

Mechanická odezva tvarově složitých konstrukcí v prostředí integrovaného návrhu

Ing. Ladislav SVOBODA, Ph.D.

Ing. Jan NOVÁK, Ph.D.

doc. Ing. Jan ZEMAN, Ph.D.

ČVUT – Fakulta stavební, Praha

Ing. arch. Lukáš KURILLA

Ing. arch. Marek RŮŽIČKA

Ing. arch. Miloš FLORIÁN, Ph.D.

ČVUT – Fakulta architektury, Praha

Ing. arch. Ondřej OTÝPKA

CUBESPACE, s. r. o., Praha

MgA. Federico DÍAZ

VŠUP – Ateliér supermédiá, Praha

Článek prezentuje pilotní výsledky nově budované metodiky a programových nástrojů pro parametrický návrh tvarově složitých konstrukcí. Místo vývoje monolitického softwarového řešení je důraz kladen na propojení architektonických a statických programů, které nabízejí dostatečné možnosti rozšíření, a to díky otevřenosti zdrojového kódu a/nebo skriptování. Výsledky tří studií, získaných pomocí modeláře Rhinoceros® a programu OOFEM, prokazují, že navrhovaná metodika a vyvinuté programové prostředky umožňují dosáhnout větší flexibility a rychlosti při architektonickém návrhu, a tím i atraktivnějších a odvážnějších konstrukcí.

Úvod

Ve stavebním průmyslu se v současné době stále častěji prosazuje projektování založené na principu BIM (Building Information Model/Modelling) [1]. Často se hovoří o přechodu od navrhování založeném na CAD (Computer-Aided Design) k BIM, a to podobně jako se v minulosti odehrál přechod od manuálního kreslení s využitím rýsovacího prkna ke CAD. Pojem BIM zahrnuje proces vytváření a spravování dat o stavebním dílu během celého jeho životního cyklu. Výsledkem pak je „informační model budovy“, který integruje všechny informace o stavbě počínaje architektonickým návrhem (geometrií budovy, prostorové vztahy), konstrukčním návrhem (projektovou dokumentaci, statické schéma) až po proces výstavby a údržby (prováděcí výkresy). Obvykle jde o trojrozměrný model vytvářený pomocí specializovaných CAD-BIM systémů. Díky tomuto integračnímu procesu mohou architekti, stavební inženýři, stavební firmy a vlastníci budov efektivněji vytvářet a koordinovat digitální dokumentaci k objektu tak, aby byla možná jeho změna v kterékoli fázi projektu. Cíleně byl pro potřeby BIM navržen datový model Industry Foundation Classes [2], který má usnadnit sdílení dat napříč různými počítačovými aplikacemi používanými ve stavebnictví.

Z uvedených faktů se zdá být zřejmé, že budoucnost spolupráce mezi stavebními profesemi spočívá v koncepci BIM. V jistých případech je nicméně tento přístup příliš těžkopádný. Jde hlavně o počáteční fáze architektonického návrhu (záměr, studie), které jsou charakteristické úzkou interakcí s objednatelům a ověřováním základních koncepcí projektu,

a BIM je tedy v tomto stadiu zbytečně složitý a obecný. Poznamenejme, že tato fáze trvá zpravidla několik měsíců (v extrémních případech i let) a vyžaduje nezanedbatelné finanční prostředky. Je tedy žádoucí, aby architekt již v této etapě navrhování ověřil, zda projektovaná konstrukce nemá zásadní prohřešky proti principům statického působení, které by bylo v pozdějších stadiích nesnadné a nákladné odstranit.

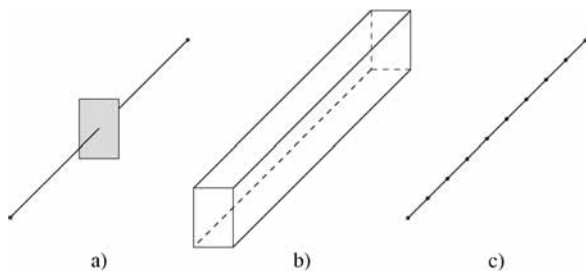
Z těchto důvodů se omezíme na zlepšení spolupráce pouze mezi dvěma subjekty, a to architektem (projektantem) a statikem ve fázi koncepčního návrhu objektu. Samozřejmě, že i v rámci takto omezené spolupráce je výhodné se držet základních myšlenek BIM, kdy je ke každému elementu přiřazena dodatečná informace o materiálu, zatížení a geometrických charakteristikách. Výsledný datový formát je poté využíván sadou jednoduchých nástrojů, umožňujících interaktivní výpočet mechanické odezvy topologicky složitěho architektonického modelu. Důraz je přitom kladen na modulární strukturu nástrojů, která umožňuje kombinovat existující volně dostupné a komerční architektonické modeláře a výpočetní balíky [3]. To významně rozšiřuje jejich použitelnost v porovnání s nedávno vyvinutými produkty, které jsou založeny na monolitickém návrhu softwaru, např. [4],[5]. Celá sada těchto nástrojů je volně k dispozici [6] případným zájemcům ze ziskového i neziskového sektoru, zejména pak studentům s umělecko-technickým zaměřením.

Metodologie

Při spolupráci mezi architektem a statikem narážíme na zásadní nekompatibilitu obou profesí ve smyslu priorit kladených na počítačový model. Zjednodušeně lze říci, že zatímco architekt klade největší důraz na estetiku vnějšího pláště budovy, statika naopak zajímá především to, co se skrývá „pod skořápkou“. Provedení statického výpočtu přímo na architektonickém modelu, který představuje skutečný trojrozměrný tvar konstrukce, je ve většině případů neli nemožné, tak přinejmenším velmi složité a neefektivní. Proto je nezbytné model geometricky maximálně zjednodušit, samozřejmě při zachování staticky výstižného výpočetního schématu. Typicky tuto transformaci provádí inženýrstatik na základě svých zkušeností a profesních znalostí. Plná automatizace tohoto procesu je tedy velmi obtížná, a to i při důsledném využití metodiky BIM, jak bylo diskutováno výše.

Naším cílem je proto vývoj jednoduchého programového nástroje pro statickou analýzu hmotových nebo tvarových

studií. Předpokládá se přitom, že architektonický model reprezentuje pouze nosnou konstrukci objektu, a lze tudíž provést jeho (téměř) automatickou konverzi na výpočtové schéma (téměř) bez zásahu statika. V parametrickém modeláři, běžně používaném v moderní architektuře, lze takového předpokladu dosáhnout využitím skriptů (sekvencí příkazů), které na základě vytvářeného architektonického modelu generují odpovídající statické schéma. Ze základních nástrojů BIM se k takovému účelu nabízí možnost využití objektového modelování. Jeho výhody lze stručně demonstrovat na příkladu nosníku s obdélníkovým průřezem. V klasickém architektonickém modelu je nosník vykreslen na výstupním zařízení a udržován v paměti jako soustava dvanácti úseček topologicky svázaných s uzly umístěnými v jeho vrcholech (*obr. 1b*). V objektovém modelování však uživatel zkonstruuje pouze jedinou úsečku typu „prut“, jemuž přiřadí vlastnost „průřez“, v tomto případě obdélníkový (*obr. 1a*). Konstrukci z objektů pak můžeme zobrazit nebo exportovat v „návrhovém módu“ zobrazujícím nosník jako trojrozměrné těleso (*obr. 1b*). Ve „statickém módu“ se tentýž nosník zpracovává pouze jako úsečka, která je při statické analýze nahrazena liniovými konečnými prvky s prostorovými stupni volnosti (*obr. 1c*).



Obr. 1. Objektový model prostého nosníku s obdélníkovým průřezem

Díky tomuto přístupu může architekt vizuálně kontrolovat skutečnou podobu namodelované konstrukce, a zároveň má k dispozici statický výpočtový model. Obdobně jako je prismatickému prutu z *obr. 1* přiřazena úsečka reprezentující jeho výpočtový obraz, lze i jiným geometrickým prvkům (desce, stěně, skořepině atd.) přiřadit jejich výpočtové ekvivalenty. Koncepce zvoleného softwarového řešení je uvedena v *obr. 2*. Je dodržen modulární přístup, přičemž každý z modulů je odpovědný za část komunikace statik-designér.



Obr. 2. Sled programů použitých při analýze architektonického modelu

Zatímco zásuvné moduly (dostupné zatím pouze pro modelář Rhinceros®) a konvertor MIDAS [7] (Multifunctional Interface between Design and Mechanical Response Solver) jsou nově vytvářeny, zbylé součásti představují existující, převážně komerční, programy [8]. Výjimkou je otevřený konečněprvkový balík OOFEM [9], který byl v rámci této studie rozšířen o některé nové elementy a funkce. V popsaném řetězci chybí zmínka o generování sítě konečných prvků na výpočetním modelu, modely prezentované v této studii jsou totiž konstruovány pomocí NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) křivek, se kterými dostupné progra-

my neumí pracovat. Proto byla síť konečných prvků vytvářena přímo v modeláři. Obecnější možností je předat konvertoru MIDAS pouze geometrii modelu a ten síť konečných prvků vygeneruje pomocí externího programu. Pak by byl řetězec zobrazený na *obr. 2* doplněn o buňku „Generátor sítě“ ležící mezi zásuvnými moduly a MIDAS.

Zásuvné moduly slouží primárně k obohacení existujícího objemového modelu o informace nezbytné pro statickou analýzu. Standardní průběh přípravy výpočetního modelu pomocí modulů:

1. vytvoření architektonického modelu;
2. úpravy modelu pro potřeby analýzy – odstranění detailů, nenosných prvků atd.;
3. generování sítě konečných prvků;
4. přiřazení průřezů (pomocí identifikačních čísel) daným částem (nosné) konstrukce;
5. přiřazení materiálů (pomocí identifikačních čísel) daným částem konstrukce;
6. podepření daných částí konstrukce zvoleným typem podpor;
7. zatížení daných částí konstrukce zvoleným typem zatížení (zpravidla dostává vlastní tíha konstrukce, aby byla odhalena většina slabých míst koncepčního návrhu [10]);
8. spuštění automatického zpracování a výpočtu.

Základní průřezové a materiálové charakteristiky jsou spravovány v externí databázi. Po spuštění automatického zpracování jsou data (vlastní geometrie a ostatní pomocné informace) předávány konvertoru MIDAS pomocí souborů ve formátu VTK [11] (Visualization ToolKit), ve stejném formátu jsou získány i výsledky statického výpočtu. Ty lze následně zobrazit přímo v modeláři nebo ve volně dostupných prohlížečích (Paraview, MayaVi [12]).

Hlavním programem z vytvářené sady nástrojů je MIDAS. V nejjednodušším případě (při úplné shodě statického a architektonického modelu) provede pouhou konverzi dat přijatých z modeláře na vstupní datový soubor pro statický program, tj. vybere z databáze materiály a přiřadí je konečným prvkům, předepíše požadovaná zatížení atd. Pro složitější scénáře jsou v programu implementovány i další funkce, jako je např. vyhledávání a slučování totožných uzlů a elementů v síti konečných prvků, detekce a mazání elementů nulových rozměrů, kontrola kvality sítě, detekce podoblastí separovaných od hlavní řešené oblasti, detekce nepodpřítých konců příhradových prutů, integrace vyztužení do řešené konstrukce, možnost přípravy dat pro paralelní výpočet. Z výčtu vlastností programu MIDAS je zřejmé, že jde o nástroj s relativně jednoduchými, ale výkonnými funkcemi, které mohou být díky otevřenosti zdrojového kódu dle potřeby rozšiřovány, např. při řešení nestandardních úloh s komplikovanou geometrií a topologií.

Příklady

Navrhovaný koncept integrovaného návrhu je ověřen na třech příkladech. Studie byly vypracovány ve spolupráci architektonického ateliéru FLOW [13], [14] na Fakultě architektury ČVUT (FA ČVUT), architektonického studia CUBESPACE [15] a Federica Díaze [16]. Tyto ateliéry se zabývají tzv. digitální nebo též algoritmickou architekturou a ke generování tvarů budov primárně využívají počítačové algoritmy [17]. Stavby jsou pak většinou natolik vzdáleny od klasických schémat, že je bez počítačové podpory často obtížné kvalifikovaně odhadnout statické působení a při-

padná slabá místa konstrukce. Všechny prezentované výsledky byly získány pomocí modeláře Rhinoceros a statického softwaru OOFEM.

První příklad *skleněného rodinného domu* představuje ideální situaci, kdy model hmotové studie skořepinové konstrukce přímo reprezentuje nosnou konstrukci a vlastní analýza může proběhnout automaticky. Konstrukce *Annelida* naopak představuje staticky a konstrukčně heterogenní strukturu kombinující systém prutů a skořepin. Poslední konstrukce *Geometric Death Frequency-141* demonstruje především schopnost heuristických analýz modulu MIDAS převést velmi složitou prostorovou úlohu na mnohem jednodušší prutový systém, a tím výrazně požadovaný výpočetní čas redukovat.

Příklad 1 – Skleněný rodinný dům

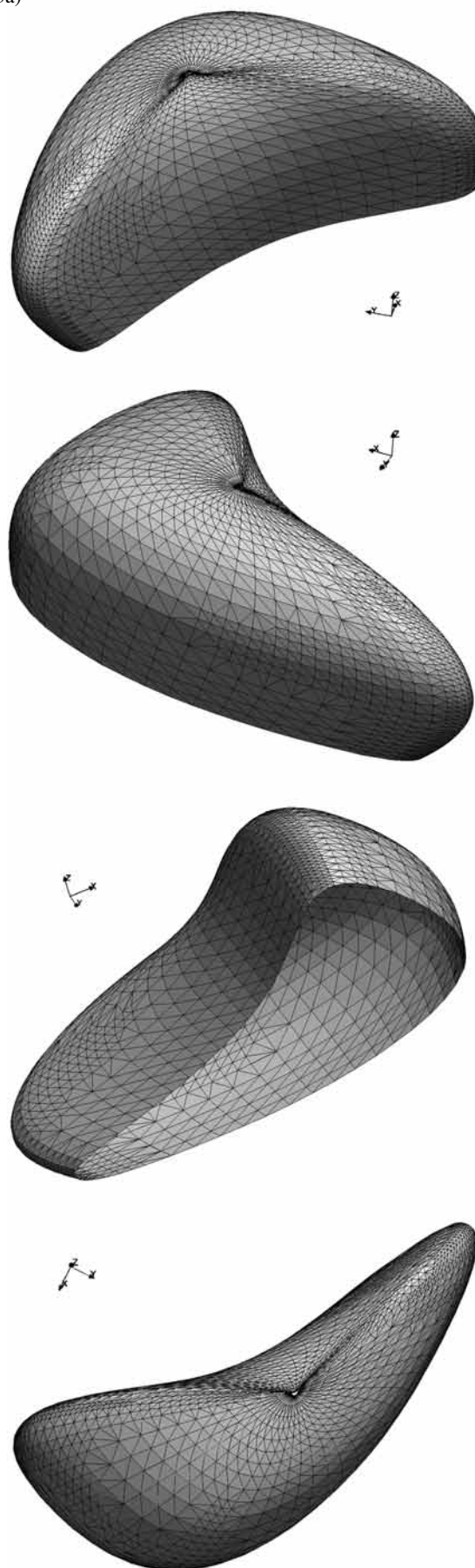
Stavbu navrhl Tomáš Tatýrek v rámci semestrálního projektu [18] na FA ČVUT jako soubor několika skleněných obytných buněk s označením SLC (space, light, curve – prostor, světlo, křivka). V této stavebnici si rozložení, velikost a počet buněk volí každý investor individuálně. Typicky se dům skládá z 5-8 buněk poskládaných do tvaru vějíře, v němž jedna buňka obvykle představuje jeden pokoj. Detailní návrh buňky (prostupy skleněnou stěnou atd.) byl proveden až v dalších fázích návrhu. Posuzována byla jedna vybraná buňka (obr. 3a). Ze statického hlediska jde o samonosnou skořepinovou konstrukci o charakteristických rozměrech cca 12x9x4 m, navrženou z izolačního dvojskla a podepřenou pouze v místě styku se zemí. Architektonický model byl vytvořen v programu Rhinoceros pomocí jedné plochy NURBS. Požadavkem autora bylo ověřit, zda je zvolený tvar konstrukce vhodný vzhledem k zatížení vlastní tíhou, v opačném případě identifikovat kriticky namáhané oblasti pro jeho následnou optimalizaci.

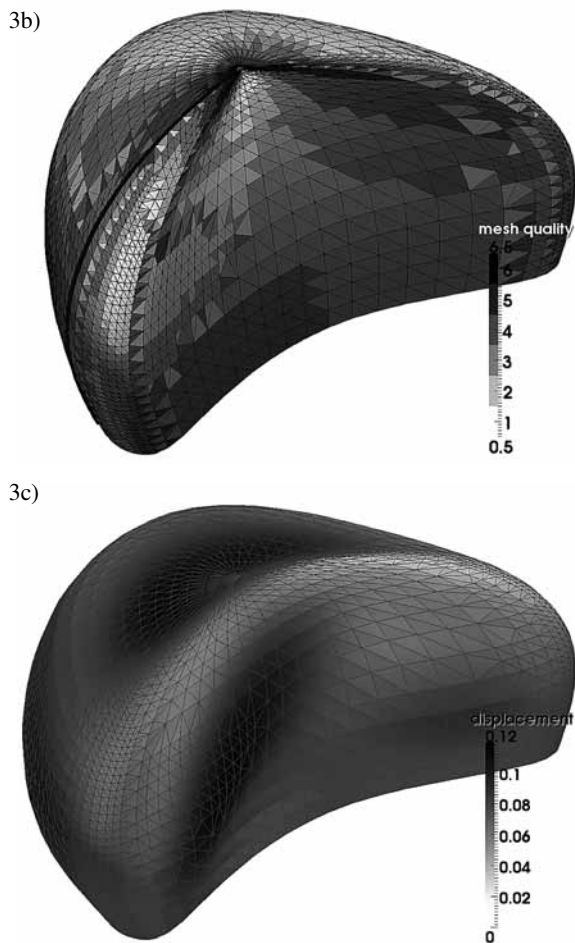
Model je tvarově čistý, konstrukčně jednotný a lze ho bez úprav použít pro statickou analýzu. Zadání tedy představuje modelový případ hmotové studie, v níž lze vzhledem k jednotnému konstrukčnímu systému předpokládat minimální zásahy uživatele-architekta a je možné přímo přistoupit k řešení statické odezvy. Za tímto účelem bylo nutné v modeláři provést tyto kroky (včetně generování sítě konečných prvků z důvodu použití plochy NURBS):

1. převést plochu NURBS na trojúhelníkovou síť a v oblasti jejího vertikálního „švu“ vynutit identickou polohu každého zdvojeného uzlu (obr. 3b);
2. zapnout požadavek na slučování zdvojených uzlů – plocha ve švu se spojí v celek;
3. označit uzly, ve kterých mají být podpory;
4. všem trojúhelníkům přiřadit shodné identifikační číslo tloušťky skořepiny a materiálu;
5. všem trojúhelníkům přiřadit zatížení vlastní vahou;
6. spustit výpočet.

Další kroky probíhají automaticky. Exportovaný soubor VTK byl zpracován konvertorem MIDAS přesně dle shora uvedených pokynů uživatele, tj. odstranění duplicitních bodů vzniklých na švu plochy NURBS, zatížení vlastní vahou, přiřazení tloušťek a materiálů jednotlivým konečným prvkům. Při zpracování byla v některých případech detekována špatná kvalita konečných prvků, a proto byl vytvořen nový soubor VTK s jejím ohodnocením pro případné úpravy sítě (obr. 3b). Po zpracování byla data předána řešiči OOFEM. Jako výsledek výpočtu byl vygenerován další soubor VTK s vypočtenými mechanickými veličinami (posuny a napětí, viz obr. 3c), které byly následně načteny programem Rhinoceros a vyhodnoceny uživatelem.

3a)





Obr. 3. Buňka SLC, architektonický a statický model
 a – pohledy na konstrukci, b – kvalita prvků; 1 – dobrá, 6 – špatná, vyznačena poloha „švu“ plochy NURBS, c – posunutí od vlastního zatížení [mm] na deformované konstrukci

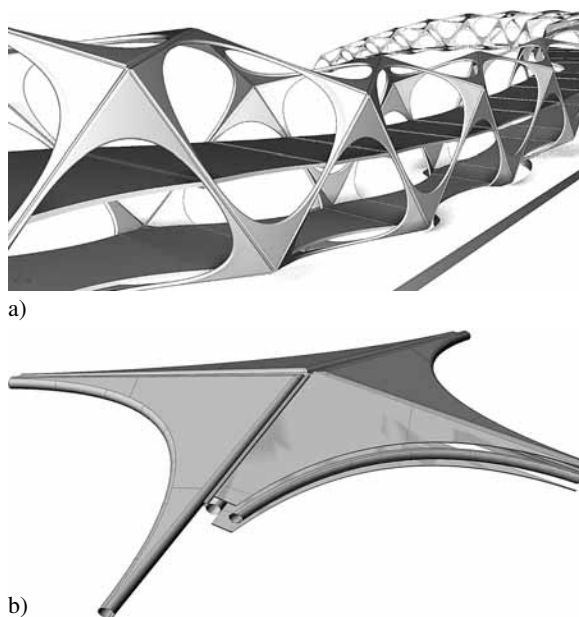
Příklad 2 – Annelida

Především příklad demonstruje jednoduchou konstrukci, u níž bylo nezbytné vykonat pouze několik úkonů a vlastní model nebylo nutné jakkoli upravovat. Konstrukce Annelida naopak demonstruje jednu ze skupiny konstrukčně složitějších úloh, kde původní model bylo nutné zjednodušit pro následnou statickou analýzu. Zjednodušenou verzi ocelové lávky o rozměrech 44x8x12 m navrhl Lukáš Kurilla v rámci diplomové práce [19]. Kostra konstrukce je složena z ocelových trubek, kde přímé pruty vytvářejí okrajové hrany opakujícího se geometrického vzoru zborceného čtyřúhelníku (obr. 4a). Každý vrchol čtyřúhelníku je vyztužen obloukovým náběhem, a to ze dvou rovinných plechů, které jsou zarovnané s okraji trubky (obr. 4b). Konstrukce je podepřena na obou koncích vždy ve dvou bodech. Architektonický model byl vygenerován automaticky pomocí parametrizovaného skriptu. Na základě výsledků statické analýzy pak dochází k úpravě těchto parametrů a následně optimalizaci tvaru.

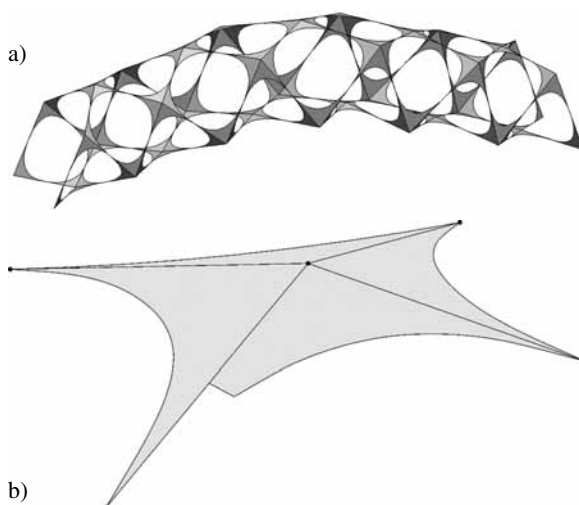
Jak je patrné z obr. 4, architektonický model je již vytvořen s ohledem na technologii provádění jednotlivých detailů. Hrany čtyřúhelníků jsou modelovány z prutů kruhového průřezu a dvojice plechů s odpovídající vzájemnou vzdáleností. Z takto koncipovaného modelu by samozřejmě bylo možné vygenerovat detailní síť skořepinových nebo objemových konečných prvků, jako např. v [5], tyto prvky by však na stěnách trubek byly nepřiměřeně malé. To by vedlo k velkému počtu stupňů volnosti úlohy a značným problémům

s výpočtem na běžně užívaných osobních počítačích. Nejednoznačný by v případě takového pojetí zůstal i způsob připojení dvojice souběžných přímých prutů, které jsou díky složitě topologii konstrukčních prvků lehce mimoběžné. V architektonickém návrhu jsou mezi nimi sice vloženy tenké pruty, ale mají pouze estetický význam. Z těchto důvodů bylo nutné upravit skript generující konstrukci tak, aby byly trubky modelovány pomocí křivek nulového průřezu a zdvojený plech jako přiléhající náběh reprezentovaný jednoduchou rovinnou plochou (obr. 5).

Další kroky jsou shodné s předchozím příkladem nesouměrné skořepiny, tj. výběr podpor, přiřazení materiálů, průřezů atd. Síť byla opět generována v programu Rhinoceros a na styku prutových a skořepinových prvků byly vynuceny souhlasné polohy uzlů, které byly sloučeny programem MIDAS.



Obr. 4. Annelida, architektonický model
 a – celek, b – detail vyztuženého styčnicku



Obr. 5. Annelida, statický model
 a – celek, b – detail vyztuženého styčnicku

Příklad 3 – Geometric Death Frequency-141

Na posledním příkladu předvedeme použití představené sady nástrojů na nestandardní konstrukci uměleckého díla

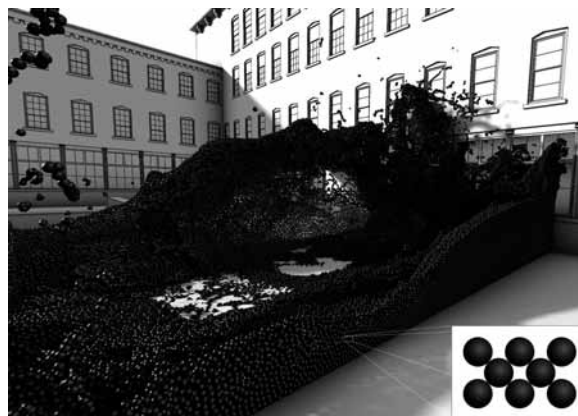
Geometric Death Frequency-141¹, instalovaného Fredericem Díazem v MASS MoCA (Massachusetts Museum of Contemporary Art) [20]. Konstrukce zde z obdobných důvodů jako v případě lávky nemohla být posouzena automaticky, a navíc bylo třeba při jejím zpracování nutné obohatit MIDAS o další funkce. Jde o skulpturu představující vlnu, která vznikne proniknutím určitého množství tekutiny do ohraničeného prostoru ve tvaru kvádrů. Pohyb tekutiny byl simulován digitálně a z vytvořené animace byl vybrán jeden snímek tvaru vlny. Získaný prostorový tvar byl posléze vyplněn dutými kuličkami z plastu ABS Ø 47 mm s tloušťkou stěny 1 mm, sestavených v pravidelném rastru (obr. 6). V místech dotyku jsou kuličky navzájem spleeny a vytvářejí tak samonosnou prostorovou konstrukci složenou z přibližně 420 tisíc kusů. Toto množství vylučuje ruční úpravy a kontrolu detailů a celý proces musel být plně automatizovaný.

Pro potřeby statického posudku byla část konstrukce ve tvaru klenby čítající cca 250 tisíc kuliček převedena na síť složenou z prutových prvků, kde ve středu každé kuličky byl umístěn uzel sítě a každému lepenému spoji odpovídal jeden prut spojující odpovídající středy (obr. 6, obr. 7). Momentová únosnost a tuhost prutů byly určeny experimentálně, zatěžovací zkouškou konzoly vytvořené z 10 kuliček². Tuhost byla navíc ověřena detailní konečněprvkovou simulací v systému ANSYS. Podpory byly umístěny do uzlů příslušejících kuličkám přilepeným k pevnému podkladu. Konstrukce byla posouzena na zatížení vlastní tíhou a sněhem. Celý proces přechodu od vlny z homogenního materiálu ke konečněprvkové síti byl řízen sadou jednoúčelových skriptů v programu Rhinoceros. Pomocí konvertoru MIDAS byla síť nejprve validována, tj. byla kontrolována duplicita prvků a uzlů a uzly nespojené s hlavním celkem (kuličky vznášející se ve vzduchu) byly vyloučeny jak z výpočtu, tak z následné realizace [20]. Po geometrické úpravě sítě byly přidány podpory a zatížení a vytvořen soubor VTK. Ten byl vizuálně překontrolován, zda při automatickém zpracování nevznikla nějaká zásadní chyba, např. v podobě deformace vnějšího tvaru. Poté byla úloha předána statickému programu OOFEM a ze získaných výsledků byly do modeláře předány relevantní informace o překročení únosnosti struktury (obr. 7). Vzniklý výpočtový model měl přibližně 800 tisíc stupňů volnosti, a bylo proto nutné při analýze použít iterační řešič s předpokládáním IML [21]. Tento řešič však vykazuje špatnou konvergenci pro konstrukce s výrazně proměnnou tuhostí, což je právě analyzovaná konstrukce, kdy je změna její tuhosti způsobena dlouhými a tenkými výběžky stříkající kapaliny. Do programu MIDAS byla proto přidána funkce, která odstraňuje výběžky o tloušťce 1 až 2 kuliček. Při praktickém použití funkce bylo odstraněno přibližně 1 % uzlů a prutů, což nemělo vliv na celkovou únosnost konstrukce, zatímco čas výpočtu se výrazně zkrátil, někdy i na desetinu původní doby. Analýzou byla detekována slabá místa (obr. 7) a konstrukce byla následně upravena – byl vybrán jiný snímek z digitální animace a na vhodná místa byly přidány nebo ubrány kuličky zahuštěním rastru nebo lokální změnou tvaru kapaliny. Tento proces optimalizace se opakoval několikrát, než bylo dosaženo uspokojivého výsledku, tj. frekvence č. 141³.

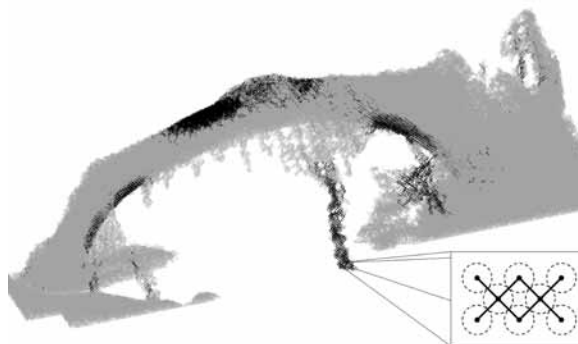
Závěr

Článek je věnován jedné ze součástí komplexního integrovaného návrhu tvarově složitých konstrukcí, a to výpočtu jejich mechanické odezvy ve fázi koncepčního návrhu. Soustředili jsme se na maximální možnou automatizaci procesu posouzení stavebně uměleckého díla v počátečních fázích návrhu a z ní vyplývající úsporu času. Byla představena jednoduchá, ale účinná metodika, založená na rozhraní s otevřeným kódem, která umožňuje propojit existující statické a architektonické nástroje. Poznatky získané z analýzy tří reprezentativních návrhů lze shrnout do následujících bodů:

- je-li architektonický návrh vytvořen se zřetelem na následné statické posouzení, je vlastní proces robustní, tj. probíhá zcela bez zásahu uživatele;
- při složitějším návrhu stavby, který primárně zohledňuje architektonické hledisko, je nutné provést zjednodušení vytvářené konstrukce; následná statická analýza nicméně může probíhat automaticky, bez zásahu statika;
- při řešení zcela unikátních a velmi rozsáhlých konstrukcí je naopak nutná spolupráce s odborníkem na statiku, numerické metody a programování;
- ve všech případech bylo dosaženo výrazné časové úspory v komunikaci statik-architekt (například při návrhu konstrukce *Geometric Death Frequency-141* bylo 20 modifikačních modelů provedeno během 14 dnů).



Obr. 6. *Geometric Death Frequency-141*, vizualizace



Obr. 7. *Geometric Death Frequency-141*, statické schéma nevyhovujícího návrhu (černě jsou označeny pruty s přesazenou momentovou únosností)

¹ Viz http://www.massmoca.org/event_details.php?id=549; na <http://vimeo.com/16019145> lze zhlédnout vlastní proces výroby konstrukce. Pro ilustraci ohlasu, který instalace konstrukce dne 23.10.2010 vyvolala, uveďme, že vyhledávač Google.cz nalezl na frázi „Geometric Death Frequency-141“ 704 tisíc odkazů (údaj z 25.11.2010).

² Alternativně by k použitému diskrétnímu modelu bylo možné použít víceúrovňového přístupu a modelovat konstrukci jako spojitě prostředí, s vlastnostmi materiálu odvozenými z analýzy reprezentativního objemu sestaveného z několika kuliček.

³ Frekvence č. 141 zde odkazuje na obraz proudící kapaliny ve 141. kroku simulace.

Na závěr zdůrazněme, že naším cílem je nabídnout tvůrcům staveb podporu pro získání lepší představy o statickém působení jejich návrhů. Taková statická analýza však v žádném případě nemá a ani nemůže nahradit funkci statického posouzení konstrukce v rozsahu požadovaném v pokročilých fázích projektu (dokumentace pro stavební povolení, dokumentace pro provádění stavby).

Článek vznikl za podpory projektů FR-TI1/568 MPO a 1M 0579 MŠMT.

Literatura

- [1] Eastman, Ch. – Teicholz, P. – Sacks, R. – Liston, K.: BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling. 978-0-470-18528-5, 2008.
- [2] Bazjanac, V. – Crawley, D. B.: The Implementation of Industry Foundation Classes in Simulation Tools for the Building Industry. [Proceedings], Building Simulation Conference, 1997.
- [3] Svoboda, L. – Růžička, M. – Kurilla, L.: Shrnutí dostupných softwarových produktů pro parametrický návrh konstrukcí. [Technická zpráva], <http://mech.fsv.cvut.cz/~termit/MPO-TIP-iGenD>, 2010.
- [4] Lindemann, J. – Sandberg, G. – Damkilde, L.: Finite-Element Software for Conceptual design. [Proceedings], ICE – Engineering and Computational Mechanics, 2010.
- [5] www.scan-and-solve.com
- [6] <http://mech.fsv.cvut.cz/~da/MPO-TIP-iGenD/>
- [7] MIDAS, software, <http://mech.fsv.cvut.cz/~da/MIDAS/>
- [8] www.ansys.com, www.rhino3d.com, www.autodesk.com/autocad
- [9] Patzák, B. – Bittnar, Z.: Design of Object Oriented Finite Element Code. *Advances in Engineering Software*, 32, 759-767, 2001.
- [10] Sobotková, M.: Analýza konstrukce navržené pomocí principů digitální architektury. [Bakalářská práce], ČVUT v Praze, 2008.
- [11] www.vtk.org/VTK/img/file-formats.pdf
- [12] www.paraview.org, mayavi.sourceforge.net
- [13] www.studioflorian.com
- [14] Florián, M.: FLO(W). *Architekt*, 01, 66-69, 2010.
- [15] www.cubespace.eu
- [16] <http://www.fediaz.com>
- [17] Leach, Neil (ed.): *Digital Cities. Architectural Design*, 4, 1-136, 2009.
- [18] projekty.studioflorian.com/118-tomas-tatyrek-skleneny-rodiny-dum, projekty.studioflorian.com/50-tomas-tatyrek-slc-objects
- [19] Kurilla, L.: *Annelida. Architekt*, 01, 79-81, 2010.
- [20] Thompson, J. – Kipnis, J. – Heiss, A.: *Federico Díaz Geometric Death Frequency-141*. 978-88-8158793-3, 2010
- [21] [http://math.nist.gov/iml+/?](http://math.nist.gov/iml+/)

Svoboda, L. Et al.: Mechanical Response of Dimensionally Complicated Structures in Integrated Design

This paper presents pilot results of newly developed methods and program tools for parametric design of dimensionally complicated structures. Instead of the development of a monolithic software solution, emphasis is laid upon the integration of existing architectural and structural programs, which offer ample opportunities for enhancement thanks to the openness of the source code and/or scripting. The results of three studies, gained with the help of the Rhinoceros® design software as well as the OOFEM program have proven that the developed methods and program tools make it possible to achieve higher flexibility and speed in architectural design thus creating more attractive and imposing structures.

Svoboda, L. u. a.: Mechanische Reaktion von kompliziert geformten Bauteilen im Umfeld des integrierten Entwurfs

Der Artikel präsentiert Pilotergebnisse einer neu geschaffenen Methodik und von Programminstrumenten für den parametrischen Entwurf von kompliziert geformten Bauteilen. Anstelle der Entwicklung einer monolithischen Softwarelösung wird Wert auf die Verknüpfung der bestehenden architektonischen und statischen Programme gelegt, die ausreichende Erweiterungsmöglichkeiten bieten, und zwar dank der Offenheit des Ursprungscode und/oder des Scriptings. Die Ergebnisse dreier mit Hilfe des Modellierungsprogramms Rhinoceros® und des Programms OOFEM erhaltener Studien weisen nach, dass die entworfene Methodik und die entwickelten Programmwerkzeuge es ermöglichen, größere Flexibilität und Schnelligkeit beim architektonischen Entwurf und damit auch attraktivere und gewagtere Konstruktionen zu erreichen.