

CEMENTO-PLETENÉ BEDNĚNÍ

Martin Salák, *

Department of Concrete and Masonry Structures, Faculty of Civil Engineering,
Czech Technical University in Prague, Thakurova 7/2077, 166 29 Prague 6, Czech Republic.
martin.salak@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Díky povaze betonu můžeme tvarovat betonové a železobetonové konstrukce do téměř libovolných tvarů, a vytvářet tak efektivní a architektonicky neobvyklé konstrukce. Hlavní problém výstavby neobvykle tvarovaných konstrukcí je však cena a čas spojený s výstavbou, konkrétně bedněním. Článek se zaměřuje na pletené membránové bednění jakožto řešení tohoto problému. Pletení může být využito k vytvoření nerovinných tvarů za pomoci numericky ovládaných pletacích strojů. Díky nerovinnému 3D tvaru pleteniny ji stačí vypnout pomocí menšího množství kabelů, než klasické rovinné membrány. Dodatečné deformaci pod tíhou betonové směsi je zabráněno aplikací tenké cementové vrstvy, jež převezme statickou funkci pleteniny a ponese tíhu čerstvé betonové směsi. Takto je vytvořena technologie pro výstavbu bednění neobvyklých tvarů, která je rychlejší, šetrnější i levnější než například klasický proces obrábění polystyrenu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton • Křivočaré konstrukce • Membránové bednění • Pletené bednění

ABSTRACT

Concrete can be shape into any shape, therefore it can be used to create structurally efficient and architectonically unique structures. However, the bottleneck of the process construction of these structures is the price and time needed for formwork construction. The article focuses on knitted membrane formwork as a solution to the problem. Knitted fabric can be created in any 3D nondevelopable shape without seams using knitting machines. The 3D shape is ready to be prestressed to gain its prescribed shape. Then the fabric is coated with thin layer of cement to stop any further deformation of the membrane under the load of fresh concrete creating functional, faster and cheaper solution for complex formwork.

KEYWORDS

Concrete • Nondevelopable structure • Membrane formwork • Knitted formwork

1. ÚVOD

Beton je nejpoužívanější stavební materiál na světě. "Tekutá" směs může být z pravidla tvarována do téměř libovolného tvaru. Tím pádem je možné dosáhnout nejen vysokých architektonických kvalit ale i těch strukturálních, kdy dobrou alokací materiálu na základě působícího zatížení lze dosáhnout subtilnějších, efektivnějších konstrukcí. Jak je však vidět na obrázku 1, největší náklady pro složitěji

tvarované konstrukce s sebou nese výstavba, a to především materiál a práce spojená s bedněním. (Schipper & Grünewald 2014)

Samotné bednění s prací spojenou s jeho výstavbou může tvořit přes 80% nákladů na výstavbu dvojitě zakřivených prvků. Obvyklý postup výstavby takovéto konstrukce je využití strojově obráběného polystyrenu. Takové řešení je však velmi drahé, zdlouhavé a vytváří značné množství odpadu. V současnosti je vyvíjeno několik způsobů, jak efektivně vyrábět složité betonové prvky:

- Aditivní technologie, jako je 3D tisk. Lze tisknout bednění či samotnou konstrukci bez potřeby bednicích prvků. (*3D formwork for lightweight* n.d.) (Jipa et al. 2018)
- Obrábění materiálu. (Gericke et al. 2016) (Adriaenssens et al. 2014)
- Opakovatelné bednění s proměnlivým tvarem. (*Adapa* n.d.) (Lloret Fritschi et al. 2017)
- Užití výztuže jako ztracené bednění. (Hack et al. 2017)
- Membránové bednění, která používá velmi malé množství materiálu.

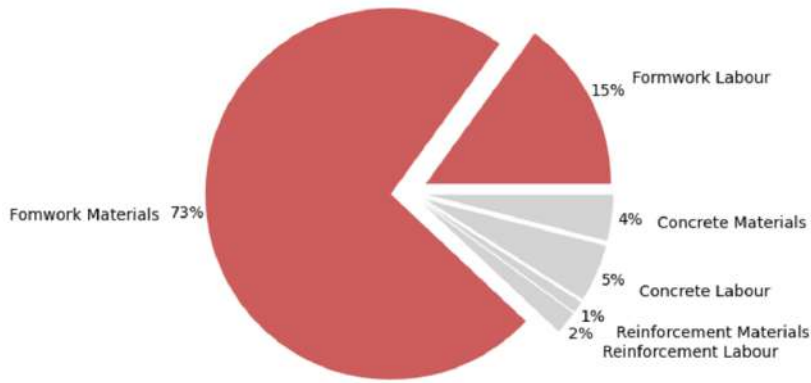
Všechny možnosti mají své výhody a nevýhody. V tomto článku bude podrobněji rozebrána poslední možnost, tedy membránové bednění.

2. MEMBRÁNOVÉ BEDNĚNÍ

Bednění je z pravidla dočasná konstrukce, která má jedinou úlohu, a tou je podporovat betonovou konstrukci od doby aplikace čerstvé směsi do odbednění. Tu plní řádově dny, poté je rozebrána. Pro klasické konstrukce je možné použít systémové bednicí prvky, které lze opakovaně použít, to však není možné pro konstrukce expresivních tvarů.

Jedny z neefektivnějších konstrukcí jsou membránové konstrukce. Ty jsou za využití malého množství materiálu schopny překlenout velké rozměry. Jejich efektivita je však vyvážena jinými nedostatky: velkou náročností na ukoovení konstrukce a nutnost vnesení předpětí pro získání únosnosti. Předpětí je možné vnést například tlakem vzduchu (obrázek 2 - A), nebo vypnutím do rámu (obrázek 2 - B). Vypnutá konstrukce musí být tažena vždy ve dvou směrech působících proti sobě, aby byla dosažena strukturální únosnost membrány. Konstrukce musí mít zápornou Gaussovu křivost, tedy hlavní křivosti musí být s opačnými znaménky. Tyto tvary jsou obvykle nejnáročnější k vytváření z běžných materiálů.

* Supervisor: prof. Ing. Petr Štemberk, Ph.D., D.Eng.



Obr. 1: Rozložení nákladů na dvojitě zakřiveném betonovém prvku



Obr. 2: Vnesení předpětí do membrány

Vypnout membránu do požadovaného tvaru je náročný proces. Tvorba složitějšího tvaru může vyžadovat velký počet předpínacích lan a zdoluhavý iterační proces. Musí být brán v potaz nejen účinek jednotlivých kabelů na sebe navzájem, ale i následné zatížení betonovou směsí. Těmto obtížím lze však předcházet.

2.1. Strojové pletení

Využívat rovinnou membránu vyžaduje mnoho práce, jak bylo popsáno výše. Lze však použít nerovinnou membránu ve tvaru požadované konstrukce, a tím pádem omezit velké množství nutných předpínacích kabelů pro dosažení požadovaného tvaru.

Strojové pletení lze využít pro vytváření bezešvých tvarově kreativních membrán. Moderní stroje dokáží uplést velmi složité, do roviny nerozložitelné tvary, které by bylo velmi náročné vyrobit jiným způsobem. Kromě tvarů existuje možnost kombinovat různé materiály příze, nebo vytvářet kanály či kapsy. Kanály mohou sloužit k upevnění předpínacích kabelů, a tím dále snížit pracnost stavebního procesu.

Pletací stroje dokáží uplést teoreticky nekonečně dlouhou látku, jsou však omezeny svou šířkou, což se dá vyřešit sešitím pruhů látky. Náročnou částí návrhu strojově pleteného bednění je vytvoření pletacího vzoru z daného 3D tvaru. Pletací stroje jsou designované pro opakující se procesy zadávané pomocí 2D pletacího vzoru. Kvalitní, automatické vytvoření takového vzoru je stále součástí výzkumů. (Popescu 2019)



Obr. 3: Pletací stroj v procesu pletení bezešvého svetry

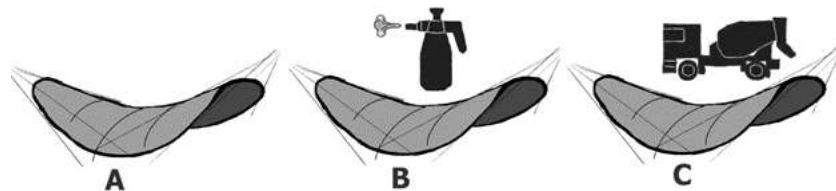
2.2. Hledání tvaru

Membrána nemá žádnou vlastní ohybovou tuhost, žádný vlastní tvar. Pro dosažení těchto vlastností je ji třeba předepnout. Pro předpovězení výsledného tvaru předpjaté membrány lze použít matematických modelů, jako například dynamické relaxace. Ta, statickou úlohu formuluje jako dynamickou. Následně ji řeší v jednotlivých krocích a snaží se dosáhnout rovnosti sil, kdy je dosaženo přirozeného tvaru konstrukce. Ten je dosažen za pomoci minimalizace potenciální energie systému. Tato metoda je přímou aplikací Newtonova druhého zákona $F = M * a$. Pokud je konstrukce diskretizovaná do bodu a je zavedena viskózní tuhost, pak lze dynamickou relaxaci definovat takto: (Rombouts et al. 2019)

$$R_{ix}^t = M_{ix} \times \dot{V}_{ix}^t + C_i \times V_{ix}^t \quad (1)$$

kde:

R_{ix}^t je zbytková síla v čase t , ve směru x a bodě i
 M_{ix} je hmotnost v bodě i , působící ve směru x
 \dot{V}_{ix}^t je zrychlení v čase t , směru x a bodě i



Obr. 4: Proces výstavby - vypnutí konstrukce (A), nanesení tenké cementové vrstvy (B), betonáž (C)

C_i je viskózní tlumení v bodě i , ve směru x
 V_{ix}^t je rychlost v čase t , ve směru x a v bodě i

3. NANÁŠENÍ CEMENTOVÉ SMĚSI

Zatížení membrány čerstvou betonovou směsí způsobuje další deformaci konstrukce. Tato skutečnost může být minimalizována postupným pokrýváním pleteniny tenkou vrstvou cementové směsi, která ji zatíží jen minimálně, a tak co nejdříve odebrat nosnou funkci poddajné membráně. Takto lze vytvořit tenkostěnnou skořepinu, která dále ponese zatížení konstrukční betonové vrstvy. Postup je znázorněn na obrázku 4, nejdříve je konstrukce předepnuta do požadovaného tvaru (A), poté je nanesena tenká vrstva cementové směsi (B) a nakonec probíhá samotná betonáž (C). Tímto postupem prakticky odebíráme membráně nosnou funkci, lze tak prakticky bez omezení soustředit vlastnosti membrány na vytvoření požadovaného tvaru.

Tloušťka první nanesené vrstvy se odvíjí od tvaru konstrukce, jelikož únosnost tenké skořepiny je funkcí její geometrie: křivost konstrukce určuje její únosnost. (Iskhakov & Ribakov 2015)

Tento přístup umožňuje další postupy výstavby. Bednění lze rozdělit na menší části (například podle šířky pletacího stroje), předepnout a pokrýt tenkou cementovou vrstvou ve výrobě a na stavbu lze přivést tak již hotové díly bednění. Tím lze odebrat stavbu mohutného rámu nutného pro předepnutí membrány na staveništi.

Tenkostěnné bednění musí překonat vnitřní pnutí spojené se zráním a smršťováním cementové směsi. Vysoký poměr plochy a objemu bednění spolu s expresivními tvary konstrukce umocňují vliv vysychání. Tahovou pevnost v průběhu tuhnutí betonu lze obecně vyjádřit takto: (Stemberk 2003)

$$f_{ctm}(t) = \left(\frac{a_2 \left(\frac{t_i}{a_3} \right)^{a_4}}{a_5 + a_2 \left(\frac{t_i}{a_3} \right)^{a_4}} \right)^{a_6} \quad (2)$$

kde:

a_i jsou konstanty popisující vlastnosti cementu

$f_{ctm}(t)$ je střední hodnota tahové pevnosti v závislosti na čase

t_i je čas v hodinách

4. VÝSLEDKY

K prvotním testům pletného bednění dochází ve dvou variantách, z rovné látky a z látky připravené na stroji ve finálním tvaru.

První varianta z rovné látky je zobrazena na obrázku 6 je tvořena ručně pletenou pleteninou o rozměrech cca 15x25 cm. Je následně vypnuta do rámu. Jelikož pro roztažení pleteniny do výsledného tvaru je potřeba na různých místech více napnout než na jiných,

mají hodnoty předpětí velké rozdíly.

Druhou variantou je strojově vyráběná pletenina upletená již v požadovaném tvaru. Nejprve byl vyroben 3D model který byl následně převeden do 2D pletacího vzoru. Vzor je zadávacím vstupem pro pletací stroj. Na obrázku můžete vidět první výsledek prvního pokusu strojového pletení.



Obr. 5: Ručně pletená pletenina



Obr. 6: Vypnutí pleteniny do rámu



Obr. 7: První pokus strojově pletného prvku

5. ZÁVĚR

Pletací stroje dokáží uplést komplexní tvary včetně tunelů pro předpínací kabely. To šetří čas a materiál v porovnání s běžnými způ-

soby výstavby dvojité zakřivených skořepin. Strojově pletené bednění stačí po upletení vypnout do rámu. Pletenina zaujme svůj požadovaný tvar snadno, jelikož byla přesně k tomuto tvaru vyrobená. Další změny tvaru jsou minimalizovány nanášením tenké cementové vrstvy. Takto vytvořená tenká skořepina slouží jako ztracené bednění pro samotnou konstrukci.

Tenkostevé cemento-pletané bednění zjednodušuje kritický krok ve výstavbě dvojité zakřivených skořepin, kterým je výstavba bednění. Strojově pletení umožňuje vytvářet pletené membrány pro nerozložitelné tvary bez složitých sešívání. Tenká cementová vrstva zaručuje udržení originálního tvaru bednění, vytváří extrémně tenkou skořepinu, která odolává zatížení cementové směsi.

ACKNOWLEDGEMENTS

Úvodní testování strojního pletení bylo provedeno firmou Knit-
Tex CS díky paní jednatelce Heleně Fišerové.

References

- 3D formwork for lightweight* (n.d.), [online].
URL: <https://www.voxeljet.com/3d-printing-solution/architectur-and-construction/>
- Adapa* (n.d.), [online].
URL: <https://adapa.dk/portfolio-item/adaptive-mould-d300-2/>
- Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D. & Williams, C. (2014), *Shell structures for architecture: form finding and optimization*, Routledge.
- Gericke, O., Kovaleva, D., Haase, W. & Sobek, W. (2016), Fabrication of concrete parts using a frozen sand formwork, in 'Proceedings of IASS Annual Symposia', Vol. 2016, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), pp. 1–10.
- Hack, N., Wangler, T., Mata-Falcón, J., Dörfler, K., Kumar, N., Walzer, A. N., Graser, K., Reiter, L., Richner, H., Buchli, J. et al. (2017), Mesh mould: an on site, robotically fabricated, functional formwork, in 'Second Concrete Innovation Conference (2nd CIC), Paper', number 19.
- Iskhakov, I. & Ribakov, Y. (2015), *Design principles and analysis of thin concrete shells, domes and folders*, CRC Press.
- Jipa, A., Bernhard, M. & Dillenburger, B. (2018), Submillimeter formwork: 3d-printed plastic formwork for concrete elements, in 'TxA 78th Annual Conference and Design Expo (TxA 2017)'.
- Lloret Fritschi, E., Reiter, L., Wangler, T., Gramazio, F., Kohler, M. & Flatt, R. J. (2017), 'Smart dynamic casting: slipforming with flexible formwork-inline measurement and control', *HPC/CIC Tromsø 2017* pp. Paper-no.
- Popescu, M. A. (2019), KnitCrete: Stay-in-place knitted formworks for complex concrete structures, PhD thesis, ETH Zurich.
- Rombouts, J., Lombaert, G., De Laet, L. & Schevenels, M. (2019), 'A fast and accurate dynamic relaxation approach for form-finding and analysis of bending-active structures', *International Journal of Space Structures* **34**(1-2), 40–53.
- Schipper, H. & Grünwald, S. (2014), Efficient material use through smart flexible formwork method, in 'ECO-Crete: International Symposium on Environmentally Friendly Concrete, Reykjavik, Iceland, 13-15 August 2014'.
- Stemberk, P. (2003), Evolutionary material model of hardening concrete under uniaxial loading, PhD thesis, .