

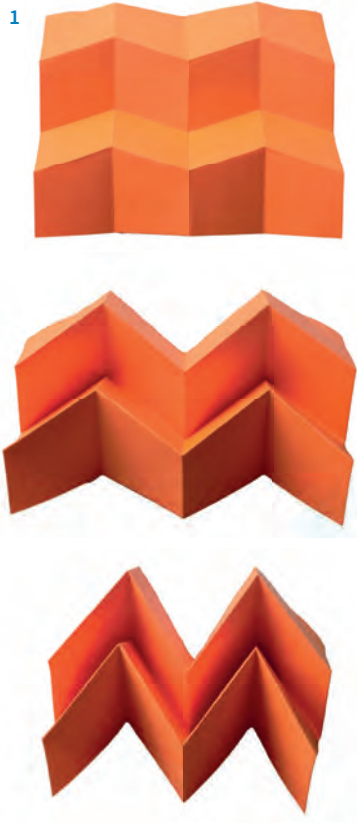
NÁVRH A VÝROBA MODELU MOSTU INSPIROVANÉHO ORIGAMI

DESIGN AND FABRICATION OF AN ORIGAMI-INSPIRED BRIDGE MODEL

TEXT Martin Salák, Michaela Frantová

Cílem článku je nastínit problematiku konstrukcí inspirovaných uměním origami a popsat proces návrhu a realizace modelu takovéto konstrukce. Nejdříve je popsána problematika origami obecně, poté je rozebráno současné směřování výzkumu a využití origami konstrukcí a nakonec je popsána vlastní výroba konkrétního modelu. Model byl navržen a spočítán pomocí výpočetního softwaru a způsob výroby bednění a betonáže byl zkoušen v průběhu výroby na menších částech konstrukce. Výsledkem popisované práce byl model vláknobetonového origami mostu s rozpětím cca 1,5 m, s kterým se tým studentů ČVUT zúčastnil mezinárodní soutěže vláknobetonových modelů mostů v Budapešti v červnu roku 2019.

The paper aims to outline the challenges of structures inspired by origami and describes the design and building of a small-scale model of such a structure. Properties of origami, in general, are reviewed first, then the trend of the contemporary research of origami structures is analysed and, finally, construction of a real, physical model is described. The model was designed using numerical software. The construction process together with the type of formwork were tested first on smaller elements of the structure. The result was a model of an origami-based bridge made of FRC with a span of approximately 1.5 m. The team of students of CTU in Prague who carried out this project took a part in an international contest for FRC structures in Budapest in June 2019.



Origami je starobylé japonské umění skládání papíru, jež se rozšířilo do celého světa. Název origami pochází až z konce 19. století, avšak samotné skládání papíru či látky je mnohem starší a objevilo se nezávisle na sobě na mnoha místech naší planety.

Dnes rozlišujeme mnoho druhů origami, přičemž nejlépe využitelný druh origami pro stavební konstrukce se nazývá origami teselace. Teselace je mozaikování či parketování a jedná se tedy o vyplnění prostoru opakováním jednoho nebo více geometrických tvarů bez překrývání a mezer. Nejslavnější technikou origami teselace je pravděpodobně Miura-Ori (obr. 1), která byla vymyšlena za účelem skládání solárních panelů ve vesmíru. V raketě musí být panel složen, ale jakmile se plavidlo dostane do vesmíru, musí být panel velmi snadno rozložitelný do roviny. Takto složený panel lze rozložit i složit jediným plynulým pohybem oddálením

jakýchkoli jeho dvou částí od sebe (na rozdíl např. od klasické mapy). [1]

Moderní technologie otevírají pro origami ve stavebnictví nové možnosti. Současné metody navrhování spolu s CNC obráběcími stroji jako by byly stvořeny právě pro origami konstrukce. Za pomoci této technologie lze velmi snadno vyrábět rovinné bednění jednoduchých i složitých tvarů. Jednoznačnou výhodou je opakovatelnost jednotlivých prvků bednění, která snižuje ekonomickou náročnost i při jedinečném tvaru origami konstrukce.

Přestože nelze najít mnoho velkých staveb využívajících princip origami, je jasné, že origami architekturu inspiruje. Na obr. 2 jsou příklady dvou moderních staveb inspirované origami sklady. Při výstavbě mezinárodního přístavního terminálu v Jokohamě v roce 2002 byl použit systém prolamovaných ocelových plechů a betonových nosníků (obr. 2a), pavilon v Ósace z roku 2008 je dřevěný (obr. 2b). [2], [3]



2a



2b



3a



3b



3c



3d

Vývoj betonových origami konstrukcí probíhá i na univerzitní půdě po celém světě, např. Martin Bechtold z Harvardské univerzity postavil v roce 2006 experimentální origami oblouk s rozpětím 6,5 m a tloušťkou betonových desek 20 mm. V této práci byly trojúhelníkové desky vybetonovány v rovině s vynechaným prostorem pro spoje, výztuž však těmito spoji probíhala. Spoje pak byly zmonolitněny po zvednutí konstrukce do finální podoby. [4], [5]

Na technické univerzitě v Cáchách Rostislav Chodba, Jan Dirk van der Woerd a Josef Hegger vyvinuli vlastní systém origami konstrukcí. Testovali různé způsoby skládání s ohledem na montáž. Zkoušeli např. využití mechanického jeřábu, který přidržel jednotlivé díly v dané poloze, nebo vyvěšení desek spojených textilií „vzhůru nohama“ a jejich následné zmonolitnění. [6], [7]

V tomto příspěvku je popsán návrh a technologický postup výroby modelu mostu s využitím právě origami tvaru, který byl zkonstruován na Katedře betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT. Tento model byl postaven s cílem účastnit se 4. mezinárodní soutěže modelů vláknobetonových mostů, která se konala 21. června 2019 v Budapešti současně s tradičním závodem betonových kánoí. [8]

Návrh a analýza konstrukce

Návrh modelu origami konstrukce začínal koncepčními návrhy tvaru a objevováním možností obloukovitých origami teselací. Jako nejvhodnější se zdál tzv. diamantový vzor (obr. 3d) pro svou jednoduchost. Takovýto origami oblouk je rozložitelný do roviny, což je základní vlastnost origami (je složeno z jedné roviny – papíru), avšak neplatí pro všechny lomenicové konstrukce.

Tuhost klenby s diamantovým vzorem byla analyzována pomocí softwaru Fusion 360 od společnosti Autodesk a byla porovnána s tuhostí klasické klenby při zachování stejného objemu materiálu, resp. origami oblouk s tloušťkou 20 mm byl porovnán s klasickým hladkým obloukem

1 Proces skládání Miura-Ori **2** Současné využití origami tvarů v konstrukcích: a) v Jokohamě (2002), b) v Ósace (2008) [2], [3] **3** Hledání vhodného tvaru origami oblouku

1 The process of folding of the Miura-Ori

2 Contemporary origami structures: a) in Yokohama (2002), b) and Osaka (2008) [2], [3]

3 Search for a suitable shape of the origami arch



4 Zkoumání nárůstu tuhosti oblouku při užití prolamování pomocí softwaru 5 Model vláknobetonového origami mostu 6 Proces modelování origami konstrukce 7 Deformace modelu v softwaru 8 Způsob betonáže oblouku 9 Testování bednění i betonové směsi
 4 Investigation of the rise in toughness of the arch using software for analysis of fracture 5 Model of a FRC origami bridge 6 Design process of the origami structure 7 Deformation of the model produced by the software 8 Method used for placing of concrete in the arch 9 Testing of the concrete mix and of the formwork

s tloušťkou 26,5 mm. Oba měly shodné rozpětí 4,5 m a šířku 0,9 m. Tento rychlý pokus byl proveden pro demonstraci zvýšení tuhosti prolamováním konstrukce a jevil se jako úspěšný, neboť maximální lineární průhyb prolamovaného origami oblouku byl o řád menší než průhyb oblouku hladkého (obr. 4).

Jak již bylo uvedeno, model origami mostu byl postaven podle pravidel soutěže „4th Concrete Bridge Competition“, a tak byl omezen maximální hmotností 80 kg, minimálním rozpětím 300 mm a co se týče materiálu, tak byly po-

veleny pouze materiály na bázi cementového kompositu s vyztužením vlákny o maximální délce 60 mm. Finální model byl tedy navržen na rozpětí 1,5 m a skládal se ze tří částí, všechny s předpokládanou tloušťkou 20 mm. Jednotlivé části jsou zobrazeny na obr. 5 rozdílnými barvami.

Model byl nejdříve analyzován v programu Fusion 360, který obsahuje pokročilé možnosti modelování a zároveň i základní lineární analýzu. Proces modelování je zobrazen na obr. 6: model byl zatížen vlastní tíhou a bodovým zatížením



9a



9b



9c



9d



9e

uprostřed rozpětí, což odpovídá zatěžování v průběhu soutěže. Kolaps modelu byl očekáván při zatížení 150 kg.

Výroba modelu

Materiál

Použitý materiál byl vybrán tak, aby odpovídal pravidlům soutěže, a především s ohledem na způsob betonáže, tedy lití do úzkého prostoru mezi prostorově tvarované bednění. Byla použita vlákna MasterFiber 401 délky 12 mm od společnosti BASF. Kompletní složení betonové směsi je v tab. 1. Tato směs již byla testována na betonové kánoi Fakulty stavební ČVUT v Praze vyrobené v roce 2018, vláknobeton takového složení má pevnost v tahu 8,1 MPa. [9]

Betonáž

Model mostu se skládal ze tří částí, z nichž každá byla betonována zvlášť. Jednalo se o mostovku o rozměrech 300 x 1 600 mm, dvě vzpěry a vlastní origami oblouk. Návrh počítal s betonáží oblouku v celku tak, že se položí na bok a beton bude vlit do oboustranného bednění, jak je znázorněno na obr. 8. Tento proces byl otestován, aby se ověřila dostatečná probetonovatelnost a tuhost bednění.

Testování probíhalo na devítině oblouku v reálných rozměrech modelu. Bednění bylo vyrobeno z dřevěné překližky tloušťky 4 mm a bylo spojeno lepidlem. Proces skládání bednění, betonáže i samotný vzorek je zobrazen na obr. 9. Bylo potvrzeno, že je tímto způsobem možné vybetonovat oblouk mostu v požadované kvalitě.

Tab. 1 Složení vláknobetonové směsi
Tab. 1 Mixture design

Složka	Množství [g]	
CEM I 42,5 R	600	
mikrosilika	120	
vápenec	150	
voda	215	
kamenivo	0-0,25 mm	150
	0,25-0,5 mm	550
	0,5-1 mm	250
plastifikátor (Stachema 2000)	30	
PVA vlákna	10	

Po úspěšném testování pokračovala výroba modelu stejným způsobem. Vnější i vnitřní strana bednění oblouku byly vyrobeny z překližky tloušťky 5 mm, každá strana bednění se skládala z 50 shodných trojúhelníků. Následně bylo bednění ošetřeno tmelem Lukopren pro snadnější odbednění a pro vytvoření nenasákové vrstvy na překližce. Celý proces je zobrazen na obr. 10.

Obě strany bednění byly vyrobeny z trojúhelníků a následně byly fixovány na desku a zajištěny tak proti tlaku betonu třemi dvojicemi latí. Dále bylo připraveno i bednění pro mostovku a vzpěry. Postup betonáže oblouku je patrný z obr. 11. Odbednění proběhlo jeden den po betonáži.

Hotový model samotného origami oblouku i celého mostu je zachycen



10a



10b



10c



11a



11b

Zdroje:

- [1] NISHIYAMA, Y. Miura Folding: Applying Origami to Space Exploration. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2012, Vol. 79, pp. 2269–2279.
- [2] LANGDON, D. AD Classics: Yokohama International Passenger Terminal / Foreign Office Architects (FOA). *ArchDaily* [online]. October 17, 2018. Dostupné z: www.archdaily.com/554132/ad-classics-yokohamainternational-passenger-terminal-foreign-office-architects-foa
- [3] ASHIZAWA, R. Bamboo Forest & Huts with Water. *Ryuichi Ashizawa Architects & associates* [online]. 2009. Dostupné z: www.r-a-architects.com/prj/2009/bambooforest.html
- [4] BECHTOLD, M. *Innovative Surface Structures: Technologies and Applications*. New York: Taylor and Francis, 2008.
- [5] BECHTOLD, M. *Concrete Origami*. *Harvard University, Graduate School of Design* [online]. 2019. Dostupné z: www.gsd.harvard.edu/project/concrete-origami-1/
- [6] VAN DER WOERD, J. D., CHUDOBA, R., HEGGER, J. Single-curved shell structure made out of textile-reinforced concrete plate using a folding technique. In: *Proceeding of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013*. Wroclaw University of Technology, Poland, 2013.
- [7] CHUDOBA, R., VAN DER WOERD, J. D. Thin-walled folded plate structures made of cementitious composites. *IMB RWTH Aachen University* [online]. Institute of Structural Concrete, 2018. Dostupné z: www.imb.rwth-aachen.de/en/research/finished-projects/231-thin-walled-folded-plate-structures
- [8] *Versenykiírás* [online]. 2019. Dostupné z: www.betonkenu.hu/versenykiirasrules/
- [9] ŠONKA, Š., FRANTOVÁ, M., ŠTEMBERK, P., BRAUN, J. Design and Structural Analysis of CTU in Prague 2018 Concrete Canoe. In: *Mechanika 2018. Proceedings of the 23rd International Scientific Conference*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2018. pp. 154–158. 2018.
- [10] SALÁK, M., FRANTOVÁ, M. FRC origami bridge model. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, 596. DOI: 10.1088/1757-899X/596/1/012038. ISSN 1757-899X. Dostupné také z: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/596/1/012038

na obr. 12. Oblouk byl vybetonován silnější, než byl původní záměr, a výsledná hmotnost oblouku byla 65,6 kg. Celý most vážil 79,5 kg. Vnitřní rozpětí oblouku bylo 1 400 mm a vze-pětí 800 mm. [10]

Zkouška únosnosti

S hotovým modelem se studenti ČVUT zúčastnili mezinárodní soutěže v Maďarsku. Součástí soutěže byla destruktivní zkouška únosnosti postupným zatěžováním konstrukce, jak je patrné z obr. 13. Na most byla zavěšena nádrž o hmotnosti 75 kg, která byla postupně plněna vodou. Během soutěže bylo po dohodě s organizátory rozhodnuto, že se bude zatěžovat pouze origami oblouk mostu. Zatěžovací zkouška po-



12

10 Tvorba dřevěného bednění **11** Proces betonáže origami oblouku **12** Hotový vláknobetonový origami model **13** Ze zatěžovací zkoušky oblouku

10 Construction of the timber formwork
11 Concreting of the origami arch **12** Finished FRC origami model **13** Load-bearing test of the arch

tvrdila očekávanou únosnost mostu 150 kg. Model mostu zkolaboval při zatížení 149 kg.

Závěr

Tento příspěvek měl za cíl nejen nastítnit současný vývoj a využití origami konstrukcí, ale také popsat výrobu jednoho modelu tohoto typu konstrukce. Vlastní konstrukce a materiál byly zvoleny na základě pravidel soutěže vláknobetonových modelů mostů.

Příspěvek ukazuje komplexní přístup od návrhu designu stavby až po konečné úpravy hotového modelu. Způsob betonáže byl upraven s ohledem na specifika modelu, potřebnou rychlost výstavby a požadovanou tuhost konstrukce. Všechny kroky výroby modelu byly předem testovány na menších částech konstrukce. 3D model a simulace soutěžního zatěžování byly provedeny před samotnou výstavbou modelu mostu.

Hotový model byl nakonec podroben destruktivní zkoušce únosnosti, která ověřila správnost výpočtů. Tento vláknobetonový origami model mostu byl na soutěži oceněn celkovým druhým místem nejen pro svou únosnost, ale i pro svůj zajímavý design.

Tato práce byla provedena za finanční podpory SGS ČVUT (projekt číslo SGS19/038/OHK1/1T/11), za kterou autoři děkují.



Ing. Martin Salák
martin.salak@fsv.cvut.cz



Ing. Michaela Frantová, Ph.D.
michaela.frantova@fsv.cvut.cz

oba: Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných konstrukcí

13

