

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta stavební
Ústav stavební mechaniky

Doc. Ing. Drahomír Novák, DrSc.

**MODELOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI A VLIVU VELIKOSTI
BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ**

**RELIABILITY MODELLING AND SIZE EFFECT OF CONCRETE
STRUCTURES**

TEZE PŘEDNÁŠKY KE JMENOVÁNÍ PROFESOREM
V OBORU
TEORIE A KONSTRUKCE STAVEB



Brno 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

spolehlivost, beton, vliv velikosti, náhodná pole, lomová mechanika

KEY WORDS

reliability, concrete, size effect, random fields, fracture mechanics

© Drahomír Novák
ISBN 80-214-2101-0
ISSN 1213-418X

OBSAH

Představení autora – strukturovaný životopis	4
MODELOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI A VLIVU VELIKOSTI BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ	
1 Úvod	6
1.1 Současný stav problematiky	6
1.2 Výběr z literatury	8
2 Stochastická analýza vlivu velikosti	10
2.1 Nelokální Weibullova teorie	10
2.2 Energeticko-statistický vliv velikosti	12
2.3 Návrh experimentálně-analytického stanovení pevnosti v tahu ohybem s ohledem na vliv velikosti	13
2.4 Vliv velikosti, součinitele spolehlivosti zatížení a spolehlivost návrhu	14
3 Náhodná pole a metoda stochastických konečných prvků	16
3.1 Simulace náhodných polí metodou orthogonální transformace kovarianční matice	16
3.2 Zvýšení účinnosti metody užitím Latin Hypercube Sampling	16
4 Nelineární lomová mechanika a stochastické přístupy	18
4.1 Obecné poznámky	18
4.2 Příklad aplikace – spolehlivostní výpočet mostu	19
5 Závěr	20
6 Přehled nejvýznamnějších prací autora	21
7 Koncepce další autorovy vědecké a pedagogické činnosti	26
Abstract	27

Představení autora – strukturovaný životopis

Narozen: 15. 1. 1960 v Prostějově

Vzdělání:

Gymnázium: v Prostějově, ukončení 1978

Vysoká škola: Vysoké učení technické v Brně, FAST, ukončení 1984 s vyznamenáním

CSc.: 1991 na téma: “Náhodné chování a pravděpodobnost poruchy stavebních konstrukcí”

Obor 39-01-9 Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí

Doc.: 1997 na téma: “Pravděpodobnostní optimalizace a citlivostní analýza konstrukcí“

Obor Teorie a konstrukce staveb

DrSc.: 2001 na téma: “On Reliability Aspects of Concrete Structures: Deterioration, Size Effect and Random Fields”, ČVUT v Praze

Obor 36-02-9 Teorie a konstrukce inženýrských staveb

Praxe:

- 1984 – 1987: projektant a odborný pracovník projektové organizace Brnoprojekt
- 1987 – 1992: vědeckovýzkumný pracovník Fakulty stavební VUT v Brně
- 1992 – 1997: odborný asistent Fakulty stavební VUT v Brně
- 1997 – dosud: docent Fakulty stavební VUT v Brně, Ústav stavební mechaniky

Zahraniční praxe - výzkumné pobyty (celkem téměř 3 roky):

- 1989 (2 měsíce) - School of Civil Engineering, Kyoto University, Japan
- 1990 (3 měsíce) - Institute of Engineering Mechanics, University of Innsbruck, Austria
- 1991-1993 (18 měsíců) - School of Civil Engineering, Kyoto University, Japan, absolvoval "International Course of Kyoto University", stipendium japonské vlády Mombusho
- 1994 (1 měsíc) - Institute of Engineering Mechanics, University of Innsbruck, Austria
- 1996 (1 měsíc) - Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand
- 1997 (1 měsíc) - Northwestern University, Evanston, USA
- 1998 (1 měsíc) - Faculty of Engineering, Kasetsart University a Rangsit University, Bangkok, Thailand
- 1999 (4 měsíce) – Northwestern University, Evanston, USA, Fulbright scholar
- 2000 (1 měsíc) – Northwestern University, Evanston, USA
- 2001 (2 měsíce) – Northwestern University, Evanston, USA

Hlavní oblast výzkumu:

Spolehlivost stavebních konstrukcí, stochastická výpočtová mechanika, rizikové inženýrství, stochastická lomová mechanika kontinua, simulační metody Monte Carlo, modelování betonových konstrukcí, metoda stochastických konečných prvků, porušování kvazikřehkých materiálů, vliv velikosti, pravděpodobnostní optimalizace konstrukcí, náhodná pole v mechanice kontinua.

Výzkumné projekty:

- Grant č. 20/94-B "Optimalizace konstrukcí metodou evolučních strategií", Interní grant VUT Brno, 1994, řešitel.
- Grant č. 103/93/2037 GAČR "Analýza a predikce životnosti konstrukcí", 1993, spoluřešitel.
- Grant č.. 103/95/0781 GAČR "Predikce karbonatace betonu", 1995, spoluřešitel.

- Grant č. 20/95-B "Statistická a citlivostní analýza Karlova mostu", Interní grant VUT Brno, 1994, spoluřešitel.
- Grant č. 103/97/K0003 GAČR "Materiálové modely betonu pro modelování poruch jaderných elektráren", 1997 - dosud, spoluřešitel.
- Grant č. 103/00/0603 GAČR "Ocenění rizika ztráty únosnosti a provozuschopnosti stavebních konstrukcí", 2000 – dosud, spoluřešitel.
- Získání Fulbrightova stipendia pro výzkumný projekt "Nonlocal Weibull theories and statistical size effect for quasi-brittle failures of concrete structures", ve spolupráci s prof. Z. P. Bažantem, Northwestern University, USA, 1999.
- Mezinárodní projekt "Structural Analysis and Reliability Assessment (SARA)", Brenner Autobahn, Itálie, 2000 - dosud, vedoucí týmu FAST VUT v Brně.
- Výzkumné záměry Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy, CEZ J22/98:261100007 a CEZ J22/98:261100008, 1998 – dosud, vedoucí dílčího výzkumného týmu.
- Grant GAČR č. 103/02/1030/A "Nelineární lomová mechanika betonu s využitím stochastických konečných prvků a náhodných polí", 2002 – 2004, zodpovědný řešitel.

Vyzvané přednášky na zahraničních univerzitách:

- University of Innsbruck, Austria, 1994.
- Workshop "Who Needs Reliability Methods?", Innsbruck, Austria, 1997.
- Int. Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, Barcelona, 1995.
- Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 1996, 1998.
- Bauhaus – Weimar University, Germany, 1999
- Northwestern University, Evanston, USA, July 1997, 1999.

Pedagogická činnost:

Vedení přednášek: Pružnost a plasticita I, Stavební mechanika I, Teorie spolehlivosti stavebních konstrukcí, Vybrané statě ze stavební mechaniky.

Vedení přednášek v anglickém jazyce: Elasticity and Plasticity I, Fundamentals of Structural Mechanics, Elasticity and Plasticity II, Reliability of Buildings.

Vedení diplomových prací: Doposud 7 úspěšně obhájených prací.

Vedení studentů doktorského studia: 1 úspěšně obhájená práce v roce 2001 (studentka z Thajska W. Lawanwisut), nyní vedení 4 doktorandů (1 před dokončením).

Pedagogická činnost v zahraničí: Basic Course on Structural Safety, Kasetsart University, Bangkok, Thajsko (krátkodobá přednášková činnost pro MSc. studenty na pozvání – 1 měsíc, 1996; Přednášková činnost v rámci programu Socrates-Erasmus na Bauhaus – Weimar University, Německo, 1999.

Členství v organizacích a další aktivity:

- Člen mezinárodní organizace pro lomovou mechaniku FraMCoS
- Člen technické normalizační komise TNK 38 Spolehlivost stavebních konstrukcí
- Člen České společnosti pro mechaniku – tajemník Brněnské pobočky
- Člen Vědecké rady stavební fakulty VUT v Brně
- Člen komise pro obhajoby disertačních prací doktorského studijního programu na FAST VUT v Brně ve vědním oboru 36-06-9 Teorie konstrukcí
- Předsednictví v rigorózních komisích na FAST
- Členství ve státnicové komisi na Ústavu betonových a zděných konstrukcí, FAST
- Organizace semináře 3RE Workshop Weimar/Brno – Reliability, Revitalization, Reengineering, 5.- 6. 10. 2000, FAST VUT, Brno.

MODELOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI A VLIVU VELIKOSTI BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

1 Úvod

1.1 Současný stav problematiky

Vliv velikosti konstrukce na její únosnost, v laboratorních podmínkách charakterizovaný např. pevností v tahu za ohybu, je u betonu a jiných kvazikřehkých materiálů (kompozitní materiály, keramika či led) znám již poměrně dlouho. Klasické vysvětlení jevu bylo statistické, založené na náhodné proměnlivosti pevnosti materiálu. Historicky spadá až k pracím Mariotte (1686) a matematicky bylo popsáno v konečné podobě Weibullovou teorií (Weibull 1939). Podrobný popis historického vývoje podal Bažant a Planas (1998). Výpočty metodou konečných prvků, Hillerborg a kol. (1976), Petersson (1981), poprvé ukázaly, že experimentálně poznáný vliv velikosti na únosnost ohýbaných nosníků je možné popsat deterministicky pomocí modelu fiktivní trhliny jako důsledek redistribuce napětí v průřezu před dosažením maximálního zatížení. Jednoduchý analytický vztah založený na takové redistribuci odvodil Bažant a Li (1995), vztah uspokojivě vystihuje experimentální data. Stejný vztah navrhl Rokugo a kol. (1995) (komentoval Bažant a Li 1996) na empirických základech. Do poloviny osmdesátých let byl vliv velikosti připisován zejména statistickému pohledu na problematiku. Nyní je však již prokázáno, že základní příčina vlivu velikosti je deterministická – uvolnění energie vlivem růstu trhliny (Bažant 1984).

Vzhledem k heterogenitě kvazikřehkých materiálů jakým je beton, však musí mít náhodná proměnlivost určitý význam a použití statistického popisu a stochastických přístupů se jeví jako nezastupitelné. Weibullovu teorii nejslabšího článku pro stochastický model poškození použil Mazars (1982) a Mazars a kol. (1991). Nelokální formulace konečných prvků byly použity k numerickým simulacím s popisem náhodně rozdělené pevnosti po konstrukci – náhodná pole (např. Breysse 1990, Breysse a Fokwa 1992, Breysse a kol. 1994, Breysse a Renaudin 1996). Tato problematika byla studována pro kvazikřehké materiály porušující se při růstu trhliny (nosníky se zářezem) Bažantem a Xi (1991) a Bažantem a Planasem (1998). Tito autoři publikovali zobecnění Weibullové teorie, ve které pravděpodobnost poruchy materiálu nezávisí pouze na lokálním napětí v bodě konstrukce ale na zprůměrované poměrné deformaci charakteristického objemu materiálu (v určitém okolí tohoto bodu). Postup zamezuje divergenci Weibullova integrálu v případě singularit napětí např. v okolí zářezu a nepřímou zavádí prostorovou korelaci pravděpodobností poruchy materiálu. Přístup představuje rozšíření deterministické teorie poškození (Pijaudier-Cabot a Bažant 1987, Bažant a Planas 1998). Nelokální Weibullova teorie přináší základní výhodu ve srovnání s přístupy metody stochastických konečných prvků (jako např. Breysse a kol. 1994, Carmeliet 1994, Carmeliet a Hens 1994) nebo s modelem tzv. „numerického betonu“ (Roelfstra a kol. 1985): výpočet může být realizován standardními nástroji nelineární lomové mechaniky kontinua prakticky nezávisle na pravděpodobnostní analýze. Klasické spolehlivostní přístupy založené na simulaci typu Monte Carlo jsou z tohoto pohledu mnohem obtížněji aplikovatelné na výpočtově náročnější problémy nelineární lomové mechaniky.

Vliv velikosti na pevnost betonu v tahu za ohybu byl poté podrobně analyzován (Bažant a Novák 2000a,b,c) v teoriích kombinujících deterministický a statistický vliv velikosti. Výsledky jsou ve velmi dobré shodě s experimentálními daty a vyústily k praktickému návrhu experimentálně-analytického stanovení pevnosti betonu v tahu za ohybu s uvažováním vlivu velikosti. Vzhledem ke skutečnosti, že vliv velikosti u základního

testování nosníku ohybem (tříbodový a čtyřbodový ohyb) není doposud v normách pro zkoušení zohledněn (přestože je obecně znám), bylo vyvinutí tohoto postupu žádoucí.

Jednou z rychle se rozvíjejících metod v posledním desetiletí je metoda stochastických konečných prvků (SFEM - stochastic finite element method), která spojuje metodu konečných prvků s teorií náhodných polí. Hlavním úkolem SFEM je vyšetřit stav napjatosti a deformace namáhané konstrukce vyplývající z náhodné proměnlivosti parametrů systému v prostoru (po konstrukci) jako jsou materiálové charakteristiky nebo geometrie. Vyšší úroveň analýzy pak představuje pravděpodobnostní analýza (tj. výpočet teoretické pravděpodobnosti poruchy, resp. indexu spolehlivosti). Ucelený pohled na tuto problematiku poskytuje Brenner (1996).

Základem SFEM je klasická metoda konečných prvků, většinou použitá v její deformační variantě, ke které je určitým způsobem připojena stochastická část. Pro diskretizaci náhodného pole se obvykle využívá geometrie sítě konečných prvků. Není to ovšem striktní pravidlo, síť diskretizovaného náhodného pole a síť konečných prvků mohou být rozdílné. Přesnost řešení zde mnohem více závisí na velikosti konečného prvku, která nemůže být stanovena pouze s ohledem na očekávané gradienty napětí. Zároveň je při volbě sítě nutno uvažovat i některé charakteristiky použitého náhodného pole, jako je např. autokorelační funkce, spektrální hustota či korelační délka. Existuje řada postupů diskretizace (Vanmarcke a Grigoriu 1983, Hisada a Nakagiri 1981, Der Kiureghian a Ke 1988, Yamazaki a kol. 1988, Liu a kol. 1986, Lawrence 1987, Spanos a Ghanem 1989 a další).

Pro vyšetření vlivu náhodné proměnlivosti vlastností konstrukce na její náhodné chování se většinou používá klasická simulační metoda Monte Carlo. Při tomto přístupu je třeba nejdříve generovat náhodné vstupní parametry, opakovaně řešit problém, tj. provést řešení systému lineárních algebraických rovnic a pak získané soubory odezvy konstrukce vyhodnotit. Aby se odstranila výpočtová náročnost opakovaného řešení systému rovnic, byly navrženy postupy jako perturbační techniky, nebo rozvoj globální matice tuhosti do Taylorovy řady prvního nebo vyššího stupně. Později byl pro stochastickou část řešení použit Neumannův rozvoj inverzní globální matice tuhosti (Yamazaki a kol. 1988).

Základem SFEM je obecně generace náhodných polí. Snahou je použít účinnou metodu tak, aby postihovala požadované vlastnosti náhodného pole a neměla příliš velké nároky na výpočtový čas. Výpočtové nároky u spolehlivostních problémů jsou závislé na počtu náhodných veličin potřebných k reprezentaci (simulaci) náhodného pole. Z tohoto pohledu je velmi vhodnou metodou postup ortogonální transformace kovarianční matice (Schuëller a kol. 1990, Liu a Belytschko 1995, Brenner 1996). Pro účinnou reprezentaci náhodného pole stačí u této metody použití pouze několika náhodných veličin, kterým odpovídají největší vlastní čísla kovarianční matice. Dalším důležitým faktorem je počet opakovaných simulací náhodného pole (výpočtů). U náročnějších problémů např. nelineární lomové mechaniky betonu je počet simulací limitován spíše desítkami. Právě pro takové problémy byla navržena kombinace metody spektrální dekompozice kovarianční matice a simulační metody Latin Hypercube Sampling (Novák a kol. 2000). Účinnost metody byla ověřena numerickou studií a aplikacemi (Bucher a Ebert 2000).

V poslední době se objevuje stále více prací k postihu vlivu velikosti pomocí náhodných polí a stochastických konečných prvků. Jednou z prvních prací na toto téma je práce Shinozuka (1972), dále pak např. Carmeliet 1994, Carmeliet a Hens 1994 aj. Vystávají otázky postihu statistického vlivu velikosti pomocí náhodných polí a SFEM, které jsou doposud uspokojivě nezodpovězené. Další pokrok v této oblasti výzkumu vyžaduje interdisciplinární přístup a spolupráci odborníků lomové mechaniky a spolehlivostního inženýrství. Tento trend v současné době nastupuje.

1.2 Výběr z literatury

1. Bažant, Z.P. (1984) Size effect in blunt fracture: Concrete, Rock, Metal. *ASCE J. of Engrg. Mech.*, Vol. 110, 518-535.
2. Bažant, Z.P. and Frangopol, D. (2002) Size effect hidden in excessive dead load factor. *Journal of Structural Engineering*, (to appear).
3. Bažant, Z.P. and Li, Z. (1995) Modulus of rupture: size effect due to fracture initiation in boundary layer. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 4, 739-746.
4. Bažant, Z.P., Li, Z. (1996) Discussion to paper “Fracture mechanics approach to evaluation of flexural strength of concrete” by Rokugo, K., Uchida, Y., Katoh, H. and Koyanagi, W. *ACI Materials Journal*, September-October 1996, Vol. 93, No. 5, 507-510.
5. Bažant, Z.P. and Novák, D. (2000a) Probabilistic nonlocal theory for quasi-brittle fracture initiation and size effect. I: Theory. *J. of Engrg. Mechanics ASCE*, 126(2):166-174.
6. Bažant, Z.P. and Novák, D. (2000b) Probabilistic nonlocal theory for quasi-brittle fracture initiation and size effect. II: Application. *J. of Engrg. Mechanics ASCE*, 126(2):175-185.
7. Bažant, Z.P. and Novák, D. (2000c) Energetic-statistical size effect in quasi-brittle failure at crack initiation. *J. of ACI*, 97(3):381-392.
8. Bažant, Z.,P. and Planas, J. (1998) *Fracture and size effect in concrete and other quasi-brittle material*. CRC Press.
9. Bažant, Z.P., Xi, Y. (1991) Statistical size effect in quasi-brittle structures. II. Nonlocal Theory. *ASCE J. of Engrg. Mech.*, Vol.. 117, No. 11, 2623-2640.
10. Brenner, C.E. (1996) *Stochastic finite element methods (literature review)*. Int. Working Report No. 35-91, Institute of Engineering Mechanics, University of Innsbruck, Austria.
11. Breyse, D. (1990) Probabilistic formulation of damage evolution law of cementitious composites. *J. of Engrg. Mechanics, ASCE*, Vol. 116, No. 7, 1389 –1410.
12. Breyse, D., Fokwa, D. (1992) Influence of disorder of the fracture process of mortar. *Fracture Mechanics of Concrete Structures (proc., 1st Int. Conf. Held in Breckenridge, Colorado)*, ed. Z.P. Bažant, publ. By Elsevier, London, 536-541.
13. Breyse, D., Fokwa, D., Drahy, F. (1994) Spatial variability in concrete: Nature, Structure and Consequences. *Applied Mechanics Reviews, ASME*, Vol. 47, No. 1, 184-196.
14. Breyse, D., Renaudin, P. (1996) On the influence of local disorder on size effect. *Size-Scale Effects in the Failure Mechanisms of Materials and Structures (Proc., IU-TAM Symp. Held in 1994 at Politecnico di Torino)*, E & FN Spon, London, 187-199.
15. Bucher, C., Ebert, M. (2000) Load carrying behavior of prestressed bolted steel flanges considering random geometrical imperfections. *Proc. Of 8th ASCE Speciality, Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, PMC 2000*, Notre Dame, USA.
16. Carmeliet, J. (1994) On stochastic descriptions for damage evaluation in quasibrittle materials. *DIANA Computational Mechanics, G.M.A. Kusters and M.A.N. Hendriks (eds.)*
17. Carmeliet, J. Hens, H. (1994) Probabilistic nonlocal damage model for continua with random field properties. *ASCE J. of Engrg. Mech.*, Vol. 120, No. 10, 2013-2027.
18. Der Kiureghian, A. and Ke B.J. (1988) The stochastic finite element method in structural reliability. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 3(2):83-91.
19. Hillerborg, A., Modéer, M., Petersson, P.E. (1976) Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Res.*, Vol. 6, No.6, 773-782.
20. Hisada, T. and Nakagiri, S. (1981) Role of the stochastic finite element method in stochastic analysis of structures. *Proc. 4th Int. Conf. Structural Safety and Reliability, ICOSAR'81, Trondheim, Norway*, 395-408.
21. Koide, H., Akita, H., Tomon, M. (1998) Size effect on flexural resistance due to bending span of concrete beams. *Fracture Mechanics of Concrete Structures (Proc., 3rd Int. Conf.,*

- FraMCoS-3, held in Gifu, Japan*), H. Mihashi and K. Rokugo, eds., *Aedificatio Publishers, Freiburg, Germany*, 2121-2130.
22. Lawrence, M. (1987) Basic random variables in finite element analysis. *Int. Journal Numerical Method in Engineering*, 24(10):1849-1863.
 23. Lindner, C.P., Sprague, I.C. (1956) Effect of depth of beams upon the modulus of rupture of plain concrete. *ASTM Proc.*, 55, 1062-1083.
 24. Liu, W.K., Belytschko, T. and Mani, A. (1986) Random field finite element. *International Journal for Numerical in Engineering*, 23:1831-1845.
 25. Liu, W.K., Belytschko, T. and Lua, Y.J. (1995) Probabilistic finite element method. In *Probabilistic Structural Mechanics Handbook: Theory and Industrial Applications*, Texas, USA, 70-105.
 26. Mariotte, E. (1686) *Traité du mouvement des eaux*, posthumously edited by M. de la Hire; Engl. Transl. by J.T. Desvaguliers, London (1718), p. 249; also *Mariotte's collected works*, 2nd ed., The Hague (1740)
 27. Mazars, J. (1982) Probabilistic aspects of mechanical damage in concrete structures. *Proc. Conf. On Fracture Mech. Technol. Appl. To Mat. Evaluation and Struct. Design*, G.C. Sih (ed.), Melbourne, Australia, 657-666.
 28. Mazars, J., Pijaudier-Cabot, G., Saouridis, C. (1991) Size effect and continuous damage in cementitious materials. *Journal of Fracture Int.*, 51:159-173.
 29. Novák, D., Lawanwisut, W., Bucher, C. (2000) Simulation of random fields based on orthogonal transformation of covariance matrix and Latin Hypercube Sampling. *Proceeding of Int. Conference on Monte Carlo Simulation MC 2000*, Monaco, Monte Carlo, June 2000, 129-136.
 30. Petersson, P.E. (1981) *Crack growth and development of fracture zone in plain concrete and similar materials*. Report No. TVBM-1006, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
 31. Pijaudier-Cabot, G., Bažant, Z.P (1987) Nonlocal damage theory. *ASCE J. of Engrg. Mech.*, Vol. 113, No. 10, 1512 – 1533.
 32. Roelfstra, P.E., Sadouki, H., Wittman, F.H. (1985) *Lé Béton Numérique*. *Materials and structures*, Vol. 18, 327-335.
 33. Rokugo, K., Uchida, Y., Katoh, H., Koyanagi, W. (1995) Fracture mechanics approach to evaluation of flexural strength of concrete. *ACI Materials Journal (Selected translation from Japan Concrete Institute)*, Vol. 92, No. 5, 561-566.
 34. Shinozuka, M. (1972) Probabilistic modeling of concrete structures. *ASCE J. of Engrg. Mech. Division*, Vol. 98 (EM6), 1433-1451.
 35. Schuëller, G.I., Bucher, C.G. and Pradlwarter, H.J. (1990) Computational methods in stochastic structural dynamics. *Proc. EUROLYN'90, Germany*.
 36. Spanos, P.D. and Ghanem, R.G. (1989) Stochastic finite element expansion for random media. *Journal Engineering Mechanics, ASCE*, 115(5):1035-1053.
 37. Vanmarcke, E.H., and Grigoriu, M. (1983) Stochastic finite element analysis of simple beams. *Journal of Engineering Mechanics*, 109(5):1203-1214.
 38. Weibull, W. (1939) The phenomenon of rupture in solids. *Proc. Royal Swedish Institute of Engineering Research (Ingenioersvetenskaps Akad. Handl.) Stockholm*, (153):1-55.
 39. Yamazaki, F., Shinozuka, M. and Dasgupta, G. (1988) Neumann expansion for stochastic finite element analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, 114(8):1335-1354.
 40. Zech, B., Wittmann, F.H. (1977) A Complex study on the reliability assessment of the containment of a PWR, Part I. Probabilistic Approach to Describe the Behavior of Materials. *Trans., 4th Int. Conf. On Structural Mechanics in Reactor Technology* (held in San Francisco), H.T.A. Jaeger and B.A. Boley, eds., European Communities, Brussels, Vol. J, 1-11.

2 Stochastická analýza vlivu velikosti

2.1 Nelokální Weibullova teorie

Základním kamenem nelokální Weibullové teorie je v podstatě klasická Weibullova teorie vedoucí na Weibullův integrál k výpočtu teoretické pravděpodobnosti poruchy. Místo lokálních napětí $\sigma(\mathbf{x})$ se však do integrálu dosazují napětí nelokální, $\bar{\sigma}(\mathbf{x})$, jenž se získají pomocí vhodného průměrování poměrného přetvoření v okolí bodu kontinua. Teoretická pravděpodobnost poruchy je pak dána vztahem

$$p_f = 1 - \exp\left\{-\int_V \left\langle \frac{\bar{\sigma}(\mathbf{x})}{\sigma_0} \right\rangle \frac{dV(\mathbf{x})}{V_r}\right\}^m, \quad (1)$$

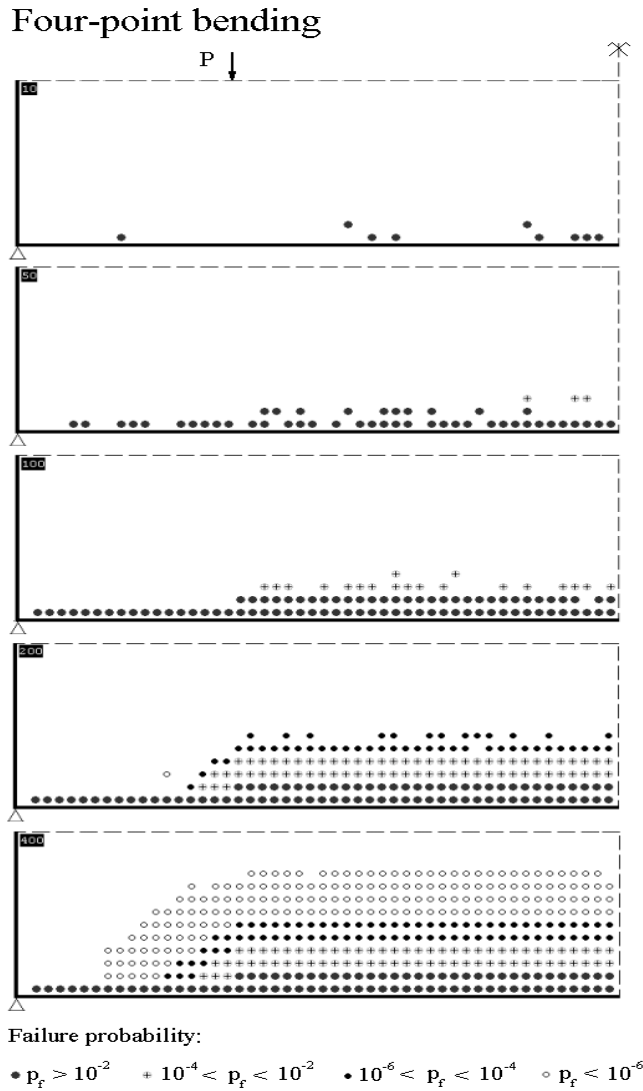
kde V je objem konstrukce, σ_0 a m jsou parametry Weibullova rozdělení pravděpodobnosti, V_r je charakteristický objem materiálu a \mathbf{x} představuje souřadnice materiálového bodu. Nelokální koncept zabraňuje divergenci integrálu v případě singularit napětí (např. nosník se zářezem) a obecně zavádí ve statistickém smyslu prostorovou statistickou závislost.

Tato teorie byla aplikována pro případ ohybu nosníků z prostého betonu, představující klasický test tříbodovým či čtyřbodovým ohybem. Pro ilustraci Weibullova integrálu je uveden obr. 1, který ukazuje posloupnost postupného porušování materiálových bodů podle rozdělení příspěvků k pravděpodobnosti poruchy tvořících Weibullův integrál. Vstupním parametrem je počet porušených bodů (na obr. vlevo nahoře) prosté simulace Monte Carlo podle rozdělení pravděpodobnostních příspěvků. Je zřejmé, že porušené body postupně vytvoří oblast procesní zóny, tak jak je známá pro tříbodový a čtyřbodový ohyb.

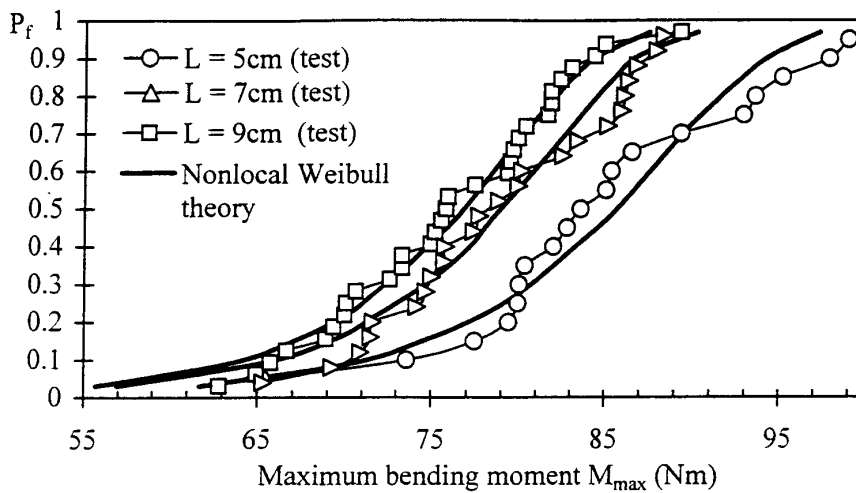
Pevnost v tahu za ohybu f_r je definována jako maximální normálové napětí na nosníku vypočtené na základě předpokladu pružného chování materiálu

$$f_r = \frac{6M_u}{bD^2}, \quad (2)$$

ve kterém D, b = výška (charakteristický rozměr) a šířka nosníku, M_u = maximální (mezní) ohybový moment, který je funkcí mezního zatížení (norma ČSN-ISO 4013 používá termín lomové zatížení) a závisí na způsobu zatěžování zkušební tělesa. Na základě mnoha experimentů i numerických studií tato pevnost klesá s rostoucí velikostí nosníku. Tato skutečnost byla potvrzena i pomocí nelokální Weibullové teorie. Teorie však navíc poskytuje informaci o statistickém rozptylu. Jinými slovy je schopna postihnout celou distribuční funkci pevnosti. Příkladem je srovnání teorie s výsledky zcela ojedinělých experimentů, které provedl Koide a kol. (1998), obr. 2. Jedná se o čtyřbodový ohyb, kde cílem bylo zjistit vliv délky nosníku na jeho únosnost (vyjádřenou mezním ohybovým momentem). Bylo dosaženo velmi dobré shody. Všimněme si, že s rostoucí velikostí klesá nejenom únosnost, ale také mírně klesá její rozptyl.



Obr. 1 Náhodná simulace postupného porušování materiálových bodů podle rozdělení příspěvků k pravděpodobnosti poruchy.



Obr. 2 Srovnání distribučních funkcí mezního ohybového momentu, Koide a kol. (1998) a nelokální Weibullova teorie.

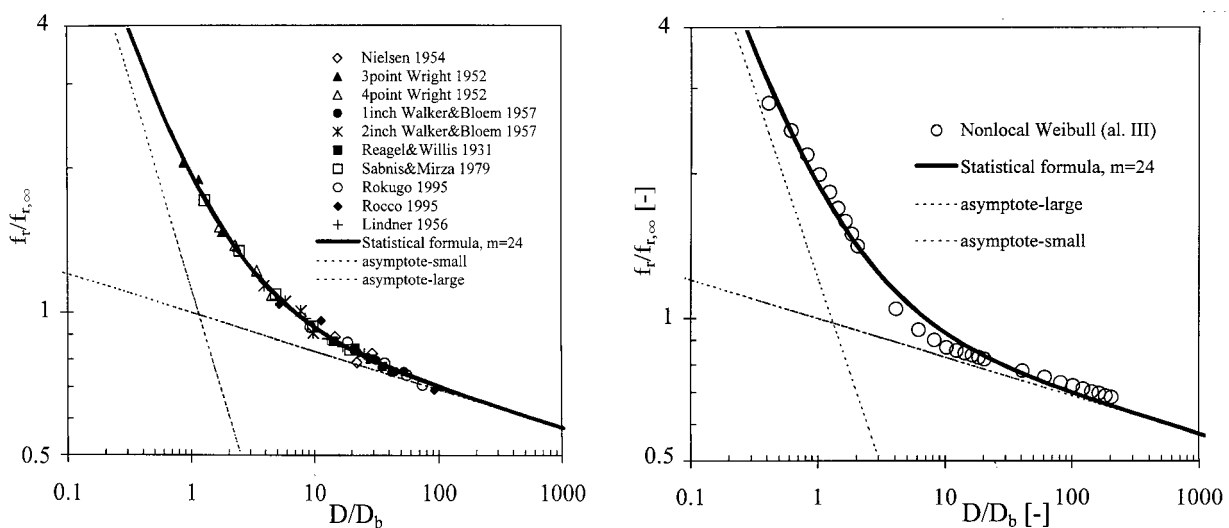
2.2 Energeticko-statistický vliv velikosti

Při porušování nosníku z prostého betonu ohybem se tvoří viditelná vrstva potrhaného betonu, jejíž velikost je přibližně konstantní (stejná pro různé velikosti nosníku) a je prakticky určena maximální velikostí zrna kameniva, Bažant a Planas (1998). Vznik trhlin způsobuje uvolnění energie a redistribuci napětí. Protože v případě velkého nosníku potrhaná vrstva představuje mnohem menší procentuelní podíl výšky nosníku (charakteristické velikosti) a tedy méně redistribuce napětí, pevnost v tahu za ohybu (nominální pevnost) klesá s rostoucí velikostí nosníku. To je základní příčina deterministického energetického vlivu velikosti. Navíc se uplatní rovněž statistický vliv velikosti vyplývající z náhodné proměnlivosti lokální pevnosti konstrukce podle Weibullové teorie. Snahou bylo odvodit vztah pro vliv velikosti v uzavřeném tvaru, jež by byl snadno použitelný.

Kombinací obou typů vlivu velikosti (deterministického-energetického a statistického-Weibullova) byl odvozen pro pevnost v tahu za ohybu obecný energeticko-statistický vztah

$$f_r = f_r^0 \left[\left(\frac{D_b}{D} \right)^{rn/m} + \frac{rD_b}{D} \right]^{1/r}, \quad (3)$$

ve kterém f_r^0 , D_b , r a m jsou konstanty představující neznámé empirické parametry. Protože pro 2D podobnost ($n = 2$) a parametry m a r je možné předepsat na základě informací o experimentech v dostupné literatuře, zůstává určit pouze dva parametry, f_r^0 a D_b . Určením těchto dvou parametrů je závislost pevnosti v tahu na velikosti plně popsána. Výše uvedený vztah byl použit spolu s experimentálními daty k určení neznámých parametrů pomocí speciálně navrženého iterativního algoritmu využívajícího Levenberg-Marquardtův nelineární optimalizační algoritmus. Bylo použito celkem deseti datových souborů pocházejících z osmi laboratoří. Výsledek je na obr. 3, s parametry $f_r^0 = 3.68$ MPa, $D_b = 15.53$ MPa a $r = 1.14$. Optimalizací variačního koeficientu chyby bylo dále zjištěno, že Weibullův modul m je vhodnější uvažovat přibližně hodnotou 24 a ne 12, jak tomu bylo doposud (Zech a Wittman 1977).



Obr. 3 Existující data pevnosti v tahu za ohybu a energeticko-statistický vztah s optimalizovanými parametry; vpravo porovnání s výpočtem podle nelokální teorie.

2.3 Návrh experimentálně-analytického stanovení pevnosti v tahu ohybem s ohledem na vliv velikosti

Na základě dosažených výsledků v oblasti stochastické analýzy vlivu velikosti byl navržen postup experimentálně-analytického stanovení pevnosti v tahu za ohybu zohledňující vliv velikosti (Bažant a Novák 2001, Novák a Bažant 2000). Postup vyvolává otázku úpravy stávajících norem např. ASTM C78-94 a C293-94, ČSN-ISO 4013, jenž je vzhledem k významnosti problematiky velmi žádoucí. Uvedme například katastrofický případ zřícení mostu Schoharie Greek, způsobený propagací trhliny v masivní opěře: jednou z příčin byl i vliv velikosti a bylo ukázáno, že ve světle dnešních poznatků měla být nominální pevnost betonu uvažovaná tehdy v projektu snížena o 46 % (Bažant a Novák 2001)!!!

Prakticky celý postup stanovení pevnosti tak, jak je uveden v těchto normách, může zůstat zachován, pouze je nutné začlenit vliv velikosti podle vztahu (3). Postup lze shrnout do následujících bodů:

- 1 Zvolí se dvě rozdílné velikosti vzorku D_1, D_2 . Pro každou velikost je třeba pro přesnější výsledek testovat více vzorků (doporučuje se alespoň 6), abychom pracovali s dobrými odhady středních hodnot. Tyto velikosti nesmí být velmi blízko u sebe (např. 90 a 100 mm), neboť problém určení parametrů by byl špatně podmíněný. Doporučuje se naopak aby byly velikosti pokud možno co nejvíce rozdílné (podmíněno samozřejmě možnostmi laboratoře a významností akce), např. 70 a 300 mm.
- 2 Podle stávající normy se spočte pevnost v tahu za ohybu (2) pro všechny testované vzorky; stanoví se průměr f_1 pro velikost D_1 a průměr f_2 pro velikost D_2 .
- 3 Neznámé parametry f_r^0 a D_b vztahu (3) se pak určí řešením soustavy dvou rovnic, jenž vznikne z (3) pro $D = D_1$ a $D = D_2$ vyjádřením f_r^0 :

$$f_r^0 = f_1 \left[\left(\frac{D_b}{D_1} \right)^{rn/m} + \frac{rD_b}{D_1} \right]^{-1/r}, \quad f_r^0 = f_2 \left[\left(\frac{D_b}{D_2} \right)^{rn/m} + \frac{rD_b}{D_2} \right]^{-1/r} \quad (4)$$

Z těchto rovnic určíme nejprve D_b ;

$$D_b = \left[\frac{f_1^r D_1 D_2^p - f_2^r D_1^p D_2}{r(f_2^r D_2 - f_1^r D_1)} \right]^{1/p}, \quad p = 1 - \frac{rn}{m} \quad (5)$$

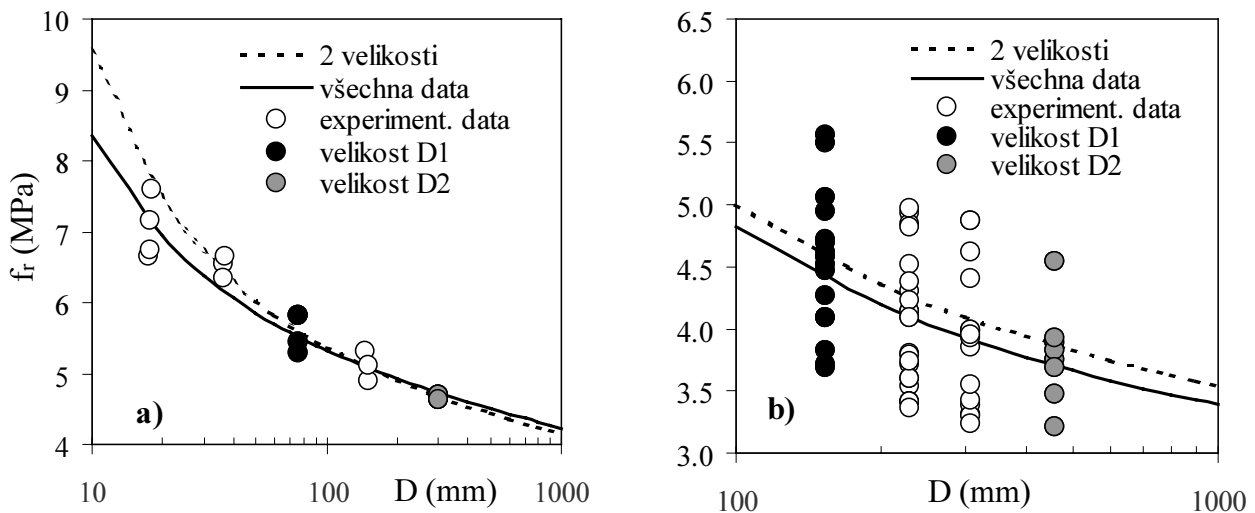
- 4 Parametr f_r^0 je pak určen z (4). Tak je energeticko statistický vztah (3) pro určení pevnosti s ohledem na velikost jednoznačně stanoven. Pro jakoukoliv velikost D je možné snadno určit odpovídající pevnost v tahu za ohybu f_r .

Uvedený postup aplikujme na případy dvou souborů experimentálních dat z literatury pro třibodový ohyb. První představuje velmi kvalitní data s pěti různými velikostmi nosníků zahrnující poměrně velký rozsah testovaných velikostí. K ilustraci navrhovaného postupu předpokládejme, že byly testovány pouze dvě velikosti, $D_1 = 75.28$ mm a $D_2 = 304.8$ mm, odpovídající průměrné pevnosti v tahu za ohybu $f_1 = 5.60$ MPa a $f_2 = 4.67$ MPa. Podle výše uvedeného postupu byly získány dva neznámé parametry $f_r^0 = 6.36$ MPa a $D_b = 5.55$ mm. Výsledná závislost podle energeticko-statistického vztahu (3) je zobrazena na obr. 4a.

Na obr. 4 je zachycen rovněž případ, kdy byly použity všechny velikosti pro určení neznámých parametrů pomocí Levenberg-Marquardt nelineárního optimalizačního algoritmu.

Druhý příklad představuje data s mnohem větším rozptylem, obr. 4b, s použitím $D_1 = 152.4$ mm, $D_2 = 457.2$ mm, $f_1 = 4.48$ MPa a $f_2 = 3.79$ MPa byly získány neznámé parametry $f_r^0 = 4.77$ MPa a $D_b = 16.3$ mm.

Z grafů je zřejmé, že výsledky získané použitím pouze dvou velikostí se liší velmi málo od přesnější závislosti získané nelineární regresí vztahu (3) s použitím všech dat. Demonstrují tak schopnost navrhovaného postupu implementace vlivu velikosti do současných norem zkoušení pevnosti betonu v tahu za ohybu.



Obr. 4 Závislost pevnosti v tahu za ohybu na velikosti: a) Rocco, b) Lindner & Sprague.

2.4 Vliv velikosti, součinitele spolehlivosti zatížení a spolehlivost návrhu

Tato část si klade za cíl ukázat důsledky snížení součinitelů zatížení (pro stálá a nahodilá) na spolehlivost návrhu a jakou roli v tomto sehrává vliv velikosti (Novák a Bažant, 2002). Bažant a Frangopol (2000) zdůraznili, že bez zavedení vlivu velikosti do normových předpisů nelze snižovat součinitel spolehlivosti pro stálá zatížení, jak se v současné době v USA diskutuje. Tento text se pokouší kvantifikovat vliv pomocí pravděpodobnosti poruchy pro konkrétní případ nosníku z prostého betonu. Přestože případy ohýbaných konstrukcí z prostého betonu nejsou časté, příklad má metodologický charakter s obecnější platností a vyvolává otázky interakce vlivu velikosti a spolehlivosti.

Předpokládáme, že chceme určit skutečnou únosnost vyjádřenou v případě ohýbaného nosníku maximálním momentem únosnosti

$$M_u^{real} = f_r^{real} \frac{D^2 b}{6}, \quad (6)$$

kde f_r^{real} je pevnost v tahu za ohybu vyjádřitelná energeticko-statistickým vztahem (3). Pokud odečteme část ohybového momentu od stálého zatížení, dostaneme maximální skutečnou hodnotu ohybového momentu od zatížení nahodilého M_{live}^{real} .

V případě návrhu podle normy je situace poněkud jiná. Projektant musí pracovat se součiniteli zatížení a s návrhovými hodnotami materiálových vlastností (v našem případě

f_r^{design}). Předpokládejme, že tato hodnota je zavedena konstantní na základě testování s jednou velikostí, např. $D = 100$ mm, navíc je upravena součinitelem spolehlivosti. Pak návrhový mezní moment je

$$M_u^{design} = f_r^{design} \frac{D^2 b}{6} \quad (7)$$

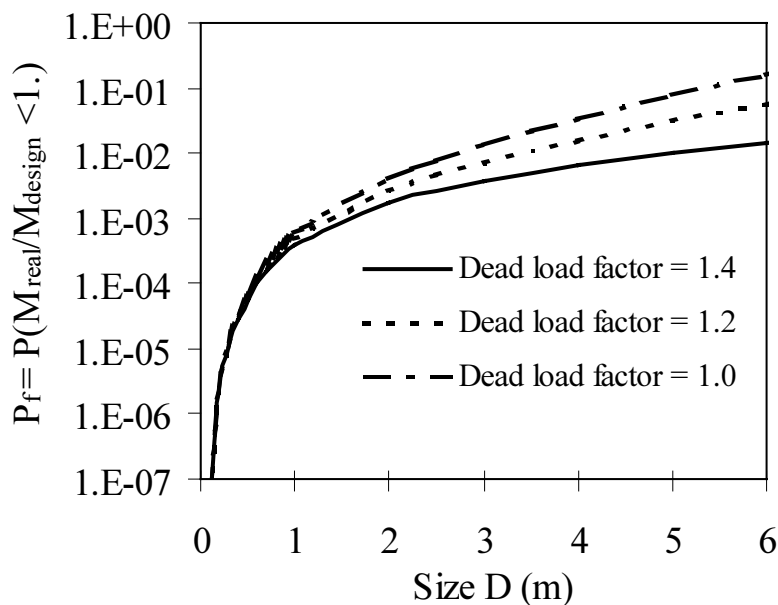
Připustíme-li maximální návrhové zatížení podle normy ACI 319 (1999) vedoucí k návrhovému meznímu momentu (levá strana v (7)), pak lze vyjádřit návrhovou hodnotu ohybového momentu od nahodilého zatížení jako

$$M_{live}^{design} = (M_u^{design} - 1.4M_{dead}) / 1.7 \quad (8)$$

Porovnáním hodnot M_{live}^{real} a M_{live}^{design} lze posoudit spolehlivost. Nejlépe v pravděpodobnostní formě pomocí pravděpodobnosti poruchy

$$p_f = P\left(\frac{M_{live}^{real}}{M_{live}^{design}} \leq 1\right) \quad (9)$$

K ukázce důsledků vlivu velikosti a případného snížení součinitele spolehlivosti pro stálé zatížení použijeme energeticko-statistický vztah vlivu velikosti získaný pro reálná data (Lindner a Sprague 1956) a zjednodušeně zavedeme náhodnou proměnlivost poměru momentů ve vztahu (9) variačním koeficientem 0.1. Závislost pravděpodobnosti poruchy (9) na velikosti D je na obr. 5. Je zřejmé, že snížení součinitele zatížení by vedlo ke zvýšení pravděpodobnosti poruchy. Ovšem dominantní důsledky na spolehlivost má vliv velikosti, z tohoto pohledu ani současná hodnota součinitele 1.4 nemůže „zachránit“ spolehlivost. Podobně by vyzněla analýza s předpoklady podle Eurocode 1.



Obr. 5 Pravděpodobnost poruchy v závislosti na velikosti nosníku.

3 Náhodná pole a metoda stochastických konečných prvků

3.1 Simulace náhodných polí metodou orthogonální transformace kovarianční matice

Velmi účinným způsobem generace stochastického pole je provedení orthogonální transformace korelační matice, tzn. platí

$$\Lambda = \Phi^T C_{XX} \Phi, \quad (10)$$

kde Φ je matice vlastních vektorů a Λ je diagonální matice vlastních čísel korelační matice C_{XX} . Vlastní čísla v diagonální matici Λ odpovídají rozptylům nekorelovaných gaussovských náhodných proměnných. Poté můžeme generovat náhodné pole podle vztahu

$$\mathbf{X} = \Phi \mathbf{Y}, \quad (11)$$

kde $\mathbf{Y} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_n]^T$ je vektor skládající se z n nezávislých normálně rozdělených náhodných čísel s nulovou střední hodnotou a s rozptyly odpovídajícími diagonálním členům matice Λ .

Setřídíme-li diagonální členy matice Λ od největšího do nejmenšího, je zpravidla zřejmé, že pouze několik málo náhodných proměnných postačuje k dostatečně přesnému popisu náhodného pole. Není třeba pracovat s n náhodnými čísly při generování, stačí pouze použít k čísel ($k \ll n$) s nejvyšší proměnlivostí. Tento počet k závisí zejména na korelační délce (parametru autokorelační funkce).

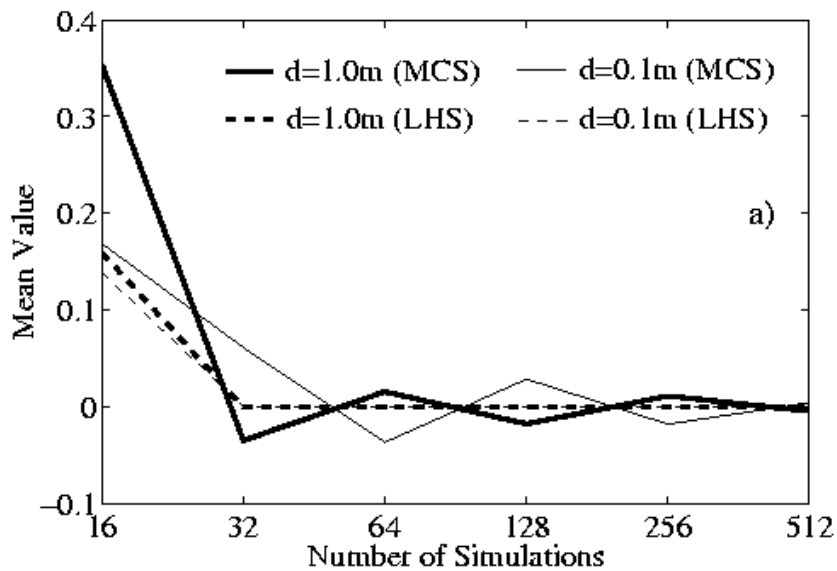
Výhoda této metody spočívá v tom, že při simulaci pak pracujeme pouze s nekorelovanými náhodnými veličinami, kterých je pouze k . Dochází tedy k výraznému snížení počtu náhodných veličin potřebných pro reprezentaci náhodného pole. To je významné především v souvislosti s použitím simulačních technik k výpočtu pravděpodobnosti poruchy typu „importance sampling“, ale i pro klasickou statistickou analýzu metodou Monte Carlo.

3.2 Zvýšení účinnosti metody užitím Latin Hypercube Sampling

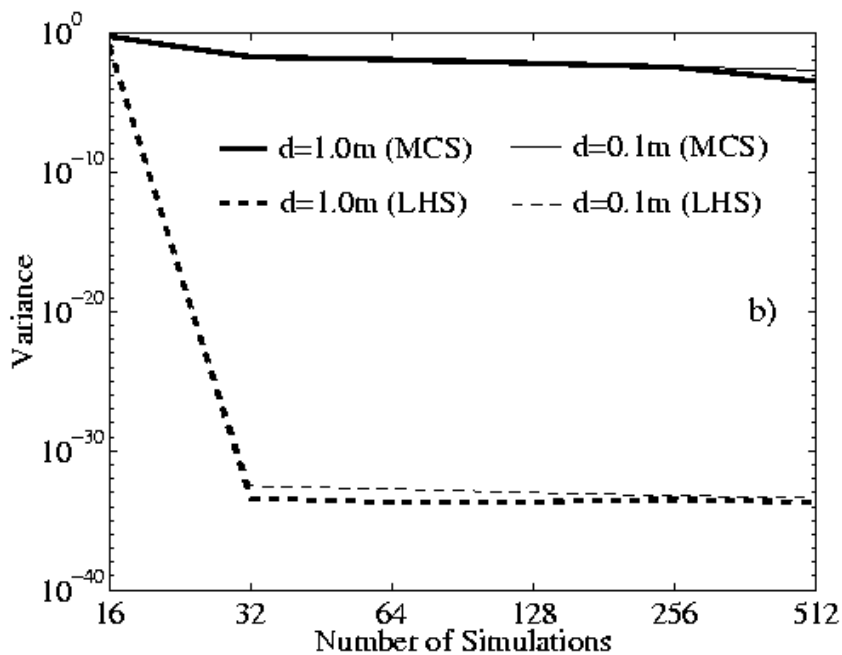
Použití metody Latin Hypercube Sampling (LHS) pro generaci redukovaného náhodného vektoru \mathbf{Y} představuje zlepšení výše popsané metody navržené pro statistickou analýzu. V případě časově náročnějších výpočtových problémů, kdy není možné provádět dostatečný počet simulací klasické metody Monte Carlo, je nutné snížit počet simulací na přijatelné minimum. Metoda LHS byla v tomto ohledu ověřena pro simulaci náhodných veličin. Pro simulaci náhodných polí byla provedena podrobnější parametrická studie účinnosti metody v kombinaci s metodou orthogonální transformace kovarianční matice (Novák a kol. 2000).

Jako testovací příklad byla zvolena nejdříve 1D konstrukce délky 6 m, rozdělená na 128 diskretních bodů (např. 128 konečných prvků). Ve studii byly použity různé hodnoty korelační délky Gaussovského náhodného pole, byl testován především obor malého počtu simulací – srovnání použití prosté metody Monte Carlo (MCS) a Latin Hypercube Sampling (LHS). Pozornost byla zaměřena na kvalitu realizace základních statistik náhodného pole. Ty byly zjišťovány opakovanými simulacemi vždy s jiným nastavením generátoru pseudonáhodných čísel. Tak bylo dosaženo postupně několika náhodných výběrů ze základního souboru (ve studii použito dvacet). Zde uvádíme výsledky pro střední hodnotu náhodného pole, požadovaná hodnota je nula. Kvalita simulace byla měřena dvěmi

základními statistikami – průměrem a rozptylem. Výsledky jsou na obr. 6 a 7. Z obr. 6 je zřejmé, že střední hodnota se velmi rychle blíží požadované hodnotě v případě varianty LHS již pro velmi malé počty simulací. Rozptyl této střední hodnoty ve srovnání s použitím MCS je řádově nižší, obr. 7. To dokumentuje schopnost této svým způsobem nové alternativní metody postihnout základní statistiku náhodného pole použitím malého počtu simulací. Proto je metoda předurčena pro použití spolu s náročnějšími výpočtovými modely mechaniky kontinua a metody stochastických konečných prvků.



Obr. 6 Statistika střední hodnoty: průměr.



Obr. 7 Statistika střední hodnoty: rozptyl.

4 Nelineární lomová mechanika a stochastické přístupy

4.1 Obecné poznámky

Realistická počítačová analýza představuje moderní nástroj k hlubšímu poznání skutečného chování stavební konstrukce. Odezva analyzované konstrukce je přitom ovlivněna jednak nelineárním chováním materiálu, jednak náhodností vstupních materiálových parametrů. Jak již bylo naznačeno v úvodu, pozornost teoretického výzkumu problematiky spolehlivosti a vlivu velikosti betonových konstrukcí je zaměřena především na kombinaci deterministických a stochastických aspektů, teorii lomové mechaniky a teorii spolehlivosti. V zásadě lze rozlišit dva výrazné směry:

- Přístupy založené na Weibullově teorii.
- Využití náhodných polí v lomové mechanice betonu – metoda stochastických konečných prvků.

Oba směry byly a jsou autorem sledovány. Autor se pokusil přispět především k teoretickému rozvoji problematiky. Výsledky představují základ k praktickému využití statistické simulace v nelineární lomové mechanice. Na tomto interdisciplinárním poli se autor v současné době zvýšenou měrou angažuje ve spolupráci s firmou Červenka Consulting - randomizace software ATENA (2001). V následujícím je uvedena základní koncepce a ilustrace praktického použití (Novák a kol. 2002).

Nelineární chování betonu je možno postihnout metodami nelineární lomové mechaniky a modelem rozetřených trhlin, které jsou využity v programu pro nelineární analýzu betonových a železobetonových konstrukcí ATENA. Vliv statistického charakteru vstupních veličin lze zkoumat náhodným generováním vstupních materiálových veličin metodou Monte Carlo a opakováním nelineárního výpočtu s různými sadami (náhodnými realizacemi) vstupních parametrů. Vzhledem k výpočtové náročnosti nelineární analýzy konstrukce je přitom třeba použít efektivní statistické techniky dosahující dostatečně přesných výsledků již při malém počtu náhodných realizací. Jedna z takových metod, Latin Hypercube Sampling, je využita v pravděpodobnostním modulu, který zajistí automatické generování náhodných realizací zadané konstrukce a umožní statistické vyhodnocení výsledků získaných nelineárními výpočty. Integrací programu ATENA a pravděpodobnostního modulu byl vytvořen stochastický programový systém, umožňující v konečném důsledku stanovení spolehlivosti konstrukce.

Postup stochastické simulace je popsán následujícím schématem:

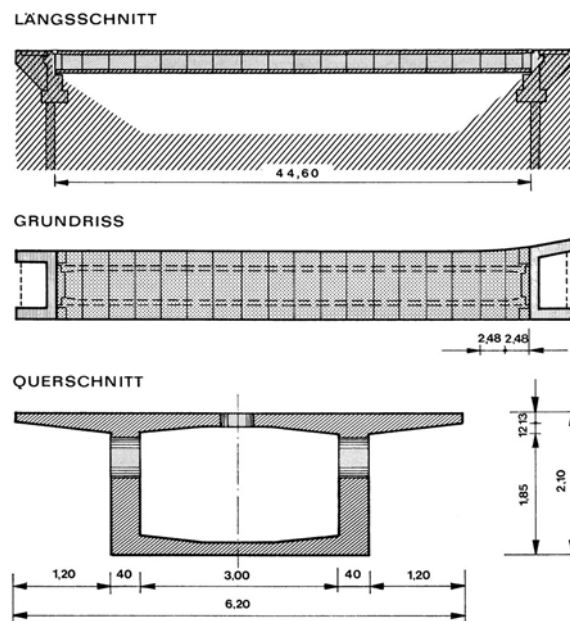
1. V prostředí programu ATENA je vytvořen a odladěn deterministický model analyzované konstrukce.
2. Nejistoty výpočtového modelu jsou reprezentovány v pravděpodobnostním modulu jako náhodné veličiny s určitým teoretickým rozdělením pravděpodobnosti (normální, lognormální, Weibullovo aj.). Statistická závislost mezi jednotlivými veličinami je popsána korelační maticí.
3. Pravděpodobnostní modul simuluje metodou LHS jednotlivé realizace těchto náhodných veličin.
4. Generované realizace jsou postupně použity jako vstupní parametry nelineárního výpočtového programu ATENA. Nelineární řešení úlohy je opakováno a vybrané výsledky jsou uchovány.
5. Na konci celého simulačního procesu jsou získané soubory odezvy konstrukce statisticky vyhodnoceny. Výstupem jsou statistické charakteristiky odezvy, například mezního zatížení nebo průhybu. Pro konkrétní konstrukci lze při definici funkce poruchy stanovit její globální součinitel spolehlivosti, resp. pravděpodobnost poruchy.

4.2 Příklad aplikace – spolehlivostní výpočet mostu

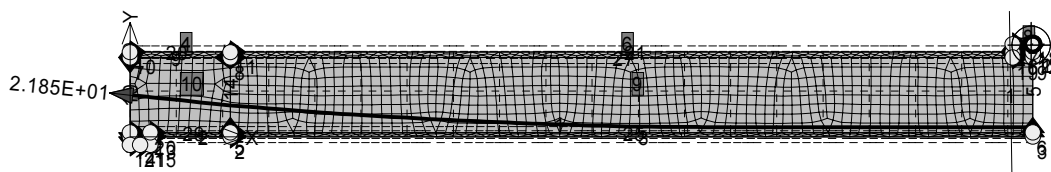
Jednou z posledních aplikací výše naznačeného přístupu byl spolehlivostní výpočet dodatečně předpjatého komorového mostu, (Pukl, Novák, Eichinger, 2002; Bergmeister, Novák a kol., 2002). Most ve Vídni se skládá z 18 segmentů, každý segment má délku 2.485 m. Celková délka mostu je 44.6 m, šířka 6.4 m a výška 2.1 m, obr. 8. Most je v současné době určen k demolici, přičemž stochastická simulace mostu je součástí numerické predikce pro naplánování destruktivního testu a optimalizaci testovacího zařízení.

Výpočtový model poloviny komorového nosníku je na obr. 9. Most byl nejprve předepnut a pak zatížen předepsanou deformací uprostřed rozpětí. Takto bylo možno obdržet mezní zatížení a rovněž sestupnou větev diagramu zatížení vs. přetvoření. Celkem bylo uvažováno 13 náhodných veličin – parametry betonu a předpětí. Bylo nutné uvažovat rovněž statistickou závislost některých veličin pomocí korelační matice.

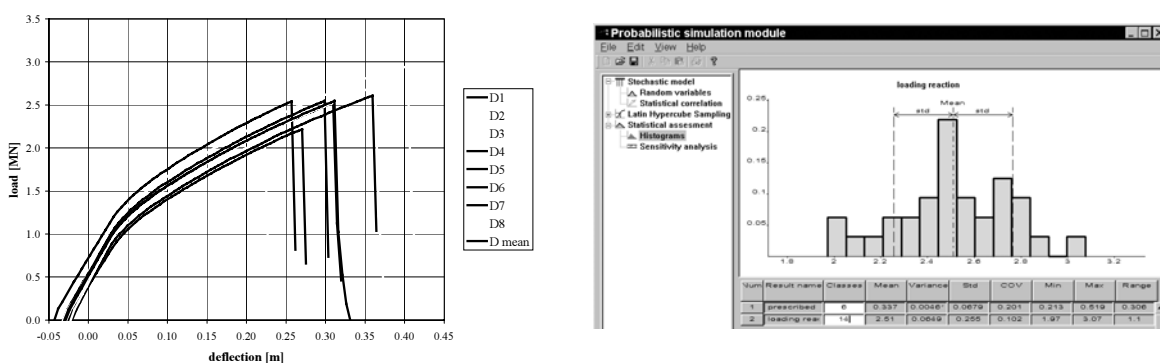
Některé výsledky statistické simulace jsou uvedeny na obr. 10. Vlevo jsou simulací získané realizace diagramu zatížení vs. přetvoření, vpravo je elementární statistické vyhodnocení mezního zatížení ve formě histogramu. V tomto případě střední hodnota mezního zatížení získaná z 32 simulací je 2.51 MN a směrodatná odchylka 0.255 MN. Za předpokladu normality rozdělení pravděpodobnosti zatížení je pak možné snadno vypočítat spolehlivost vyjádřenou indexem spolehlivosti. Výsledky jsou zobrazeny na obr. 11 parametricky pro různé úrovně střední hodnoty zatížení a dvě hodnoty variačního koeficientu zatížení. Takový výsledek je možné srovnat se spolehlivostními požadavky norem, např. Eurocode uvádí hodnotu 4.7 (vodorovná přímka na obr. 11).



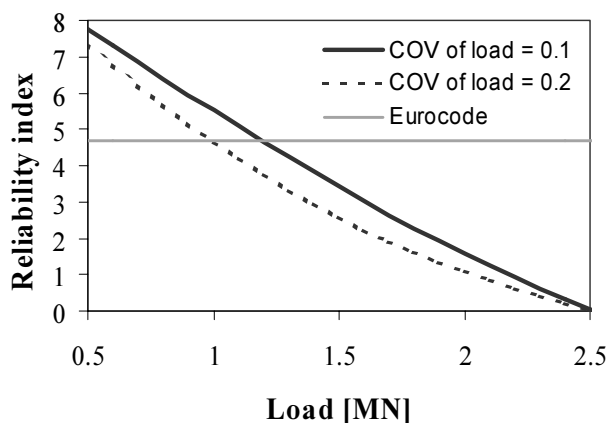
Obr. 8 Schéma komorového mostu.



Obr. 9 Výpočtový model mostu, metoda konečných prvků, program ATENA.



Obr. 10 Diagram zatížení vs. průhyb (8 simulací) a histogram mezního zatížení (32 simulací).



Obr. 11 Spolehlivost – index spolehlivosti vs. zatížení.

5 Závěr

Problematika modelování kvazikřehkého porušování betonových konstrukcí musí být založena na interdisciplinárním přístupu k dané problematice: teorie spolehlivosti stavebních konstrukcí, otázky degradace materiálu, náhodná pole a stochastické konečné prvky, nelineární lomová mechanika. Běžné komerční programy pro analýzu stavebních konstrukcí pracují na deterministické úrovni řešení dané úlohy. Deterministické řešení dává poměrně jednoznačnou odpověď na stanovené otázky a většině uživatelů proto vyhovuje. Na první pohled se zdá, že zavedení statistických postupů by daný problém pouze zkomplikovalo a dokonce zamlžilo. Ve skutečnosti však přináší stochastická analýza novou kvalitu do výpočtového modelování. Tento trend lze sledovat i u některých úspěšných komerčních programů.

Hlavní důvody ke stochastické simulaci jsou následující:

1. Materiálové vlastnosti a geometrické parametry sledované konstrukce, jakož i zatížení a vlivy prostředí se ve skutečnosti realizují náhodně. Jsou to tedy náhodné veličiny, náhodná pole a náhodné procesy, jež ovlivňují odezvu konstrukce. Odezva konstrukce – napětí, přetvoření, mezní únosnost – je tudíž rovněž náhodnou veličinou. Základní otázkou je tedy určení statistické proměnlivosti odezvy konstrukce, jejich statistických charakteristik, rozdělení pravděpodobnosti apod.

2. Při nelineárních výpočtech existuje určitá nekonzistentnost normových předpisů ve vztahu k použití výpočtových hodnot. Výpočtovými hodnotami se zajistí požadovaná spolehlivost konstrukce metodou dílčích součinitelů spolehlivosti (např. v systému norem Eurocode). To je však plně v pořádku pouze u lineárních výpočtů. Pro nelineární výpočet je třeba použít průměrné vstupní hodnoty. Jednou z možností řešení takovéto úlohy je aplikace stochastické simulační techniky k zjištění statistických charakteristik odezvy konstrukce. Na takto získanou odezvu je třeba aplikovat patřičné (globální) součinitele spolehlivosti. V takovém případě se jedná o plně pravděpodobnostní přístup, zatímco současné normy jsou na úrovni polopravděpodobnostní. Většina norem však plně pravděpodobnostní metody ve svých předpisech připouští a doporučuje.
3. Deterministický výpočet poskytuje pouze velmi omezenou informaci o spolehlivosti konstrukce: konstrukce buď je nebo není spolehlivá. Konečným cílem pravděpodobnostního výpočtu je však stanovit pravděpodobnost poruchy konstrukce, resp. index spolehlivosti, který objektivně kvantifikuje spolehlivost konstrukce.
4. Dalším výstupem statistické simulace je tzv. citlivostní analýza. Pomocí citlivostní analýzy lze sledovat vliv jednotlivých náhodných vstupních parametrů na odezvu konstrukce, případně na její spolehlivost. Citlivostní analýza představuje kvalitativně vyšší úroveň ve srovnání s klasickou parametrickou studií.
5. Postižení statistického vlivu velikosti na porušování konstrukce je dalším důvodem k uvažování náhodnosti u konstrukcí z kvazikřehkých materiálů jako je beton.

6 Přehled nejvýznamnějších publikací autora (Výběr z celkového počtu 107 publikací)

Publikace v mezinárodních časopisech

1. Teplý, B., Novák, D. (1988). "Consequence of Uncertainty of Input Data on Engineering Software Reliability." *Software for Engineering Workstations*, 5, 33-34.
2. Florian, A., Novák, D. (1988). "The Statistical Model Selection for Random Variables." *Software for Engineering Workstations*, 4, 158-160.
3. Novák, D. (1991). "Procedure FAILURE – The Computation of Probability of Failure." *Adv. Eng. Software*, Vol.13, No. 4, 211-214.
4. Novák, D., Stoyanoff, S., Herda, H. (1995). "Error Assessment for Wind Histories Generated by Autoregressive Method." *Structural safety*, Vol.17, No. 1.
5. Teplý, B., Keršner, Z., Novák, D. (1996). "Sensitivity Study of BP-KX and B3 Creep and Shrinkage Models." *Materials and Structures*, Vol. 29, 500-505.
6. Kijawatworawet, W., Novák, D., Keršner, Z., Teplý, B. (1999). "Statistical Prediction of Carbonation Deterioration: Two-case Studies in Thailand." *Building Research Journal*, Vol. 47, No. 1, 41-49.
7. Bažant, Z. P., Novák, D. (2000). "Probabilistic Nonlocal Theory for Quasibrittle Fracture Initiation and Size Effect. I: Theory." *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.126, No.2, 166-174.
8. Bažant, Z. P., Novák, D. (2000). "Probabilistic Nonlocal Theory for Quasibrittle Fracture Initiation and Size Effect. II: Application." *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.126, No.2, 175-185.
9. Bažant, Z. P., Novák, D. (2000). "Energetic-Statistical Size Effect in Quasibrittle Failure at Crack Initiation." *ACI Materials Journal*, May-June 2000, Vol.97, No.3, 381-392.
10. Bažant, Z. P., Novák, D. (2001). "Proposal for Standard Test of Modulus of Rupture of Concrete with its Size Dependence." *ACI Materials Journal*, January-February 2001, Vol.98, No.1, 79-87.

Publikace v národních časopisech

11. Teplý, B., Novák, D. (1985). „Statistické hodnocení náhodného chování železobetonových nosníků.“ (in Czech with English summary), *Stavebnický časopis*, 4, VEDA, Bratislava, 293-307.
12. Teplý, B., Keršner, Z., Novák, D. (1987). „Vliv variability fyzikálních a geometrických veličin na chování železobetonových konstrukcí.“ (in Czech), *Pozemní stavby*, 9, 403-407.
13. Teplý, B., Novák, D. (1988). „Prostředky pro statistickou analýzu výpočetních modelů.“ (in Czech with English summary), *Stavebnický časopis*, 36, č.4, VEDA, Bratislava, 321-326.
14. Novák, D. (1989). „Pravděpodobnost poruchy železobetonového průřezu namáhaného prostým ohybem.“ (in Czech with English summary), *Stavebnický časopis*, 37, č.4, VEDA, Bratislava, 265-278.
15. Novák, D. (1991). „Pravděpodobnostní analýza železobetonového průřezu namáhaného prostým ohybem za použití výpočtového modelu mezního přetvoření.“ *Stavebnický časopis*, 39, č.1, VEDA, Bratislava, 3-14.
16. Novák, D., Trávníček, J. (1991). „Optimalizovaný návrh podélné výztuže železobetonových nosníků.“ (in Czech), *Stavební výzkum*, 2, 1-6.
17. Keršner, Z., Novák, D. (1994). „Spolehlivostní analýza krychelné pevnosti betonu při urychlování jeho tvrdnutí ohřevem.“ (in Czech), *Stavební obzor*, 5, 145-148.
18. Novák, D., Šmerda, Z. (1995). „Pravděpodobnostní prognóza životnosti železobetonového vazníku.“ (in Czech), *Beton a živo*, 1, 19-21.
19. Keršner, Z., Novák, D., Teplý, B., Bohdanecký, V. (1996). „Karbonatace betonu, koroze výztuže a životnost chladicí věže.“ (in Czech), *Sanace*, prosinec, 21-23.
20. Silbrník, V., Novák, D. (1996). „Optimalizace konstrukcí metodami evolučních strategií a simulovaného žíhání.“ (in Czech), *Inženýrská mechanika*, 3, č.6, 363-372.
21. Rusina, R., Novák, D. (1997). „Řešení rovinné úlohy metodou stochastických konečných prvků.“ (in Czech), *Inženýrská mechanika*, 4, č.1, 15-24.
22. Teplý, B., Novák, D., Keršner, Z., Lawanwisut, W. (1999). “Deterioration of Reinforced Concrete: Probabilistic and Sensitivity Analyses.” *Acta Polytechnica*, Prague, Vol.39, No.2, 7-23.
23. Šmerda, Z. & Adámek, J., Keršner, Z., Meloun, V., Mencl, V., Novák, D., Rovnaníková, P., Teplý, B. (1999). „Životnost betonových staveb.“ (in Czech), Technická knihovna autorizovaného inženýra a technika, Nakladatelství ŠEL, spol. s r.o., Praha.
24. Teplý, B., Novák, D., Vokroj, P. (2000). „Predikce životnosti korodující ocelové válcové nádrže.“ (in Czech), *Inženýrská mechanika*, 7, č.2, 151-157.

Publikace na mezinárodních konferencích

25. Teplý, B., Materna, A., Keršner, Z., Novák, D. (1986). “Nondeterministic Analysis of Long-Term Behaviour of RC Beams.” *Fourth RILEM International Symposium Creep and Shrinkage of Concrete: Mathematical Modeling*, August 1986, Evanston, Illinois, USA.
26. Novák, D., Teplý, B. (1991). “Estimation of Structural Failure Probability.” *European Conference on New Advances in Computational Structural Mechanics*, Giens, France.

27. Keršner, Z., Novák, D., Teplý, B. (1993). "Probabilistic Modeling of Concrete Strength in Heating Process." *ICOSSAR'93 - 6th International Conference on Structural Safety and Reliability*, Innsbruck, Austria, August 1993, 1281-1285.
28. Novák, D., Teplý, B., Shiraishi, N. (1993). "Sensitivity Analysis of Structures: A Review." *The Fifth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing*, Edinburgh, Scotland, August 1993, 201-207.
29. Novák, D., Kijawatworawet, W. (1990). "A Comparison of Accurate Advanced Simulation Methods and Latin Hypercube Sampling Method with Approximate Curve Fitting to Solve Reliability Problems." Internal Working Report No. 34-90, Institute of Engineering Mechanics, University of Innsbruck, Austria.
30. Novák, D., Shiraishi, N. (1993). "Latin Hypercube Response Approximation and Sensitivity Analysis for Reliability Problems." Research Report No. 93-ST-01, School of Civil Engineering, Kyoto University, Japan, March 1993.
31. Novák, D., Keršner, Z., Teplý, B. (1994). "Probabilistic Modelling of Deterioration of PC Beams." *Conference Durability and Service Life of Bridge Structures*, Poznań, Poland, September 1994, 211-215.
32. Teplý, B., Keršner, Z., Novák, D. (1994). "Effect of Composition and Environmental Factors on Damage of Concrete Caused by Carbonation: A Probabilistic Modelling." *Europe - U.S. Workshop on Fracture and Damage in Quasibrittle Structures: Experiment, Modelling and Computer Analysis*, Prague, Czech Republic, September 1994.
33. Keršner, Z., Novák, D. (1995). "Curing of Concrete - Duration of Curing, Resistance against Frost: Probabilistic modelling." *Conference CERRA - ICASP 7*, Paris, France.
34. Keršner, Z., Teplý, B., Novák, D. (1996). "Uncertainty in Service Life Prediction Based on Carbonation of Concrete." *7th International Conference on the Durability of Building Materials and Components*, Stockholm, Sweden, May 1996.
35. Novák, D., Keršner, Z., Teplý, B. (1996). "Prediction of Structure Deterioration Based on the Bayesian Updating." *4th International Symposium on Natural-Draught Cooling Towers*, Kaiserslautern, Germany, May 1996, 417-421.
36. Novák, D., Silbrník, V. (1996). "Reliability-Based Optimization by Simulated Annealing Approach." *Conference on the Design and Assessment of Building Structures*, Prague, Czech Republic, September 1996.
37. Novák, D., Teplý, B., Keršner, Z. (1997). "The Role of Latin Hypercube Sampling Method in Reliability Engineering." *ICOSSAR'97 - 7th International Conference on Structural Safety and Reliability*, Kyoto, Japan, November 1997, 403-409.
38. Marek, P., Guštar, M., Teplý, B., Novák, D., Keršner, Z. (1997). "Sensitivity Analysis in Simulation-based Reliability Assessment of Structures." *ICOSSAR'97 - 7th International Conference on Structural Safety and Reliability*, Kyoto, Japan, November 1997, 715-721.
39. Keršner, Z., Novák, D., Teplý, B., Rusina, R. (1997). "Modelling of Deterioration of Concrete Structures by Stochastic Finite Element Method." *ICOSSAR'97 - 7th International Conference on Structural Safety and Reliability*, Kyoto, Japan, November 1997, 971-974.
40. Teplý, B., Keršner, Z., Novák, D., Silbrník, V. (1997). "Reliability-Based Optimisation of Repair Strategy and Service Life of Concrete Structures." *ICOSSAR'97 - 7th International Conference on Structural Safety and Reliability*, Kyoto, Japan, November 1997.
41. Vokroj, P., Teplý, B., Novák, D., Keršner, Z. (1997). "Corrosion and Life-time Prediction of a Steel Storage Tank." *International Conference on Carrying Capacity of Steel Shell Structures*, Brno, Czech Republic, October 1997, 239-245.

42. Teplý, B., Keršner, Z., Rovnaníková, P., Novák, D. (1998). "Structural Life-time Prediction: Two Case Studies." *CONSEC'98 - 2nd International Conference on Concrete under Severe Conditions*, Tromso, Norway, June 1998, 635-645.
43. Keršner, Z., Novák, D., Rusina, R., Teplý, B. (1998). "Stochastic Finite Element Method as a Tool for Modelling of Deterioration of Concrete Structures." *Zeszyty naukowe politechniki opolskiej, Seria: Budownictwo z.42, Nr kol. 239/98*, Warsaw, Poland, 27-36.
44. Rusina, R., Novák, D., Keršner, Z., Teplý, B. (1998). "Shear Lag in Concrete Box Girder Flanges Modelled by Stochastic FEM." *EURO-C 1998 – Computational Modelling of Concrete Structures*, Badgastein, Austria, April 1998, 817-822.
45. Teplý, B., Novák, D., Keršner, Z., Lawanwisut, W. (1999). "Failure Probability of Deteriorating Reinforced Concrete Beams." *8th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Vancouver, Canada, 1357-1366.
46. Rusina, R., Novák, D., Teplý, B., Křístek, V. (1999). "Modelling Shear Lag in Concrete Box Girder Flanges by Stochastic FEM." *International Conference on Innovation in Concrete Structures: Design and Construction*, Dundee, Scotland, UK, September 1999, 73-78.
47. Lawanwisut, W., Novák, D., Keršner, Z., Teplý, B. (1999). "Probabilistic Modelling of Deteriorating RC Beams." *Conference on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures*, Bratislava, Slovakia, July 1999, 225-230.
48. Novák, D., Teplý, B., Lawanwisut, W., Keršner, Z. (1999). "The Modelling of RC Beam Deterioration: A Sensitivity Study." *ICASP8 – International Conference on Applications of Statistics and Probability*, Sydney, Australia, December 1999, 307-313.
49. Lawanwisut, W., Novák, D., Ouypornprasert, W., Keršner, Z., Teplý, B. (2000). "Reliability and Sensitivity Analysis of Deteriorating Reinforced Concrete Beams." *The 6th National Convention on Civil Engineering: Potential of Thai Civil Engineers in the Next decade*, Thailand, May 2000, 115-120.
50. Novák, D., Adámek, J. (2000). "Reliability and Sensitivity Analyses of Masonry Vaults." *5th International Congress on Restoration of Architectural Heritage – Firenze 2000 (CD-ROM Proc.)*, Florence, Italy, September 2000.
51. Bažant, Z. P., Novák, D. (2000). "Energetic Probabilistic Theory of Fracture Scaling of Composites." *Proceeding of ICTAM 2000*.
52. Novák, D., Lawanwisut, W., Bucher, C. (2000). "Simulation of Random Fields Based on Orthogonal Transformation of Covariance Matrix and Latin Hypercube Sampling." *Proceeding of Int. Conference on Monte Carlo Simulation MC 2000*, Monaco, Monte Carlo, June 2000, 129-136.
53. Bažant, Z. P., Novák, D. (2000). "Probabilistic Nonlocal Theory for Quasibrittle Fracture Initiation and Size Effect Based on Extreme Value Statistics." *8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, PMC 2000 (CD-ROM Proc.)*, Notre dame, USA.
54. Kala, Z., Novák, D., Vořechovský, M. (2001). "Probabilistic Nonlinear Analysis of Steel Frames Focused on Reliability Design Concept of Eurocodes." *8th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2001*, Newport Beach, California, USA, June 2001.
55. Bažant, Z. P., Novák, D. (2001). "Nonlocal Model for Size Effect in Quasibrittle Failure Based on Extreme Value Statistics." *8th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2001*, Newport Beach, California, USA, June 2001.

56. Lawanwisut, W., Novák, D., Teplý, B. (2001). "Reliability Analysis of Reinforced Concrete Beams: Deterioration, Sensitivity and Spatial Variability Aspects." *8th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2001*, Newport Beach, California, USA, June 2001.
57. Novák, D., Vořechovský, M., Pukl, R., Červenka, V. (2001). "Statistical Nonlinear Analysis – Size Effect of Concrete Beams." *4th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures, FraMCoS – 4*, Cachan, France.
58. Bažant, Z. P., Novák, D. (2001). "Nonlocal Weibull Theory and Size Effect in Failures at Fracture Initiation." *4th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures, FraMCoS – 4*, Cachan, France.
59. Lawanwisut, W., Novák, D., Kijawatworawet, W. (2001). "Sensitivity Analysis of Deteriorating RC Beams." Proceedings of conference Probability-based design of structures, Bangkok, Thailand, WK2: 1-9.
60. Bažant, Z. P., Zhou, Y., Novák, D., Daniel, M. (2001). "Size Effect in Fracture of Sandwich Structure Components: Foam and Laminate". *ASME Annual Meeting organized by Y. D. S. Rajapakse (ADM Volume)*, USA.
61. Novák, D., Bažant, Z. P. (2002). "Consequences of Size Effect and Load Factors on Reliability of Design". *1st International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS'02*, Barcelona, Spain, July, v tisku.
62. Pukl, R., Novák, D., Eichinger, E.M. (2002). "Stochastic Nonlinear Fracture Analysis." *1st International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS'02*, Barcelona, Spain, July, v tisku
63. Bergmeister, K., Novák, D., Strauss, A., Eichinger, E.M., Kolleger, J., Pukl, R., Červenka, V. (2002). "Structural Analysis and Safety Assessment of Existing Concrete Structures". *1st fib Congress 2002 Concrete Structures in 21 Century*, Osaka, Japan, October, v tisku.
64. Novák, D., Pukl, R., Vořechovský, M., Rusina, R., Červenka, V. (2002). "Structural Reliability Assessment of Computationally Intensive Problems – Nonlinear FEM Analysis". *1st Int. ASRANet Colloquium*, Glasgow, Scotland, July, v tisku.

Publikace na národních konferencích

65. Novák, D., Teplý, B., Materna, A., Keršner, Z. (1986). „Metoda LHS a její srovnání s metodou Monte Carlo při statistické analýze železobetonových nosníků“. *Sborník konference Matematické vědy v technice*, prosinec 1986, Karlovy Vary, 399-404.
66. Novák, D., Keršner, Z. (1995). "Optimization of Structures by Method of Evolution Strategies." *Workshop 95: Mechanics in Engineering*, Prague, Czech Republic, January 1995, 349-350.
67. Novák, D., Bažant, Z. P. (2000). „Stanovení pevnosti betonu v tahu za ohybu s ohledem na vliv velikosti nosníku.“ *Sborník konference Betonářské dny 2000*, Pardubice, 256-259.
68. Vořechovský, M., Novák, D., Pukl, R., Červenka, V. (2000). „Modelování vlivu velikosti nosníku na jeho únosnost prostředky nelineární lomové mechaniky – SBETA.“ *Sborník konference Betonářské dny 2000*, Pardubice, 375-379.
69. Pukl, R., Novák, D., Vořechovský, M., Rusina, R., Červenka, V. (2001). "Stochastická nelineární analýza betonových konstrukcí." *Betonářské dny 2001*, Pardubice.
70. Keršner, Z., Novák, D., Teplý, B., Vítek, J.L. (2001). "Statistická analýza při výstavbě tunelů pražského metra." *Betonářské dny 2001*, Pardubice.
71. Novák, D. (2002). "Influence of size effect on reliability: Is quantitative assessment possible?“. Seminář Problémy modelování, FAST VŠB-TUO, Ostrava, 72-74.

7 Koncepce další autorovy vědecké a pedagogické činnosti

Ve vědeckovýzkumné a odborné činnosti předpokládá autor zaměření především na následující oblasti:

- Modelování kvazikřehkých materiálů, teoretické a experimentální ověřování mechanismů porušování, aspekty lomové mechaniky ve výpočtovém modelování.
- Vývoj účinných metod analýzy spolehlivosti konstrukcí, metoda stochastických konečných prvků a náhodná pole.
- Softwarová řešení praktických výpočtů spolehlivosti ve spolupráci s praxí (v současné době je realizována úzká dlouhodobá spolupráce s firmou Červenka Consulting – software ATENA, předpoklad pokračování).
- Výzkum vlivu velikosti na únosnost betonových a železobetonových konstrukcí bude především zaměřen na problematiku postižení statistického vlivu velikosti.
- Možnosti optimalizace konstrukcí na úrovni deterministické a stochastické (pravděpodobnostní přístup).
- Popularizace pravděpodobnostních přístupů a jejich prosazování do navrhování a posuzování nosných konstrukcí (přednášková činnost).
- Hledání širších souvislostí spolehlivostního a rizikového inženýrství, interdisciplinární řešení.

Je přirozené, že výzkumný potenciál je nutné rozvíjet v součinnosti s pedagogickou činností a potřebami praxe. Předávání poznatků a zkušeností z vědeckovýzkumné a odborné činnosti se realizuje ve výuce, především pak specializovaných předmětů magisterského a doktorského studia. Právě práce s vybranými studenty magisterského studia a především s doktorandy patří k nejnáročnějším úkolům pedagoga působícího na vysoké škole. Autor se v tomto směru vždy zvýšenou měrou angažoval, vytváření příznivých podmínek pro nadané studenty doktorského studia a jejich zapojování do výzkumných projektů považuje za zásadní předpoklad jejich úspěšného studia. V současné době vede 4 doktorandy (1 je těsně před dokončením) a tuto činnost hodlá nadále prohlubovat. Zahraniční studentka W. Lawanwisut ukončila úspěšně doktorandské studium v roce 2001 a poté získala konkurzem místo výzkumného pracovníka na univerzitě v Dundee ve Skotsku.

Autor i nadále předpokládá vést výuku řady předmětů v anglickém jazyce a domnívá se, že tato forma výuky si zaslouží zvýšenou pozornost. Autor se rovněž domnívá, že počet zahraničních studentů doktorského studia by se měl na fakultě zvyšovat a vzhledem ke svým kontaktům na zahraničních univerzitách bude o zlepšení usilovat. Udržování a další rozšiřování mezinárodních kontaktů a spolupráce považuje autor za nesmírně důležité. V rámci programu Socrates – Erasmus probíhá výměna studentů, učitelů a doktorandů s univerzitou ve Weimaru, Německo (Bauhaus University), autor pracuje na těchto výměnách jako koordinátor. Autor doposud inicioval a realizoval významnější kontakty a spolupráci s Kyoto University (Japonsko), Innsbruck University (Rakousko), Kasetsart University (Thajsko), Rangsit University (Thajsko), University of Newcastle (Austrálie), Weimar – Bauhaus University (Německo), BOKU a TU Wien (Rakousko), Northwestern University (USA).

Autor předpokládá do budoucna posílení spolupráce s odbornými pracovišti na národním fóru se kterými již spolupracuje, především s Katedrou stavební mechaniky a Katedrou betonových konstrukcí a mostů, fakulta stavební, ČVUT Praha, firmou Červenka Consulting, Kloknerovým ústavem a řadou ústavů na FAST VUT v Brně.

Abstract

Main topic of the author's research interest is structural safety and reliability, several important problems of computational stochastic mechanics were tackled by the author, resulting in some original achievements in the field. This text reflects, according to the author's opinion, his most important contributions on some reliability aspects of concrete structures modelling – size effect and random fields. Description provided here is not designed to be complex. The reader is referred to author's papers for detailed information.

First, achievements on stochastic analysis of size effect are summarised. This part should be considered as the main part of this text. It combines reliability theory and fracture mechanics and some outputs have direct practical implications (the proposal for standard tests of modulus of rupture). It is basically focused on failure modelling of quasi-brittle fracture of concrete at crack initiation, typical for standard testing of concrete beams. The part starts with nonlocal Weibull theory description and energetic-statistical size effect for modulus of rupture. In both cases extensive comparison with test data is provided. Results have general validity for failures of concrete structures at crack initiation. Theoretical results are then used practically – proposal for standard test of modulus of rupture is suggested. Hidden size effect – consequences of size effect and load factors on reliability of design is shown next.

Second, the author's contribution to the topic of random fields and stochastic finite elements is outlined. An attention is given to techniques, which are developed for analysis of computationally intensive problems, typical for non-linear FEM analysis. It is focused mainly on description of the new alternative method for simulation of random fields. The method is based on combination of orthogonal transformation of covariance matrix and stratified simulation. It requires small number of random variables and small number of simulations to represent a random field, therefore it is suitable for computationally intensive problems. This technique appeared to be very robust for particular problems.

Finally possibilities of probabilistic simulation using non-linear fracture mechanics and small-sample Monte Carlo simulation are shown. Suitable type of Monte Carlo simulation technique should be applied – Latin Hypercube sampling, in order to keep the number of required simulations at acceptable level, as non-linear analysis is generally computationally demanding. Random variables are randomly generated under probability distribution functions, statistical correlation among them is imposed by the optimisation technique called simulated annealing. Consequently, the analysed problem is repeatedly solved and statistical characteristics of structural response can be obtained and assessed. The results of such statistical simulation are basically statistical characteristics of structural response (e.g. ultimate capacity, stress, deflection, crack width, etc.). Additionally, sensitivity analysis and reliability can be performed.

A multi-purpose probabilistic software for statistical, sensitivity and reliability analysis of engineering problems is under development. This software was recently successfully integrated with advanced non-linear fracture mechanics solution of concrete structures - the program ATENA (Červenka and Pukl, 2001). The approach, implemented into ATENA package, is general and can be applied for basic statistical analysis of computationally intensive fracture mechanics problems. The feasibility and outcomes of the approach is shown on selected numerical example of failure simulation of particular concrete bridge. The activities of the author in the interdisciplinary field of stochastic nonlinear fracture mechanics are supported under the international research project SARA (Structural Assessment and Reliability Analysis, Brenner Autobahn, Italy), project of Grant Agency of Czech Republic No. 103/02/1030 (principal investigator D. Novák, co-investigator V. Červenka) and the research cooperation with prof. Z.P. Bažant (Northwestern University, USA).