



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

EFEKTIVNÍ LOMOVÉ PARAMETRY BETONU PRO ŽELEZNIČNÍ PRAŽCE

Václav Veselý¹, Miroslav Stibor²

V článku jsou prezentovány lomové charakteristiky betonu předpjatých železničních pražců zjišťované ze zkoušek ve dvou konfiguracích ve zkušebně Ústavu stavební mechaniky FAST VUT v Brně. Pomocí klasické zkoušky tříbodovým ohybem trámce se zářezem byly určovány lomová houževnatost K_{Ic} , lomová energie G_F a charakteristická délka l_{ch} . Na naměřená data byla aplikována také aproximativní nelineární úprava LELM, tzv. model efektivní trhliny, poskytující dva parametry pro popis stability trhliny – efektivní délku trhliny a_e a efektivní lomovou houževnatost K_{Ic}^e . Vedle zkoušky na trámcích se zářezem probíhalo určování lomových parametrů pro mód I i na krychlích se dvěma zářezy v protilehlých stěnách. Standardní zkušební těleso v betonovém stavitelství – krychle o hraně 150 mm – se totiž pro lomové experimenty zdá být vhodnou alternativou tělesa ve tvaru trámce, ve stavebnictví méně rozšířeného. Pro adaptaci modelu efektivní trhliny na krychli se zářezy byla použita analogie stanovování efektivních lomových parametrů z tělesa ve tvaru trámce. Je provedeno srovnání délek zářezů a , lomových houževnatostí K_{Ic} a jim odpovídajících efektivních parametrů a_e a K_{Ic}^e zjišťovaných na obou zmíněných zkušebních tělesech. V závěru je uveden příklad využití zjištěných lomových parametrů betonu. Některé z nich sloužily jako vstupy pro simulaci chování předpjatého betonového pražce při statické zkoušce v MKP systému ATENA.

Klíčová slova: cementové kompozity, efektivní lomová houževnatost, efektivní délka trhliny, krychle se zářezy.

1 Úvod

Lomově mechanické teorie a modely se v dnešní době začínají uplatňovat v betonovém stavitelství stále častěji, ale jejich přínos v některých oblastech tohoto odvětví je pořád nedocenen. Ve většině současných aplikací je lomová mechanika zastoupena jen v podobě modelů kohezivní trhliny, vestavěných v MKP kódech určených pro nelineární analýzu železobetonových konstrukcí (u nás např. [1]). Ovšem i techniky nevyužívající přímo MKP s implementací kohezivních modelů mohou přispět k rozšíření a „popularizaci“ lomové mechaniky mezi stavebními konstruktéry či technology.

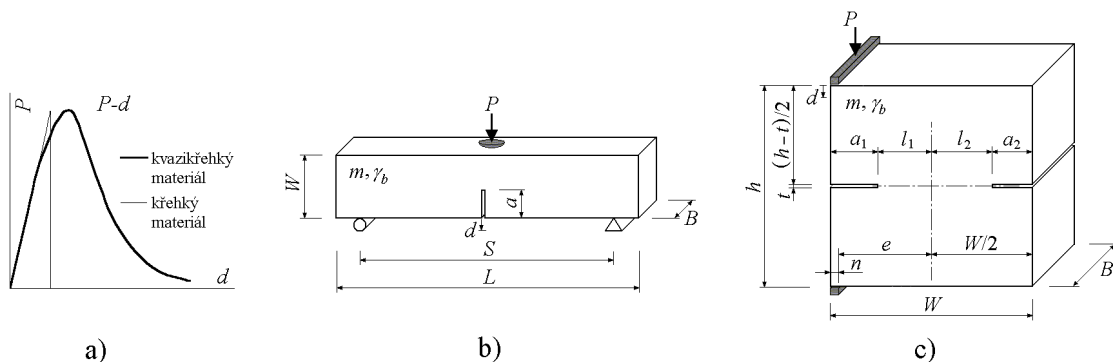
V posledních 20 letech bylo pro kvazikřehké materiály (jako beton, malta, zatvrdlá cementová pasta či některé horniny) navrženo několik úprav lineární elastické lomové mechaniky (LELM), které berou v úvahu nelineární lomové chování těchto materiálů přibližným způsobem. Používají pro popis stability trhliny, na rozdíl od jednoparametrové LELM, dva nezávislé parametry, a to vzhledem k nelineární

¹ Ing. Václav Veselý, vesely.vl@fce.vutbr.cz, Ústav stavební mechaniky, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, tel. 42 - 5 - 41147131, fax 42 - 5 - 41240994.

² Ing. Miroslav Stibor, stibor@vertigo.fme.vutbr.cz, Ústav stavební mechaniky, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, tel. 42 - 5 - 41147368, fax 42 - 5 - 41240994.

závislosti zatížení-přetvoření (v těchto modelech se jedná o část diagramu do dosažení maximálního zatížení – viz obr. 1a). Tyto tzv. modely efektivní trhliny provádějí lomo-ovou analýzu skutečné betonové konstrukce tak, že ji nahradí ekvivalentní lineárně-pružnou konstrukcí obsahující efektivní trhlinu, jejíž délka je větší než délka trhliny ve skutečné konstrukci. Jsou to např. dvouparametrový model (Two Parameter Model – TPM, [2], [5]), model efektivní trhliny (Effective Crack Model – ECM, [3], [5]) a také Bažantův model rozměrového efektu (Size effect model – SEM, [4], [5]). Parametry zmíněných dvouparametrových modelů jsou označovány jako tzv. elastické ekvivalenty (ekvivalenty odpovídajících veličin z LELM). Tento článek je zaměřen na elastické ekvivalenty lomové houževnatosti a délky trhliny za použití modelu efektivní trhliny (ECM).

Cílem práce předloženého příspěvku je aplikovat model efektivní trhliny [2] vytvořený pro klasickou zkoušku třibodového ohybu trámce se zářezem (Single Edge Notched Specimen – Three Point Bending Test – SEN-TPB, obr. 1b) také na jiné geometrie, které by mohly být vhodné pro zjišťování či kontrolu lomových vlastností betonu. Zkouška na krychli se zářezy (Double Edge Notched Specimen – Eccentric Compression Test – DEN-EC, obr. 1c) se jeví v určitých případech jako dobrá alternativa testů na trácích (v literatuře např. [6], [7], [8]), zvláště jde-li o kontrolu lomově mechanických vlastností stávajících konstrukcí, pro něž jsou uchovávány kontrolní vzorky ve tvaru krychlí.



Obr. 1: a) zatěžovací křivka kvazikřehkého a křehkého materiálu, b) zkouška SEN-TPB, c) zkouška DEN-EC.

2 Model efektivní trhliny – určení lomových parametrů

Vliv nelineárního chování do dosažení únosnosti skutečné betonové konstrukce s ostrým vrubem (trhlinou) délky a je v ECM zahrnut pomocí ekvivalentní pružné konstrukce s trhlinou efektivní délky $a_e > a$. Tato efektivní délka trhliny a_e je počítána ze sečné tuhosti skutečného betonového vzorku při maximálním zatížení P_{max} , způsob výpočtu je naznačen v další části.

Podle ECM nastane lom ve skutečné betonové konstrukci tehdy, když faktor intenzity napětí, který odpovídá efektivní délce trhliny a_e , dosáhne kritické hodnoty, zde označené K_{Ic}^e :

$$K_I = K_{Ic}^e, \quad a = a_e. \quad (1)$$

Počátek lomu je tedy popsán dvěma parametry.

Lomové parametry a_e a K_{Ic}^e se získají vyhodnocením lomových zkoušek. Postup určení těchto elastických ekvivalentů byl autory modelu ECM (Nallathambi a Karihaloo [3]) navržen pro třibodový ohyb trámce se zářezem. Autoři tohoto článku navrhuji rozšíření modelu ECM pro excentrický tlak krychle se dvěma zářezy.

2.1 Třibodový ohyb trámce se zářezem (SEN-TPB)

Pro výpočet a_e a K_{Ic}^e jsou jako výstup zkoušky požadovány pouze dva body z diagramu zatížení-průhyb uprostřed rozpětí $[P, d]$. První dvojice, označena P_i-d_i , je z počáteční lineárně-pružné oblasti, druhá s označením $P_{max}-d_{Pmax}$ je ve vrcholu zatížení nebo těsně před ním. Průběžný záznam závislosti $P-d$ pro doporučenou zkušební metodu není nutný, ovšem je-li k dispozici, odečtení bodů $[P_i, d_i]$ a $[P_{max}, d_{Pmax}]$ je přesnější. V tomto případě je také možno využít k výpočtu a_e a K_{Ic}^e (a dalších lomových charakteristik) PHP skript dostupný na internetové adrese <http://stibor.fce.vutbr.cz/~stibor/graf.php>³.

Vztah (2), který lze nalézt např. v [5], vyjadřuje průhyb trámce se zářezem uprostřed rozpětí:

$$d = \frac{P}{4EB} \left[\frac{S^3}{W^3} + 2\kappa(1+\nu) \frac{S}{W} \right] + \frac{q}{4EB} \left[\frac{5}{8} \frac{S^4}{W^3} + \kappa(1+\nu) \frac{S^2}{W} \right] + \frac{9}{2EB} \left(\frac{S}{W} \right)^2 \left(P + \frac{qS}{2} \right) \int_0^\alpha x Y^2(x) dx, \quad (2)$$

kde q je vlastní tíha vzorku na jednotku délky, $\alpha = a/W$ a $Y(x)$ je funkce geometrie pro třibodově ohýbaný nosník. Smysl ostatních symbolů je zřejmý z obr. 1b. První dva sčítance odpovídají běžnému průhybu uprostřed rozpětí nosníku bez zářezu od zatížení silou uprostřed a od vlastní tíhy. Je zde uváženo i vliv smyku na průhyb, součinitel smyku κ pro obdélníkový průřez je 1,2 [9], Poissonovo číslo ν se pro beton uvažuje okolo hodnoty 0,2. Třetí výraz ve vztahu (2) odpovídá dodatečnému průhybu uprostřed rozpětí, jenž je způsoben přítomností zářezu.

Efektivní délka trhliny a_e se stanoví takto:

- Ze vztahu (2) se vyjádří modul pružnosti E materiálu. Do takto upraveného vzorce se dosadí dvojice naměřených hodnot P_i-d_i . Horní mez integrálu $\alpha = a/W$ ve třetím sčítanci je určena počáteční délkou zářezu a vytvořeného v trávci.
- Vypočtený modul pružnosti E se opět dosadí do (2) spolu se silou P_{max} . Průhyb určený z těchto vstupů nebude nyní odpovídat skutečně zjištěnému průhybu d_{Pmax} při zatížení P_{max} . Proto nyní hledáme (iterativním postupem) délku trhliny a (označme ji a_e), příslušející takovému průhybu d , které je se zvolenou přesností roven d_{Pmax} .

Hodnota a_e z poslední uskutečněné iterace je efektivní délka trhliny (ta je větší než původní délka zářezu a). V [5] je stanovení a_e navrženo jiným způsobem, iterace probíhá přes modul pružnosti E . Jedná se o rovnocenné postupy.

Kritický faktor intenzity napětí K_{Ic}^e se nyní vypočte ze vztahu pro LELM, kde za a dosadíme a_e :

$$K_{Ic}^e = \sigma \sqrt{a_e} Y = \frac{3}{2} \frac{S \left(P + \frac{qS}{2} \right)}{BW^2} \sqrt{a_e} Y. \quad (3)$$

³ Program STICRACK vytvořený Ing. Miroslavem Stiborem. Načítá a zpracovává výstupní soubory měřicího zařízení (závislosti zatížení a přemístění na čase) a vyhodnocuje lomové charakteristiky zkoušeného materiálu.

2.2 Excentrický tlak krychle se zářezy (DEN-EC)

Pro určení efektivních lomových parametrů je ze zkoušky DEN-EC na krychli se zářezy potřeba stejných výstupů, zkouška tedy probíhá obdobným způsobem jako SEN-TPB; monitoruje se síla v závislosti na posunu čelistí lisu. Stanovení efektivní délky trhliny je provedeno podobně jako u SEN-TPB, k vypočtení a_{2e} iterativním postupem se používá vzorec vyjadřující vztah mezi naměřenými veličinami (tedy P a d), v němž vystupuje jako proměnná délka otevírané trhliny (popř. vztažená k W). Pro svislý posun d bodu v místě vnášení síly P (viz obr. 1c) byl proto odvozen následující vztah:

$$d = \frac{P}{EB} \left[32 \left(\frac{a_1 - n}{h - t} \right)^3 + 4 \kappa (1 + \nu) \left(\frac{a_1 - n}{h - t} \right) \right] + \frac{q}{EB(h - t)} \left[4 \frac{(n^4 - 4na_1^3 + 3a_1^4)}{(h - t)^2} + 2 \kappa (1 + \nu) (a_1^2 - n^2) \right] + \frac{P}{EB} \left[\frac{h}{W - a_1} + 12 \frac{h \left(\frac{W + a_1 - n}{2} \right)^2}{(W - a_1)^3} \right] + \frac{2P}{EB} \int_0^{\alpha_2} x Y^2(\alpha_1, x) dx. \quad (4)$$

Význam jednotlivých symbolů je zřejmý z obr. 2, α_1 je zde rovno a_1/W , $\alpha_2 = a_2/W$. $Y(\alpha_1, \alpha_2)$ je funkce geometrie, jež bude popsána dále v textu. První dva sčítance vyjadřují tu část posunu, která je zapříčiněna působením síly P a vlastní tíhy (q je vlastní tíha vzorku na jednotku délky) na oblasti krychle mezi místem vnášení zatížení a zářezem a_1 . Předpokládá se působení těchto částí jako konzol a nutně se bere v úvahu vliv smyku ($\kappa = 1, 2$). Třetí sčítanec představuje posun při uvažování prvku jako mimostředně tlaččeného prutu. Čtvrtá část vzorce reprezentuje vliv existence zářezu a_2 na posun zmíněného bodu na krychli pod vneseným zatížením ve zkušebním zařízení. Tato část byla odvozena za použití Castiglianova principu a vystihuje skutečnost velmi přesně. Má ovšem stejná omezení použitelnosti jako dále popsaná funkce geometrie $Y(\alpha_1, \alpha_2)$, protože je na ní závislá. První tři části odvozené za předpokladů nosníkové teorie již samozřejmě tak přesné nejsou; relativní chyba posunů spočtených podle vzorce (4) (při vztažení k „přesným“ hodnotám plynoucím z MKP výpočtů) je okolo 12 %. V případě vzorce (2) je to pro rozměry běžně zkoušených trámů asi 5 %.

Vnesení mírné nepřesnosti do výpočtu a_{2e} prostřednictvím vztahu (4) hodnotu efektivní délky trhliny dramaticky neovlivňuje, protože (4) je pouze iterační předpis. Autoři nyní pracují na zpřesnění uvedeného vztahu.

Efektivní lomovou houževnatost K_{Ic}^e nyní vypočteme ze vztahu pro LELM nahrazením délky trhliny a_2 její efektivní hodnotou a_{2e} :

$$K_{Ic}^e = \frac{P_{\max}}{BW} \sqrt{a_{2e}} Y(\alpha_1, \alpha_2), \quad (5)$$

kde funkce geometrie $Y(\alpha_1, \alpha_2)$ má tvar

$$\begin{aligned}
Y(\alpha_1, \alpha_2) = & A_0 + A_1\alpha_1 + A_2\alpha_2 + A_3\alpha_1^2 + A_4\alpha_1\alpha_2 + A_5\alpha_2^2 + A_6\alpha_1^3 + A_7\alpha_1^2\alpha_2 + \\
& + A_8\alpha_1\alpha_2^2 + A_9\alpha_2^3 + A_{10}\alpha_1^3\alpha_2 + A_{11}\alpha_1^2\alpha_2^2 + A_{12}\alpha_1\alpha_2^3 + A_{13}\alpha_2^4 + \\
& + A_{14}\alpha_1^3\alpha_2^2 + A_{15}\alpha_1^2\alpha_2^3 + A_{16}\alpha_1\alpha_2^4 + A_{17}\alpha_1^3\alpha_2^3 + A_{18}\alpha_1^2\alpha_2^4 + A_{19}\alpha_1^3\alpha_2^4.
\end{aligned} \quad (6)$$

i	koeficienty A_i		
	$a_2 = 20$ až 70 mm	$a_2 = 70$ až 85 mm	$a_2 = 85$ až 95 mm
0	-17,023	-45363,106	-1940090,036
1	234,152	556132,104	23338424,299
2	307,442	385554,026	14234632,783
3	-969,003	-2285307,266	-93734287,182
4	-3942,064	-4727903,060	-171262123,767
5	-1976,116	-1228856,293	-39151444,729
6	1558,347	3161139,177	125855282,106
7	16862,975	19435394,447	687969080,587
8	25333,421	15073923,986	471124973,009
9	5419,817	1741719,569	47848868,690
10	-25354,590	-26897157,224	-923947310,225
11	-108483,872	-61991119,515	-1892926064,557
12	-69219,692	-21373168,986	-575893805,057
13	-5590,295	-927184,632	-21928695,572
14	162963,525	85844630,995	2542908451,857
15	297228,228	87940034,224	2314416522,879
16	71412,046	11383274,916	263984247,808
17	-445450,015	-121869484,760	-3110095015,437
18	-307662,028	-46865828,465	-1061192086,942
19	463633,007	65012314,632	1426539473,955

Tab. 1: Koeficienty polynomu (6).

Koeficienty A_0 až A_{19} jsou uvedeny v tab. 1. Tento polynom byl vytvořen regresí z výsledků výpočtu K -faktoru v MKP systému ANSYS [10]. Výpočty byly provedeny pro rozsah $a_1 = 35$ až 45 mm (s krokem 1 mm) a $a_2 = 20$ až 95 mm (s krokem 2 mm) na krychli o hraně 150 mm ($t = 2$ mm, $n = 6$ mm, viz obr. 1b). Shoda funkční hodnoty $Y(\alpha_1, \alpha_2)$ se spočtenými daty je i na okrajích oblasti do 0,5 %.

3 Vyhodnocení experimentů

Lomovým experimentům byly podrobeny zkušební vzorky ve tvaru trámů a krychlí, jež byly odlity z jedné betonové směsi pro výrobu prefabrikovaných předpjatých železničních prahů. Jednalo se o 6 trámů o rozměrech 80×80×480 mm a 6 krychlí o hraně 150 mm. Vzorky zrály ve vlhkém uložení, den před zkouškou do nich byly diamantovou pilou vytvořeny zářezy. Popis geometrie zkušebních těles je v tab. 2 a tab. 3. Zkoušky proběhly při stáří vzorků 28 dnů. Tlaková pevnost f_c zkoušeného betonu zjišťovaná při tomto stáří na krychli o hraně 150 mm byla 80,4 MPa. V průběhu zkoušky na trácích i krychlích byl automaticky zaznamenáván diagram zatížení-posun ($P-d$).

K vyhodnocení zkoušek byla využita internetová aplikace STICRACK. V tab. 4 a tab. 5 je možno porovnat lomové parametry prahového betonu zjišťované na trácích se zářezem a krychlích se dvěma zářezy. Jedná se o délku zářezu a a lomovou houževnatost K_{Ic}^L (dle LELM) a jejich ekvivalenty podle ECM – efektivní délku trhliny a_e a efektivní lomovou houževnatost K_{Ic}^e . Také je možno srovnat moduly pružnosti E , jež poskytuje výpočetní postup pro určení efektivní délky trhliny (viz odst. 2). Ze zkoušky SEN-TPB byly ještě určeny další parametry betonu popisující jeho křehkost/duktilitu – lomová energie G_F (dle doporučení RILEM, nebylo ovšem dodrženo kritérium rozměr trámce) a charakteristická délka l_{ch} . Pro všechny lomové charakteristiky jsou tabulky doplněny o aritmetické průměry a variační koeficienty.

Ozn.	W	B	S	L	a
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
B1	79,5	84,4	400	483	25,8
B2	79,5	82,4	400	479	25,9
B3	79,5	84,5	400	484	25,5
B4	79,5	83,7	400	482	26,0
B5	79,5	84,5	400	481	25,6
B6	79,3	82,2	400	479	25,9

Tab. 2: Rozměry trámců.

Ozn.	W	B	h	e	a_1	a_2
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
KI1	150,5	151,3	150,3	72	40,3	40,4
KI2	150,1	150,3	150,3	72	39,7	39,9
KI3	150,2	150,9	150,1	72	40,0	40,0
KI4	150,2	149,9	150,2	72	39,9	40,0
KI5	150,4	149,1	150,3	72	39,9	40,3
KI6	150,3	150,6	150,3	72	39,9	40,1

Tab. 3: Rozměry krychlí.

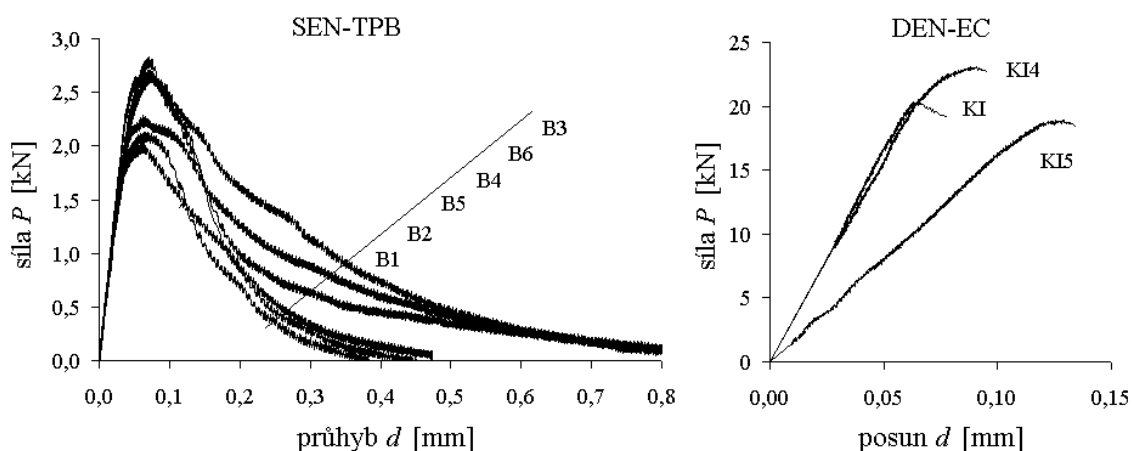
Ozn.	LELM		ECM		E	G_F	l_{ch}
	a	K_{Ic}^L	a_e	K_{Ic}^e	[GPa]	[GPa]	[mm]
	[mm]	[MPa.m ^{1/2}]	[mm]	[MPa.m ^{1/2}]			
B1	25,8	1,043	42,5	1,337	39,5	145,1	196,4
B2	25,9	0,962	40,7	1,207	38,4	164,8	252,9
B3	25,5	1,201	39,3	1,491	39,9	274,1	446,6
B4	26,0	1,164	37,8	1,404	36,7	166,3	251,1
B5	25,6	1,158	35,9	1,370	36,6	166,6	244,0
B6	25,9	1,031	38,6	1,258	37,1	215,3	329,5
mean	25,8	1,093	39,1	1,345	38,0	188,7	286,8
cov [%]	0,7	8,6	5,9	7,6	3,8	25,4	31,1

Tab. 4: Lomové parametry prázecového betonu zjišťované na tělesech ve tvaru trámce se zářezem (označeny B1-B6).

Ozn.	LELM		ECM		E
	a_2	K_{Ic}^L	a_{2e}	K_{Ic}^e	[GPa]
	[mm]	[MPa.m ^{1/2}]	[mm]	[MPa.m ^{1/2}]	
KI2	39,9	0,978	71,3	1,308	37,5
KI4	40,0	1,125	78,4	1,574	35,9
KI5	40,3	0,926	71,0	1,229	18,7
mean	40,1	1,010	73,6	1,370	36,7
cov [%]	0,4	10,2	5,7	13,2	3,0

Tab. 5: Lomové parametry z krychlí se zářezem (označeny KI1-KI6). Na vzorcích KI1, KI3 a KI6 testy neproběhly správně, výsledky zde tedy nejsou zahrnuty. Modul pružnosti u vzorku KI5 (zašedlé pole) není započten do hodnoty aritmetického průměru a cov.

Průběhy závislosti síly P vnášené čelistmi zkušebního zařízení na jejich posunu d je možno si prohlédnout v grafech na následujícím obrázku.



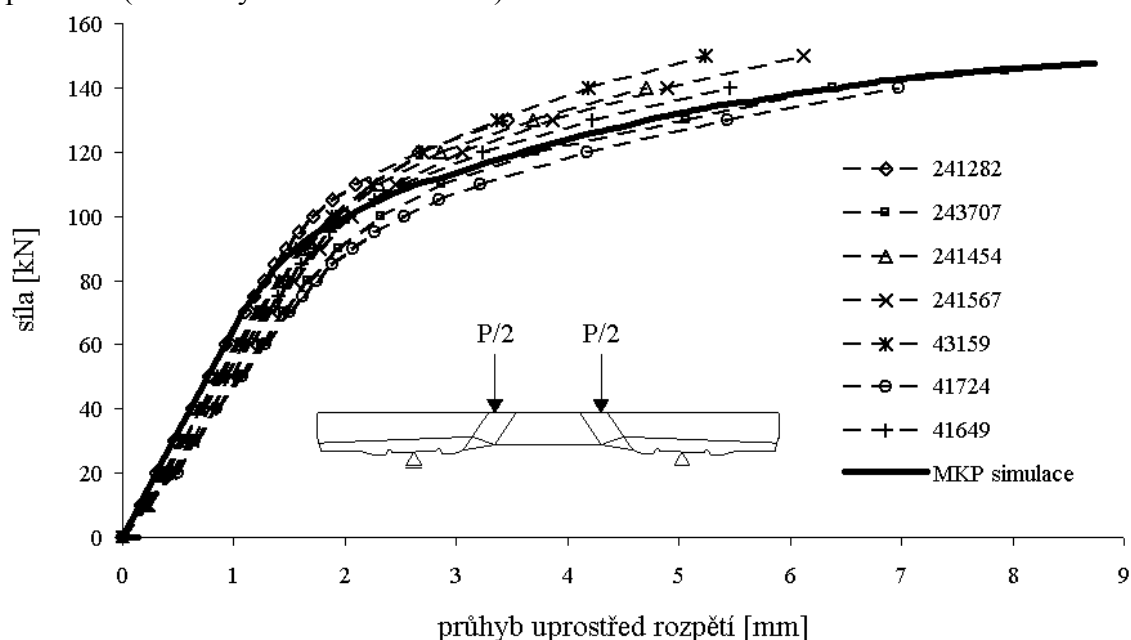
Obr. 2: Zatěžovací křivky ze zkoušek SEN-TPB a DEN-EC.

Z tabulek 4 a 5 lze vypořádat, že moduly pružnosti zjištěné na krychli ze zářezy jsou ve vynikající shodě s údaji pořízenými na stejném materiálu pomocí zkoušky SEN-TPB. Rovněž lomové houževnatosti, a to jak na úrovni LELM, tak za použití nově upravené metodiky ECM. Rozdíl mezi K_{Ic}^L a K_{Ic}^e , který se pohybuje kolem 30 %, je u cementových kompozitů obvyklý. Nesoulad velikosti efektivních trhlin na obou tělesech lze částečně přičíst nepřesnému odhadu posunu bodu pod vnášeným zatížením u krychle se zářezy – viz rovnice (4). Rozdíl $a_e - a$ (tzv. přírůstek do efektivní trhliny) činí pro DEN-EC asi 30 mm, zatímco pro SEN-TPB je to zhruba polovina.

S ohledem na spíše křehký způsob porušení při zkoušce DEN-EC (pravděpodobně velká rychlost zatěžování) nebyla určována lomová energie G_F , proto nemohla být vyčíslena charakteristická délka l_{ch} .

4 Využití zjištěných lomových parametrů

Motivace k provedení popsáných experimentů byla kromě odzkoušení ECM na DEN-EC také následující: zjistit lomové a mechanické charakteristiky pražcového betonu, které slouží jako vstupy do materiálových modelů betonu pro MKP systém ATENA. Pomocí tohoto systému s dobře nakalibrovanými materiálovými modely betonu a předpínací výztuže byly provedeny numerické simulace chování předpjatého prefabrikovaného železničního pražce. Prozatím se jednalo pouze o simulace průkazní zkoušky (čtyřbodový ohyb, viz zatěžovací schéma na obr. 3). Byl použit SBETA materiálový model [1] pro beton, pro který byly ze zkoušek popsáných výše určeny vstupní hodnoty lomově-mechanických parametrů G_F a E a pevností v tlaku f_c a tahu f_t . Popis numerického modelu a další podrobnosti týkající se numerických simulací chování pražců je možno najít v [11]. V tomto článku na obr. 3 je uvedeno pouze porovnání zatěžovacích diagramů numerické simulace a skutečných průkazních zkoušek na sedmi předpjatých pražcích (označeny na obrázku číslem).



Obr. 3: Porovnání zatěžovacích diagramů z experimentálních zkoušek na pražcích a MKP simulace v systému ATENA.

5 Závěr

Byla navržena metoda určování efektivních lomových parametrů podle dvouparametrového modelu efektivní trhliny pro krychle se zářezy. Při porovnání s výsledky z tradiční zkoušky SEN-TPB se ukazuje, že nově navržený postup je v oblasti technologie stavebních hmot použitelný. Lomové houževnatosti, stejně jako moduly pružnosti, vykazují hodnoty korespondující se SEN-TPB. Je třeba doladit vyčíslení přemístění (4), což by mělo vést ještě k přesnějšímu určení efektivní délky trhliny. Způsob stanovování lomových parametrů podle navržené metodiky je nutno odzkoušet a zkontrolovat na kvazikřehkých materiálech jiného složení.

Čtenáře, jenž věnoval tomuto článku tolik energie, že se dočetl až po toto místo, upřímně obdivujeme a litujeme. Současně jej ale můžeme potěšit, že uvedená metodika by v praxi mohla najít uplatnění.

Poděkování

Práce na tomto příspěvku byly podporovány z prostředků projektu GAČR 103/00/0603 a výzkumného záměru CEZ: J22/98: 261100007.

Literatura

- [1] ATENA Program Documentation, Cervenka Consulting, Revision 05/2000, May 2000, Part 1, 3, 4
- [2] Jenq, Y. S., Shah, S. P. A two parameter fracture model for concrete. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 111, 1985, 1227-1241
- [3] Nallathambi, P., Karihaloo, B. L. Determination of specimen-size independent fracture toughness of plain concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 38, 1986, 67-76
- [4] Bažant, Z. P., Planas, J. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials. *CRC Press*, Boca Raton, 1998
- [5] Karihaloo, B. L. Fracture mechanics and structural concrete. *Longman Scientific & Technical*, New York, 1995
- [6] Barr, B. I. G., Sabir, B. B. Fracture Toughness Testing by Means of the Compact Compression Test Specimen. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 37, No. 131, June 1985, 88-94
- [7] Barr, B. I. G., Abusiaf, H. F., Sener, S. Size effect and fracture energy studies using compact compression specimens. *Materials and structures*, Vol. 31, 1998, 36-41
- [8] Keršner, Z., Veselý, V., Schmid, P., Bílek, V. Lomová houževnatost cementových kompozitů z tlakového testu krychle se zářezy. *Sborník konference Betonářské dny 2000*, Pardubice, prosinec 2000, 228-231
- [9] Šmiřák, S. Energetické principy a variační metody v teorii pružnosti. Skriptum VUT v Brně, ÚSM FAST VUT v Brně, 1998
- [10] ANSYS, Users Manual, Version 5.7, Swanson Analysis System, Inc., Houston, Pennsylvania, 2000
- [11] Veselý, V. Simulace průkazních zkoušek prázdců z předpjatého betonu. Sborník komorního semináře *Problémy modelování*, Ostrava, leden 2002, ISBN 80-214-2017-0