VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

HLEDÁNÍ TVARU SKOŘEPINOVÝCH KONSTRUKCÍ

FORM FINDING OF SHELL STRUCTURES

KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

AUTOR PRÁCE Ing. Jiří Musil

VEDOUCÍ PRÁCE prof. Ing. JIŘÍ STRÁSKÝ, DSc.

BRNO 2017

KLÍČOVÁ SLOVA

Skořepinová konstrukce, betonová skořepina, hledání tvaru, statická analýza, membránový stav, výslednicový tvar, modelová podobnost, fyzikální experiment, 3D tisk, FDM.

KEYWORDS

Shell structure, concrete shell, form finding, static analysis, membrane state, resultant shape, model analogy, physical experiment, 3D printing, FDM.

DOKUMENT ULOŽEN V

Knihovnickém informačním centrum FAST VUT.

ISBN 80-214-
ISSN 1213-4198

© Ing. Jiří Musil

OBSAH

OBSAH 3

1. ÚVOD 5

2. POPIS SOUČASNÉHO STAVU 5

2.1. Historický vývoj 5
2.2. Experimentální tvary a vybrané Islerovy skořepiny 6

3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE 8

3.1. Základní principy návrhu tvaru 8
3.2. Studie tří skořepinových konstrukcí 8
3.3. Experimentální ověření návrhu skořepinové konstrukce 9

4. POPIS VÝPOČTOVÉHO PROGRAMU 9

5. MODELOVÁ PODOBNOST 9

6. PRINCIP METODY 10

6.1. Analytické řešení příkladu 10
6.2. Numerické řešení prutové konstrukce 10
6.3. Numerické řešení membránové konstrukce 12
6.4. Vyhodnocení 12
6.5. Válcová skořepina 12
6.6. Závěr 13

7. STUDIE SKOŘEPINY TYPU „BUCKELSCHALE“ 13

7.1. Nalezení tvaru skořepiny 13
7.2. Konstrukce uložená po obvodě 14
7.3. Konstrukce s předpjatým obvodovým trámem 14
7.4. Závěr 14

8. ČERPACÍ STANICE, DEITINGEN SÜD 15

8.1. Nalezení tvaru skořepiny 15
8.2. Konstrukce uložená neposuvně 17
8.3. Konstrukce s předpjatými táhly 17
8.4. Závěr 18

9. ZASTŘEŠENÍ SPORTOVNÍCH HAL A PLAVECKÝCH BAZÉNŮ 18

9.1. Odvození tvaru skořepiny z rovinné membrány 18
9.2. Odvození tvaru skořepiny z prostorové membrány 19
9.3. Napřímení delší hrany konstrukce – získání tvaru 20
9.4. Konstrukce uložená neposuvně 21

9.5. Konstrukce s předpjatými táhly 21
9.6. Závěr 22
10. FYZIKÁLNÍ MODEL KONSTRUKCE 23
10.1. Příprava 23
10.2. Model konstrukce 24
10.3. Realizace experimentu 25
10.4. Výsledky 25
10.5. Závěr 26
11. ZÁVĚR DISERTAČNÍ PRÁCE 27
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 28
ŽIVOTOPIS AUTORA 29
ABSTRACT 30

1. ÚVOD

Disertační práce se zabývá návrhem betonových skořepinových konstrukcí se zaměřením na hledání jejich optimálního tvaru. Optimálním tvarem se především rozumí tvar, při němž je tíha konstrukce přenášena do podpor téměř výhradně tlakovými normálovými silami. Současně konstrukce musí být navržena tak, aby vykazovala dostatečnou únosnost a stabilitu během celé doby životnosti pro všechna zatížení, kterým může být vystavena.

Inspirací pro tuto práci je činnost švýcarského inženýra Heinze Islera, který navrhoval tvary skořepinových konstrukcí na základě modelových zkoušek vhodně zatížených, ohybově netuhých membrán. Netuhá deska není schopna přenášet významné ohybové momenty ani posouvající síly a je transformována na membránovou konstrukci [1].

V této práci je prezentováno řešení výše zmíněných modelových zkoušek pomocí programu Midas Civil, který je založen na metodě konečných prvků.

V úvodu práce jsou zmíněny některé významné klenbové a skořepinové konstrukce, metody získání jejich tvaru a jsou zmíněny někteří významní stavitelé skořepin a některé realizace skořepinových konstrukcí z poslední doby.

Následně jsou na příkladu průvěsu lana demonstrovány základní principy metody numerického hledání tvaru skořepinových konstrukcí. Numericky nalezené tvary jsou porovnány s analytickým řešením a na jejich základě jsou navrženy skořepiny. Skořepiny jsou analyzovány a je popsáno jejich namáhání při zatížení vlastní tíhou.

V další části je zpracována studie tří zrealizovaných konstrukcí Heinze Islera. Ke každému numericky nalezenému tvaru je nadefinován materiál a tloušťka. Nejdříve je staticky analyzována konstrukce s dokonale tuhými podporami. Na základě získaných deformací a napětí pro jednotlivé kombinace zatížení je posuzována vhodnost návrhu konstrukce. Následně je analyzována a zhodnocena skořepinová konstrukce uložená pružně, to simuluje reálné chování podpor.

V závěru práce jsou získané deformace a napětí vybrané skořepiny experimentálně ověřeny na fyzikálním modelu v měřítku 1:55,56. Model je vytvořen technologií 3D tisku.

2. POPIS SOUČASNÉHO STAVU

2.1. HISTORICKÝ VÝVOJ

Použití konstrukcí se zakřivenými plochami není novou myšlenkou. Stavby se zděnými klenbami byly již ve starověku na velmi vysoké technické úrovni. Od této doby přicházejí s každým novým stavebním slohem nové typy kleneb. Mezi významné zaklenuté stavby starověku se řadí např. Atreova pokladnice v Mykénách, či Římský Pantheon. Významným technickým dílem je rovněž kupole chrámu svatého Petra ve Vatikánu z 16. a 17. století.

Výše zmíněné konstrukce byly na svoji dobu významným technickým počinem. Avšak o skořepinové konstrukce se v pravém smyslu slova nejedná, protože jsou schopny přenášet pouze tlaková napětí. První skořepinové konstrukce se začaly objevovat až s vynálezem cementu a železobetonu. Stavitelů skořepinových konstrukcí byla celá řada, mezi nejvýznamnější patří Franz Dishinger, Félix Candela a Heinz Isler. Protože předkládaná práce vychází z činnosti Heinze Islera, je modelovému vývoji a konstrukcím této osoby věnovaná samostatná kapitola.

Příkladem realizace z poslední doby je skořepina obchodního centra Centro Ovale ve Švýcarsku (obr. 2-1). Skořepina má tvar elipsoidu o rozměrech 92,8×51,8×22,5 m.

2.2. EXPERIMENTÁLNÍ TVARY A VYBRANÉ ISLEROVY SKOŘEPINY

Tvary skořepinových konstrukcí je možné např. rozdělit dle způsobu jejich získání na elementární geometrické tvary (např. válcové tvary nebo části kulových ploch), matematické tvary (např. hyperbolický paraboloid), volné tvary (nevychází ze statické funkce, ale z architektonických požadavků) a přírodní tvary (inspirované např. tvary živočichů, květů a rostlin) [3].

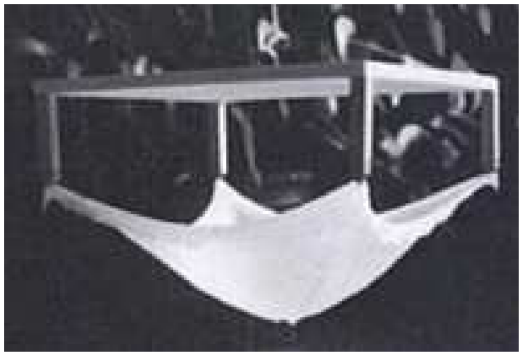
Jednou významnou skupinou jsou tzv. „experimentální“ tvary jimiž se zabýval švýcarský inženýr Heinz Isler, který se většinu svého profesního života zabýval výstavbou, modelovým vývojem a ověřováním skořepinových konstrukcí. Během své projekční praxe zrealizoval více než 1500 skořepinových konstrukcí [4].

2.2.1. Modelový vývoj tvarů

Zavěšené tvary

Zavěšené tvary (obr. 2-2) byly vytvářeny pomocí zavěšené tkaniny nasycené vodou. Tkanina byla zavěšena v místě budoucích podpor skořepinové konstrukce, vzhledem k téměř nulové ohybové tuhosti se zdeformovala do výslednicového tvaru. Následně se tkanina nechala zmrznout. Inverzí výsledného tvaru byl získán přesný model skořepiny [4].

Obr. 2-1 *Skořepina OC Centro Ovale [2]*



Obr. 2-2 *Modelové získání tvaru konstrukce pomocí zavěšené tkaniny [5]*

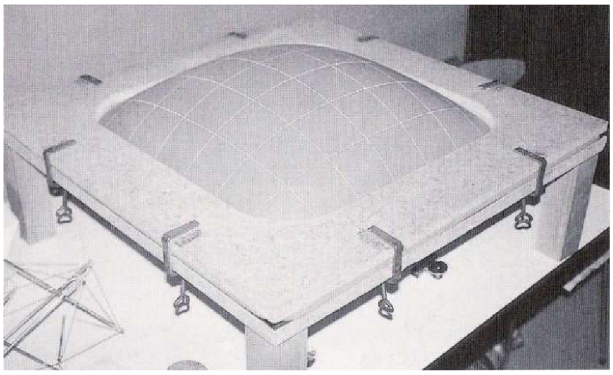
Pneumatické tvary

Pneumatické tvary (obr. 2-3) byly získávány pomocí nafouknuté gumové membrány, která byla upnuta do tuhého rámu. Gumová membrána není schopna přenášet ohybové momenty ani tlaková namáhání, nýbrž je namáhána pouze tahem. Výsledný tvar byl zaznamenán a použit pro návrh skořepinových konstrukcí [4].

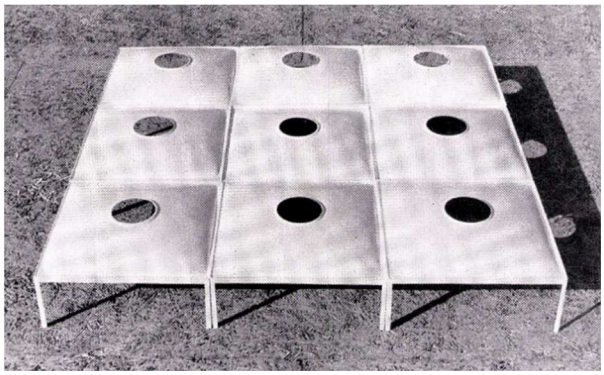
2.2.2. Skořepinové konstrukce

„Buckelschale“

Jednalo se o skořepinu navrženou na základě pneumatické zkoušky. Všesměrně zakřivená plochá skořepina je umístěna nad čtvercovým či obdélníkovým půdorysem. Skořepina je vetknutá do předpjatého obvodového nosníku, který je uložen na čtyřech rohových sloupech. Takto vyvinutá konstrukce nabízela minimálně 400 m^2 volné dispozice. Další možností využití bylo spojení několika elementů pro zastřešení rozsáhlých ploch (obr. 2-4) [8].



Obr. 2-3 *Modelové získání tvaru pomocí gumové membrány[6]*



Obr. 2-4 *Model skořepiny Heinze Islera „Buckleschale“ [7]*

Čerpací stanice Deitingen Süd

Skořepina zastřešuje čerpací stanici u dálnice N1 nedaleko městečka Deitingen (obr. 2-5). Zastřešení je tvořeno dvěma rovnoramennými trojúhelníkovými skořepinami situovanými po obou stranách servisní budovy. Skořepiny převážně tloušťky 90 mm vytvářejí nad trojúhelníkovým půdorysem 26×31,6 m plochu dvojí křivosti, která jim dává dostatečnou únosnost a stabilitu. Dominantní vodorovné reakce vrcholů skořepin jsou zachyceny předpjatými táhly kotvenými v servisní budově.

Zastřešení sportovních hal a plaveckých bazénů

Pro zastřešení sportovních hal a plaveckých bazénů vyvinul Heinz Isler skořepinu dvojí křivosti nad protáhlým obdélníkem. Výhodou této skořepiny byla její lehkost a vzdušnost (obr. 2-6), na rozdíl od obvyklého řešení, kterým byl návrh konstrukce jednoduché křivosti se ztužujícím okrajovým nosníkem. Konstrukce je založena na patkách, které jsou vzájemně spojeny předpjatými táhly [4].

Obr. 2-5 *Čerpací stanice Deitingen Süd, Švýcarsko [9]*

Obr. 2-6 *Tenisová hala v Düdingenu – postupná výstavba [4]*

3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Tématem disertační práce jsou betonové skořepinové konstrukce se zaměřením na numerický návrh jejich tvaru pomocí deformace membrány. Cílem práce je, prostřednictvím názorných příkladů, popsat a ověřit metodu numerického návrhu tvaru skořepinové konstrukce. Toho je dosaženo zpracováním úloh popsaných v kapitole 3.1 až 3.3.

3.1. ZÁKLADNÍ PRINCIPY NÁVRHU TVARU

Pro ověření a popis základních principů numerické metody nalezení výslednicového tvaru je využito známého vztahu mezi tvarem zavěšeného řetězu a inverzním tvarem oblouku, který je při zatížení vlastní tíhou namáhán pouze tlakem.

Ověření a popis základních principů metody bude provedeno na názorném příkladu, zpracováním těchto úloh:

- nalezení analyticky definovaného tvaru průvěsové křivky lana,
- numerické nalezení tvaru průvěsu ohybově netuhého prutu,
- numerické nalezení tvaru průvěsu ohybově netuhé plochy,
- porovnání jednotlivých variant průvěsových křivek (ploch),
- na základě numericky nalezených tvarů budou navrženy skořepinové konstrukce modelované prutem a deskostěnou a bude zhodnoceno jejich působení ve vztahu k membránovému působení.

3.2. STUDIE TŘÍ SKOŘEPINOVÝCH KONSTRUKCÍ

Pro potvrzení základních principů metody a pro zmapování specifik spojených s návrhem tvaru skořepin dvojí křivosti budou studovány tři typy skořepinových konstrukcí popsaných v kapitole 2.2.2.

Požadavky na každý ze tří návrhů a analýz skořepin lze shrnout do těchto bodů:

- iterativní hledání výslednicového tvaru pomocí vhodných MKP modelů,

- návrh a statická analýza konstrukce s ideálními okrajovými podmínkami,
- návrh a podrobná statická analýza konstrukce s „reálnými“ okrajovými podmínkami, vč. zohlednění reologie konstrukce,
- zhodnocení návrhu a popis rozhodujících vnitřních sil a deformací.

3.3. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ NÁVRHU SKOŘEPINOVÉ KONSTRUKCE

Pro ověření platnosti numerických výpočtů a MKP metody návrhu tvaru bude experimentálně ověřeno statické působení jedné studované konstrukce.

Požadavky na přípravu, provádění a vyhodnocení modelové zkoušky lze shrnout do těchto bodů:

- technologie výstavby umožní zrealizovat model s dostatečnou přesností,
- materiál modelu bude dostatečně pevný,
- model a ekvivalentní zatížení bude navrženo dle *teorie modelové podobnosti*,
- parametry *modelové podobnosti* budou voleny tak, aby ze zatěžovací zkoušky byly získány relativně přesné výsledky a současně aby se statické působení modelu příliš neodlišovalo od statického působení konstrukce,
- při dosažení definovaných kombinací zatížení během zatěžovací zkoušky bude měřena odezva konstrukce (deformace a poměrná přetvoření),
- budou porovnány naměřené hodnoty a výsledky MKP analýzy.

4. POPIS VÝPOČTOVÉHO PROGRAMU

Pro návrh tvaru skořepinových konstrukcí a jejich statickou analýzu je použit program Midas Civil 2016, který je založen na metodě konečných prvků. Jedná se o jeden z nejmodernějších softwarů pro statickou a dynamickou analýzu mostních a inženýrských konstrukcí. V programu jsou řešeny geometricky lineární a nelineární výpočty, časově závislá a stabilitní analýza. Pro geometricky nelineární výpočty je použita Newton-Raphsonova metoda.

Prutové prvky jsou modelovány prvky typu Beam. Prvek má v každém ze dvou uzlů šest stupňů volnosti a je definován na základě Timoshenkovy prutové teorie.

Pro modelování skořepinových prvků jsou téměř výhradně použity čtyřuzlové, Mindlinovské prvky Thick Plate. Deskostěnový prvek má v každém z uzlů šest stupňů volnosti [11].

5. MODELOVÁ PODOBNOST

V závěru práce je navržen a testován fyzikální model vybrané skořepinové konstrukce. Pro návrh modelu a popis vztahů mezi fyzikálními veličinami modelu a konstrukce je použita tzv. *teorie modelové podobnosti* [12].

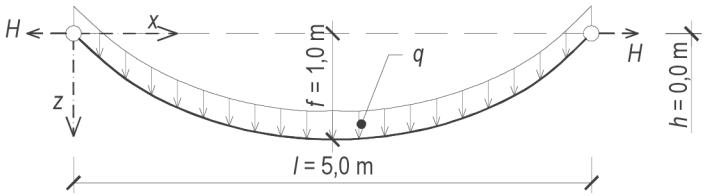
6. PRINCIP METODY

Princip metody je objasněn pomocí všeobecně známého vztahu mezi výslednicovým tvarem obecně zatíženého, ohybově netuhého vlákna a inverzním tvarem oblouku, který je při zatížení podobnou soustavou sil namáhán pouze tlakovou normálovou (membránovou) silou.

Prostřednictvím příkladu tížné řetězovky (obr. 6-1) je nejprve provedeno srovnání analytických a numerických metod získání průvěsové křivky ohybově netuhého prutu (plochy). Následně jsou na základě numericky získaných tvarů provedeny návrhy skořepinových konstrukcí a je popsáno jejich statické působení.

Zadání

rozpětí lana	$l = 5{,}0$ m
průvěs lana	$f = 1{,}0$ m
převýšení konců lana	$h = 0{,}0$ m



Obr. 6-1 *Zadání příkladu tížné řetězovky*

6.1. ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ PŘÍKLADU

Analytické řešení příkladu zahrnuje nalezení tvaru tížné řetězovky dle obr. 6-1.

6.2. NUMERICKÉ ŘEŠENÍ PRUTOVÉ KONSTRUKCE

6.2.1. Lineární řešení (první iterace)

V programu Midas Civil 2016 je vytvořen prutový model neposuvně uloženého přímého lana s rozpětím $l = 5{,}0$ m. Lano je kruhového průřezu $\phi = 10$ mm z oceli Y 1860. Lano je tvořeno prvky typu Beam a je zatíženo 1,94543násobkem vlastní tíhy. Úloha je řešena lineárně, tzn. lano působí jako prostý nosník a zdeformuje se do paraboly 4° s maximální hodnotou průhybu $f = 1{,}0$ m.

Pro první přiblížení k výslednicovému tvaru je dále v textu užíváno označení *první iterace*.

6.2.2. Nelineární řešení (druhá iterace)

Výchozí geometrií modelu pro druhou iteraci je výsledný tvar lana získaný první iterací. Materiálové parametry, rozměry průřezu a okrajové podmínky zůstávají ve shodě s první iterací. Model je řešen geometricky nelineárně, přičemž konstrukce je zatížena 4315násobkem vlastní tíhy. Při této intenzitě se lano protáhne a změní tvar, avšak průvěs f uprostřed konstrukce zůstane nezměněn (graf 6-2).

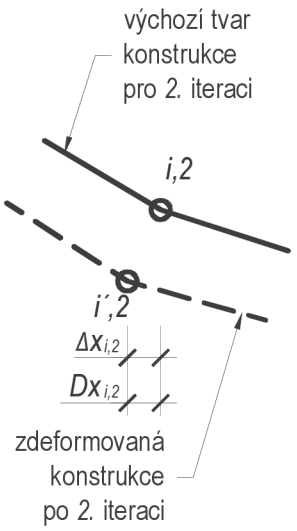
Pro druhé přiblížení k výslednicovému tvaru je dále užíváno označení *druhá iterace*, atd.

6.2.3. MKP zachování půdorysné polohy uzlů konstrukce

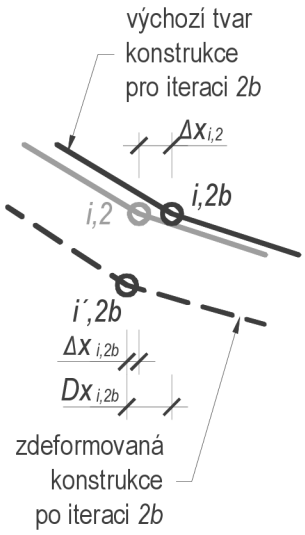
Při nelineárním iterování výslednicového tvaru se ohybově netuhý prut deformuje nejen ve svislém, ale i ve vodorovném směru. Vodorovné deformace nemají vliv na přesnost řešení ve vztahu k výslednicovému tvaru, ale mají vliv na změnu vzdálenosti mezi jednotlivými uzly. V některých aplikacích může díky vodorovným deformacím docházet k nežádoucí půdorysné změně tvaru. Nežádoucí půdorysné výchylky uzlů výsledných tvarů lze eliminovat postupnou úpravou výchozího tvaru.

Na obr. 6-2 je schematicky znázorněna výchozí poloha uzlu *i* ohybově netuhé konstrukce v druhé iteraci (viz kapitola 6.2.2). Zatížená konstrukce se zdeformuje a nastává vodorovný posun jednotlivých uzlů $Dx_{i,2}$, uzel zaujme výslednou polohu $i',2$. Následně je stanovena půdorysná odchylka $\Delta x_{i,2}$, jejíž maximální hodnota ve druhé iteraci je 25 mm (graf 6-1).

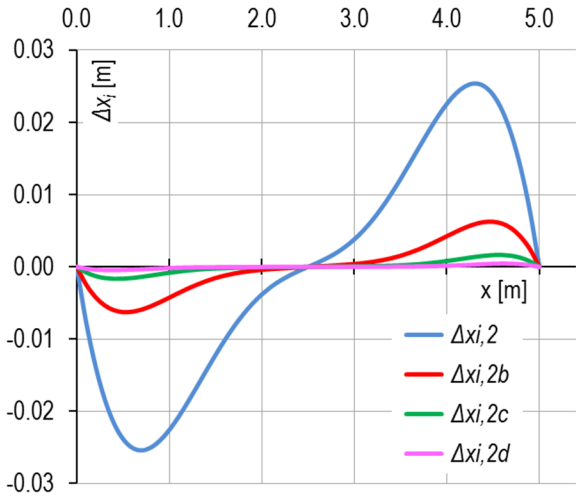
Model pro iteraci *2b* vychází z modelu pro druhou iteraci. Na základě hodnot půdorysné odchylky $\Delta x_{i,2}$ a výchozích souřadnic uzlů v druhé iteraci $x_{i,2}$ jsou stanoveny výchozí půdorysné souřadnice uzlů pro iteraci *2b* (obr. 6-3): $x_{i,2b} = x_{i,2} - \Delta x_{i,2}$, *z* souřadnice uzlů zůstávají nezměněny. Zatížená konstrukce se zdeformuje a nastává vodorovný posun uzlů $Dx_{i,2b}$. Je stanovena půdorysná odchylka $\Delta x_{i,2b}$, jejíž maximální hodnota je 6 mm, tj. cca 75% redukce v porovnání s druhou iterací.



Obr. 6-2 *Deformace konstrukce v druhé iteraci*



Obr. 6-3 *Deformace konstrukce v iteraci 2b*



Graf 6-1 *Porovnání půdorysných odchylek v závislosti na jednotlivých iteracích*

V tomto duchu lze pokračovat, dokud půdorysná odchylka neklesne pod požadovanou hodnotu. V rámci příkladu je iterování ukončeno po iteraci *2d*, kde je dosaženo maximální vodorovné odchylky $\Delta x_{i,2d}$ menší než 1 mm. Výslednicové tvary získané v iteraci *2a* až *2d* se od sebe téměř neodlišují.

6.3. NUMERICKÉ ŘEŠENÍ MEMBRÁNOVÉ KONSTRUKCE

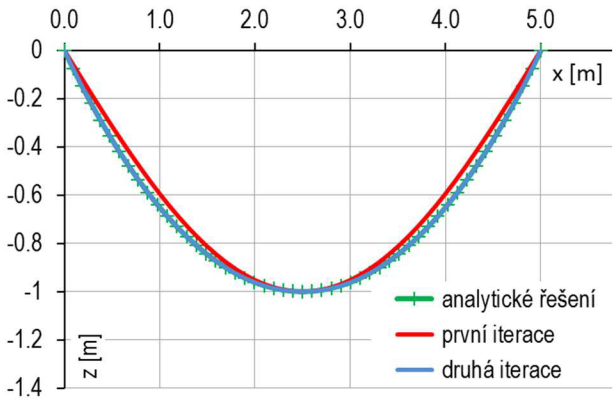
Podkladem pro výchozí geometrii membránového modelu je tvar prověšeného lana získaný lineárním řešením (viz kapitola 6.2.1). Uzly membrány jsou dány translačním posunem uzlů ve vodorovném směru, vzniklá síť uzlů je následně pokryta membránou tloušťky 7 mm. Tím vznikl ohybově netuhý prvek šířky 1,0 m. Membrána je uložena v krajních uzlech neposuvně, pás je vytvořen z deskostěnových prvků typu Thick Plate. Úloha je řešena geometricky nelineárním výpočtem a model je zatížen 4343násobkem vlastí tíhy.

Membránová konstrukce je řešena ve dvou variantách – s Poissonovým číslem $\mu = 0$ a s Poissonovým číslem $\mu = 0{,}2$.

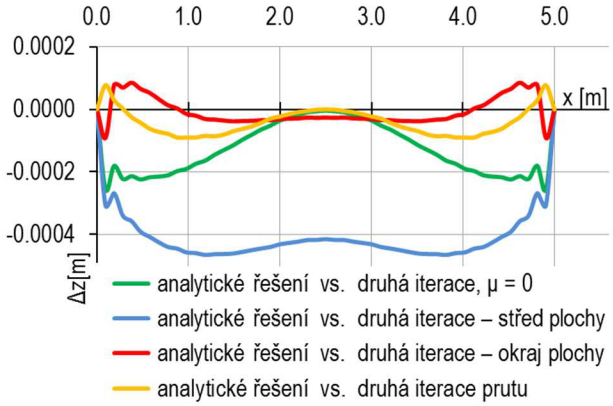
6.4. VYHODNOCENÍ

Geometrie získaná lineární deformací prutu se od analyticky získaného tvaru, při stejné hodnotě maximálního průvěsu f, liší až o 62 mm (graf 6-2), proto nelze lineární analýzu využít pro přesný návrh výslednicového tvaru skořepinové konstrukce.

Graf 6-3 porovnává jednotlivé geometricky nelineárně stanovené průvěsové křivky (plochy) s analytickým řešením. Je patrné, že jednotlivé křivky se mezi sebou i v porovnání s analytickým řešení liší pouze málo, rozdíl činí méně než 0,5 mm.



Graf 6-2 *Porovnání tvarů průvěsu vlákna*



Graf 6-3 *Porovnání odchylky analyticky získaného tvaru s numerickými řešeními*

6.5. VÁLCOVÁ SKOŘEPINA

Na základě numericky nalezených tvarů je navržena skořepina, která je následně staticky analyzována. Numerický model skořepiny je zpracován ve dvou variantách.

První variantou je prutový model (Beam) konstrukce, jehož geometrie je získána inverzí druhé iterace prutového modelu. Druhou variantou je deskostěnový, prostorový model (Thick Plate), jehož geometrie je získána inverzí tvaru numerického řešení membránové konstrukce s Poissonovým číslem $\mu = 0{,}2$.

Skořepina je v obou případech průřezu 1×0,1 m, z betonu třídy C 40/50.

Základní poznatky o statickém chování konstrukce jsou uvedeny v kapitole 6.6.

6.6. ZÁVĚR

Na názorném příkladu je prokázána dobrá shoda mezi analyticky definovaným tvarem průvěsové křivky lana a numericky nalezeným tvarem deformace ohybově netuhého prutu a plochy.

Na základě porovnání výsledků z obou modelů skořepin lze konstatovat, že výsledné průběhy normálových sil a ohybových momentů se vzájemně odlišují velmi málo. Hodnota ohybových momentů, v porovnání s normálovými silami, nedosahuje významných hodnot. To potvrzuje, že tvar skořepiny odpovídá výslednicovému tvaru.

V kapitole 6 je prokázána funkčnost metody numerického hledání výslednicového tvaru skořepinové konstrukce. Metoda je, při srovnatelné přesnosti, použitelná jak pro rovinné, tak prostorové konstrukce.

7. STUDIE SKOŘEPINY TYPU „BUCKELSCHALE“

První zkoumanou konstrukcí je tzv. Islerova skořepina („Buckelschale“). Analyzována je skořepina čtvercového půdorysu o délce strany 20 m, s maximálním vzepětím ve střednici 2,5 m.

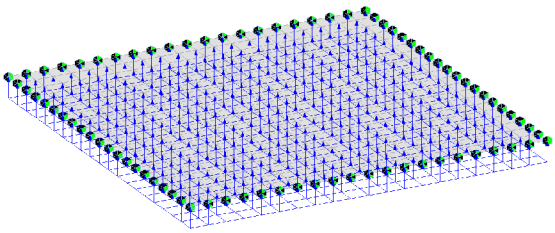
7.1. NALEZENÍ TVARU SKOŘEPINY

Numerické nalezení tvaru vychází ze zásad popsaných v kapitole 6. Požadovaný výslednicový tvar je nalezen ve čtyřech iteračních krocích.

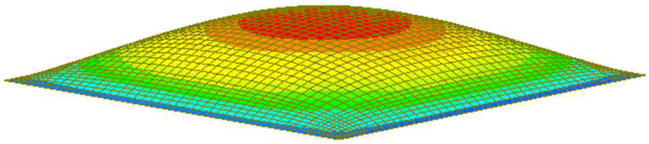
Modelem první iterace je rovinná membrána čtvercového půdorysu, která je v obvodových uzlech neposuvně uložena. Membrána je ve směru lokální kladné osy *z* zatížena rovnoměrným plošným zatížením (obr. 7-1). Neposuvné uložení simuluje upnutí gumové membrány do rámu, zatížení kolmé na střednicovou rovinu představuje tlak vzduchu v nafukované membráně. To odpovídá modelové zkoušce Heinze Islera (obr. 2-3).

Geometrie modelu druhé iterace vychází ze zdeformovaného tvaru konstrukce první iterace. Ve druhé iteraci je dosaženo požadovaného vzepětí 2,5 m.

V posledních dvou iteracích (iterace *2b* a *2c*)jsou korigovány půdorysné polohy uzlů výslednicového tvaru, aby byly zachovány jejich výchozí půdorysné souřadnice z druhé iterace (analogicky s kapitolou 6.2.3).



Obr. 7-1 *Model první iterace – axonometrie*



Obr. 7-2 *Deformace D_{xyz} po druhé iteraci, 1× převýšená [m]*

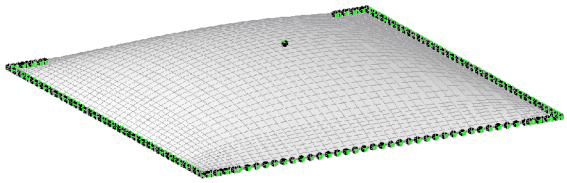
7.2. KONSTRUKCE ULOŽENÁ PO OBVODĚ

Pro prověření vhodnosti nalezeného tvaru je nejprve staticky analyzovaná skořepina s ideálními okrajovými podmínkami, tedy s dokonale neposuvným uložení po celém obvodě.

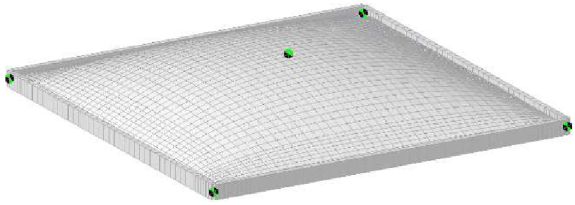
Model konstrukce je vytvořen ze skořepinových prvků Thick Plate tloušťky 80 mm. Směrem k okraji je konstrukce náběhovaná až na 140 mm, v rozích až na 220 mm. Konstrukce je neposuvně uložena ve všech obvodových uzlech (obr. 7-3) a je analyzována geometricky nelineárním výpočtem.

Pro konstrukci je definován zatěžovací stav vlastní tíha (SW) a tři různá uspořádání zatěžovacích stavů typu sníh (SN1 až SN3). Ze čtyř uvedených zatěžovacích stavů jsou vytvořeny čtyři nelineární kombinace zatížení – samotná vlastní tíha konstrukce a vlastní tíha společně v kombinaci s jednotlivými případy zatížení sněhem.

Základní poznatky o statickém působení konstrukce jsou uvedeny v kapitole 7.4.



Obr. 7-3 *Neposuvně uložený model*



Obr. 7-4 *Model s obvodovým trámem*

7.3. KONSTRUKCE S PŘEDPJATÝM OBVODOVÝM TRÁMEM

Geometrie modelu a tloušťka skořepiny je převzata z kapitoly 7.2. V modelu je nahrazeno liniového podepření předpjatým obvodovým trámem (prvek Beam obdélníkového průřezu 300/800 mm). Konstrukce je uložena v rozích, kde je jí zabráněno posunu ve svislém směru (obr. 7-4). Konstrukce je analyzována geometricky nelineárním, respektive časově závislým výpočtem.

Bylo prokázáno, že náhradou neposuvného uložení poddajným obvodovým trámem je změněno statické působení skořepiny. Proto nelze pro návrh předpětí využít poznatků z kapitoly 7.2.

Trasování kabelu ve svislé rovině připomíná plochou parabolu s maximální excentricitou 250 mm, ve vodorovné rovině je kabel přímý, umístěný v ose symetrie průřezu. Hodnota předpínací síly P je 3200 kN.

Základní poznatky o statickém působení konstrukce jsou uvedeny v kapitole 7.4.

7.4. ZÁVĚR

V kapitole 7 je navržena skořepinová konstrukce typu „Buckleschale“. Nejprve je iterativním způsobem nalezen výslednicový tvar.

Následná statická analýza neposuvně uložené konstrukce potvrdila membránové působení skořepiny i při instalaci nahodilých zatížení. Napětí v konstrukci je rovnoměrné, v intervalu ±1 MPa. Deformace jsou do 1 mm.

Ve třetí části kapitoly je navrženo zastřešení podporované obvodovým předpjatým trámem. Konstrukce v tomto uspořádání staticky působí výrazně odlišně, dochází k větší dominanci ohybových momentů a tím pádem i k nárůstu napětí a deformací.

Na druhou stanu je konstrukce navržena tak, že během celé doby životnosti, pro definovaná zatížení, jsou zachována napětí a deformace ve stanovených mezích. Tahová napětí nedosahují průměrné hodnoty pevnosti betonu v tahu, takže lze předpokládat, že trhliny nevzniknou. Rovněž tlaková napětí nedosahují limitních hodnot.

Geometricky nelineárním výpočtem bylo prokázáno, že konstrukce ztratí stabilitu při více jak 35násobku výpočtového zatížení sněhem.

8. ČERPACÍ STANICE, DEITINGEN SÜD

Druhou studijní konstrukcí je skořepina čerpací stanice Deitingen Süd (viz kapitola 2.2.2). Analyzovaná je skořepina půdorysného tvaru rovnoramenného trojúhelníka rozměrů 25,2×30,75 m (základna × odpovídající výška). Vzepětí skořepiny je 11,5 m a výškový rozdíl mezi hlavním a vedlejšími vrcholy skořepiny je 3,5 m.

8.1. NALEZENÍ TVARU SKOŘEPINY

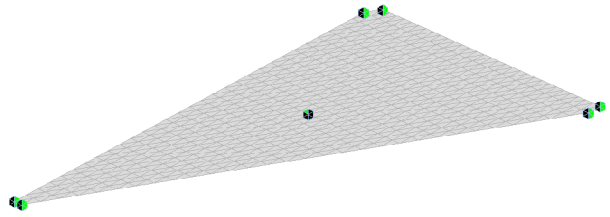
8.1.1. Iterace z rovinné membrány

Numerické nalezení tvaru vychází ze zásad popsaných v kapitole 6. Výslednicový tvar je nalezen ve dvou iteračních krocích.

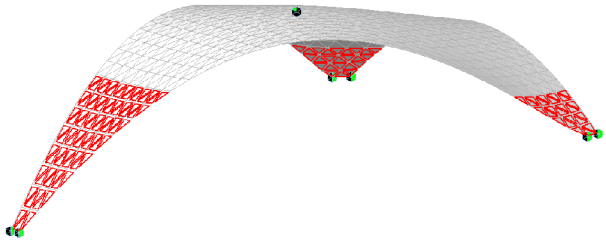
Modelem první iterace je rovinná membrána tvaru rovnoramenného trojúhelníka. Membrána je situována v šikmé rovině, která je určena podporami definitivní konstrukce. Konstrukce je ve směru globální kladné osy z (směrem vzhůru) zatížena 0,75násobkem vlastní tíhy a je neposuvně uložena v rozích (obr. 8-1).

Neposuvné uložení simuluje upnutí látky k tuhému rámu, svislé zatížení její hmotnost. Zvolené uspořádání numerického modelu odpovídá modelové zkoušce se zavěšenou tkaninou (obr. 2-2).

Geometrie modelu druhé iterace vychází ze zdeformovaného tvaru konstrukce první iterace. Model, prostřednictvím odpovídajícího zvětšení objemové hmotnosti, zohledňuje předpokládanou proměnnou tloušťku budoucí konstrukce (obr. 8-2). Ve druhé iteraci je dosaženo požadovaného vzepětí 11,5 m.



Obr. 8-1 *Model první iterace*

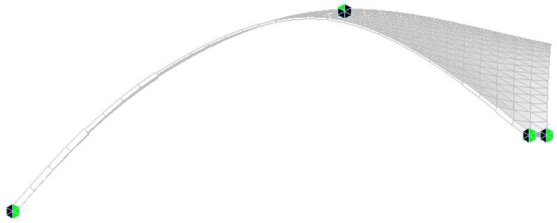


Obr. 8-2 *Model druhé iterace*

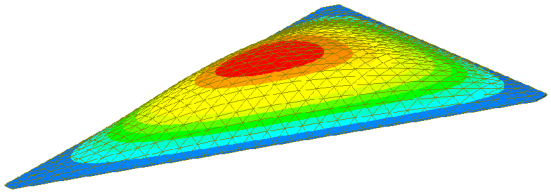
8.1.2. „Výsledný tvar konstrukce“

Výsledný tvar skořepiny (obr. 8-3) se na první pohled odlišuje od obdobné konstrukce vyvinuté Heinzem Islerem (obr. 2-5), protože v části přilehlé k hlavnímu vrcholu není patrné příčné zakřivení. Orientačním stabilitním výpočtem konstrukce bylo zjištěno, že nejmenší součinitel kritického zatížení λ má hodnotu 14,5.

Ve zbývající části kapitoly 8 je vyvinuta a analyzována skořepinová konstrukce obdobných rozměrů s větším příčným zakřivením, která je přibližně třikrát stabilnější.



Obr. 8-3 *Výsledná konstrukce – pohled z boku*



Obr. 8-4 *Svislá deformace modelu A s maximální hodnotou +1,455 m*

8.1.3. Iterace z prostorové membrány

V práci [10] je uvedeno, že při modelovém hledání tvaru skořepinových konstrukcí je možné změnou velikosti a střihu výchozího kusu látky měnit tvar finální konstrukce. Tento poznatek je využit pro návrh variantního výslednicového tvaru. Snahou je do iteračních modelů začlenit příčné zakřivení, které v tvaru výsledné konstrukce na obr. 8-3 chybí.

Model „iterace“ *1b* je nahrazen dvěma modely. První model vnáší do výsledného tvaru příčné konkávní zakřivení, druhý model navyšuje vzepětí. Podepření a zatížení jednotlivých modelů nesouvisí s podepřením finální konstrukce a neřídí se žádnými exaktními pravidly, ale snahou zdůraznit nedostatečné tvarové charakteristiky konstrukce.

Model A – konkávní zakřivení v příčném směru

Konkávního příčného zakřivení je dosaženo pomocí vhodně zatížené trojúhelníkové rovinné membrány. Membrána je podepřena v rozích, kde je jí zabráněno posunu ve směru globálních os x, y, z a ve všech zbývajících obvodových uzlech, ve kterých je jí zabráněno posunu ve směru globální osy z. Průběh deformací modelu s maximální hodnotou +1,455 m je uveden na obr. 8-4.

Model B – zvětšení vzepětí

Geometrie modelu, podepření a způsob řešení je shodný s první iterací (kapitola 8.1.1). Jediným rozdílem je intenzita plošného zatížení, která odpovídá 0,62násobku vlastní tíhy. Výsledná maximální deformace je +6,79 m.

Iterace 2b

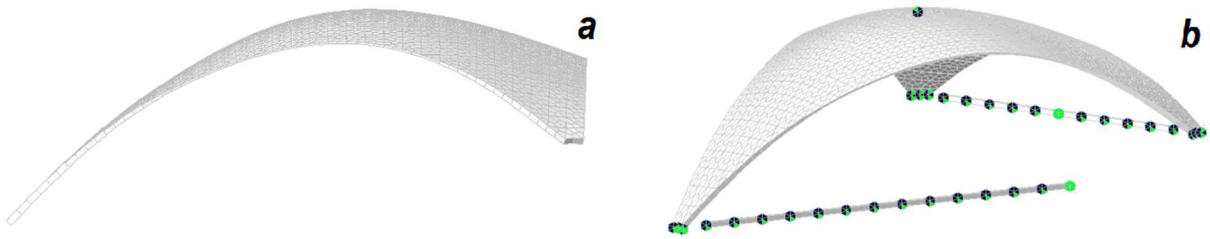
Tvar konstrukce pro iteraci *2b* je získán součtem svislých deformací dvou výše uvedených modelů a výchozích souřadnic uzlů první iterace. Geometricky

nelineárním výpočtem je získána deformovaná membrána s maximálním vzepětím 11,5 m, což je hodnota definovaná zadáním. Zároveň byla získána konstrukce s výrazně větším příčným zakřivením (obr. 8-5 a).

8.2. KONSTRUKCE ULOŽENÁ NEPOSUVNĚ

Pro ověření statického působení konstrukce a pro kontrolu optimálnosti nalezeného tvaru je nejdříve analyzována konstrukce uložená neposuvně. Dokonale neposuvné uložení odpovídá okrajovým podmínkám, pro které je tvar vyvinut, proto je kontrola výslednicového tvaru provedena právě pro tyto okrajové podmínky.

Model konstrukce (obr. 8-5 a) se skládá z obdélníkových skořepinových prvků typu Thick Plate. Typická tloušťka skořepiny v poli je 120 mm. Směrem k rohovým podporám je konstrukce náběhovaná až na 360 mm. Skořepina je neposuvně uložena v rozích. Konstrukce je analyzována geometricky nelineárním výpočtem.



Obr. 8-5 *Výsledná konstrukce – a) neposuvně uložená – pohled z boku, b) s předpjatými táhly – axonometrie*

Pro konstrukci je definován zatěžovací stav vlastní tíha (SW) a čtyři různá uspořádání zatěžovacích stavů typu sníh (SN1 až SN4). Z pěti uvedených zatěžovacích stavů je vytvořeno pět nelineární kombinací zatížení – samotná vlastní tíha konstrukce a vlastní tíha společně v kombinaci s jednotlivými případy zatížení sněhem. Základní poznatky o statickém působení konstrukce jsou uvedeny v kapitole 8.4.

8.3. KONSTRUKCE S PŘEDPJATÝMI TÁHLY

V této kapitole je analyzována konstrukce, u které jsou některé vodorovné vazby nahrazeny předpjatými táhly.

Geometrie a tloušťka skořepiny je převzata z kapitoly 8.2. Podstatná změna nastává ve způsobu podepření. Konstrukce je nadále podepřena v rozích. Hlavnímu vrcholu konstrukce je zabráněno posunu ve směru globálních os y a z. Vodorovná reakce ve směru globální osy x je tuhými vazbami přenášena do předpjatého táhla, které je na protilehlém konci uloženo neposuvně (obr. 8-5 b).

Ve vedlejších vrcholech je nadále zabráněno posunu ve směru globálních os x a z, reakce ve směru globální osy y je tuhými vazbami přenášena do předpjatého táhla, které vzájemně spíná oba vedlejší vrcholy. Táhla jsou modelována Beam prvky obdélníkového průřezu 300/300 mm.

Velikost předpínacích sil je volena tak, aby během celé doby životnosti, při žádném ze zatěžovacích stavů nevznikly v táhlech trhliny. Případný pokles tuhosti by měl za následek značný nárůst deformací a napětí ve vlastní skořepině (viz [13]).

Konstrukce je analyzována geometricky nelineárním, respektive časově závislým výpočtem. Základní poznatky o statickém působení konstrukce jsou uvedeny v kapitole 8.4.

8.4. ZÁVĚR

V kapitole 8 je navržena skořepinová konstrukce půdorysného tvaru rovnoramenného trojúhelníka. Nejprve je iterativním způsobem nalezen výslednicový tvar.

Následně je staticky analyzovaná neposuvně uložená konstrukce. Při zatížení vlastní tíhou je skořepina převážně namáhána membránovými silami. Při přitížení konstrukce nahodilým zatížením je narušeno membránové působení skořepiny, ale i přesto jsou zachována napětí a deformace v přijatelných mezích.

Ve třetí části jsou některé vodorovné vazby nahrazeny táhly. Průběhy a hodnoty napětí ve vlastní skořepině se během celé životnosti konstrukce výrazně nemění a jsou přibližně shodné s rozdělením napětí na neposuvně uložené konstrukci.

Maximální hlavní napětí σ_1 nepřekročí hodnotu +1,5 MPa a extrémní minimální hlavní napětí σ_2 je cca −6,4 MPa. Extrémní hodnota deformace při zkoumaných zatěžovacích stavech je −10,6 mm, a to při zohlednění reologických vlivů.

Geometricky nelineárním výpočtem bylo prokázáno, že konstrukce ztratí stabilitu při více jak 85násobku výpočtového zatížení sněhem.

9. ZASTŘEŠENÍ SPORTOVNÍCH HAL A PLAVECKÝCH BAZÉNŮ

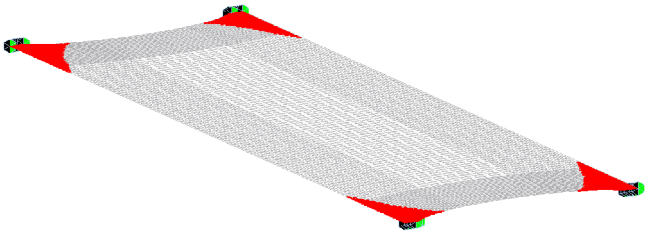
Třetí analyzovanou konstrukcí je skořepina, kterou Heinz Isler vyvinul pro zastřešení sportovních hal a plaveckých bazénů.

Důležitým funkčním požadavkem je půdorysná přímost delší strany skořepiny. Přímá hrana umožní umístit několik modulů vedle sebe a zastřešit tak rozsáhlé prostory bez vnitřních podpor. V následující textu je zpracován návrh konstrukce o půdorysných rozměrech 17×50 m, s maximálním vzepětím ve střednici 10 m.

9.1. ODVOZENÍ TVARU SKOŘEPINY Z ROVINNÉ MEMBRÁNY

Numerické nalezení tvaru vychází ze zásad popsaných v kapitole 6.

Modelem první iterace je rovinná membrána přibližně obdélníkového tvaru, která je neposuvně uložena na čtyřech rohových podporách šířky 1 m (obr. 9-1). Konstrukce je ve směru globální kladné osy z (směrem vzhůru) zatížena 0,1násobkem vlastní tíhy.



Obr. 9-1 *Model první iterace – axonometrie*

Hledání výslednicového tvaru je provedeno dle postupu popsaného v kapitole 6, požadovaného vzepětí 10 m je dosaženo v páté iteraci.

Na základě získaného tvaru (obr. 9-2) byla navržena skořepinová konstrukce tloušťky 120 mm, směrem k bodovým podporám je konstrukce náběhovaná až na 240 mm. Model je do podpor vetknut.

Obr. 9-2 *Výsledná konstrukce – a) pohled z boku, b) pohled z čela*

Geometricky nelineární analýza ideální konstrukce potvrdila, že nalezená konstrukce odpovídá výslednicovému tvaru, protože při zatížení vlastní tíhou není výrazně ohybově namáhána a deformace jsou v řádu jednotek milimetrů.

Při nerovnoměrném rozdělení zatížení je konstrukce nadměrně deformována a namáhána, jsou překročeny všechny limity mezních stavů únosnosti a použitelnosti.

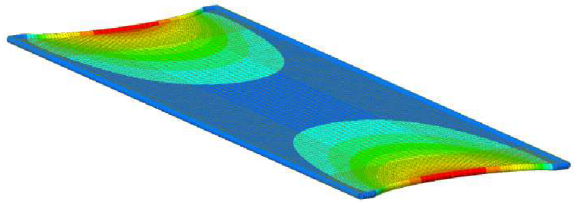
Konstrukce tohoto typu, realizované Heinzem Islerem, jsou v příčném směru výrazněji zakřiveny. Toto zakřivení (stejně jako např. u trapézových plechů) zajišťuje konstrukci tuhost a stabilitu. Proto je nutné hledat jiný výslednicový tvar konstrukce na daném půdorysu.

9.2. ODVOZENÍ TVARU SKOŘEPINY Z PROSTOROVÉ MEMBRÁNY

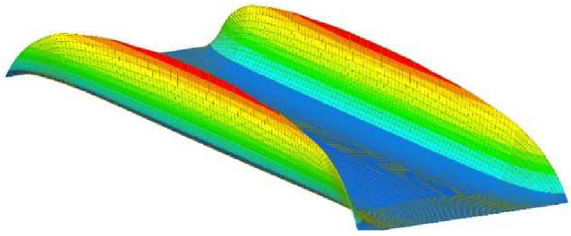
Je zřejmé, že pokud má být dosaženo požadovaného tvaru konstrukce, nemůže být jako výchozí tvar použita rovina. V podstatě je nutné do iteračních modelů začlenit tvarové charakteristiky, které jsou v konstrukci (viz kapitola 9.1) zastoupeny v nedostatečné míře nebo zcela chybí.

Model první iterace je nahrazen čtyřmi modely. Podepření a zatížení jednotlivých modelů nesouvisí s podepřením finální konstrukce a neřídí se žádnými exaktními pravidly, ale snahou zdůraznit nedostatečné tvarové charakteristiky konstrukce.

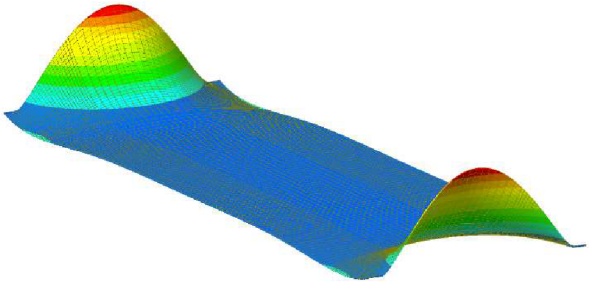
Deformace jednotlivých modelů jsou uvedeny na obr. 9-3 až obr. 9-6.



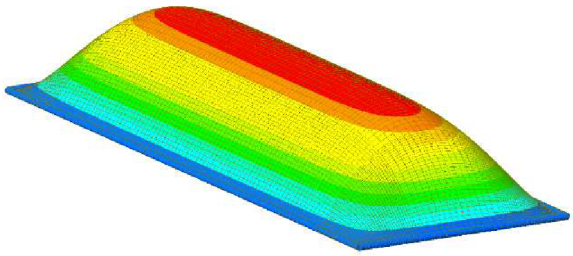
Obr. 9-3 *Model A – vodorovná deformace D_{xy} s maximální hodnotou ±1,85 m*



Obr. 9-4 *Model B – svislá deformace D_z s maximální hodnotou +6,07 m*



Obr. 9-5 *Model C – svislá deformace D_z s maximální hodnotou +6,50 m*



Obr. 9-6 *Model D – svislá deformace D_z s maximální hodnotou +7,38 m*

Tvar konstrukce pro druhou iteraci, definovaný polohou uzlů, je získán na základě součtu výchozích souřadnic uzlů a svislých (model B, C, D), respektive vodorovných (model A) deformací.

Výsledný tvar je stanoven dle postupu popsaného v kapitole 6, požadovaného předpětí 10 m je dosaženo ve třetí iteraci. Výsledný tvar konstrukce má výraznější profilování příčného řezu, konstrukce však nesplňuje tvarové požadavky na přímost delší hrany (obr. 9-7).

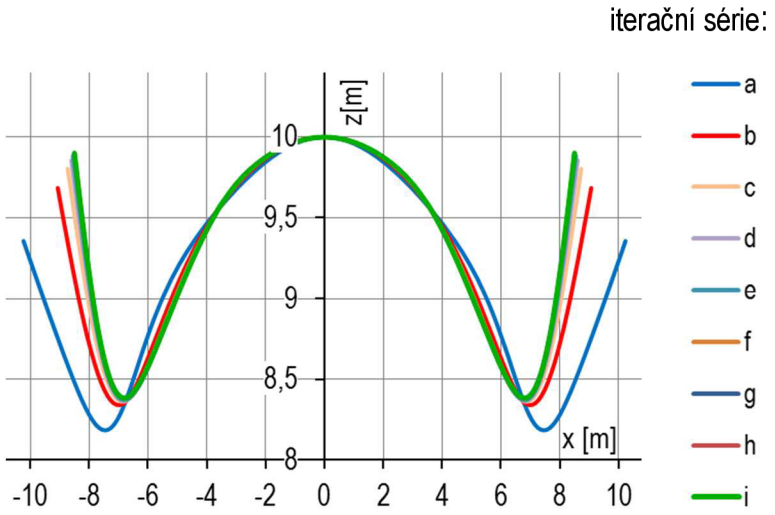
Geometricky nelineární analýza potvrdila, že nalezený tvar je tvarem výslednicovým. Současně konstrukce pro všechny analyzované kombinace zatížení vykazuje dostatečnou tuhost a stabilitu.

Obr. 9-7 *Výsledná konstrukce – a) pohled z boku, b) pohled z čela*

9.3. NAPŘÍMENÍ DELŠÍ HRANY KONSTRUKCE – ZÍSKÁNÍ TVARU

Delší hrana je vychýlena směrem z konstrukce až o 1,73 m (obr. 9-7 b). Korekce vychýlení je provedena postupnou úpravou výchozího tvaru, ve smyslu kapitoly 6.2.3. V jednotlivých iterační sériích byla postupně zmenšována vodorovná výchylka podélné hrany, v iterační sérii *i* klesla maximální vodorovná výchylka pod 0,7 mm a iterování bylo ukončeno.

Vývoj tvarů finálních konstrukcí jednotlivých iteračních sérií, v řezu vedeným příčnou osou symetrie, popisuje graf 9-1.



Graf 9-1 *Tvary finálních konstrukcí v příčné ose symetrie – 6× převýšené*

9.4. KONSTRUKCE ULOŽENÁ NEPOSUVNĚ

Obr. 9-8 *Výsledná konstrukce – a) pohled z boku, b) pohled z čela*

Model konstrukce vychází z modelu popsaného v kapitole 9.1.

Pro konstrukci je definován zatěžovací stav vlastní tíha (SW) a čtyři různá uspořádání zatěžovacích stavů typu sníh (SN1 až SN4). Charakteristická tíha sněhu na střeše je 1,5 kN/m^2. Schéma rozhodujícího zatěžovacího stavu SN2 – zatížení na podélné polovině je znázorněn na obr. 10-3.

Z pěti uvedených zatěžovacích stavů je vytvořeno pět nelineární kombinací zatížení – samotná vlastní tíha konstrukce a vlastní tíha společně v kombinaci s jednotlivými případy zatížení sněhem. Konstrukce je analyzována geometricky nelineárním výpočtem.

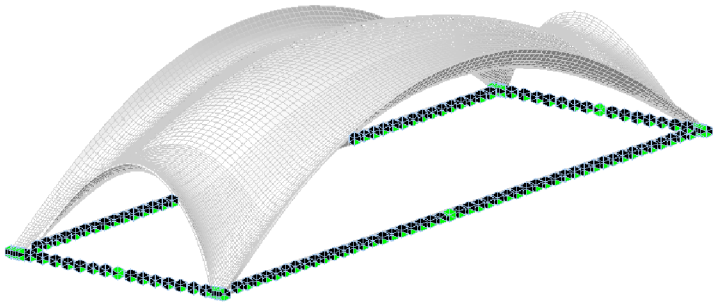
Základní poznatky o statickém působení konstrukce jsou uvedeny v kapitole 9.6.

9.5. KONSTRUKCE S PŘEDPJATÝMI TÁHLY

V následující kapitole je analyzována varianta konstrukce, u které jsou nahrazeny vodorovné podpory předpjatými táhly. Čtyři táhla vytvářejí na obvodu konstrukce tuhý rám a zajišťují vodorovnou polohu podpor.

Model je založen na modelu popsaném v kapitole 9.1. Do modelu jsou doplněna táhla, která prostřednictvím tuhých vazeb vzájemně spojují vrcholy skořepiny. Táhla nahrazují neposuvné vazby ve směru globální osy *x* a *y* a jsou modelována prvky typu

Beam. V podélném směru (směr globální osy *y*) je rozměr táhla 500/500 mm, v příčném (směr globální osy *x*) 300/300 mm (obr. 9-9).



Obr. 9-9 *Model – axonometrie*

Návrh předpínacích sil reflektuje maximální hodnoty vodorovných reakcí získaných analýzou modelu a předpokládané ztráty předpětí.

Táhlo obdélníkového průřezu 500/500 mm je centricky předepnuto silou 1700 kN, táhlo průřezu 300/300 mm, je centricky předepnuto silou 600 kN.

Konstrukce je analyzována geometricky nelineárním, respektive časově závislým výpočtem. Základní poznatky o statickém působení konstrukce jsou uvedeny v kapitole 9.6.

9.6. ZÁVĚR

V kapitole 9 je navržena skořepinová konstrukce obdélníkového tvaru. V počáteční fázi vývoje je nejprve navržena konstrukce výslednicového tvaru, který však nevykazuje dostatečnou tuhost a stabilitu pro nesymetrická rozložení zatížení. Na základě úpravy výchozího tvaru membrány je vyvinuta konstrukce, která je sice dostatečně tuhá a stabilní, ale nesplňuje vstupní tvarová kritéria. Dalšími postupnými úpravami výchozího tvaru je vyvinuta dostatečně tuhá a stabilní konstrukce, která splňuje tvarové požadavky.

Ve druhém kroku je konstrukce staticky analyzovaná při ideálních okrajových podmínkách (dokonalém neposuvném uložení). Při zatížení vlastní tíhou je statické působení skořepiny charakterizováno nízkou úrovní napjatosti a deformacemi v řádech jednotek milimetrů. Konstrukce se nachází v membránovém stavu. Při přitížení nahodilým zatížením je narušeno membránové působení skořepiny, ale i přesto jsou zachována napětí a deformace v přijatelných mezích. Výjimkou je kombinace zatížení SW + SN2, při které je na poměrně rozsáhlé části podélných úžlabí překročena pevnost betonu v tahu.

Následně je analyzována varianta konstrukce, u které půdorysnou polohu podpor fixující čtyři *plně* předpjatá táhla. Průběhy a hodnoty napětí ve vlastní skořepině se během celé životnosti konstrukce výrazně nemění a jsou přibližně shodné s rozdělením napětí na neposuvně uložené konstrukci. Konstrukce je zpracována v úrovni studie a neřeší detailně všechny jevy, které souvisí s realizací konstrukce. Při případné realizaci je nutné rozšířit analýzu konstrukce o další zatěžovací stavy (vítr, pokles podpor, teplota apod.) a zohlednit porušení konstrukce trhlinami.

10. FYZIKÁLNÍ MODEL KONSTRUKCE

10.1. PŘÍPRAVA

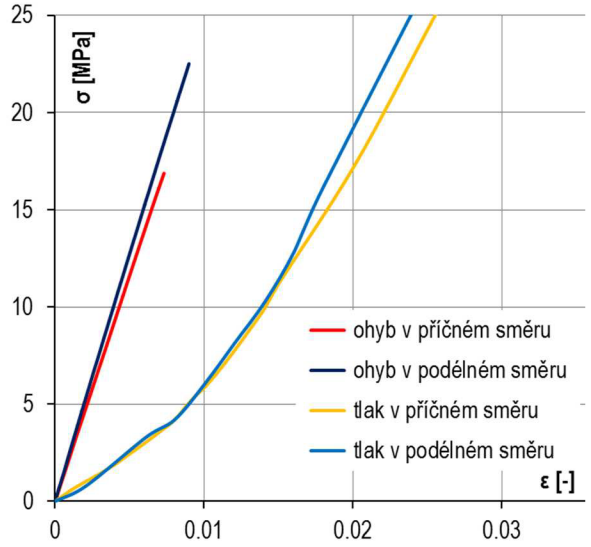
Pro výstavbu modelu je zvolena metoda 3D tisku typu FDM (Fused Deposition Modelling). Metoda funguje na podobném principu jako tavná pistole – do tiskové hlavice je vháněn tiskový materiál – termoplast, který je zde roztaven. Počítačově ovládaná hlavice se pohybuje nad tiskovým stolem a vytváří výsledný objekt.

Materiál je nanášen ve formě vláken, po vrstvách. Tisk každé vrstvy začíná vytvořením minimálně jedné obvodové kontury. Vnitřní prostor mezi konturami je šikmo vyplněn vlákny, přičemž výplň následující vrstvy je zpravidla kolmá na předchozí. Z uvedeného popisu je zřejmé, že touto technikou vzniká anizotropní vrstevnatý materiál. Jsou rozlišovány dva základní směry – příčný a podélný. Příčný směr je kolmý na rovinu vrstev, podélný směr je rovnoběžný s rovinou vrstev.

Jako materiál pro stavbu modelu je použit ABS M 30 (akrylonitrilbutadienstyren), který vykazuje vysoké hodnoty pevnosti překračující 20 MPa a moduly pružnosti v rozsahu 1760 až 2230 MPa.

Pro ověření materiálových charakteristik byla vytvořena sada zkušebních těles (trámečky profilu 20×10 mm) pro zkoušku ohybem a sada zkušebních těles (hranoly 10×20×20 m) pro zkoušku tlakem. Každá sada obsahovala tělesa pro zatěžování jak v podélném, tak v příčném směru.

Graf 10-1 prezentuje závislost napětí na poměrném přetvoření při zkoušce tlakem a ohybem (pozn. graf nezachycuje dosažení meze pevnosti).



Graf 10-1 *Závislost napětí na poměrném přetvoření při zkoušce tlakem a ohybem – detail*

Obr. 10-1 *Experiment – kombinace zatížení SW+SN2*

Výsledný modul pružnosti v tlaku je pro podélný směr 1501 MPa, pro příčný směr 1263 MPa. Modul pružnosti v ohybu v podélném směru je 2527 MPa, v příčném směru 2348 MPa.

Výsledný modul pružnosti pro celou konstrukci je stanoven jako průměrný vážený modul pružnosti, který zohledňuje směr a velikost povrchového napětí připadající na ohybový moment a normálovou sílu. Jeho hodnota je E_ϕ = 1820 MPa.

Zkoušky prokázaly, že orientace vláken má poměrně malý vliv na modul pružnosti a materiál lze pokládat za izotropní. Dále lze konstatovat, že materiál vykazuje pro provedení experimentu dostatečnou pevnost a že změna napětí je, pro hodnoty napětí dosahovaných během experimentu, lineárně závislá na přetvoření.

10.2. MODEL KONSTRUKCE

Na základě *přibližné modelové podobnosti* bylo navrženo ekvivalentní modelové zatížení a model s měřítkem délek 1:55,56 a s měřítkem tlouštěk 1:24, který zachovává napětí.

Na fyzikální model lze také nahlížet tak, že se jedná o model jiné konstrukce, s podobným statickým působením. Budou-li naplněny předpoklady, získané numerickou analýzou, o statickém působení tohoto fyzikálního modelu, lze předpokládat, že i reálná konstrukce se bude chovat ve shodě s numerickou analýzou.

Výše zmíněnou metodou 3D tisku je vytvořen model konstrukce. Stavba modelu probíhala v poloze na boku. Tato orientace je zvolena, protože dominantní směr namáhání je souhlasný se směrem vláken, tj. směrem, ve kterém je materiál nejúnosnější.

Místa podepření modelu jsou po obvodě konstrukce spojena táhly, která pomáhají ztužit model a zajišťují neměnnost tvaru během manipulace. Táhla jsou však nedostatečně tuhá pro zatěžovací zkoušku, proto je model usazen do tuhého duralového rámu.

Obr. 10-2 *Fyzikální model – perspektiva*

Bylo určeno 60 míst pro zavěšení závaží. Ekvivalentní bodové síly (hmotnosti závaží) jsou určeny pomocí MKP analýzy. Celková hmotnost závaží pro náhradu vlastní tíhy je 202,534 kg, pro náhradu plného nahodilého zatížení 99,440 kg. Model při plném zatížení přenáší 301,974 kg. Pro experiment bylo vyrobeno 60 závaží pro náhradu nahodilých zatížení a 120 závaží (dvě stejné sady) pro náhradu vlastní tíhy, závaží byla vyrobena z ocelové kulatiny ϕ 50 mm (obr. 10-1).

Celý model je osazen na 20 pozicích 40 odporovými tenzometry (vždy jeden tenzometr ze zdola a jeden shora), většina tenzometrů je osazena v podélném směru,

tj. ve směru dominantního namáhání. Model byl osazen osmi snímači pro měření svislých deformací. Čtyři snímače byly umístěny poblíž podpor pro stanovení jejich sednutí a čtyři snímače byly umístěny v ploše konstrukce. Snímače jsou připevněny na masivním ocelovém nosníku, který je uložen na betonových pilířcích.

10.3. REALIZACE EXPERIMENTU

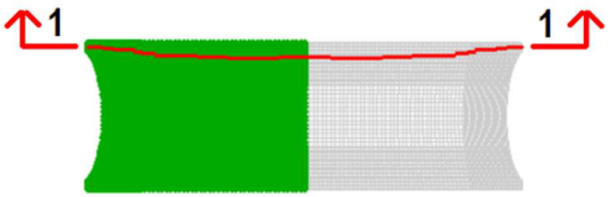
Během experimentu byly opakovaně realizovány všechny předepsané kombinace zatížení, a to i v jejich zrcadlových uspořádáních. Při zavěšení všech předepsaných závaží pro danou kombinaci zatížení bylo vyčkáno na ustálení měřených hodnot.

Aby naměřené hodnoty byly co nejpřesnější a měly co možná nejlepší vypovídací hodnotu o statickém působení konstrukce pod mechanickým zatížením, jsou naměřené hodnoty „očištěny“ od vlivu dotvarování, změny teploty a poklesu podpor.

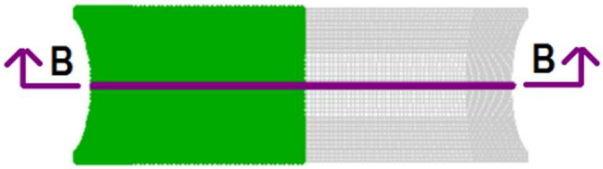
10.4. VÝSLEDKY

Na konstrukci jsou definovány řezy pro vyhodnocení napětí a deformací. V řezech je, kromě zaznamenaného měření, vynesen průběh napětí a deformací získaný geometricky nelineární analýzou konstrukce a polymerního, bodově zatíženého modelu. Pro možnost přímého porovnání s hodnotami na reálné konstrukci jsou hodnoty deformací fyzikálního modelu upraveny dle zásad modelové podobnosti.

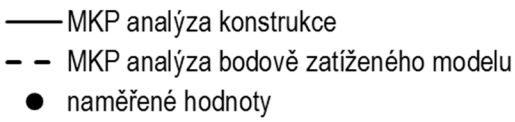
V tezích disertační práce jsou prezentovány průběhy napětí v řezu 1–1 (obr. 10-3) a průběhy deformací v řezu B–B (obr. 10-4) a to pro kombinaci zatížení vlastní tíhy (SW) a vlastní tíhy a zatížení sněhem na podélné polovině (SW+SN2).



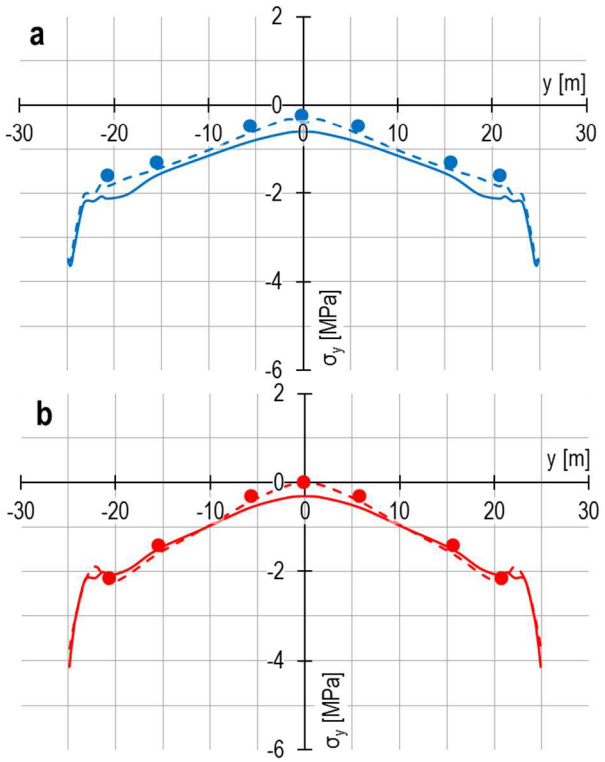
Obr. 10-3 *Řez pro vyhodnocení napětí; zatížení sněhem SN2*



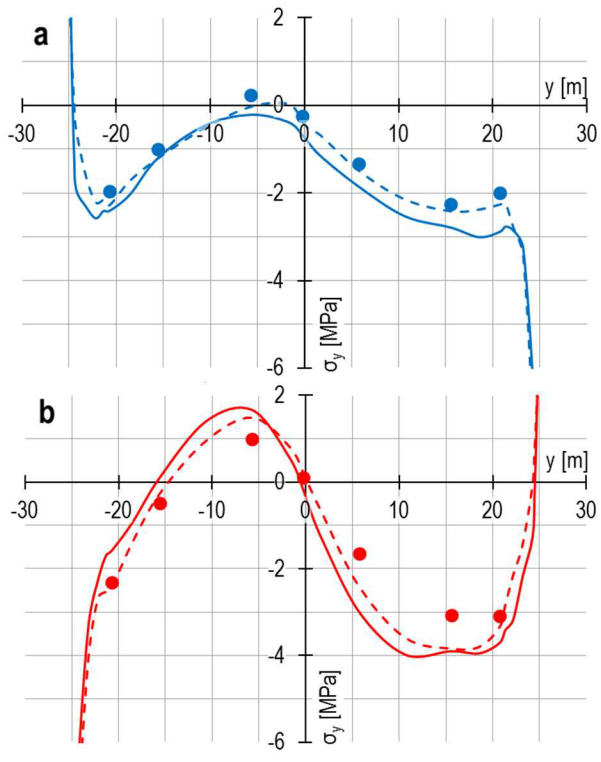
Obr. 10-4 *Řez pro vyhodnocení deformace; zatížení sněhem SN2*



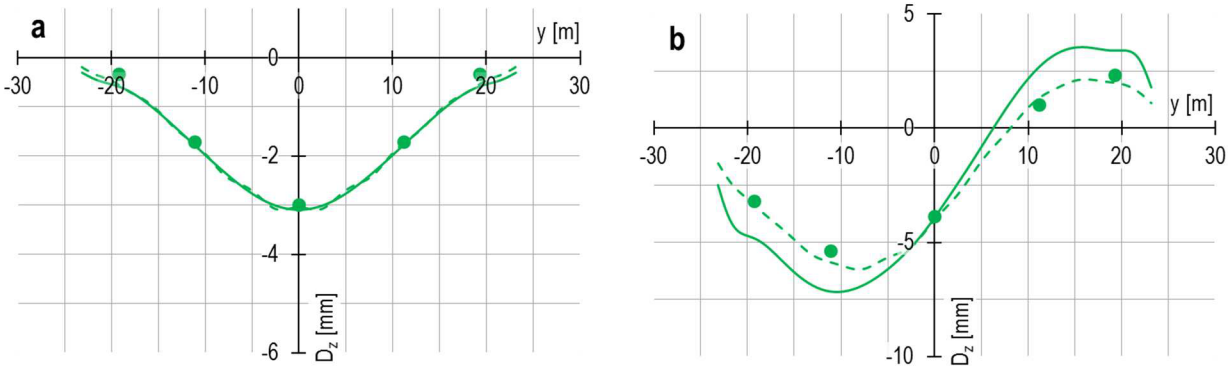
Obr. 10-5 *Legenda napětí a deformací*



Graf 10-2 *SW, řez 1–1, napětí σ_y – a) horní vlákna, b) spodní vlákna [MPa]*



Graf 10-3 *SW+SN2, řez 1–1, napětí σ_y – a) horní vlákna, b) spodní vlákna [MPa]*



Graf 10-4 *Deformace D_z, řez B–B, kombinace zatížení – a) SW, b) SW+SN2 [mm]*

10.5. ZÁVĚR

V práci je prokázána dobrá shoda mezi modelovým měřením a mezi numericky stanovenými hodnotami napětí a deformací na polymerním modelu (graf 10-2 až graf 10-4).

Rozdílnost numericky stanovených průběhů napětí a deformací na betonové konstrukci a modelovým měřením je již o něco větší, avšak dle názoru autora nijak nevybočuje z hranic *přibližné modelové podobnosti*.

Ze shody modelového měření a numericky stanovených hodnot vyplývá, že pro návrh tvaru železobetonové skořepiny lze použít MKP iterativní metodu deformace membrány. Navrženou konstrukci lze následně spolehlivě staticky analyzovat stejným MKP programem, a to minimálně v pružné oblasti chování betonu.

11. ZÁVĚR DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce se zabývá studiem betonových skořepinových konstrukcí se zřetelem na numerický návrh jejich tvaru pomocí deformace membrány. Prostřednictvím názorných příkladů je popsána a ověřena metoda návrhu tvaru skořepinových konstrukcí, pomocí MKP softwaru.

V kapitole 6 je na názorném příkladu průvěsu lana prokázána funkčnost metody numerického hledání výslednicového tvaru skořepinové konstrukce. Bylo prokázáno, že metoda je při srovnatelné přesnosti použitelná jak pro rovinné, tak i prostorové konstrukce.

V každé z kapitol 7, 8 a 9 je prostřednictvím iterativní numerické metody nalezen tvar, na jehož základě je navržena skořepinová konstrukce.

Pro ověření statického působení konstrukce a pro kontrolu optimálnosti nalezeného tvaru je nejdříve analyzována konstrukce s dokonale tuhým uložením.

V dalším kroku jsou některé dokonale tuhé podpory nahrazeny reálně tuhými podporami, zpravidla předpjatými trámy či táhly. Konstrukce je opětovně analyzována. Výsledkem je návrh tří skořepinových konstrukcí, které při zatížení vlastní tíhou vykazují nízké úrovně napjatostí a deformací, při ostatních zatěžovacích stavech jsou deformace a napětí v přijatelných mezích.

Pro ověření platnosti teoretických výpočtů je experimentálně ověřeno statické působení skořepiny pro „zastřešení sportovních hal a plaveckých bazénů“. Model a ekvivalentní modelové zatížení je navrženo dle *přibližné modelové podobnosti*.

Model v měřítku 1:55,56 je vytvořen technologií 3D tisku. Základní mechanické vlastnosti materiálu jsou ověřeny zkouškami.

Model byl osazen odporovými tenzometry a snímači deformace. Pomocí zavěšených závaží byly opakovaně simulovány jednotlivé kombinace zatížení a zjišťována poměrná přetvoření a deformace. Experimentálně zjištěné hodnoty napětí (poměrných přetvoření) a deformací velmi dobře odpovídají numericky určeným hodnotám na polymerním, bodově zatíženém modelu. Rozdílnost numericky stanovených průběhů napětí a deformací na betonové konstrukci a modelovým měřením je již o něco větší, avšak nijak nevybočuje z hranic *přibližné modelové podobnosti*.

Za důležitý vedlejší výsledek lze považovat i samotnou realizaci modelu metodou 3D tisku.

Na základě výše uvedeného popisu zpracování jednotlivých dílčích úkolů je zřejmé, že cíle disertační práce byly naplněny. Disertační práce nabízí metodu návrhu tvaru skořepinových konstrukcí, která je přiměřeně časově náročná, využívá cenově dostupný a relativně hojně rozšířený typ softwaru a je proveditelná a pochopitelná při běžné úrovni znalostí stavebního inženýra se zaměřením na statické výpočty.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] BLETZINGER, Kai-Uwe. NOVEL FORM OPTIMIZATION CONCEPTS OF SHELL AND MEMBRANE STRUCTURES [online]. Barcelona: European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS 2000, 2000 [cit. 2016-09-23]. Dostupné z: http://congress.cimne.com/eccomas/eccomas2000/pdf/908.pdf

[2] MUTTONI, Aurelio, Franco LURATI a Miguel FERNÁNDEZ RUIZ. Concrete shells - towards efficient structures: construction of an ellipsoidal concrete shell in Switzerland. Structural Concrete. 2013, 14(1), 43-50. DOI: 10.1002/suco.201200058. ISSN 14644177.

[3] ISLER, Heinz. Typologie und Technik der modernen Schalen. *Ingenieurbaukunst = L'art de l'ingénieur = The art of engineering*. 1983, **70**(12), 34-41.

[4] STRÁSKÝ, Jiří. Heinz Isler, stavitel skořepin. BETON - technologie, konstrukce, sanace: BETON TKS. 2013, 2013(02), 10-19. ISSN 1213-3116.

[5] Heinz Isler: a few important things. BUILDING LCC [online]. 2009 [cit. 2012-12-19]. Dostupné z: http://blog.buildllc.com/2009/04/heinz-isler-a-few-important-things/

[6] CHILTON, John C. Heinz Isler: The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture. Londýn: Thomas Thelford, 2000. ISBN 072772878.

[7] ISLER, Heinz. Technik und Typologie der Buckelschalen. Bauen + Wohnen: internationale Zeitschrift. Bauen + Wohnen GmbH, 1965, 1965(19), 384-388.

[8] ISLER, Heinz a A. WEDER. Die "Buckelschale", ein interessantes Bauelement. Schweizerische Bauzeitung. 1955, 1955, 346-349.

[9] Deitingen, Autobahn N1, Raststätte "Mövenpick Silberkugel". ETH-Bibliothek [online]. 2012 [cit. 2012-12-19]. Dostupné z:http://www.e-pics.ethz.ch/index/ethbib.bildarchiv/ETHBIB.Bildarchiv_Com_F68-13947_47759.html

[10] BLETZINGER, Kai-Uwe a Ekkehard RAMM. Structural optimization and form finding of light weight structures. *Computers* [online]. 2001,**79**(22-25), 2053-2062 [cit. 2016-10-05]. DOI: 10.1016/S0045-7949(01)00052-9. ISSN 00457949. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794901000529

[11] Analysis for Civil Structures: Midas Civil.

[12] BLAŽEK, Jan a Evžen HORÁČEK. *Nepřímé metody experimentální statiky*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959.

[13] MUSIL, Jiří. Prostorové konstrukce podepřené kabely a/nebo oblouky. Brno, 2012. Etapová zpráva o průběhu řešení projektu TA02011322 v roce 2012. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Jiří Stráský, Radim Nečas.

ŽIVOTOPIS AUTORA

OSOBNÍ ÚDAJE

Jméno	**Jiří Musil**
Datum narození	27. 03. 1983
Místo narození	Brno
Trvalé bydliště	Lipová 7, 680 01, Boskovice
Státní příslušnost	ČR

VZDĚLÁNÍ

2010 – dosud **Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební**
Doktorské studium
Obor: Konstrukce a dopravní stavby
Státní doktorská zkouška složena dne 17. 01. 2012

2002 – 2008 **Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební**
Magisterské studium, prezenční forma
Obor: Pozemní stavby – Konstrukce a statika staveb
Udělen titul Ing.

2005 – 2006 **Technische Universität Wien**
Fakultät für Bauingenieurwesen
V rámci programu Sokrates Erasmus

1998 – 2002 **SPŠ Stavební Brno**
Zakončeno maturitní zkouškou

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

2008 – dosud **Stráský, Hustý a partneři s.r.o.**
Asistent projektanta

JAZYKOVÉ ZNALOSTI

Mateřský jazyk	čeština
Ostatní jazyky	němčina, slovenština, angličtina

ABSTRACT

The theme of this doctoral thesis is the design of concrete shell structures with the focus on finding their optimal shape. The optimal shape of a concrete shell is the shape in which for a given load (usually the dead weight of the structure) no significant bending moments are generated in the shell and the structure is in the so-called membrane state.

The inspiration for this thesis is the work of Swiss engineer Heinz Isler, who developed the shapes of shell structures using model tests of appropriately loaded flexible membranes. He developed the shell structure for large spans by inverting the resultant shape, which carried its weight almost entirely via membrane forces. The numerical solution of the above experiments using Midas Civil is presented herein.

The basic principles of the method are demonstrated on the example of sagged cable. The numerically found shapes are compared with the analytical solution. A shell is designed based on the numerically found shapes and its stress response to dead load is described, particularly in relation to the membrane action.

In the next part, the acquired knowledge and methods were used to design three relatively complicated shell structures. Each structure was statically analysed and its static behaviour was described. Structures with perfectly rigid or flexible supports, which simulate real behaviour of the supports, were studied.

In the final phase, the results of static analysis of the selected shell were experimentally verified on a physical model in a scale of 1: 55.56. The model has been built using 3D printing. The thesis describes the use of a modelling similarity, the model design, the production process, and the experiment. The load test confirmed the optimal design of the shell structure and the validity of the numerical method for finding their shapes.