

SKOŘEPINA DVOJÍ KŘIVOSTI NAD OBDÉLNÍKOVÝM PŮDORYSEM

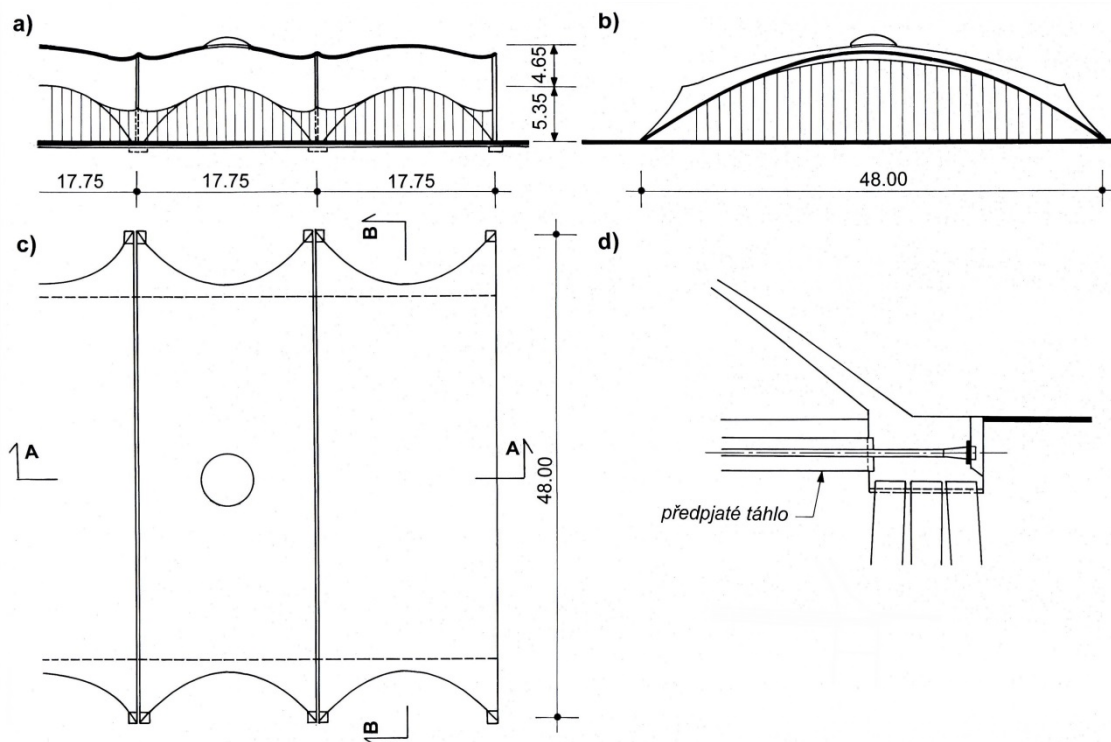
1 Úvod

Funkční vzorek pomohl hledání optimálního tvaru skořepinové konstrukce dvojí křivosti, kterou Heinz Isler úspěšně použil pro zastřešení řady tenisových hal a bazénů. Pro nalezení tvaru byl využit komerčně dostupný program umožňujících geometricky nelineární analýzu konstrukcí. Správnost řešení byla ověřena nejen analyticky, ale také na modelu postaveném v měřítku 1:56. Model byl vytvořen technologií 3d tisku.

This functional sample deals with the search for the optimal shape of the shell structure of double curvature, which Heinz Isler successfully used for roofing many tennis halls and swimming pools. For the shape finding a commercially available program allowing geometrically nonlinear analysis of structures was used. The correctness of the solution was verified not only analytically, but also on the model built in the scale 1:56. The model was created by a modern technology of 3D printing.

2 Skořepiny Prof. Islera

Jedna z nejúspěšnějších Islerových konstrukcí je skořepina vyvinutá pro zastřešení tenisových hal a plaveckých bazénů. Tento typ skořepiny byl poprvé navržen v roce 1978 pro zastřešení tenisových hal v Düdingenu. Zastřešení tvoří tři skořepiny půdorysného rozměru 18,6 x 48,5 m; jejich tloušťka je 90 až 100 mm. Skořepiny jsou bodově podepřeny v rozích obdélníků. Od té doby bylo postaveno 45 podobných konstrukcí - Obr. 1.



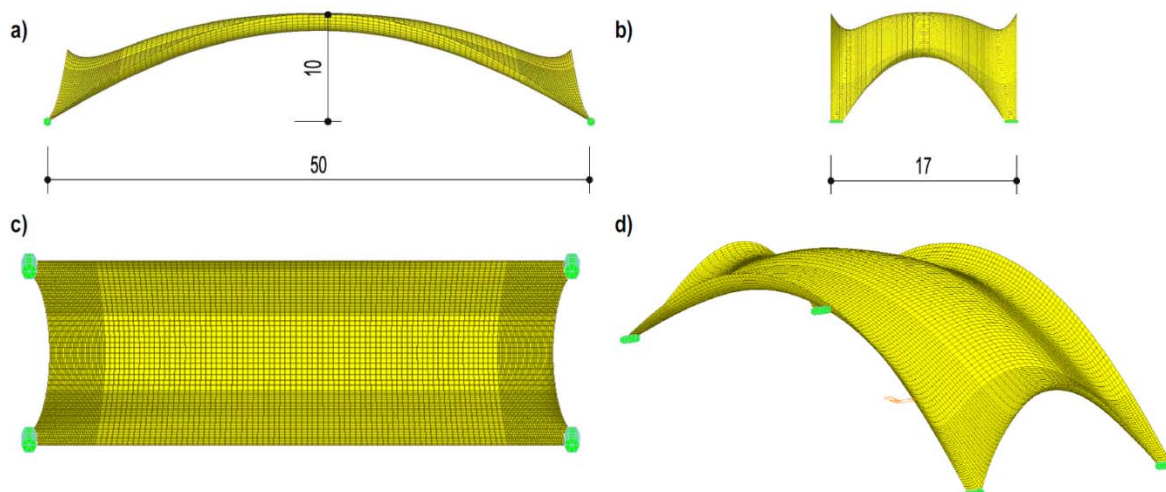
obr. 1 Tenisová hala – zastřešení pomocí Islerových skořepin

Návrh těchto skořepin vyžadoval velkou dovednost a zkušenost, protože je velmi obtížné navrhnout bodově podepřenou skořepinu dvojí křivosti nad protáhlým obdélníkem. Prof. Isler analyzoval popsané konstrukce ve dvou na sebe navazujících krocích. V prvním kroku na modelu obrácené zavěšené textilie (hanging cloth reversed) určil tvar membránové konstrukce. V druhém kroku, po pečlivém změření membrány, vytvořil obrácený model skořepinové konstrukce postavené z polyesterové pryskyřice. Tuto konstrukci pak ověřil modelovým měřením.

Kolektiv autorů se již dříve zabýval hledáním optimálního tvaru skořepin nad obdélníkovým půdorysem pomocí dostupných programů. Po nalezení tvaru byla konstrukce ověřena nejen analyticky, ale také na modelu.

3 Studovaná konstrukce

Studovaná konstrukce byla navržena nad obdélníkovým půdorysem šířky 17 m a délky 50 m – Obr. 2. Vzepětí ve středu skořepiny bylo 10 m. Cílem bylo navrhnout konstrukci, která bude podobně jako Islerova skořepina na okrajích zvlněna tak, aby vytvořila ztužující žebra.



obr. 2 Studovaná konstrukce

Pro analýzu byl využit programový systém Midas Civil 2012, použitý prvek byl prvek ‘Thick PLATE’. Z výsledků analýzy vyplývá, že konstrukce je převážně namáhána rovnoměrným tlakem, jeho maximální velikost dosahuje hodnoty 7,9 MPa. Je tedy zřejmé, že pro účinky vlastní tíhy je konstrukce navržena správně. Také pro všechna ostatní zatížení jsou deformace a napětí v rozumných mezích. Pro kritické zatížení situované na podélné polovině skořepiny je maximální deformace velikosti jen 16 mm, maximální tahové napětí dosahuje velikosti 3,5 MPa a maximální tlakové napětí je 8,0 MPa. Je patrné, že konstrukce bezpečně přenesla všechna normová zatížení.

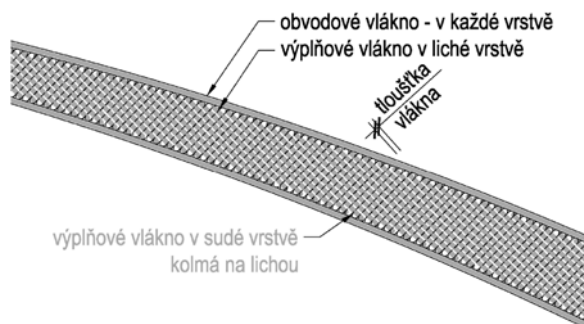
Funkce skořepiny byla také ověřena stabilitním výpočtem, který byl proveden pro kombinaci vlastní tíhy a zatížení sněhem. Při nelineární analýze byla konstrukce zatížena vlastní tíhou a postupně se zvětšujícím zatížením sněhem. Ztráta stability byla dosažena při zatížení, při kterém nebylo možné najít rovnováhu vnitřních sil na deformované konstrukci. Výpočet byl proveden pro všechny studované polohy zatížení. Z analýzy vyplývá, že ke ztrátě stability by došlo později, než k porušení konstrukce vlivem vyčerpání pevnosti betonu a únosnosti betonářské výztuže.

Je evidentní, že skořepina, která je na okrajích ztužená jejím zvlněním, bezpečně přenesla všechna normová zatížení. Analýza také potvrdila správnost postupu určení vhodného tvaru konstrukce. Přesto bylo rozhodnuto ještě ověřit analýzu měření na modelu konstrukce.

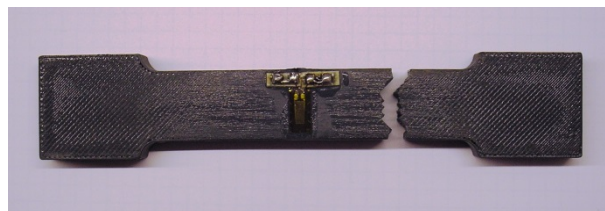
4 Fyzikální model

Z hlediska modelové podobnosti je vhodné vytvořit model ze stejného materiálu jako vlastní konstrukci, tedy z betonu. Avšak návrh a výroba bednění i samotné skořepiny by byly velmi pracné. I modely z polyesterové pryskyřice, které sloužily Prof. Islerovi pro ověření funkce skořepin, jsou náročné na výrobu a vyžadují značnou řemeslnou zručnost. Proto byla dále studována technologie 3D tisku betonu. Dosud se touto technologií vytváří převážně objekty drobné architektury. Je tedy patrné, že tato technologie je vhodná pro stavbu modelů betonových konstrukcí. Bohužel jsme nenašli v blízkosti dodavatele, který by byl schopen za rozumnou cenu vytisknout betonovou skořepinu.

Proto byla využita komerčně dostupná technologie FDM (Fused Deposition Modeling). Tato technologie využívá dvou materiálů – základního, stavěcího a materiálu podpor. Při tisku je materiál odvíjen z cívky do hlavice tavné pistole, která ho nanáší na podložku. Materiál podpor se využívá v místech, kde by při tisku musel stavěcí materiál „viset“ ve vzduchu. Po vytvoření modelu se materiál podpor odstraní. Stavěcí materiál je nanášen ve formě vláken, po vrstvách. Tisk každé vrstvy začíná vytvořením minimálně jednoho obvodového vlákna, vnitřní prostor mezi konturami je vyplněn vlákny pod úhlem 45°, přičemž v následující vrstvě je úhel výplně kolmý na předchozí vrstvu – Obr. 3. Zvolený průměr vláken byl vzhledem k velikosti modelu a tomu odpovídající ceně zvolen co největší - 0,33mm. I tak tisk modelu trval více než 50 hodin. Pro tisk byl použit materiál označený ABS M 30 (akrylonitrilbutadienstyren).



obr. 3 Skladba 3D tisku

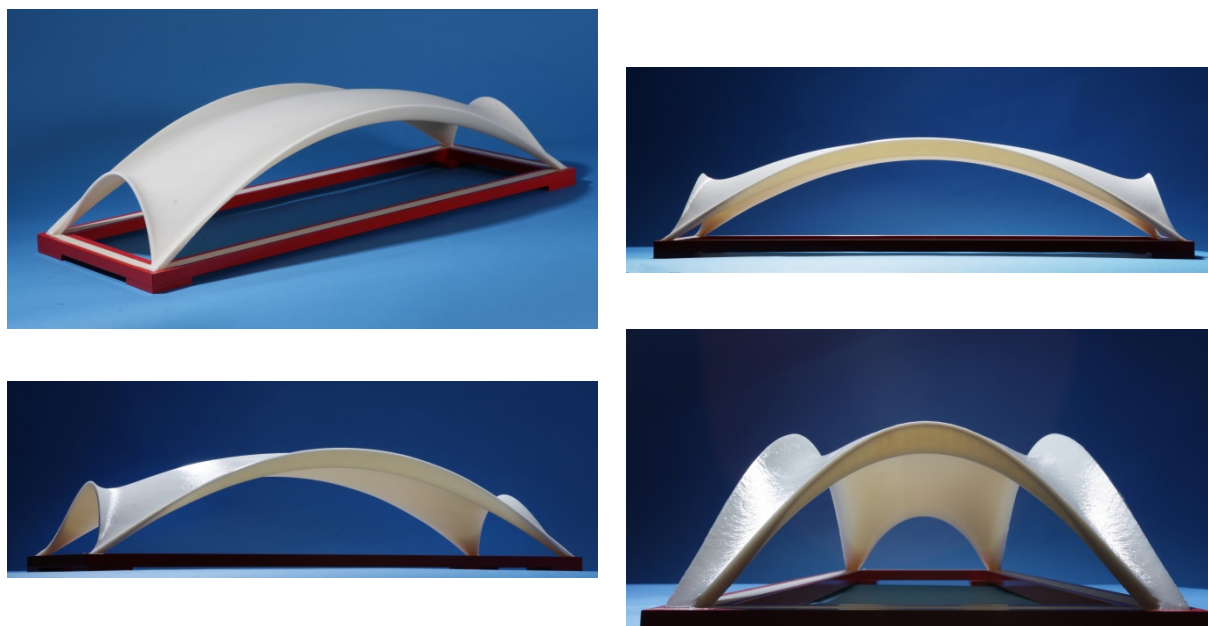


obr. 4 Zkouška tahové pevnosti

Pro tisk byl použit přístroj FORTUS 900mc s největším dostupným pracovním prostorem 914 x 610 x 914mm - který umožňoval tisk modelu v měřítku 1:55,56. Při tomto měřítku by byla minimální tloušťka modelu jen 2,2 mm. Proto, s ohledem na technologii tisku, byla tloušťka modelu provedena v měřítku 1:24. Tato skutečnost byla zohledněna v analýze modelové podobnosti.

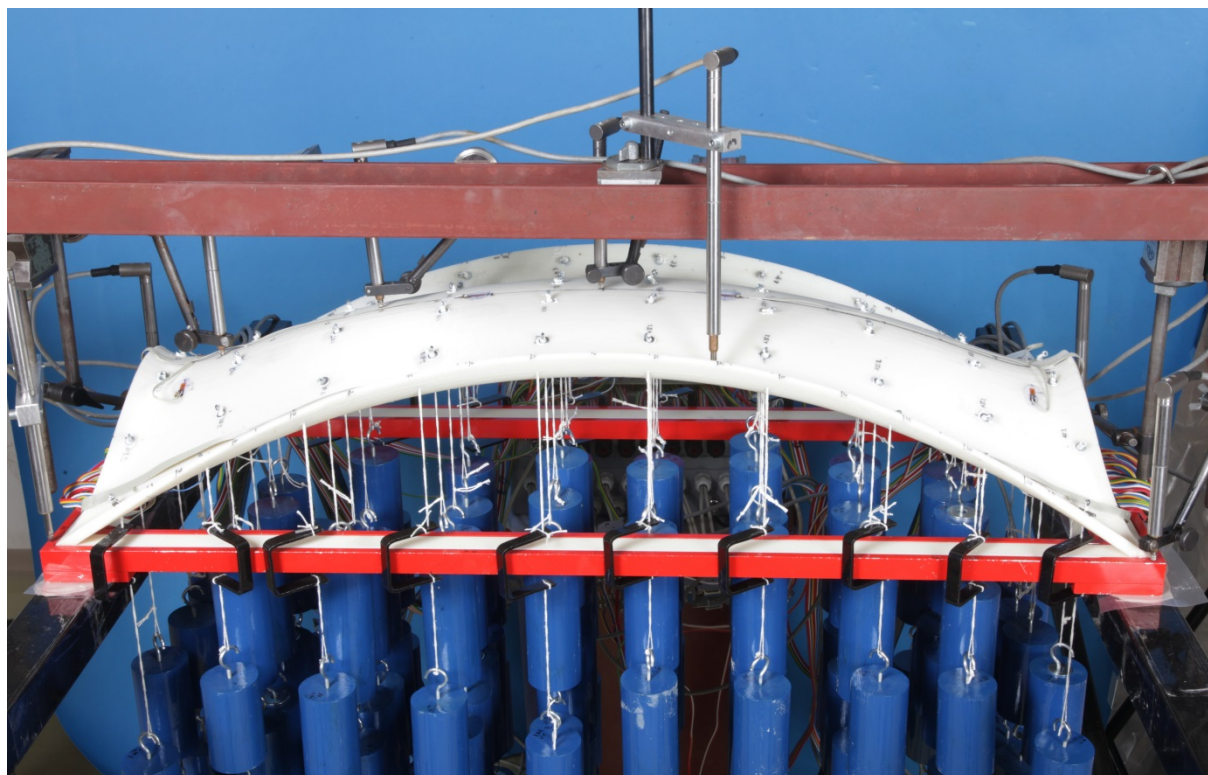
Pro orientační ověření materiálových charakteristik a práci s materiálem (především lepení tenzometrů) byla vytvořena a odzkoušena sada zkušebních těles (Obr. 4). Zkoušky byly provedeny jednak pro namáhání působící v rovině vláken a kolmo k rovině vláken.

Model byl vytištěn s táhly spojujícími podpěry jak v podélném, tak i příčném směru. Po vytištění byl podporující materiál odstraněn a model byl vložen do duralového rámu, ve kterém byl u podpěr podlit epoxidem. Obr. 5 dokumentuje geometrii studované konstrukce.



obr. 5 Model vyrobený technologií 3D tisku

Při návrhu zkušebního zatížení se vyšlo z modelové podobnosti. Model byl zkoušen pro různé polohy zatížení, které bylo určeno z podmínky stejné velikosti napětí v modelu a na skutečné konstrukci. Rovnoměrné zatížení bylo nahrazeno 60 osamělými břemeny rovnoměrně situovanými na povrchu skořepiny (Obr. 6). Mezi břemeny náhradního zatížení bylo na 20 místech osazeno celkem 40 odporových tenzometrů 1-LY11-6/350 a 1-LY11-3/350, vždy jeden shora a druhý zdola (Obr. 7).



obr. 6 Zkouška modelu skořepiny



obr. 7 Zkouška modelu skořepiny

Pro porovnání deformací a napětí v měřených místech konstrukce byla pro všechny zatěžovací stavy provedena analýza modelu zatíženého plošným a bodovým zatížením. Z hlediska deformací došlo pouze k zanedbatelným odchylkám mezi oběma modely, z hlediska napětí nebyla situace tak příznivá, ale pro většinu posuzovaných míst (90% až 95% podle zatěžovacího stavu) byla shoda velmi dobrá. Analýza tedy potvrdila možnost náhrady plošného zatížení za bodové. Mimo měření poměrných přetvoření byly také na osmi místech měřeny deformace konstrukce. Deformace byly měřeny u podpěr a v podélné ose modelu.

Zkouška modelu probíhala v laboratoři Ústavu betonových a zděných konstrukcí VUT FAST. Při zkoušce byla průběžně měřena teplota a deformace podpěr. Zatížení simulující vlastní tíhu bylo do konstrukce vnášeno postupně a symetricky. Model byl následně zkoušen pro sledované polohy zatížení. Každé zatížení bylo na konstrukci ponecháno, dokud se měřené hodnoty neustálily. Pak bylo veškeré zatížení odebráno a po změření deformací a proměnných přetvoření nezatíženého modelu se celý postup opakoval. Pro vyhodnocení byly použity hodnoty, od kterých byly odečteny účinky změny teploty a poklesu podpěr.

5 Závěr

Statická analýza a měření na modelu potvrdily správnost popsaného postupu hledání tvaru skořepinových konstrukcí. Je tedy zřejmé, že popsaný postup můžeme použít pro návrh skořepin nad libovolným půdorysem. Analýza také upozornila na skutečnost, že tenké skořepiny je nutno analyzovat geometricky nelineárními programy, které upozorní na velké deformace a následnou možnou ztrátu stability.