

Nowe rozwiązania stropów prefabrykowanych

New solutions for prefabricated floor slabs

1. Wprowadzenie

Obecnie inwestorzy stawiają coraz wyższe wymagania na wszystkich etapach wznoszenia i użytkowania budynków. Dotyczą one nie tylko odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa konstrukcji, ale także ergonomicznego i funkcjonalnego wykorzystania przestrzeni użytkowej, które może ulegać modyfikacjom w zależności od przeznaczenia w danym momencie. Wiodącym czynnikiem w wyborze rozwiązania konstrukcyjnego pozostaje oczekiwanie maksymalnego skrócenia procesu budowlanego oraz globalne zmniejszenie kosztów. Ponadto, wymaga się coraz większej jakości wykonania i estetyki, jak również umiejętnego dostosowania obiektu do architektury otoczenia.

Chociaż jest wiele materiałów, z których można wykonywać stropy w budynkach, to zdecydowanie najczęściej stosuje się konstrukcje z betonu zbrojonego. Wynika to nie tylko z niskiego kosztu realizacji, ale i z ich bardzo dobrych właściwości akustycznych, dynamicznych oraz zwiększonego bezpieczeństwa w sytuacji pożaru. Obecnie polscy projektanci dysponują bardzo szeroką gamą rozwiązań konstrukcyjnych z betonowych płyt stropowych, które umożliwiają optymalne dostosowanie projektu do wymagań inwestorskich, jednakże w praktyce zazwyczaj wykonuje się monolityczne, żelbetowe płyty dwukierunkowo zbrojone.

2. Stropy z elementów prefabrykowanych z betonu

Obecnie rynek oferuje wiele systemów betonowych stropów prefabrykowanych, dlatego wybór odpowiedniego typu powinna poprzedzić dokładna analiza, pozwalająca na efektywne wykonanie i użytkowanie konstrukcji. Najczęściej wymieniane zalety stropów prefabrykowanych są następujące:

- szeroki wybór możliwych technologii z punktu widzenia kosztów realizacji, wszechstronności użytkowania, odporności ogniowej, parametrów cieplnych i akustycznych;
- łatwa możliwość łączenia systemu prefabrykowanego z monolitycznym [stropy zespolone];
- przyspieszenie procesu budowlanego, a przez to obniżenie kosztów budowy;

1. Introduction

The last few years have seen increasingly high demands from investors at all stages of the construction and utilisation of buildings. These demands concern not only the appropriate security level of the building's structure, but also the ergonomic and functional use of its floor space, which may need to be modified depending on its purpose in any given moment. The leading factor when choosing a particular construction solution has always been the shortest possible construction time and globally reduced prices. Moreover, there are demands for increasingly high quality and aesthetics, as well as skilful adjustment of the building to the surroundings.

Although there are many materials that can be used for floor slabs, the most commonly used structures are made from reinforced concrete. This results not only from a low cost, but also from very good soundproofing and dynamic properties, as well as increased fire protection. Although Polish designers have access to a variety of structural solutions that apply concrete floor slabs and allow for a project's optimal adjustment to investors' demands, in practice it is most common to use monolithic, cross reinforced concrete slabs.

2. Floors from prefabricated concrete elements

Since the current market offers a number of concrete prefabricated floor systems, selecting the right type should be preceded by a thorough analysis to ensure that the structure is efficiently made and used. The most frequently listed advantages of prefabricated floors are:

- wide selection of available technologies with regard to implementation costs, versatility, fire resistance, and insulation and soundproofing properties;
- simplicity of combining prefabricated systems with monolithic systems [composite floors];
- acceleration of the construction process resulting in lower construction costs;
- reduction of formwork;
- reduction of "dirty" concrete work, including a smaller amount of dust and noise emitted during construction;

- zmniejszenie ilości robót szalunkowych;
- zmniejszenie ilości „brudnych” prac betonowych, w tym zmniejszenie ilości pyłu i hałasu emitowanego w trakcie budowy;
- lepsza kontrola jakości na etapie produkcji i wykonania elementów;
- możliwość typizacji elementów;
- mniejsze koszty utrzymania i konserwacji obiektów;
- powtarzalność rozwiązań konstrukcyjnych.

Zastosowanie sprężenia, najczęściej w technologii strunobetonu, pozwala na uzyskanie dodatkowych zalet, które mogą mieć zasadniczy wpływ na decyzję inwestora o ostatecznym wyborze rozwiązania:

- zwiększona trwałość konstrukcji poprzez wyeliminowanie lub ograniczenie zarysowania betonu;
- zwiększona sztywność konstrukcji, gwarantująca większe rozpiętości i mniejsze wysokości stropu, przy jednoczesnym zachowaniu ograniczenia ugięć;
- zwiększona nośność;
- zwiększona odporność na obciążenia dynamiczne i zmęczeniowe;
- redukcja ciężaru własnego;
- ograniczenie kosztów zużycia stali i betonu, w przypadku stropów o dużej rozpiętości;
- większa estetyka przy zwiększonej smukłości.

Powszechnie stosowane rozwiązania stropów z betonu prefabrykowanego, na przykład płyty kanałowe, płyty żebrowe TT, stropy zespolone typu „Filigran”, lub stropy o gęstym żebrowaniu, zostały opisane przez Bachmanna i Steinlego (1), Kisiołka (2), Derkowskiego i Skalskiego (3) oraz Drobieca (4). Rozwiązania te są wciąż udoskonalane, a zakres ich stosowalności zwiększany. Jako przykład można podać wykorzystanie płyt kanałowych do rozmieszczenia instalacji łazienkowych lub grzewczych (5). Jest to wariant szczególnie korzystny w przypadku obiektów hotelowych lub mieszkalnych, ponieważ dotychczas zastosowanie stropów prefabrykowanych w pomieszczeniach łazienek, wymagało umieszczenia instalacji na płycie stropowej, co wiązało się z koniecznością podniesienia poziomu posadzki w całym lokalu. Termoaktywny strop, wykorzystujący dużą pojemność cieplną płyt kanałowych, a same kanały jako ciągi wentylacyjne, stanowić może jednocześnie wygodną i cichą klimatyzację, która z powodzeniem może być wykorzystywana w budynkach użyteczności publicznej, zarówno w lecie, jak i w zimie. Płyty kanałowe są swoistego rodzaju wymiennikami ciepła między powietrzem pobieranym z zewnątrz a pomieszczeniami – rysunek 1. Ciepło oddawane przez ludzi przebywających w pomieszczeniach, a także przez oświetlenie, komputery czy promieniowanie słoneczne może być gromadzone w płytach stropowych, zwiększając ich temperaturę o 2-3°C w ciągu dnia, bez wpływu na komfort użytkowników. Latem nadmiar ciepła powstający w ciągu dnia jest odprowadzany z płyt przez chłodne, nocne powietrze. Zimą ciepło zgromadzone w płytach w ciągu nocy zapewnienia komfort mieszkańcom następnego dnia

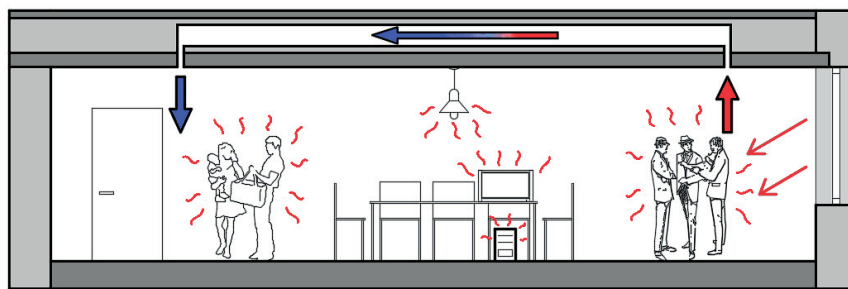
- better quality control at the element manufacture and production stage;
- possibility to typify elements;
- reduced maintenance costs;
- repeatability of construction solutions.

The application of prestressing, mostly in pre-tensioned prestressed concrete technology adds certain advantages that can have a profound effect on the investor's final choice of a solution:

- increased durability of the structure by eliminating or limiting hairline cracks in the concrete;
- increased stiffness of the structure which ensures greater span and smaller height of the floor while preserving deflection reduction;
- increased load capacity;
- increased fatigue and dynamic load resistance;
- reduction of dead load;
- reduction of the costs of steel and concrete wear in the case of high-span floors;
- better aesthetics with increased slenderness.

The widely used solutions for precast concrete floors, such as hollow core slab, double-T slabs, filigree composite floors or suspended beam and block floors have been described by Bachmann and Steinle (1), Kisiołek (2), Derkowski and Skalski (3) and Drobiec (4). These solutions are constantly improved and the range of their use is being widened. One example could be the use of HC slabs when laying out plumbing or heating systems (5). This method is particularly beneficial for hotels and residential buildings, as the previous use of prefabricated floors in bathrooms required locating the installation on the floor slab, which resulted in the need to raise the floor level in the whole apartment. A thermoactive floor that uses the extensive thermal capacity of HC slabs and the hollow cores themselves as air ducts, may also constitute a convenient and quiet air conditioning system which may be successfully used in public utility buildings both in the summer and winter. HC slabs serve as a kind of heat exchangers between outside and inside air – Fig. 1. The heat generated by humans in a room as well as by lighting, computers or the sun, may be stored in floor slabs, raising their temperature by 2-3°C throughout the day without decreasing the comfort level of the residents. In the summer, the heat generated throughout the day is removed from the slabs by the cool night air, while in the winter, the heat accumulated in the slabs throughout the night provides comfort to the residents the next morning. To exemplify, the thermal capacity of a 320 mm high HC slab with the surface area of 9.6 m² is approx. 100 J·K⁻¹, which causes the slab temperature to rise by 3°C and results in the accumulation of approx. 300 J·m⁻², which saves approx. 37 J·m⁻² of energy normally used for cooling down rooms in the span of 8 hours.

The development of civil engineering is increasingly linked with the introduction of innovative solutions with regard to information processing, object design methodology, as well as new building materials and construction technologies. The need to obtain che-



Rys. 1. Idea zapewnienia komfortu cieplnego użytkownikom pomieszczeń

Fig. 1. Concept of providing thermal comfort to residents

rano. Na przykład, pojemność cieplna płyty kanałowej o wysokości 320 mm i powierzchni $9,6 \text{ m}^2$ wynosi około $100 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ co powoduje, że podniesienie temperatury płyty o 3°C prowadzi do kumulacji około $300 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$, co w okresie 8 godzin daje około $37 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ oszczędności energii, normalnie zużywanej do chłodzenia pomieszczeń.

Rozwój inżynierii lądowej coraz silniej powiązany jest z wdrażaniem innowacyjnych rozwiązań w zakresie przetwarzania informacji, metod projektowania obiektów, a także nowych materiałów i technologii budowlanych. Potrzeba znajdowania tańszych i szybszych w realizacji rozwiązań konstrukcyjnych w budownictwie jest od dawna wykorzystywana zarówno przez inwestorów, jak i wykonawców. W zakresie konstrukcji stropowych poszukiwanie nowych rozwiązań dotychczas sprowadzało się do prób realizacji coraz większych rozpiętości przęseł, co obecnie stało się stosunkowo łatwe dzięki wykorzystywaniu technologii sprężania oraz stosowaniu coraz lepszych materiałów, na przykład betonów specjalnych. Przegląd najnowszych światowych osiągnięć w dziedzinie stropów pokazuje, że obecnie motorem innowacji staje się szukanie rozwiązań pozwalających na rozmieszczenie różnego rodzaju instalacji w grubości stropu, zmniejszających jego masę własną, a także wykorzystanie konstrukcji stropowej do poprawy komfortu termicznego w pomieszczeniach.

Określenie „innowacja” może być różnie rozumiane. W zakresie budownictwa zazwyczaj mówimy o innowacjach produktowych czyli wprowadzaniu wyrobów, które są nowe lub znacznie udoskonalone w zakresie swoich właściwości bądź zastosowań, lub o innowacjach procesowych oznaczających wdrażanie coraz lepszych metod produkcji. Warto jednak podkreślić, iż rozróżnia się różne skale rynku wdrażania innowacji: międzynarodową na przykład europejską, krajową lub zaledwie regionalną. Tak więc innowacjami nie są wyłącznie nowe, wcześniej nigdzie na świecie niestosowane rozwiązania, ale mogą być także lokalne wdrożenia, ulepszonych produktów lub technologii.

W niniejszym artykule przedstawione zostaną jedynie najnowsze rozwiązania stropów prefabrykowanych, opracowane i wdrażane na świecie, jednak do tej pory nieznanne na rynku polskim.

aper and faster solutions in the construction industry has long been exploited both by investors and contractors. With regard to floor structures, so far the search for new solutions has boiled down to attempts at introducing increased span lengths, which has become relatively easy thanks to the prestressing technology and the use of better materials, such as special concretes. An overview of the latest global achievements in the field of floors shows that the search for solutions allowing to distribute different types of installations within the floor's thickness to reduce its dead weight is the current driver of innovations, along with the use of the floor structure to improve the thermal comfort inside rooms.

The term “innovation” may be understood in many different ways. When it comes to the construction industry, we usually talk about product innovations, i.e. introduction of products which are new or with significantly improved properties or applications, or process innovations, i.e. implementing better production methods. However, it is worth emphasizing that the innovation introduction market functions on many different levels: international, e.g. European, national or merely regional. Thus, innovations do not necessarily constitute new and hitherto unknown solutions, but they can also be local implementations of improved products and technologies.

This article presents only the latest solutions for prefabricated floors that have been developed and used worldwide, but are hitherto unknown on the Polish market.

3. Innovative solutions for floor systems

3.1. Prefabricated layered T-beam slabs

A new type of a “layered” T-beam floor made from prefabricated, prestressed elements has recently been developed by a Korean and Italian consortium. This solution involves a slipformed prefabricated element comprised of three pre-tensioned prestressed concrete beams joined by a bottom plate. The prefab element is shown in Fig. 2. The 60 mm thick concrete bottom plate is reinforced with a steel mesh. The prefabricated prestressed load-bearing beams are 100 mm wide and 200 to 360 mm high. As opposed to commonly slipformed HC slabs, the beams in that precast element have additional transverse reinforcement embedded approx. 100 mm above the upper surface, which ensures increased shear

3. Innowacyjne rozwiązania systemów stropowych

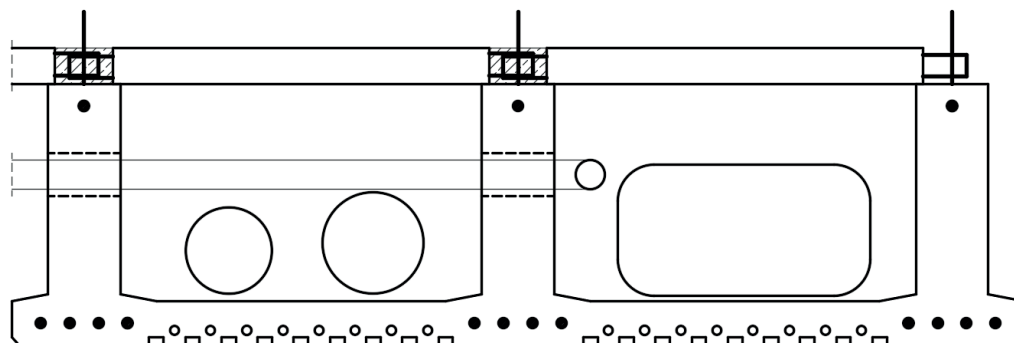
3.1. Prefabrykowany, żebrowy strop warstwowy

Nowy typ żebrowego stropu „warstwowego”, ze sprężonych elementów prefabrykowanych, opracowany został w ostatnich latach przez koreańsko-włoskie konsorcjum. Rozwiązanie to tworzy prefabrykat składający się z trzech żeber strunobetonowych połączonych płytką dolną, wykonywany w technologii formowania ślizgowego (6). Prefabrykat ten pokazano na rysunku 2. Żelbetowa płytka dolna, o grubości 60 mm, ma stalową siatkę zbrojeniową. Strunobetonowe żebra nośne mają szerokość 100 mm i wysokość od 200 do 360 mm. W przeciwieństwie do powszechnie wytwarzanych metodą formowania ślizgowego płyt kanałowych, żebra w tym prefabrykacie mają dodatkowe zbrojenie poprzeczne, wypuszczone około 100 mm powyżej górnej powierzchni. Takie rozwiązanie zapewnia zwiększenie nośności prefabrykatu na ścinanie, a równocześnie daje możliwość zespolenia prefabrykatu z płytką górną, układaną na miejscu budowy.

Strop ten jest stosunkowo lekki, bardzo sztywny i jednocześnie może przenosić bardzo duże obciążenia, dochodzące nawet do 36 kN/m², przy 11 m rozpiętości stropu. Z tego względu chętnie jest wykorzystywany do budowy stropów w dużych centrach logistycznych i obiektach przemysłowych.

Elementy stropowe są elementami pracującymi jednokierunkowo, dlatego konieczne jest zapewnienie podpór liniowych, w postaci ścian lub podciągów. Ponieważ, z użytkowego punktu widzenia, najkorzystniejszym rozwiązaniem jest strop płaski, bez żeber lub podciągów znajdujących się poniżej dolnej powierzchni stropu, proponowane jest wykonanie w pasmach słupowych belek ukrytych. Belki te mogą być wykonywane jako elementy sprężone kablami.

W przypadku projektowania obiektów wysokich lub wysokościowych, ważnym zagadnieniem staje się ograniczanie wysokości stropu wraz z koniecznymi instalacjami. Omawiane rozwiązanie cechuje się dużymi wolnymi przestrzeniami, znajdującymi się między cienkimi płytkami, tworzącymi powierzchnie dolną i górną stropu. W tak utworzonych przestrzeniach możliwe jest rozprowadzenie szeregu przewodów i kanałów instalacyjnych. Prowadzenie instalacji w obu kierunkach możliwe jest dzięki wykonaniu otworów w środnikach żeber.



Rys. 2. Trzy-żebrowy prefabrykat stropowy

Fig. 2. Triple T-slab

strength and at the same time enables the element to be bonded with a prefabricated upper plate placed on-site.

The floor is relatively lightweight, very stiff and at the same time can bear great loads of up to 36 kN/m², with an 11 m span. Hence, it is often used for large logistics centres and industrial facilities.

The slabs are one-way elements, so it is necessary to provide linear support in the form of walls or binding joists. Due to the fact that usability-wise the most advantageous solution is to use flat slabs without beams or binding joists below the bottom part of the floor, it is suggested to introduce hidden band beams. These beams can be prestressed with cables.

When designing tall or high-rise buildings, limited floor height due to necessary utility systems becomes an important issue. The described solution provides large free spaces between the thin plates that constitute the lower and upper surface of the floor. These spaces may contain a number of cables and ducts. Guiding utility systems in both directions is possible thanks to holes made in the webs.

In order to increase the comfort of use of a given room, we can utilise the ability to store heat in the concrete elements of the structure. The slab thermal activation enables storage as well as distribution of heat in individual rooms. To this end, cold water pipeline is placed in the bottom plate of the prefabricated floor [Fig. 3]. The spaces in the middle section of the floor may be used for ventilation/AC ducts as well as for placing small AC units. The upper floor plate may contain a floor heating system. It may also contain electric and ICT wiring laid on the floor level. For improved acoustic comfort in large rooms, the bottom surface of the prefabricated floor may also be grooved.

3.2. Partially prefabricated beam floor

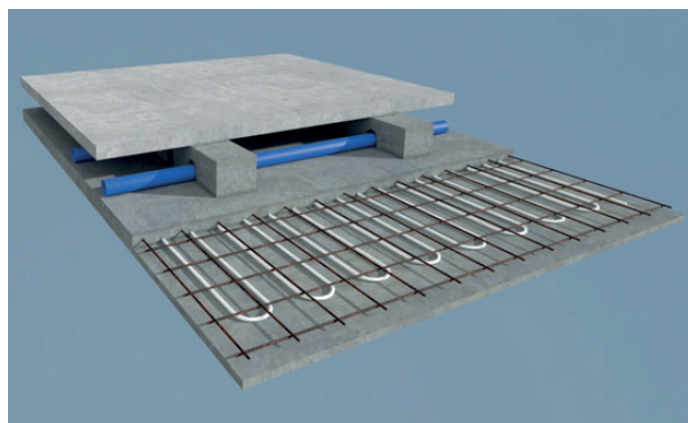
Another new and innovative solution is a system of prepressed partially prefabricated floors, which originated from Australia. The load-bearing structure of the floor is made up of prefabricated prestressed beams along with different options when it comes to filling the space between them. The slabs are made from precast fiber-reinforced concrete elements if the beam spacing is between 400 and 600 mm, or on steel stay-in-place formwork if the spacing is between 660 and 1470 mm.

Dla zwiększenia komfortu użytkowania pomieszczeń można również wykorzystać możliwości gromadzenia ciepła w betonowych elementach konstrukcyjnych. Aktywacja termiczna prefabrykatu umożliwia zarówno magazynowanie, jak i dystrybucję energii cieplnej w poszczególnych pomieszczeniach. W tym celu umieszcza się rurki instalacji zimnej wody w płycie dolnej prefabrykatu [rysunek 3]. Przestrzenie w środkowej części stropu mogą służyć do wprowadzenia kanałów wentylacyjnych/klimatyzacyjnych, jak i do umieszczenia niewielkich klimatyzatorów. W górnej płycie stropowej możliwe jest wprowadzenie instalacji ogrzewania podłogowego. W niej można również wbudować przewody do instalacji elektrycznych i teleinformatycznych, wyprowadzanych na poziomie podłogi. Dla poprawy komfortu akustycznego w dużych pomieszczeniach możliwe jest również wykonanie rowkowania powierzchni dolnej prefabrykatu [rysunek 2].

3.2. Częściowo prefabrykowany strop belkowy

Innym, nowym i innowacyjnym rozwiązaniem jest system prefabrykowanych, sprężonych, częściowo prefabrykowanych stropów, opracowanych w Australii. Konstrukcję nośną stropu stanowią strunobetonowe belki wraz z różnymi opcjami wypełnienia przestrzeni między belkami. Płyty wykonuje się z prefabrykatów fibrobetonowych w przypadku rozstawu belek od 400 do 600 mm, lub na stalowych szalunkach traconych dla rozstawu belek od 660 do 1470 mm.

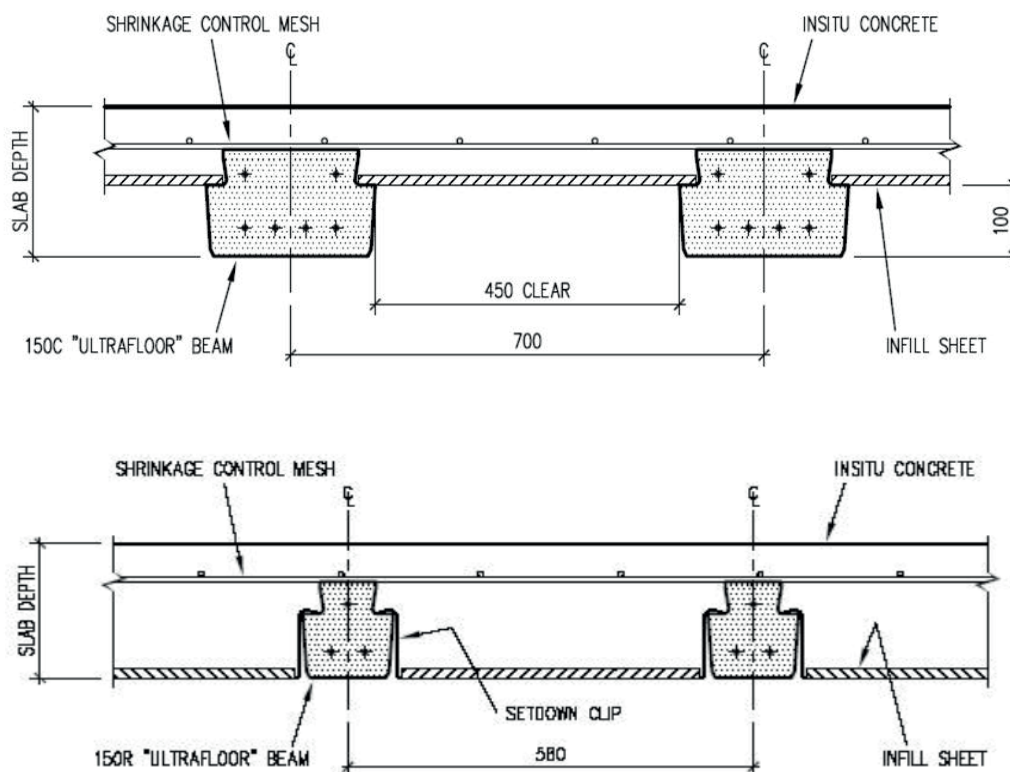
Belki stropowe wykonywane są z betonu wysokowartościowego klasy C60/75 i sprężane 2 – 8 splotami, o średnicy 9,5 mm. Wy-



Rys. 3. Prefabrykat z rurkami rozprowadzającymi zimną wodę w płycie dolnej

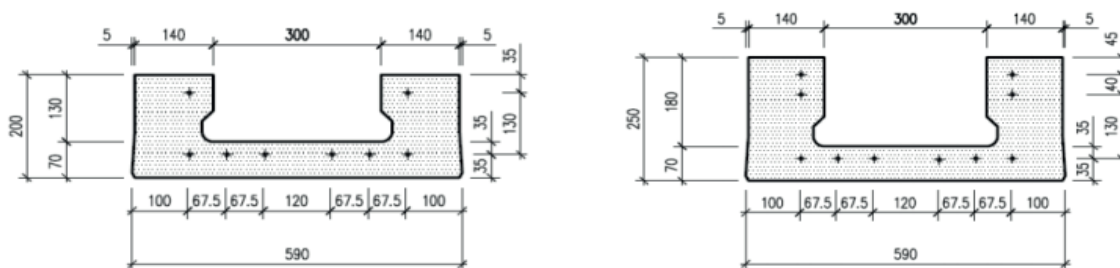
Fig. 3. Prefabricated floor with cold water pipes on the lower plate

The beams are made from high performance C60/75 class concrete and are prestressed by 2 - 8 coils 9.5 mm in diameter. The height of the beams is between 130 and 250 mm – a schematic cross-section of the floor is presented in Fig. 4. These floors can be 190 to 400 mm high, and the axial spacing of the beams can range between 480 and 1470 mm, which gives us plenty of room when it comes to the diversification of the floor load-bearing capacity. From the point of view of the designer, it is important to know that the required depth at which the beam should rest on the supports is merely 50 mm, which significantly simplifies the designing process.



Rys. 4. Przekroje poprzeczne stropu częściowo prefabrykowanego

Fig. 4. Cross-sections of a partially prefabricated floor



Rys. 5. Geometria strunobetonowych kształtek belek podporowych

Fig. 5. Geometry of precast prestressed profiles of supporting beams

sokość belek waha się od 130 mm do 250 mm – schematyczny przekrój poprzeczny stropu pokazano na rysunku 4. Stropy takie mogą mieć wysokość od 190 mm do 400 mm, przy czym rozstaw osiowy belek może wahać się od 480 mm do 1470 mm – daje to bardzo duże możliwości różnicowania nośności stropu. Z punktu widzenia projektanta konstrukcji, ważną informacją jest, że wymagana głębokość oparcia belek stropowych na podporach wynosi zaledwie 50 mm, co znacznie ułatwia ich projektowanie.

Ważnym powiększeniem tego układu są strunobetonowe kształtki szerokich belek nośnych [podciągów], o niewielkiej wysokości. Kształtki te są formą szalunków traconych, uzupełnianych na miejscu budowy odpowiednio dobranym zbrojeniem porzecznym i mieszanką betonową klasy co najmniej C30/37. Przykładowe przekroje poprzeczne kształtek belek podporowych pokazano na rysunku 5. W ten sposób otrzymane belki, o wysokości od 290 mm do 600 mm i szerokości od 600 mm do 2400 mm, mogą być stosowane do 11 m rozpiętości. Podciągi wykonane ze strunobetonowych kształtek mogą być zastosowane nad podporami środkowymi, przez ułożenie w warstwie betonu uzupełniającego zbrojenie górne. Ukształtowanie podciagu, o szerokości 1200 mm i wysokości części belki znajdującej się poniżej stropu zaledwie 150 mm, schematycznie pokazano na rysunku 6.

W przypadku występowania ponadnormatywnych obciążeń, lub potrzeby zwiększenia rozpiętości, belki te mogą być dodatkowo zbrojone zbrojeniem zwykłym, w postaci prętów podłużnych lub sprężone kablami sprężającymi, układanymi na miejscu budowy.

3.3. Stropy prefabrykowane z betonu lekkiego

W porównaniu ze zwykłym betonem, lekki beton kruszywowy cechuje niska gęstość objętościowa i duża trwałość, przy porównywalnej wytrzymałości na ściskanie. Ponadto, użycie betonu lekkiego powoduje wyraźną poprawę właściwości termoizolacyjnych przegrody. Argumenty te powodują, że obecnie wracają koncepcje wykorzystania tego materiału we współczesnej prefabrykacji betonowych elementów konstrukcyjnych, przede wszystkim z uwagi na spodziewane mniejsze koszty transportu i montażu.

Dodatek włókien stalowych poprawia właściwości betonu, przede wszystkim wytrzymałość na zginanie. Taki beton można dosto-

This system can be enlarged with prefabricated prestressed profiles for broad load-bearing beams [binding joists] of a small height. These profiles are a form of stay-in-place formwork supplemented on-site with properly selected transverse reinforcement and an at least C30/37 strength class concrete mix. Exemplary cross-sections of profiles for support beams are shown in Fig. 5. Beams obtained in the aforementioned way, measuring 290 to 600 mm in height and 600 to 2400 mm in length, may span up to 11 m. Binding joists made from prefabricated prestressed profiles may be applied above mid-section supports, by placing them in the layer of concrete that fills up the upper reinforcement. The schematic shape of binding joists measuring 1200 mm in width and the height of the part of the beam placed below the floor of merely 150 mm, is depicted in Fig. 6.

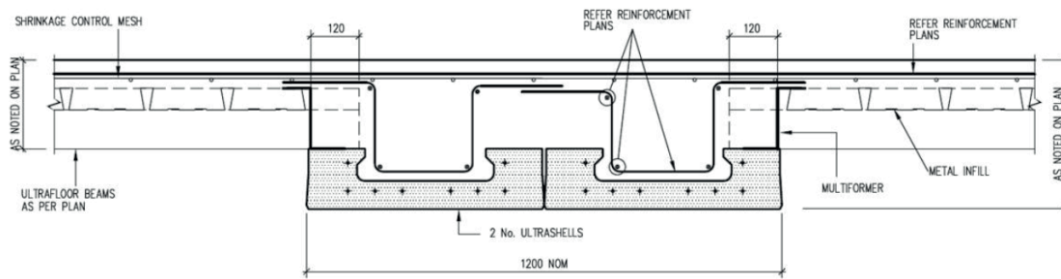
In the case of excessive loads or the need to increase the span, these beams may be additionally reinforced with standard reinforcement in the form of rebars, or prestressed with prestressing cables laid on-site.

3.3. Prefabricated floors from lightweight concrete

Compared to regular concrete, light-aggregate concrete is characterised by low volumetric density and high durability, with comparable compression strength. Moreover, using lightweight concrete notably increases the thermal insulation properties of the wall barrier. For these reasons, the latest years have seen a return of this material in contemporary prefabrication of concrete structural elements, mostly due to lower anticipated costs of transport and assembly.

The addition of steel fibres improves the properties of concrete, especially its bending strength. This kind of concrete can be adapted to incredibly versatile demands, and in several cases it is even possible to fabricate elements without the classic reinforcement in the form of rebars. The combined application of steel fibres and light aggregates enables us to obtain concrete with good properties, which can bring measurable economic benefits.

One idea for using lightweight aggregate concrete is to make prefabricated half-slabs [filigree formwork] (7). The filler concrete placed on-site can also be lightweight, but thanks to being addi-



Rys. 6. Przekrój poprzeczny podciągu stropowego

Fig. 6. Cross-section of a binding joist

sować do bardzo zróżnicowanych wymagań, a w niektórych przypadkach można wykonywać elementy nieposiadające klasycznego zbrojenia w postaci prętów zbrojeniowych. Połączone zastosowanie włókien stalowych i lekkich kruszyw umożliwia uzyskanie takiego betonu o dobrych właściwościach, co może przynosić wymierne korzyści ekonomiczne.

Jedną z koncepcji wykorzystania lekkich betonów kruszywowych jest wykonywanie prefabrykatów stropowych szalunków traconych typu filigran (7). Beton uzupełniający, układany na miejscu budowy był również betonem lekkim lecz zbrojony był włóknami szklanymi, co pozwoliło na rezygnację z siatki zbrojenia górnego.

Ciekawym, nowym rozwiązaniem konstrukcyjnym w zakresie prefabrykacji elementów stropowych z wykorzystaniem betonów lekkich jest system SL-Deck, łączący lekki beton kruszywowy zwykły z betonem samozagęszczającym się. W systemie tym beton zwykły używany jest tylko w tych przypadkach, w których jest to konieczne z uwagi na warunki nośności. Pozostała część – około 45% całkowitej objętości elementu, wykonana jest z betonu lekkiego w postaci łukowych bloków, układanych w dolnej części płyty. Między lekkimi blokami wytwarza się z betonu zwykłego podłużne, sprężone żebra nośne oraz wąskie żebra rozdzielcze. Rozwiązanie to pokazano na rysunku 7 (8). Takie elementy stropowe produkowane są o szerokości do 2,4 m.

W przypadku konieczności ułożenia warstwy „nadbetonu” konstrukcyjnego na prefabrykatkach, na przykład w garażach wielopoziomowych, konieczne jest zapewnienie nośności styku na rozwarstwienie. W przypadku elementów wykonywanych z betonu samozagęszczającego się powierzchnia styku powinna być bardzo gładka, tak więc dla zapewnienia odpowiedniej nośności wymagane jest zastosowanie zbrojenia zszywającego, wypuszczonego powyżej powierzchni górnej.

Ważną cechą użytkową tego systemu stropowego jest duża swoboda kształtowania prefabrykatów. Na przykład w celu lokalnego zwiększenia nośności płyty na ścinanie przy przebiciu, możliwe jest zastąpienie części bloków lekkich betonem zwykłym. Specjalne ukształtowanie krawędzi bocznych, w postaci powierzchni

tionally reinforced with glass fibres, upper textile reinforcement is unnecessary.

An interesting new design solution with regard to prefabricated floor slabs that applies lightweight concrete is the SL-Deck system, that combines traditional light-aggregate concrete with self-consolidating concrete. Traditional concrete is only used in places where it is necessary due to load-carrying conditions. The remaining part – around 45% of the element total volume – is made from lightweight concrete in the form of arching blocks, arranged in the lower part of the slab. Between these lightweight blocks, traditional concrete forms longitudinal prestressed load-bearing ribs and narrow separating ribs. The solution is shown in Fig. 7 (8). The manufactured floor elements are 2.4 m wide.

If there is a need to place a layer of concrete topping on the prefabricated slabs, e.g. in multi-storey car parks, it is necessary to protect the contact point against delamination. In the case of elements made from self-consolidating concrete, the contact surface should be very smooth, so providing proper load-bearing capacity requires the introduction of rebar stitching, above the upper surface.

An important performance property of this floor system is great freedom when it comes to shaping prefabricated elements. For example, in order to increase a slab shear strength at the puncture, it is possible to replace some lightweight blocks with traditional concrete. A special shape of outer edges in the form of dowelled surfaces allows us to shift the traverse load. Increased resistance



Rys. 7. Prefabrykat SL-Deck (8)

Fig. 7. SL-Deck precast slab (8)

dyblowanych, umożliwia przenoszenie obciążeń poprzecznych. Zwiększoną nośność na działanie sił poziomych, w tym obciążeń sejsmicznych czy para-sejsmicznych, można osiągnąć za pomocą dodatkowych łączników pomiędzy płytami. Ponadto, strop ten ma doskonałe właściwości dźwiękowe i ogniowe, pomimo znacznie niższej masy, jego izolacyjność akustyczna jest prawie taka sama jak płyty żelbetowej, o tej samej grubości (9).

W większości zastosowań w budownictwie mieszkaniowym, prefabrykaty wykonane są z gładką powierzchnią dolną. W omawianym przypadku gładką powierzchnię uzyskać można przygotowując na stole prefabrykacyjnym cienką warstwę zaprawy, o grubości około 3 mm, po czym układając na niej bloki z betonu lekkiego. Pozostawienie jednak szorstkiej powierzchni dolnej, eksponującej kruszywo, przyczynia się dodatkowo do poprawy właściwości akustycznych pomieszczeń, eliminując potrzebę stosowania dodatkowych sufitów akustycznych. Może to być wykorzystywane w salach lekcyjnych lub budynkach użyteczności publicznej.

3.4. Koncepcja stropów z betonu ze zbrojeniem węglowym

Najnowszym pomysłem w dziedzinie realizacji stropów jest koncepcja wykonywania lekkich i wysokowytrzymałych prefabrykatów z betonu ze zbrojeniem węglowym. Materiał ten pozwala na nowe podejście do konstrukcji z elementów nośnych. Konstrukcje z betonu zbrojonego tekstyliami węglowymi mogą mieć znacznie mniejsze wymiary przekroju poprzecznego niż konwencjonalne elementy żelbetowe, ponieważ nie jest wymagana zwiększona otulina betonowa, wynikająca z ochrony antykorozyjnej zbrojenia. Minimalna grubość otuliny betonowej dla elementów ze zbrojeniem węglowym jest ograniczona jedynie wymaganiami wynikającymi z warunków przyczepności zbrojenia do betonu. Inną zaletą jest znacznie wyższa wytrzymałość na rozciąganie kompozytów z włóknami węglowymi, niż w przypadku konwencjonalnej stali zbrojeniowej. W związku z tym wymagana powierzchnia przekroju poprzecznego zbrojenia węglowego jest wyraźnie zmniejszona w stosunku do zbrojenia stalowego. Zalety oraz zagrożenia wynikające ze stosowania zbrojenia elementów betonowych włóknami węglowymi zostały opisane przez autora w 2015 roku (10).

Do wykonywania betonów ze zbrojeniem węglowym w postaci tkanin o małym rozmiarze oczek, bardzo dobrze nadaje się drobnoziarnisty beton samozagęszczający się. Ze względu na bardzo małą otulinę betonową, mogącą wynosić jedynie 8 mm, a także na niewielkie odległości między warstwami zbrojenia, konieczne było stosowanie kruszywa o uziarnieniu nie przekraczającym 1 mm. Beton ten cechuje się bardzo dużą wytrzymałością na ściskanie, wynoszącą co najmniej 80 MPa (11).

Nowy materiał konstrukcyjny, jakim jest beton ze zbrojeniem węglowym, pozwala na optymalizację przekrojów poprzecznych elementów konstrukcyjnych, stosowanych w budownictwie. Zrealizowane i badane na Uniwersytecie Technicznym w Dreźnie przykłady prototypowych, w pełni lub częściowo prefabrykowanych, elementów stropowych pokazują ogromne możliwości jakie

to horizontal forces, including seismic and parasismic loading, can be obtained with the application of additional connectors between slabs. Moreover, this form of floor has excellent sound- and fireproof properties despite its reduced mass, with sound resistance almost the same as in reinforced concrete slabs of the same thickness (9).

In residential buildings, most prefabricated elements have a smooth bottom surface. In the case of SL-Deck slabs, this can be obtained by preparing a thin, 3 mm layer of mortar on a prefabrication table, and then placing lightweight concrete blocks on top. However, leaving a coarse bottom surface as is, with exposed aggregate, contributes to an improvement of the soundproofing properties of the rooms, thus eliminating the need of additional acoustic ceiling systems. This solution can be applied in classrooms or public utility buildings.

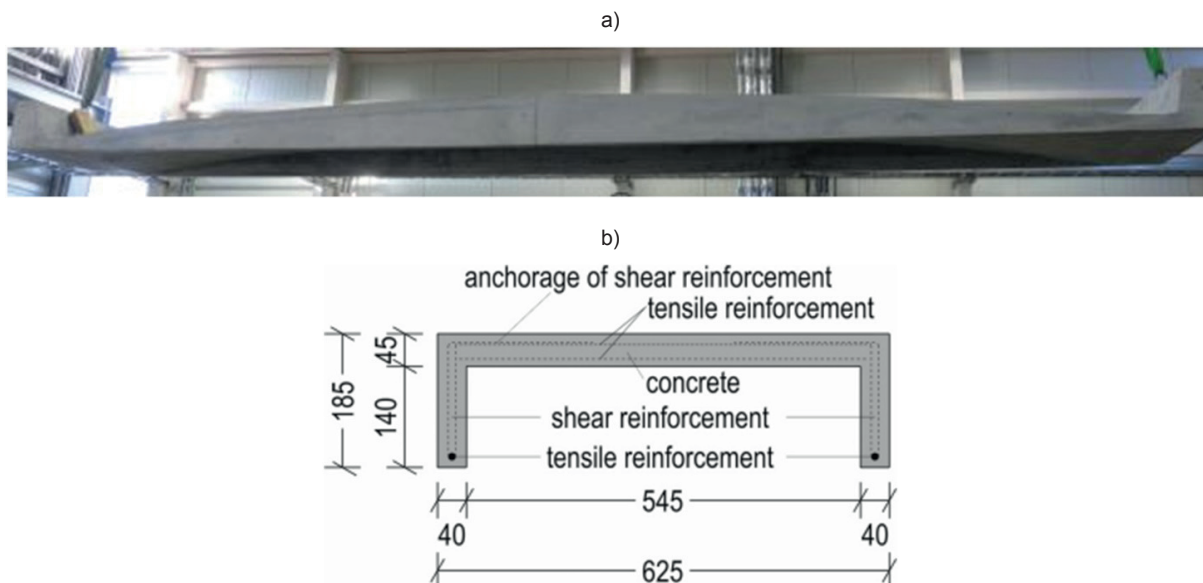
3.4. Carbon fibre-reinforced concrete slabs

The latest concept in floor construction is the manufacture of lightweight and high-resistance prefabricated slabs made from carbon fibre-reinforced concrete. This material offers a new perspective on load-bearing structures. Structures made from concrete reinforced with carbon textiles can have significantly smaller cross-section dimensions, than conventional reinforced concrete elements, since increased concrete bonding otherwise applied to protect reinforcement from corrosion is not required. The lowest thickness of concrete bonding for elements with carbon reinforcement is limited to the restrictions resulting from the properties of the reinforcement adhesion to concrete. Another advantage is significantly higher tensile strength of composites with carbon fibres, than in the case of conventional reinforcing steel. This means that the required cross-section area of carbon reinforcement is notably lower, compared to steel reinforcement. The advantages and risks resulting from the application of carbon fibres in concrete reinforcement were described by the author in 2015 (10).

Fine-grain self-consolidating concrete is a very suitable material for the production of concrete with carbon reinforcement in the form of small mesh textiles. Thanks to a very small amount of concrete bonding, which can be as thin as 8 mm, as well as low distances between reinforcement layers, it was necessary to use aggregate with the grain size of 1 mm and below. This type of concrete is characterised by great compression strength of at least 80 MPa (11).

The newest building material, which is concrete with carbon fibre reinforcement, optimises the cross-section areas of structural elements used in construction. Examples of fully or partially prefabricated prototypes of floor elements implemented and studied at the Technische Universität Dresden, have shown great capabilities of this material when combined with the new conceptual design of structural elements (11).

A conventionally designed reinforced concrete slab, subjected to evenly distributed forces, is assessed with the assumption that the compressive forces are carried through concrete and the tensile forces are carried through reinforcement, at the stretched edge. It



Rys. 8. Pół-prefabrykat ze zbrojeniem węglowym: a), b) przekrój poprzeczny w środku rozpiętości przęsła (11)

Fig. 8. Partially prefabricated component with carbon reinforcement: a), b) mid-span cross-section (11)

może dawać ten materiał w połączeniu z nowym projektowaniem koncepcyjnym elementów budowlanych (11).

Konwencjonalnie projektowana płyta żelbetowa, poddana działaniu obciążeń równomiernie rozłożonych, obliczana jest przy założeniu, że siły ściskające przenoszone są przez beton, a siły rozciągające przez zbrojenie, umieszczone przy krawędzi rozciąganej. Jak wiadomo, w elementach swobodnie podpartych strefa ściskana pomiędzy podporami przyjmuje kształt płaskiego łuku, natomiast całość rozciągania przejmowana jest przez zbrojenie dolne. Nowe, lekkie prefabrykowane elementy stropowe, opracowano w oparciu o model pracy konstrukcji przyjmujący, że pomiędzy łukiem sił ściskających a strefą rozciągania w obszarze przęsłowym, a także ponad łukiem ściskania w strefie przypodporowej, beton nie jest potrzebny do przenoszenia obciążeń.

Pierwszą propozycją jest pół-prefabrykowany element stropowy, o długości 4,5 m, składający się z łukowej powłoki w kierunku podłużnym o grubości zaledwie 45 mm, dwóch belek o bardzo małej szerokości, wynoszącej 40 mm, usytuowanych wzdłuż bocznych krawędzi powłoki oraz dwóch podporowych belek poprzecznych. Element ten i jego przekrój poprzeczny pokazano na rysunku 8. Belki te zbrojone są prętami stalowymi lub węglowymi. W ten sposób osiągnięto zmniejszenie masy własnej elementu o 70%, w porównaniu z tradycyjnym prostokątnym, przekrojem poprzecznym płyty żelbetowej, o tej samej wysokości.

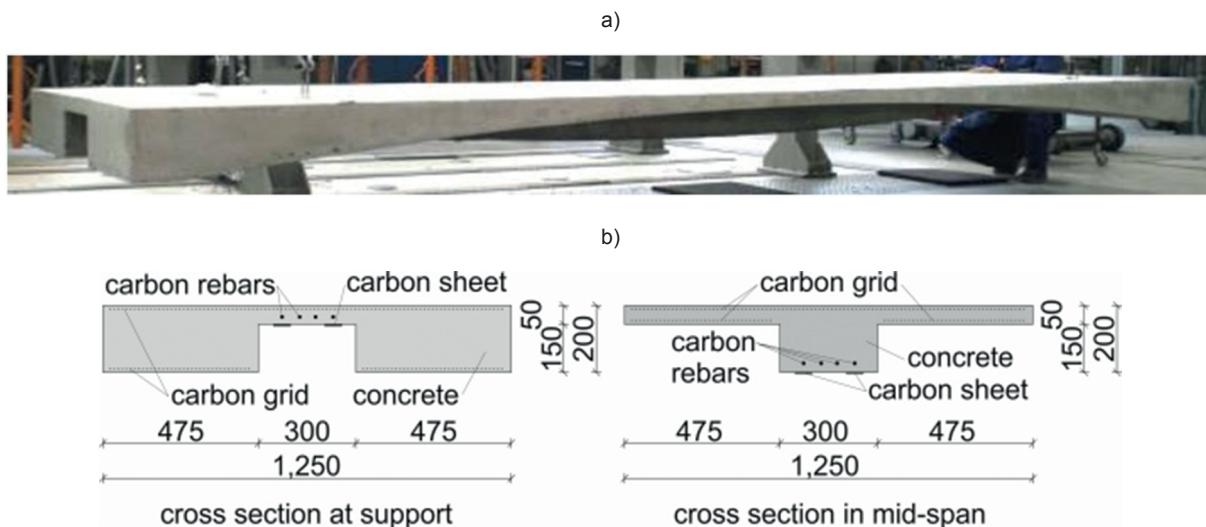
Koncepcja stropu wykonywanego z takich elementów zakłada, że łukowa powłoka będzie również przyjmować wszystkie równomiernie rozłożone obciążenia. Do uzyskania poziomej powierzchni podłogi, konieczne jest zastosowanie zasypki na łuku – może być ona wykonana z betonu lekkiego, syckiego materiału zasypowego lub w postaci izolacji akustycznej, lub termicznej. Zasypka ta poprawia również właściwości akustyczne stropu. Projektanci uwzględnili, że materiał zasypowy może powodować dodatkowe obciążenie stałe rzędu 1,1 kN/m².

is a well-known that in simple-supported elements, the compressed zone between supports assumes the shape of a flat curve, whereas the total tension is born by the lower reinforcement. The latest lightweight prefabricated floor slabs were designed based on a structural model which assumes that between the curve of the compressive forces and the tensile zone in the spanning area, as well as over the compressive curve in the near-supporting area, the concrete is not required to carry loads.

The first proposed solution is a partly prefabricated floor slab measuring 4.5 m in length and consisting of a 45 mm thick longitudinally curved layer, two very narrow beams measuring 40 mm in width, located along the side edges of the layer, and two supporting cross-beams. This element and its cross-section are shown in Fig. 8. The beams can be reinforced with steel or carbon rebars. This way the dead mass of the component was reduced by 70% compared to the traditional rectangular cross-section of a reinforced concrete slab, of the same height.

The concept of floors made from these elements assumes that the curved layer will bear all evenly distributed loads. In order to obtain a levelled floor area it is necessary to backfill the curve – the backfill may be made from lightweight concrete, loose material or by way of an acoustic, or thermal insulation. This backfill also improves the soundproofing properties of the floor. Designers have taken into consideration that the backfilling material may generate additional constant load of 1.1 kN/m².

The second concept is a fully prefabricated concrete element measuring 200 mm in height, with a levelled smooth upper surface, reinforced with carbon fibres reinforcement only. This element, composed of three curved strips, is characterised by variable geometry along the length of the span – the element and its cross-section is shown in Fig. 9. The outer curves measuring 50 mm in thickness mid-span, are arranged in the opposite direction to the inner curve. The outer curves bear compressive forces in the bent



Rys. 9. Prefabrykat ze zbrojeniem węglowym: a), b) przekroje poprzeczne: podporowy i przęsłowy (11)

Fig. 9. Precast component with carbon reinforcement: a), b) cross-sections: support and span (11)

Drugą koncepcję tworzy w pełni prefabrykowany element betonowy o wysokości 200 mm i poziomej gładkiej powierzchni górnej, zbrojony jedynie zbrojeniem z włókien węglowych. Element ten składający się z trzech łukowych pasm ma zmienną geometrię na długości przęsła - widok i przekrój poprzeczny elementu pokazano na rysunku 9. Łuki zewnętrzne o grubości 50 mm w połowie rozpiętości przęsła, są ułożone odwrotnie niż łuk wewnętrzny. Zewnętrzne łuki przejmują siły ściskające w zginanym prefabrykacie, natomiast łuk środkowy zawiera zbrojenie rozciągane – zarówno wewnętrzne zbrojenie zwykłe, jak i zewnętrzne zbrojenie sprężające. Ze względu na ułożenie na dolnej powierzchni wewnętrznego łuku, wstępnie naprężonej taśmy CFRP, uzyskuje się dodatkowy efekt wypychania konstrukcji do góry na skutek obciążenia radialnego, wywołanego przez krzywoliniowe ciągną sprężające.

4. Podsumowanie

Stropy betonowe stanowią zdecydowaną większość ze wszystkich typów stropów, realizowanych na świecie. Nie wymagają one dodatkowych zabezpieczeń przeciwpożarowych lub okresowych zabiegów konserwacyjnych, jakim podlegają chociażby elementy stalowe, co czyni je tańszymi w eksploatacji. Przy wykonywaniu stropów z betonu coraz powszechniej zaczynają być wykorzystywane betony specjalne, a także technologia sprężania. Chęć odciążenia konstrukcji jest motorem poszukiwań możliwości wykorzystywania kruszywowych betonów lekkich w konstrukcjach stropowych. Bardzo ciekawą wydaje się być perspektywa wykorzystywania w prefabrykacji betonowej drobnoziarnistych betonów wysokowartościowych ze zbrojeniem tekstylnym z włókien węglowych, które pozwalają na nieporównywalnie mniejsze przekroje poprzeczne elementów, niż obecnie stosowane są w technologii tradycyjnego żelbetu. Coraz częściej nowe koncepcje prefabrykatów stropowych pozwalają na połączenie stropowego elementu konstrukcyjnego z całością instalacji, wymaganych w pomieszczeniu.

Choć innowacje zdarzają się również w obszarze konstrukcji żelbetowych wykonywanych na miejscu budowy, to jednak technologia

prefabrykated element, and the middle curve features tensile reinforcement – both in the form of inner conventional reinforcement and outer shear reinforcement. Placed on the bottom surface of the inner curve, a pre-tensioned CFRP band provides an additional effect of pushing the structure up as a result of radial load generated by a curvilinear prestressing tie.

4. Summary

Concrete floors constitute the vast majority of all types of floors erected worldwide. They do not require additional fire protection measures or periodical maintenance work that is necessary in the case of steel components, thus reducing the cost of their exploitation. Special concretes and prestressing technology are increasingly common in the production of concrete floors. The desire to de-load the structure is the driving force behind looking for ways of applying light-aggregate concretes in floor production. The application of fine-grain high performance concretes with textile carbon fibre reinforcement in concrete prefabrication processes seems an interesting solution, allowing for incomparably smaller cross-sections of the used elements than the components currently used in the traditional reinforced concrete technology. The latest concepts of prefabricated floors allow us to integrate the entirety of utility systems required in a given room into a structural floor component.

Although innovations in the area of on-site RC construction are not uncommon, prefabrication still constitutes a technology that is the most open to creating and implementing new and unconventional solutions in the construction industry. Not only does it allow us to obtain high performance, flexible structural elements, but it is also consistent with the limitations tied to broadly defined sustainable economic growth. It caters to environmentally-friendly structures in the entirety of their life cycle – from restriction on the consumption of natural resources and carbon dioxide emissions in the production process, through lower noise and dust emissions on the construction site, to easier demolition and reuse of some

prefabrykacji jest jednym z najbardziej otwartych na tworzenie i wdrażanie nowych, niestandardowych rozwiązań w zakresie konstrukcji budowlanych. Pozwala ona nie tylko na uzyskiwanie wysokiej jakości, estetycznych elementów konstrukcyjnych, ale i dobrze spełnia ograniczenia związane z szeroko rozumianym zrównoważonym rozwojem gospodarki. Sprzyja ona powstawaniu konstrukcji przyjaznych środowisku w całym ich cyklu życia – począwszy od ograniczania zużycia zasobów naturalnych i zmniejszenia emisji dwutlenku węgla w procesie produkcyjnym, poprzez zmniejszenie emisji hałasu i pyłu na miejscu budowy, aż po możliwość łatwej rozbiórki obiektu i ponownego użycia części jego składników. W sytuacji, kiedy pojawiają się rosnące niedobory wyspecjalizowanej siły roboczej – a przez to postępuje wzrost jej kosztów - wszelkie działania prowadzące do zmniejszenia pracochłonności stają się ważnym argumentem. Ponadto, wciąż jeszcze niedoceniane w naszym kraju ograniczenie kosztów społecznych dla lokalnej społeczności, wynikających z uciążliwości prowadzenia budowy, powinno stanowić atut technologii prefabrykacji.

Należy podkreślić, że w artykule zaprezentowano jedynie subiektywny wybór współczesnych rozwiązań stosowanych do budowy stropów z betonowych elementów prefabrykowanych. Podążanie za najnowszymi osiągnięciami w tej dziedzinie, konieczne jest ciągłe śledzenie najnowszej literatury fachowej oraz materiałów technicznych, oferowanych przez licznych producentów.

Literatura / References

1. H. Bachmann, A. Steinle, *A Precast Concrete Structures*, Ernst & Sohn, Berlin 2011.
2. A. Kisiółek, *Rynek systemów stropowych w Polsce – Analiza wybranych rozwiązań na przestrzeni lat 2015-2016*. Wydawnictwo WWSSE, Środa Wielkopolska 2018.
3. W. Derkowski, P. Skalski, *New concept of slimfloor with prestressed composite beams*, *Procedia Engineering*, **193**, pp. 176-183 (2017).
4. Ł. Drobiec, *Stropy Vector – koncepcja, kształtowanie, obliczanie, wykonawstwo*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2018.
5. W. Derkowski, *Budownictwo kubaturowe ze ścianami nośnymi – możliwości współczesnej prefabrykacji*, *Cement, Wapno, Beton*, **82**, 5, 414-425 (2017).
6. T. Friedrich, *Precast buildings of tomorrow – cool, intelligent and flexible*, *CPI*, 1, pp. 11-27 (2018).
7. K. Holschemacher, F. Junker, T. Müller, H. Kieslich, *Reduction of minimum reinforcement in lightweight concrete elements through use of steel fibres*, *CPI*, 5, pp. 56-61 (2017).
8. *Innovative concrete deck expands internationally*, *CPI*, 5, pp. 198-202 (2016).
9. *New production concept for precast slabs – improving competitiveness on residential market*. *CPI*, 6, pp. 196-200 (2017).
10. W. Derkowski, *Opportunities and Risks Arising from the Properties of FRP Materials Used for Structural Strengthening*, *Procedia Engineering*, **108**, pp. 371-379 (2015).
11. S. May, O. Steinbock, H. Michler, M. Curbach, *Precast Slab Structures Made of Carbon Reinforced Concrete*, *Structures*, **18**, pp. 20-27 (2019).

of the components. In the face of increasing lack of specialised workforce – resulting in the rising costs thereof – all measures aimed at reducing labour intensity become a significant asset. Moreover, the limitation of social costs for the local community with regard to the inconvenience of construction works – which is still underrated in our country – should constitute yet another asset of prefabrication.

It needs to be emphasised that the article presents a subjective selection of contemporary solutions implemented in the construction of floors, from prefabricated concrete elements. In order to keep up with the latest achievements in this field, it is necessary to follow the latest industry publications and technical materials, offered by numerous manufacturers.