

SKOŘEPINOVÉ KONSTRUKCE A METODY NAVRHOVÁNÍ

Jan Rozkošný, *

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

ABSTRAKT

Článek se věnuje tématu skořepinových konstrukcí. Popisuje jejich chování, využití ve stavebnictví a metody, podle kterých je lze navrhovat. Existuje již celá řada staveb, kde hlavní nosné konstrukce jsou tvořeny skořepinami. Tyto konstrukce se řadí mezi vysoce estetické prvky díky své tvarové variabilitě a schopnosti efektivně rozložit zatížení v jejich ploše. S tím souvisí také definování optimálního tvaru konstrukce a metody, kterými lze dané prvky navrhnout. Každá metoda vychází z různých předpokladů a mohou být využity v různých stádiích návrhu dílčí konstrukce, ať už pro určení základní geometrie v předběžném návrhu, nebo pro zpřesnění tvaru konstrukce při její optimalizaci pomocí složitějších výpočetních programů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Skořepinové konstrukce • Železobeton • Optimální tvar skořepiny • Metoda konečných prvků

ABSTRACT

The article deals with the topic of shell structures. It describes their behaviour, their use in construction and the methods by which they can be designed. There are already many buildings where the main load-bearing structures are made of shells. These structures are highly aesthetic elements due to their shape variability and their ability to distribute loads efficiently over their area. This also involves defining the optimum shape of the structure and the methods by which the elements can be designed. Each method is based on different assumptions and can be used at different stages of the design of a substructure, either to determine the basic geometry in the preliminary design or to refine the shape of the structure when optimising it using more complex calculation programs.

KEYWORDS

Shell structures • Reinforced concrete • Optimal shell shape • Finite element method

1. ÚVOD

Skořepinové konstrukce patří v dnešní době k zcela běžným konstrukčním prvkům a jsou často využívány ve stavebnictví a architektuře nejen pro konstrukce tunelů a zastřešení objektů,

ale i např. pro různé designové prvky. Mohou být vyrobeny z různých materiálů, nejčastějšími materiály jsou např. ocel, beton a dřevo. Skořepiny lze navrhovat různých tvarů a velikostí s použitím malého množství materiálu. Důvodem proč jsou tolik populární je především jejich tvarová variabilita a futuristický vzhled. Dále jsou navrhovány z hlediska funkčnosti a svým uplatněním vytváří otevřené prostory bez užití vnitřních podpor.

2. SKOŘEPINOVÉ KONSTRUKCE

Skořepinové konstrukce jsou plošné prvky definované svojí tloušťkou. Hlavní výhodou těchto konstrukcí spočívá ve schopnosti rovnoměrného rozložení zatížení po celé ploše, tudíž dochází k efektivnímu využití materiálu ve srovnání s jinými konstrukčními prvky.

Skořepinové konstrukce mají široké uplatnění v současnosti a lze je nalézt v různých aplikacích, od velkých budov až po malé objekty. Jako příklady staveb lze uvést např. Operu v Sydney (Austrálie), Kresgeho auditorium (MIT, USA), sportovní halu Palazzetto dello Sport, (Itálie) a mnoho dalších.

2.1. Rozdělení dle typu namáhání

Podle typu namáhání lze konstrukce rozdělit na (Šejnoha, J. & Bittnarová, J., 1999):

- Tlustostěnné
- Střední tloušťky
- Tenkostěnné
- Nelineární tenkostěnné
- Membrány

Od tohoto dělení se odvíjí způsob, jak přistoupit k návrhu nosné konstrukce a zohlednit chování a vyvolané namáhání konstrukce.

2.2. Rozdělení dle tvaru

Obecně se skořepiny podle jejich tvaru dají dělit na dvě základní skupiny: skořepiny rotační a obecných tvarů.

Pro podrobnější popsání tvaru střednicové plochy se využívá Gaussova křivost κ , která vychází z hlavních křivosti plochy (minimální κ_1 a maximální κ_2):

$$\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2 \quad (1)$$

* Školitel: Ing. Josef Novák, Ph.D.

Dle Gaussovy křivosti lze plochy členit dále na rozvinutelné (s nulovou Gaussovou křivostí) a nerozvinutelné (s nenulovou Gaussovou křivostí).

3. METODY NAVRHOVÁNÍ TVARU SKOŘEPIN

V historii se často využívala analytická metoda, při které nešlo pouze o nalezení vhodného tvaru konstrukce, ale o matematické definování střednicové plochy. Tuto metodu využíval např. Pier Luigi Nervi nebo Félix Candela.

Oproti analytické metodě lze navrhnout konstrukce experimentálními metodami. Této problematice se svého času věnoval známý statik Heinz Isler. V roce 1994 na mezinárodním semináři demonstroval princip hledání tvaru skořepinové konstrukce pomocí obrácené volně zavěšené textilie (Stránský 2013). Dříve byla podobná metoda využívána jen pro 1D konstrukční prvky, např. pro návrh mostních oblouků tvaru obráceného zavěšeného lana. Jedná se tedy o experimentální metodu, kterou se lze přiblížit k optimálnímu tvaru konstrukce.

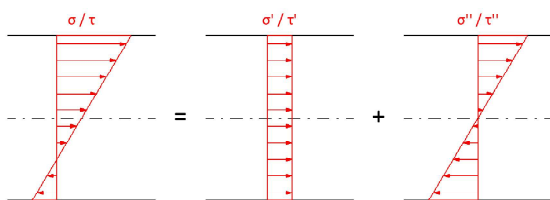
Návrh tvaru skořepiny za pomoci numerických metod, kterou je např. metoda konečných prvků, je velice náročný a mnohdy až nemožný. Tyto numerické metody se spíše používají pro kontrolu již navrženého tvaru konstrukce, zatímco pomocí analytických metod lze předběžné rozměry skořepin navrhnout relativně snadno.

Z toho důvodu se analytické řešení skořepin používá často pro předběžné návrhy geometrie konstrukcí a následně se použijí sofistikovanější algoritmy počítačových programů využívající metodu konečných prvků pro ověření a zpřesnění daného návrhu.

4. NAMÁHÁNÍ A VNITŘNÍ SÍLY SKOŘEPIN

V případě analytického řešení tenkostěnných skořepin se vychází z elementu vyjmutého z obecné skořepiny. Ty mohou být namáhány různým zatížením, které uvnitř konstrukce vytváří napětí.

Obecně lze zatížení působící na danou konstrukci rozdělit na zatížení působící ve střednicové rovině a zatížení působící ve směru normálovém (princip superpozice). Stejným způsobem je možné rozložit i vzniklá napětí uvnitř konstrukce (Šejnoha, J. & Bittnarová, J., 1999). Rozložení napětí lze provést na ohybovou a membránovou složku napětí (Obrázek 1).

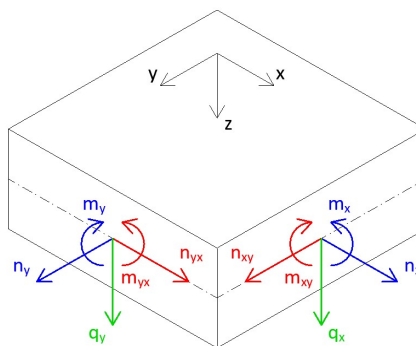


Obrázek 1: Rozložení celkového napětí na membránové (uprostřed) a ohybové (vpravo).

Rozložená napětí lze poté obecně nahradit výslednými silovými účinky vztaženými ke střednicové ploše.

4.1. Ohybová teorie

Ohybovou teorii lze použít v případech, kdy konstrukce není namáhána pouze měrnými normálovými silami působící ve střednicové ploše, ale také vnitřními silami působící mimo střednicovou plochu. Těmi se rozumí měrné momenty a posouvající síly (Obrázek 2).

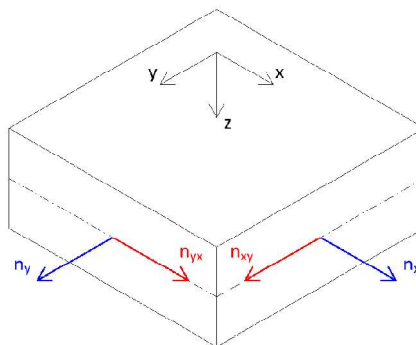


Obrázek 2: Ohybový stav skořepiny – měrné vnitřní síly.

Při řešení tenkých skořepinových konstrukcí lze vycházet z Kirchhoffovy teorie tenkých desek.

4.2. Membránová teorie

V membránové teorii oproti teorii ohybové není uvažováno s účinky posouvajících sil, ohybových ani kroutících momentů. V konstrukci se tedy vyskytují pouze vnitřní návrhové síly působící ve střednicové rovině a nastává tak membránový stav napjatosti (Obrázek 3).



Obrázek 3: Membránový stav skořepiny – měrné vnitřní síly.

Při navrhování konstrukcí pomocí této teorie je nutné věnovat zvýšenou pozornost kritickým oblastem, které mohou narušit

celkovou integritu konstrukce. Mezi ně se řadí např. oblasti s lokálním zatížením, náhlými změnami geometrie a oblasti v blízkosti otvorů konstrukce.

5. NÁVRH OBEKTU KOSTELA

Praktickým příkladem návrhu skořepin sloužil objekt kostela svatého Františka z Assisi (Obrázek 4), na kterém byla prove-

dena analýza chování a návrh konstrukce uplatněním metody ohybové teorie.

Při návrhu nosné konstrukce kostela se vycházelo z převzatého tvaru konstrukce realizované stavby. V souvislosti s tím, že daná konstrukce není optimálního tvaru, vznikají uvnitř konstrukce nezanedbatelné účinky ohybových a kroutících momentů, a tudíž není možné postupovat dle membránové teorie a uvažovat pouze normálové síly.



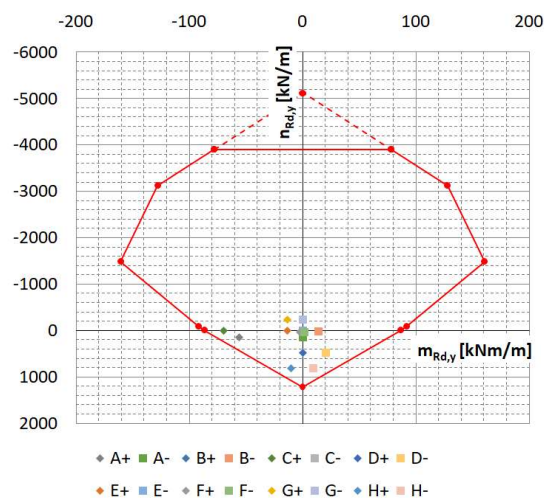
Obrázek 4: Kostel sv. Františka z Assisi (Expedia 2023).

Výpočet byl proveden v programu SCIA Engineer metodou konečných prvků (MKP) podle Kirchhoffovy teorie. Velikost sítě MKP byla stanovena na 200 mm. V oblastech styku s navazujícími konstrukčními prvky byla síť zjemněna a byly také použity průměrovací pásy s využitím průměrování do obou směrů pro získání relevantnějších výsledků návrhových vnitřních sil, konkrétně kombinace normálových sil a ohybových dimenzačních momentů.

Z výpočetního softwaru byla na každé konstrukci nalezena kritická místa a k nim příslušné odpovídající kombinace návrhových vnitřních sil. Pro takto vytvořené skupiny vnitřních sil byl proveden návrh výztuže průřezu, jeho posouzení pomocí interakčního diagramu a následné vynesení do grafů.

Pro výpočet únosnosti průřezu bylo využito 6 bodů interakčního diagramu. Každý z nich se vyznačuje stavem, podle kterého lze jednoduše stanovit normálovou a ohybovou únosnost průřezu (Típka 2019).

Z typického příkladu grafu interakčního diagramu (Obrázek 5) vyplývá, že tvar konstrukce není optimální - rozhodujícím parametrem jsou ohybové momenty.



Obrázek 5: Příklad interakčního diagramu se zobrazenými kritickými místy A-H na horním (+) a spodním (-) povrchu.

V rámci objektu kostela bylo navrženo několik skořepinových konstrukcí. Každá z nich byla z hlediska návrhu jedinečnou konstrukcí. Jednotlivé konstrukce byly odlišné především geometricky, a tudíž i z hlediska rozložení vnitřních sil.

Jedním z hlavních řešených dílčích problémů byl tvar skořepinových konstrukcí. Ve výpočetním programu obecně vycházely nezanedbatelné ohybové účinky. Dá se předpokládat, že převzatá geometrie skořepinových konstrukcí není na aplikované účinky zatížení ideálního tvaru a konstrukce by mohla být optimalizována.

6. ZÁVĚR

V rámci objektu kostela bylo navrženo několik skořepinových konstrukcí. Každá z nich byla z hlediska návrhu jedinečnou konstrukcí. Jednotlivé konstrukce byly odlišné především geometricky, a tudíž i z hlediska rozložení vnitřních sil.

Z hlediska návrhu skořepinových konstrukcí je velice výhodné konstrukce navrhovat dle membránové teorie (Kapitola 4.2). Pro docílení tohoto stavu je nutné dokonale navrhnout tvar konstrukce na předem definované zatížení, což není zcela jednoduché z důvodu proměnlivosti zatížení (sníh, vítr, zatížení teplotou).

Z hlediska technologického postupu existují i geometrické imperfekce způsobené nepřesnostmi při betonáži prvků, které mohou optimální tvar konstrukce také mírně narušit.

Je tedy zřejmé, že popsat a navrhovat skořepinové konstrukce v běžné praxi pomocí této teorie je skoro nereálné. Z toho důvodu se v dnešní praxi navrhují konstrukce v mnoha případech právě s použitím ohybové teorie, která zohledňuje i účinky ohybových i kroutících momentů.

Tato skutečnost se potvrdila i u konstrukčního návrhu kostela svatého Františka z Assisi, kde díky nevhodnému tvaru skořepiny vznikaly nezanedbatelné ohybové účinky. Ty se nepodařilo snížit ani úpravou napojení jednotlivých skořepin, které do sebe různě zasahovaly a vzájemně se tak ovlivňovaly.

Pro návrh dle ohybové teorie je nutné věnovat pozornost převážně místům, kde hrozí nadměrný vznik ohybových momentů (oblasti podpor, otvorů, napojení na ostatní konstrukční prvky apod.).

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl vytvořen v rámci Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS24/041/OHK1/1T/11 - Exploring the Relationship Between Parametric Model Complexity and Optimization Efficiency in Civil Engineering.

Reference

- Stránský, J. (2013). Heinz Isler, stavitel skořepin, in *'Beton-Technologie, Konstrukce, Sanace'*, 9, 10-19.
- Expedia (2023). *Church of Saint Francis of Assisi Tours and Activities*. [online]. [cit. 2024-03-24]. url: <https://www.expedia.com/Church-Of-Saint-Francis-Of-Assisi-Sao-Luiz.d6098666.Vacation-Attraction>.

- Tipka, M. (2019). *Posouzení sloupu – interakční diagram*. Fakulta stavební ČVUT v Praze, 7. října 2019. [cit. 2024 - 03 - 25]. url: https://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/vyuka_soubory/NNKB/pomucky_NNKB_soubory/10_interakcni_diagram.pdf.
- Šejnoha, J. & Bittnarová, J., (1999). *Skořepiny: Doplnkové skriptum*, Praha: České vysoké učení technické.