

**Václav VESELÝ<sup>1</sup>, Jakub SOBEK<sup>2</sup>**

**NUMERICKÁ STUDIE PORUŠOVÁNÍ TĚLES Z CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ  
PŘI MODIFIKACI LOMOVÉHO TESTU EXCENTRICKÝM TAHEM**

**NUMERICAL STUDY OF FAILURE OF CEMENTITIOUS COMPOSITE SPECIMENS  
IN MODIFIED COMPACT TENSION FRACTURE TEST**

**Abstrakt**

Příspěvek představuje numerickou analýzu průběhu porušení těles zatěžovaných v modifikované zkušební konfiguraci testu excentrickým tahem (Compact Tension test, CT), plánovaných pro použití při zjišťování lomových parametrů kvazikřehkých materiálů na bázi cementu, a to včetně rozsahu lomové procesní zóny. Série těles zahrnující tři velikosti, určená pro experimenty za využití rentgenografie, byla modelována v programu ATENA 2D. Zváženy byly různé varianty excentricity tahové síly, jejího vnesení do tělesa a délek iniciačního zářezu pro optimalizaci počtu náročných experimentů.

**Klíčová slova**

Zkouška excentrickým tahem, kvazikřehký lom, lomová procesní zóna, numerická simulace, model kohezivní trhliny.

**Abstract**

The paper introduces a numerical analysis of failure process in specimens loaded in modified Compact Tension (CT) test configuration which are intended to be used for estimation of fracture parameters of quasi-brittle cement-based materials, including the extent of the fracture process zone. Specimen set (consisting of three sizes), designated to future testing in lab by X-ray imaging, was modelled in ATENA 2D software. Several variants of the tensile load eccentricity, the way of the load application and the initial crack length were considered in order to optimize the range of demanding experiments.

**Keywords**

Compact tension test, quasi-brittle fracture, fracture process zone, numerical simulation, cohesive crack model.

## **1 ÚVOD**

Hodnoty lomových parametrů, vystupujících jako veličiny v modelech pro popis lomového chování materiálů, určované ze záznamů lomových zkoušek dnes dostupnými a doporučovanými metodami, jsou závislé nejen na velikosti a tvaru (i v drobných detailech, např. [1,2]) zkušební tělesa, ale i okrajových podmínkách při zatěžovacích zkouškách. Zejména v oblasti kvazikřehkého lomu hovoříme v této souvislosti o tzv. rozměrovém efektu (size effect), vlivu geometrie (shape effect) a vlivu volných okrajů (boundary effect) na hodnoty zjišťovaných lomových parametrů [3,4].

---

<sup>1</sup> Ing. Václav Veselý, Ph.D., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, tel.: (+420) 541 147 362, e-mail: vesely.v1@fce.vutbr.cz.

<sup>2</sup> Ing. Jakub Sobek, Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, tel.: (+420) 541 147 116, e-mail: sobek.j@fce.vutbr.cz.

Pro eliminaci (popř. rozpoznání) těchto vlivů z výsledků zatěžovacích zkoušek by mělo být přihlédnuto k postupu a distribuci samotného porušení materiálu tělesa v tzv. lomové procesní zóně (LPZ). Rozsah této zóny souvisí s rozložením napjatosti, determinovaným právě okrajovými podmínkami a tvarem tělesa – míra stísněnosti napětí a deformace (constraintu) u čela šířící se trhliny se pro různá tělesa a pro různé druhy zatížení mění. To, jakým způsobem a do jaké míry je možné tohoto jevu využít pro určení materiálových hodnot lomových charakteristik, je předmětem prováděného výzkumu, jehož část je zde představena.

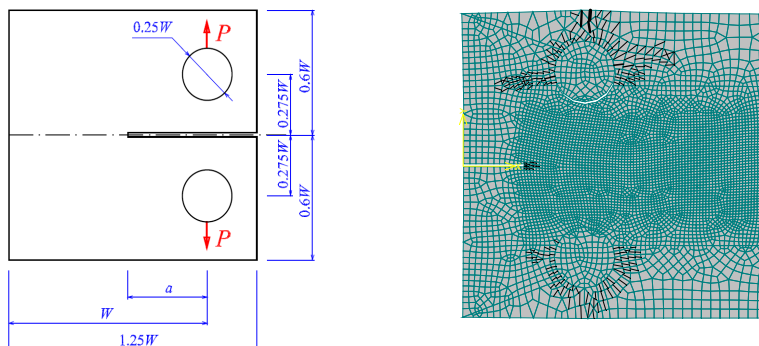
V rámci příspěvku autoři navrhuji modifikaci zkoušky excentrickým tahem (Compact Tension – CT) k jejímu využití pro kvazikřehké materiály. Úpravy excentricity tahové síly způsobují výrazné změny v rozložení napětí ve zkoušeném tělese (a tedy i stísnění napětí a deformací v okolí čela trhliny). Série těchto modifikovaných zkušebních těles je v současné chvíli připravena k testování v laboratoři při využití rentgenografie (metodami představenými např. v [5,6]). Vzhledem k možnostem experimentální techniky, jež má být k testům využita, je nutné testovat tělesa relativně velmi malých rozměrů (v relaci s běžnými rozměry těles z cementových kompozitů, jež jsou určeny v závislosti na velikosti kameniva).

## 2 NUMERICKÁ STUDIE

Pro experimentální studii byly vybrány tři velikosti těles (označeny jako L, M a S – large, medium a small), aby mohly být studovány výše vyjmenované vlivy (size, shape, boundary effects). Dále pak byly uvažovány různé excentricity vnášení tahového zatížení (A až C, viz dále) pro dosažení rozdílné úrovně constraintu. Prostřednictvím zde prezentované numerické studie byl optimalizován způsob vnesení tahového zatížení do tělesa, který (vzhledem k nízké tahové pevnosti zkoumaných cementových kompozitů) způsobuje komplikace v provedení testů – byly uvažovány rozličné varianty zatěžovacích přílohek a jejich spojení s vlastním testovacím tělesem; dále byla sledována odezva tělesa v závislosti na délce iniciačního zářezu.

### 2.1 Uvažované varianty konfigurace testu modCT

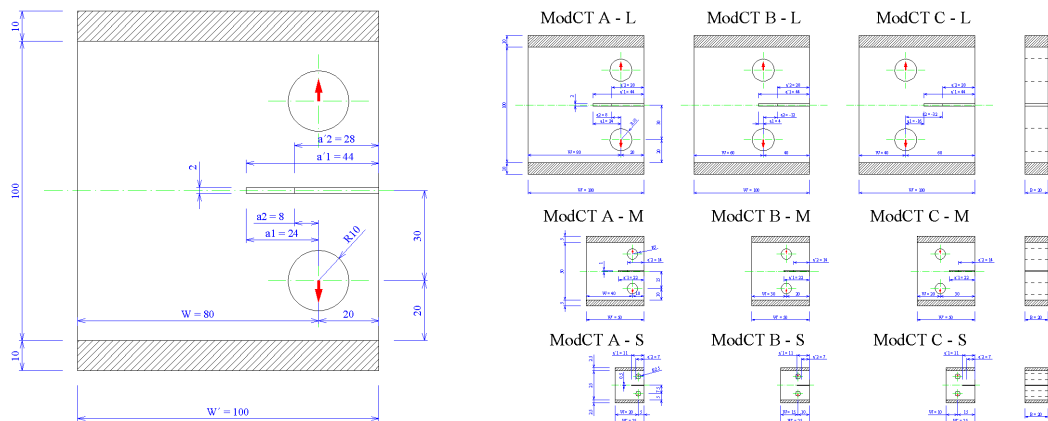
Klasický CT test (schéma viz obr. 1 vlevo) spočívá v rozevírání kompaktního tělesa excentricky vnášenou tahovou silou; bývá nejčastěji používán pro zkoušení kovových materiálů (ocel, hliník, atd. – tedy materiály s relativně vysokou pevností v tahu oproti cementovým kompozitům). Body vnášení tahového zatížení jsou situovány do míst odebrání materiálu, tedy do vyvrtaných otvorů; zatížení je vneseno skrze čepy, vsunuté do těchto otvorů. U kvazikřehkých materiálů však vyvstává při tomto řešení několik problémů. A to zejména s vytvářením otvorů (pro vložení čepů zatěžovacího zařízení) a pak při jejich samotném zatěžování. Při numerických simulacích CT tělesa (z kvazikřehkého materiálu) s otvory v místě vnášení síly/posunu bylo zjištěno, že těleso se začne porušovat právě v místě styku tělesa a čepu vnášejícího zatížení (viz obr. 1 vpravo). Takové chování zjištěné u reálného experimentu by zcela znehodnotilo výsledek.



Obr. 1: Vlevo schéma klasické CT geometrie, vpravo ukázka nasimulovaného porušení pro případ bez přílohek (přímý styk tělesa a čepu)

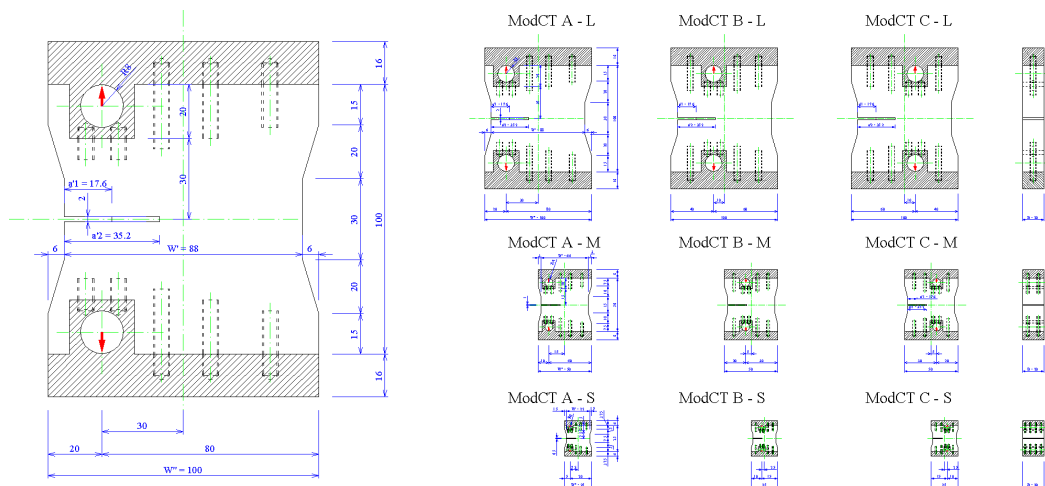
Z tohoto důvodu se hledaly jiné možnosti, jak docílit vnesení zatížení tak, aby k požadovanému porušení došlo výlučně v místě iniciačního zářezu. Konfigurace modifikovaného CT testu, lišící se způsobem vnášení tahového zatížení za pomoci resp. přímo přes kovové příložky (pracovně ocelové, při radiografii je však výhodnější použít vhodný lehčí materiál, který by nezpůsoboval stínění a odrazy rentgenových paprsků, např. dural či karbonový kompozit), shrnují následující obrázky.

Na obr. 2 je zobrazena konfigurace, kde jsou stěny tělesa kolmé ke vnášené tahové síle vyztuženy příložkami zabráňujícími zmíněnému porušení, přičemž je zachován způsob vnášení zatížení skrz otvory.



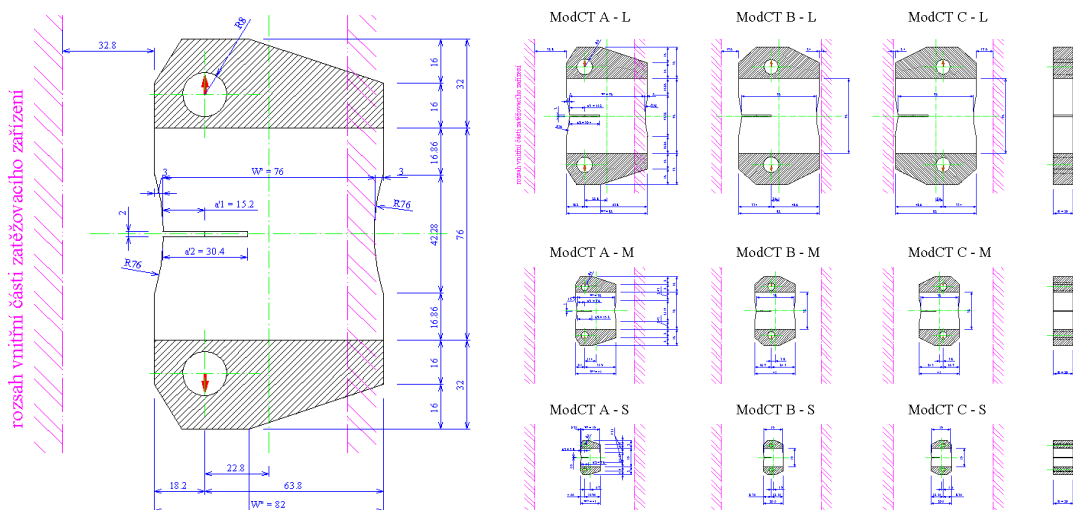
Obr. 2: Ukázka jedné z uvažovaných variant konfigurace modCT – vlevo detail geometrie tělesa s příložkami, vpravo uvažovaná kompletní série těles (L, M a S) s různými excentricitami (A, B a C)

Obr. 3 ukazuje variantu, kde je příložka zasazena do tělesa během jeho přípravy. Otvor pro vložení zatěžovacích čepů je vytvořen již v příložce, aby nebylo třeba vlastní zkušební těleso po odformování dále opracovávat. Soudržnost materiálu modifikovaného CT tělesa a materiálu příložky je podporována vložím výztužných (sřahovacích) prutů. Zúžení (vykrojení) tělesa v oblasti ligamentu je provedeno za účelem zvýšení koncentrace napětí vedoucí k zabezpečení iniciace trhliny z vrcholu zářezu (doplňuje vytvořený zářez).



Obr. 3: Konfigurace s vykrojením tělesa a příložkou, která spolupůsobí se samotným tělesem pomocí sřahovacích trnů (čárkovaně) – vlevo geometrie tělesa s příložkami, vpravo kompletní série těles

Konfigurace na obr. 4 kombinuje obě předchozí varianty. Rozdíly jsou v upevnění přílozek, které jsou zamýšleny jako lepené (dokonalý styk modifikovaného tělesa s příložkou). Menší rozdíl je i v hladké křivce vykrojení. V uvedeném obrázku je navíc naznačen vnitřní prostor zatěžovacího zařízení, určeného pro rentgenografii – je z něj zřejmé, že pro největší těleso s největší excentricitou tahové síly (konfigurace A – L) bude nutné navrhnut úpravy zatěžovacího zařízení.



Obr. 4: Konfigurace s přilepenými příložkami a vykrojením; jsou vyznačeny limity vnitřní části komory zatěžovacího stroje – vlevo geometrie tělesa s příložkami, vpravo kompletní série těles

## 2.2 Poloha vnášeného zatížení, iniciační délka trhliny

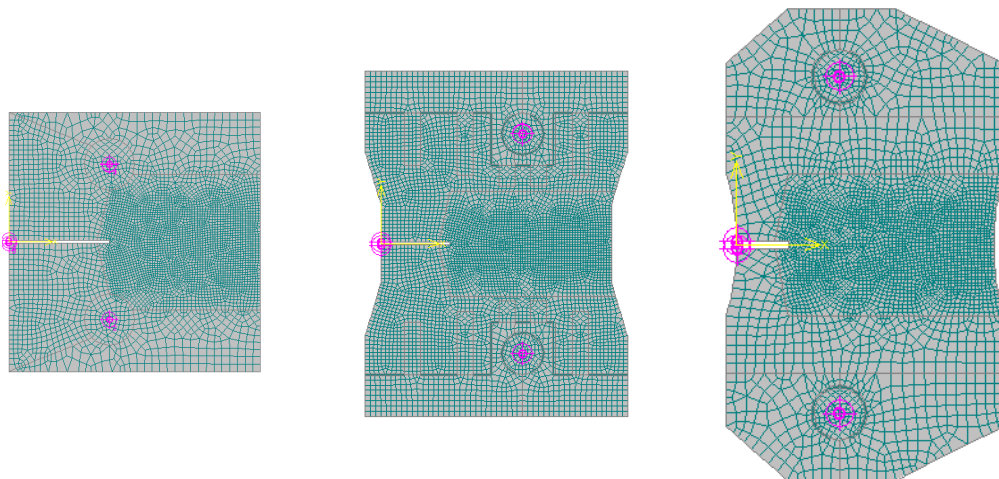
Pro docílení změn vlastností LPZ bylo uvažováno se změnami polohy vnášeného tahového zatížení a délky zářezu. Předchozí obrázky zobrazují tři uvažované velikosti těles, včetně polohy zatížení. Písmeno A v názvu udává, že tahové zatížení je vnášeno nejbližší k okraji modifikovaného CT tělesa, v němž je vytvořen zářez (excentricita tahové síly je  $0,3W'$ ); B představuje zatížení, jehož paprsek se blíží k ose symetrie tělesa ze strany ústí zářezu (excentricita  $0,1W'$ ) a konečně C následuje těsně po ose symetrie (excentricita  $-0,1W'$ ). Délka zářezu (iniciační trhliny)  $a$  byla volena přes poměr  $a/W' \in (0,1; 0,6)$ , kde  $W'$  představuje rozměr tělesa ve směru šíření trhliny.

## 2.3 Výpočetní nástroj

Numerické modely byly vytvořeny v programu ATENA 2D [7], umožňující nelineární analýzu porušení konstrukce trhlinami, jejich vznik a postupné šíření v průběhu zatěžovacího procesu. Disponuje nelineárními modely materiálů (plasticita, porušování) pro simulaci skutečných vlastností kompozitů na bázi cementu. Lomově-plastický model pro beton, který byl použit pro simulace, kombinuje konstitutivní modely pro tahové (lomové) a tlakové (plastické) chování. Model lomu je založen na klasické ortotropní formulaci rozetřených trhlin s implementací modelu pásu trhlin (model kohezivní trhliny). Zahrnuje Rankinovo kritérium porušení, exponenciální změkčení a může být použit s modelem rotující nebo fixované trhliny, případně jejich kombinací. Plastický model změkčení/zpevnění je založen na Menétrey-Williamově povrchu porušení.

Pro cementový kompozit byl použit výše popsaný lomově-plastický materiálový model (označovaný jako *3D Nonlinear Cementitious 2*), s parametry ponechanými na defaultních hodnotách, vygenerovaných programem pro krychelnou pevnost  $f_{cu} = 40$  MPa. Materiál přílozek a čepů byl modelován jako elastický izotropní s běžnými parametry pro ocel. Problém byl modelován ve 2D jako rovinná deformace.

Ukázky sítí konečných prvků u vybraných numerických modelů jednotlivých použitých variant jsou uvedeny v obr. 5. Materiály tělesa a přílozek jsou barevně odlišeny.

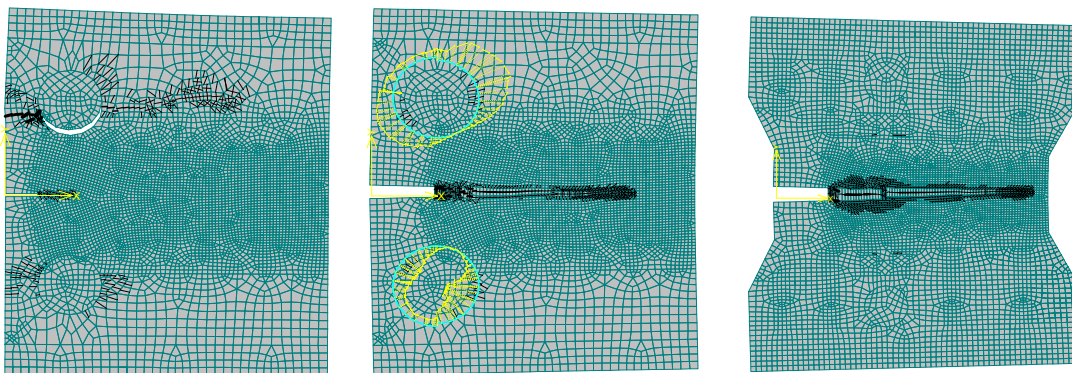


Obr. 5: Numerické modely vybraných variant modCT těles (dle schémat z obr. 2 až 4)

Průběh testu byl simulován vnášením přírůstku vzájemného posunu středů zatěžovacích čepů (spodní fixní, horní posuvný); kromě této časové řady se monitorovala také síla odporující tomuto přírůstku a otevření líců zářezu (monitorovací body zobrazeny také na obr. 5). Nelineární výpočet byl řízen metodou Newton-Raphson.

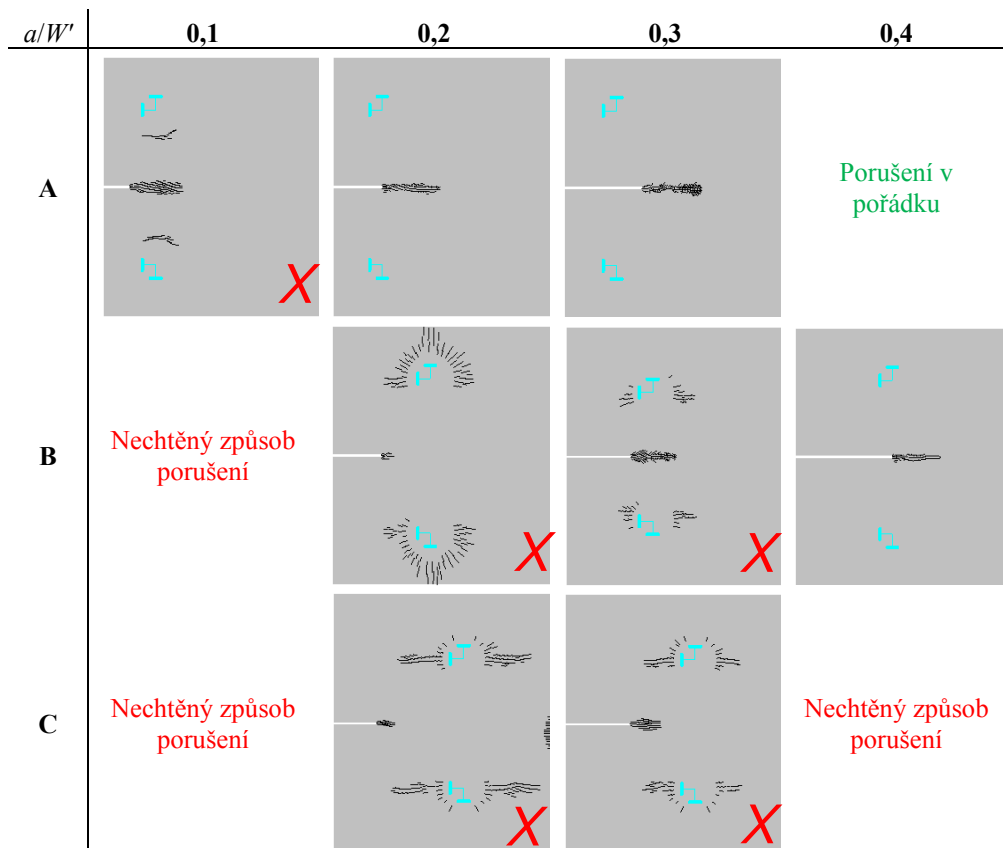
### 3 VÝSLEDKY, DISKUZE

Ukázky porušení, simulovaného v sw. ATENA 2D pro vybrané varianty řešení vnesení zatížení, uvádí obr. 6. Varianta vlevo zahrnuje jednoduchou příložku (viz obr. 2), je zobrazen vzor trhlin včetně sítě konečných prvků, a to pro model s poměrem  $a/W' = 0,2$ . Je zde patrné, že šíření porušení se odehrává i mimo vrchol iniciačního zářezu, zejména pro krátké zářezy se masivně realizuje z místa styku tělesa a zatěžovacího čepu. V obr. 6 uprostřed je zobrazena jedna z uvažovaných úprav této varianty, které se zaměřovaly na vyztužení zkušebního tělesa v okolí otvoru pro zatěžovací čep, konkrétně varianta s radiální výztuží (včetně vykreslení průběhu tahového napětí v ní). Pro simulace byly uvažovány různé modifikace radiální i tangenciální výztuže ocelovými dráty či vložení objímky (včetně radiálně přivařených spřahovacích trnů). Tyto varianty se z důvodu nedostatečné funkčnosti či očekávané velké pracnosti výroby dále nerozvíjely. Na obr. 6 vpravo je pak vykreslen vzor trhlin pro variantu s příložkami se spřahovacími trny (viz obr. 3) pro  $a/W' = 0,3$ ; je zde patrné požadované šíření trhliny po celé výšce tělesa bez parazitních porušení v jiných oblastech tělesa.



Obr. 6: Ukázky porušení a deformovaného tvaru modelů vybraných variant vč. zobrazení MKP sítě

Náhledy na rozdíly v rozsahu a lokalizaci porušení těles ukazují série obrázků pro jednotlivé varianty a iniciační relativní délky zářezu o hodnotě 0,1 až 0,4 s proměnnými umístěními tahového zatížení (obr. 7 až 9). Pro obr. 7 a 8 je použito vykreslení vzorů trhlin ze stádia zkoušky odpovídajícího vrcholu zatěžovacích diagramů. V obr. 9 jsou navíc i náhledy na vzor trhlin ze stádia v koncové části sestupné větve zatěžovací křivky. Je zřejmé, že s posunem paprsku zatěžovací síly blíže k zadnímu okraji zkoušeného tělesa (snižování excentricity tahové síly) dochází ke snížení constraintu projevujícímu se rozšířením pásu porušení, tedy zvětšením rozsahu (alespoň šířky) LPZ. Křížkem jsou označeny „nehodné“ varianty (tj. varianty, které se porušují mimo centrální oblast tělesa, např. v okolí zatěžovacích čepů a sprahovacích trnů).

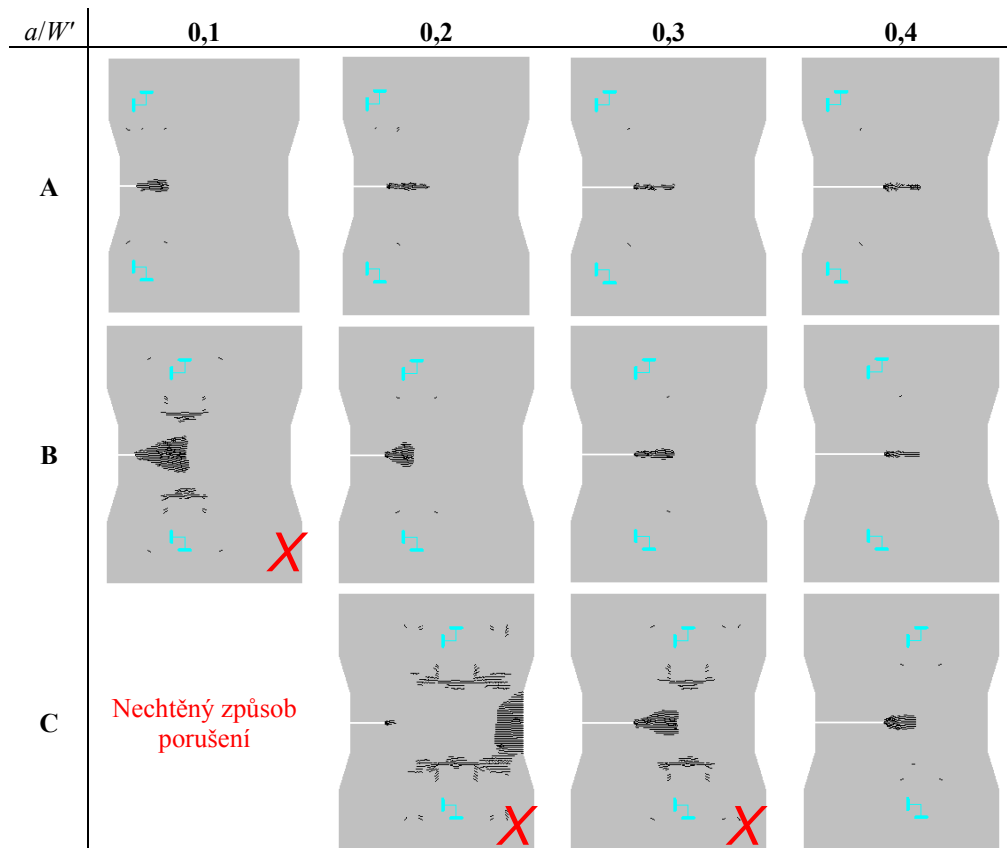


Obr. 7: Ukázky porušení pro různé délky zářezů a pozice tahové síly pro variantu z obr. 2

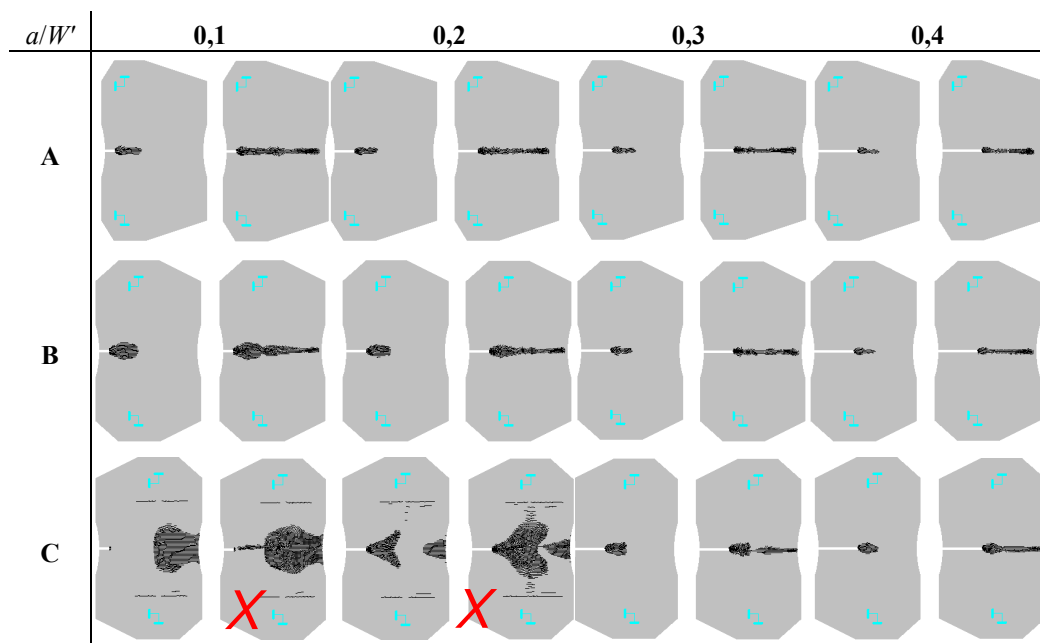
#### 4 ZÁVĚR

Pro potřeby experimentální kampaně je třeba volit variantu ekonomicky výhodnou a zejména technicky/technologicky proveditelnou. Z předběžného vyhodnocení studie se jako nejvýhodnější jeví varianta s přilepenými příložkami (typicky pomocí epoxidového lepidla), v nichž jsou vytvořeny otvory pro zatěžovací čepy, a vykrojením tělesa v místě ligamentu, viz obr. 4. Vhodné zkušební konfigurace budou zahrnovat tělesa o velikostech v poměru 4 : 2 : 1 s výškou ligamentu  $W' = \{76, 38, 19\}$  mm, s relativními délkami trhliny  $a/W' = \{0,2; 0,3; 0,4\}$  a excentricitou vnášené tahové síly ve variantách A, B i C (kromě  $a/W' = 0,2$  u varianty C). Detailní numerická studie lomového testu v této konfiguraci pro očekávané materiálové parametry je před dokončením, zde jsou prezentovány výsledky pouze pro velikost L. Zda se varianty S a M budou chovat podobně, rozhodne až další studie, zpracovaná také s ohledem na vliv velikosti, včetně výsledků reálných experimentů vyrobených těles.





Obr. 8: Ukázky porušení pro různé délky zářezů a pozice tahové síly pro variantu z obr. 3



Obr. 9: Ukázky porušení pro různé délky zářezů a pozice tahové síly pro variantu z obr. 4

Na obr. 10 jsou zobrazeny již hotové formy, určené pro odlévání vzorků. Modifikovaná CT tělesa budou v plánovaných testech doplněna klasickými tříbodově ohýbanými trámečky se zářezem.



Obr. 10: Formy určené pro výrobu modCT těles  
(doplněné o formy pro trámečky zkoušené ve tříbodovém ohybu)  
(foto © Keršner 2013)

### PODĚKOVÁNÍ

Výzkum byl realizován za finanční podpory GA ČR (projekt P105/11/1551) a VUT v Brně (projekt specifického vysokoškolského výzkumu FAST-S-12-21/1653). Na návrhu a výrobě forem se podíleli také Ing. Hana Šimonová, Ph.D., Ing. Ivana Havlíková, Miroslav Friedl a prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc., za což jim autoři vřele děkují.

### LITERATURA

- [1] KORTE S., V. BOEL, W. DE CORTE, G. DE SCHUTTER and S. SEITL. Experimental study of the influence of the initial notch length in cubical concrete wedge-splitting test specimens, *Key Engineering Materials* Vols. 525–526 (2013), pp. 209–212, ISSN: 1662-9795.
- [2] SEITL S., J. KLUSÁK and Z. KERŠNER. The influence of a notch width on a crack growth for various configurations of three-point bending specimens. *Materials Engineering*, XIV/3 (2007), pp. 213–219. ISSN 1335-0803.
- [3] BAŽANT, Z.P. Analysis of work-of-fracture method for measuring fracture energy of concrete. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*. 1996, 122(2), pp. 138–144.
- [4] DUAN, K., X-Z. HU and F.H. WITTMANN. Size effect on specific fracture energy of concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007, 74, pp. 87–96.
- [5] VAVŘÍK, D., T. FÍLA, I. JANDEJSEK, V. VESELÝ, P. FRANTÍK a Z. KERŠNER. Fracture Process in Silicate Composite Specimens – X-ray Dynamic Observation and Numerical Modelling. In: *Proceedings of the 19<sup>th</sup> ECF*, Kazan, Russia, Kazan Scientific Centre of the Russian Academy of Science, Kazan, 2012, 9 p. ISBN 978-5-905576-18-8.
- [6] VAVŘÍK D., I. JANDEJSEK, T. FÍLA a V. VESELÝ. Radiographic observation and semi-analytical reconstruction of fracture process zone in silicate composite specimen. *Acta Technica*. 2013, 58, pp. 315–326.
- [7] ČERVENKA V., L. JENDELE a J. ČERVENKA. *ATENA Program Documentation, Theory*. Praha: Cervenka Consulting, 2010.

### Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Ing. Michal Šejnoha, Ph.D., DSc., Katedra mechaniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze.

Doc. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D., Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i.