

VZPOMÍNKY NA ČTYŘI DESETILETÍ ÚSILÍ O POKROK V MODELOVÁNÍ POŠKOZENÍ A VLIVU VELIKOSTI

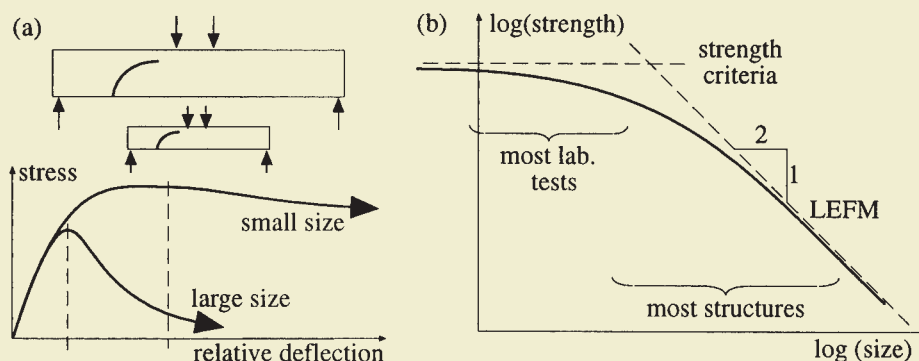
ZDENĚK P. BAŽANT

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 velmi jednoduché. Vyvíjející 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 a býval tudíž zahrnutý mezi součinitele bezpečnosti.

S nástupem počítačů a metody konečných prvků se však vše změnilo, celá oblast materiálového modelování se měnila. V lednu 1969 jsem přijel na pozvání Borise Breslera na kalifornskou universitu do Berkley, kde se v té době rozvíjelo centrum konstrukčního inženýrství. Jak jsem brzy poznal, všichni zde byli v zajetí metody konečných prvků. Protože jsem byl velmi zaujat porušováním betonu a laminátů díky mému předchozímu studijnímu pobytu u L'Hermite, mého mentora v Paříži, byl jsem přímo fascinován Rashidovou myšlenkou simulace rozvoje trhlin v konteimentu jaderného reaktoru prostřednictvím metody konečných prvků ze vztahu napětí-přetvoření.

Ukázalo se však, že nadšení vládnoucí v Davis Hall (stavební fakulta) není sdíleno přes ulici v Etcheverry Hall (strojí fakulta). Myslím, že jsem byl jediný z Davis Hall, kdo se zúčastňoval seminářů v osobitěm světě ústavu mechaniky. Profesor Nahdi, vedoucí ústavu a v tom čase guru mechaniky kontinua, se mě jednou otázel: „Mimochodem, co vás zajímá?“ „Změkčení materiálu (v dalším textu použito pro „strain-softening“) pro modelování trhlin v betonu a horninách“ odvětil jsem. V lehce sarkastickém tónu pravil: „Mladý muži, pokud se budete zabývat takovou kontroverzní otázkou, nikam to nedotáhnete. Tenzor tangenciálních modulů, jejichž matice není pozitivně definitní, to nikdo neslyšel. Materiály s takovými vlastnostmi neexistují; byly by nestabilní a nemohlo by se v nich šířit vlnění.“ Brzy jsem si uvědomil, že Prager a další giganti mechaniky kontinua smýšlejí 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 Berkley na termodynamiku dotvarování a vodu v nanoporech v betonu, další velký problém betonových obálek jaderných reaktorů.

Na fakultě v Northwestern University, kam jsem se dostal po odchodu z Berkley, nebyly hlavním tématem výzkumu konečné prvky, ale lomová mechanika. Začal jsem se tedy v tomto oboru



vzdělávat. V roce 1972, když jsem listoval v naší knihovně, mě zaujal článek v Indian Concrete Journal od P. F. Walshe, pro mne neznámého mladého Australana, který popisoval zajímavé experimenty lámání betonových nosníků se zářezem. Velice jasně se na nich projevoval vliv velikosti. Nevycházel však z mocninového zákona, a tím se dostával do konfliktu s neotřesitelnou Weibullovou statistickou teorií. Pozorovaný vliv velikosti byl příliš silný, aby se vysvětloval pouze touto teorií. Bylo jasné, že křehké heterogenní materiály volají po jiné teorii objasňující vliv velikosti.

Pobyt na Northwestern ve vynikající skupině mechaniky, mladé, soutěživé avšak kooperativní, měl pro mne velký přínos. Skupina zahrnovala několik ústavů a 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 zaujal nějaké biology, Ronald Rivlin zsměšnil některé neotřesitelné principy mechaniky kontinua, například princip „všudypřítomnosti“. Tehdy jsem si dodal odvahy 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 by zakázala plýtvat zdroji socialismu na takový výzkum). Kromě toho jsem si uvědomil, že fyzikové se nebáli podobných modelů (např. klasická van der Waalsova změna fáze v diagramu závislosti tlaku a objemu páry).

Na Northwestern přišel Jim Rice a jeho nadšené semináře otvíraly oči. Upoutala mne jeho myšlenka (rozvinul ji jeho student John Rudnicki, který se stal později mým kolegou), že příčinou lokalizace plastických poměrných přetvoření ve smykových pásech je geometricky nelineární účinek konečných deformací, a jeho práce s Andrew Palmerem o vlivu velikosti ve smykových trhlinách konzolidovaných jílu. Uvědomil jsem si, že nepružné přetvoření má tendenci se lokalizovat a že by to mělo být určováno jakousi charakteristickou délkou.

Kolem roku 1975, ve snaze řešit nestabilitu materiálu pomocí přístupu založeného na přetvárné práci druhého řádu a částečně inspirovaná prací Giulio Maiera z Milána, jsem si uvědomil, že model rozetřených trhlin má smysl pouze tehdy, když je jeho oblast omezena na poměrně malý pás a že je materiálovou vlastností, nazývanou charakteristická délka.

Shodou okolností 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 můžeme možné extrapolovat z normálního běžného rozměru prvku zkoušeného v laboratorii na tyto velmi velké a politicky velmi citlivé konstrukce?“ ptal se mě Stan. Bylo třeba vzít nějak realističtější v úvahu oblasti trhlin. Proto bylo nevyhnutelné uvážit vliv tahového změkčení, což dalo vzniknout deterministicky formulovanému vlivu velikosti.

V roce 1976 Arne Hillerborg, svým neokázalým způsobem, vedl památný seminář na Northwestern, ve kterém prezentoval svůj model fiktivní trhliny pro beton. Arne ukázal, že pro křehké materiály jako beton lze užít model kohezivní trhliny nejen pro šíření existující trhliny, ale také vznik trhliny kdekoli v materiálu. Pomocí konečných prvků ukázal, že i bez náhodné pevnosti, může popsat vliv velikosti na ohybovou pevnost v souladu s experimenty. Po té, během večere ve známé Café Provencal, jsme se zájmem polemizovali o vzájemných aspektech jeho modelu a modelu pásu trhlin. Zpětně se tyto argumenty jeví jako zbytečné, protože se oba modely ukázaly jako rovnocenné, dávající stejné výsledky a 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 umožňuje simulovat velké nelokalizované oblasti vzniku a rozvoje trhlin.

Nevyhnutelným závěrem stabilitních a bifurkačních studií materiálových modelů se změkčením ve spojení s konečnými prvky, které se velmi rozšířily během sedmdesátých let, bylo, že jsou neobjektivní vzhledem k citlivosti na hustotu sítě prvků. Při zjemňování sítě k nulové velikosti by analýza vedla ke vzniku poškození za nulové spotřeby energie. To se ukázalo být citlivou záležitostí, vedoucí k opozici v řadách konstrukčních inženýrů - praktiků. Taková byla situace např. na konferencích 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 sabatical 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 byl model dále rozšiřován a podrobně propracováván až k jeho současné formě.

Model pásu trhlin však nebyl odborníky na mechaniku kontinua považován za univerzální lék. Na konferencích se objevovala řada námitek jako např. Ivana Sandlera v roce 1982: „Jestliže váš model pásu trhlin nedovoluje zjemňovat velikost prvku k nule, jak definujete konvergenci? Jaká je souvislost s problémem okrajových podmínek, který bude tak jako tak špatně podmíněn?“ Bylo zřejmé, že okrajová úloha musí být nějak regulá-

zována. Možnou nápravu jsem probíral se svým přítelem, ale také rivalem, Tedem Belytschko. Naše spolupráce vedla k vytvoření nelokálního modelu změkčení, avšak byla doprovázena řadou numerických problémů. Náprava však přišla brzy, a to z Francie – Gilles Pijaudier-Cabot si plnil vojenskou službu formou doktorského studia u mě. O jeho výsledcích jsem musel informovat francouzského plukovníka a výsledky byly výborné. V roce 1986 Gilles navrhl uvažovat nelokálně pouze nepružná přetvoření.

Zákon vlivu velikosti pro konstrukce, v nichž vznikají trhliny před dosažením maximálního zatížení formulovaný v roce 1983, se z počátku velmi obtížně obhájoval, dokonce i doma. Například jednou, po mém semináři, můj kolega a přítel Tosio Mura umírněně namítal: „Zdeňku, tvůj zákon vlivu velikosti je příliš jednoduchý. A tvoje odvození není 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 a též jejich experimentálnímu ověření.

Zákon vlivu velikosti umožnil určit lomovou energii pouze měřením pevnosti vzorků (maximální síly), což je mnohem jednodušší než měření za vrcholem, dosud nutné pro experimentální stanovení lomové energie. Tato myšlenka byla dále rozvíjena ve spolupráci se španělskými výzkumníky Jaime Planasem a Manuelem Elicesem (s využitím fondů z pronájmu amerických leteckých základen, které bylo nutno utratit ve Španělsku) při ověření vlivu velikosti u zkoušek lomových vlastností a dalších vlivů, teploty, vlhkosti, rychlosti zatěžování apod.

Na teoretickém poli jsme se pokoušeli odvodit zákon velikosti s pomocí asymptoty kohezivní trhliny a asymptotického spojení mezi ekvivalentní lineární lomovou mechanikou a plasticitou. To přineslo výsledky. Byly vyjasněny meze použitelnosti zákona při velmi rozmanitých způsobech porušení od smyku a tlaku v betonu, u podzemních vrtů v horninách či při vzniku sněhových lavin.

„Vliv velikosti nemůže být čistě deterministický. Protože materiál je uspořádán náhodně musí obsahovat i komponent, který je statistický, a tento komponent je Weibulova typu.“ To byl další druh kritiky, se kterým jsem se setkal na statistických konferencích ASCE a ICOSSAR. Tuto otázku mi během devadesátých let pomohli vyjasnit Yunping Xi a Drahoš Novák pro oba typy porušení, jak pro růst velkých trhlin, typických pro železobeton, tak při vzniku trhlin u lomových zkoušek. Druhý případ vedl k energeticko-statistické formulaci vlivu velikosti, která byla potvrzena již při předchozích zkouškách Rokuga v Gifu, Koide v Sendai, Rocco v Madridu a dalších.

Prvotní výpočtové modely rozetřených trhlin, kvazi-křehkého porušení a vlivu velikosti, byly značně vylepšeny v devadesátých letech, například práce Jirásky v Lausanne a Manga ve Vídni. Rots v Delftu a Červenkové v Praze vyvinuli úspěšné komerční programy založené na modelu pásu trhlin (DIANA, SBETA, ATENA). Jiné praktické řešení, navržené Leroyem a Ortizem a rozpracované Belytschkem a dalšími, bylo zavedení diskontinuit do konečných prvků.

V rámci úsilí o co největší koncepční jednoduchost a vystižení fyzikálních jevů jako je rozevření trhlin a smykový pokluz v mikrostruktuře byl postupně formulován mikro-ploškový konstitutivní zákon neboli „microplane“ (inspirovaný velkým G. I. Taylorem

v roce 1938). Jeho vývoj probíhal na Northwestern ve spolupráci s Ohem, Pratem, Hasegawou, Crolem, Jiráskem, Canerem a dalšími. Čím to, že „micropplane“ vystihuje fyzikální jevy porušování? Je to ve formulaci, která není založena na tenzorech napětí a poměrných přetvoření, ale na vektorech působících na kinematicky podmíněných rovinách všech možných orientací. Pro tyto roviny byl vytvořen název „micropplanes“. Častou námitkou byla otázka: „Nejsou na překážku nadměrné výpočetní nároky? Nikoliv, díky neuvěřitelnému růstu výkonnosti počítačů. Ve WES, Vicksburg (US armádní laboratoře) provádějí simulace pomocí explicitního programu konečných prvků s konstitutivním modelem „micropplane“ s úlohami o několika milionech konečných prvků.

Problematické zůstává, a zatím vzbudilo malý zájem inženýrské praxe a normotvorných orgánů, vzít v úvahu deterministický vliv velikosti, což je zásadní důsledek modelu pásu trhlín a nelokálního modelu kontinua. Přitom všechny tyto teorie byly důkladně experimentálně prověřeny na Northwestern.

Ovšem nejpřesvědčivější zkoušky byly provedeny v Japonsku. Na americko-japonských workshopech Američany překvapila osvědčenost velkých japonských firem, Shimizu a Kajima, které neváhají vynaložit velké prostředky na zkoušky vlivu velikosti smykového porušení betonových nosníků a desek enormních rozměrů (36 a 20 m). V důsledku těchto zkoušek se Japonsko stalo první zemí, která zahrnuje, díky úsilí Okamury, vliv velikosti do norem pro navrhování železobetonových konstrukcí. Bylo to také Japonsko, kde byla první konference věnovaná výlučně vlivu velikosti – organizovaná Mihashim v Sendai v roce 1993.

Velké přehradý na vodních tocích představují též závažný bezpečnostní problém. V letech 1990 až 94 pořádali Wittman, Saouma a Mazars serii workshopů na toto téma v Luganu, Boulderu a Chambéry. Někteří projektanti přehrad namítali: „Proč se máme zabývat lomovou mechanikou? Děláme to bezpečně, uvažujeme beton bez tahových napětí, takže si vystačíme s plasticitou bez lomové mechaniky.“ Potřeba lomové analýzy u přehrad však nakonec převládla. Podle mého názoru na tom mají zásluhu práce o nelokálních a kohezivních konečných prvcích Milana Jiráka v Lausanne, Wittmana, Brüllera a Saoumy v Lausanne a Boulderu a skupiny Elicese v Madridu. Díky Saoumovi se USA staly též jednou z prvních zemí, kde tento typ požadavků byl zaveden do normových dokumentů pro přehradu.

Z probabilistického pohledu se před námi jeví nový problém. Na základě statistických dat, současný stupeň bezpečnosti pro vlastní váhu velké konstrukce, rozdílný od součinitelů zatížení, je hodně přehnaný. Protože vlastní váha velkých konstrukcí tvoří mnohem větší část vnitřních sil než je tomu u malých konstrukcí, nadhodnocený stupeň bezpečnosti (běžně 1,4) v sobě skrývá vliv velikosti, který může být až 30 %. Tento skrytý vliv velikosti zřejmě kompenzuje to, že na druhé straně chybí v pravidlech a vzorcích pro mezní stavy. Je tomu tak, ale děje se to poněkud iracionálním způsobem. K zajištění prevence určitých typů porušení (např. u ohybového porušení způsobeného tečením výztuže) taková kompenzace není potřeba, zatímco pro jiné (např. diagonální smykové porušení) by bylo potřeba mnohem větší kompenzace. Pro konstrukce z vysokopevnostních betonů nebo předpjaté, které jsou lehčí, je kompenzace vlivu velikosti skrytá v přehnaném součiniteli vlastní váhy menší než je tomu u konstrukcí z běžného betonu a nepředpjatých, přestože vliv

velikosti je u nich vzhledem k vyšší křehkosti výraznější. Jednoduše, vyjádření vlivu velikosti součinitelem vlastní váhy není dobrý způsob.

Na pražském Sympoziu *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. Vliv velikosti (pohybující se od 25 do 55 %) pravděpodobně významně přispěl k mnoha známým katastrofám, např. porušení přehrad Malpasset v Alpách (1959), přehrad St. Francis v Kalifornii (1928), mostu Schoharie Creek v New Yorku (1987), zřícení norské těžní věže Sleipner v Severním moři (1991), viaduktu Han-Shin při zemětřesení v Kóbe (1995) a pilíře mostu v Los Angeles při zemětřesení (1984). Proč však vliv velikosti nebyl, s výjimkou mostu Schoharie Creek, rozpoznán vyšetřovacími komisemi expertů? Důvod je v tom, že na rozdíl od aeronautiky, ve stavebním inženýrství jsou bezpečnostní součinitele velmi vysoké. Musí dojít k souhrě několika chyb, aby došlo k zřícení mostu nebo budovy, zatímco jedna chyba může způsobit pád letadla. Při haváriích se tedy vliv velikosti většinou projevuje v interakci s dalšími poruchami, což činí jeho identifikaci složitější.

Nakonec se vrátím k statistikám chyb vlastní váhy. Měli bychom přijmout návrhy na snížení součinitele vlastní váhy? Jistěže ne. Taková redukce by byla nebezpečná, pokud by vliv velikosti nebyl zahrnutý do formulace návrhu. Obráceně, je třeba připustit, že zavedení vlivu velikosti do formulace návrhu konstrukce bez současného snížení součinitele vlastní váhy na realistickou hodnotu nemá velký význam.

Podobně, smysl přesného výpočtu konstrukce metodou konečných prvků a vliv rozměrů je zpochybněn, je-li použit nepřiměřený součinitel vlastní váhy předepsaný normou. S takovým iracionálním součinitelem je jednoduchý výpočet často dostačující.

Počítačový nadšenec mi navrhoval: „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. Jsou schopné předpovědět zatížení s pravděpodobností poruchy 1 až 10 %, těžko méně. Je zřejmé, že k vyřešení tohoto přístupu bude ještě třeba spojit úsilí mnoha odborníků z oblasti mechaniky, spolehlivosti i poruch konstrukcí.

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

Zdeněk P. Bažant

Walter P. Murphy Professor of Civil Engineering and Material Science
Northwestern University
Evanston, Illinois, USA

Se souhlasem autora ve zkrácené verzi přeložili Jana Margoldová a Vladimír Červenka z originálu uveřejněného v *Japan Concrete Institute, Anniversary Issue of Concrete Journal* 40 (2), 16-28, 2002

Ilustrativní obrázek použit z knihy Bažant Z. P., Planas J.: *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, vydalo CRC Press LLC, 1998, ISBN 0-8493-8284-X