

## Profesor Zdeněk P. Bažant opět na ČVUT v Praze

V pondělí 10. března 2003 ve 14 hodin se konala na Fakultě stavební ČVUT přednáška profesora Z. P. Bažanta, člena americké Národní akademie věd. Její název byl „Stochastic Models for Deformation and Failure of Quasibrittle Structures: Recent Advances and Few Directions“ a pan profesor ji přednesl v češtině.

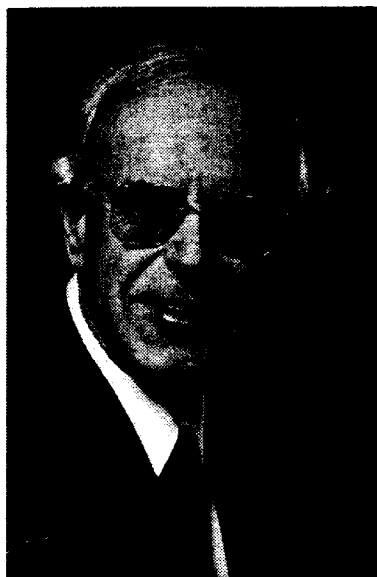
Prof. Bažant je znám nejen české, ale i světové veřejnosti jako jeden vedoucích vědců v mechanice pevných těles. Pochází z rodiny známých českých inženýrů. Jeho otec byl profesorem zakládání staveb a dědeček profesorem stavební mechaniky na ČVUT v Praze.

Roku 1960 vystudoval Fakultu inženýrského stavitelství ČVUT v Praze. Pracoval v Kloknerově ústavu, externě přednášel na ČVUT, byl úsekovým stavbyvedoucím na stavbě obloukového mostu přes Vltavu na Zbraslavi a vyprojektoval unikátní zakřivený předpjatý železobetonový most přes Jizeru u Kořenova.

Ještě před odchodem do zahraničí získal hodnost kandidáta věd, kterou mu udělila tehdejší Československá akademie věd v oblasti inženýrské mechaniky. Postgraduální diplom v teoretické fyzice obdržel na Karlově univerzitě v roce 1966 a jako docent se na ČVUT habilitoval roku 1967.

Od 70. let žije v USA, kde působí jako profesor mechaniky materiálů na Northwestern University v Evanstonu, stát Illinois.

V dubnu loňského roku bylo profesoru Bažantovi uděleno mimořádné ocenění – prestižní členství americké Národní akademie věd, a to za jeho práce v oboru mechaniky materiálů, v nichž „... objevil zákon pro energetický vliv velikosti při porušení kvazi-křehkých materiálů na přechodu mezi tvárným a křehkým chováním, ověřil jej experimentálně pro mnoho důležitých materiálů, ukázal jeho vliv pro měření lomových charakteristik a koncipoval nelokální modely a modely pásu trhlin, které se nyní v širokém



měřítku používají pro numerickou simulaci porušení konstrukcí.“

Americkou Národní akademii (National Academy of Science) založil Abraham Lincoln v roce 1863, kdy probíhala občanská válka USA. Členství v této akademii je považováno za nejvyšší ocenění, jakého je možné v americké vědě dosáhnout. Akademie má přibližně 1900 aktivních a 300 zahraničních členů, z toho 86 je z technických oborů a 181 členů je nositelem Nobelovy ceny. Profesor Bažant je v akademii jediným českým rodákem a zástupcem stavebního oboru.

Prof. Bažant je autorem přes 350 vědeckých publikací. Ve vědeckých kruzích jsou jeho práce velmi dobře známy, např. z činnosti FRAMCOS (Společnost pro lomovou mechaniku betonových konstrukcí), jejímž byl iniciátorem, spoluzakladatelem a prvním prezidentem. Dále pak je znám z řady článků renomovaných odborných časopisů a šesti knih (o dotvarování betonu, stabilitě konstrukcí, chování betonu při vysokých teplotách, kvazi-křehké mechanice lomu, nepružných konstrukcích a vlivu velikosti na pevnost konstrukcí).

Jeho příspěvek k základnímu poznání o chování inženýrských materiálů byl oceněn i řadou prestižních

cen, udělením čestných doktorátů na čtyřech univerzitách včetně ČVUT v Praze a členstvím v inženýrských akademiích USA (členem od roku 1996), Rakouska a České republiky.

Podobně jako většina základních poznatků, tak i „size effect“ neboli vliv velikosti si hledá cestu do praxe velmi pomalu. Z experimentů je již dávno známo, že velké konstrukce mají relativně menší pevnost než konstrukce malé a o kolik menší velmi závisí na typu konstrukce. Přesto se tento jev nepodařilo dostatečně zjednodušit tak, aby se dal použít v normách. Většina norem pro navrhování zatím s vlivem velikosti nepočítá, případně počítá jen ve formě empirických pravidel pro jednotlivé případy.

Profesor Bažant jako první přeložil ucelenou teorii pro vliv velikosti, nabídnul výpočetní metody pro její praktické použití a tím umožnil použití této teorie v praxi.

Kromě vlivu velikosti přišel i s řadou dalších originálních myšlenek. Mostářům je nejvíce znám Bažantův model pro výpočet dotvarování betonu, který se v praxi velmi rozšířil. Materiálový model „microplane“ je univerzálním nástrojem pro popis chování heterogenních materiálů. Známá je i Bažantova metoda pásu trhlin, která je základem většiny programů pro výpočet trhlin v betonových konstrukcích.

Většina těchto myšlenek je dovezena do praktické formy a je široce využívána ve Spojených státech i v mezinárodním měřítku.

### Životopisná data Zdeňka P. Bažanta

- narozen 10. 12. 1937 v Praze
- 1955 maturita na dejvickém gymnáziu v Praze
- 1955–1960 studium na Fakultě stavební ČVUT v Praze
- 1961–1963 pracoval jako mistr inženýr v Dopravoprojektu a v podniku Stavby silnic a železnic v Praze
- 1963 kandidátem věd v technické mechanice

- 1964–1967 výzkumníkem ve Stavebním (nyní Kloknerově) ústavu ČVUT a externě přednášel na ČVUT
- 1967 docent v betonových konstrukcích
- 1966–1967 francouzské státní stipendium ASTEF v CEBTP (Centre d'Etudes du Batiment et des Travaux Publiques) v Paříži
- 1967–1968 stipendium Fordovy nadace, University of Toronto
- 1968–1969 hostujícím výzkumníkem na University of California, Berkeley
- od r. 1969 na Northwestern University poblíž Chicaga
- od r. 1973 řádným profesorem
- 1974–1979 koordinátorem výuky stavebních konstrukcí
- 1976 získal americké státní občanství
- 1981–1987 ředitel výzkumného centra (Center for Concrete and Geomaterials), tento ústav byl předchůdcem dnešního známého Center for Advanced Cement Based Materials
- od r. 1990 obdržel prestižní profesorskou stolicí W. P. Murphyho, jeho profesura rozšířena na vědu o materiálu
- od r. 2002 drží křeslo McCormick Professor
- 1997 čestný doktorát na německé univerzitě Karlsruhe
- 1998 členem akademie inženýrství ČR
- 2000 členem Rakouské akademie věd
- 2000 čestný doktorát University of Colorado, USA
- 2001 čestný doktorát na italské Politecnico di Milano
- 2002 členem italské Academia di scienze e lettere

#### Významná ocenění prof. Bažanta

- 1991 čestný doktorát na ČVUT v Praze
- 1996 zvolen členem Národní akademie inženýrství USA

-red-

(na článku bylo využito materiálů od p. prof. Bažanta a čas. Beton 5/2002)

## Vzpomínky na čtyři desetiletí boje a pokroku v modelování poškození a vlivu velikosti

Před čtyřmi desetiletími, když jsem začínal jako mostní inženýr v Praze, modely materiálů a výpočetní metody konstrukcí z betonu, stejně jako hornin, ledu, vláknových kompozitů a dalších materiálů, které nyní nazýváme kvazi-křehké, byly z dnešního pohledu primitivní. Vytvářící se poškození způsobené rozvojem trhlin bylo buď přehlíženo nebo chybně považováno za plasticitu. Vliv velikosti na pevnost a přetvárnost konstrukcí zhotovených z těchto materiálů buďto nebyl znám nebo nebyl brán v úvahu. Když už byla jeho existence připuštěna, byl chápán výhradně statisticky, jako vliv patřící do součinitele bezpečnosti.

S nástupem počítačů a metody konečných prvků se však vše změnilo. Realističtější modelování materiálů se stalo najednou možné a potřebné. V lednu 1969 jsem přijel na pozvání Borise Breslera na kalifornskou universitu v Berkeley, kde výzkum konstrukčního inženýrství byl v té době světovou špičkou. Jak jsem brzy poznal, všichni zde byli v zajetí metody konečných prvků. Protože jsem byl velmi zaujat porušováním beto-

nu a laminátů díky mému předchozímu studijnímu pobytu u L'Hermitte, mého mentora v Paříži, a mému výzkumu v Kloknerově ústavu, byl jsem přímo fascinován Rashidovou myšlenkou simulovat rozvoj trhlin v kontejnmentu jaderného reaktoru prostřednictvím metody konečných prvků pomocí vztahu napětí-přetvoření.

Ukázalo se však, že nadšení vládnoucí v Davis Hall (Fakulta konstrukcí) nebylo sdíleno přes ulici v Etcherry Hall (Fakulta strojní), kde analytické metody kralovaly. Myslím, že jsem byl jediný z Davis Hall, kdo se zúčastňoval seminářů v osobitěm světě Ústavu mechaniky. Profesor Naghdi, vedoucí ústavu a v tom čase guru mechaniky kontinua se mě jednou otázel: „Mimochodem, co vás zajímá?“ „Změkčení materiálu (použito v dalším textu pro „strain-softening“) pro modelování trhlin v betonu a horninách,“ odvětil jsem. V lehké sarkastickém tónu pravil: „Mladý muži, pokud se budete zabývat takovou kontroverzní otázkou, nikam to nedotáhnete a definitivu (anglicky „tenure“) nezískáte. Tenzor tangenciálních modulů, jejichž matice není

pozitivně definitní, to nemá smyslu. Materiály s takovými vlastnostmi neexistují. Byly by nestabilní a nemohly by se v nich šířit vlny.“ Brzy jsem si uvědomil, že Prager a další giganti mechaniky kontinua smýšleli podobně a že jsou zde klasické práce počínaje Hadamardem podporující tento názor. Tak jsem se rozhodl hrát to opatrně a zaměřil jsem své úsilí v Berkeley na termodynamiku dotvarování a roli vody v nanopórech v betonu, další velký problém betonových obálek a nádob jaderných reaktorů.

Na fakultě v Northwestern University, kam jsem přešel z Berkeley, nebyly hlavním tématem výzkumu konečné prvky, ale lomová mechanika. Tak jsem se v tomto oboru začal vzdělávat. V roce 1972, když jsem listoval v naší knihovně, mě zaujal článek v Indian Concrete Journal od P. F. Walshe, mně neznámého mladého Australana, který popisoval zajímavé experimenty lámání betonových trámů s vruby. Velice jasně se na nich projevoval vliv velikosti na průměrnou pevnost. Nevyhovoval však mocninovému zákonu, a tím byl v konfliktu s tehdy neotřesitel-

nou Weibullovou statistickou teorií (jejíž myšlenka je, že čím je konstrukce větší, tím je větší pravděpodobnost v ní najít bod dané velmi malé lokální pevnosti). Pozorovaný vliv velikosti byl příliš silný, aby se dal vysvětlit touto teorií. Bylo jasné, že křehké heterogenní materiály volají po jiné teorii objasňující vliv velikosti.

Pracovat na Northwestern ve vynikající skupině mechaniky tuhých těles, mladé, soutěživé, ale kooperativní, měl pro mne ohromný přínos. Skupina zahrnovala odborníky z několika ústavů. Scházeli jsme se v pátek na seminářích mechaniky, na které navazovaly večírky končící pozdě v noci. Na jednom památném semináři s provokativním názvem „Rudý herinek a ryba obecná v mechanice kontinua“ (který skutečně přitáhl nějaké biology) Ronald Rivlin zesměšnil některé tehdy neotřesitelné principy mechaniky kontinua, například princip „všudypřítomnosti“. Tehdy jsem si dodal odvalu k prolomení tabu a ponořil se do nebezpečné oblasti změkčení materiálu (být v té době ještě za železnou oponou, bylo by všechno jinak, protože všemocná komise Akademie zakázala plýtvat zdroji socialismu na takový výzkum odporující přijatým zákonům). Kromě toho jsem si též uvědomil, že fyzikové se podobných modelů nebáli (příklady jsou klasická van der Waalsova změna fáze v diagramu závislosti tlaku na objemu páry nebo kolaps neutronové hvězdy).

Na Northwestern přišel mladý a již proslavený Jim Rice a jeho nadšené semináře otevíraly oči. Upoutala mne jeho myšlenka (rozvinutá jeho studentem Johnem Rudnickim, který se stal později mým kolegou), že příčinou lokalizace plastických smykových přetvoření ve smykových pásech je geometricky nelineární účinek konečných deformací a dále jeho a Andrew Palmera použití mechaniky lomu pro skluz svahů konzolidovaných jílu. Uvědomil jsem si, že nepružné přetvoření má tendenci se lokalizovat a že by to mělo být určováno jakousi konstantou reprezentující charakte-

ristickou délkou. Kolem roku 1975, ve snaze řešit nestabilitu materiálu pomocí přístupu založeném na převrtárné práci druhého řádu, částečně inspirovaného prací Giulio Maiera z Milána, jsem si uvědomil, že model rozetřených trhlin má smysl pouze tehdy, když je jeho oblast omezena na poměrně úzký pás, jehož tloušťka je materiálovou vlastností, nazývanou charakteristická délka.

Šťastnou náhodou mě v roce 1974 Stan Fistedis vyzval k předložení výzkumného záměru na problém porušení betonových obálek jaderných reaktorů způsobené různými hypotetickými scénáři nukleární nehody. Přijetím návrhu začala moje dlouhodobá spolupráce s Argonne National Laboratory. „Jak máme extrapolovat z normálního vzorku běžného rozměru zkoušeného v laboratoři na tyto velmi velké a politicky velmi citlivé konstrukce?“, ptal se mě Stan. Bylo třeba vzít nějak realisticky v úvahu oblasti trhlin. Proto bylo nevyhnutelné uvážit vliv tahového změkčení. To pak logicky vedlo k deterministicky formulovanému vlivu velikosti.<sup>2</sup>

V roce 1976 Arne Hillerborg ze Švédska vedl svým neokázalým způsobem památný seminář na Northwestern, ve kterém prezentoval svůj model fiktivní (či kohezni) trhliny pro beton. Arne ukázal, že pro křehké materiály jako beton lze užít model kohezni trhliny nejen pro šíření existující trhliny, ale také vznik nové trhliny kdekoli v materiálu. Pomocí konečných prvků ukázal, že i bez náhodné pevnosti může popsat vliv velikosti na ohybovou pevnost v souladu s experimenty. Poté, během večere ve známé Café Provençal, jsme polemizovali o vzájemných aspektech jeho modelu a modelu pásu trhlin.

Zpětně se naše polemika jeví jako zbytečná, protože se oba modely ukázaly jako téměř rovnocenné, dávající přibližně stejné výsledky. Volba mezi nimi je věcí vhodnosti. Model kohezivní trhliny je vhodný pro pružné řešení ve spojení s konceptem lineárně pružné lomové mechaniky, zatímco model pásu trhlin je

vhodnější pro implementaci do existujících programů užívajících konečné prvky a zároveň umožňuje simulovat velké nelokalizované oblasti vzniku a rozvoje trhlin stabilizované, např. výztuží.

Nevyhnutelným závěrem stabilitních a bifurkačních studií materiálových modelů se změkčením bylo, že počítačová řešení konečnými prvky, které se v praxi velmi rozšířily během sedmdesátých let, jsou neobjektivní vzhledem k citlivosti na hustotu sítě prvků. Při zjemňování sítě k nulové velikosti by takováto analýza vedla ke vzniku poškození za nulové spotřeby energie, což by bylo nesmyslné. Toto se však ukázalo být citlivou kritikou, vedoucí k opozici v řadách konstrukčních inženýrů – praktiků. Taková byla situace, např. na konferencích reaktorové technologie (SMiRT) v Londýně, San Francisku, Berlíně a Paříži a na řadě mítinků ASCE. Na jednom z nich, ve Waterloo, jsem potkal Luigi Cedolina, který se mnou souhlasil. V roce 1977 přijel na sabbatical do Evanstonu, aby mi pomohl formulovat a ověřovat první model pásu trhlin založený na energii. Následně byl tento model s hodnotnou pomocí Byunga Oha rozšířen na materiálový model poškození s progresivním změkčením. S pomocí řady dalších spolupracovníků (P. Bhat, S. S. Kim, T. Tsubaki, J. C. Chern, T. P. Chang, F. B. Lin) byla plasticita zobecněna pro změkčování a byl formulován mikro-ploškový (microplane) model. V poslední době byl tento model dále rozšířen a propracováván (zvláště Červenkovými a Liborem Jendelem) až k jeho současné formě. Koncepcionálně byla lokalizace objasněna řešením podmínek stability rovnoběžných trhlin při vysychání nebo náhlém ochlazení skály studovaném s H. Ohtsubo z Tokijské univerzity pro účel tehdy zamýšleného čerpání geotermální energie ze suché horké skály ve velké hloubce.

Model pásu trhlin však nebyl odborníky na mechaniku kontinua považován za univerzální lék. Na konferencích teoretiků se objevovala řada námitek. Např. na NSF Workshopu ve Stone Mountain r. 1982 Ivan

Sandler namítal: „Jestliže tvůj model pásu trhlin nedovoluje zjemňovat velikost prvku k nule, jak definuješ konvergenci?“ Na příštím workshopu v General Butler Park, Valanis, Hegemier, Read a Leckie namítali: „Jak se vyrovnáš s tím, že okrajová úloha bude tak jako tak špatně podmíněna (ill-conditioned) kvůli přechodu mezi eliptickou a hyperbolickou formou diferenciální rovnice?“ Bylo zřejmé, že okrajová úloha musí být nějak regularizována. Možnou nápravu jsem probíral se svým přítelem, ale také rivalem, Tedem Belytschko. Naše spolupráce vedla ke konceptu silně nelokálního modelu změkčení (a přidruženého slabě nelokálního gradientního modelu), v němž byl vypůjčen dřívější nelokální koncept Krönera a Eringenova pro pružnost a tvrdnoucí plasticitu. Ten původní koncept z r. 1984 (zvaný „imbricate“) však byl doprovázen řadou numerických problémů v programování a v periodických nestabilitách nulové energie. Náprava však přišla brzy (r. 1987), a to s pomocí mého francouzského asistenta Gilles Pijaudier-Cabot, který si plnil vojenskou službu formou doktorského studia u mě. O jeho výsledcích jsem musel pravidelně informovat francouzského plukovníka a výsledky byly výborné. V roce 1986 Gilles přikvačil do mé úřadovny a jasnou zvěř vykřikl: „Proč neuvažovat nelokálně pouze nepružná přetvoření?“ – A to se prokázalo jako ta správná cesta (ačkoliv podle poslední práce de Luzio na Northwestern v r. 2001 kombinace s nelokálním totálním přetvořením je v určité formě efektivnější).

Deterministický zákon vlivu velikosti na (statisticky střední) pevnost kvazi-křehké konstrukce je vysvětlen tím, že před porušením musí stabilně vyrůst buď velká trhlinka nebo velká zóna mikrotrhlinek způsobující přesuny napětí, která vedou k uvolnění energie jež vzrůstá s velikostí konstrukce rychleji (asymptoticky v kvadrátu) než energie rozptýlená lomem (vzrůstající lineárně). Tento zákon, formulovaný analyticky v roce 1983, se z počátku obhajoval obtížně, dokonce i doma. Na-

příklad jednou, po mém semináři, můj kolega a přítel Toshio Mura sarkasticky namítal: „Zdeňku, nejenom je tvůj zákon vlivu velikosti příliš jednoduchý, aby byl obecně pravdivý, ale tvoje odvození není dostatečně důsledné!“ To se těžko vyvracelo. Proto se můj tým schopných spolupracovníků věnoval pečlivému prověření tohoto zákona pomocí numerických simulací s použitím metody pásu trhlin, nelokálních konečných prvků, mikromechanických modelů (mříže náhodných částic) a též systematickému experimentálnímu ověření. Můj student M. T. Kazemi mi pomohl odvodit vztah koeficientů v zákonu vlivu velikosti k funkcím uvolnění energie známým z mechaniky lomu, což umožnilo snadno určit lomovou energii pouze měřením pevnosti (tj. maximální síly) vzorků různých velikostí a tvarů, což je mnohem jednodušší nežli měření při klesajícím zatížení během porušení (post-peak), potud pro experimentální stanovení lomové energie nezbytné. Tato myšlenka byla dále rozvíjena ve spolupráci s vynikajícími španělskými výzkumníky Jaime Planasem a Manuelem Elicesem (s využitím dolarových fondů z pronájmu amerických leteckých základen, které bylo nutno utratit ve Španělsku). Tato spolupráce a práce mých studentů Phila Pfeiffera a Ravindra Getty, vedly k ověření vlivů teploty, vlhkosti, rychlosti zatěžování, cyklické únavy, atd., na lomové vlastnosti ve zkouškách vlivu velikosti a k přímému měření počátečního sklonu kohezivní křivky (a křivky změkčování v modelu pásu trhlin) pouze na základě měření maximálních zatížení. Ukázalo se, že k výpočtu maximální únosnosti konstrukcí postačuje znát jen tento sklon, zatímco dlouhý ocas té změkčující kohezivní křivky není třeba znát.

Na teoretickém poli jsme se pokoušeli odvodit zákon velikosti s pomocí asymptoty kohezivní trhliny a asymptotického propojení (asymptotic matching) mezi ekvivalentní lineární lomovou mechanikou a plasticitou, z nichž ta první představuje asymptotické chování pro nekoneč-

nou velikost a ta druhá pro nulovou velikost kvazi-křehké konstrukce. To přineslo výsledky. Byly vyjasněny meze použitelnosti zákona vlivu velikosti při rozmanitých způsobech porušení ve smyku a tlaku v betonu, v hlubokých skalních vrtech a štolách, v horninách, při vzniku sněhových lavin, skluzu svahu a tlaku ledu na pilíře a na mořské naftové věže.

„Vliv velikosti nemůže být čistě deterministický. Protože materiál má náhodnou mikrostrukturu, musí obsahovat i komponent, který je statistický a tento komponent by měl být klasického Weibulova typu.“ To byl další druh kritiky, se kterým jsem se setkal na pravděpodobnostních konferencích ASCE a ICOSAR. Tuto otázku mi během devadesátých let pomohli vyjasnit napřed Yunping Xi a poté Drahoš Novák pro oba typy porušení, jak při růstu velkých trhlin, typických pro železobeton, tak při vzniku šíření trhlin bez přítomnosti vrubu (jako v klenbových přehradách, v nevytuzených nosnících, v ledových deskách a ve skalních vrstvách). Ten druhý případ vedl k energeticko-statistické formulaci vlivu velikosti, která byla potvrzena využitím předchozích zkoušek Rokuga v Gifu, Koide v Sendai, a Rocco v Madridu.

Počítačová řešení byla od počátku hlavním účelem. Bylo pro mě významné přispět k prvním workshopům na toto téma pro beton organizovaných Luigi Cedolinem r. 1978 v Milanu a Herbertem Mangem dva roky poté ve Vídni. Prvotní výpočtové modely rozetřených trhlin pro kvazi-křehké porušení a vliv velikosti byly značně vylepšeny v devadesátých letech, například pracemi Jiráskova v Lausanne ve Vídni, Rots v Delftu a Červenkovými v Praze, kteří vyvinuli úspěšné komerční programy založené na modelu pásu trhlin (DIANA, SBETA, ATENA). Jiné praktické řešení, navržené Leroyem a Ortizem a rozpracované Belytschkem, Fishem, Jiráskem a dalšími, bylo zavedení nespojitosti (diskontinuit) do konečných prvků, a převedení problému de Bostem a Peerlingsem v Delft gradientní

podoby pomocí Helmholtzovy diferenciální rovnice. Nelokální modely s dostatečně jemnou sítí se ukázaly nejlepší pro předpověď směru šíření trhlin.

„Má tvůj nelokální model solidní fyzikální bázi v mikrostruktuře?“, byla jiná těžká otázka předhozená dávno kolegou Toshio Murou. Tehdy jsem neměl dobrou odpověď, ale kolem r. 1990 se ukázalo, že nelokalitu lze logicky odvodit (za určitých zjednodušení) z uvolnění energie diskrétními mikrotrhlinkami a jejich interakcí. Tento přístup zároveň ukázal potřebu zobecnění pro určité případy, které rozlišuje vzájemné stínění a amplifikace sousedních mikrotrhlin a závislost na jejich orientaci, což mi pomohli rozpracovat Jirásek a Ozbolt. Numericky, fyzikální zdůvodnění nelokality a vlivu velikosti bylo získáno pomocí modelu náhodně rozdělených mikrotrhlin a mřížkových modelů v pracích Zubelewicze, Tabbary, Jiráska a Cusatisse. Podrobnější studie jsou však stále zapotřebí.

Alternativní přístup se objevil v modelech porušení kontinua, jež navrhli Kacanov a Lemaitre. Avšak problém těchto elegantních a módních modelů byl, že lokalizace poškození byla ignorována. V oboru betonu jsem se udivoval: „Není třeba v těchto modelech zavést také charakteristickou délku?“ Samozřejmě je a modely tohoto typu vyvinuté Pijaudier-Cabot na Northwestem a Mazars v Paříži splnily tuto zásadní podmínku.

V rámci úsilí o co největší konceptní jednoduchost a vystižení fyzikálních jevů jako je rozevření trhlin a smykový pokluz s třením v mikrostruktuře byl postupně formulován mikroploškový konstitutivní zákon (anglicky „microplane“) inspirovaný velkým G. I. Taylorem v r. 1938. Jeho vývoj probíhal na Northwestem ve spolupráci s Ohem, Pratem, Carolem, Jiráskem, Canerem, Broccou a dalšími. Čím to, že „microplane“ tak jednoduše vystihuje fyzikální jevy porušování? Je to ve formulaci, která není založena na tenzorech napětí a poměrných přetvořeních, ale na vektorech působících na kinema-

ticky podmíněných rovinách (mikroploškách) všech možných orientací. Častou námitkou bývalo: „Nejsou na překážku nadměrné výpočetní nároky?“ Dnes nikoliv, a to díky neuvěřitelnému růstu výkonnosti počítačů. Ve WES, Vicksburg (armádní laboratoř), Adley a Akers provádějí dnes simulace nárazu a průniku projektilu do betonu a hornin s pomocí explicitního programu konečných prvků s konstitutivním modelem „microplane“ v úlohách s několika miliony konečných prvků. Tento model byl rozpracován také pro porézní skálu, písčité a jílovité zeminy, komposity, tuhé pěny a slitiny s pamětí tvaru (shape memory).

Problematické zůstává, jak vzít v úvahu deterministický vliv velikosti v projekčních normách. Je zapotřebí dokumentovat a kalibrovat tento jev zkouškami modelů skutečných konstrukcí, pokud možno nepříliš zmenšených. Největší zkoušky byly provedeny v Japonsku firmami Shimizu a Kajima, které neváhaly vynaložit miliony dolarů na zkoušky smykového porušení betonových nosníků a desek enormních rozměrů (36m a 20m). Díky tomu a též úsilí Okamury se Japonsko stalo koncem 80. let první zemí, která zahrnuje vliv velikosti do norem pro navrhování železobetonových konstrukcí. Bohužel však interpretace zkoušek byla zpochybněna odchylkami od zákona podobnosti a formulace v normě byla tehdy založena na klasické statistické teorii, která, jak se později ukázalo, pro kvazi-křehké materiály neplatí. Revize je tudíž zapotřebí. Ačkoliv v Americe (v důsledku požadavku pro všeobecný souhlas praktiků) jsme zatím pozadu v tom, že vliv velikosti v normě železobetonu nemáme, jsme lepší tím, že v tomto ohledu v normě dosud nemáme nic nesprávného. Také u nás použití normy je dobrovolné a speciální běžné konstrukce často posuzuje konzultant podle posledních teorií.

Pro betonové normy bude eventuálně zapotřebí zavést vliv velikosti pro mnoho typů porušení – vedle smyku nosníků, také propichování desek, kroucení, vytažení výztuže

a kotev, ovinované styky výztuže a tlakové drčení sloupů (jež se mnou v naší laboratoři zkoušeli na zmenšených modelech Sener z Ankary a Lee z Koreje, Desmorat z Paříže a Thoma z Mnichova). Jan Vítek přišel z Prahy pomoci mi vyřešit mocný vliv velikosti ve spřažených nosnících, v nichž spodní ocelový nebo betonový nosník je spřažen s horní betonovou deskou smykovými hmoždíky. U velkého nosníku, na rozdíl od malého, se hmoždíky neporuší současně, ale jejich porušení se šíří od jednoho k druhému, což globálně působí jako šíření velké smykové trhliny mezi deskou a nosníkem. Když se pro velký nosník použijí větší hmoždíky, vytažení každého z nich z betonu také podléhá vlivu velikosti (neboť je to křehký jev), takže vliv velikosti vlastně existuje současně na dvou úrovních, a tudíž může být ještě silnější než v případě jednoduchých trhlin.

Historie katastrof ukazuje, že nebezpečí protržení velkých přehrad na vodních tocích je závažný problém. V letech 1990–94 pořádali Wittman, Saouma a Mazars sérii workshopů na toto téma v Luganu, Boulderu a Chambéry. Někteří projektanti přehrad namítali: „Proč se máme zabývat lomovou mechanikou? Vždyť to děláme bezpečně, neboť konzervativně předpokládáme, že beton nemůže přenášet tahová napětí, takže si vystačíme s plasticitou bez lomové mechaniky.“ Potřeba lomové analýzy byla u přehrad nicméně prokázána. Mají na tom zásluhu hlavně práce o nelokálních a kohezivních konečných prvcích Milana Jiráska v Lausanne, a také studie Wittmana, Brühwillera a Saoumy v Lausanne a Boulderu, a skupina Elicese v Madridu. Díky Saoumovi se Spojené státy staly první zemí, kde zhodnocení bezpečnosti přehrad musí být podle normových předpisů založeno na mechanice lomu, v níž je vliv velikosti zahrnut automaticky.

Rozšířit zákon deterministického vlivu velikosti z betonu na horniny, led, komposity, lamináty, atd. byl další boj. Podobně jako v oboru betonu, věřilo se do konce 80. let, že

nelineární mechaniku lomu a analýzu lokalizace poškození. Jen tak lze logicky extrapolovat laboratorní měření na mnohem větší konstrukce v praxi, pro něž kontrolované zkoušky porušení neexistují (s vzácnými výjimkami ojedinělých, nesmírně drahých, zkoušek několika jen mírně velkých nosníků, nedostatečně odpovídajících zákonům podobnosti).

Dlouho se vedly debaty o přesunu ohybových momentů ve staticky neurčitých nosnicích a rámech. Dovolená míra přesunu je omezena, kdy se tzv. plastické klouby změkčují kvůli tlakovému porušování betonu. Jak jsme nedávno ukázali s mým asistentem Guo, nevyhnutelně to též vede k vlivu velikosti, ale jiného typu. V malé konstrukci se různé plastické klouby změkčují současně, zatímco ve velké se změkčují popořadě, jeden po druhém.

Z pravděpodobnostního hlediska se jeví nový problém. Na základě statistických dat, současný stupeň bezpečnosti pro vlastní váhu velké konstrukce, rozdílný od součinitelů zatížení, je hodně přehnaný. V Americe je 1,4, zatímco statisticky nelze zdůvodnit více než 1,03 až 1,05. Protože vlastní váha velkých konstrukcí tvoří mnohem větší část vnitřních sil než je tomu u malých konstrukcí, nadhodnocený stupeň bezpečnosti v sobě skrývá vliv velikosti, který může být až 40%. Tento skrytý vliv velikosti kompenzuje to, že na druhé straně vliv velikosti chybí v pravidlech založených na mezních stavech. Kompenzuje však jen částečně a iracionálně, v mnohých případech nedostatečně a v jiných přehnaně. K prevenci určitých typů porušení (např. u ohybového porušení způsobeného tečením výtzuže) žádná kompenzace není potřeba, neboť vliv velikosti neexistuje, zatímco pro jiné typy, např. smykové porušení velmi velkých nosníků (nebo všechny případy tlakového porušení v příhradovém, neboli „strut-and-tie“, modelu pro beton), by bylo třeba mnohem větší kompenzace (i přes 100%). Pro konstrukce z vysokopevnostních beto-

nů nebo předpjatých, které jsou lehčí, je kompenzace vlivu velikosti skrytá v přehnaném součiniteli vlastní váhy menší, než je tomu u konstrukcí z běžného betonu nebo nepředpjatých, přestože vliv velikosti je u nich vzhledem k vyšší křehkosti mnohem výraznější. Prostě schování vlivu velikosti do součinitele bezpečnosti pro vlastní váhu není dobrá myšlenka.

Na pražském kongresu *fib* v roce 1999 se mě jeden inženýr pochybovačně zeptal, zda vliv velikosti někdy způsobil havárii konstrukce. Ano, způsobil, ale obvykle to nebyla jediná příčina. Vlivy velikosti (pohybující se od 25% do 55%) pravděpodobně významně přispěly k mnoha známým katastrofám, např. zřícení přehrady Malpasset v Alpách (1959), pře-hrady St. Francis v Kalifornii (1928), mostu Schoharie Creek v New Yorku (1987), norské mořské těžní ná-tové věže Sleipner (1991), viaduktu Han-Shin a Cypress při zemětřese-ních v Kóbe (1995) a Oaklandu (1989), a pilíře mostu při zemětřesení v Los Angeles (1994). Proč však vliv velikosti nebyl, s výjimkou mostu Schoharie, uveden ve zprávách vyšetřova-cích komisí?<sup>3</sup> Důvod je v tom, že na rozdíl od aeronautiky, ve stavebním inženýrství jsou zjevně i skryté bezpečnostní součinitele velmi vysoké. Identifikace příčin je ztížena tím, že musí dojít k souhře několika chyb, aby ke zřícení došlo, zatímco jedna chyba obvykle způsobí pád letadla.

Nakonec se vrátím ke statistikám chyb vlastní váhy. Měli bychom přijmout návrhy na snížení součinitele vlastní váhy? Jakožto jedinou změnu, nikdy. Taková redukce by byla nebezpečná, pokud by vliv velikosti nebyl současně zahrnut do normy a do výpočtu v projektu. Obráceně je třeba připustit, že zavedení vlivu velikosti do normy a návrhu konstrukce bez současného zavedení realistického součinitele bezpečnosti pro vlastní váhu nemá velký význam. Podobně, přesný výpočet konstrukce metodou konečných prvků metodami zahrnujícími vliv velikosti má málo smyslu, je-li nato použit

nepřiměřený součinitel vlastní váhy předepsaný normou. Zdá se, že s takovým iracionálním součinitelem je jednoduchý výpočet často dostatečující.

Počítačový nadšenec mi navrhol: „Proč neignorujete součinitele bezpečnosti v normách a nepoužíváte stochastické konečné prvky?“ To je lákavé doporučení, ale v současnosti neuskutečnitelné. Existující formulace stochastických konečných prvků, v jejich současném stavu, nedokáží předpovědět zatížení pro extrémně malou pravděpodobnost poruchy (která by měla být zhruba 1 z 10 milionů). Jsou schopné správně předpovědět zatížení s pravděpodobností poruchy větší než jenom asi 5%, protože pravděpodobnostní struktura těchto metod není správná pro vzdálený ocas náhodného rozdělení únosnosti. Je zřejmé, že k vyřešení tohoto přístupu bude třeba spojené úsilí odborníků z oblasti mechaniky lomu, počítačových metod a spolehlivosti konstrukcí.

Bitva ještě zdaleka není u konce, ale dosažený pokrok již stojí za to.

Zdeněk P. Bažant

#### (Footnotes)

<sup>1</sup> Přepřacovaný a rozšířený překlad z originálu uveřejněném v *JCI Concrete Journal* 40 (2), 16–28, 2002, číslo článku pozvaných ke 100. výročí Japan Concrete Institute (JCI). Zkrácená verze zaměřená na beton, přeložená Janou Margoldovou a Vladimírem Červenkou, byla publikována v časopise *Beton*, č. 5, 2002, str. 54–57.

<sup>2</sup> Je vhodné vysvětlit, že vliv velikosti se projevuje závislostí tzv. nominálního napětí na charakteristickém rozměru konstrukce, když se uvažují konstrukce geometricky podobné. Lze matematicky obecně dokázat, že podle klasických teorií pružnosti a plasticity se podobné konstrukce různých velikostí porušují při stejném nominálním napětí, což znamená, že není žádný vliv velikosti. V mechanice poškození a mechanice lomu to tak není, pro-

čez termín „vliv velikosti“. Výjimkou je případ, kdy jediná zanedbatelně malá trhlinka dokáže způsobit náhlé porušení celé konstrukce. To je případ únavy křehkých kovů, pro něž teorie pružnosti s mezním napětím tudíž platí a jediný možný vliv velikosti je statistický, pocházející

z náhodnosti trhlinek. Cílem vývoje nových materiálů, např. transformačního zhouževnatění keramik, je dosáhnout, aby porušení nenastalo dříve než vyroste velká trhlinka nebo velké pole mikrotrhlinek, což však pracuje jen pro konstrukce a součásti dostatečně malé.

<sup>3</sup> Přestože jsem byl pozván det Norske Veritas jako konzultant na vyšetřování Sleipner, evropská komise mé dobrozdání, že vliv velikosti tloušťky desky 'tricell' tam musel být značný, do své zprávy nezahrnula. Proč?

## FAKULTA STROJNÍ

### MACH, METAL, FINET 2003 s prezentací nových technologií

Pro urychlení rozvoje všech odvětví průmyslu je třeba hledat stále nové informace o technologiích a materiálech. Technologické informace jsou nejcennějším zbožím na trhu vědění. Jednou z nejdůležitějších forem, jak tyto informace získávat a účinně předávat, jsou osobní jednání mezi nositeli těchto informací. Těmi jsou v první řadě všichni ti, kteří přímo působí ve výrobní sféře a mohou tak své poznatky z oblasti teorie doplňovat o praktické zkušenosti.

V poslední době, kdy vzniká řada nových firem s různými obory činnosti, je stále těžší najít vhodnou formu, jak firmu v konkurenčním prostředí co nejefektivněji propagovat.

Mnoho podniků zvolilo cestu přírodních osobních jednání s klientem. Aby tato jednání byla dostatečně účinná, je třeba, aby byl klient zkontaktován i několikrát během jednoho roku, což je časově velmi náročné. Vhodným způsobem, jak osobně oslovit své stálé zákazníky a získat zákazníky nové, je účast na specializovaných akcích, kam směřují především odborníci se zájmem o daný obor.

Takovouto akcí bude bezesporu i tzv. technické trojveletrží MACH – 2. veletrh strojírenských technologií, METAL – 11. veletrh metalurgie a FINET – 2. veletrh povrchových úprav, finálních technologií a obalové techniky. Tyto tři samostatné odborné veletrhy pořádá veletržní správa TERINVEST od 13. do 15. května 2003 v Pražském veletržním areálu Letňany.

Záměrem veletržní správy je vytvořit odpovídající prostor pro poznání a rozvoj strojírenských technologií ve vazbě na materiály a možnosti jejich zpracování. V souladu s obdobnými trendy v zahraničí jde o pořádání veletrhů s odborným zaměřením na progresivní technologie a materiály v jednotlivých oborech průmyslu. Jelikož právě Praha je centrem poměrně velkého, technicky vyspělého regionu, stává se tak důstojným místem pro prezentaci technologické vyspělosti našich firem.

Veletrhy MACH, METAL a FINET chtějí navázat na tradiční pražské průmyslové výstavní akce a dále tak napomáhat rozvoji jednotlivých odvětví průmyslu.

Nově, reprezentativně upravené výstavní prostory Pražského veletržního areálu Letňany splňují potřebné parametry pro konání technických veletrhů. Jde především o dostatek výstavních prostor s pevnými vysoce únosnými podlahami s rozvodnými kanálky, dostatek parkovacích míst přímo v areálu výstaviště a konferenčních prostor s možností širokého využití. Neméně důležitou roli hraje také dobrá dostupnost areálu z centra města. Toto vše přispívá ke spokojenosti jak vystavovatelů, tak i návštěvníků.

Zájem přihlášených firem i odborných organizací a institucí, které podpořily veletrhy udělením svých záštít a garancí, dokazuje, že souběžné konání těchto tří odborných veletrhů bylo zvoleno správně.

Věříme, že i doprovodné akce, které veletrhy po odborné stránce doplňují, budou zajímavým zpestřením pro všechny účastníky a že se letos v květnu otevrou v Letňanech nejen brány veletrhů, ale rovněž nové cesty pro úspěšný rozvoj firem a celého našeho průmyslu.

### Fakulta strojní na prahu kulatého výročí

7. dubna 2003 se v kongresovém středisku Fakulty strojní konala tisková konference k zahájení příprav k oslavám 140 let výuky strojírenského inženýrství na Fakultě strojní Českého vysokého učení technického v Praze.

Jako první představil Fakultu strojní její děkan prof. Ing. Petr Zuna, CSc. Mimo jiné uvedl: „Současným cílem fakulty je špičkové pedagogicko-vědecké české pracoviště uznávané doma i v zahraničí. Modernizace a aktualizace studia je vede-

na tak, aby studium bylo jak atraktivní pro studenty, tak aby současně odpovídalo potřebám společnosti. Podstatné změny v systému studia prohloubily nejen vysokoškolský charakter výuky, ale spolu se zavedením rozsáhlé možnosti indi-