

NÁVRH OPRAVY SKOŘEPINOVÉ KONSTRUKCE ZASTŘEŠNÍ

Tomáš Malecký, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
tomas.malecky@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Článek je shrnutím diplomové práce (Malecký, 2018) a zabývá se návrhem opravy skořepinového zastřešení haly Vozovny Hloubětín v Praze. Pro účely této práce se předpokládalo ponechání stávajících podpůrných konstrukcí a zřízení nové betonové skořepiny. Takto navržená konstrukce byla ověřena podrobným statickým výpočtem, alternativní varianty řešení zastřešení byly navrženy pouze orientačně. Pro návrh nové konstrukce se okrajové podmínky v průběhu zpracování ukázaly jako velmi omezující z hlediska efektivity nové konstrukce. V hlavní části diplomové práce byla provedena rešerše na téma skořepin a shrnutí výpočtové části, společně s vyhodnocením a závěry práce. V tomto článku bude diplomová práce stručně shrnuta.

KLÍČOVÁ SLOVA

Skořepina • Železobeton • Zastřešení • Konoid

ABSTRACT

This article is a summary of a Master's thesis (Malecký, 2018) and its goal is to suggest a method of reparation of the roof shell over Vozovna Hloubětín hall in Prague. For the purpose of this work, the current supportive structures were to be kept intact as boundary conditions for the new shell structure. This structure was verified by a structural analysis, other variants were considered without a structural analysis. Boundary conditions proved to be very limiting for the design of the new structure in terms of efficiency of the structure. In the main part of the work there was a research on the topic of shell structures and a sum-up of the structural analysis together with evaluation of the work. Said thesis will be briefly summed up in this article.

KEYWORDS

Shell structures • RCC • Reinforced concrete • Roof • Conoid

1. ÚVOD

Tento článek vychází z diplomové práce [1].

Článek se zabývá obecně skořepinami a poté se zaměřuje na jeden konkrétní případ, kterým je návrh a ověření opravy zastřešení haly Vozovna Hloubětín v Praze.

V úvodní části článku je shrnutí „teorie“ z diplomové práce. Je zde shrnuto současné poznání o skořepinách z pohledu stavební mechaniky, dále několik zajímavých praktických příkladů skořepinových staveb, a nakonec několik poznámek pro praktické navrhování skořepin.

Další část článku se zabývá „praktickou“ částí diplomové práce, kterou byl návrh a ověření stávající konstrukce zastřešení. Jsou zde uvedeny různé varianty, které byly uvažovány pouze předběžně a poté finální varianta, která byla namodelována v MKP a ověřena dle platných norem.

2. TEORIE

2.1. Definice skořepin, základní pojmy

Skořepiny jsou prostorové konstrukce plošného charakteru, tj. na konstrukci převládají dva rozměry, zatímco třetí (tloušťka) je proti těmto dvěma mnohem menší. V případě rovinných prvků se jedná o desky, pokud jsou prvky prostorově zakřivené nazýváme je skořepinami.

Podle velikosti zakřivení směru působení zatížení je třeba při výpočtech o skořepinách uvažovat jako o deskostěnových konstrukcích. V ideálním (a čistě teoretickém) případě vzniká tzv. stav ideální membránové napjatosti, který je žádoucí a ve skutečných konstrukcích se mu snažíme co nejvíce přiblížit.

Membránová napjatost je stav, při kterém v konstrukci nevznikají žádné momentové účinky (ohybové ani kroutící). Tento stav je určen geometrickým tvarem skořepiny, zatížením a podmínkami uložení.

Střednicová plocha skořepiny je definována jako množina bodů půlící tloušťku skořepiny.

Základní veličiny popisující skořepinu jsou:

h – tloušťka skořepiny

R_i – poloměr zakřivení v rovině i

2.2. Členění skořepin dle namáhání

Trulstostěnné skořepiny jsou takové, kde tloušťka h je srovnatelná s R_{\min} . Neplatí Kirchhoffova hypotéza, jsou velmi složité řešitelné.

* Školitel: doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.

Tenkostěnné skořepiny; h je oproti R_{min} velmi malé. Lze zanedbat vliv smykových sil na deformaci normál ke střednicové ploše. Rozložení normálových napětí po výšce je lineární.

Nelineární tenkostěnné skořepiny nazýváme velmi tenké skořepiny, kde vznikají deformace srovnatelné s tloušťkou. Při jejich řešení je nutné uvážit geometrickou nelinearitu.

Membrány jsou speciálním typem skořepin, kde se vyskytují pouze normálové (popř. smykové) síly a napětí je rovnoměrně rozloženo po tloušťce konstrukce. Jsou charakterizovány tzv. membránovou napjatostí.

2.3. Členění skořepin dle tvaru

Skořepiny se nejčastěji dělí na skořepiny obecného tvaru, skořepiny vycházející z válcových ploch (speciálně pak rotační skořepiny). Je vhodné vzít zohlednit případnou symetrii. Tvarové dělení můžeme reprezentovat tzv. Gaussovou křivostí K , která je součinem dvou hlavních křivostí k_1 a k_2 .

$$k_1 = \frac{1}{R_1} \qquad k_2 = \frac{1}{R_2}$$

R_1 a R_2 – hlavní poloměry křivosti jsou největší a nejmenší poloměr v daném bodě (lze dokázat, že R_1 a R_2 leží v rovinách na sobě kolmých). Gaussova křivost je pak definována:

$$K = k_1 \cdot k_2 = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2}$$

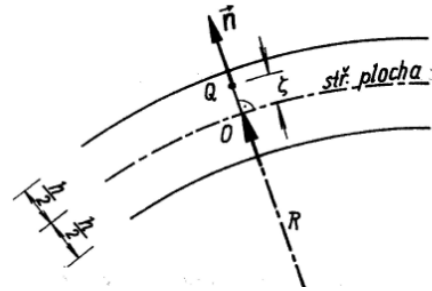
Pak lze skořepiny dělit podle Gaussovy křivosti jejich střední plochy:

Tabulka 1: Dělení skořepin dle Gaussovi křivosti

K	Geometrický tvar (např.)
> 0	Koule
< 0	Hyperbolický paraboloid
$= 0$	Válec
Různé dle místa na ploše	Anuloid

2.4. Teorie skořepin

Teorie skořepin je založena na možnosti rozvinout posuny a napětí do mocninné řady dle parametru ζ , který představuje vzdálenost obecného bodu Q od střednicové plochy skořepiny, viz Obr. 1.



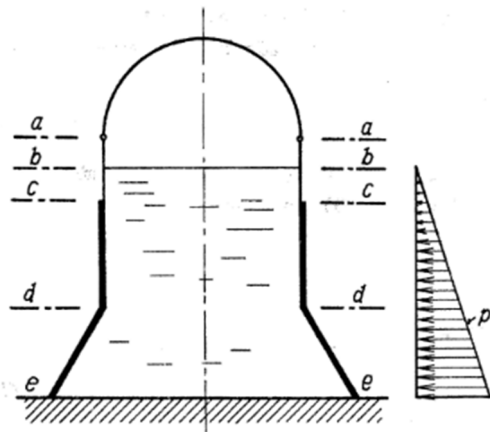
Obrázek 1: Parametr ζ

Budeme-li uvažovat pouze první dva členy řady (absolutní a lineární), dojdeme k *ohybové teorii skořepin*. Ta je obdobou Kirchhoffovy teorie ohybu tenkých desek.

Omezíme-li se pouze na absolutní člen, řešení bude na ζ nezávislé a zredukuje se na tzv. *membránovou teorii skořepin*.

Při uvažování nekonečného počtu členů by se dalo teoreticky získat exaktní řešení. Jeho obdobou je Cauchy-Poissonovo řešení ohybu desek. Konvergence těchto řad však dosud není prokázána.

Jednotlivé teorie jsou podrobněji popsány v diplomové práci [1]. V části o membránové teorii jsou popsána typická místa, kde může docházet k porušení membránové napjatosti, viz Obr. 2:



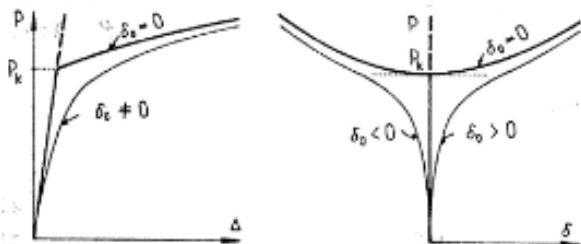
Obrázek 2: Poruchy membránové napjatosti

1. Okraje skořepiny (řez e-e)
2. Zlomy ve střednicové ploše (řez d-d)
3. Místa, kde se skokově mění křivost střednicové plochy (řez a-a)
4. Místa, kde se skokově mění tuhost skořepiny (řez c-c)
5. Křivky nespojitosti složek zatížení či jejich derivací (řez b-b)

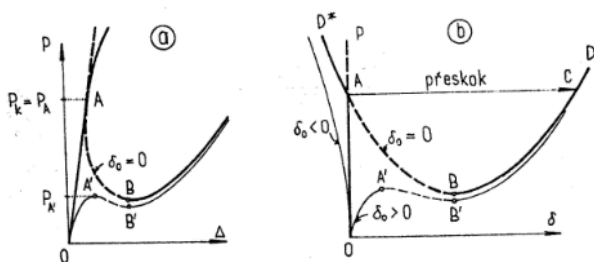
2.5. Stabilita skořepin

Stabilita skořepinových konstrukcí se liší od běžného problému „ideálního prutu“, na který inženýr naráží nejčastěji. Dochází nejen ke vzniku druhotných ohybových napětí, ale

i ke vzniku přidavných napětí na střednicové ploše, které nelze na rozdíl od prutu (nebo desky) zanedbat. Rozdíl v chování mezi prutem (deskou) a skořepinou je patrný z diagramů $P = P(\Delta, \delta_0)$ resp. $P = P(\delta, \delta_0)$ (Obr. 3 pro prut nebo desku, Obr. 4 pro skořepinu). Pro prut a desku je charakteristický symetrický tvar grafu, protože podmínky pro vznik kladné a záporné výchylky jsou stejné. Způsob zborcení skořepiny je do značné míry ovlivněn geometrií konstrukce. Pokud středy křivosti všech normálových řezů leží na jedné straně střednicové plochy, je experimentálně dokázáno, že se skořepina nejčastěji vybojí směrem ke středu křivosti.

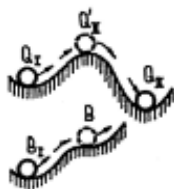


Obrázek 3: Ztráta stability prutu nebo desky (Δ - posun působíště síly, δ - výchylka)



Obrázek 4: Ztráta stability skořepiny

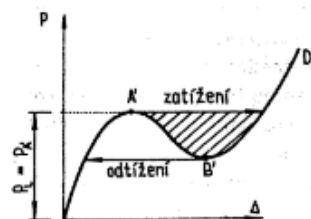
Pro skořepiny je v problému stability typický tzv. přeskok. Chování skořepiny za přeskoku je dobře ilustrováno známým modelem z teoretické mechaniky, kde dosaženou hladinu energie představuje poloha kuličky vedené po hladké křivce (Obr. 5, horní část obrázku). Popsaný jev se u skořepin nazývá prolomení („snapping“); v souvislosti s podkritickým zatížením hovoříme o proražení energetické bariéry.



Obrázek 5: Kulička na hladké křivce

Skutečné skořepiny se vždy vyznačují některými nedokonalostmi – geometrickými, způsob zatížení (popř. materiálové nehomogenity atd.). Imperfekce jsou příčinou poruch membránového stavu, tím vzniká rozdíl v chování už na počátku zatěžování. Skořepiny jsou na imperfekce velmi citlivé, viz Obr. 6. Při velikosti zatížení $P_{A'}$ ($P_{A'} < P_A$), imperfektní skořepina ztrácí stabilitu a nastává přeskok na

stabilní větev (opět s uvolněním kinetické energie). Při odtěžování pak nastane opačný přeskok – pokud však není stav dosažený přeskokem stabilní.



Obrázek 6: Imperfekce při ztrátě stability

2.6. Poznámky pro praktické navrhování skořepin

1. Ztužující prvek – je vhodné skořepinu doplnit o ztužující prstenec, který zajistí prostorovou stabilitu celé konstrukce. Případně jako ztužující prvky můžeme použít žebra, konstrukce se pak už pravděpodobně nebude chovat jako čistá skořepina, ale například pro zachování vnějšího vzhledu skořepiny a překonání velkých rozpětí se může jednat o vhodnou úpravu. Ztužující i podpůrné prvky je vhodné modelovat s jejich skutečnými vlastnostmi. Rozdíl ve velikosti výsledků pro pružnou a ideální podporu může bez problému dosahovat stovek procent, případně se zcela může změnit charakter namáhání.
2. Přechodová oblast – v oblastech, kde se skořepina stýká se ztužujícím prvkem nebo podpůrnou konstrukcí je třeba předpokládat větší porušení membránové napjatosti. V těchto místech je vhodné navrhnout lokální zvětšení tloušťky konstrukce. Je také vhodné se na tyto oblasti zaměřit v MKP softwaru (zahuštění sítě, dodržovat přesnou geometrii a okrajové podmínky).
3. Volba tvaru – často je v tomto směru mnoho omezení z architektonického hlediska, pokud je konstrukce potom staticky neproveditelná je třeba např. zvýšit tloušťku a přejít ke konstrukcím stěnovým nebo deskovým. Další možností je použít různé ztužující prvky a uvažovat konstrukci hybridní, popřípadě využít předpětí (dnes často používané u tvarově složitějších prefabrikovaných konstrukcích).
4. Nerovnoměrná zatížení a lokální břemena – skořepinové konstrukce na tato zatížení zpravidla bývají velmi náchylné, je proto důležité nevynechat tyto stavy ve statickém výpočtu, protože mohou mít rozhodující roli. Lokálním břemenům je ideální se zcela vyhnout, pokud je nezbytné nějaké lokální břemeno ke konstrukci připojit, je vhodné využít roznašecí desky, zavěsit jedno břemeno ve více místech atd.
5. Změny zatížení – tyto je důležité zohlednit např. při rekonstrukcích nebo změně charakteru užívání objektu (instalace nové technologie atd.). Stávající skořepina je pravděpodobně navržena tak, aby se co nejvíce přiblížila stavu membránové napjatosti, změna zatížení by tento stav mohla narušit a mít tak nežádoucí účinky na konstrukci.
6. Otvory – je možné je navrhovat. Nejvhodnější je otvor ve vrcholu nebo v polovině vzdálenosti mezi rohovými podporami. Obecně je výhodné volit otvory symetricky. Po obvodu otvorů je opět vhodné využít ztužující prvky.

3. PŘÍKLAD NÁVRHU SKOŘEPINY

Předmětem praktické části diplomové práce byl návrh a posouzení vhodné opravy střešních konstrukcí na hale Vozovny Hloubětín. Hala slouží jako tramvajové depo.

Stávající konstrukce byla postavena na začátku 50. let 20. století. Hala je rozdělena rámovými konstrukcemi do jednotlivých segmentů, které jsou zastřešeny separátními skořepinami - konoidy. Každá skořepina zastřešuje půdorysnou plochu 18,8 x 8,75 m.

Na stávající konstrukci se začaly po cca 50 letech provozu objevovat nadměrné deformace, proto bylo v roce 2013 provedeno její podrobné zaměření, diagnostický průzkum a statický přepočet. Výsledkem těchto prací byl návrh série opatření, která zajistí, že se stav konstrukce nebude zhoršovat, popř. nedojde k jejímu zřícení a ohrožení zaparkovaných tramvají nebo lidského zdraví.

V rámci tohoto výpočtu bylo uvažováno se zachováním stávajících podpůrných konstrukcí skořepin a zachováním stávajícího architektonického rázu celé haly.

3.1. Varianty návrhu

Ocelová žebra

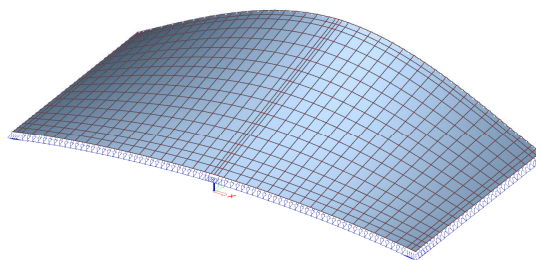
Tato varianta uvažovala s ponecháním stávající skořepiny, která byla vyrovnána do ideálního tvaru a podepřena válcovanými ocelovými profily (např. HEB). Předběžné výpočty naznačovaly rastr žeber cca po 1 m.

Od této varianty bylo upuštěno z důvodu velké pracnosti stavebního provedení. Bylo by třeba vyrovnávat lokální nerovnosti mezi ocelovým nosníkem a skořepinou. Nejsložitější by pravděpodobně bylo připojení ocelových nosníků ke stávajícím železobetonovým obloukovým trámům podél delších hran skořepinové konstrukce.

Konoid (Obr. 7)

Tato varianta uvažuje zachování původní geometrie, pouze by byla upravena tloušťka konstrukce (popř. náběhy) a navržena odpovídající betonářská výztuž. Případně je možná změna geometrie u spodního okraje skořepiny, kde může být křivka libovolně vedena po stávajícím trámu. Je nutno dodat že stávající tvar není ze statického hlediska zcela ideální, ve spodní části je velmi malá křivost, díky čemuž je většina zatížení přenášena pouze v podélném směru haly (ve směru kratšího rozpětí).

I přes svá omezení se tato varianta nakonec jeví jako nejvhodnější řešení. Konstrukce vyhověla při posouzení pro tloušťku 110 mm. Současně bylo odstraněno prostřední žebro, které nemělo zásadní vliv na chování konstrukce. Na všech okrajích byly zároveň navrženy náběhy, na kratších okrajích skořepiny na tloušťku 300 mm na vzdálenost 1000 mm od osy podpůrné konstrukce a na delších okrajích skořepiny na tloušťku 250 mm na vzdálenost 500 mm od okraje podpůrné konstrukce. Nová konstrukce skořepiny je také relativně jednoduše připojitelná ke stávajícím svislým a vodorovným konstrukcím (díky shodě okrajové geometrie).

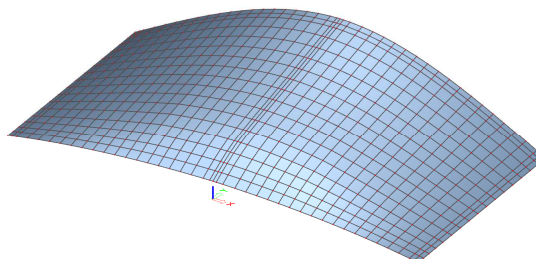


Obrázek 7: Geometrie střednicové plochy stávajícího konoidu

„Ideální“ tvar (Obr. 8)

Pro dané okrajové podmínky byla provedena analýza pro zjištění ideálního tvaru. Výpočet je založen na teorii obrácené řetězovky (viz [1], kapitola 3.4.4).

Výsledky byly sice lehce příznivější než pro konoid, ale složitost tvaru by zajisté vedla ke značnému navýšení nákladů na provedení, proto bylo od této varianty nakonec ustoupeno.



Obrázek 8: „Ideální“ tvar

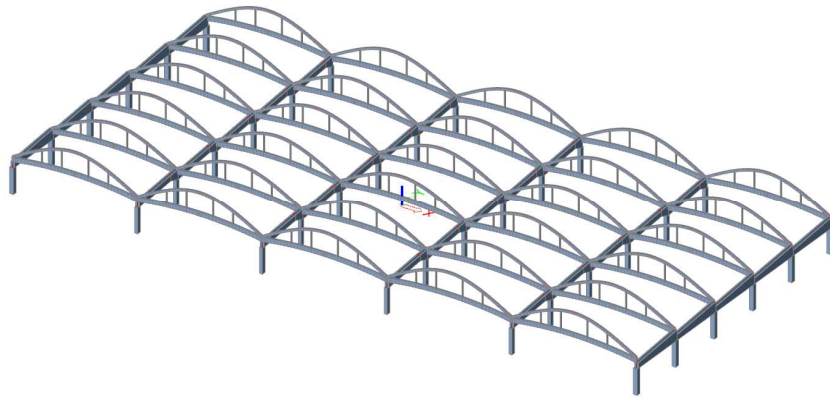
Ekonomický návrh

Byly zváženy i varianty, které by byly skutečně ekonomické. V tomto případě by se téměř jistě odstoupilo od požadavku na zachování stávajícího rázu konstrukce. Jako nejlepší varianta se jeví stržení skořepin a umístění trapézových plechů na ocelové nosníky na kratší rozpětí (8,75 m). Zde by bylo pouze třeba vyřešit odvedení srážkové vody z úžlabí střechy podél vazníků.

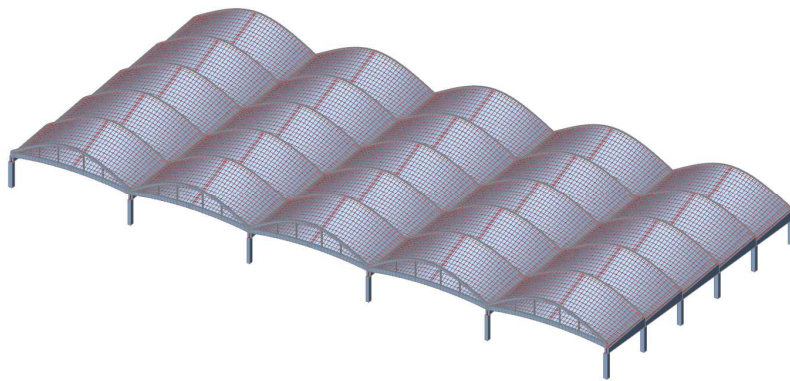
3.2. MKP model

Konstrukce byla modelována v programu SCIA Engineer. Předběžné výpočty byly prováděny na modelu, kde byly podpůrné konstrukce nahrazeny linií kloubovou podporou, poté byl vytvořen globální model pro celý dilatační celek zahrnující skutečné okrajové podmínky.

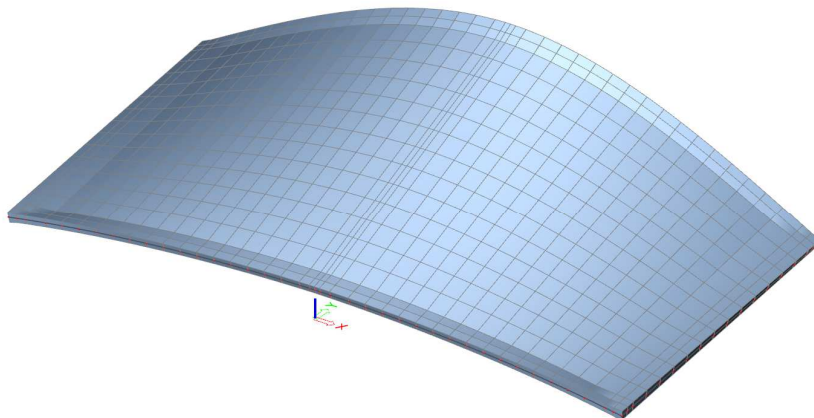
Jako menší problém se zde ukázalo vkládání samotné konstrukce do programu. Všechny body na skořepině jsou jednoduše matematicky popsatelné, takže se daly vložit tabulkově, ale vytvoření plošných prvků bylo komplikovanější.



Obrázek 9: *Podpůrné konstrukce*



Obrázek 10: *Model celého dilatačního celku*



Obrázek 11: *Jeden segment*

3.3. Zhodnocení navržené konstrukce

Konstrukce vyhoví dle platných norem, ale je velmi neefektivní. Při původním tvaru je na hranici proveditelnosti. Pokud by investor trval na skořepinové konstrukci bylo by vhodné změnit i podpůrné konstrukce, především zvýšit vzepětí ve spodním trámu, pravděpodobně pak rovněž zvýšit křivost u okrajů v příčném směru. Ze statického a pravděpodobně i ekonomického hlediska bude vhodnější volit jinou variantu konstrukce.

4. ZÁVĚR

V rešeršní části byla shrnuta základní specifika návrhu skořepinových prvků. Dále byla shrnuta základní terminologie skořepin, technologické a materiálové možnosti, zajímavé příklady, nakonec bylo zmíněno několik zásad pro navrhování skořepin v praxi.

V praktické části bylo zhodnoceno několik variant nového zastřešení Vozovny Hloubětín. Nejvhodnější z variant, která zásadně nezasahovala do charakteru celé stavby, byla následně detailně posouzena dle platných norem.

Nová konstrukce vyhověla podmínkám stability a odolnosti, ale je zřejmé, že při daných okrajových podmínkách je na hraně proveditelnosti a není efektivní.

5. PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří Ing. Michalu Drahorádovi, Ph.D. za vedení diplomové práce, poskytnuté rady a konzultace, bez kterých by vypracování nebylo možné. Další poděkování patří doc. Ing. Lukáši Vráblíkovi, Ph.D., díky kterému se mohu hlouběji věnovat tématu štíhlých konstrukcí, která mě zajímají.

6. BIBLIOGRAFIE

References

- [1] MALECKÝ Tomáš *Návrh opravy skořepinové konstrukce zastřešení*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí