

TRAMVAJOVÁ ZASTÁVKA Z 3D TIŠTĚNÉHO UHPC V PRAŽSKÝCH HOLEŠOVICÍCH

Jan Nováček, Petr Tomečka, Jiří Stráský, Federico DÍaz, Dmitrij Nikitin, Závíš Unzeitig

Na okraji pražského parku Stromovka byla postavena první tramvajová zastávka z 3D tištěného UHPC. Nosná konstrukce zastřešení byla vyrobena speciálním robotickým ramenem české společnosti So Concrete technologií robotické aditivní fabrikace. Součástí zastávky je zastřešení z plexiskla, boční ochranná stěna z plexiskla, informační panel, lavička a integrované LED osvětlení. Podlahu zastávky tvoří betonové panely. Design zastávky navrhli Federico DÍaz, Dmitrij Nikitin a Závíš Unzeitig, kteří umocnili výsledky analýzy hledání tvaru konstrukce provedené projekční kanceláří Stráský, Hustý a partneři. Konstrukce zastávky má úsporné organické tvary dané čistým statickým působením.

TRAM STOP MADE OF 3D PRINTED UHPC IN PRAGUE HOLEŠOVICE

On the edge of Prague's Stromovka Park, the first tram stop from 3D printed UHPC was built. The roofing load bearing structure was produced by a special robotic arm of the Czech company So Concrete by a technology of robotic additive manufacturing. The stop includes a plexiglas roof, a plexiglas side protective wall, an information panel, a bench and integrated LED lighting. The floor of the stop consists of concrete panels. The design of the tram stop was performed by Federico DÍaz, Dmitrij Nikitin and Závíš Unzeitig, who amplified the results of the analysis of the form finding carried out by the design office Stráský, Hustý a partneři. The stop's structure has economical organic shapes given by a pure static action.



Klient	Hlavní město Praha
Návrh	So Concrete, Praha
Projekt	Stráský, Hustý a partneři s.r.o., Brno
Zhotovitel	So Concrete, Praha

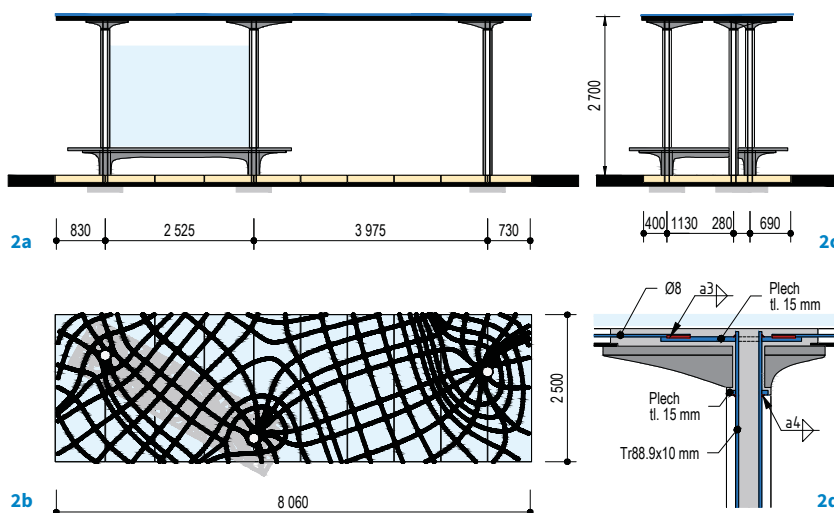
Návrh zastávky

Přístřešek s půdorysem 8,06 × 2,50 m má střešní konstrukci tvořenou rovinným roštem z 3D tištěného UHPC. Rošt, který je zhotoven z půdorysně zakřivených žebér, podporuje krytinu z panelů plexiskla (obr. 2). Osnova žebér je spřažena s hlavicemi (obr. 3) podepřenými trojicí sloupů, jejichž poloha byla určena tak, aby co nejméně omezovaly volný prostor zastávky. Vlastní řešení žebér a hlavic vyplynulo ze specifických požadavků technologie tištěného betonu.

Zastávka je doplněna lavičkou (obr. 4) a boční stěnou z plexiskla. Jak střešní, tak i boční stěna mají vybroušené obrazce umocňující konstrukční řešení střechy. Součástí přístřešku je i betonová podlaha, u níž byl povrch ztvárněn ve stejném duchu (obr. 5).

Hledání tvaru konstrukce

Tvar a uspořádání žebér vyplynuly z konceptu vyvinutého slavným italským inženýrem Pierem Luigim Nervim, který navrhoval izostatické stropní konstrukce [1], [2]. Tyto kon-





3

strukce jsou tvořeny železobetonovými deskami ztuženými žebry sledujícími průběhy hlavních momentů v desce. Izostatické stropy Nervi navrhoval jak pro průmyslové haly, tak i pro výstavní pavilony a reprezentativní budovy. Příkladem může být konstrukce stropu nad čelní plastikou hlavní haly audienčního sálu Pavla VI. ve Vatikánu (obr. 6). Z fotografie je zřejmé, že tato konstrukce, jejíž tvar vychází z čistého statického působení, je nejen konstrukčně efektivní, ale také mimořádně krásná. Proto byl tento přístup opakován i u dalších reprezentativních konstrukcí navržených v zahraničí [3].

Postup při návrhu tvaru a uspořádání žebrování střešního přístřešku je zřejmý z obr. 7, na kterém jsou vykresleny velikosti a směry hlavních momentů izotropní desky podepřené ve třech bodech. Z těchto směrů byly iteračně odvozeny počty a trajektorie žebrování tak, aby jejich namáhání bylo co nejrovnoměrnější. Úvodní modely pro hledání tvaru byly tvořeny na izotropní desce v prostředí Grasshopper s pluginem Karamba3D. V tomto softwaru proběhl iterační proces a pomocí vyvinutého softwarového konvertoru byl exportován tento model pro pokročilé výpočty v programu Midas Civil. Žebra byla modelována pruty, které byly spojeny s deskostěnovými prvky vystihujícími působení hlavic situovaných v místě uložení konstrukce na sloupy (obr. 8). Výpočtový model korektně vystihl proměnnou výšku a sklon těžištní osy hlavic. Hlavice byly spojeny se svislými pruty modelujícími působení sloupů (obr. 9).

Na tomto výpočtovém modelu byly určeny vnitřní síly pro všechna nor-



4

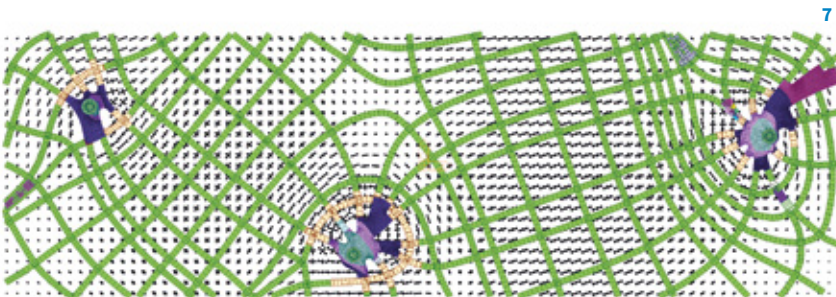


5

1 Tramvajová zastávka Výstaviště v Praze
 2 Konstrukční uspořádání: a) čelní pohled, b) půdorys, c) boční pohled, d) detail spojení střešního roštu
 3 Hlavice pilíře podporující střešní rošt
 4 Lavička
 5 Výtvarná úprava povrchu podlahy
 6 Audienční sál Pavla VI. ve Vatikánu: strop nad čelní plastikou
 7 Hlavní momenty v desce a odvozená geometrie žebrování
 8 Výpočtové modely hlavic podpěr
 1 Tram stop Výstaviště in Prague
 2 Structural arrangement: a) front elevation, b) plan, c) side elevation, d) detail of the connection of the roof with the column
 3 Pier capital supporting the roof grid
 4 Bench
 5 Artistic treatment of the floor surface
 6 The Paul VI Audience Hall in Vatican: ceiling above the frontal sculpture
 7 Principal moments in the slab and derived rib geometry
 8 Analytical models of the pier's capital



6



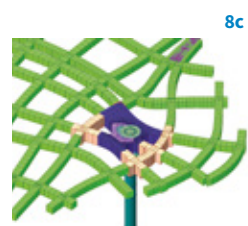
7



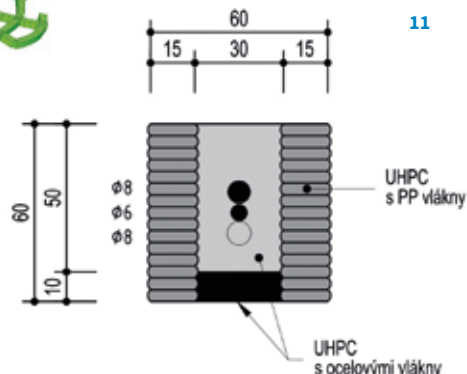
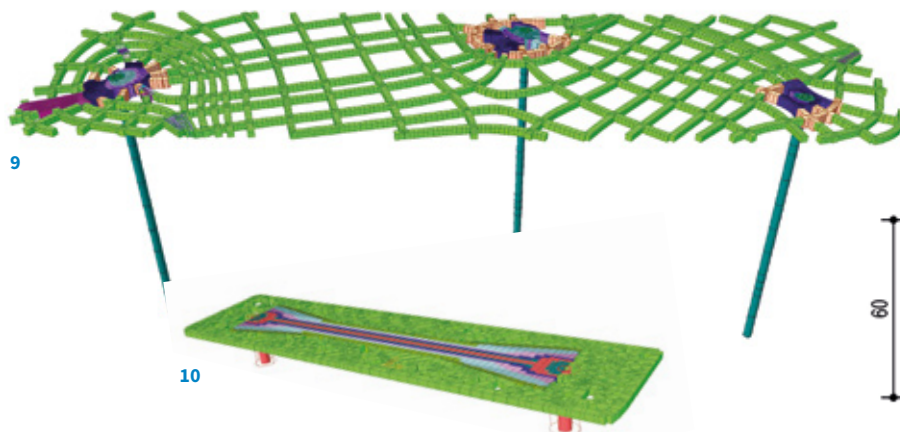
8a



8b



8c



mová zatížení. S ohledem na polohu sloupů a na rámové podepření střešní konstrukce jsou sloupy nejen tlačeny, ale také ohýbány.

Lavičku, která diagonálně spojuje dva sloupy, tvoří nosník s převislými konci. Jeho rozpětí je 2,9 m. Po šířce má ve střední, nosné části plný průřez, na okrajích je vylehčena otvory. Ty byly určeny nejen s ohledem na estetické působení lavičky, ale především s ohledem na pohodlí uživatelů. Lavička, která byla navržena na zatížení 10 osobami o celkové hmotnosti jedna tuna, byla analyzována jako deskostěnová konstrukce (obr. 10).

Technické řešení konstrukce

Sloupy sestávají z ocelové trubky 88,9 × 10 mm vyplněné UHPC pro zvýšení jejich tuhosti. Ocelové trubky jsou obetonovány bílým UHPC a jsou přivařeny ke kruhovým patním plechům kotveným šesti šrouby. Na sloupy navazují prefabrikované hlavice podporující žebra střešní konstrukce. Při montáži konstrukce byly sloupy chráněny PVC trubkou, která sloužila zároveň jako bednění pro obetonování ocelového sloupu.

Všechna žebra mají konstantní výšku a šířku 60 mm (obr. 11). U podpěr jsou žebra spřažena s hlavice-

mi výšky od 40 do 140 mm. Střešní konstrukce byla navržena z UHPC C110/130. Aby bylo možné žebra vyztužit, byla vytvářena postupně. Nejdříve se vytvořil U-průřez, do kterého se vložila a zabetonovala betonářská výztuž (obr. 12 a 13). I vlastní U-průřez se vytvářel postupně. Technologií robotické aditivní fabrikace se vytiskly boční stěny, mezi kterými se následně stejnou technologií vytvořila dolní příruba. Nad hlavice byla žebra tvořena jen bočními stěnami, prostor mezi nimi byl vyplněn až po jejich montáži.

Při stavbě byla střešní konstruk-





16



17



18a



18b

ce rozdělena na šest montážních dílů (obr. 14). V místě spojů byla výplň U-profilů vynechána a betonářská výztuž prodloužena (obr. 15). Po osazení jednotlivých dílů byla vyčnívající betonářská výztuž vzájemně svařena a prostor mezi bočními stěnami žeber byl vyplněn UHPC.

Hlavice byly stejnou technologií vybetonovány do bednění z extrudovaného polystyrenu (obr. 16 a 17), tvar hlavic byl v polystyrenu digitálně vyfrézován. Žebra byla s hlavicemi spřažena epoxidovým lepidlem a hmoždinkami zakotvenými v hlavicích a zabetonovanými ve výplňovém betonu U-průřezu. Při stavbě byly hlavice uloženy na ocelové prstence navařené na ocelovou trubku. V úrovni dolního povrchu žeber byly po montáži hlavic na sloupy nasazeny a následně navařeny ocelové plechy, na které byla přivařena výztuž žeber zajišťující přenos tahu pro zachycení podporového ohybového momentu. Nakonec byl prostor mezi stěnami žeber vyplněn UHPC.

Také lavička je sestavena ze dvou vzájemně spřažených prvků – spodní, podpůrné části a posedové, deskové části (obr. 18). I tyto prvky byly vyráběny podobně jako střešní konstrukce technologií robotické aditivní fabrikace. Spodní část byla vyplněna UHPC do bednění z extrudovaného polystyrenu, ve kterém byl její tvar také digitálně vyfrézován.

Horní část lavičky byla vytvořena ve dvou krocích. Nejdříve se na podkladní desce vytiskl vnější obrys a obrysy otvorů lavičky. Potom se do pro-

9 Výpočtový model konstrukce 10 Výpočtový model lavičky 11 Příčný řez žebrem 12 Betonářská výztuž vložená do U-průřezu 13 Komplettní žebra 14 Montážní díly 15 Spojení žeber 16 Forma hlavice 17 Hlavice 18 Konstrukce lavičky: a) půdorys, b) spodní část 19 Montáž konstrukce 9 Analytical model of the structure 10 Analytical model of the bench 11 Rib's cross-section 12 Reinforcing steel inserted into the U section 13 Complete ribs 14 Assembly parts 15 Ribs' connections 16 Capitals' formwork 17 Capitals 18 Bench's structure: a) plan, b) lower part 19 Structure assembly

19





20

Literatura:

- [1] NERVI, P. L. *Aesthetics and Technology in Buildings*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1964.
- [2] HALPERN, A. B., BILLINGTON, D. P., ADRIAENSENS, S. The Ribbed Floor Slabs of Pier Luigi Nervi. In: *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS): Beyond the Limits of Man*. Wrocław, 2013.
- [3] FRAMPTON, K., DREW, P. *Harry Seidler: Four Decades of Architecture*. London: Thames and Hudson Ltd., 1992.
- [4] COUFAL, A., KALNÝ, M., KOLÍSKO, J., VÍTEK, J. L. *Technická pravidla ČBS 07: Ultra vysokohodnotný beton*. Praha: Česká betonářská společnost, 2022.



21

20 Osvětlení žeber 21 Zastávka, jejíž technické řešení vychází z přírodních principů
20 Ribs' lighting 21 Tram stop, whose technical design is based on natural principles

storu mezi otvory vložila betonářská výztuž a prostor se vyplnil UHPC. Následně se obě části spojily epoxidovým lepidlem a hmoždinkami.

Ověření únosnosti dílčích prvků (žebra, náběhy, sprážený sloup) bylo provedeno v souladu s TP ČBS 07 [4]. Pro posouzení byla uvažována směs mající charakteristickou pevnost v tlaku 110 MPa (C110) a pevnost v tahu 8 MPa. Tahová únosnost byla uvažována jen pro UHPC s ocelovými drátky a betonářskou výztuží. Pro tlakové namáhání bylo uvažováno zapojení UHPC u všech prvků.

Realizace

Zastávka byla postavena na podzim roku 2022. Po provedení přípravy pro konstrukci byly osazeny sloupy a uložena lavička. Následovalo osazení hlavic a přivaření hlavicových plechů.

Pro montáž střešní konstrukce byla smontována lehká skruž, na kterou byly jednotlivé díly střešní konstrukce osazeny (obr. 19). Po svaření betonářské výztuže spojů a navaření výztuže žeber na hlavicové plechy byl prostor mezi stěnami žeber vybetonován. Následovalo zrušení montážních podpěr, osazení střechy z plexiskla, LED osvětlení (obr. 20) a dokončovací práce.

Závěr

Zastávka je elegantní, zajímavá a nevšední (obr. 21). Přírodní principy byly základem pro vytvoření struktury, která je v souladu s okolím, jež nepřehlazuje, ale doplňuje.

Konstrukce vznikla příkladnou spoluprací výtvarníků, konstruktérů a technologů, kteří se vzájemně respektovali.



Ing. Jan Nováček, Ph.D.
Stráský, Hustý a partneři s.r.o.
j.novacek@shp.eu



Ing. Petr Tomečka
Fakulta stavební VUT v Brně, ÚBZK
& Stráský, Hustý a partneři s.r.o.
p.tomecka@shp.eu



prof. Ing. Jiří Stráský, DSc.
Fakulta stavební VUT v Brně, ÚBZK
& Stráský, Hustý a partneři s.r.o.
j.strasky@shp.eu



MgA. Federico Díaz
So Concrete a.s.
fd@so-concrete.com



Ing. arch. MgA. Dmitrij Nikitin
So Concrete a.s.
dn@so-concrete.com



MgA. Závěš Unzeitig
So Concrete a.s.
zu@so-concrete.com