

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra betonových a zděných konstrukcí**

Návrh opravy skořepinové konstrukce zastřešení

Design of shell roof repair

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. Michal Drahorád, Ph.D.

Bc. Tomáš Malecký

Praha 2017

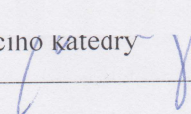


ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Malecký</u>	Jméno: <u>Tomáš</u>	Osobní číslo: <u>410156</u>
Zadávací katedra: <u>K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce a dopravní stavby</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Návrh opravy skořepinové konstrukce zastřešení</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Design of shell roof repair</u>	
Pokyny pro vypracování: - studie stávající konstrukce zastřešení a možností její opravy - ověření stávajících nosných konstrukcí zastřešení a návrh opravy, včetně návrhu případných nových konstrukcí	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Michal Drahorád</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>04.10.2017</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>8.1.2018</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry 

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

<u>25.10.2017</u>	Podpis studenta(ky)
Datum převzetí zadání	



Prohlašuji, že jsem přiloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne:

Podpis:

Bc. Tomáš Malecký



Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří přispěli k dokončení mé diplomové práce. Především děkuji Ing. Michalu Drahorádovi, Ph.D. za poskytnuté rady a konzultace, bez kterých by vypracování nebylo možné.



ABSTRAKT

Předmětem této práce je návrh opravy skořepinového zastřešení haly Vozovny Hloubětín v Praze. Pro účely této práce se předpokládalo ponechání stávajících podpůrných konstrukcí a zřízení nové monolitické betonové skořepiny. Takto navržená konstrukce byla ověřena podrobným statickým výpočtem, alternativní varianty řešení zastřešení jsou navrženy pouze orientačně, na základě poznatků získaných zpracováním této práce. Pro návrh nové konstrukce se okrajové podmínky v průběhu zpracování ukázaly jako velmi omezující z hlediska efektivity nové konstrukce.

V hlavní části diplomové práce je uvedena rešerše na téma skořepin a shrnutí výpočtové části, společně s vyhodnocením a závěry práce. V příloze je pak doložen podrobný statický výpočet konstrukce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Skořepina, železobeton, zastřešení, konoid



ABSTRACT

The goal of the work 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 are to be kept intact as boundary conditions for the new shell structure. This structure is to be verified by a structural analysis, other variants will be considered without a structural analysis based on the experience gained in the process of making this work. 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 is a research on the topic of shell structures and a sum-up of the structural analysis. The attachment consists of structural analysis of the new structure.

KEYWORDS

Shell structure, RCC, reinforced concrete, roof, conoid



OBSAH

1	ÚVOD.....	8
2	CÍLE.....	9
3	SKOŘEPINY	10
3.1	ÚVOD.....	10
3.2	ÚVOD DO TÉMATIKY SKOŘEPIN.....	10
3.2.1	DEFINICE POJMU SKOŘEPINA	10
3.3	ČLENĚNÍ SKOŘEPIN.....	11
3.3.1	DĚLENÍ DLE NAMÁHÁNÍ.....	11
3.3.2	TVAROVÉ DĚLENÍ SKOŘEPIN	11
3.4	POUŽITÍ VE STAVEBNÍ PRAXI.....	13
3.5	HISTORIE SKOŘEPIN.....	13
3.6	ZAJÍMAVÉ REALIZACE.....	14
3.7	NÁVRH SKOŘEPIN	17
3.7.1	STATIKA	17
3.7.2	TECHNOLOGIE	27
3.7.3	EKONOMICKÝ NÁVRH.....	28
3.7.4	URČENÍ VHODNÉHO TVARU	29
3.7.5	POZNÁMKY DO PRAXE	30
3.7.6	KLADY A ZÁPORY.....	31
3.8	SHRNUTÍ	32
4	NÁVRH OPRAVY ZASTŘEŠENÍ VOZOVNY HLOUBĚTÍN	33
4.1	ÚVOD.....	33
4.2	POPIS NOVÉ KONSTRUKCE	33
4.3	VARIANTY S VĚTŠÍM ZÁSAHEM DO KONSTRUKCE	34
5	ZÁVĚR.....	35
6	BIBLIOGRAFIE	36
7	SEZNAM PŘÍLOH.....	37



1 ÚVOD

Tématem této diplomové práce je návrh a ověření opravy zastřešení haly Vozovna Hloubětín v Praze.

Stávající zastřešení je skořepinová konstrukce postavená v 50. letech 20. století. Každý skořepinový segment ve tvaru konoidu zastřešuje plochu o rozměrech 18,8 m x 8,75 m, na kratších okrajích je vetknut do průvlaků a na delších okrajích vetknut do obloukových trámů. Podrobný popis geometrie skořepiny i podpůrných konstrukcí je uveden v Příloze 1: Statický výpočet – kapitola 2.1. Stávající konstrukce skořepiny má charakteristickou tloušťku 50 mm a po cca 50 letech provozu se začaly projevovat nadměrné deformace neslučitelné s dalším užíváním objektu. Proto byly v roce 2013 provedeny práce pro zjištění jejího skutečného stavu a byla přijata opatření, která zabránila dalšímu zhoršování stavu konstrukce (dočasné podepření konstrukce). Následně byly zahájeny práce na přípravě celkové rekonstrukce objektu.

V rámci této práce bude proveden alternativní návrh opravy konstrukce. Bude navrženo a předběžným výpočtem ověřeno několik variant opravy, nejvhodnější varianta pak bude podrobně ověřena na přesném modelu a posouzena dle platných norem pro navrhování. Prioritou návrhu bude zachování co největší podoby s konstrukcí stávající; varianty zásadně měnící charakter celé haly budou probrány pouze slovně a stručně.



2 CÍLE

Cílem diplomové práce je návrh a posouzení opravy konstrukce zastřešení tramvajové haly v Praze Hloubětíně. Prioritou návrhu je maximální dodržení tvarového řešení stávající konstrukce. Současné provedení je skořepinové, ale části konstrukce jsou v nepřijatelném technickém stavu.

V rámci práce bude proto navržena nová konstrukce, která má nahradit nejvíce poškozené segmenty, popř. všechny segmenty konstrukce. Prioritou bude co nejmenší zásah do provozu a stávající konstrukce.



3 SKOŘEPINY

3.1 ÚVOD

Tato část práce je věnována rešerši na téma skořepiny. V oblasti teoretické mechaniky nebudou všechna odvození rozebrána dopodrobna, není to cílem této práce.

3.2 ÚVOD DO TÉMATIKY SKOŘEPIN

3.2.1 DEFINICE POJMU SKOŘEPINA

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 nevznikají žádné momentové účinky (ohybové ani krouťící). 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



3.3 ČLENĚNÍ SKOŘEPIN

Skořepiny nejčastěji dělíme dle tvaru, křivosti a způsobu namáhání.

3.3.1 DĚLENÍ DLE NAMÁHÁNÍ

Tlustostěnné skořepiny jsou takové, kde tloušťka h je srovnatelná s R_{\min} . Neplatí Kirchhoffova hypotéza (viz 3.4.1.2), jsou velmi složitě řešitelné.

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 (viz 3.2.1).

3.3.2 TVAROVÉ DĚLENÍ SKOŘEPIN

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 3-1 Dělení skořepin dle Gaussovi křivosti

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

3.3.2.1 TRANSLAČNÍ SKOŘEPINY

Válcové plochy apod., typicky používané jako konstrukce zastřešení. Samotná skořepina může být buď uložena přímo do základu nebo stát na podpůrné konstrukci (sloupy, stěny, příhradové konstrukce atd.), a to buď s táhlem nebo bez něj. Pokud chceme zvýšit prostorovou stabilitu těchto konstrukcí můžeme je buď „zvlnit“ nebo vložit žebra.

3.3.2.2 ROTAČNÍ SKOŘEPINY

V této skupině najdeme např. rotační hyperboloid, který je typickým tvarem pro chladicí věže, jednu z nejrozšířenějších aplikací skořepin v současnosti.

Další hojně zastoupenou skupinou zde bude koule (popř. elipsoid), resp. její části. Tyto konstrukce byly využívány zejména historicky jako konstrukce zastřešení (kopule).

3.3.2.3 SKOŘEPINY DVOJÍ KŘIVOSTI

Rozšířené jako zastřešení průmyslových objektů. Jedná se o „kopule“ na obdélníkovém půdorysem. Často navazují na práci H. Islera (viz kapitola 3.4.4), který tento typ konstrukcí „tabeloval“ pro různé půdorysné rozměry hal.

3.3.2.4 OSTATNÍ

Ze zatím nezmiňovaných geometrických variant zbývá jedna častější – parabolický hyperboloid. Obzvláště jeho speciální případ sedlová plocha (ohraničena čtyřmi přímkami) bývá používán jako tvar zastřešení.



Nakonec je třeba uvést skořepiny obecné. Tyto nejčastěji vznikají za účelem architektonickým, proto tvar nebývá příliš efektivní a zpravidla je třeba tyto konstrukce předpínat.

3.4 POUŽITÍ VE STAVEBNÍ PRAXI

Jak bylo zmíněno v předešlých kapitolách, zdaleka nejčastěji bývají skořepinové konstrukce využívány jako zastřešení. Další rozšířené využití je v průmyslu, kde se jedná o konstrukce komínového typu (hlavně chladící věže) nebo sklady sypkých materiálů. Popřípadě se může jednat o naprosto libovolné konstrukce, kde je kladen důraz na architektonickou stránku.

Z inženýrského hlediska jsou (při správném návrhu) velmi efektivní z hlediska využití materiálu. Na druhou stranu je třeba vzít v úvahu případnou složitost bednění a nepřesnosti na stavbě.

3.5 HISTORIE SKOŘEPIN

Skořepiny se historicky vyvinuly z kleneb, které se také snaží přizpůsobit svůj tvar působícímu zatížení tak, aby bylo namáhání ideální. Jako další předchůdce skořepin můžeme zařadit kopulové konstrukce zastřešení v sakrální architektuře, velmi rozšířené např. v Římské říši; od dnešních skořepin se lišily převážně větší tloušťkou, popř. použitím žeber. Jako příklad by zde mohl být uveden římský Pantheon, postaven kolem roku 100 n.l., kde byl jako materiál použit předchůdce prostého betonu.

Co se týče skořepin dle současné definice, ty se začaly rozmáhat ve 30. letech 20. století. Byly využívány zejména pro zastřešení objektů o větším rozpětí a výhodné byly díky vysokému využití materiálu. Zájem o skořepiny upadal během 60. let, a to hlavně kvůli pracnosti provádění a zdražení pracovní síly v tomto období. Renesance skořepin nastala během 90. let 20. století, a to díky rozvoji výpočetních metod, které umožňují (ve správných rukou) poměrně



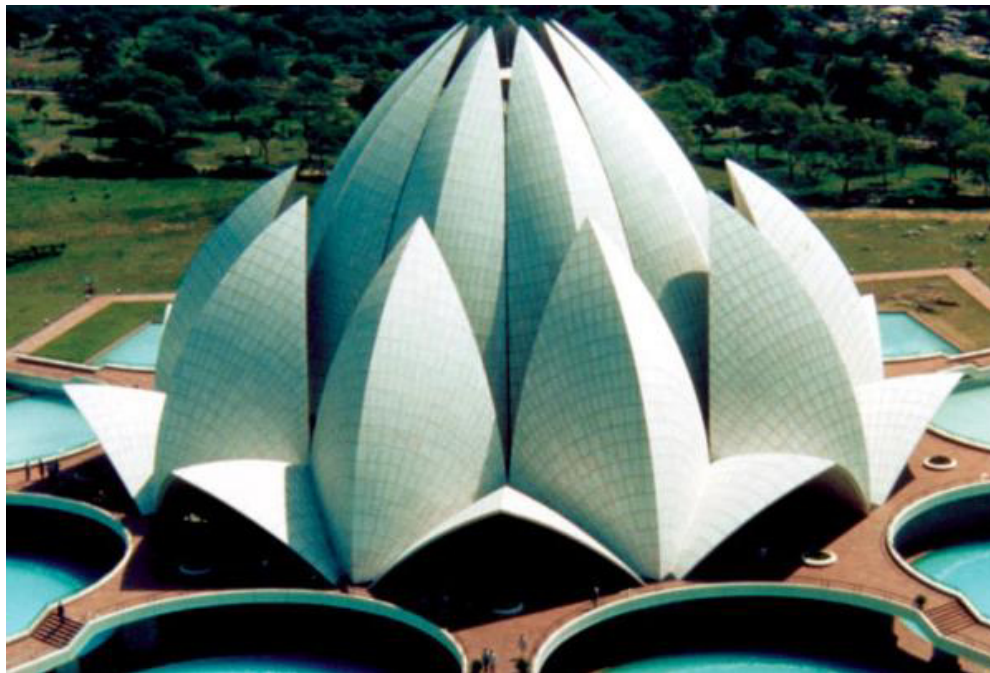
rychlý návrh efektivní konstrukce. Dnes už nejsou skořepiny tolik atraktivní kvůli úspoře materiálu, ale spíše díky neuvěřitelné variabilitě tvarů z architektonického hlediska.

3.6 ZAJÍMAVÉ REALIZACE

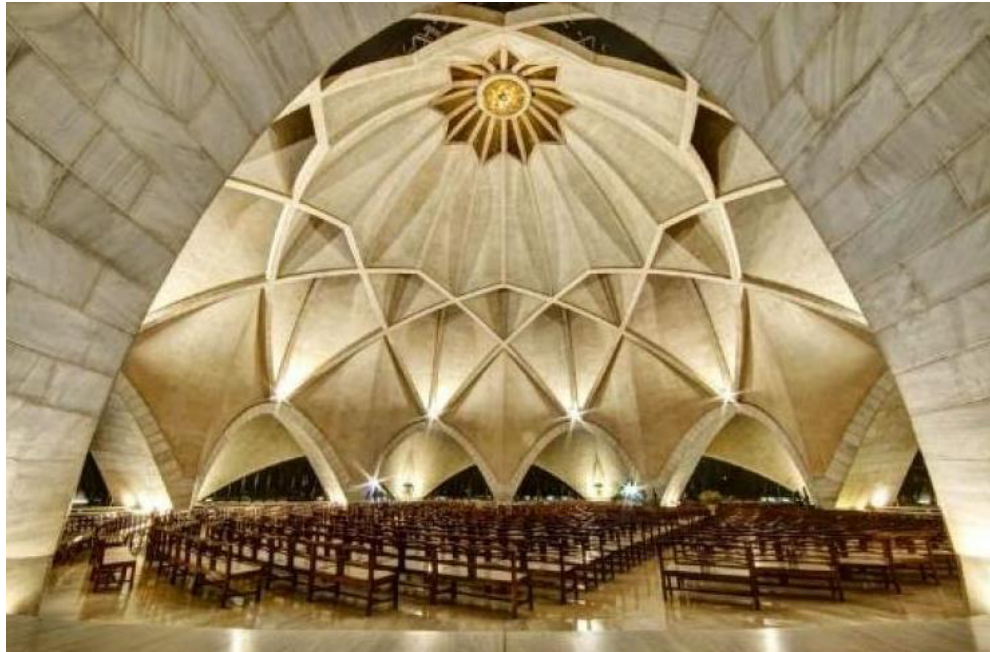
Zajímavých realizací je ve světě mnoho, zde bude uvedeno několik příkladů, které zaujaly autora práce.

Lotus Temple, New Delhi, India

Dokončen v roce 1986. Konstrukce je rotačně rozdělena na devět stejných částí, tvary skořepin jsou ohraničeny žebry. Na vrcholu konstrukce je ponechán otvor pro vstup přírodního světla. Skořepiny jsou z prefabrikovaného betonu, pokryté mramorem.



Obr. 1 Lotus Temple – exteriér



Obr. 2 Lotus Temple – interiér

Sydney Opera House, Sydney, Australia

Stavba byla dokončena v roce 1973. Jedná se o jednu z nejznámějších moderních staveb. Autorem je dánský architekt Jorn Utzon; návrh byl tak komplikovaný, že při výpočtech byla pravděpodobně poprvé ve stavitelství použita výpočetní technika. Po dlouhých pokusech určit optimální tvar „plachet“ došli projektanti k závěru, že nejvhodnější bude všechny části konstrukce zhotovit jako různé segmenty jedné koule o poloměru 150 m. Tím se dosáhlo obrovského zjednodušení (a zlevnění) výroby. Celá skořepina se skládá z komorových žebor, která jsou podélně rozdělena na menší segmenty. Díky tomu, že všechny tvary vychází z jedné koule, jsou téměř všechna žebra identická, výjimku tvoří pouze delší žebra, jež více segmentů. Všechna žebra jsou pak spojena epoxidovým tmelem, který zabraňuje vzájemné dilataci při působení teplotních změn.



Obr. 3 Sydney Opera House

Zahradní centrum Florétites, Clause SA, St. Appoline, Paris

Konstrukce Heinze Islera z roku 1965. Jedná se o skořepinu tloušťky 80 mm o diagonálním rozpětí 41 m, půdorys je pětiúhelník. Na zaoblených okrajích je úmyslně zvolena opačná křivost, než je vhodná; tyto prvky tvoří ztužující prostorový rám a zároveň slouží jako „odvodňovače“. Vodorovné síly jsou pak zachyceny předpjatými táhly. Jedná se o jednu z mnoha skořepin volného tvaru tohoto autora. Více viz 3.4.4, [1; 2].



Obr. 4 Zahradní centrum Florétites

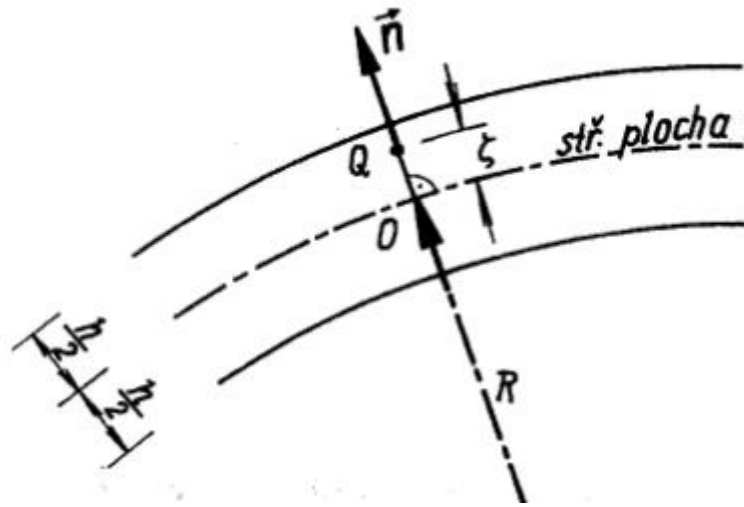
3.7 NÁVRH SKOŘEPIN

3.7.1 STATIKA

3.7.1.1 TEORIE SKOŘEPIN

Zakřivení skořepin je voleno takové, aby došlo k co nejpříznivějšímu rozložení vnitřních sil. Skořepina se chová jako kombinace desky a stěny.

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. 5.



Obr. 5 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.

3.7.1.2 OHYBOVÁ TEORIE SKOŘEPIN

Ohybová teorie vychází ze dvou Kirchhoffových předpokladů:

1. Normály ke střednicové ploše skořepiny přejdou po deformaci opět v normály, avšak zdeformované střednicové plochy. Přitom vzdálenost bodů ležících na téže normále se deformací nemění.
2. Normálové napětí σ_n , orientované do směru normály \vec{n} , je oproti složkám působícím rovnoběžně se střednicovou plochou zanedbatelné.

Skořepiny vyhovující svým tvarem podmínce



$$\lambda = h/R_{min} \ll 1$$

se nazývají tenké. Ve stavební praxi se jiné nepoužívají, proto se dále budeme zabývat pouze těmito skořepinami. Všechny rovnice jsou odvozeny pro konstantní nebo slabě proměnnou tloušťku (derivace λ dle souřadnice zavedené na střednicové ploše je nejvýše téhož řádu jako λ). Dále je během těchto odvození samozřejmě uvažována teorie malých deformací.

Odvození všech teoretických rovnic pro výpočet vnitřních sil, napětí a deformací je přehledně shrnuto ve skriptu [3] na str. 5-17. Je zde provedena definice pole posunutí, odvození geometrických rovnic, odvozeny rovnice pro vnitřní síly a vyřešení rovnice rovnováhy.

Za zmínku zde stojí, že během odvozování geometrických rovnic je vhodným pootočením základní soustavy (do hlavních směrů křivosti) snížen počet vystupujících parametrů z osmi na šest. Jedná se o tyto:

1. $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma$ - reprezentující délkové a úhlové změny na střednicové ploše („stěnový efekt“)
2. κ_1, κ_2, τ - vyjadřující změny křivosti střednicové plochy způsobené ohybem a kroucením skořepiny („deskový efekt“)

Z úprav rovnic rovnováhy pak vyplynou tyto vztahy:

1. $-\frac{\partial}{\partial \alpha_1}(m_{12}A_2) + m_1 \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} - \frac{\partial}{\partial \alpha_2}(m_2A_1) - m_{21} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} + q_2A_1A_2 = 0$
2. $\frac{\partial}{\partial \alpha_1}(m_1A_2) + m_{12} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial}{\partial \alpha_2}(m_{21}A_1) - m_2 \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} + q_1A_1A_2 = 0$
3. $\frac{m_{12}}{R_1} - \frac{m_{21}}{R_2} + \frac{1}{R_{12}}(m_1 - m_2) + n_{12} - n_{21} = 0$

Třetí rovnice je pouze jiným zápisem známé věty o vzájemnosti smykových napětí $\sigma_{12} = \sigma_{21}$.

Jako další krok je třeba vzájemně propojit deformační a silové faktory. Skriptum ([3], str. 14) toho dosahuje za pomoci rovnice pro potenciální energii deformace. Výsledné vztahy pak jsou:

1. $n_1 = \frac{Eh}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2)$



$$\begin{aligned} 2. \quad n_2 &= \frac{Eh}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1) \\ 3. \quad n_{12} &= \frac{Eh}{2(1+\nu)} \left(\gamma + \frac{h^2\tau}{GR_2} \right) \\ 4. \quad n_{21} &= \frac{Eh}{2(1+\nu)} \left(\gamma + \frac{h^2\tau}{GR_1} \right) \\ 5. \quad m_1 &= \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} (\kappa_1 - \nu\kappa_2) \\ 6. \quad m_2 &= \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} (\kappa_2 - \nu\kappa_1) \\ 7. \quad m_{12} &= \frac{Eh^3}{12(1+\nu)} \tau \\ 8. \quad m_{21} &= \frac{Eh^3}{12(1+\nu)} \tau \end{aligned}$$

Tyto fyzikální rovnice vážou osm silových a osm deformačních faktorů. Jak je uvedeno v této kapitole, k popisu pole deformace stačí znát šest parametrů deformace (ε_1 , ε_2 , γ , κ_1 , κ_2 , τ). Proto se také používá šest silových veličin n_1 , n_2 , t , m_1 , m_2 , $2k$, které jsou s parametry deformace sdruženy ve smyslu virtuálních posunutí, a tudíž stačí pro popsání pole napětí.

$$t = n_{12} - \frac{m_{21}}{R_2} = n_{21} - \frac{m_{12}}{R_1} = \frac{Eh}{2(1+\nu)} \gamma; \quad k = \frac{1}{2} (m_{12} - m_{21}) = \frac{Eh^3}{12(1+\nu)} \tau$$

Jako poslední krok je třeba popsat metody řešení a jejich aplikace v technické praxi. Existují dva způsoby řešení – deformační a silová metoda. Metoda deformační má za neznámé posuny bodů na střednicové ploše (u , v , w) a řeší se integrací tří statických rovnic, za pomoci rovnic geometrických a fyzikálních. Řešení deformační metodou vede na diferenciální systém rovnic osmého řádu, který lze převést na jednu diferenciální rovnici osmého řádu pro jednu neznámou (např. „průhyb“ w). Silová metoda má neznámé silové faktory (n_1 , n_2 , t , m_1 , m_2 , $2k$) a řeší se pomocí tří statických rovnic doplněných o tři rovnice kompatibility.

V teorii skořepin se asi nejlépe ujala smíšená metoda, která využívá jedné rovnice rovnováhy (obdoba deskové rovnice) a jedné rovnice kompatibility (obdoba stěnové rovnice). Vystupují zde dvě neznámé – průhyb w a funkce



napětí \mathbf{F} (popř. jiná silová veličina). Tyto dvě rovnice spolu opět tvoří diferenciální systém osmého řádu.

Vzhledem ke složitosti výsledných rovnic vznikla tzv. technická teorie skořepin, která zanedbává vliv tečných posunů u_1 a u_2 ve střednicové ploše na pootočení normály. Toto zjednodušení pak vede na „ručně“ řešitelné rovnice.

3.4.1.3 MEMBRÁNOVÁ TEORIE SKOŘEPIN

Při řešení skořepin za membránového stavu neuvažujeme členy vyjadřující ohybové a kroučící účinky:

$$m_1 = m_2 = m_{12} = m_{21} = 0$$
$$q_1 = q_2 = 0$$

Z fyzikálních rovnic vyplývá, že tyto podmínky mohou být splněno ve dvou případech:

1. Pro dokonale ohebné membrány, kde Eh je konečné, avšak $Eh^3 \neq 0$.
2. U reálných skořepin ($Eh^3 \neq 0$), které sice mohou přenášet ohybové účinky, ale při daném způsobu podepření, geometrii skořepiny a zatížení jsou změny křivosti střednicové plochy zanedbatelné.

Z inženýrského hlediska představuje membránová napjatost nejpříznivější způsob namáhání skořepiny a každý konstrukční návrh by se mu měl snažit co nejvíce přiblížit.

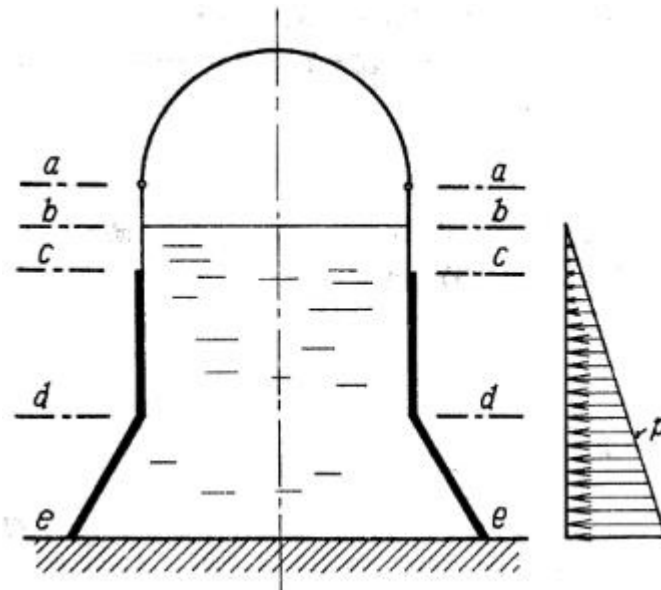
Pro tři vnitřní síly n_1, n_2, t máme právě tři podmínky rovnováhy. Úloha je tedy staticky určitá. To znamená, že statické rovnice a okrajové podmínky stačí k určení vnitřních sil. Poté můžeme přejít k výpočtu parametrů deformace $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma$. Pro ně máme soustavu tří diferenciálních rovnic (u_1, u_2, w jako neznámé). Jako poslední krok zbývá dopočítat změny křivosti střednicové plochy κ_1, κ_2, τ a přesvědčit se, že vliv kroučících a ohybových momentů v reálné skořepině je opravdu zanedbatelný.

V porovnání s ohybovou teorií je membránová teorie výrazně jednodušší, co se týče řešitelnosti. V membránové teorii jsou rovnice integrovatelné



v uzavřeném tvaru pro velké množství úloh, se kterými se inženýr může v praxi setkat. Naproti tomu diferenciální rovnice v ohybové teorii tvoří složitý systém osmého řádu, který vyžaduje na každém okraji zavést čtyři okrajové podmínky.

Nakonec je důležité vzít v potaz oblast použitelnosti membránové teorie. Problémy mohou nastat v těchto místech (řezy na Obr. 6):



Obr. 6 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)

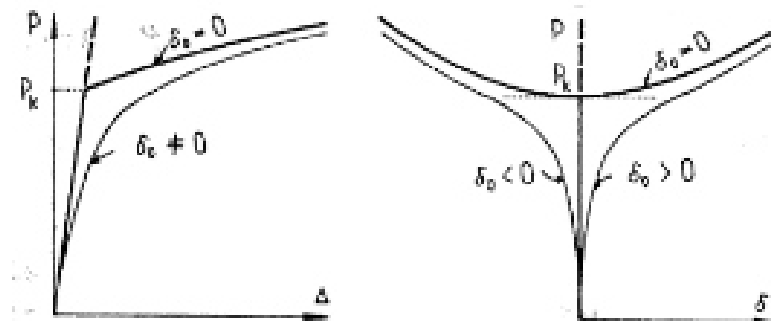
Poruchy membránové napjatosti se vyšetřují ve dvou krocích. V prvním kroku řešíme skořepinu podle membránové teorie a toto řešení přibližný partikulární integrál obecného problému (řešení vyhovuje jen některým okrajovým podmínkám). V druhém kroku řešíme diferenciální rovnice ohybové teorie, v níž položíme složky zatížení p_1 , p_2 , p_n rovny nule (řešení pak vyhovuje všem okrajovým podmínkám). Ve skriptu [3] je pak ukázáno, jak lze ručně řešit



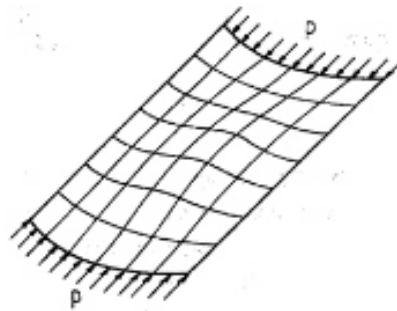
skořepiny membránovou teorií na speciálních případech skořepin (rotačně symetrické skořepiny, válcové skořepiny, ploché skořepiny).

3.4.1.4 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 přídatných 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. 7 pro prut nebo desku, Obr. 9 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.

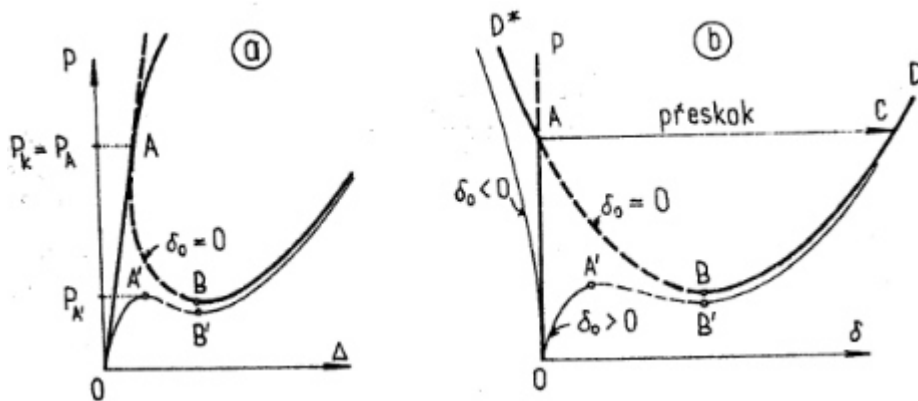


Obr. 7 Ztráta stability prutu nebo desky (Δ - posun působitě síly, δ - výchylka)



Obr. 8 Příklad skořepiny

Jako příklad vezměme skořepinu na Obr. 8. Jako kladnou výchylku budeme uvažovat výchylku směřující do středu křivosti. Chování ideální skořepiny (skořepiny v ideální membránové napjatosti) je znázorněno na Obr. 9, na dráze OABD. Na grafu vidíme, že zatížení P monotónně roste až do hodnoty P_K , při níž nastává bifurkace rovnováhy (nesymetrický bifurkační bod A). Skořepina v bodě A ztrácí stabilitu a za předpokladu, že se zatížení $P \equiv P_K$ nezmění, nastane přeskok v diagramu P - δ do bodu C . Následující zatěžování probíhá po stabilní větvi CD .

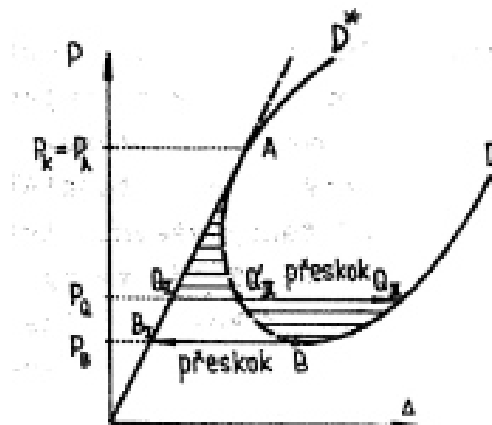


Obr. 9 Ztráta stability skořepiny

Je vhodné objasnit, zda by mohlo dojít ke ztrátě stability při zatížení menším než P_K . Uvažujme příklad $P = P_0$ na Obr. 10. Skořepina zde zaujímá určitou rovnovážnou konfiguraci, kterou nazveme počátečním stavem. Ten je charakterizován fundamentální drahou (procházející bodem O). Skořepina pak

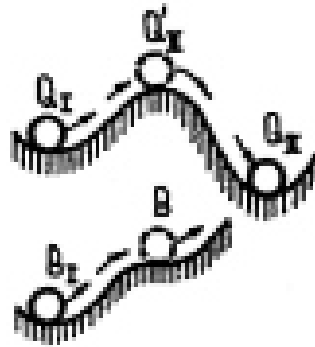


při dalším zatěžování má větší potenciální energii, než v počátečním stavu (jelikož původní uvažovaný stav je stabilní). Z toho ovšem vyplývá, že se skořepina „snaží“ vrátit zpět k počátečnímu stavu. Pak platí, že nebude stačit infinitezimálně malý přírůstek deformace k překonání energetické bariéry a je třeba dodat dostatečný vnější podnět, aby se mohl přeskok do dalšího tvaru uskutečnit. Bariéra pro přechod do bodu Q'_{II} je znázorněna obrazcem $Q_1AQ'_{II}$. V labilní rovnováze (bod Q'_{II}) skořepina nesetrvá a přeskóčí do bodu Q_{II} s kinetickou energií rovnající se obsahu obrazce $Q'_{II}BQ_{II}$. Uvolnění kinetické energie s sebou dle zákona zachování energie nese pokles potenciální energie systému. Ta může být dle dosažené úrovně P_Q na konci přeskoku větší, stejná nebo menší než na jeho začátku.



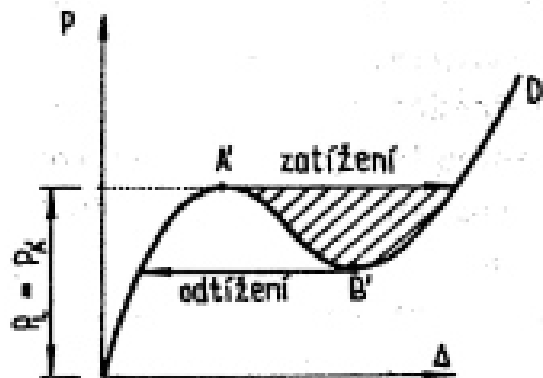
Obr. 10 Prolomení skořepiny

Chování skořepiny za přeskoku je dobře ilustrováno známým modelem z teoretické mechaniky, kde dosaženou hladinu energie představuje poloha kuličky vedené po hladké křivce (Obr. 11). Z polohy kuličky v bodu B je zřejmé, že rovnováha je zde labilní a při odtížení dojde k návratu do bodu B1. Popsaný jev se u skořepin nazývá **prolomení** („snapping“); v souvislosti s podkritickým zatížením P_Q hovoříme o proražení energetické bariéry.



Obr. 11 Kulička na hladké křivce

Skutečné skořepiny se vždy vyznačují některými nedokonalostmi – geometrickými, způsob zatížení (popř. materiálové nehomogenity atd.). Imperfekce jsou příčinou poruchy membránového stavu, tím vzniká rozdíl v chování už na počátku zatěžování. Skořepiny jsou na imperfekce velmi citlivé, viz Obr. 12. 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 v bodě B' .



Obr. 12 Imperfekce při ztrátě stability

S ohledem na nevyhnutelnost imperfekcí je pravděpodobné, že bifurkace bude spíše výjimkou než pravidlem. Přesto má vyšetřování bifurkačních stavů i praktický význam. Dosažení bifurkačního bodu lze stanovit na základě lineární teorie stability, pokritické stádium se vyšetřuje jedině prostředky nelineární analýzy. Výhodnější bývá vyšetřovat pokritický stav podle celkové změny



potenciální energie systému a brát přitom v úvahu všechny tvary zborcení, které v bifurkačním bodě předpovídá lineární teorie. Stejně tvary pak lze použít pro posouzení citlivosti konstrukce na malé imperfekce. Získáme tak poměrně jednoduchý, ale i dostatečně spolehlivý vzorec pro odhad kritického limitního zatížení.

Pro posouzení stability skořepin jsou tedy významné dva kritické stavy. První je charakterizován bifurkací rovnováhy na ideální skořepině, druhý prolomením skořepiny skutečné. Odpovídající zatížení nazveme kritické bifurkační zatížení $P_A = P_K$ resp. kritické limitní zatížení P_A' .

Do hloubky je tento problém rozebrán ve skriptu [4].

3.4.1.5 PODEPŘENÍ, OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Z hlediska mechaniky můžeme předepisovat následující okrajové podmínky: posuny a vnitřní síly nebo jejich derivace.

V praxi, kde v dnešní době všechn výpočet skořepin probíhá pomocí softwaru, je třeba se pozorně věnovat několika skutečnostem. V reálné konstrukci v oblasti blízko podpor budou vždy vznikat nenulové ohybové momenty, na tuto oblast se musíme detailně zaměřit (zahuštění sítě MKP atd.). Dále je vhodné nemodelovat podpory skořepiny jako ideální, ale s reálnou tuhostí (tj. např. vymodelovat i podpurné stěny); tím dosáhneme dalšího přiblížení reálným průběhům sil ve skutečné konstrukci.

3.7.2 TECHNOLOGIE

Z materiálového hlediska máme tyto možnosti: prostý beton, železobeton, beton s rozptýlenou výztuží a předpjatý beton.

Prostý beton, nebo stavební materiály jemu podobné, byly využívány zejména historicky pro stavbu střešních kopulí (Pantheon, Řím)



Železobeton je dnes nejrozšířenější volbou. Výztuž je v nepodporové oblasti spíše konstrukční, případně pro stavy na hranici MSÚ; v krajní oblasti pak pomáhá přenést ohybové účinky.

Beton s rozptýlenou výztuží využijeme tam, kde z určitého důvodu není možné použít železobeton. Tento typ výztuže nám zvýší modul pružnosti výsledného materiálu a tím se sníží deformace (rozdíl ovšem není výrazný).

Předpjatý beton využijeme tam, kde nemůžeme měnit tvar tak, aby ideálně přenášel zatížení (např. architektonická omezení).

Ostatní materiály – dřevo, ocel, kovy, kompozity atd.

Z pohledu provádění můžeme volit mezi monolitickým provedením, stříkaným betonem a prefabrikací. Technologie stříkaného betonu je dnes na velmi dobré úrovni a ve stavbě skořepin je vhodná pro provádění tvarově složitých konstrukcí. Pro konstrukce jednoduššího tvaru, kde se často jeden tvar opakuje (průmyslové stavby) je vhodné volit monolitickou konstrukci do bednění. Prefabrikace je pak vhodná například pro kopulové konstrukce zastřešení. V dnešní době je prefabrikace v kombinaci s předpínáním často používána pro konstrukci těch nejsložitějších tvarů skořepin.

Vzhledem k malým tloušťkám konstrukcí může např. posun výztuže o jeden centimetr znamenat rozdíl v únosnosti v řádu desítek (a více) procent. Je proto třeba předepisovat a dohlížet na dodržování vysoké přesnosti provádění.

3.7.3 EKONOMICKÝ NÁVRH

Již z filozofie skořepinových konstrukcí vyplývá, že pro vhodný návrh bude dosaženo velmi dobrého využití materiálu. Na druhou stranu je třeba brát v potaz složitost bednění a zvýšené nároky na přesnost. V rámci samotných skořepin nebude pravděpodobně mezi různými variantami cenový rozdíl velký, ale např. u konstrukcí s větším rozpětím by mohlo být vhodné vzít v potaz úplně jiné statické nebo materiálové řešení, pokud nám v tom nebrání zadání objednatele, architektonické řešení apod.



3.7.4 URČENÍ VHODNÉHO TVARU

V 50. letech 20. století určoval Heinz Isler, jeden z nejvýznamnějších stavitelů skořepin, tvary experimentálně. Využíval přitom dávno známý princip obrácené řetězovky tj., že lano zavěšené mezi dvěma body zatížené jen vlastní tíhou zaujme tvar řetězovky a je namáháno jen tahem. Pokud bychom ho pak obrátili podél vodorovné osy, bude namáháno jen tlakem.

Skořepiny tvaru polštáře („bubble shells“) jsou skořepiny dvojí křivosti nad obdélníkovým půdorysem. Isler jejich tvar určil pokusem, kdy mezi nepropustnou podložku a rám vložil gumovou membránu a dovnitř pumpoval vzduch. Z fyzikálního modelu takto navrženého tvaru pak zjistil, že v rozích dochází ke koncentraci napětí (díky opačné křivosti), takže rohy zaoblil. Dále bylo zjištěno, že cca 90% zatížení je přenášeno do rohů konstrukce, byl tedy navržen okrajový rám s parabolicky vedenými předpínacími kabely, které vyrovnají vodorovné účinky v poli a podpory jsou v podstatě nutné jen v rozích. Isler poté „tabeloval“ tyto konstrukce pro rozpětí od 22 m do 59 m. Od té doby takových konstrukcí bylo postaveno více než 700.

Skořepiny volného tvaru (free form shells) navrhoval Isler pomocí textilie, kterou namočil v pryskyřici a poté jí zavěsil. Zde už nebyl výsledný tvar okamžitě zřejmý, bylo totiž potřeba vzít v potaz estetiku, ale také vliv vodorovných sil. Následně byly vytvořeny fyzikální modely, na kterých se ověřovala funkčnost těchto konstrukcí.

V dnešní době se k určení vhodného tvaru používá MKP. V prvním kroku se konstrukce modeluje jako rovinná a požadovaným zatížením (svisle nebo kolmo na střednicovou rovinu) tak, aby bylo dosaženo deformace odpovídající 80 – 90 % požadovaného vzepětí; zde stačí provést lineární výpočet. V druhém kroku se zvolí jako výchozí deformovaná konstrukce z kroku jedna a ta se zatíží tak, aby bylo dosaženo požadovaného vzepětí (včetně odchylky); prováděn je nelineární výpočet. Deformovaný tvar z druhého výpočtu pak bude výsledný tvar



konstrukce. V článku [2] je pak ukázáno, že takto získané tvary jsou velmi vhodné z hlediska výsledného namáhání.

3.7.5 POZNÁMKY DO PRAXE

V této kapitole bude shrnuto několik doporučení pro návrh skořepinových konstrukcí.

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.
2. Přejímací oblast – v oblastech, kde se skořepina stýká se ztužujícím prvkem nebo podpůrnou konstrukcí je třeba přepokládat 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 konstrukcí). Pokud není tvar omezen architektonicky je vhodné použít například řešení popsané na konci kapitoly 3.4.4, které se s menšími úpravami dá použít pro obecný tvar.
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 budou pravděpodobně mít rozhodující roli. Lokálním břemenům je ideální se zcela vyhnout, pokud je nezbytné nějaké lokální břemeno ke konstrukci připojit, je vhodné využít roznášecí 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 membránové napjatosti, změna zatížení by tento stav mohla narušit a mohla by mít 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 obvodě otvorů je opět vhodné využít ztužující prvky. Příklady vhodné volby otvorů pro některé tvary skořepin (především válcové) jsou například v [5], str.65.
7. Okrajové podmínky – je třeba vždy modelovat skutečné podpurné konstrukce. Rozdíl ve velikosti výsledků pro pružnou a ideální podporu může bez problému dosahovat stovek procent, případně se zcela může změnit charakter namáhání.

3.7.6 KLADY A ZÁPORY

Mezi hlavní výhody patří velmi vysoké využití materiálu a architektonická atraktivita. Nevýhodná bývá zejména složitost provedení a vysoká náchylnost ke změnám zatížení. Často je také nutné zajistit nadstandardní kvalitu stavebních prací. Další komplikací jsou dnešní betonové směsi a požadavky na jejich provedení, které často znemožňují betonové skořepinové konstrukce provést jako monolitické.



Je vhodné dodat, že všechny zmíněné vlastnosti skořepinových konstrukcí jsou velmi závislé na zpracování návrhu a samotném provedení. V rukou zkušeného architekta a statika je možné dosáhnout velmi atraktivních, efektivních a zároveň ne přehnaně drahých konstrukcí.

3.8 SHRnutí

Z hlediska mechaniky je teorie skořepin v současnosti na vysoké úrovni, ale dnes už se moc nerozvíjí, neboť drtivá většina návrhů skořepin dnes probíhá pomocí MKP. Mnoho jednoduchých postupů odvozených např. v 50. a 60. letech je ovšem při vhodné aplikaci možné použít i dnes a značně si tak zjednodušit práci.

Co se týče navrhování resp. posuzování, je často problém konstrukci dostatečně jednoduše a přitom přesně přenést do výpočetního softwaru. Vzhledem k téměř nekonečnému množství variant návrhu je pak nutné zvolit vhodný postup optimalizace geometrie a zamyslet se nad volbou materiálového a technologického řešení. Dále je třeba zajistit kvalitu provedení, trvanlivost použitých materiálů a zachování zatížení na které byla konstrukce navržena.

Navrhování skořepinových konstrukcí je relativně komplexní činnost, která vyžaduje zkušenost, případně konzultaci se zkušenou osobou.



4 NÁVRH OPRAVY ZASTŘEŠENÍ VOZOVNY HLOUBĚTÍN

4.1 ÚVOD

Cílem práce bylo navrhnout opravu zastřešení Vozovny Hloubětín. Bylo uvažováno s mnoha variantami; všechny varianty, které uvažovali zachování stávajících segmentů skořepiny byly zavrženy. Pokusy o podepření skořepin a jejich zachování pouze jako „izolace“ by byly téměř jistě nákladnější než postavení segmentu nového. Využití stávajících segmentů jako bednění pro nové skořepiny bylo také odmítnuto, horní povrch je moc nerovný, bude vhodnější vytvořit např. několik rozkládatelných bednění, která budou opakovaně použita pro více segmentů.

4.2 POPIS NOVÉ KONSTRUKCE

Nová konstrukce má stejnou geometrii střednice jako konstrukce původní. Charakteristická tloušťka je 110 mm, je vynecháno prostřední ztužující žebro. Na okrajích v příčném směru je vytvořen náběh na tl. 300 mm na vzdálenost 1000 mm od středu podpůrné konstrukce, na okrajích v podélném směru je vytvořen náběh na tl. 250 mm na vzdálenost 500 mm od okraje podpůrné konstrukce.

Navržená výztuž B500B v ose konstrukce:

- V podélném směru: $\varnothing 10$ mm, 12 ks/m, horní vrstva
- Ve příčném směru: $\varnothing 10$ mm, 14 ks/m, spodní vrstva
- V náběžích + 200 mm přesah budou všechny pruty zdvojeny

Byla navržena tepelná izolace z expandovaného polystyrenu tl. 100 mm a střešní krytina NAIP tl. 10 mm.



Provádění se předpokládá z monolitického samozhutnitelného betonu C40/50 do (pravděpodobně ocelového) rozebíratelného uzavřeného bednění, které bude opakovaně použito pro více segmentů.

4.3 VARIANTY S VĚTŠÍM ZÁSAHEM DO KONSTRUKCE

V této kapitole budou krátce rozebrány další možnosti opravy, o kterých by se dalo uvažovat.

1. Změna okrajových podmínek – geometrie bočních průvlaků by byla zachována, změnil by se tvar zakřivených trámů. Zvláště zvýšení vzepětí spodního trámu, které je nyní jednoznačně nedostatečné by mohlo mít dostatečně příznivý vliv na rozložení namáhání ve skořepině. Zásadně by se tak ovšem snížil přístup přirozeného osvětlení do objektu.
2. Změna tvaru skořepinové konstrukce – náhrada konoidu – od přírodního osvětlení vnitřku haly z jižní strany by se zcela ustoupilo. Byla by navržena skořepina o jedné křivosti kopírující pouze geometrii horních trámů nebo skořepina dvojí křivosti vetknutá v jedné rovině (zde by se muselo dořešit odvodnění a sklon na bočních trámech).
3. Odstranění skořepinových konstrukcí – byly by vybourány skořepiny i zakřivené trámy a nahrazeny jednoduchou pravděpodobně ocelovou konstrukcí. Jako vhodné řešení se nabízí např. ocelové nosníky pnuté v podélném směru (rozpětí 8,75 m) a trapézový plech. Zde je pouze třeba zajistit odvedení srážkové vody. Toto řešení samozřejmě zásadně změní architektonický ráz stavby, ale bylo by velmi pravděpodobně nejekonomičtější.



5 ZÁVĚR

V rešeršní části bylo shrnuto dosavadní poznání o skořepinách z hlediska stavební mechaniky. Dále byla shrnuta základní terminologie skořepin, technologické a materiálové možnosti, zajímavé příklady, nakonec bylo zmíněno několik rad pro navrhování skořepin v praxi.

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

Nová konstrukce vyhověla, ale je zřejmé, že při daných okrajových podmínkách je na hraně proveditelnosti a není efektivní. Pokud by investor trval na zachování skořepinového zastřešení, byl by pravděpodobně vhodný větší stavební zásah, zejména změna geometrie trámů ve spodní a horní části skořepiny. Ze statického hlediska je ovšem doporučeno změnit celkový charakter zastřešení.



6 BIBLIOGRAFIE

- [1] STRÁNSKÝ, Jiří. HEINZ ISLER, STAVITEL SKOŘEPIN. *Beton TKS*. 2013, **2013**(2), 10-19.
- [2] MUSIL, Jiří a Jiří STRÁNSKÝ. HLEDÁNÍ TVARU SKOŘEPINOVÝCH KONSTRUKCÍ. *Beton TKS*. 2014, **2014**(5), 50-55.
- [3] ŠEJNOHA, Jiří a Jitka BITTNAROVÁ. *Skořepiny: doplňkové skriptum*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01944-6.
- [4] ŠEJNOHA, Jiří a Jitka BITTNAROVÁ. *Stabilita skořepin: doplňkové skriptum*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02016-9.
- [5] PŠENIČKA, František. *Pozemní stavitelství: nosné konstrukce zastřešení*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02128-9.



7 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Statický výpočet