 9 i 10). Dodatkowo w dachu ukryto dwie kondygnacje poddasza.

Trudności wynikające z gabarytów (liczby kondygnacji) projektowanego

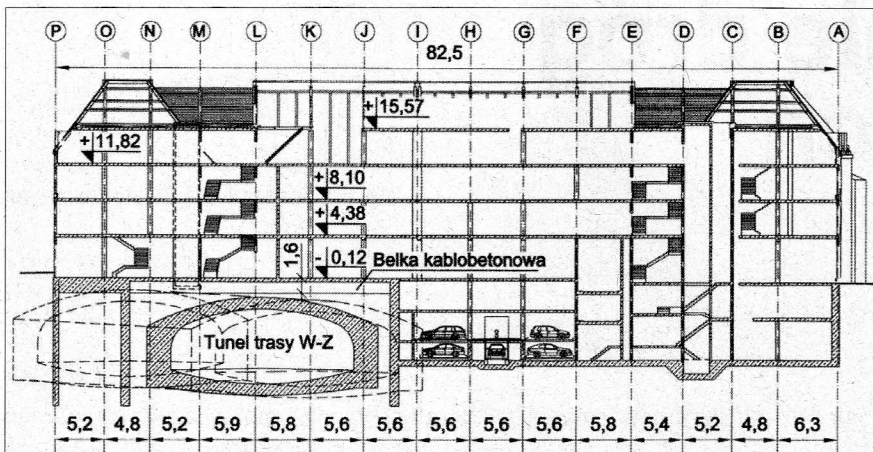
objektu oraz przebiegającego pod nim tunelu zaprowadziły autorów projektu i jednocześnie tej publikacji do zastosowania w projekcie stropu transferowego, którego główne elementy nośne stanowi sześć belek kablobetonowych o przekrojach $1,8 \times 1,6$ m. Dodatkowym wyzwaniem było ograniczenie trwałych ugięć stropu do 30 mm. Dla belki o rozpiętości 28,0 m stanowi to 1/933 rozpiętości. Trzy z projektowanych belek przebiegają prostopadłe do ścian podpierających (BS/4 do BS/6 – rys. 10), a trzy pozostałe (BS/1 do BS/3) zbiegają się we wspólnym węźle. Ze względu na zróżnicowane rozpiętości i obciążenia w belkach przyjęto sprężenie od czterech kabli 19-splotowych do pięciu kabli 22-splotowych (sploty 15,2 mm). Szczegóły sprężenia belki BS/1 oraz sprężenie we wspólnym węźle belek pokazano na rys. 11.

Przy realizacji stropu zastosowano kilka dyskusyjnych i niestosowanych powszechnie rozwiązań technologicznych. Ze względu na dużą moc sprężenia było ono wprowadzane w czterech etapach. W pierwszym etapie napięto po jednym kablu w każdej belce, zabetonowanej uprzednio bez płyty (do wysokości 1,2 m). Miało to uczynić belki nośnymi dla betonowanej w późniejszym czasie płyty o grubości 400 mm

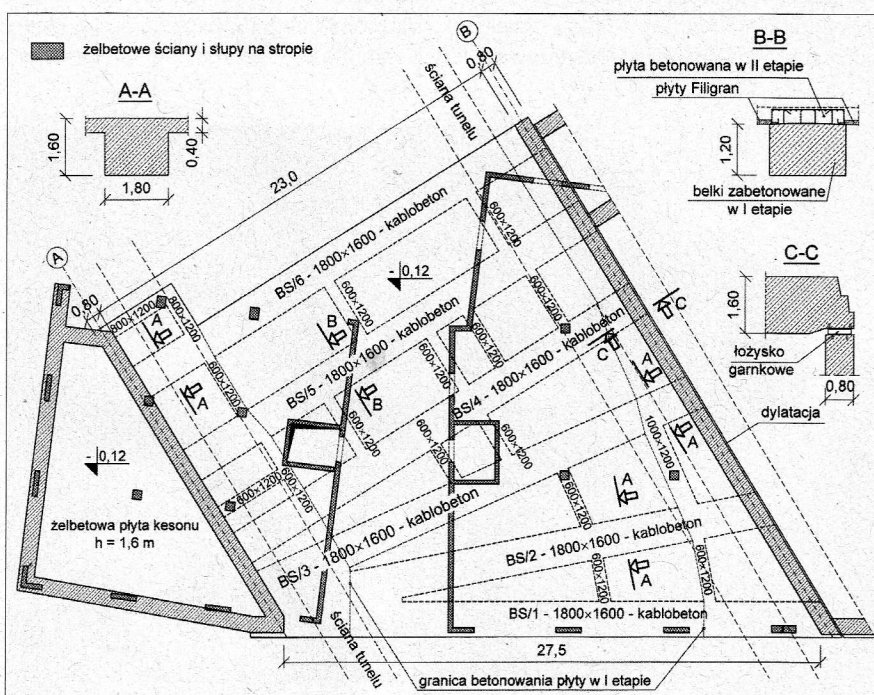


Fot.

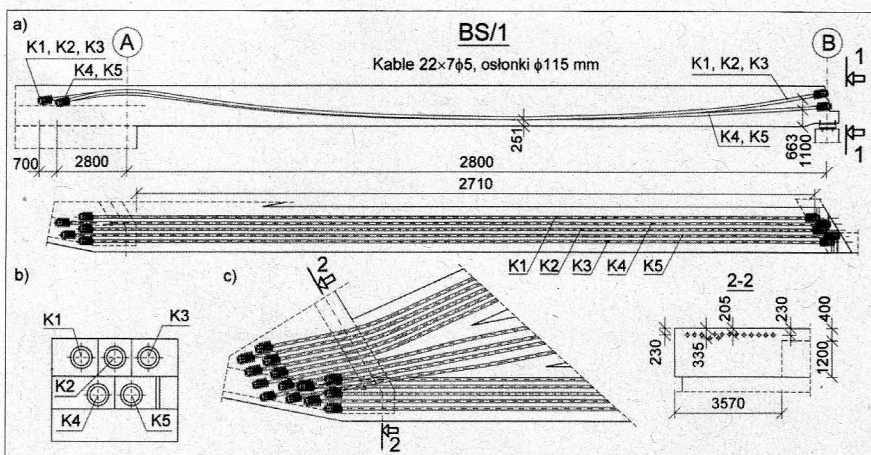
Budynek przy placu Zamkowym w Warszawie



Rys. 9. Przekrój przez budynek na warszawskiej Starówce



Rys. 10. Rzut konstrukcyjny stropu nad tunelem z belkami transferowymi



Rys. 11. Profil i rzut (a) oraz widok zakotwień czynnych na czole (b) belki BS/1, układ sprzężenie we wspólnym węźle belek BS/1, BS/2 i BS/3

i uniknąć obciążania nią tunelu. Płytę zabetonowano na prefabrykacjach Filligran o grubości 70 mm, ułożonych na belkach. Drugi kabel w każdej belce napięto tuż po zabetonowaniu płyty, przed rozpoczęciem wiązania betonu. Taka operacja pozwoliła zredukować duże ugięcia powstałe w wyniku oparcia mokrej płyty na niepełnych belkach. Kolejny trzeci kabel napięto po wykonaniu dwóch kondygnacji budynku, a ostatnie kable po wykonaniu kompletnej konstrukcji.

Szczegóły dotyczące stropu zamieszczono w pracach [3–5]. Dzięki zastosowaniu takich zabiegów, jak dwuetapowe betonowanie oraz czteroetapowe wprowadzanie sprzężenia, udało się skonstruować belki o maksymalnym stosunku rozpiętości do wysokości wynoszącym 17,6, niosące ciężar pięciu kondygnacji. Są to bardzo niskie belki na tle innych podobnych realizacji.

Wnioski

Ogólna nieufność i ograniczone umiejętności projektowania kablobetonowych stropów transferowych sprawiają, że stropy te mają w Polsce utrudnioną drogę rozwoju. W kraju wykonano zaledwie kilka takich realizacji. Ich konstruowanie daje jednak duże oszczędności w gabarytach przekrojów oraz ilości zużytej stali i betonu, dlatego też powinny być stosowane i zastępować podobne konstrukcje żelbetowe.

Bibliografia

1. PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2 Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
2. FIB: Post-tensioning in building, FIB-Bulletin No. 31, Lozanna 2005.
3. R. Szydłowski, *O projekcie i realizacji sprężonych belek transferowych w budynku przy placu Zamkowym w Warszawie*, „Przegląd Budowlany” nr 1/2017.
4. R. Szydłowski, M. Szreniawa, *About the project and study of post-tensioned transfer beams under the five-storey building in the centre of Warsaw*, proceedings of 4th Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering, Singapore 2016.
5. R. Szydłowski, B. Łabuzem, *Współczesne rozwiązania kablobetonowych konstrukcji sprężonych*, wykład na XXXIII Ogólnopolskich Warsztatach Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 2018. ◀