

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 341

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Václav Veselý

Parametry betonu
pro popis lomového chování

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

Ing. Václav Veselý

**PARAMETRY BETONU PRO POPIS
LOMOVÉHO CHOVÁNÍ**

*PARAMETERS OF CONCRETE FOR DESCRIPTION
OF FRACTURE BEHAVIOUR*

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: Ing. Zbyněk Keršner, CSc.

Oponenti: Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.
Prof. Ing. Zdeněk Bittnar, DrSc.
Prof. RNDr. Zdeněk Knésl, CSc.

Datum obhajoby: 9. 2. 2005

Klíčová slova

kvazikřehký materiál, elastická ekvivalentní trhlina, efektivní lomové parametry, R-křivky, T- napětí, faktor biaxiality, R-plocha, lomové zkoušky, MKP simulace, předpjaté železniční pražce

Key words

quasi-brittle material, elastic equivalent crack, effective fracture parameters, R-curves, T-stress, biaxiality factor, R-surface, fracture tests, FEM simulations, prestressed railway sleepers

Disertační práce je uložena na Ústavu stavební mechaniky FAST VUT v Brně

OBSAH

1	ÚVOD	5
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
2.1	PŘEHLED LOMOVÝCH MODELŮ PRO BETON	5
2.2	HIERARCHIE LOMOVÝCH MODELŮ PRO BETON	7
2.3	APLIKACE LOM. MECHANIKY V KONSTRUKČNÍM BETONU	7
2.3.1	Konstrukční hledisko	8
2.3.2	Technologické hledisko	8
3	CÍLE PRÁCE	9
4	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	10
4.1	LINEÁRNÍ ELASTICKÁ LOMOVÁ MECHANIKA	10
4.2	MODELÝ EKVIVALENTNÍ ELASTICKÉ TRHLINY	12
4.3	REZISTENČNÍ KŘIVKY	13
4.4	REZISTENČNÍ PLOCHY	14
5	HLAVNÍ VÝSLEDKY	14
5.1	LOMOVÉ ZKOUŠKY PRAŽCOVÉHO BETONU	14
5.2	NUMERICKÉ SIMULACE LOMOVÝCH ZKOUŠEK	15
5.2.1	Rozměrové extrapolace	16
5.2.2	Numerické simulace experimentů – vybrané konfigurace . .	16
5.3	NUMERICKÉ SIMULACE CHOVÁNÍ PŘEDPJATÝCH PRAŽCŮ .	20
6	ZÁVĚR	20
	LITERATURA	22
	AUTOROVO CURRICULUM VITAE	24
	ABSTRACT	25

1 ÚVOD

Třída elastických ekvivalentních modelů a s nimi související koncept rezistenčních křivek představují pouze nejnižší stupeň nelineární aproximace skutečného lomového chování betonu. Avšak přestože v posledních desetiletích byly navrženy složitější a obecnější lomové modely, stále má tato skupina velký potenciál být v určitých případech efektivním nástrojem při modelování lomu betonu či konstrukční analýze betonových prvků a konstrukcí. Hlavním důvodem je relativně jednoduchý aparát lineární elastické lomové mechaniky, který modely elastické ekvivalentní trhliny používají. Pro jisté druhy úloh může být analýza pomocí efektivních modelů či R -křivek velmi vhodná v porovnání s časově, výpočetně i ekonomicky náročnými analýzami za použití modelů kohezivní trhliny, nelokálních nebo částicových lomových modelů.

Modely elastické ekvivalentní trhliny a na ně navazující koncept rezistenčních křivek se stávají základním tématem předkládané disertační práce, jejímž cílem je odstranit některé známé nevýhody a nedostatky tohoto přístupu k popisu šíření trhliny v betonu a obdobných kvazikřehkých materiálech. Další část disertační práce je pak zaměřena na využití numerických simulací lomového chování betonu. Potenciál těchto simulací je vyšetřován při analýzách lomového chování železničních předpjatých železobetonových prahů a při lomových analýzách prováděných v rámci zkoumání elastických ekvivalentních modelů a konceptu R -křivek.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Lomová mechanika představuje soubor teorie a výpočetních technik, který je schopen popsat a předpovídat porušování materiálů konstrukcí. S úspěchem se jejích poznatků využívá v mnoha odvětvích strojínského inženýrství. Aplikace lomové mechaniky na problémy stavebního inženýrství, obzvláště betonových konstrukcí, je naopak spíše nová záležitost několika posledních desetiletí.

2.1 PŘEHLED LOMOVÝCH MODELŮ PRO BETON

Klasická lineární lomová mechanika – základy lomové mechaniky vybudoval Griffith svou prací z roku 1921 [8], v níž využil elastické řešení napjatosti v okolí eliptického otvoru v nekonečné desce provedené Inglisem v roce 1913. S přiblížením délky vedlejší poloosy elipsy, kterou je trhlina modelována, k nule jdou k nekonečnu napětí v okolí vrcholu elipsy bez ohledu na velikost přiloženého zatížení. Napětí na špičce trhliny v elastické desce tedy nemůže být kritériem porušení, Griffith proto vytvořil kritérium energetické. Podle něj se trhlina v tělese bude šířit, jestliže množství energie *dostupné* k vytvoření nového povrchu trhliny dosáhne či překročí množství energie *potřebné* k uskutečnění tohoto procesu.

Za energii potřebnou k vytvoření nových dvou povrchů trhliny jednotkové plochy

vzal Griffith hodnotu 2γ , kde γ je specifická povrchová energie pružného tělesa. Později byla tato veličina nahrazena *odporem proti šíření trhliny* \mathcal{R} . Energie dostupná ke zvětšení povrchu trhliny o jednotku se značí \mathcal{G} a nazývá *hnací silou trhliny*. Je to energie dodávaná tělesu s trhlinou jako práce vnějších sil a/nebo jako deformační energie uvolňovaná při šíření trhliny.

Základy *lineární elastické lomové mechaniky* (LELM) byly postaveny po 2. světové válce představením Irwinova konceptu faktoru intenzity napětí K a jeho svázáním s Griffithovým energetickým kritériem. Pomocí LELM však lze předpovídat poruchu konstrukce jen v případě, že materiál konstrukce je velmi křehký, navíc ani tehdy predikce nemusí být spolehlivá. Lomová houževnatost jako jediný potřebný parametr pro predikci lomu totiž není materiálovou konstantou, její hodnoty jsou závislé mimo jiné také na tvaru tělesa a způsobu namáhání. Při stejném faktoru intenzity napětí se mohou jiné parametry pole napětí a deformací u čela trhliny výrazně lišit [14]. Geometrie má totiž vliv na stav napětí v okolí kořene trhliny, jež lze podchytit prostřednictvím dalšího parametru pole napětí, tzv. *T-napětí*. Tento přístup je nazýván *dvouparametrovou lomovou mechanikou*.

Klasické nelineární modely – v důsledku nevístižnosti LELM pro popis lomového chování betonu bylo navrženo několik nelineárních teorií. Ty se dají rozdělit do dvou hlavních skupin: jsou to *modely kohezivní trhliny* a *modely efektivní trhliny* (nazývané také *modely ekvivalentní elastické trhliny*).

Modely kohezivní trhliny simulují nelineární chování materiálu v blízkosti čela trhliny tak, že uvažují přenášení napětí mezi líci trhliny až do jejího určitého otevření. Pro lomovou mechaniku kvazikřehkých materiálů z nich má největší přínos Hillerborgův *model fiktivní trhliny* [9], který je schopen popsat lomový proces betonové konstrukce od stavu bez trhlín až po úplné porušení.

Modely ekvivalentní elastické (neboli efektivní) trhliny pro beton využívají aparátu LELM a s rozsáhlou neelastickou zónou za čelem trhliny se vypořádávají následovně: Snížení tuhosti kvazikřehkého tělesa s trhlinou dané vznikem nelineární zóny je simulováno prodloužením počáteční trhliny daného tělesa při uvažování jeho křehkého působení. Mezi používané modely elastické ekvivalentní trhliny patří *model o dvou parametrech* (shrnuto např. v [11]), *model efektivní trhliny* [18] a *model rozměrového efektu* (shrnuto např. v [4]).

Elastické ekvivalentní modely po rozšíření o některá pravidla poskytují možnosti popisovat celý průběh porušení. Lze toho dosáhnout pomocí konceptu tzv. *R-křivky* (rezistenčních křivek – závislost \mathcal{R} na prodloužení trhliny). Odpor proti šíření trhliny \mathcal{R} není konstantou, nýbrž roste k určité limitní hodnotě se zvětšující se délkou trhliny.

Lomové modely založené na mechanice kontinua – teorie postavené na mechanice kontinua popisují vznik a propagaci trhlín v makroskopicky bezvadném materiálu. Jedná se o modely zpracováváné do konečnoprvkových kódů majících ambice numericky simulovat lomové chování materiálu. Patří mezi ně např. Bažantův

modelu pásu trhlin (patřící do třídy modelů *rozetřené trhliny*), jenž v určitých rysech shodný s Hillerborgovým modelem (zástupce třídy modelů *diskrétní trhliny*), ovšem zachovává si formulaci pomocí mechaniky kontinua. Do této skupiny se řadí i nelokální modely v integrální (koncept *nelokálního kontinua*) i diferenciální formě (*gradientní modely*).

2.2 HIERARCHIE LOMOVÝCH MODELŮ PRO BETON

Z pohledu moderní výpočetní mechaniky [10] se materiálové modely dají rozdělit na *spojité*, *diskrétní* a *smíšené*. Základní jednotkou spojitých modelů je infinitesimální objem a chování materiálu je popsáno zákony napětí–deformace. Speciální třída konstitutivních modelů mechaniky kontinua, která byla vyvinuta pro tahového namáhání betonu, je označována pojmem *modely rozetřené trhliny*. Rozdělují celkovou deformaci na elastickou a neelastickou, kde neelastická deformace odpovídá otevření trhliny a souvisí přímo s napětím přenášeným mezi lícemi trhliny podle zákona napětí–otevření trhliny (např. Bažantův *model pásu trhlin*). Mezi spojitě modely patří také *mikroploškové (microplane) modely* a *mikropolárního (micropolar) kontinua* bratří Cosseratů.

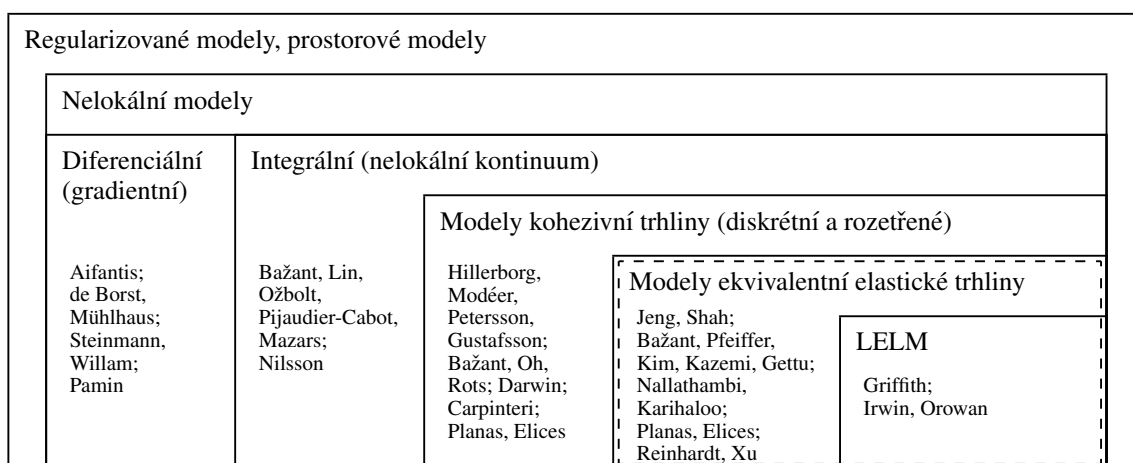
Smíšenými modely rozumíme takové, které rozšiřují kontinuum o oblasti, kde je pole posunů nespojitě. Tyto diskontinuity odpovídají makroskopickým trhlinám nebo pásům poškození vyvolaných smykem. Ta část tělesa, která zůstává kontinuem, se popisuje pomocí zákona napětí–deformace, pro popis existujících (popř. vznikajících) diskontinuit musí být postulováno kritérium jejich šíření. Do této kategorie lze zařadit např. *lineární lomovou mechaniku*, *modely ekvivalentní elastické trhliny* rozšířené o *R-křivky* a také Hillerborgův *model fiktivní trhliny*.

Diskrétní modely pracují s entitami konečných rozměrů (např. pruty, nosníky, pružiny) a sestavují vztahy mezi vnitřními silami působícími na jejich koncových průřezích a posuny těchto průřezů. Tyto modely se používají k simulaci materiálu na úrovni mikrostruktury a nazývají se souhrně *částicovými modely*.

Hierarchická struktura [7] výše uvedených modelů lomové mechaniky, jež mohou být využity k predikci lomového chování betonových konstrukcí, je znázorněna na obrázku 1. Jednotlivé třídy jsou doplněny i jmény autorů uvedených modelů, popřípadě jmény autorů významných prací týkajících se dané oblasti. Čárkovanou čarou jsou ve schématu ohraničeny oblasti lomové mechaniky betonu, do kterých svým obsahem předkládaná disertační práce přispívá.

2.3 APLIKACE LOM. MECHANIKY V KONSTRUKČNÍM BETONU

Kolaps konstrukce z betonu či železobetonu je typicky spojen se vznikem a šířením trhlin. Přesto se lomová mechanika prozatím stále téměř neuplatňuje při designu betonových konstrukcí, který je z velké části založen na teorii pružnosti a plasticity. Příčinou je nevýstižnost klasické lomové mechaniky v oblasti návrhu betonových konstrukcí, která je spjata s fyzikálními procesy probíhajícími v lo-



Obr. 1: Hierarchie lomových modelů pro kvazikřehké materiály. Převzato a upraveno z [7]

mové procesní zóně (LPZ) za čelem trhliny. Lomové chování betonu se označuje jako *kvazikřehké*. Formy lomové mechaniky, jež jsou pro beton výstižné, jsou intenzivně rozvíjeny až v posledních třech desetiletích a postupně zapracovávají do návrhových norem (např. CEB-FIP Model Code, normy ACI a AS, Eurokódy). Moderní lomovou mechaniku lze dnes uplatnit ve dvou hlavních oblastech betonového stavitelství – konstrukční a technologické.

2.3.1 Konstrukční hledisko

Únosnost – mezi současnými konstrukčními pravidly a doporučeními jsou mnohá, jež vycházejí z empirie a dosud postrádaly spolehlivé fyzikální vysvětlení. Právě teorie lomové mechaniky je schopna objasnit fenomény, které klasická pevnostní teorie vysvětlit nedovede. Lomová mechanika tak může pomoci dosáhnout teoreticky lépe podloženého, efektivnějšího a levnějšího designu betonových konstrukcí.

Použitelnost – některé kategorie mezních stavů 2. skupiny souvisejí se vznikem a šířkou trhlín. Šířka trhlín, jejich hustota a délka hraje významnou roli v odhadech životnosti železobetonových a předpjatých konstrukcí. Lomově-mechanické parametry slouží jako vstupy pro některé modely degradace.

2.3.2 Technologické hledisko

Charakteristika chování kvazikřehkých materiálů pouze pevnostními parametry je nedostatečná, zejména u moderních cementových kompozitů se speciálními vlastnostmi. Lomové parametry (např. lomová houževnatost, lomová energie, charakteristická délka) jsou využívány při analýze chování cementových kompozitů ve vztahu k různým typům pojiva [23], přísadám a příměsím [6] nebo různým typům kameniva. Zkoumají se možnosti ovlivňování mikrostruktury cementových kompozitů [12, 24] a také změny vlastností materiálů po expozici fyzikálně nestandardním podmínkám – vliv vysokých teplot [19, 16] i vliv opakovaného zmrazování [5].

3 CÍLE PRÁCE

Cíle předkládané disertační práce lze rozdělit do dvou skupin. Práce se v první části zaměřuje zejména na třídu elastických ekvivalentních modelů a koncept R -křivek pro popis lomového chování betonu. Této části se týká první skupina cílů. Druhá část je pak zaměřena na využití numerických simulací lomového chování betonu, a to jak při lomových analýzách prováděných v rámci zkoumání elastických ekvivalentních modelů a R -křivek, tak také při analýzách skutečných stavebních konstrukcí. Druhá skupina cílů předkládané práce souvisí s využitím těchto numerických simulací.

Elastické ekvivalentní modely a R -křivky

Z této oblasti jsou v disertaci zkoumány možnosti:

1. využití parametrů těchto modelů jako charakteristik kvality materiálů (tj. jako srovnávací nástroj),
2. rozšíření těchto modelů na vhodné zkušební geometrie připadající v úvahu pro účely technologie betonu (tj. na zkušební konfigurace vycházející z používaného zkušebního tělesa ve tvaru krychle),
3. využití těchto modelů pro predikci lomového chování betonových konstrukcí, jejich částí a detailů,
4. zahrnutí vlivu geometrie do konceptu efektivních modelů a R -křivek.

Využití numerických simulací

Pomocí vhodných MKP softwarů je zamýšleno:

1. využít a ověřit použitelnost numerických simulací laboratorních lomových zkoušek a jejich rozměrových extrapolací pro verifikaci a porovnání jednotlivých efektivních modelů a technik určování R -křivek,
2. využít a ověřit použitelnost numerických simulací chování předpjatých betonových konstrukcí, pro něž byly experimentálně zjišťovány lomové charakteristiky,
3. prozkoumat možnosti nahrazení experimentálních prací na skutečných konstrukcích vhodnou numerickou simulací.

Ze shrnutí současného stavu problematiky lomové mechaniky betonu provedeného v předcházející sekci vyplývá, že obzvláště první skupina cílů této práce se zaměřuje na oblast lomové mechaniky, která skýtá prostor pro další výzkum. Naopak cíle druhé skupiny jsou spíše praktické. Jsou to dílčí cíle vymezené v rámci prováděných lomových a konstrukčních analýz a nemají ambice přinášet samy o sobě nové teoretické poznatky do studované problematiky.

4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

4.1 LINEÁRNÍ ELASTICKÁ LOMOVÁ MECHANIKA

Irwinova teorie lomu – v křehkém tělese se celý lomový proces odehrává v okolí vrcholu trhliny, kde je pole napětí singulární a celý zbytek tělesa zůstává elastický. Jednotlivé složky tenzoru napětí σ_{ij} ($i, j = x, y, z$) v blízkosti kořene trhliny (pouze singulární členy Williamsova rozvoje [27]) jsou vždy jen funkcí polohy vyšetřovaného bodu a veličiny nazvané *faktor intenzity napětí* K . Pro tahový mód I je definován takto:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_y(r, \theta). \quad (1)$$

U těles s konečnými rozměry je K -faktor ovlivněn volnými okraji tělesa. Do výpočtu K -faktoru se tento vliv zavádí pomocí *funkce geometrie* Y nebo ekvivalentně *faktoru geometrie* k . Po dosazení příslušné složky tenzoru napětí a pro $\theta = 0$ lze zapsat

$$K_I = \sigma_N \sqrt{a} Y(\alpha) = \sigma_N \sqrt{D} k(\alpha), \quad (2)$$

kde σ_N je nominální napětí, $D = W$ je charakteristický rozměr konstrukce, $\alpha = a/W$ je relativní délka trhliny a $k(\alpha)$ je rovno $Y(\alpha)\sqrt{\alpha}$. Jednotkou faktoru intenzity napětí je $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Trhlina se podle Irwinova kritéria bude šířit, jestliže

$$K_I \geq K_{Ic}, \quad (3)$$

kde K_{Ic} je kritická hodnota faktoru intenzity napětí – *lomová houževnatost*. Charakteristiky pole napětí v nejbližším okolí kořene trhliny jsou svázány s energií \mathcal{G} dostupnou během lomu na trhání materiálových vazeb. K_{Ic} tedy souvisí s lomovou energií G_f (tj. odporem proti šíření trhliny \mathcal{R}) takto:

$$K_{Ic} = \sqrt{G_f E'} \quad \text{neboli} \quad G_f = \frac{K_{Ic}^2}{E'}. \quad (4)$$

Dvoupřímá LELM – klasická lomová mechanika charakterizuje pole napětí a deformací v okolí kořene trhliny jediným parametrem, obvykle K -faktorem. Takto koncipované lomové teorie vycházejí z předpokladu, že kritická hodnota tohoto parametru K_c je materiálová konstanta nezávislá na geometrii tělesa. Zjistilo se ovšem, že lomové chování těles různé geometrie různě zatížených, avšak se stejným K , není shodné. V okolí trhliny dochází ke vzniku *multiaxiality* napětí, což ovlivňuje sledované parametry pole napětí a deformací. Tento jev se označuje jako *constraint* efekt a charakterizuje se pomocí *T-napětí* nebo ekvivalentně *faktoru biaxiality* B .

Tenzor napětí v tělese s trhlinou lze vyjádřit ve tvaru Williamsova mocninného rozvoje [27, 14]

$$\sigma_{ij} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \frac{n}{2} \right) r^{\frac{n}{2}-1} f_{ij}(n, \theta), \quad (5)$$

kde r a θ jsou polární souřadnice, koeficienty A_n jsou konstanty a f_{ij} známé funkce. První člen nekonečné řady (5) je singulární vzhledem ke vzdálenosti r od vrcholu trhliny, druhý člen rozvoje je konstantní vzhledem k r , další členy nabývají pro libovolné r konečných hodnot a pro $r \rightarrow 0$ konvergují k nule. Pro aproximativní popis napětí a deformací v blízkém okolí vrcholu trhliny je tedy možné zanedbat členy rozvoje s $n > 2$.

Konstanta A_1 u prvního členu rozvoje odpovídá faktoru intenzity napětí K_I . Klasická LELM tedy při popisu napětí a deformací v blízkosti kořene trhliny bere v úvahu pouze první singulární člen nekonečné řady a ostatní zanedbává. Dvouparametrová LELM využívá i druhý konstantní člen Williamsova rozvoje. Tento člen se označuje jako T -napětí. Tenzor napětí lze zapsat ve tvaru

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + T \delta_{1i} \delta_{1j}, \quad (6)$$

kde $f_{ij}(\theta)$ je funkce polárního úhlu a δ_{kl} je Kroneckerovo delta.

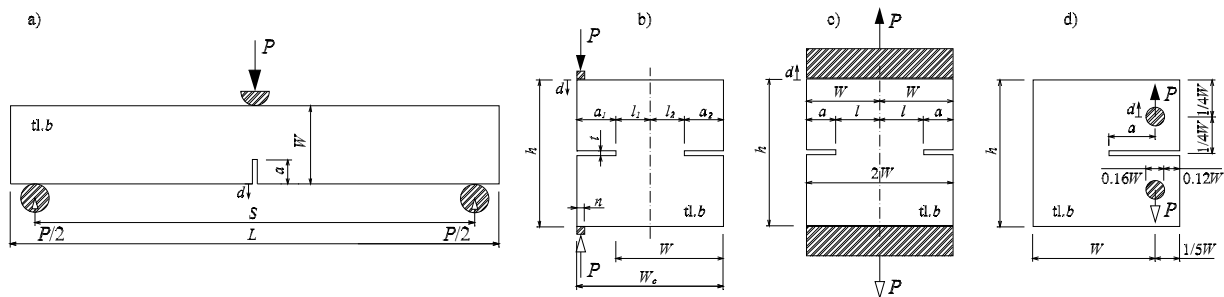
K -faktor slouží jako kvantifikátor pole napětí v blízkosti kořene trhliny, T -napětí charakterizuje vliv geometrie tělesa a úrovně dosažené deformace na tahové napětí na čele trhliny. Jako charakteristika constraintu se používá ekvivalentně k T -napětí bezrozměrný faktor biaxiality napětí [15] definovaný takto:

$$B = \frac{T \sqrt{\pi a}}{K_I}. \quad (7)$$

Pro výpočet T -napětí byla vyvinuta řada metod, které jsou shrnuty např. v [14, 2]. V této práci je použita přímá diferenční technika založená na srovnání výsledků MKP řešení s analytickým vyjádřením.

Konfigurace zkoušek pro určování lomových parametrů – k nejčastěji používaným konfiguracím pro určování LELM parametrů v lomové mechanice betonu patří trámec se zářezem namáhaný tříbodovým ohybem (označ. SEN-TPB). Dalším vhodným tělesem je vzorek ve tvaru kvádrů nebo speciálně krychle [3, 13], na jejíž dvou protilehlých hranách jsou vytvořeny centrální zářezy. Pro tahový mód I se využívá ke zkoušce excentrickým tlakem (DEN-EC) a centrickým tahem (DEN-T). Z tělesa ve tvaru kvádrů, resp. krychle, lze vytvořit další z hlediska betonového stavitelství výhodnou konfiguraci – excentrický tah tělesa se zářezem (SEN-CT). Zkušební konfigurace používané v této práci jsou znázorněny na obr. 2.

Aproximativní řešení pro výpočet K -faktoru v uzavřeném tvaru pro mnoho elastických těles s trhlínami je možné najít v literatuře [17, 11, 14]. Při využití dvouparametrové lomové mechaniky je však navíc nezbytná také znalost vztahů pro



Obr. 2: a) Třibodový ohyb trámce se zářezem (SEN-TPB), b) excentrický tlak (DEN-EC) a c) tah (DEN-T) tělesa se dvěma zářezy, d) excentrický tah tělesa se zářezem (SEN-CT)

parametr T (resp. B) popisující constraint. Pro v této práci používané tvary těles konfigurací DEN-EC, DEN-T a SEN-CT však tyto vztahy nebyly v literatuře nalezeny, proto bylo přistoupeno k provedení numerických výpočtů za použití MKP. Byly tak na základě numerických analýz vytvořeny vztahy pro výpočet faktoru intenzity napětí K a T -napětí (resp. B).

4.2 MODEL EKVIVALENTNÍ ELASTICKÉ TRHLINY

Lom kvazikřehkých materiálů obecně nelze popsat jediným lomovým parametrem. Tím je relativně dostatečně charakterizován pouze křehký lom, kdy velikost nelineární zóny je nepatrná vzhledem k rozměrům konstrukce. Je-li lomová procesní zóna za čelem trhliny příliš velká pro aplikaci linární elastické lomové mechaniky, zároveň však dostatečně malá ve srovnání s ligamentem praskající konstrukce, je možné pro popis lomu použít zjednodušené nelineární lomové teorie [4]. Jsou nazývány jako *modely ekvivalentní elastické trhliny*, popř. *modely efektivní trhliny*.

Toto označení se odvíjí od způsobu, jakým berou v úvahu nelineární kohezivní chování kvazikřehkých materiálů. Využívají aparátu LELM a dovolují provést lomovou analýzu skutečné kvazikřehké konstrukce pomocí její záměny za elastickou konstrukci s delší trhlinou tak, aby chování obou konstrukcí bylo ekvivalentní. Ekvivalence skutečné kvazikřehké a pomocné elastické konstrukce se docílí prodloužením skutečné trhliny délky a ve skutečné konstrukci o efektivní přírůstek trhliny Δa_e při současném považování materiálu skutečné konstrukce za křehký a dodržení okrajových podmínek.

Velikost efektivního přírůstku trhliny Δa_e se určí tak, že pole napětí, deformací a posunů vně neelastické zóny u skutečné i ekvivalentní elastické konstrukce se uvažují při stejném zatížení shodná. Efektivní délku trhliny při lze zapsat jako

$$a_e = a_0 + \Delta a_e, \quad (8)$$

kde a_0 je délka trhliny před zatížením.

Vlastní šíření trhliny pak tyto modely popisují pomocí dvou charakteristik. Jednou je K -faktor (ekviv. hnací síla \mathcal{G}) vztažený k vrcholu myšlené efektivní trhliny,

proto označovaný jako efektivní, druhou je obvykle délka této efektivní trhliny a_e . Délka efektivní trhliny se počítá ze změny poddajnosti tělesa během lomového procesu, efektivní faktor intenzity napětí K_I^e pak pomocí LELM vzorců s dozazením a_e místo a . Kritická délka efektivní trhliny a_{ec} odpovídající kritickému zatížení blíže určuje a doplňuje efektivní lomovou houževnatost K_{Ic}^e . Oba parametry jsou v rámci této koncepce považovány za materiálové charakteristiky. Do této třídy lomových modelů se řadí např. *model efektivní trhliny* (ECM – effective crack model) [18], *model o dvou parametrech* (TPM – two parameter model) [11] a *model rozměrového efektu* (SEM – size effect model) [4]. Podrobně jsou popsány v disertační práci.

4.3 REZISTENČNÍ KŘIVKY

Modely ekvivalentní elastické trhliny vyhodnocují pouze kritickou situaci při zatěžování tělesa. Lomové parametry těchto modelů jsou uvažovány jako fixní – nemění se během šíření trhliny. Koncept rezistenčních křivek zachovává jejich výpočetní aparát (LELM), ovšem doplňuje ho o předpoklady, které mu umožňují provádět celkovou konstrukční analýzu. Přináší možnost popisu celého procesu šíření trhliny, a to jak před dosažením maxima zatížení, tak i po něm. Uvolňuje totiž podmínku stability trhliny $\mathcal{G} = \mathcal{R}$ (ekvivalentně $K_I = K_{Ic}$), kde \mathcal{R} (ekviv. K_{Ic}) je považován za materiálovou vlastnost. Místo jediné hodnoty materiálového parametru používá koncept rezistenčních křivek pravidlo vztahující hodnotu tohoto parametru k délce elastické ekvivalentní trhliny popř. velikosti jejího přírůstku.

Definice rezistenční křivky – pod pojmem R -křivka (K_R -křivka) se rozumí vyjádření odporu proti šíření trhliny \mathcal{R} (lomové houževnatosti K_{Ic}) jako funkce prodloužení elastické ekvivalentní trhliny Δa :

$$\mathcal{R} = R(\Delta a), \quad \text{resp. ekviv.} \quad K_{Ic} = K_R(\Delta a). \quad (9)$$

Původní přístupy předpokládaly, že tato funkce je materiálovou charakteristikou. Rezistenční křivky jsou však do značné míry závislé na geometrii konstrukce a také na její velikosti. Nezávislost R -křivky na velikosti konstrukce poskytuje pouze metoda jejího určení z efektu rozměru, ani tato metoda však neodstraňuje závislost tvaru R -křivky na geometrii konstrukce.

Experimentální určování rezistenčních křivek – pro kvazikřehké materiály se používají dvě základní skupiny metod určování R -křivek. První skupina je založena na stanovení sad hodnot $[\Delta a, \mathcal{G}]$ z bodů zatěžovacího diagramu v různých stádiích kvazistatického růstu trhliny, pro který platí $\mathcal{G} = \mathcal{R}$. Tyto body pak definují tvar R -křivky. Druhá skupina metod stanovení tvaru rezistenční křivky vychází z toho, že R -křivku lze vytvořit jako množinu tečných bodů odpovídajících průběhů $\mathcal{G}(a)$ a $\mathcal{R}(\Delta a)$. K získání těchto bodů se využívá efektu rozměru, příp. tvaru. Pro specifickou sadu zkušebních těles se provedou testy na maximální zatížení P_u . Pro jednotlivá tělesa se vynesou křivky $\mathcal{G}(P_u, a)$, z nichž každá se dotýká $\mathcal{R}(\Delta a)$ křivky, avšak v jiném bodě. R -křivka tak vznikne jako obálka průběhů hnací síly trhliny

$\mathcal{G}(P_u, a)$ pro všechna tělesa uvažované sady. V disertační práci jsou podrobně rozebrány obě skupiny metod určování R -křivek.

4.4 REZISTENČNÍ PLOCHY

Výše byly zmíněny určité nedostatky konceptu rezistenčních křivek. Nejproblematictějšími aspekty jsou závislost R -křivky na velikosti konstrukce a závislost R -křivky na zkušební konfiguraci. R -křivku tedy nelze obecně považovat za materiálovou charakteristiku.

Problém závislosti R -křivky na velikosti je částečně vyřešen, eliminují jej metody určování R -křivky vycházející z rozměrového efektu. Avšak velkou nevýhodou konceptu R -křivek, jež naopak nebyla dosud uspokojivě vyřešena, zůstává závislost na geometrii. Důležitým řešením je robustní Bažantova analytická metoda určování R -křivek z rozměrového zákona, která křivku vyjadřuje jako funkci asymptotických lomových parametrů Bažantova rozměrového zákona G_f a c_f . Otázkou však zůstává, zda parametry G_f a c_f určené metodou rozměrového efektu [22] jsou skutečně asymptotické (podle definice nezávislé na geometrii). Dalším problémem je skutečnost, že těleso konečných rozměrů během šíření trhliny nesleduje R -křivku určenou z Bažantova rozměrového zákona pro analyzovanou geometrii a počáteční relativní délku trhliny α_0 , ale tzv. *skutečnou* R -křivku. Na základě výsledků provedených numerických experimentů byl proto navržen přístup [25, 26] zahrnující vliv geometrie do konceptu rezistenčních křivek – tzv. *koncept rezistenčních ploch*.

Definice rezistenční plochy – navrhovanou materiálovou charakteristikou plně určující lomové chování materiálu je rezistenční plocha, ve které leží R -křivky těles různých geometrií. Vliv geometrie tělesa na jeho lomové chování je zohledněn prostřednictvím nástrojů dvouparametrové LELM, tj. pomocí podrobnějšího popisu pole napětí v okolí vrcholu trhliny, pro který se k faktoru intenzity napětí K zavádí další parametr – T -napětí nebo ekvivalentně faktor biaxiality B . Právě charakteristika constraintu na čele efektivní trhliny je třetí dimenzí prostoru, do kterého jsou vykreslovány rezistenční křivky, jež spolu vytvářejí rezistenční plochu. Rezistenční plochu lze definovat jako

$$\mathcal{R} = R(\Delta a, T), \quad \text{resp. ekviv.} \quad \mathcal{R} = R(\Delta a, B). \quad (10)$$

V této práci se používá druhé vyjádření, tj. závislost na faktoru biaxiality B .

5 HLAVNÍ VÝSLEDKY

5.1 LOMOVÉ ZKOUŠKY PRAŽCOVÉHO BETONU

Experiment I – byl prováděn během podzimu 2001. Jeho cílem bylo získat co nejvíce lomově-mechanických informací o betonu předpjatých železničních pražců, pomocí kterých by bylo možno nakalibrovat materiálový model pro numerické

MKP simulace chování těchto prážců v softwaru ATENA [1]. Výběr zkušebních konfigurací ovlivnila snaha o získání těchto informací z lomových zkoušek na běžně dostupných zkušebních tělesech. Většina standardizovaných experimentálních technik pro určování lomově-mechanických vlastností (např. doporučení RILEM [20, 21, 22]) používá konfiguraci SEN-TPB. Trámce ovšem nejsou v betonovém stavitelství zcela obvyklým zkušebním tělesem. Naopak tělesa ve tvaru válce a u nás především krychle se v konstrukčním betonu užívají běžně pro stanovení mechanických vlastností, jako jsou pevnost v tlaku a příčném tahu či modul pružnosti. Byly tedy provedeny testy jak na konfiguraci SEN-TPB, tak i na DEN-EC, obě za účelem srovnání zjištěných lomových parametrů příslušejících jednotlivým konfiguracím.

Experiment II – byl prováděn na jaře 2002, navazoval na Experiment I a v některých ohledech jej doplňoval. Byl zejména zaměřen na porovnání efektivních lomových parametrů zjišťovaných na různých geometriích, jmenovitě SEN-TPB, DEN-EC a DEN-T.

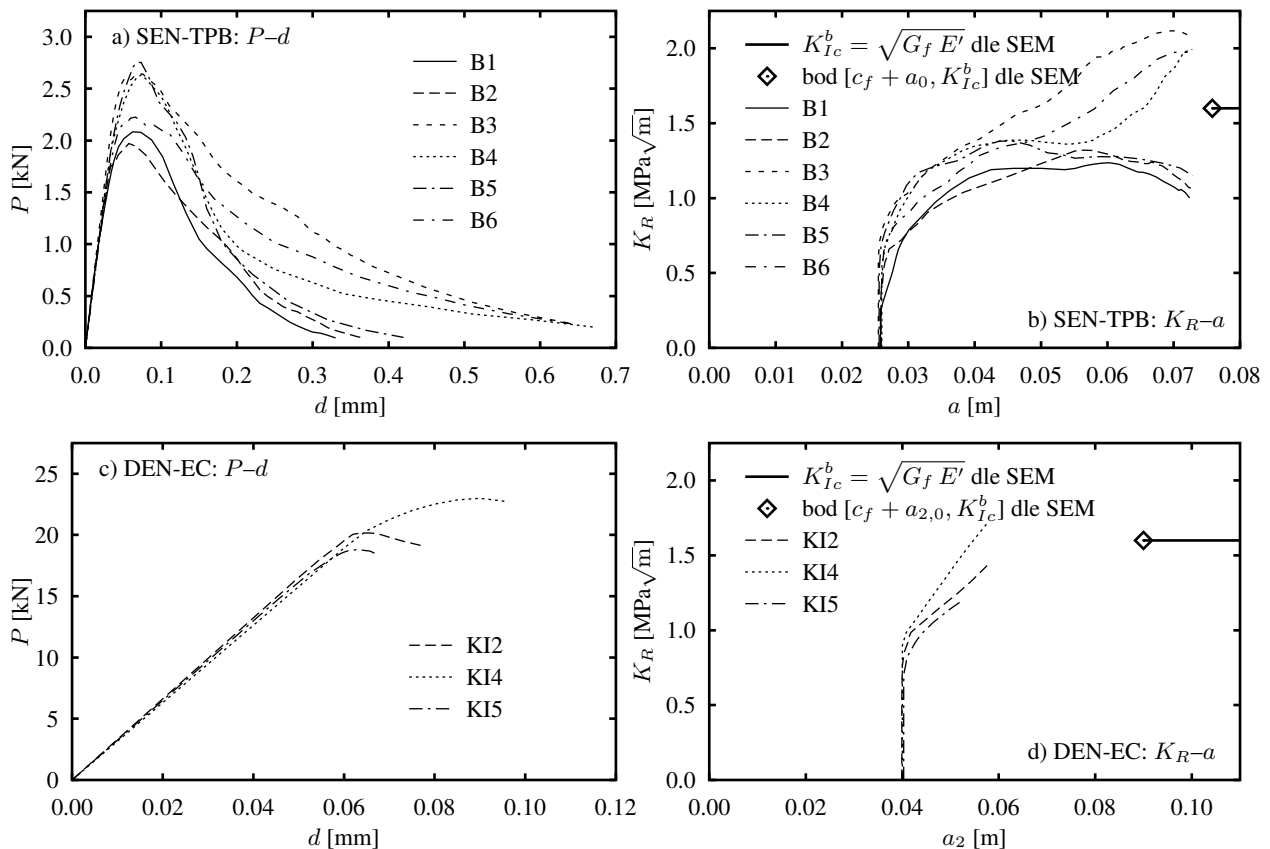
V tomto textu jsou částečně prezentovány výsledky zkoušek provedených v rámci Experimentu I. Popis průběhů zkoušek a zpracování výsledků Experimentu I a celý popis Experimentu II je uveden v disertační práci. Na obr. 3a) a c) jsou vykresleny zaznamenané zatěžovací křivky z testů SEN-TPB a DEN-EC, z nichž byly vypočteny lomové parametry. Jejich hodnoty jsou pro obě konfigurace shrnuty v tabulce 1. Ze zatěžovacích diagramů byly také zkonstruovány K_R -křivky z poddajnosti (viz obr. 3b a d).

SEN-TPB	E [GPa]	a_{ec} [mm]	Δa_{ec} [mm]	K_{Ic}^e [MPa \sqrt{m}]	K_{INu} [MPa \sqrt{m}]	G_F [Jm $^{-2}$]	DEN-EC	E [GPa]	a_{ec} [mm]	Δa_{ec} [mm]	K_{Ic}^e [MPa \sqrt{m}]	K_{INu} [MPa \sqrt{m}]
B1	40,0	42,48	16,68	1,343	0,735	145,1	KI1					
B2	38,9	40,72	14,82	1,212	0,715	164,8	KI2	40,4	50,19	10,29	1,239	0,950
B3	40,5	39,31	13,81	1,498	0,923	274,1	KI3	33,1				
B4	37,2	37,85	11,85	1,412	0,936	166,3	KI4	38,0	61,33	21,33	1,936	1,089
B5	37,1	35,86	10,26	1,379	0,972	166,6	KI5	39,7	52,71	12,41	1,240	0,898
B6	37,6	38,60	12,70	1,265	0,810	215,3	KI6	36,3				
a. p.	38,5	39,14	13,35	1,352	0,849	188,7	a. p.	37,5	54,74	14,68	1,472	0,979
s. o.	1,5	2,30	2,27	0,103	0,110	47,9	s. o.	2,9	5,84	5,86	0,402	0,099

Tab. 1: Lomové parametry ze zkoušek SEN-TPB (zkušební tělesa označena B1 až B6) a DEN-EC (KI1 až KI6) – modul pružnosti E , kritická délka efektivní trhliny a_{ec} , kritický přírůstek délky efektivní trhliny Δa_{ec} , efektivní lomová houževnatost K_{Ic}^e , zdánlivá lomová houževnatost K_{INu} a u SEN-TPB i lomová energie G_F

5.2 NUMERICKÉ SIMULACE LOMOVÝCH ZKOUŠEK

Ve vyšetřování lomového chování prážcového betonu bylo po provedených experimentech pokračováno prostřednictvím MKP simulací. Těmito simulacemi byly nahrazeny další experimentální práce z důvodů jejich velké ekonomické náročnosti a/nebo nedostatečně vybavenosti zkušební laboratoře pro jejich provedení. Pro numerické simulace lomového chování betonu byl použit výpočetní systém ATENA [1] umožňující nelineární analýzu betonových a železobetonových konstrukcí. Vý-



Obr. 3: $P-d$ diagramy a K_R-a křivky ze zkoušek SEN-TPB a DEN-EC

počty byly prováděny ve dvoudimenzionální verzi tohoto systému jako rovinná napjatost. Materiálový model byl kalibrován na výsledky zkoušek SEN-TPB z Experimentu I, nakalibrovaný materiálový model byl poté použit i na numerické simulace průkazných zkoušek předpjatých železničních pražců.

5.2.1 Rozměrové extrapolace

Pro další lomovou analýzu pražcového betonu bylo potřeba odhadnout asymptotické lomové parametry G_f a c_f Bažantova modelu rozměrového efektu. Jako vstupní hodnoty pro jejich výpočet slouží maximální dosažená zatížení při zkouškách na sadě geometricky podobných vzorků lišících se velikostí. Simulace byly prováděny jako rozměrové extrapolace zkoušky SEN-TPB Experimentu I. Výsledky těchto simulací byly, mimo jejich využití k výpočtu G_f a c_f , podrobeny důkladné analýze, při níž se sledovaly změny křehkosti lomového chování tělesa s růstem jeho velikosti. Pro více viz diserační práci.

5.2.2 Numerické simulace experimentů – vybrané konfigurace

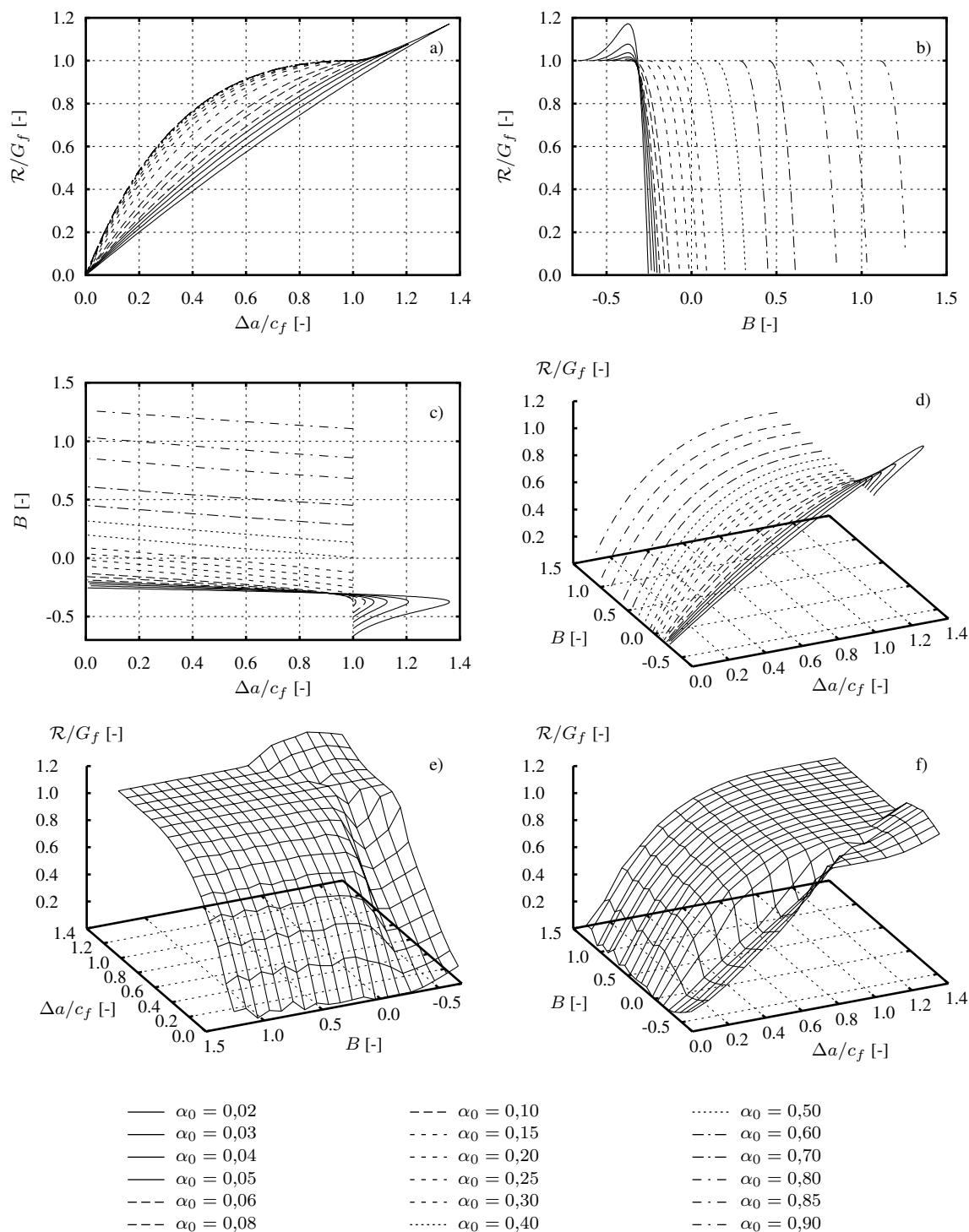
Tvar a způsob zatížení zkušební tělesa ovlivňuje tvar rezistenčních křivek. Možnost postihnout tuto závislost vhodným parametrem napěťového pole, rovněž determinovaného vlastnostmi zkušební konfigurace, byla studována prostřednic-

tvím naplánovaného numerického experimentu. Zmíněným parametrem, který charakterizuje vliv multiaxiality napětí na čele trhliny na lomové chování tělesa (tzv. constraint efekt), může být T -napětí nebo ekvivalentně faktor biaxiality B . Pro tento numerický experiment byly vybrány čtyři zkušební konfigurace, které se navzájem liší typem a mírou constraintu napětí u kořene trhliny a jsou snadno připravitelné ze zkušebních těles používaných v betonovém stavitelství. Jedná se o konfigurace SEN-TPB, DEN-EC, DEN-T a SEN-CT. Protože vybavení zkušebny neumožňovalo úspěšné provedení lomových zkoušek DEN-EC, DEN-T a SEN-CT, byly tyto zkoušky simulovány numericky. Pro simulace byl použit MKP software ATENA s nakalibrovaným materiálovým modelem podle zkoušek SEN-TPB z Experimentu I popsáním výše. Jako parametr constraintu pro porovnání studovaných geometrií zde byl použit faktor biaxiality. Průběh závislosti faktoru biaxiality B na relativní hloubce trhliny α pro všechny použité konfigurace je naznačen na obr. 5a).

Numericky byly nasimulovány zatěžovací diagramy pro studované geometrie. Vyhlazené zatěžovací diagramy byly transformovány do rezistenčních křivek z poddajnosti. Na základě srovnání vykreslených K_R -křivek a průběhů faktoru biaxiality B (obr. 5a) byl navržen tzv. *koncept rezistenční plochy* [25], který by vliv geometrie zahrnoval. Rezistenční plocha je podle této koncepce sestrojena ve třídimenziálním prostoru: ke dvěma rozměrům typickým pro koncept R -křivek (efektivním lomovým parametřům Δa a K_I) přibude rozměr kvantifikující stísnění deformace na čele elastické ekvivalentní trhliny (faktor biaxiality B). Takto vytvořená rezistenční plocha by plnila roli charakteristiky materiálu, a tedy rezistenční křivky těles různých konfigurací stejného materiálu by byly podmnožinou této plochy. Nasimulované zatěžovací diagramy a z nich vypočtené rezistenční křivky a rezistenční plochy jsou uvedeny v disertační práci.

Rezistenční křivky pro jednotlivé studované zkušební konfigurace byly konstruovány také analytickou metodou z Bažantova rozměrového zákona (metoda Bažant-Kazemi). Postup výpočtu bodů R -křivky byl naprogramován. Aby bylo možno udělat si představu o míře závislosti tvaru R -křivky určité geometrie na relativní délce počáteční trhliny α_0 , byly pro studované geometrie určeny R -křivky pro celou sadu α_0 . Z níže uvedených grafů je patrné, že závislost tvaru R -křivky na zkušební konfiguraci (tj. způsobu zatížení tělesa a jeho tvaru, jenž samozřejmě zahrnuje i počáteční délku trhliny) je velmi silná – viz graf a) v obr. 4.

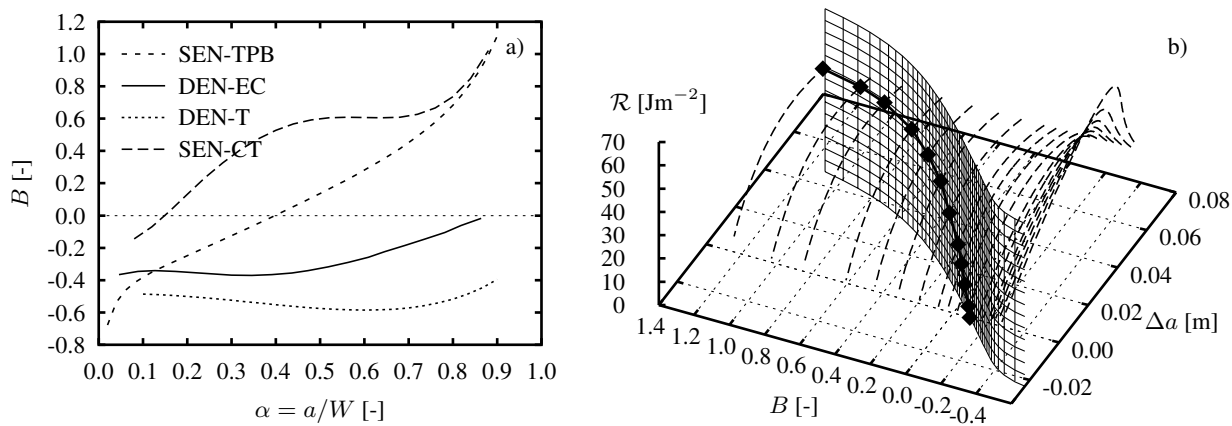
Proto byl i u R -křivek z rozměrového zákona učiněn pokus popsat či podchytit vliv geometrie na tvar R -křivky pomocí charakteristiky constraintu na špici elastické ekvivalentní trhliny [26]. K jednotlivým bodům $\mathcal{R}-\Delta a$ křivek byla přiřazena odpovídající hodnota faktoru biaxiality B . R -křivky jsou do tohoto třídimenziálního prostoru pro geometrii SEN-TPB vykresleny v grafu d) na obrázku 4, v grafech a), b) a c) jsou pro ozřejmění zobrazeny i průměty těchto křivek do jednotlivých souřadnicových rovin. R -křivky určité zkušební konfigurace stanovené pro různé počáteční relativní délky trhlín vytvářejí plochu. Na obr. 4e) a 4f) je vykreslena



Obr. 4: R -křivky určené z Bažantova rozměrového zákona pro konfiguraci SEN-TPB – zobrazení ve 3D prostoru veličin \mathcal{R}/G_f , $\Delta a/c_f$ a B . Na obr. e) a f) je ve dvou pohledech vykreslena aproximace rezistenční plochy vytvořené z R -křivek pro jednotlivé α_0

aproximace (drátěný model) této R -plochy.

V disertační práci jsou sestrojeny R -plochy také pro ostatní studované zkušební konfigurace. Jejich důkladnou prostorovou analýzou (porovnáním prostorového umístění jednotlivých R -křivek tvořících tyto R -plochy) byla popřena hypotéza, že rezistenční plocha by mohla sloužit ve třídě ekvivalentních elastických modelů jako



Obr. 5: a) průběh faktoru biaxiality B jako funkce relativní délky trhliny u studovaných zkušebních konfigurací, b) osvětlení postupu při určení skutečné R -křivky

univerzální lomová charakteristika materiálu. Důvodem je skutečnost, že R -plochy pro jednotlivé zkoumané konfigurace nejsou podmnožinami jedné plochy.

Z konceptu R -ploch však plyne zásadní přínos pro konstrukční analýzu prováděnou pomocí konceptu R -křivek. Lom kvazikřehkého tělesa konečné velikosti s relativní délkou zářezu α_0 nelze obecně popsat R -křivkou predikovanou metodou Bažant-Kazemi z rozměrového zákona pro tuto aktuální hodnotu α_0 . Šíření trhliny totiž charakterizuje tzv. *skutečná* R -křivka, která vznikne jako průsečnice dvou ploch: R -plochy určené sjednocením R -křivek z rozměrového zákona pro všechna α_0 dané geometrie a válcové plochy určené průběhem funkce charakteristiky constraintu, zde faktoru biaxiality B .

Stanovení skutečné R -křivky odpovídající materiálu, velikosti, tvaru a způsobu zatížení zkoumaného tělesa se provede následujícím způsobem: Nejdříve se určí R -plocha pro danou konfiguraci tělesa z R -křivek stanovených z rozměrového zákona metodou Bažant-Kazemi (zahrnutí vlivu velikosti). Tato R -plocha v souřadnicích $[\Delta a/c_f, B, \mathcal{R}/G_f]$ se pak transformuje dosazením známých hodnot G_f a c_f do absolutních souřadnic $[\Delta a, B, \mathcal{R}]$ (zahrnutí materiálových parametrů). Následně se do souřadnicové roviny $\Delta a \times B$ zanesou průběh funkce $B(\alpha)$ pro danou geometrii opět po transformaci do absolutních souřadnic dosazením hodnoty W do $\alpha = a/W$ (zahrnutí velikosti, podchycení vlivu geometrie prostřednictvím parametru constraintu). Válcová plocha řízená funkcí $B(a)$ vztyčená nad rovinou $\Delta a \times B$ proniká R -plochu v křivce, kterou lze označit jako skutečnou R -křivku pro zkoumané těleso. Celá situace je ilustrována na obr. 5b). Míra odklonu skutečné R -křivky od R -křivky určené z rozměrového zákona pro zadanou hodnotu α_0 závisí na velikosti analyzovaného tělesa. Navrhovaný přístup řeší problém závislosti na geometrii jen v rámci dané zkušební konfigurace (závislost na relativní délce trhliny), a to v důsledku popření existence univerzální rezistenční plochy pro všechny konfigurace.

5.3 NUMERICKÉ SIMULACE CHOVÁNÍ PŘEDPJATÝCH PRAŽCŮ

Součástí práce jsou také numerické simulace průkazných zkoušek železničních pražců z předpjatého betonu. Vyšetřovaly možnosti, jak ve spojení s vhodným spolehlivostním softwarem využít těchto simulací pro analýzu dopadu např. změn v konstrukci pražce či jeho materiálového složení na jeho konstrukční/lomové chování. Při těchto simulacích byly uvažovány některé ze vstupních veličin jako náhodné. Podrobnosti jsou uvedeny v disertační práci.

6 ZÁVĚR

Z teoretické části lze akcentovat zejména následující okruhy, v nichž předkládaná disertační práce znamená přínos do zpracovávané oblasti lomové mechaniky betonu:

- **Určování lomových parametrů:** *i)* Z výsledků parametrických studií provedených v MKP systému ANSYS byly odvozeny funkce geometrie $Y(\alpha)$ pro výpočet lomové houževnatosti na tělesech upravených z krychle (DEN-EC, DEN-T, SEN-CT). *ii)* Obdobným způsobem byly vytvořeny funkce $Z(\alpha)$ pro určení faktoru biaxiality nebo výpočet hodnoty T -napětí z hodnoty K_I pro tytéž geometrie. *iii)* Byla prezentována doporučení pro experimentální zjišťování K_{Ic} ze zkoušky DEN-EC týkající se délek zářezů použitelných pro správné provedení zkoušky.
- **Modely ekvivalentní elastické trhliny a R -křivky:** *i)* Model efektivní trhliny (ECM) byl rozšířen na geometrie využívající tělesa ve tvaru krychle (DEN-EC, DEN-T, SEN-CT). *ii)* Byly rozpracovány a zhodnoceny techniky určování R -křivek ze změny poddajnosti tělesa při šíření trhliny. Pro modelování změny odtěžovací poddajnosti byly navrženy 2 metody. *iii)* Byl představen koncept rezistenčních ploch, který zohledňuje vliv geometrie tělesa na jeho lomové chování prostřednictvím nástrojů dvouparametrové lomové mechaniky.

Nejzajímavější výsledky zkoušek a numerických analýz předložených v experimentální a výpočtové části jsou shrnuty v následujících bodech:

- **Lomové zkoušky pražcového betonu:** *i)* Byly prezentovány a vyhodnoceny výsledky dvou sad experimentů na tělesech z pražcového betonu provedené v několika zkušebních konfiguracích. Z nich byly určeny hodnoty parametrů modelu efektivní trhliny a hodnoty lomové energie. Dále byly zkonstruovány rezistenční křivky z podajnosti. *ii)* Pomocí numerických simulací lomových zkoušek byly zjišťovány lomové parametry pražcového betonu, které nebylo možno určit experimentálně. Byly odhadnuty efektivní a asymptotické lomové parametry. Ze zatěžovacích diagramů nasimulovaných zkoušek těles ve čtyřech zkoumaných konfiguracích s různými po-

čátečními délkami zářezů byly zkonstruovány rezistenční křivky z poddajnosti i rezistenční křivky z rozměrového zákona. Následně byly vytvořeny rezistenční plochy z rezistenčních křivek stanovených oběma metodami. Byly zkoumány a vyhodnoceny důsledky jevů plynoucích z konceptu rezistenčních ploch.

- **Numerické simulace chování předpjatých pražců:** Byly provedeny numerické simulace průkazných zkoušek předpjatých pražců, u kterých bylo dosaženo velmi dobré shody s experimentálními výsledky.

Z résumé provedeného výše je možné vyhodnotit úroveň splnění cílů této disertační práce (srov. s kapitolou CÍLE).

Elastické ekvivalentní modely a R -křivky:

- *ad 1.* Bylo dokázáno, že použití efektivních lomových parametrů za účelem kontroly kvality materiálů je možné, tyto modely však neposkytují možnosti porovnání materiálů v případě, že si zkušební tělesa neodpovídají svou velikostí nebo nemají stejnou zkušební konfiguraci. Zahrnutí vlivů velikosti a geometrie umožní až koncept rezistenčních ploch.
- *ad 2.* Tento cíl byl úspěšně vyřešen pro geometrie DEN-EC, DEN-T a SEN-CT, které patří mezi nejběžnější a nejméně náročné zkušební konfigurace, jež je možno připravit ze standardního zkušební tělesa ve tvaru krychle.
- *ad 3.* Tyto modely jsou zde podrobně rozebrány. Pro odhad maxima zatížení se používají ekvivalentní elastické modely, pro celou odezvu, tj. i pokritické chování, se aplikuje na ně navazující koncept R -křivek, potažmo R -ploch.
- *ad 4.* Zahrnutí vlivu geometrie tělesa na jeho lomové chování bylo navrženo prostřednictvím uvážení vlivu vyšších členů Williamsova rozvoje aproximujícího pole napětí a posunů v blízkosti kořene efektivní trhliny (druhý člen, tj. T -napětí resp. faktor biaxiality B) do techniky výpočtu predikce odezvy konstrukce. Tato práce rozšiřuje pohled na tyto modely a prohlubuje jejich teoretické zázemí.

Využití numerických simulací: V rámci možností MKP softwaru použitého v prováděných simulacích lze hodnotit výpočty týkající se všech tří formulovaných cílů druhé skupiny jako velmi výstižné.

Problémy, které se naopak objasnit nepodařilo, jsou spjaty jak s teoretickou tak s praktickou částí této práce. Teoreticky se nepodařilo zcela univerzálně vyřešit problém závislosti tvaru rezistenčních křivek na geometrii. Navržený koncept rezistenčních ploch problém řeší, avšak pouze v rámci jedné zkušební konfigurace (závislost na relativní délce trhliny). Nebyla však potvrzena hypotéza o existenci jedné rezistenční plochy univerzální pro všechny geometrie těles z jednoho materiálu. Hlavními nevyřešenými problémy experimentální části jsou zkušební postupy u navržených testů na tělesech ve tvaru krychle. Jejich zvládnutí je podmíněno použitím vhodných zkušebních zařízení a pomůcek.

LITERATURA

- [1] ATENA Program Documentation (2000), Cervenka Consulting, Revision 05/2000, Prague, Part 1, 3, 4.
- [2] Ayatollahi, M. R., Pavier, M. J., Smith, D. J. (1998) Determination of T -stress from finite element analysis for mode I and mixed mode I/II loading. *International Journal of Fracture*, 91, 283–298.
- [3] Barr, B. I. G., Sabir, B. B. (1985) Fracture toughness testing by means of the compact compression test specimen. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 37, No. 131, 88–94.
- [4] Bažant, Z. P., Planas, J. (1998) Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials. Boca Raton: CRC Press.
- [5] Bílek, V. (2001) Frost resistance and fracture characteristics of concrete. In proceedings of the 9th *International Expertcenterum Conference*, Bratislava.
- [6] Bílek, V., Mosler, T., Keršner, Z., Schmid, P. (2002) The possibility of self-curing concrete. In proceedings of conference *Challenges of Concrete Construction, part Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction*, Dundee, 51–60.
- [7] Elices, M., Planas, J. (1996) Fracture mechanics parameters of concrete. *Advanced Cement Based Materials*, 4, 116–127.
- [8] Griffith, A. A. (1921) The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. Royal Soc.*, London, 163–198.
- [9] 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 Research*, Vol. 6, 773–782.
- [10] Jirásek, M. (1998) Numerical modeling of deformation and failure of materials. Czech Technical University, Prague.
- [11] Karihaloo, B. L. (1995) Fracture mechanics and structural concrete. New York: Longman Scientific & Technical.
- [12] Keršner, Z., Bílek, V. (1998) Influence of microstructure on toughening mechanisms of concretes. *Engineering Mechanics*, Vol. 5, No. 3, 199–201.
- [13] Keršner, Z., Veselý, V., Schmid, P., Bílek, V. (2000) Lomová houževnatost cementových kompozitů z tlakového testu krychle se zářezy. Sborník konference *Betonářské dny 2000*, Pardubice, 228–231.
- [14] Knésl, Z., Bednář, K. (1998) Dvoupřímá lomová mechanika: Výpočet parametrů a jejich hodnoty. Ústav fyziky materiálů Akademie věd České republiky, Brno.

- [15] Leever, P. S., Radon, J. S. (1982) Inherent stress biaxiality in various fracture specimen geometries. *International Journal of Fracture*, Vol. 19, 311–325.
- [16] Matesová, D., Bayer, P., Schmid, P., Keršner, Z. (2002) Lomové charakteristiky alkalicky aktivovaných aluminosilikátů po namáhání vysokými teplotami. Sborník konference *Inženýrská mechanika 2002 (CD-ROM)*, Svratka.
- [17] Murakami, Y. (1987) Stress intensity factors handbook. Pergamon Press.
- [18] Nallathambi, P., Karihaloo, B. L. (1986) Determination of specimen-size independent fracture toughness of plain concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 38, 67–76.
- [19] Orlovsky, Y., Orlovska, E., Shnal', T., Pavliuk, Y. (2002) Relation between concrete structure and crack resistance under the influence of raised and high temperatures. Proceedings of conference *Non-Traditional Cement and Concrete*, Brno, 409–418.
- [20] RILEM Committee FMC 50 (Recommendation) (1985) Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams. *Materials and Structures*, 18, 285–290.
- [21] RILEM Committee FMT 89 (Recommendation) (1990a) Determination of the fracture parameters K_{Ic}^S a $CTOD_c$ of plain concrete using three-point bend tests. *Materials and Structures*, 23, 457–460.
- [22] RILEM Committee FMT 89 (Recommendation) (1990b) Size effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete. *Materials and Structures*, 23, 461–465.
- [23] Rovnaníková, P., Bayer, P., Pavlas, R. (2002) Properties of alkali-activated aluminosilicate materials after high temperatures load. Part 1: Composition and microstructure. In proceedings of conference *Non-Traditional Cement and Concrete*, Brno, 43–51.
- [24] Shah, S. P. (2002) High performance concrete: Strength vs. ductility and durability. In proceedings of conference *Non-Traditional Cement and Concrete*, Brno, 347–358.
- [25] Veselý, V., Keršner, Z. (2003) Úprava konceptu R -křivek pro popis lomu betonu – vliv T -napětí. Sborník semináře *Modelování v mechanice 2003*, Ostrava, 145–156.
- [26] Veselý, V., Keršner, Z. (2004) Resistance surface concept for concrete fracture. In proceedings of *FRAMCOS-5 Conference*, Vail Colorado, 407–414.
- [27] Williams, M. L. (1957) On the stress distribution at the base of stationary crack. *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, 109–114.

AUTOROVO CURRICULUM VITAE

Narozen 5. prosince 1975 v Třinci, ženatý, české národnosti.

Vzdělání

- 1990–1994 – gymnázium v Třinci.
- 1994–1999 – magisterské studium na Fakultě stavební VUT v Brně, obor Pozemní stavby, specializace Konstrukce a statika staveb, diplomová práce *Lomové parametry kvazikřehkých materiálů* podána na Ústavu stavební mechaniky (oceněna v soutěži ČKAIT 3. místem).
- 1999–2002 – denní doktorské studium na Fakultě stavební VUT v Brně, Ústavu stavební mechaniky (školitel Ing. Zbyněk Keršner, CSc.). Státní doktorská zkouška složena v červnu 2001.
- 2002 – 2004 – civilní služba na Obecním úřadě v Bystřici.

Výuka

Vedení cvičení v kurzech Statika stavebních konstrukcí, Pružnost a plasticita, Základy stavební mechaniky a Spolehlivost stavebních konstrukcí.

Odborná specializace

Postgraduální studium a výzkumná činnost zaměřena na obor lomové mechaniky s aplikacemi na beton a podobné kvazikřehké materiály. Konkrétněji na parametry a charakteristiky popisující lomové chování betonu a také metody jejich zjišťování. Zapojení do vědeckých projektů a grantů: záměr MŠMT CEZ:J22/98: 261100007, projekt SARA, granty GA ČR 103/97/K003, GA ČR 103/02/1030, GA ČR 103/03/1350.

Účast na odborných školeních a seminářích

- Seminář Elastic and inelastic analysis of heterogeneous materials. Praha, ČR, duben 2000.
- Summer academy 2001 – Advanced studies in structural engineering and CAE, Weimar, Německo, červenec/srpen 2001.

ABSTRACT

The class of elastic equivalent crack models and the resistance curve concept are the main topics of presented thesis. In the theoretical part of this work great attention is paid to the effective crack model by Nallathambi and Karihaloo, which deals with testing configuration of three-point bending notched beam (SEN-TPB). This model is analysed in detail and then extended for testing configurations based on cube or square prism, i.e. for eccentric compression of double edge notched cube (DEN-EC), centric tension of double edge notched cube (DEN-T) and compact tension of notched cube (SEN-CT). Subsequently the techniques of R -curve determination are in the scope. First the method of determination of R -curve from compliance by means of generalised Nalathambi-Karihaloo model is discussed, then methods based on size effect are described, in particular analytical method of R -curve determination from Bažant's size effect law known as Bažant-Kazemi method.

The so-called resistance surface concept, which brings a new perspective into the part of fracture mechanics of quasi-brittle materials studied in this work, is proposed in the end of the theoretical part. This approach extends the R -curve concept into three-dimensional space by introducing next dimension to this context, which is able to involve the influence of geometry into computational procedures. A characteristic of constraint of stress at the elastic equivalent crack tip is proposed as the third dimension, in this work biaxiality factor is used.

In the experimental and computational part results of experimental tests on specimens cast from concrete designed for pre-stressed railway sleepers are presented. Then also some numerical FEM simulations are described, which were able to provide required experimental results that could not be measured in the laboratory. Innovative techniques of fracture parameters evaluation proposed in the theoretical part for four investigated geometries are tested by processing the experimental and numerical results and then compared to established and proven methods. As a section of the experimental and numerical part of this thesis the structural and fracture analysis of pre-stressed railway sleepers is performed by means of a crack band based commercial FEM code.