

Jiří BROŽOVSKÝ¹, Alois MATERNA²

VÝPOČETNÍ HOMOGENIZACE ZDIVA V NELINÁRNÍCH ÚLOHÁCH

Abstract

The article discusses computational homogenization of masonry samples for a purpose of a non-linear computational analysis of masonry structures. The proposed method includes a detailed smeared crack model of a masonry sample (with individually modeled bricks and mortar) and a homogenized elasto-plastic Chen-Chen based material model. The computational homogenization is done through comparison of results of remodeling simple material tests.

The data for homogenized material models are obtained from preliminary computations on these models for simple material tests. The improvement of material data is done through Monte Carlo – based testing of possible homogenized material parameters.

1 ÚVOD

V současné době poměrně často vyvstává potřeba provádět poměrně precizní numerické analýzy fyzikálně nelineárního chování dílčích celků, a nebo i celých zděných nosných konstrukcí. Tento postup je potřebný při studiu chování nebo analýze zbytkové únosnosti nejčastěji historických stavebních konstrukcí a památek. Ne vždy je možné provádět detailní numerickou analýzu s podrobným modelováním tvaru a polohy jednotlivých zdicích prvků, přesným respektováním vlastností (včetně například vlastností lomově-mechanických) malty a zdicích prvků a dalších aspektů. Příčinou může být jednak nedostupnost nebo technická nemožnost získání jednotlivých geometrických nebo materiálových dat (připomeňme, že řadu materiálových charakteristik není možné objektivně stanovit jinak než pomocí destruktivních zkoušek vzorků materiálu, což je často vyloučeno kvůli obvyklým postupům orgánů památkové péče), jednak rozsáhlost případného sestaveného výpočetního modelu. Proto se často přistupuje k stanovení typických vlastností materiálu na jeho relativně malém typickém vzorku (výřezu) nebo (je-li to možné) na základě provedení laboratorního experimentu. Z dosažených výsledků se obvykle stanoví náhradní vlastnosti ekvivalentního homogenního materiálu (tzv. „homogenizovaného“), které pak mohou být použity k výpočetní analýze celé konstrukce (nebo studovaného většího celku). Uvedený postup je obvykle využíván při lineárních statických analýzách, může však být (s určitými omezeními) použit i při nelineárních výpočtech, a to v případech kdy je vyšetřována vzestupná část pracovního diagramu (před dosažením meze pevnosti materiálu). Všechny zde uváděné statické analýzy byly prováděny pomocí metody konečných prvků v programu uFEM.

2 ALGORITMUS ŘEŠENÍ

V předkládaném textu se jsou uváděny příklady využívající jako výchozího stavu výsledků získaných na podrobném numerickém modelu. V případě aplikace na konkrétní případ studované konstrukce je ovšem žádoucí a potřebné, aby výchozími byly výsledky laboratorních experimentálních testů, a nebo aby tyto testy byly použity přinejmenším k verifikaci podrobného numerického modelu.

V prvním kroku se stanoví účinky základních typů zatížení (prostý tah a tlak, čistý smyk) na podrobném numerickém modelu. Z takto vypočtených dat (získány byly závislosti zatížení a defor-

¹ Ing. Jiří Brožovský, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875, Ostrava-Poruba, tel.: +420 597 321 321, e-mail: jiri.brozovsky@vsb.cz.

² Doc. Ing. Alois Materna, CSc., MBA, Katedra pozemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875, Ostrava-Poruba, tel.: +420 597 321 321, e-mail: alois.materna@vsb.cz.

mace, tedy takzvané pracovní diagramy) se pomocí základních pružnostních vztahů určí počáteční odhady materiálových parametrů homogenizovaného materiálového modelu. Tento model může být buď izotropní (což je nejčastější a nejjednodušší, ovšem z hlediska výstižnosti nejméně vhodný případ) nebo ortotropní či anizotropní (což by v případě zdiva mohlo být podstatně výstižnější, avšak uplatnění těchto předpokladů o chování materiálu podstatně zvyšuje potřebných materiálových charakteristik, které je třeba stanovit).

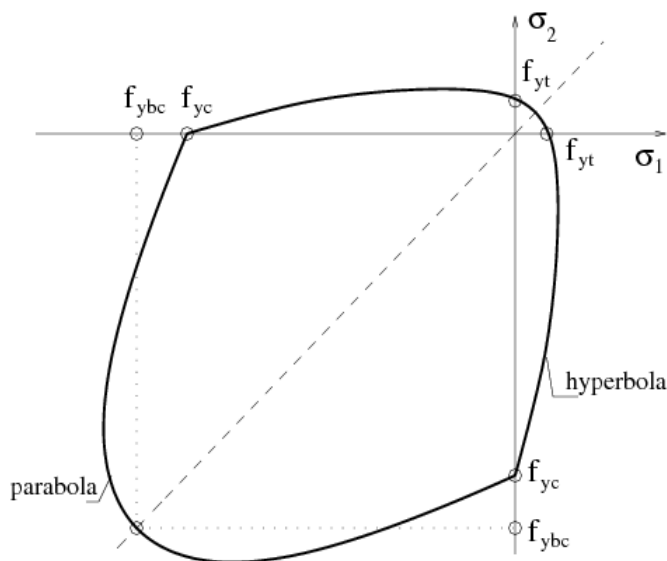
Získaná data se použijí jako střední hodnoty pro simulační ověření nejvhodnějších materiálových parametrů. K tomu se používá metody Monte Carlo, ve které se na základě zadaných středních hodnot a vhodně zvolených dalších parametrů „náhodných“ rozdělení (volba „vhodného“ rozdělení je velmi individuální a lze jen obtížně vyvodit nějaká doporučení) vytvářejí sady vstupních dat. Získaná vstupní data (může jít o tisíce nebo desetitisíce sad dat) se využijí pro provedení numerických analýz na homogenizovaných materiálových modelech. Řešení mohou být buď opět jednotlivé případy základních případů namáhání nebo může být využito zatížení více odpovídající způsobu namáhání materiálu u skutečně studované konstrukce.

Na základě rozdílů v pracovních diagramech získaných pomocí „přesného“ numerického řešení nebo pomocí experimentálního testování a v pracovních diagramech stanovených pomocí homogenizovaného modelu se vybere sada vstupních materiálových dat, která vedla k nejlepší shodě výsledků (k porovnání shody pracovních diagramů se využívá metoda konečných prvků).

3 MATERIÁLOVÉ MODELY

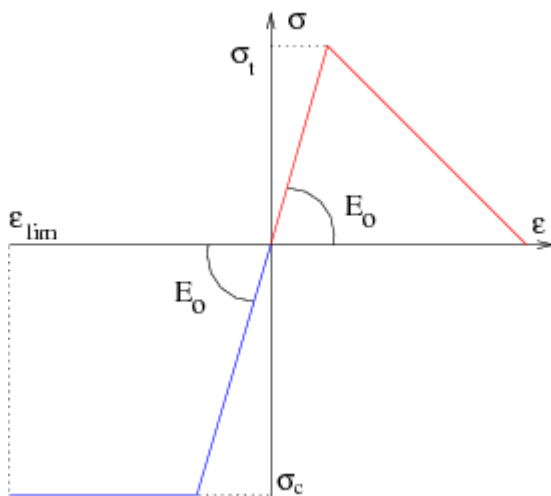
Při podrobném modelování zděných konstrukcí byl využíván takzvaný model rozmazaných trhlin. Ten vychází z předpokladu, že porušení materiálu může být modelováno pomocí spojitého výpočetního modelu ve kterém se vliv oslabení materiálu respektuje pomocí úpravy materiálových parametrů v příslušné oblasti.

V konkrétních studovaných případech šlo o model využívající jednoosý ekvivalentní vztah mezi napětím a deformací (případně mezi napětím a celkovou šířkou trhlin). V rovinných úlohách by takový model nebyl dostatečný, a proto se parametry ekvivalentních jednoosých vztahů upravují na základě parametrů vhodné podmínky porušení materiálu, které odpovídají aktuálnímu stavu napjatosti v materiálovém bodě. Jako vhodná se jeví například podmínka porušení Chen-Chenova nebo Kupferova.



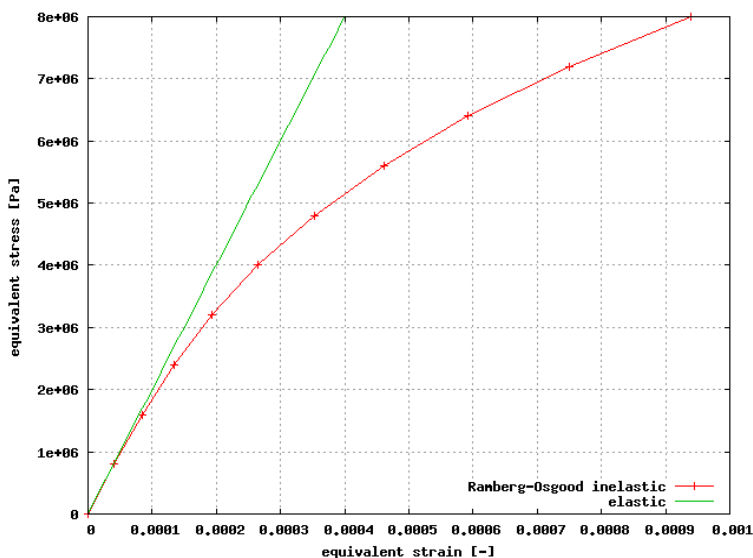
Obr. 1: Chen-Chenova podmínka porušení pro beton.

Protože výše popsaný postup může vést k závislosti výsledků řešení na tvaru a velikosti sítě konečných prvků, byl v uvedených úlohách používán Bažantův model pásu trhlin, který do řešení zavádí další fyzikální veličinu – lomovou energii betonu – a základě její velikosti na jednotku objemu zavádí úpravy ekvivalentních konstitutivních vztahů.



Obr. 2: Ekvivalentní jednoosá závislost mezi napětím a deformací.

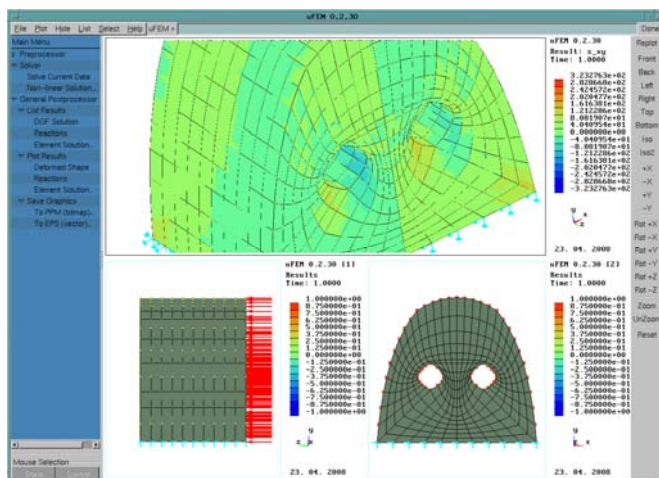
Fyzikálně nelineární modelování homogenizovaného materiálu bylo prováděno pomocí pružnoplastického modelu využívajícího Chen-Chenovu podmínku plasticity a porušení (viz Obr.1) a Ohtani-Chenův koncept modelu zpevnění pro beton. Protože parametry zpevnění Ohtani-Chenova modelu je obvykle nutné na několika dostupných parametrech aproximovat vhodnou funkcí, byla k tomuto účelu používána Rambergova-Osgoodova funkce. Typická aproximace touto funkcí je ukázána na Obr.3.



Obr. 3: Ekvivalentní jednoosá závislost mezi napětím a deformací.

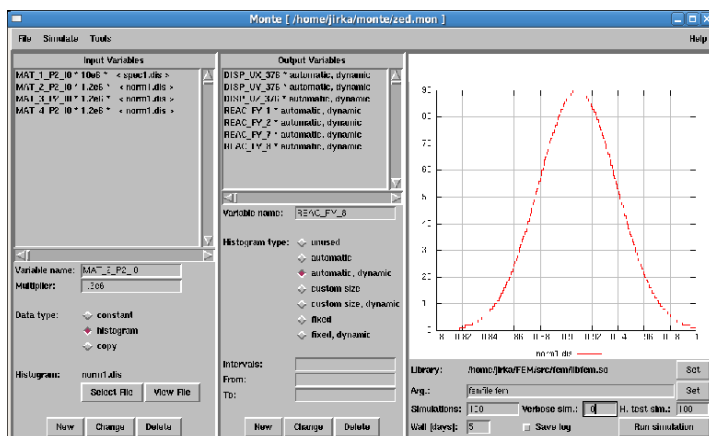
4 POUŽITÝ SOFTWARE

Pro nelineární statické analýzy byl využíván software uFEM, který byl vytvořen pro potřeby řešení projektů na Fakultě stavební VŠB-TU Ostrava. Uvedený program může být používán pro řešení statických úloh stavební mechaniky ve 2D a ve 3D (do konstrukcí je ovšem také možné vkládat prutové prvky), přičemž je možné řešit konstrukčně a fyzikálně lineární a nelineární úlohy. Program může být použit i na víceprocesorových pracovních stanicích a typický vzhled heho pracovního prostředí je uveden na Obr.4.



Obr. 4: Software uFEM.

Pro simulační testování vstupních dat byl používán program Monte, který byl v minulosti vytvořen na Katedře stavební mechaniky VŠB-TU Fakulty stavební Ostrava. Tento program může být používán k úlohám, které využívají simulační techniku Monte Carlo a podporuje výpočetní analýzy na víceprocesorových pracovních stanicích a na výpočetních klastrech (používá paralelní standard MPI). Typický vzhled volitelného uživatelského prostředí programu je uveden na Obr.5.



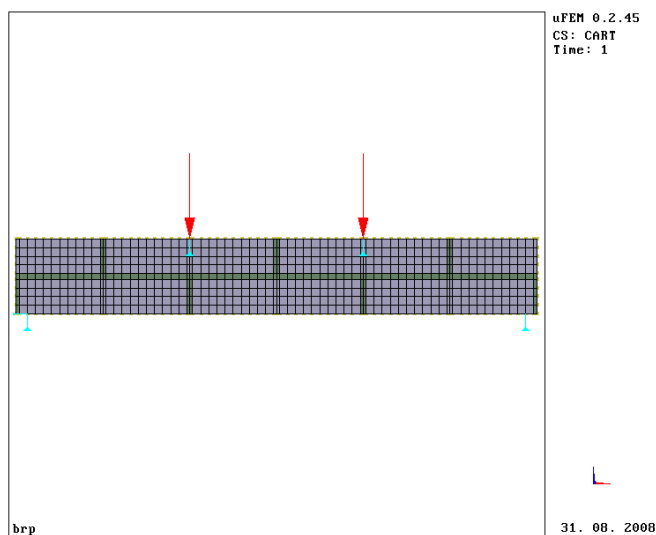
Obr. 5: Software Monte.

5 NUMERICKÉ PŘÍKLADY

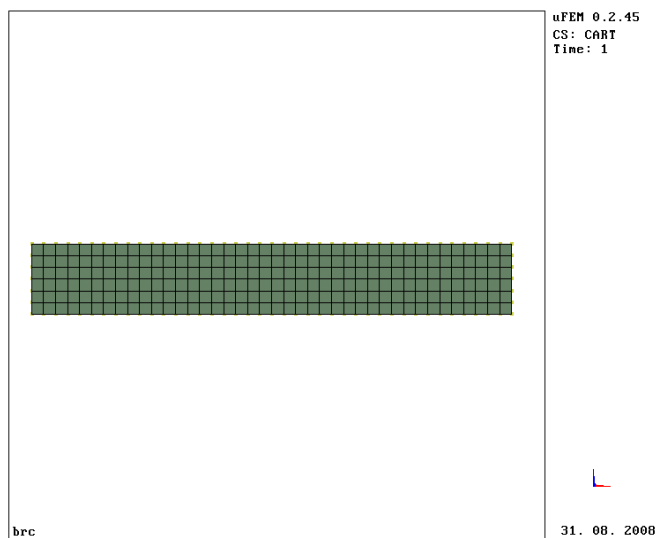
Výše popisovaný postup je možné demonstrovat na dále uvedených příkladech. V prvním případě jde o jednoduchý zděný nosník (uložený a zatížen tak, aby jeho statické působení bylo pro zdivo co nejnepríznivější), zatímco v případě druhém jde o zděný oblouk.

V obou případech byl sestaven podrobný výpočetní model, který respektoval polohu a materiálové parametry jednotlivých zdicích prvků i malty. Poté byly popsáním algoritmem stanoveny parametry homogenizovaného pružnoplastického materiálu s Chen-Chenovou podmínkou plasticity.

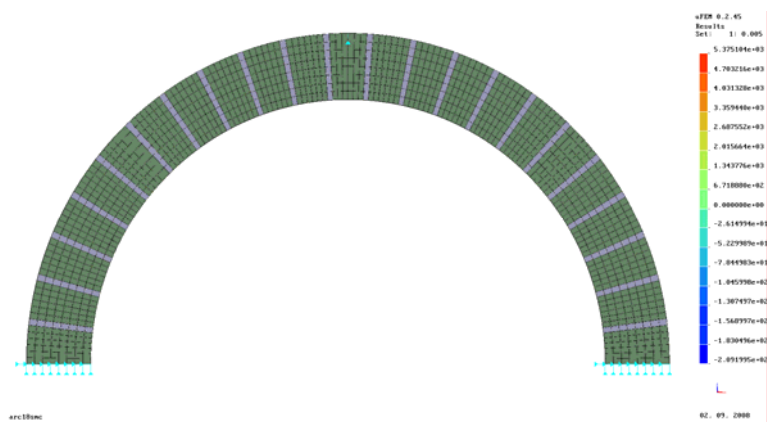
Získaná data byla použita k srovnávací analýze, jejíž výsledky jsou uvedeny v podobě pracovních diagramů na Obr.11 a Obr.12.



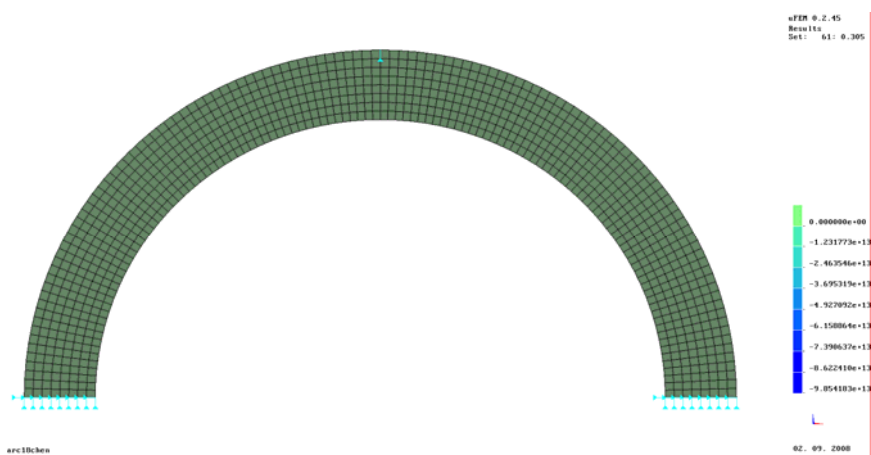
Obr. 6: Podrobný model zděného nosníku.



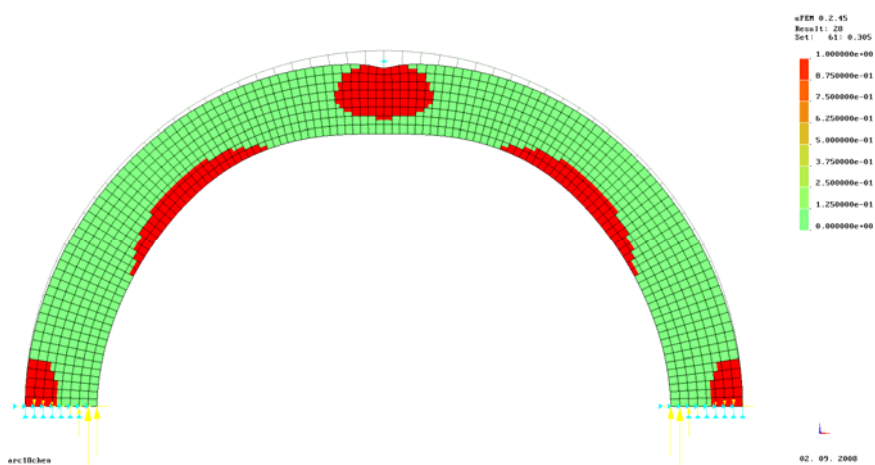
Obr. 7: Homogenizovaný model zděného nosníku.



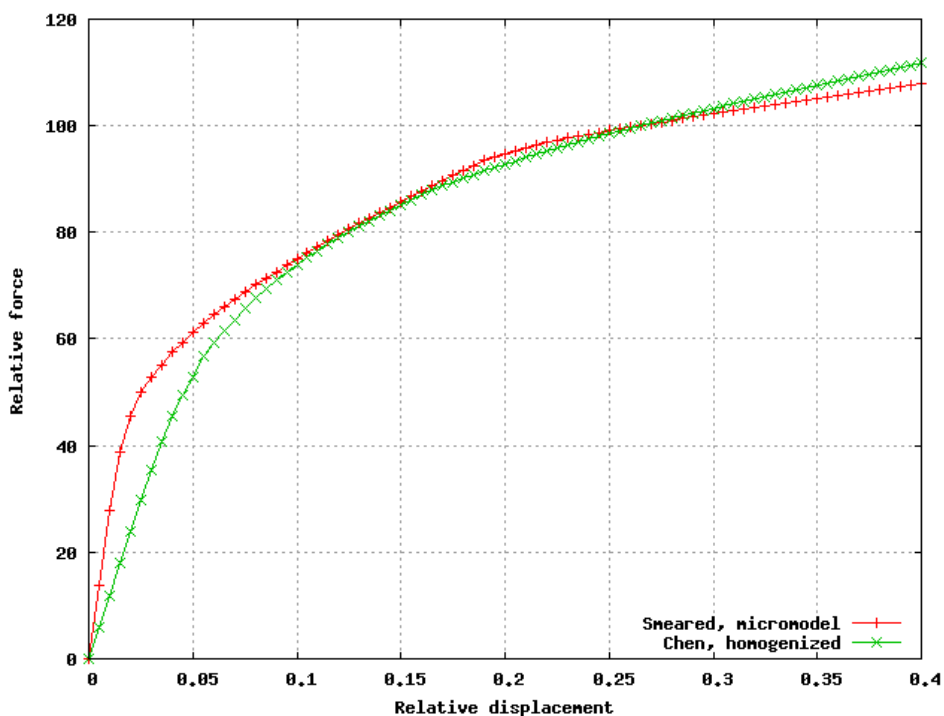
Obr. 8: Podrobný model oblouku.



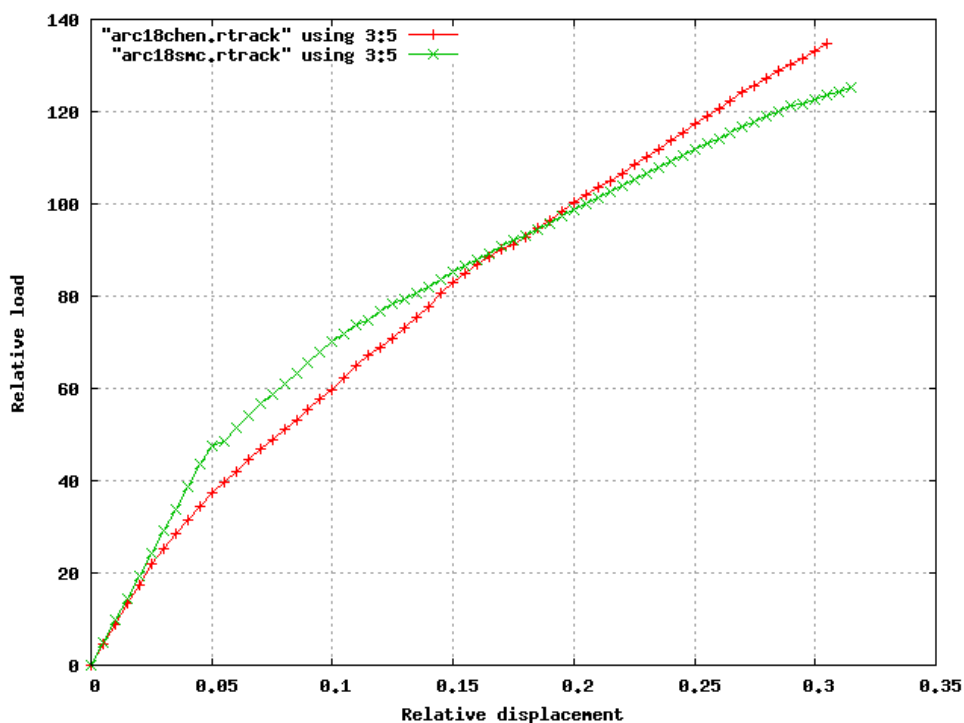
Obr. 9: Homogenizovaný model oblouku.



Obr. 10: Plastické oblasti na homogenizovaném modelu oblouku.



Obr. 11: Srovnání pracovních diagramů pro podrobný (Smeared) a homogenizovaný model nosníku.



Obr. 12: Srovnání pracovních diagramů pro podrobný a homogenizovaný model oblouku.

6 ZÁVĚRY

1. V příspěvku byl diskutován algoritmus stanovování homogenizovaným materiálových vlastností pro fyzikálně nelineární analýzu zděných konstrukcí. Algoritmus může být využíván při analýze rozsáhlejších celků zděných konstrukcí, především historických.
2. Diskutovaný postup může být dále zdokonalován. Kromě možnosti použití sofistikovanějších přístupů pro stanovování vstupních dat než je simulace Monte Carlo (náhradou by mohlo být například vhodné využití neuronových sítí) je prostor pro zlepšení především v oblasti homogenizovaného materiálového modelu. Použitý pružnoplastický přístup neposkytuje vhodné nástroje pro respektování anisotropie (případně ortotropie) materiálu, a proto by bylo vhodné ověřit možnosti použití pružnoplastických modelů využívajících například některé z modifikací Hillovy podmínky plasticity.

PODĚKOVÁNÍ

Práce byly podporovány ze státního rozpočtu České republiky prostřednictvím Grantové agentury ČR. Registrační číslo projektu je 103/06/P389.

LITERATURA

- [1] BAŽANT, Z. P., PLANAS J. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials, CRC Press, Boca Raton, 1998
- [2] BRDEČKO, L.: Modelování železobetonových deskostěnových konstrukcí s výztužnými žebry s uvažováním nelineárního chování materiálu, Disertační práce, FAST VUT v Brně, Brno, 2001
- [3] BITTNAR, Z., ŠEJNOHA, J.: Numerické metody mechaniky I., II., Vydavatelství ČVUT, Praha, 1992
- [4] ČERVENKA, V. Constitutive Model for Cracked Reinforced Concrete, ACI Journal, Titl.82, 1985
- [5] HAN, D. J., CHEN, W. H. Constitutive Modeling in Analysis of Concrete Structures, Journal of Engineering Mechanics. Vol. 113, No. 4, April, ASCE, 1987
- [6] CHEN, W. F., TING, E. C. Constitutive Models for Concrete Structures, Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE, 1980
- [7] CHVOSTA, P., MATERNA, A. Některé modely chování betonu při rovinné napjatosti, Knihovna VUT v Brně, Brno, 1980
- [8] JIRÁSEK M., Z. P. BAŽANT "Inelastic Analysis of Structures", John Willey and Sons, Chichester, USA, 2002.
- [9] KUPFER H., HILSDORF H., RÜSCH H. Behaviour of Concrete Under Biaxial Stress, Journal ACI, Pro c. V.66, č. 8, 1969
- [10] OHTANI, Y., CHEN, W. F. Multiple Hardening Plasticity for Concrete Materials, Journal of the EDM ASCE, 1988
- [11] WITZANY, J., MENCL, V., WASSERBAUER, R., GREGEROVÁ, M., POSPÍŠIL, P., ČEJKA, T., ZIGLER, R., MATERNA, A., CIKRLÉ, P., BROŽOVSKÝ, J. Souhrnné ho dno cení teoretického a experimentálního výzkumu Karlova mostu v letech 1994 až 2004 - 2. část, Stavební obzor, 2005, vol. 14, 4, 97- 106.
- [12] ZIENKIEWICZ, O. C. The Finite Element Method in Engineering Science, McGraw-Hill, London, 1971

Oponentní posudek vypracoval: Ing. Luděk Brdečko, Ph.D.