

Alois MATERNA<sup>1</sup>, Jiří BROŽOVSKÝ<sup>2</sup>, Petr KONEČNÝ<sup>3</sup>

PŘÍSPĚVEK K ANALÝZE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ S UVÁŽENÍM NÁHODNÉHO  
CHARAKTERU VYBRANÝCH VSTUPNÍCH VELIČIN

### ÚVOD

Při řešení výzkumného projektu GA ČR 103/06/1801 „Analýza spolehlivosti vlastností stavebních materiálů a konstrukcí s přihlédnutím k jejich změnám v čase a k časově proměnným vlivům“ (hlavním řešitelem je prof. Witzany z ČVUT Praha) vyvstala potřeba aplikovat pravděpodobnostní přístupy k vyjádření spolehlivosti stavebních materiálů a konstrukcí. Příspěvek obsahuje stručný nástin úkolů, které jsou řešeny v návaznosti na dlouhodobý vývoj moderních simulačních metod pro posudky stavebních konstrukcí využívajících simulační techniku na němž se podílí rovněž Fakulta stavební VŠB – Technické univerzity Ostrava se (viz. např. [1] či [2]). Příspěvek dále obsahuje přehled zvolených postupů a zatím dosažené dílčí výsledky.

### ÚKOLY

V řešeném úkolu probíhají jednak měření vlastností skutečných materiálů a konstrukcí, jednak jsou prováděny numerické analýzy, přičemž získané výsledky jsou porovnávány a dochází k úpravám matematických modelů. Vzhledem k charakteru studovaných materiálů a konstrukcí nelze nerespektovat přirozenou proměnnost vlastností materiálů a proměnlivost zatížení. Proto není účelné vycházet jen s výpočetních modelů doporučovaných stávajícími technickými normami a je vhodné používat i postupy s větším potenciálem, například založené na teorii spolehlivosti.

Po přihlédnutí k technickým a ostatním aspektům bylo rozhodnuto aplikovat metody SBRA [1], [2], [3] založené na simulační technice Monte Carlo.

Protože využití simulačních metod je nutně svázáno s využitím výkonné výpočetní techniky, byla provedena analýza možností dostupných programů a postupů odpovídajících výše uvedeným přístupům. Při tom se vycházelo především ze zdrojů [2], [4] a [5].

Ukázalo se, že dostupné programy nevyhovovaly plně požadavkům, potřebným pro dosažení cílů řešeného výzkumného projektu, a proto byla zahájena příprava vlastního programového vybavení.

### ZÁKLADNÍ POŽADAVKY

Vzhledem k rozsahu a charakteru řešených úloh, kdy se také předpokládá modelování nejen prutových konstrukcí, ale i prostorových problémů (numerická analýza dílčích celků konstrukcí), je nezbytnou podmínkou, aby spolehlivostní software dokázal efektivně spolupracovat s obecným výpočetním softwarem založeným například na metodě konečných prvků a umožnil respektovat statistickou závislost náhodných veličin charakterizovaných useknutými histogramy. V neposlední řadě, ve snaze zajistit realizovatelnost zvolených výpočtů, bylo rozhodnuto, že software musí být schopen využívat výhod moderních paralelních počítačů. Bylo proto rozhodnuto pokusit se připravit program pro spolehlivostní analýzu konstrukcí splňující vytčená kritéria.

---

<sup>1</sup> Doc. Ing., CSc. MBA, Katedra pozemního stavitelství FAST VŠB-TU Ostrava, tel.: 597321919, e-mail: alois.materna@vsb.cz

<sup>2</sup> Ing., Ph.D. Katedra stavební mechaniky FAST VŠB-TU Ostrava, tel.: 597321321, e-mail: jiri.brozovsky@vsb.cz

<sup>3</sup> Ing., Katedra stavební mechaniky FAST VŠB-TU Ostrava, tel.: 597 321 384, e-mail: petr.konecny@vsb.cz

Návaznost na obecnější konečně-prvkový prostředek pro analýzu konstrukcí byla vyřešena použitím akademického programového systému uFEM [6], který umožňuje v určitém rozsahu studovat statické působení různých typů konstrukcí, včetně prostorových.

### POPIS SOFTWARE

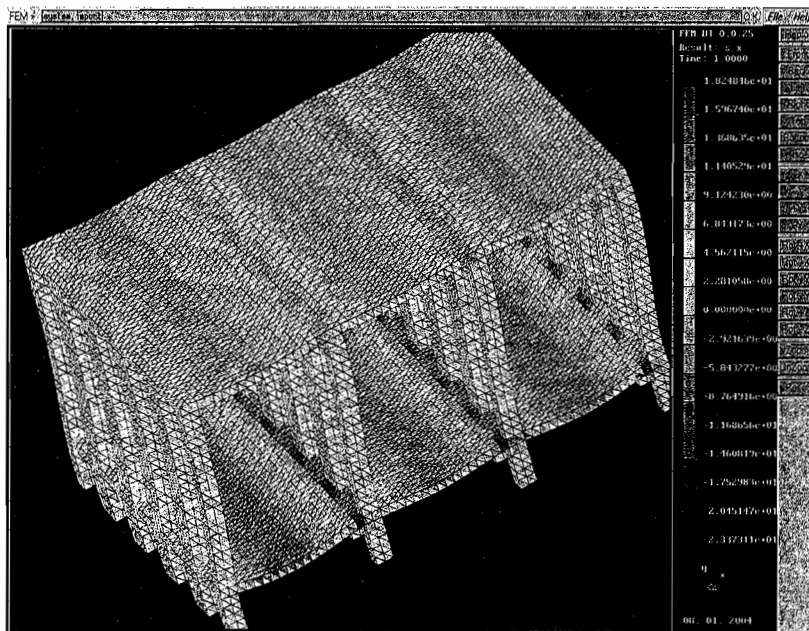
Zpracovávaný program pracuje prozatím se simulační technikou Monte Carlo v její nejjednodušší variantě. To je sice na jednu stranu do jisté míry omezující (ve většině úloh je nutno provádět vysoké počty simulací), nicméně jde o metodu jednoduchou a robustní.

Náhodné veličiny mohou být do výpočtu zavedeny v podobě kompatibilní s programem Anthill [2], aby bylo možné provádět srovnání výsledků s výsledky existujícího programového vybavení.

Jako nezbytné se ukázalo zavedení vztahů pro zajištění statistické závislosti mezi veličinami (studované dlouhodobě např. přípravě brněnského software FREET [10]) Zatím je provedeno jen v poměrně jednoduché podobě podle K. K. Phoona [8], [9]. Použitý postup umožňující generovat korelované neparametrické rozdělení popsané histogramy užívající ortogonální transformace se jeví jako nadějný.

Program umožňuje ukládat veškeré realizace vstupních veličin a veškeré výsledky (což ovšem není u úloh většího rozsahu příliš praktické), dále jsou k dispozici základní statistické parametry výsledkových veličin (aritmetický průměr, směrodatná odchylka, korelační koeficienty atd.). Výsledky je možné také úsporně uložit a následně zobrazit ve formě histogramů.

Při simulacích je k dispozici několik generátorů náhodných čísel. Kromě generátorů dostupných jako služba operačního systému, které ovšem slouží spíše jen pro ladění a testování, je možné využívat škálovatelný paralelní generátor náhodných čísel SPRNG [11].



Obr.1 Program uFEM

### TECHNICKÉ ASPEKTY

Program je napsán v programovacím jazyce C a může být používán na prakticky libovolném počítači (podmínkou smysluplného použití je pochopitelně dostatečný výpočetní výkon).

Určitým problémem byl výběr formy zadávání řešeného problému. Klasické spolehlivostní programy zpravidla využívají popis úlohy ve formě příkazů jednoduchého programovacího jazyka (aritmetické operace apod. - často nejsou ani podporovány prvky jako cykly a rozhodovací bloky). To je řešení představuje značnou překážku pro řešení komplikovaných úloh.

Například moderní software FREET [10] poskytuje možnost definovat deterministické řešení ve formě programové knihovny, kterou pak při řešení načítá a během simulačního procesu používá k transformaci realizací vstupních veličin na veličiny výstupní.

Autoři článku zvolili podobný postup – načítání řešiče úlohy z dynamické knihovny programových funkcí, přičemž definovali dvě základní varianty programového rozhraní: jednodušší, které slouží pro jednorázová řešení drobnějších problémů a složitější, s více možnostmi, které je primárně určeno k navázání víceúčelových řešičů (v současné době zejména pro nasazení programového systému uFEM [6]).

Naopak možnost přímého zápisu problému formou jednoduchého programovacího jazyka není nyní k dispozici vůbec. Tuto funkci by ovšem bylo možné do programu doplnit formou předávané dynamické knihovny využívající existující rozhraní programu.

Základní rozhraní pro použití uživatelem poskytnutých dynamických knihoven má podobu několika funkcí, které musí být v knihovně obsaženy a které jsou následně volány při výpočtu (v jazyce C):

1. **long monte\_dlib\_interface\_type(void)** ... vrací typ rozhraní (zde 1),
2. **void monte\_nums\_of\_vars(long \*ilen, long \*olen, long \*ffunc)** ... vrací počet vstupních a výstupních parametrů v proměnných **ilen** a **olen**, je-li v řešiči počítána funkce poruchy, je v parametru **ffunc** vráceno pořadové číslo výstupního parametrů, který obsahuje její výsledek,
3. **int monte\_solution(double \*ifld, double \*ofld)** ... funkce realizující samotný výpočet; pole **ifld** obsahuje realizace náhodných veličin (vstupní parametry) a pole **ofld** obsahuje vypočtené výsledky (jejich počet tedy není programem omezen).

Složitější varianta rozhraní obsahuje více funkcí. Je tomu tak proto, aby bylo možné lépe vyhovět požadavkům na navázání obecnějších řešičů, které kromě realizací náhodných veličin mohou vyžadovat ještě řadu dalších vstupů:

1. **long monte\_dlib\_interface\_type(void)** ... vrací typ rozhraní (zde 2),
2. **void monte\_nums\_of\_vars(char \*param, long \*ilen, long \*olen, long \*ffunc)** ... vrací počet vstupních a výstupních parametrů v proměnných **ilen** a **olen**, je-li v řešiči počítána funkce poruchy, je v parametru **ffunc** vráceno pořadové číslo výstupního parametrů, který obsahuje její výsledek – oproti předchozímu rozhraní přibyl ještě parametr **param**, který obsahuje (ve formě textového řetězce) další potřebné parametry pro řešič (např. u programu uFEM jde o název souboru s popisem konečněprvkové úlohy),
3. **int monte\_init\_lib\_stuff(char \*param)** ... funkce zajišťující potřebné inicializace podle potřeb řešiče (např. alokaci datových polí, načtení a analýzu vstupních dat a podobně); **param** zde má stejný význam jako výše,
4. **int monte\_clean\_lib\_stuff(char \*param)** ... funkce pro ukončení úlohy (dealokace datových polí aj.), která se volá po skončení simulačního procesu
5. **int monte\_init\_lib\_stuff(char \*param)** ... funkce provádějící deterministické řešení; její parametry mají výše definovaný význam
6. **char \*monte\_ivar\_name(char \*param, long pos)** ... funkce vrací název (řetězec) pos-té vstupní proměnné; tato funkce není využívána při řešení, ale slouží pro usnadnění interakce s uživatelem při zadávání úlohy

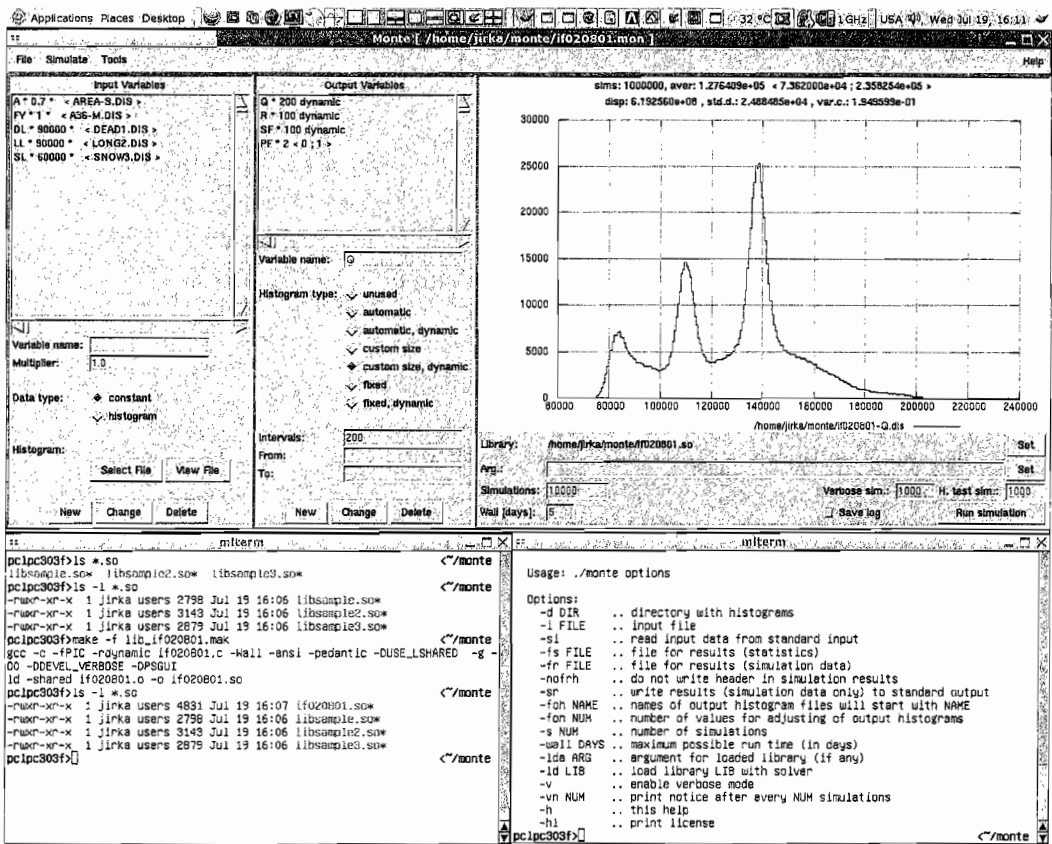
7. char \*monte\_ovar\_name(char \*param, long pos) ... funkce vrací název (řetězec) pos-té výstupní proměnné; funkce má stejný účel jako monte\_ivar\_name().

Je patrné, že obecnější rozhraní je zřetelně složitější. To je ovšem určeno pro interakci s obecnými výpočetními nástroji, a proto nebude využíváno tak často.

V současné době je možné využívat zrychlení výpočtů pomocí paralelizace. Ta je realizováno pomocí standardního rozhraní MPI [12]. Program je tedy možné využívat, byť ne zcela efektivně, jak na víceprocesorových osobních počítačích a pracovních stanicích (což je výhodné, zvláště pokud přihlídneme k současné módě vícejádrových procesorů), tak na paralelních superpočítačích. Skutečná efektivnost paralelní implementace programu však prozatím nebyla dostatečně otestována. Další testování a optimalizace jsou součástí plánovaných budoucích prací.

Paralelizace je zajištěna na úrovni pravděpodobnostního řešiče, tedy není třeba se jí zabývat při tvorbě uživatelských dynamických knihoven.

V základní podobě má program neinteraktivní textově orientované uživatelské rozhraní. Pro snazší používání byla připravena účelová grafická nadstavba v prostředí Tck/Tk [13]. Ta umožňuje definovat všechny pravděpodobnostní parametry řešené úlohy, včetně výběru dynamické knihovny s řešičem, s výjimkou tvorby korelační matice (to je prozatím třeba ručně zadat do textového vstupního souboru). Grafické rozhraní také poskytuje možnost zobrazení základních získaných výsledků v grafické a číselné podobě.



Obr.2 Grafické uživatelské rozhraní programu

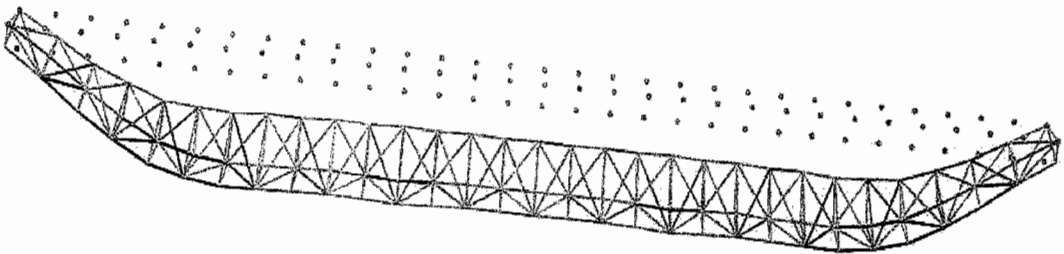
Grafické uživatelské rozhraní nemá program přímo integrováno proto, aby bylo možné jej bez nesnáží využívat v prostředí paralelních superpočítačů, kde by bylo jen na obtíž. Použití Tcl/Tk naopak umožňuje snadnější úpravy grafického prostředí podle aktuálních potřeb.

Pro jednodušší práci s programem byly vytvořeny i další pomocné nástroje, především program pro používání uživateli vytvářených dynamických knihoven pro deterministické výpočty. Ten se využívá jednak pro testování těchto knihoven, jednak poskytuje možnost snazšího tvorby vstupních dat pro pravděpodobnostní výpočty.

### ILUSTRÁČNÍ PŘÍKLADY

Pro ověření funkčnosti vytvářeného software byly řešeny některé kontrolní příklady známé z literatury – například na Obr. 2 je zobrazen výstup získaný při analýze úlohy 2.8.8 ze strany 76 publikace [1]. Při řešení bylo dosaženo velmi dobré shody s výsledky tam publikovanými.

Dále byl tento software použit i při spolehlivostní analýze ocelové prostorové příhradové konstrukce (byť vcelku jednoduché) vyobrazené na Obr. 3. V tomto případě šlo také spíše o akademickou úlohu, i když jde o model reálné konstrukce – bližší podrobnosti jsou k dispozici v článku [14]. Uvedená úloha byla původně řešena ve specializovaném programu pro posudky ocelových prostorových prutových konstrukcí a s využitím software Anthill [2].



Normal force: min=-2.240882e+02 .. max=7.685347e+02

**Obr.3** Model prostorové příhradové konstrukce

V současné době je program využíván k analýzám dalších modelů konstrukcí a to převážně ve spojení s konečnoprvkovým systémem uFEM.

### ZÁVĚR

V příspěvku byly prezentovány dílčí výsledky při tvorbě programového vybavení pro pravděpodobnostní analýzu stavebních konstrukcí a materiálů. Byly uvedeny důvody, které je k tomuto kroku vedly a také zvolené postupy.

Uvedený software může být v současné době využíván ve spojení s programovým prostředkem uFEM a je plně funkční (v rozsahu popsáném v příspěvku) v operačních prostředích unixového typu (např. Linux).

Další práce se zaměří na verifikaci sestaveného programového vybavení a na jeho využití při analýzách dle potřeb grantového projektu GA ČR 103/06/1801. Dále budou prováděny další úpravy a vylepšení programu zejména v oblasti pokročilejších simulačních technik a korelací náhodných veličin.

### PODĚKOVÁNÍ

Autoři příspěvku by rádi poděkovali za poskytnutí podpory poskytnuté prof. Ing. Pavlem Markem, DrSc. zejména při řešení prostorových příhradových konstrukcí, jakož i jeho dlouhodobou morální podporu a motivaci, kterou autorům poskytuje při jejich práci v oblasti spolehlivosti stavebních konstrukcí.

Dále děkují za poskytnutí cenných rad a konzultací a Ing. Jakubu Valihrachovi.

*Prováděné práce jsou podporovány ze státního rozpočtu České republiky prostřednictvím Grantové agentury ČR. Registrační číslo projektu je 103/06/1801.*

## LITERATURA

- [1] MAREK P. et. al.: Probabilistic assessment of Structures using Monte Carlo Simulations (second edition), ITAM CAS CZ, Praha 2003
- [2] Internetové stránky metody SBRA: <http://www.sbra-anthill.com>
- [3] MAREK, P., GUŠTAR, M., ANAGNOS, T. (1995). Simulation Based Reliability Assessment for Structural Engineers. Boca Raton: CRC Press, 1995
- [4] KŘIVÝ V., VÁCLAVEK, L., MAREK, P., VALIHRACH, J.: Probabilistic Reliability Assessment of Structural Systems in the Computer Era, Eight International Conference on Computational Structures Technology, Las Palmas, Španělsko, 2006
- [5] KONEČNÝ, P. Využití metody konečných prvků při posudku spolehlivosti metodou SBRA, teze disertační práce, Fakulta Stavební VŠB-TU Ostrava, 2005
- [6] Internetové stránky programu uFEM: [http://www.penguin.cz/jirka/fem\\_en.html](http://www.penguin.cz/jirka/fem_en.html)
- [7] MENČÍK: Simulační posuzování spolehlivosti při korelovaných veličinách. in Sborník 4. Konference „Spolehlivost“, Ostrava, 2003
- [8] PHOON, K.K.: Application of fractile correlations and copulas to non-Gaussian random vectors, in CD-ROM Proceedings of the 2.nd International ASRANet Colloquium 2004, Barcelona, Spain
- [9] PHOON, K.K., QUEK, S.T., HUANG, H.: Simulation of non-Gaussian Processes using fractile correlation, in Probabilistic Engineering Mechanics, vol 19, p. 287-292, 2004
- [10] NOVÁK, D., RUSINA, R., VOŘECHOVSKÝ, M.: FREET – Software pro pravděpodobnostní posudky výpočtově náročných problémů mechaniky kontinua, 3. Konference „Spolehlivost“, Ostrava, 2002, DT
- [11] Internetová stránka knihovny SPRNG: <http://sprng.cs.fsu.edu/>
- [12] Internetová stránka MPI Forum: <http://www.mpi-forum.org>
- [13] Internetová stránka Tcl/Tk: <http://www.tcl.tk>
- [14] ŠEDIVÝ, M., BROŽOVSKÝ, J.: Výpočet prostorové příhradové konstrukce s využitím metody MKP a SBRA, VII.konference Spolehlivost konstrukcí, Praha, 2006

**Reviewer:** Ing. Milan Guštar, Ph.D.