

# SKOŘEPINA DVOJÍ KŘIVOSTI NAD OBDÉLNÍKOVÝM PŮDORYSEM ■ DOUBLE CURVATURE SHELL ABOVE A RECTANGULAR PLAN

Jiří Musil, Jiří Stráský

Příspěvek popisuje 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 umožňující 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. Příspěvek navazuje na článek popisující práci Heinze Islera a na článek popisující metodu hledání tvaru. ■ The paper describes 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. The contribution is linked to the article describing the work of Heinz Isler and the article describing the form finding method.

V příspěvku [1] byla připomenuta práce významného projektanta Prof. Dipl. Ing. Heinze Islera, Dr.h.c., podle jehož projektů bylo postaveno více než 1 500 skořepinových konstrukcí. V navazujícím příspěvku [2] byl popsán postup hledání tvaru pomocí dostupných programů, které umožňují geometricky nelineární analýzu konstrukcí. Postup byl ilustrován na dvou Islerových konstrukcích, skořepině tvaru polštáře a skořepině nad trojúhelníkovým půdorysem navržené pro čerpací stanici Deitingen Süd. Získané tvary skořepin byly ověřeny podrobnou statickou a stabilitní analýzou.

Jedna z neúspěšnějších 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 čtyři 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 čtyřicet pět podobných konstrukcí (obr. 1).

Návrh těchto skořepin vyžadoval velkou dovednost a zkušenost, protože je velmi obtížné navrhnout bodově podepřenou skořepinu dvojí křivosti nad protáhlým obdélníkem. V tomto případě se obvykle navrhuje konstrukce jednoduché křivosti, která je ukončena ztužujícím nosníkem přenášejícím zatížení do krajních podpěr.

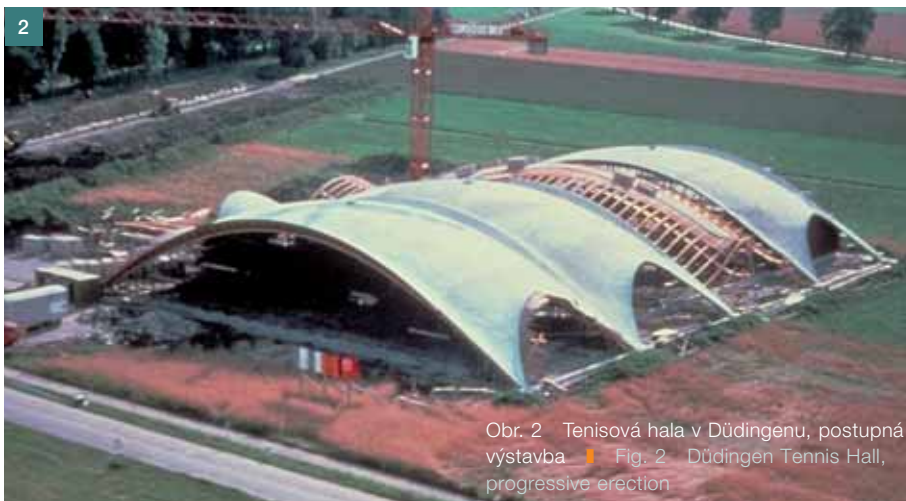
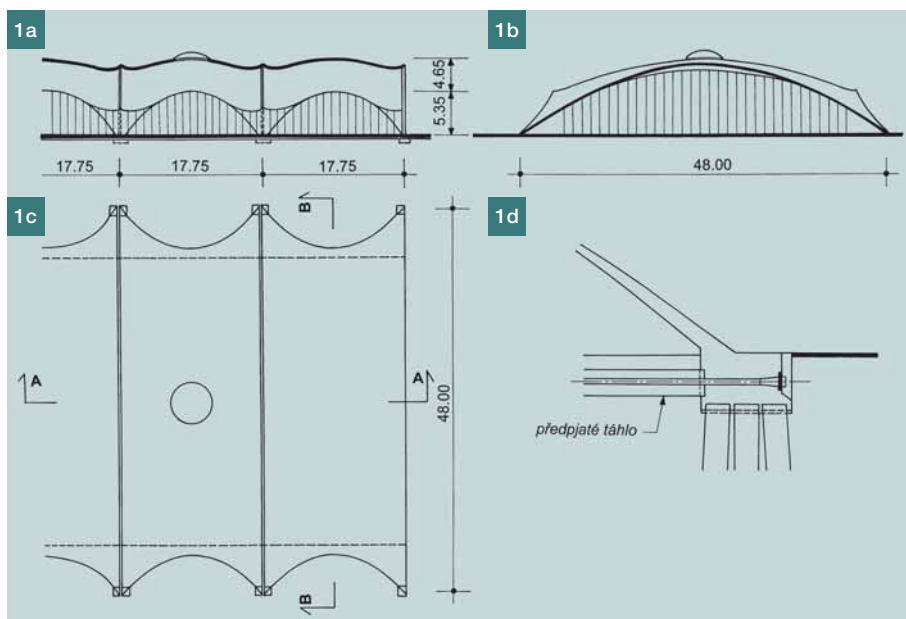
Islerova konstrukce dvojí křivosti vplynula z řady modelových měření skořepin různých vzepětí. Z modelových zkoušek tak vzešel standardizovaný tvar šířek 17,75 a 18,6 m a délky 48 m. Skruž těchto skořepin tvořil velmi elegantní rošt z lepených dřevěných nosníků. Standardizovaný tvar skořepin umožnil jejich opakované použití (obr. 2) a postupnou výstavbu.

Prof. Isler analyzoval popsané kon-

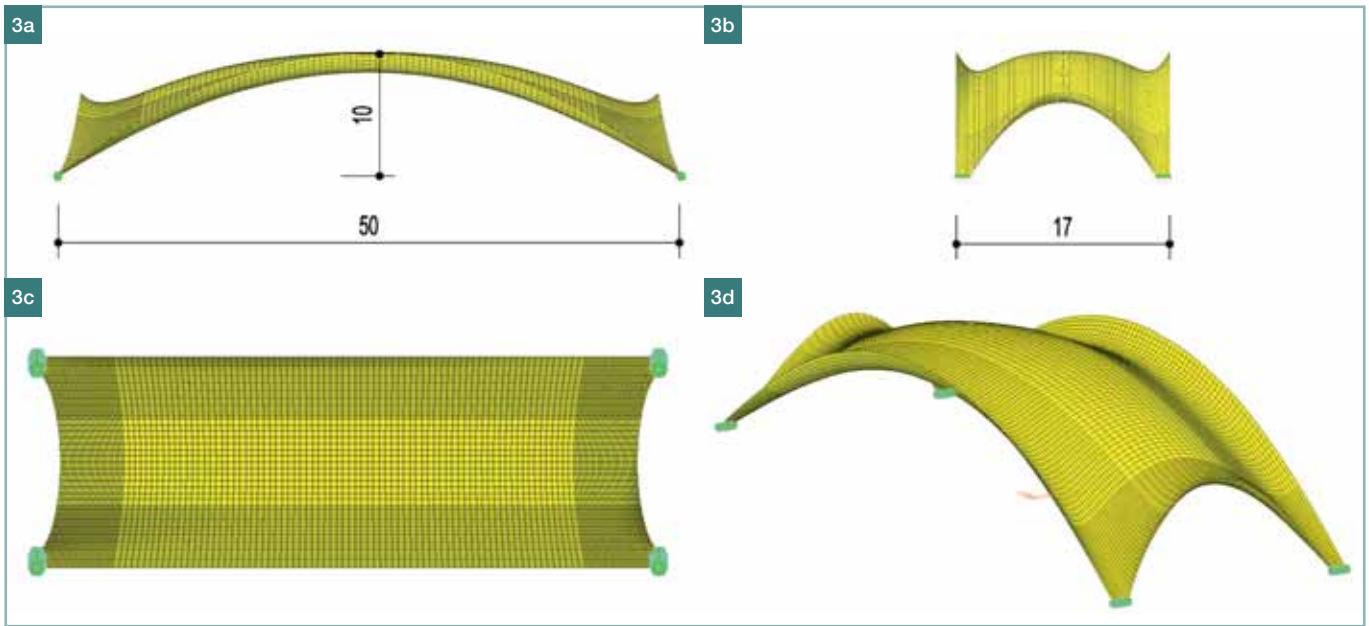
strukce ve dvou na sebe navazujících krocích. V prvním kroku na modelu obrácené zavěšené textilie (hanging cloth reversed) určil tvar membránové konstrukce. V druhém kroku, po pečlivém změření membrány, vytvořil obrácený model skořepinové konstrukce postavené z polyesterové pryskyřice. Tuto konstrukci pak ověřil modelovým měřením.

Již dříve popsaný postup [2] hledání optimálního tvaru skořepin pomocí dostupných programů byl také aplikován při analýze konstrukce

Obr. 1 Tenisová hala v Solothurnu: a) řez A-A, b) řez B-B, c) půdorys, d) podepření skořepiny ■ Fig. 1 Solothurn Tennis Hall: a) section A-A, b) section B-B, c) plan, d) shell support



Obr. 2 Tenisová hala v Düdingenu, postupná výstavba ■ Fig. 2 Düdingen Tennis Hall, progressive erection



nad obdélníkovým půdorysem. Po nalezení tvaru byla konstrukce ověřena nejen analyticky, ale také na modelu.

### STUDOVANÁ KONSTRUKCE

Studovaná konstrukce byla navržena nad obdélníkovým půdorysem šířky 17 m a délky 50 m (obr. 3). Vzepětí ve středu skořepiny bylo 10 m. Cílem bylo navrhnout konstrukci, která bude podobně jako Islerova skořepina na okrajích zvlněna tak, aby vytvářela ztužující žebra.

**Skořepina bez okrajového ztužení**  
Nejdříve byla konstrukce analyzována postupem popsaným v [2]. Výchozím tvarem byla rovinná membrána nad obdélníkovým půdorysem, která měla zakřivené kratší strany. Membrána byla uložena na čtyřech krajních podporách šířky 1 m (obr. 4). Pro analýzu byl využit programový systém Midas Civil 2012 a byl použit prvek Thick PLATE. Konstrukce byla sestavena z 8 905 obdélníkových prvků s velmi hustým dělením u podpěr a na okrajích. Základní tloušťka membrány 120 mm byla u podpěr zvětšena až na 240 mm (obr. 5). Konstrukce z betonu C30/37 byla analyzována pro proměnné plošné zatížení s intenzitou odpovídající rozložení vlastní tíhy konstrukce.

V prvním kroku byla konstrukce analyzována pro zatížení, které rozložení odpovídá vlastní tíze, s intenzitou, při které se konstrukce ve svém středu zdeformovala 7,08 m (obr. 6). V druhém kroku byla takto zdeformovaná konstrukce řešena jako geometricky nelineární úloha pomocí New-

ton-Rapsonovy metody. Při řešení byly použity tři iterační kroky s deformačním konvergenčním kritériem 0,001. Výsledkem řešení byla zdeformovaná konstrukce, jejíž geometrie tvořila vý-

chozí tvar pro následující iteraci. Iterace byla opakována, pokud ve středu konstrukce nebylo dosaženo vzepětí 10 m (obr. 7).

Je zřejmé, že takto získaný výsledný

Obr. 3 Studovaná konstrukce, a) boční pohled, b) čelní pohled, c) půdorys, d) perspektivní pohled

Fig. 3 Studied structure, a) side view, b) frontal view, c) plan view, d) perspective view

Obr. 4 Výchozí tvar membrány

Fig. 4 Initial shape of the membrane

Obr. 5 Proměnná tloušťka membrány

Fig. 5 Variable thickness of the membrane

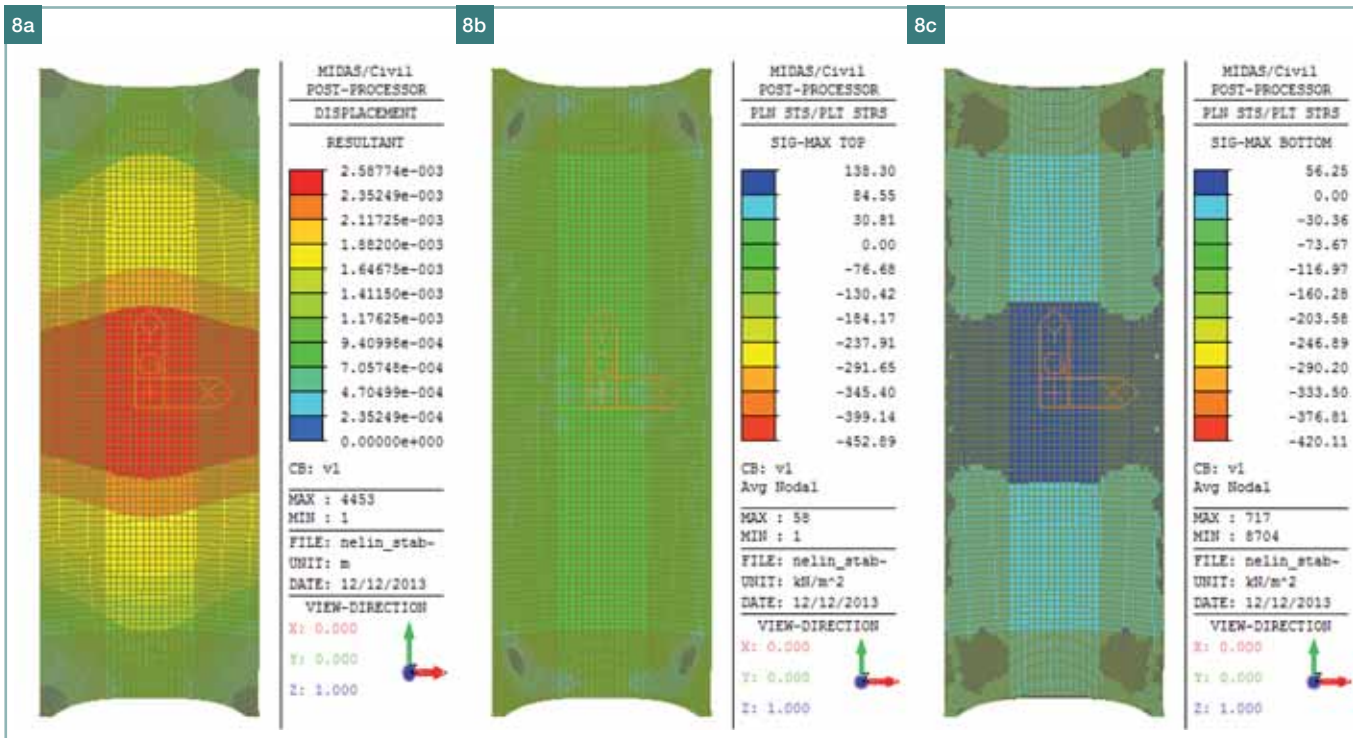
Obr. 6 Tvar membrány po prvním kroku

Fig. 6 Shape of the membrane after the first step

Obr. 7 Výsledný tvar konstrukce, a) boční pohled, b) čelní pohled

Fig. 7 Final shape of the structure, a) side view, b) frontal view





Tab. 1 Zatížení skořepiny ■  
Tab. 1 Loading of shell

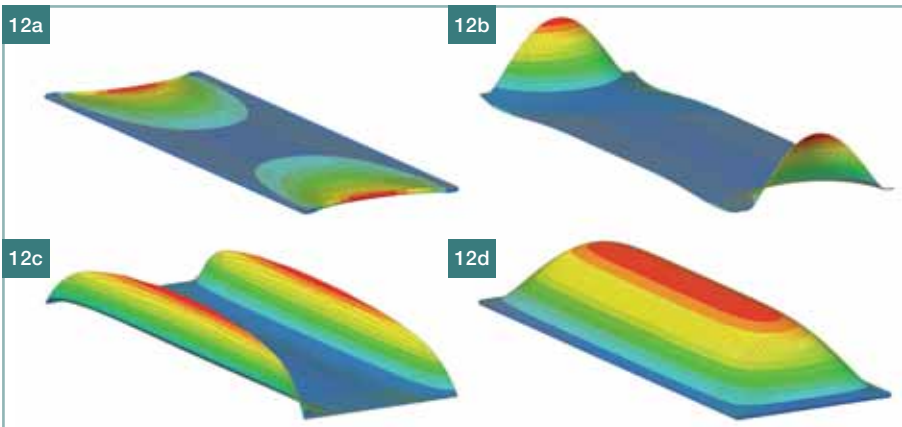
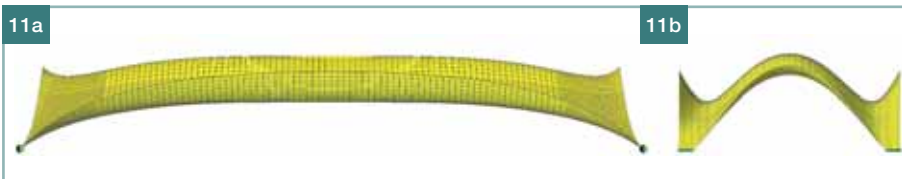
(a)	Vlastní tíha
(b)	Vlastní tíha + Zatížení sněhem 1,5 kN/m <sup>2</sup> na celé ploše
(c)	Vlastní tíha + Zatížení sněhem 1,5 kN/m <sup>2</sup> na podélné polovině
(d)	Vlastní tíha + Zatížení sněhem 1,5 kN/m <sup>2</sup> ve střední části
(e)	Vlastní tíha + Zatížení sněhem 1,5 kN/m <sup>2</sup> na příčné polovině
(f)	Vlastní tíha + Zatížení sněhem 1,5 kN/m <sup>2</sup> na čtvrtině

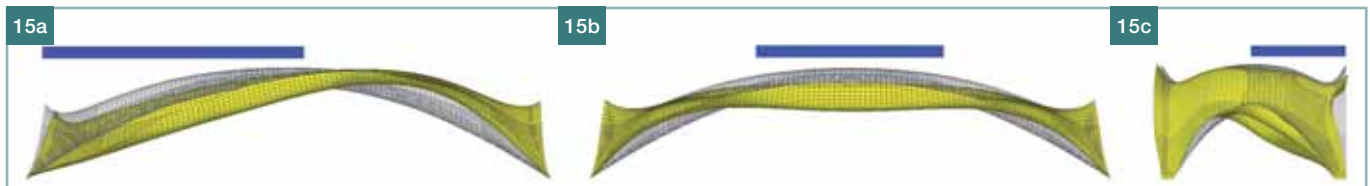
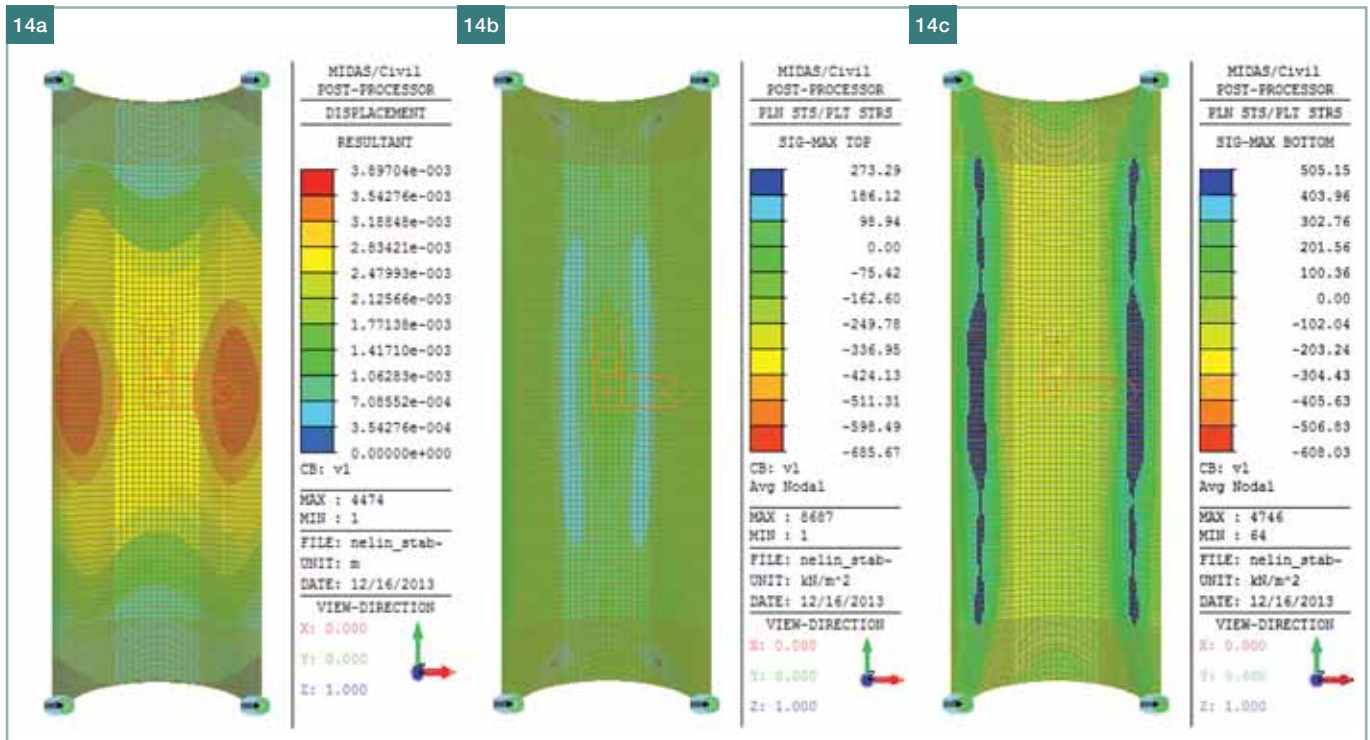


tvár konstrukce uvedený na obr. 7 je bez ztužujících okrajových žebër. Přes-to byla tato konstrukce dále posouze-na pro zatížení uvedená v tab. 1.

Na obr. 8 jsou uvedeny výsledky řešení pro zatížení vlastní tíhou. Obr. 8a ukazuje deformace konstrukce, obr. 8b maximální normálová napětí při horním povrchu a obr. 8c maximální normálová napětí při dolním povrchu skořepiny. Maximální deformace je 2,6 mm, maximální tahové napětí je 0,14 MPa. Konstrukce je převážně namáhána rovnoměrným tlakem, jeho maximální velikost dosahuje hodnoty 6,7 MPa. Je tedy zřejmé, že pro účinky vlastní tíhy je konstrukce navržena správně.

Jiná situace je pro ostatní zatížení.



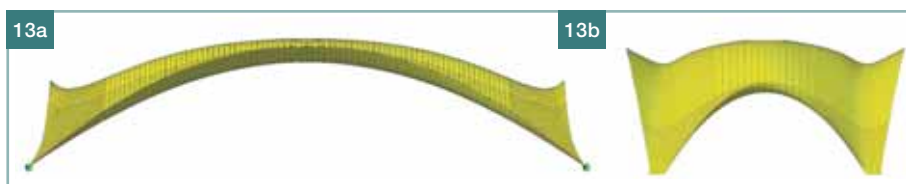


Obr. 8 Půdorys konstrukce, účinky od vlastní tíhy, a) deformace, b) maximální napětí v horních vláknech, c) maximální napětí v dolních vláknech | Fig. 8 Plan of the structure, effects of the self-weight, a) deformations, b) the maximum stresses at the top fibers, c) the maximum stresses at the bottom fibers

Obr. 9 Deformace konstrukce, a) zatížení (c), b) zatížení (d), c) zatížení (e) | Fig. 9 Deformation of the structures, a) load (c), b) load (d), c) load (e)

Obr. 10 Lávka Matadero a Invernadero, Madrid, Španělsko | Fig. 10 Matadero and Invernadero Footbridge, Madrid, Spain

Obr. 11 Tvar membrány po prvním kroku, a) boční pohled, b) čelní pohled | Fig. 11 Shape of the membrane after the first step, a) side view, b) frontal view



Obr. 12 Hledání tvaru membrány, a) zatížení vodorovným zatížením, b) zatížení svislým zatížením, c) zatížení svislým zatížením, d) zatížení vlastní tíhou | Fig. 12 Membrane shape finding, a) horizontal loads, b) vertical load, c) vertical load, d) self-weight

Obr. 13 Výsledný tvar konstrukce, a) boční pohled, b) čelní pohled | Fig. 13 Final shape of the structure, a) side view, b) frontal view

Obr. 14 Půdorys konstrukce, účinky od vlastní tíhy, a) deformace, b) maximální napětí v horních vláknech, c) maximální napětí v dolních vláknech | Fig. 14 Plan of the structure, effects of the self-weight, a) deformations, b) the maximum stresses at the top fibers, c) the maximum stresses at the bottom fibers

Obr. 15 Deformace konstrukce před ztrátou stability, a) zatížení (c), b) zatížení (d), c) zatížení (e) | Fig. 15 Deformation of the structure before buckling, a) load (c), b) load (d), c) load (e)

Kritická jsou zatížení (c), (d) a (e), při kterých deformace dosahují velikosti až 1,22 m (obr. 9) a tlaková a tahová napětí dosahují velikosti až 284 MPa. Tato napětí není konstrukce schopna přenést a takto navrženou konstrukci nelze postavit.

Je tedy nesporné, že konstrukci je nutno upravit. Jak již bylo uvedeno dříve, skořepiny nad obdélníkovým půdorysem se obvykle navrhují se ztužujícími okrajovými nosníky, nebo se zvětší tloušťka skořepiny (obr. 10). Pro-

fesor Isler však místo toho konstrukci elegantně ztužil jejím okrajovým zvlněním. Proto byl dále hledán postup, jak podobné zvlnění získat studovanou analýzou.

### Skořepina s okrajovým ztužením

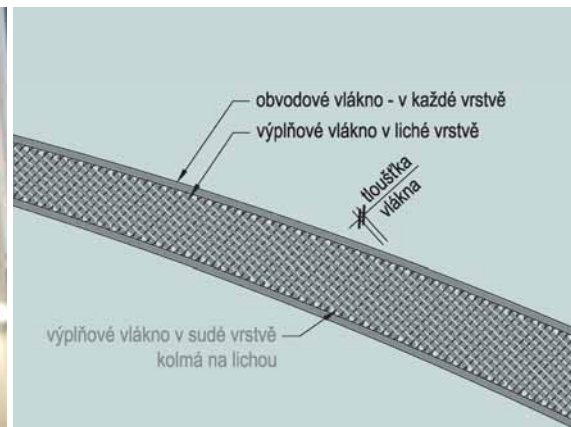
Je patrné, že pokud chceme analýzou získat konstrukci se zvlněnými okraji, nelze ve výchozím stavu vyjít z rovinné konstrukce a je nezbytné vyjít z konstrukce, která má zvednuté okraje. Tvar křivek zvednutí byl určen analýzou kon-

strukce zatížené okrajovým líniovým zatížením.

Výsledný výchozí stav (obr. 11) byl určen sečtením tvarů získaných zatížením konstrukce definované na obr. 4 a 5 postupně zatížené vodorovným (obr. 12a) a svislým (obr. 12b) líniovým zatížením kratších stran, svislým líniovým zatížením delších stran (obr. 12c) a vlastní tíhou (obr. 12d).

V druhém kroku byla konstrukce z obr. 11 řešena jako geometricky nelineární úloha pomocí Newton-Rapsonovy metody. Při řešení byly použity tři iterační kroky s deformačním konvergenčním kritériem 0,001. Výsledkem řešení byla zdeformovaná konstrukce, jejíž geometrie tvořila výchozí tvar pro následující iteraci. Iterace byla opako-

16



17

18



vána, pokud ve středu konstrukce nebylo dosaženo vzepětí 10 m.

Řešením byla získaná konstrukce, jejíž tvar byl velmi blízký požadovanému tvaru (obr. 13). Delší strany však nebyly přímé, a tak bylo nutno znovu upravit výchozí konstrukci.

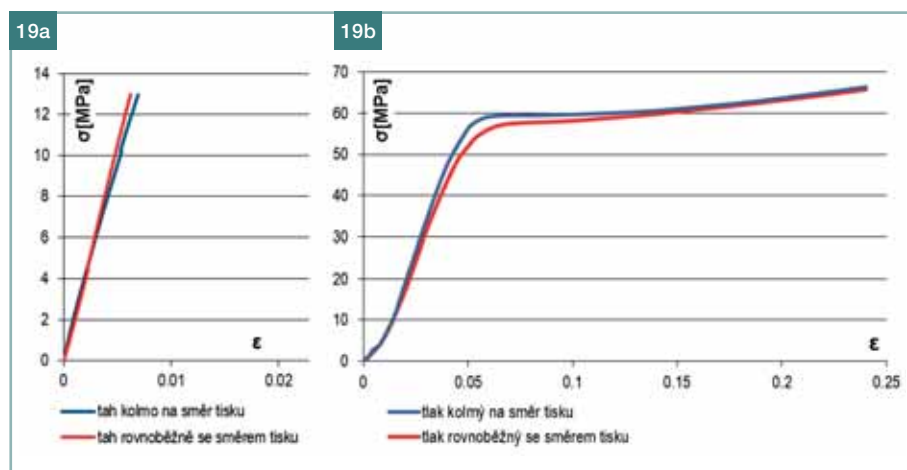
Proto byla geometrie modelu po-

dle obr. 11 v několika krocích iteračně upravena tak, aby pro provedení nelineárního výpočtu byla získána konstrukce s přímými delšími stranami. Takto byla získána skořepina požadovaného tvaru (obr. 3), která byla následně posouzena pro všechna zatížení uvedené v tab. 1.

Na obr. 14 jsou uvedeny výsledky řešení pro zatížení vlastní tíhou. Obr. 14a ukazuje deformace konstrukce, obr. 14b maximální normálová napětí při horním povrchu a obr. 14c maximální normálová napětí při dolním povrchu skořepiny. Maximální deformace je 3,9 mm, maximální tahové napětí je 0,51 MPa. 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.

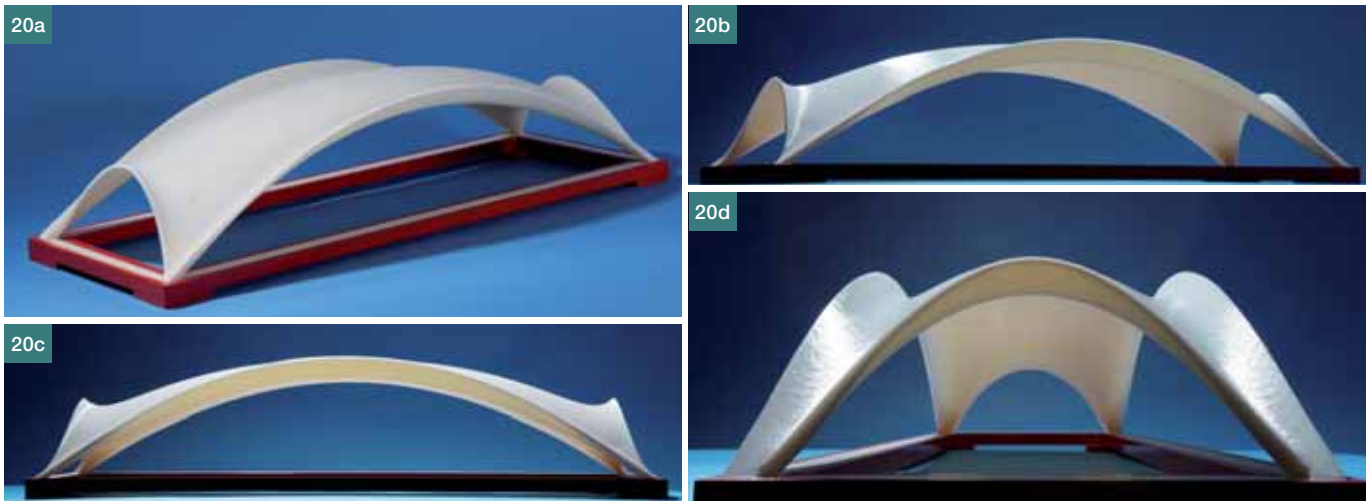
Také pro všechna ostatní zatížení jsou deformace a napětí v rozumných mezích. Pro kritické zatížení (c) situované na podélné polovině skořepiny je maximální deformace velikosti jen 16 mm, maximální tahové napětí dosahuje velikosti 3,5 MPa a maximální tlakové napětí je 8 MPa. Je patrné, že konstrukce bezpečně přenesla všechna normová zatížení.

Funkce skořepiny byla také ověřena stabilním 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 zatíže-



Tab. 2 Mechanické charakteristiky ■ Tab. 2 Mechanical properties

Mechanické charakteristiky	Zkušební metoda	Osy X Z	Osy Z X
Tahová pevnost, mez tečení (Typ 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	31 MPa	26 MPa
Mezní tahová pevnost (Typ 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	32 MPa	28 MPa
Tahový modul pružnosti (Typ 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2 230 MPa	2 180 MPa
Mezní tahové protažení (Typ 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	7 %	2 %
Tahové protažení na mezi tečení (Typ 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2 %	1 %
Ohybová pevnost (Metoda 1, 0.05"/min)	ASTM D790	60 MPa	48 MPa
Ohybový modul pružnosti (Metoda 1, 0.05"/min)	ASTM D790	2 060 MPa	1 760 MPa
Mezní ohybové poměrné přetvoření (Metoda 1, 0.05"/min)	ASTM D790	4 %	3,5 %



ní. Ztráta stability byla pro polohu zatížení (c) dosažena při 58,5násobku zatížení sněhem, pro polohu zatížení (d) při 75,5násobku zatížení sněhem a pro polohu zatížení (e) při 105násobku zatížení sněhem. Maximální deformace konstrukce před ztrátou stability dosahovaly pro polohu (c) velikosti 1,25 m, pro polohu (d) velikosti 0,64 m a pro polohu (d) velikosti 1,78 m. Z analýzy vyplývá, že ke ztrátě stability by došlo později, než k porušení konstrukce vlivem vyčerpání pevnosti betonu a únosnosti betonářské výztuže.

Z výsledků analýzy je evidentní, že skořepina, která je na okrajích ztužená svým 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.

#### MODEL

Z hlediska modelové podobnosti je vhodné vytvořit model ze stejného materiálu jako vlastní konstrukci, tedy z betonu. Tento přístup byl zvolen při analýze diagonální obloukové skořepiny [3] navržené jako lávka pro pěší s rozpětím 62 m (obr. 16). Skořepina byla vytvořena z betonu Tercon vyvinutého Doc. Terzijským. Beton byl vléván do otočené formy z boku do bednění, které tvořilo jak spodní, tak i horní plochu skořepiny. Návrh a výroba bednění i skořepiny byly velmi pracné.

I modely z polyesterové pryskyřice,

kteřé sloužily Prof. Islerovi pro ověření funkce skořepin, jsou náročné na výrobu a vyžadují značnou řemeslnou zručnost. Proto byla studována technologie 3D tisku.

Moderní technologie umožňují vytvořit nevyztuženou betonovou konstrukci pomocí 3D tisku [4]. Dosud se touto technologií vytváří převážně objekty drobné architektury. Je tedy patrné, že 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 využít

Obr. 16 Model diagonální obloukové skořepiny, zatěžovací zkouška ■

Fig. 16 Model of the diagonal arch shell, load test

Obr. 17 Skladba tištěného prvku ■

Fig. 17 Composition of printed element

Obr. 18 Přetržení zkušebního prvku ■

Fig. 18 Rupture of the test element

Obr. 19 Pracovní diagram, a) tah,

b) tlak ■ Fig. 19 Stress-strain response, a) tension, b) compression

Obr. 20a, b, c, d Podepření modelu v duralovém rámu ■

Fig. 20a, b, c, d Supporting of the model in an aluminum frame

Obr. 21 Model, pozice zatížení ■

Fig. 21 Model, load position

Obr. 22 Model, pozice zatížení a tensometrů ■

Fig. 22 Model, position of the load and strain gauges

Obr. 23 Model, zatížení (b) ■

Fig. 23 Model, load (b)

Obr. 24 Model, zatížení (c) ■

Fig. 24 Model, load (c)



vá 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 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. 17).

Zvolený průměr vláken byl vzhledem k velikosti modelu a tomu odpovídající ceně zvolen co největší – 0,33 mm. I tak tisk modelu trval více než 50 h. Pro tisk byl použit materiál označený ABS M 30 (akrylonitrilbutadienstyren), který je charakterizován parametry uvedenými v tab. 2.

Pro tisk byl použit přístroj Fortus 900mc s největším dostupným pracovním prostorem 914 x 610 x 914 mm, 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 sada zkušebních těles. Zkušební krychle o hraně 20 mm pro zkoušku tlakem, trámce průřezu 10 x 20 mm s rozšířenými konci pro tahovou zkoušku (obr. 18) a trámce 10 x 20 x 170 mm pro ověření ohybového namáhání. Zkoušky byly provedeny jednak pro namáhání působící v rovině vláken a jednak kolmo k rovině vláken. Pro určení Poissonova čísla byly také měřeny příčné deformace; jeho hodnota je  $\nu = 0,254$ .

Na obr. 19 jsou uvedeny pracovní diagramy pro namáhání v tahu a tlaku. Je patrné, že rozdíly pro namáhání působící v rovině vláken a kolmo k rovině vláken jsou malé. Protože při zkoušce tahem bylo protažení zkušebního prvku větší, než je rozsah tenzometrů, neznamená konec grafu dosažení pevnosti prvku.

Modul pružnosti, který je v rozsahu předpokládané hladiny zatížení modelu konstantní, je rozdílný pro tah a tlak. Pro analýzu modelu byl sta-

Obr. 25 Deformace v podélné ose modelu, a) zatížení (c), b) zatížení (d)

■ Fig. 25 Deformation in the model's longitudinal axis, a) load (c), b) load (d)

Obr. 26 Normálové napětí v podélném řezu dolní vlny podélného ztužení od zatížení (c) ■  
Fig. 26 Normal stresses in the longitudinal section of the bottom wave of the longitudinal stiffening due to load (c)

Obr. 27 Normálové napětí v podélném řezu dolní vlny podélného ztužení od zatížení (d) ■  
Fig. 27 Normal stresses in the longitudinal section of the bottom wave of the longitudinal stiffening due to load (d)

#### Literatura:

- [1] Stráský J.: Heinz Isler, stavitel skořepin, Beton TKS 2/2013, pp. 24–33
- [2] Musil J., Stráský J.: Hledání tvaru skořepinových konstrukcí, Beton TKS 5/2014, pp. 50–55
- [3] Strasky J.: Pedestrian bridges utilizing high-strength concrete, International Journal of Space Structures, Vol. 22, No. 1, 2007, pp. 61–79
- [4] Loughborough University Leicestershire, UK: 3D Concrete Printing: An innovative construction process, [www.freeformconstruction.com](http://www.freeformconstruction.com)
- [5] Hossdorf H.: Model Analysis of Structures, Van Nostrand Reinhold Company, 1974

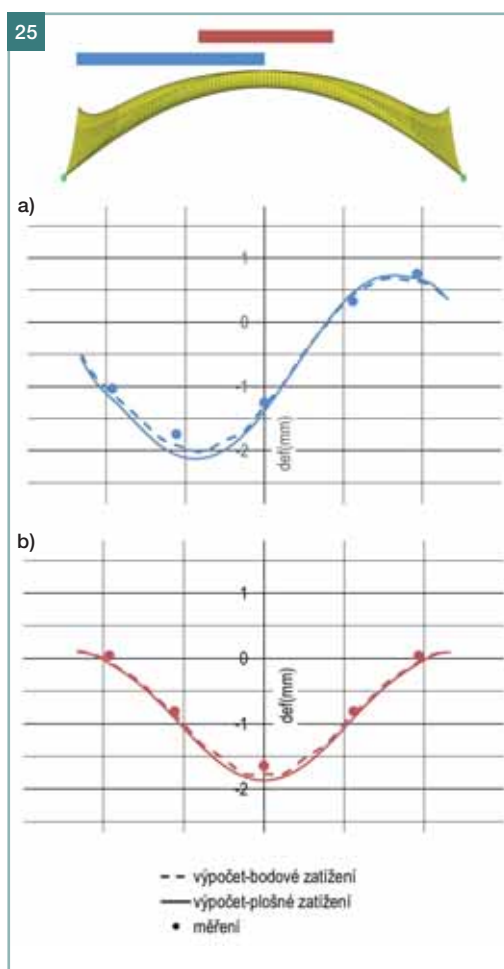
noven jako vážený průměr hodnotou  $E_m = 1\,820\text{ MPa}$ .

Model byl vytištěn s tahly spojujícími podpěry jak v podélném, tak i příčném směru. Po vytištění byl podporující materiál odstraněn a model byl vložen do duralového rámu, v kterém byl u podpěr podlit epoxidem (obr. 20). Obr. 20b až 20d dokumentují geometrii studované konstrukce.

Při návrhu zkušebního zatížení se vyšlo z modelové podobnosti. Zatížení bylo určeno z podmínky stejné velikosti napětí v modelu a ve skutečné konstrukci [5].

Model byl zkoušen pro polohy zatížení uvedené v tab. 1. Rovnoměrné zatížení bylo nahrazeno šedesáti osamělými břemeny rovnoměrně rozmístěnými na povrchu skořepiny (obr. 21). Mezi břemeny náhradního zatížení bylo na dvaceti místech osazeno celkem čtyřicet odporových tenzometrů, vždy jeden tenzometr shora a druhý zdola (obr. 22). Byly použity tenzometry 1-LY11-6/350 a 1-LY11-3/350.

Závaží byla vyrobena z ocelové kulatiny  $\varnothing 50\text{ mm}$ . Náhrada vlastní tíhy konstrukce byla realizována dvěma sadami závaží. Nahodilé zatížení bylo nahrazeno jednou sadou záva-

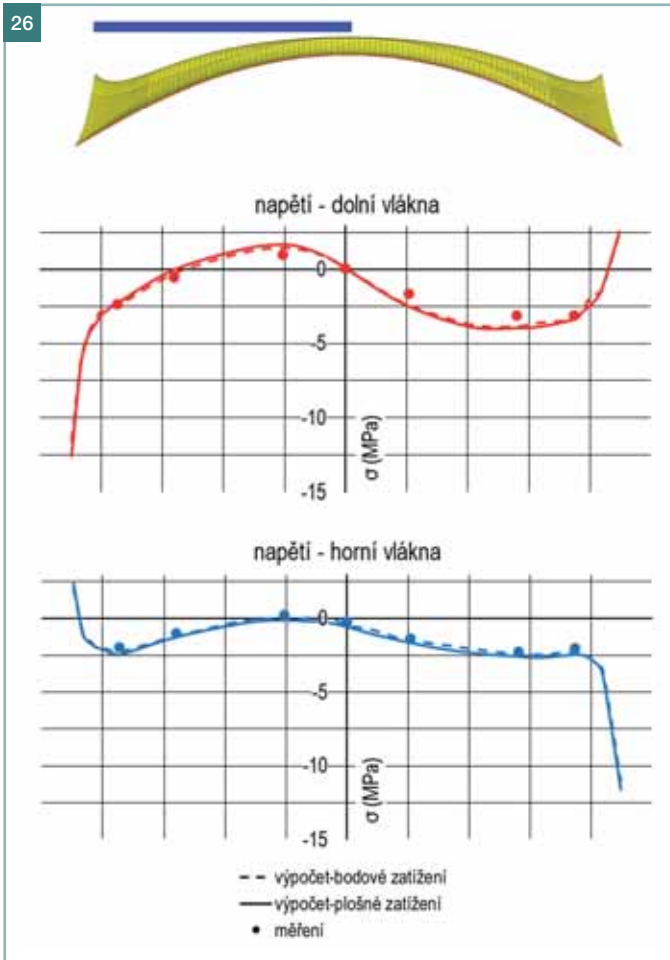


ží. S ohledem na polohu zatížení bylo nutno vyrobit 180 kusů závaží s třiceti různými hmotnostmi. Nejlehčí závaží vážilo 1,052 kg, nejtěžší 2,225 kg, maximální odchylka v hmotnosti závaží činila 0,5 %, přičemž průměrná odchylka v hmotnosti závaží činila 0,03 %. Hmotnost závaží pro náhradu vlastní tíhy činila 202,534 kg, pro náhradu nahodilého zatížení 99,44 kg, tedy maximální zatížení pro skořepinu bylo 301,974 kg.

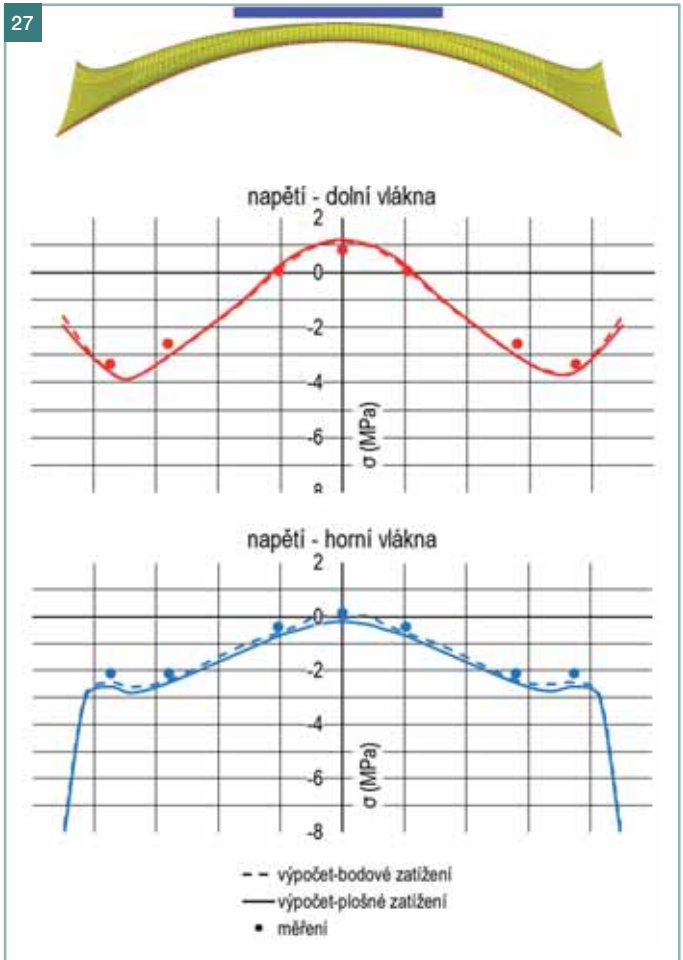
Pro porovnání deformací a napětí v měřených místech konstrukce byla pro všechny zatěžovací stavy provedena analýza modelu zatíženého plošným a bodovým zatížením. Z hlediska deformací došlo pouze k zanedbatelným odchylkám mezi oběma modely, z hlediska napětí nebyla situace tak příznivá, ale pro většinu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

Konstrukce modelu byla uložena

26



27



na dvojici vyvýšených podpěr tak, aby v prostoru mezi podpěrami bylo možné zavěsit závaží (obr. 23 a 24). Každé závaží bylo zavěšeno na provazec, který byl provlečen otvorem ve skořepině a zakotven v ocelové kruhové podložce průměru 7 mm podlité silikónem.

Zkouška modelu probíhala v laboratoři Ústavu betonových a zděných konstrukcí FAST VUT v Brně. 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 polohy zatížení uvedené v tab. 1 (obr. 23 a 24). 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.

Na obr. 25 jsou uvedeny vypočítané a změřené hodnoty deformací podélné osy modelu pro zatížení (c) a (d). Na obr. 26 a 27 jsou pro tato zatížení uvedeny vypočítané a změřené hod-

noty napětí v horních a dolních vlákních skořepiny v podélném řezu situovaném v dolní vlně okrajového zvlnění. Z obrázku je zřejmé, že shoda je velmi dobrá.

### 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.

Prof. Isler vhodným zvlněním okrajů skořepin vytvořil v konstrukci ztužující žebra, která omezila její deformace i namáhání. Proto mohla zůstat skořepina na okrajích bez obrub, a tak mohla být zvýrazněna jejich štíhlost. Takto byla demonstrována hlavní přednost skořepinových konstrukcí – plastická tvárnost a konstrukční efektivita.

Obr. 20b až 20d dokumentují, jak krásná je hospodárná inženýrská konstrukce. A přitom ve skutečnosti skoře-

pina tloušťky jen 120 mm tvoří střešní konstrukci s rozpětím 50 m.

Doufáme, že náš příspěvek přispěje k renezacii skořepinových konstrukcí a další vývoj technologie tisku betonových konstrukcí umožní jejich ekonomickou stavbu.

Analýza a modelová měření byly provedeny v rámci řešení projektu Technologické agentury České republiky TA02011322: „Prostorové konstrukce podepřené kabely a/nebo oblouky“ a za podpory projektu Specifického vysokoškolského výzkumu pod názvem: „Hledání optimálního tvaru skořepinových konstrukcí“, registrovaného na VUT pod číslem FAST-J-13-1972. Příspěvek byl napsán za přispění MŠMT projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0097, v rámci činnosti regionálního centra AdMaS „Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“.

Ing. Jiří Musil  
e-mail: j.musil@shp.eu



prof. Ing. Jiří Stráský, DSc.  
e-mail: j.strasky@shp.eu



oba: Fakulta stavební VUT v Brně  
Stráský, Hustý a partneři, s. r. o.  
Brno