

PLETENÉ BEDNĚNÍ PRO ANTIKLASTICKÉ SKOŘEPINY

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

Článek popisuje užití pleteného membránového bednění jako levnější a ekologičtější variantu ke klasickým technologiím. Popisuje rozdíly mezi použitím rovinné pleteniny a strojově upletené 3D nerovinné varianty.

Dále se článek zabývá vlastnostmi pleteniny, které byly získány z praktických zkoušek a to pro samotná vlákna, tak i pro celou pleteninu ve dvou směrech.

Následně je popsán praktický pokus v malém měřítku ve kterém je pletenina vypnuta do požadovaného tvaru a zatížena čerstvou směsí. Celý pokus je fotogrametricky dokumentován.

Závěrem je v článku popsán numerický model pleteniny, podle zjištění popsaných výše. Model bere v potaz postupné zatěžování celé konstrukce.

KLÍČOVÁ SLOVA

pletené bednění • dvojité zakřivené konstrukce • skořepina • beton • membrána

ABSTRACT

The article discusses how knitted membrane formwork can be a cheaper and more eco-friendly option compared to traditional methods. It explores the differences between using flat knitting and machine-knitted 3D non-flat variants.

It also delves into the fabric's properties, obtained through practical tests, for both individual fibers and the entire fabric in two directions.

Next, it describes a small-scale practical experiment where the fabric is stretched into the desired shape and loaded with fresh mix, all documented through photogrammetry.

Finally, it outlines a numerical model of the fabric, considering the findings discussed earlier and accounting for the progressive loading of the entire structure.

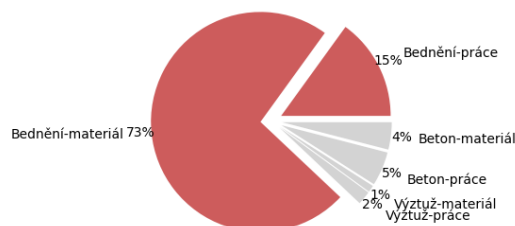
KEYWORDS

concrete • knitted formwork • thin shell • membrane • double curvature

1. ÚVOD

Beton je nejpoužívanější stavební materiál na světě. "Tekutá" směs může být 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 složitější

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



Obr. 1: Rozložení nákladů na dvojité zakřiveném betonovém prvku

Samotné bednění s prací spojenou s jeho výstavbou může tvořit přes 80% nákladů na výstavbu dvojité zakřivených prvků. Obvyklý postup výstavby takovéto konstrukce je využití strojově obráběného polystyrenu. Takové řešení je však velmi drahé, zdlouhavé a vytváří značné množství odpadu.

1.1. Složitost tvaru

K popsání složitosti tvaru nám může sloužit Gaussova křivost. Ta je rovna násobku křivosti ve dvou hlavních směrech. Pokud je rovna 0, může se jednat o rovinu nebo například tvar klenby. Ta je křivá pouze v jednom směru a ve druhém je rovná. Klenba je relativně jednoduchý tvar, lze například vytvarovat pouhým ohnutím papíru.

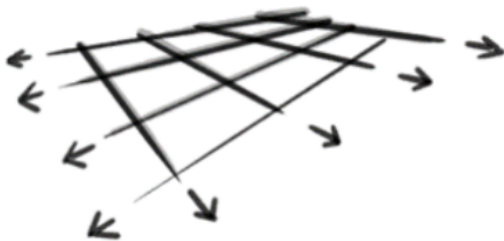
Dále máme kopule jenž mají Gaussovu křivost kladnou. Poslední variantou je záporná Gaussova křivost, jež značí křivost opačných znamének v hlavních směrech. Jako příklad lze uvést tvar sedla (parabolický hyperboloid).

1.2. Membránové bednění

Jak bylo zmíněno, dvojité zakřivené konstrukce jsou nejnáročnějšími na pracnost. Pro konstrukce se zápornou Gaussovu křivostí můžeme využít membrány. Ty musejí být předepnuty ve dvou směrech působících proti sobě (viz obrázek 2), aby získaly tvarovou stálost.

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

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



Obr. 2: Vypnutí membrány

1.3. Pletené bednění

Membrána může být vyrobena z různých materiálů, pletenina však nabízí nespočet výhod vyplývajících nejen z možností strojového pletení:

- Vysoká míra elasticity dovoluje užití rovinné membrány i pro složitější tvary
- Lze uplést přímo do daného 3D nerovinného tvaru
- Dovoluje upletení kapes či kanálků pro předpínací kabely
- Vysoká variabilita vláken pro pletení ovlivňující výslednou tuhost

2. MEMBRÁNA A JEJÍ VÝPOČET

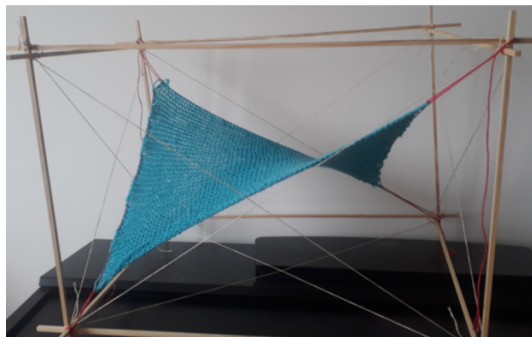
Tato kapitola popisuje možnosti a překážky v postupu návrhu skořepiny betonované do pleteného bednění.

2.1. Volba pleteniny

Postup návrhu se odvíjí od toho, zda pletenina bude rovinná, nebo již upletená v určitém tvaru.

2.1.1. Rovinná pletenina

Jednodušší z variant je použití rovinné pleteniny. Ta lze, díky její pružnosti, vypnout do požadovaného tvaru. Na obrázku 3 je znázorněna rovinná pletenina přibližných rozměrů 10x10 cm vypnutá do tvaru hyperbolického paraboloidu. Ne všechny látky nebo pleteniny je možné vypnout do takového, dvojité zakřiveného tvaru. Podle jejich tuhosti v tahu se buď roztáhnou do požadovaného tvaru, nebo se zkrabatí. Pro složitější tvary je pak nutné sešívát části dohromady.



Obr. 3: Rovinná pletenina vypnutá do nerovinného tvaru

2.1.2. 3D pletenina

Na pletacím stroji lze uplést nerovinný tvar, který bude přirozeně zaujímat předem daný tvar. Lze tak vytvořit složitější tvary než s rovinnou pleteninou bez nutnosti sešívání. Zároveň je možné uplést vícevrstvou pleteninu, dovolující umístění například kanálů pro předpínací kabely, a tím zmenšit jejich počet a celkově snížit obtížnost provádění.

Na obrázku 4 je ručně pletená pletenina. I bez předpětí, sama od sebe zaujímá tvar podobný sedlu, tvar který nelze vytvarovat z rovné látky, aniž by se natahovala či krabatila.



Obr. 4: Ručně pletená 3D pletenina

Ač je 3D pletenina lákavým a v mnoha případech velmi zjednodušujícím pomocníkem, provází ji také mnoho překážek. I když jde uplést prakticky jakýkoli možný tvar, tak zadání daného tvaru pletacímu stroji není plně automatizované a vyžaduje zkušeného pletaře. V současnosti se však zlepšují možnosti automatizace (Popescu 2019). Dále vyžaduje vysokou počáteční investici, profesionální pletací stroj schopný využít výše popsané možnosti stojí v řádech milionů korun.

Proto se zbytek článku věnuje především rovinným pleteninám.

2.2. Metody výpočtu

At' už se jedná o rovinnou či 3D tvarovanou pleteninu, je třeba navrhnut předpínací síly v kabelech formujících předpětí pleteniny a její případnou deformaci po zatížení betonovou vrstvou.

K zjištění finálního tvaru předpjeté, případně i zatížené membrány lze využít dostupného softwaru. Mezi běžně používané lze zařadit plugin Kangaroo do prostředí Rhino (*Kangaroo documentation* n.d.) nebo například form finding addon pro Dlubal RFEM (*DLubal RFEM Form Finding* n.d.).

Tyto programy používají různé matematické postupy k nalezení tvaru vypnuté membrány, mezi tyto patří například:

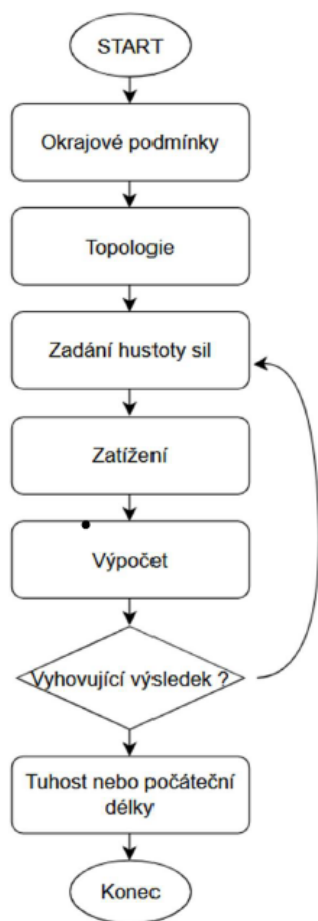
- Metoda hustoty sil
- Dynamická relaxace
- Analýza tažených sítí (Thrust network analysis)
- Systémy částice-pružina (particle-spring)

Pro další postup byla vybrána ručně naprogramovaná metoda hustoty sil, kvůli její jednoduchosti.

2.3. Hledání vypnutého tvaru metodou hustoty sil

Ve své lineární podobě odebírá metoda hustoty sil nutnost iterovat a řeší pouze lineární soustavu rovnic která pro předem daný poměr

hustoty sil zavedených jako poměr síly a protažené délky prutu. Tyto hustoty sil, jsou ale nutné zadat ručně. Diagram pro tuto metodu je znázorněn na obrázku 5. Výsledkem tohoto výpočtu je jeden konkrétní tvar odpovídající zadaným hustotám sil.



Obr. 5: Vývojový diagram lineární metody hustoty sil

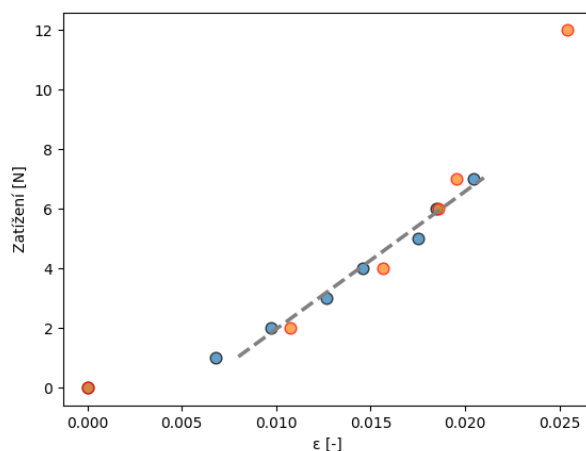
Abychom však mohli správně navrhnout předpínací síly a ověřit výsledný tvar, je třeba znát vlastnosti pleteniny.

3. VLASTNOSTI PLETENINY

Pro zmenšený model byla zvolena rovinná pletenina upletená na ručním pletacím stroji. Vlákno pleteniny je ze 100% bavlna TEX 50x3. Pro zjištění vlastností samotného vlákna i výsledné pleteniny byly provedeny jednoduché zatěžovací zkoušky v domácím prostředí zavěšením kusu materiálu a zatížením závaží při měření deformace.

Na obrázku 6 je znázorněn pracovní diagram jednoho vlákna. Byly provedeny dva zatěžovací testy na dvou vláknech délky cca 1 m. Dva různé testy jsou odděleny barvami. Modul pružnosti vlákna je naznačen čárkovaně a je vypočten jako lineární regrese metodou nejmenších čtverců všech bodů vyjma bodů okrajových. K přetrhnutí vlákna došlo při zatížení cca 30 N.

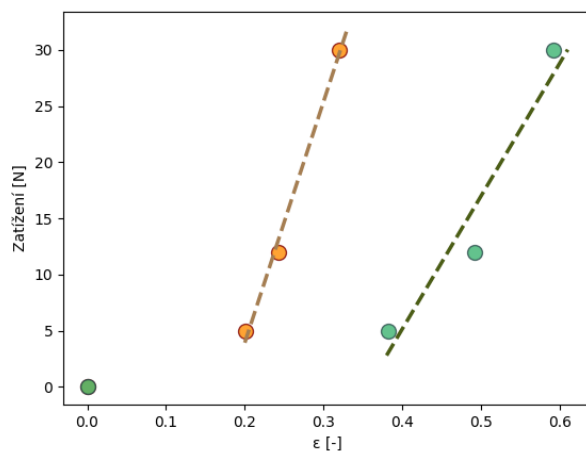
Kromě samotných vláken, byla otestována i pletenina a to ve dvou směrech. Na obrázku 7 jsou znázorněny pracovní diagramy pleteniny. Oranžové body byly naměřeny ve směru ok, tedy směrem kterým se plete. Zelené body byly naměřeny v kolmém směru -



Obr. 6: Naměřené deformace pro dané zatížení vláken

ve směru vláken. Pletenina byla měřena vždy v šířce cca 5 cm uprostřed rovného kusu pleteniny tak, aby okraje pleteniny, které mají jinou tuhost, nezkreslovali výsledky.

Z obrázku 7 vyplývá ortotropní chování pleteniny, kdy ve směru ok je pletenina cca 2x tužší.



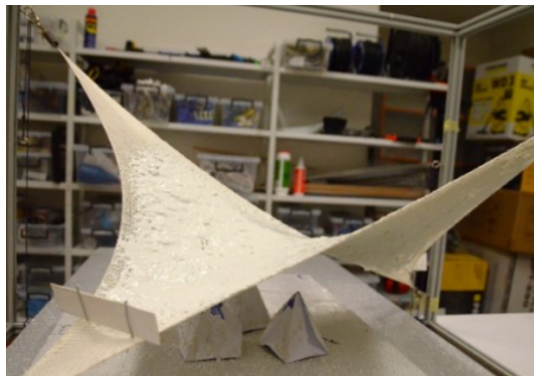
Obr. 7: Naměřené deformace pro dané zatížení pleteniny ve dvou směrech

4. PRAKTICKÝ POKUS

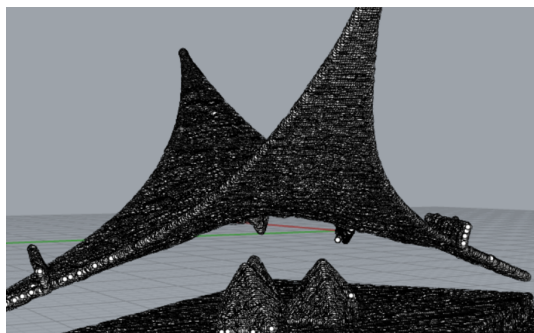
Byl vytvořen praktický pokus pro ověření numerického modelování. Do kvádru 80x60x60 cm byla vypnuta pletenina do tvaru hyperbolického paraboloidu. Následně byla zatížena cementovou směsí, která byla nanášena stříkáním na její povrch. Na obrázku 8 je zachycena čerstvá cementová směs na bedně. Pletenina byla před a po aplikaci cementové vrstvy fotogrametricky zaznamenána, tak aby reálný model šel porovnat s numerickými výsledky, na obrázku 9 je 3D model zatížené pleteniny.

Na obrázcích rovněž můžete vidět měřicí pyramidy pod pleteninou a zavěšený měřicí bod na pletenině. Ty slouží k reálnému

škálování a natočení vytvořených 3D modelů a zároveň jako možnost ručního měření jednoho konkrétního bodu pro verifikaci výsledků.



Obr. 8: Vypnutá pletenina zatížena čerstvou vrstvou cementové pasty



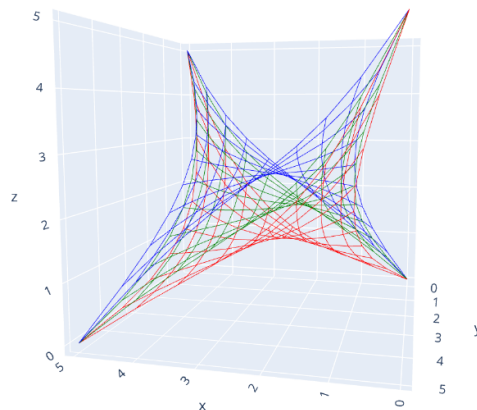
Obr. 9: 3D model zachycen metodou fotogrametrie

5. VÝSLEDKY

Pomocí naměřených hodnot a vizuálním porovnáním s vypnutou pleteninou byl vytvořen 3D model vypnuté pleteniny. Na obrázku 10 je model vytvořen metodou hustoty sil před zatížením (modrá) po nanesení cementové směsi na půlku membrány (zelená) a po nanesení směsi celoplošně (červená). Nejedná se o reálné hodnoty průhybů, v této fázi projektu byly pouze zadávány poměry tuhostí sil pleteniny, nejde tedy o přesný materiálový model.

6. DISKUZE

Již zmíněnou výhodou pleteniny užitě jako membránové bednění je možnost zmenšit počet předpínacích lan. Čím více však zmenšíme počet lan, tím bude tuhost samotného bednění menší. Při nižší tuhosti se dochází k větší deformaci konstrukce. S tím je nutné počítat při návrhu tvaru a zároveň i při návrhu betonáže - při delší betonáži na větší ploše může dojít již k částečnému ztuhnutí směsi aniž by byla směs aplikovaná na celou konstrukci. Při zatížení konstrukce v jedné části, dochází zpravidla k změně tvaru celé konstrukce, tím pádem hrozí porušení mladého, již ztuhnutého betonu.



Obr. 10: Numerický model před, při a po zatížení směsí

7. ZÁVĚR

Byly popsány výhody a nevýhody membránového bednění obecně, poté byly popsány vlastnosti pleteniny. Byly provedeny materiálové zkoušky samotných vláken, ze kterých se látka skládá, tak i již upletené pleteniny.

Dále byl popsán praktický pokus který slouží k verifikaci numerických výsledků, při kterém byla pletenina vypnuta a zatížena cementovou pastou.

Na základě předchozích zjištění byl vytvořen numerický model pleteniny, který bere v potaz průběh aplikace cementové směsi. A byla diskutována možnost zjednodušení výstavby použitím menšího počtu předpínacích lan a tím pádem měkčí membrány.

Poděkování

Poděkování patří Českému vysokému učení v Praze za finanční podporu v rámci projektu SGS24/041/OHK1/1T/11.

References

DLubal RFEM Form Finding (n.d.), [online].

URL: <https://www.dlubal.com/en/products/rfem-and-rstab-add-on-modules/tensile-membrane-structures/rf-form-finding>

Kangaroo documentation (n.d.), [online].

URL: <https://github.com/Dan-Piker/Kangaroo-Documentation/blob/master/Kangaroo242ReleaseNotes.pdf>

Popescu, M. A. (2019), KnitCrete: Stay-in-place knitted formworks for complex concrete structures, PhD thesis, ETH Zurich.

Schipper, H. & Grünewald, 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'.