

VERIFIKACE LOKALIZACE A PRŮBĚHU PORUŠENÍ V BETONOVÝCH VZORCÍCH STANOVENÝCH POMOCÍ AE A EME: NUMERICKÉ SIMULACE

VERIFICATION OF LOCALIZATION AND PROGRESS OF FAILURE IN CONCRETE
SPECIMENS DETERMINED USING AE AND EME: NUMERICAL SIMULATIONS

Václav Veselý¹, Petr Frantík², Ondřej Vodák³

Abstract

This paper presents a numerical analysis aimed at verification of monitoring of failure – its progress and the locations of the individual failure events – in quasi-brittle cement-based materials performed using a technique based on utilization of (combination of) acoustic emission (AE) and electromagnetic emission (EME) phenomena. The analysis is conducted on concrete laboratory specimens and helps to reveal the type and intensity of failure which can be captured by this experimental technique. Numerical tools ATENA and FyDiK based on continuum mechanics with implemented cohesive crack models and physical discretization of continuum, respectively, are employed in the analysis.

1 Úvod a motivace

Iniciaci a šíření trhlin v pevných látkách lze detekovat pomocí akustických a elektromagnetických jevů (pro materiály ve stavebnictví např. [8], [14], [25]). Tyto jevy jsou označovány jako akustická/elektromagnetická emise (AE/EME). Při vývoji metodologie měření a vyhodnocování vzniku a šíření trhlin/y pomocí těchto jevů lze výhodou použít výpočetních nástrojů schopných numericky simulovat procesy porušování materiálu. Tento článek je věnován právě simulacím procesu porušování vybraných stavebních materiálů, a to cementových kompozitů, při lomových zkouškách. Kromě sledování pracovních diagramů vzorků a distribuce porušení po jejich objemu je pozornost upřena také na disipaci energie při porušování, která se u cementových kompozitů projevuje akustickou a elektromagnetickou emisí.

2 Numerické simulace

2.1 MKP, software ATENA

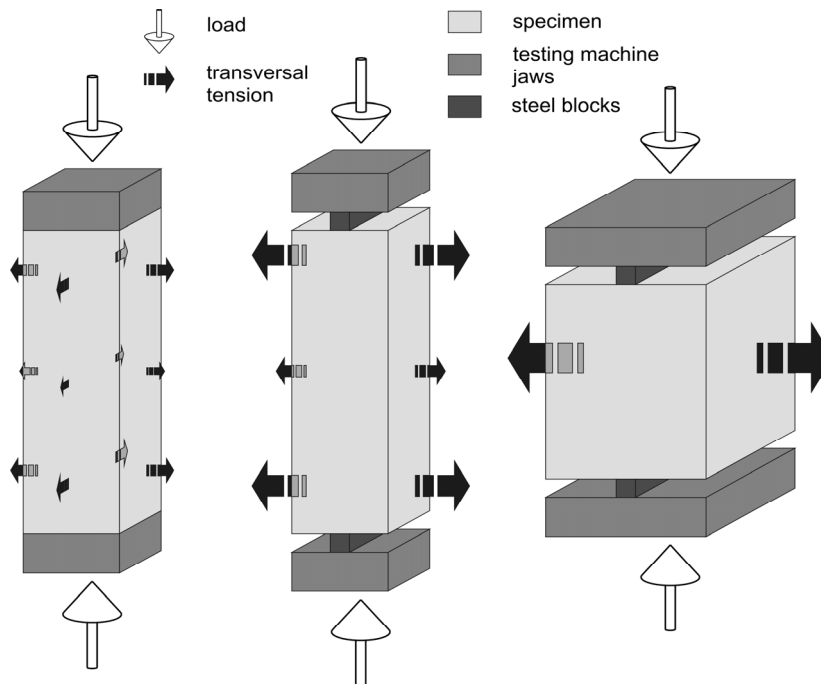
V předchozích pracích autorů, jež se zabývají touto problematikou, byly s použitím komerčního softwaru ATENA [3] provedeny numerické studie pole napětí, deformací a průběhu porušení během testů ve vybraných zkušebních konfiguracích. Práce [20] byla zaměřena na výběr tvaru tělesa a okrajových podmínek testu (pro zatěžování tlakem ve zkušebním zařízení), které by byly vhodné pro studium porušování kvazikřehkých

¹ Ing. Václav Veselý, Ph.D., VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, Veveří 331/95, 602 00 Brno, vesely.v1@fce.vutbr.cz.

² Ing. Petr Frantík, Ph.D., dtto, kitnarf@centrum.cz.

³ Bc. Ondřej Vodák, dtto, Vodak.O@study.fce.vutbr.cz.

materiálů pomocí elektromagnetické (resp. kombinace elektromagnetické a akustické) emise. Studie byla prováděna jako rovinná úloha, bylo použito několik různých materiálových modelů pro beton. Následné analýzy se prováděly ve 3D verzi použitého softwaru [21], [11], [12] a soustředily se na dva tvary těles (sady A a B, tj. štíhlé resp. masivní těleso – viz obr. 1) a dvě zatěžovací konfigurace (neboli geometrie, I a II, tj. prostý tlak zkušebního tělesa, resp. tlak přes centrálně umístěné ocelové hranoly způsobující napjatost v tělese vedoucí k porušení příčnými tahy – viz obr. 1) vybrané z předchozí studie.

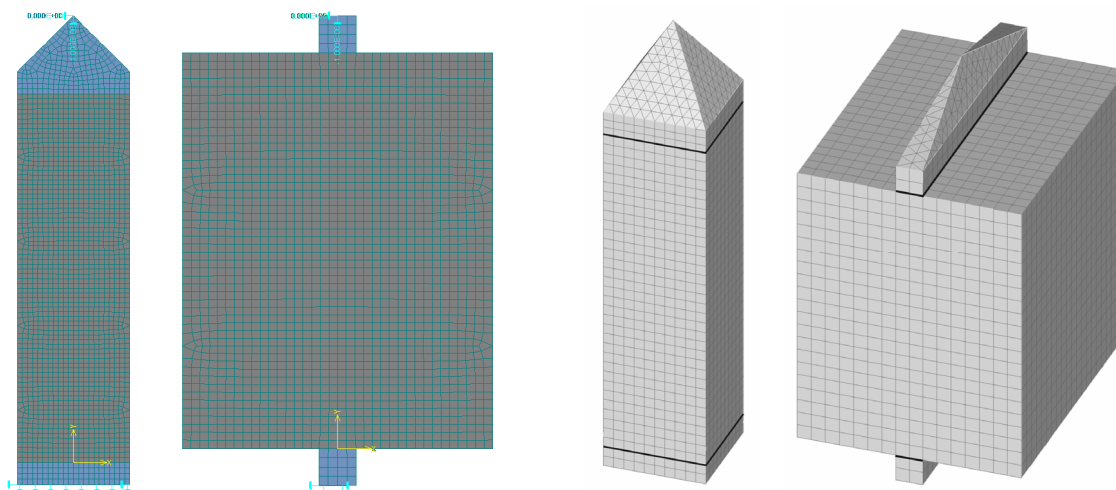


Obr. 1. Schematické znázornění zkušebních těles (sada A – vlevo a uprostřed, sada B – vpravo) v uvažovaných zatěžovacích konfiguracích (konfigurace I – vlevo, konfigurace II – uprostřed a vpravo) [12]

Provedené simulace ověřily možnosti modelování procesů porušování ve zkušebních tělesech podrobených testům ve zvolených zkušebních geometriích. V souvislosti se zkoumanou experimentální technikou využívající jevy AE a EME však ukázalo jako žádoucí provést také detailnější analýzu charakteristik simulovaného porušení, např. velikost (otevření) a orientace vznikajících trhlin resp. odpovídajícího neelastického poměrného přetvoření. Na základě jejich porovnání s charakteristikami záznamů AE/EME měření by pak bylo možné usuzovat na možnosti a citlivost této experimentální techniky v oblasti monitorování porušení kvazikřehkých materiálů ve stavebnictví (zejména např. silikátové kompozity a skalní horniny).

Model

Pro výše nastíněnou podrobnou analýzu jsou použity 3D modely z předchozí studie; vývoj metodiky k této analýze a její pilotní zjednodušené testy probíhají na jim odpovídajících modelech ve 2D. Obě verze modelů včetně MKP sítě jsou pro testy AI a BII (těleso tvaru A v geometrii I, resp. těleso tvaru B v geometrii II) znázorněny na obr. 2.



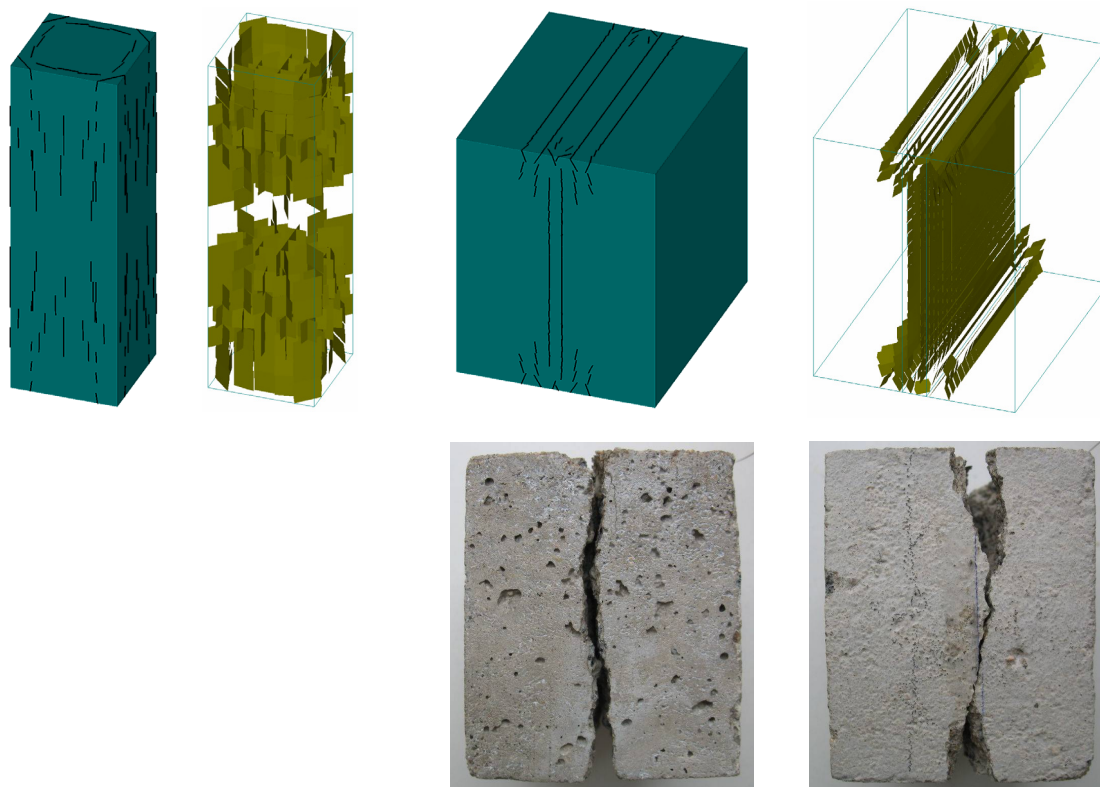
Obr. 2. 2D modely testů AI a BII včetně znázornění okrajových podmínek (vlevo) a jim odpovídající 3D modely (vpravo)

Modelované okrajové podmínky testu jsou naznačeny na 2D modelech, dolní příčnick lisu byl uvažován jako pevný, horní příčnick zatěžoval těleso (přes ocelové příložky, resp. hranolky) přírůstkem posunu. Modely byly ve 2D i 3D vytvořeny v několika variantách hustoty MKP sítě. Třídídimenzionální analýzy byly prováděny s materiálovým modelem 3D Non-Linear Cementitious (varianta 2, viz [3]), pro 2D pilotní simulace byl navíc použit SBETA materiálový model. Materiálové modely byly nastaveny tak, aby simulovaly porušení vzorků z betonu o pevnosti v tlaku 20 MPa, na nichž byla prováděna experimentální měření [10].

Výsledky

Pro porovnání odezvy virtuálních testů – numerických simulací – s testy skutečnými se typicky využívá zatěžovacích křivek, tj. diagramů závislosti zatěžovací síly a vnášeného posunu (tzv. *load–displacement*, neboli *l–d* diagramy). V těchto diagramech lze pro kvazikřehké materiály/konstrukce rozlišit základní stádia průběhu porušování tělesa jako jsou lineární chování, nelinearita před dosažením maxima zatížení způsobená vznikem a spojováním mikrotrhlin, vrchol zatížení a začátek sestupné větve diagramu odpovídající lokalizaci porušení a sestupná větev charakteristická pro šíření/otevírání již zlokalizované makrotrhliny [1], [8], [15], [16].

Další významnou skupinou výsledků je zobrazení (průběhu) napjatosti a deformací a zejména rozsahu porušení, a to pomocí variety veličin (napjatostní, deformační, energetické,...), které výpočetní program poskytuje. Zde se omezíme pouze na prezentaci ukázky vzorů trhlin ve stádiu testu při dosažení maxima zatížení (z 3D analýzy) a jejich porovnání s výsledky experimentů [10], [12].

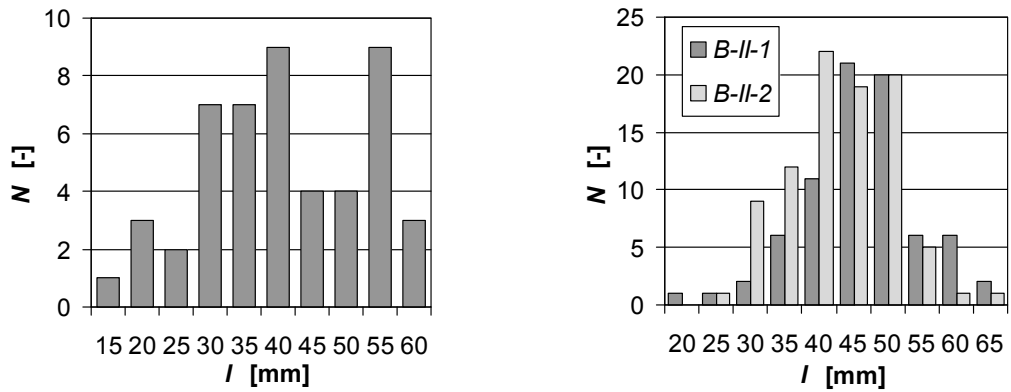


Obr. 3. nahoře – rozložení porušení po objemu tělesa predikované programem ATENA 3D pro testy (zleva) AI a BII – povrchová síť trhlin resp. jejich distribuce uvnitř tělesa; dole – fotografie dvou porušených sady BII

Zpracování výsledků simulací, doplňkový post-processing

Jak bylo uvedeno v úvodu této části, charakteristiky simulovaného porušení se dále zpracovávají za účelem např. zjistit limity experimentální techniky pro monitoring poškození kvazikřehkých materiálů/konstrukcí ve stavebnictví založené na EME/AE, pochopit a správně interpretovat zaznamenaná data apod.

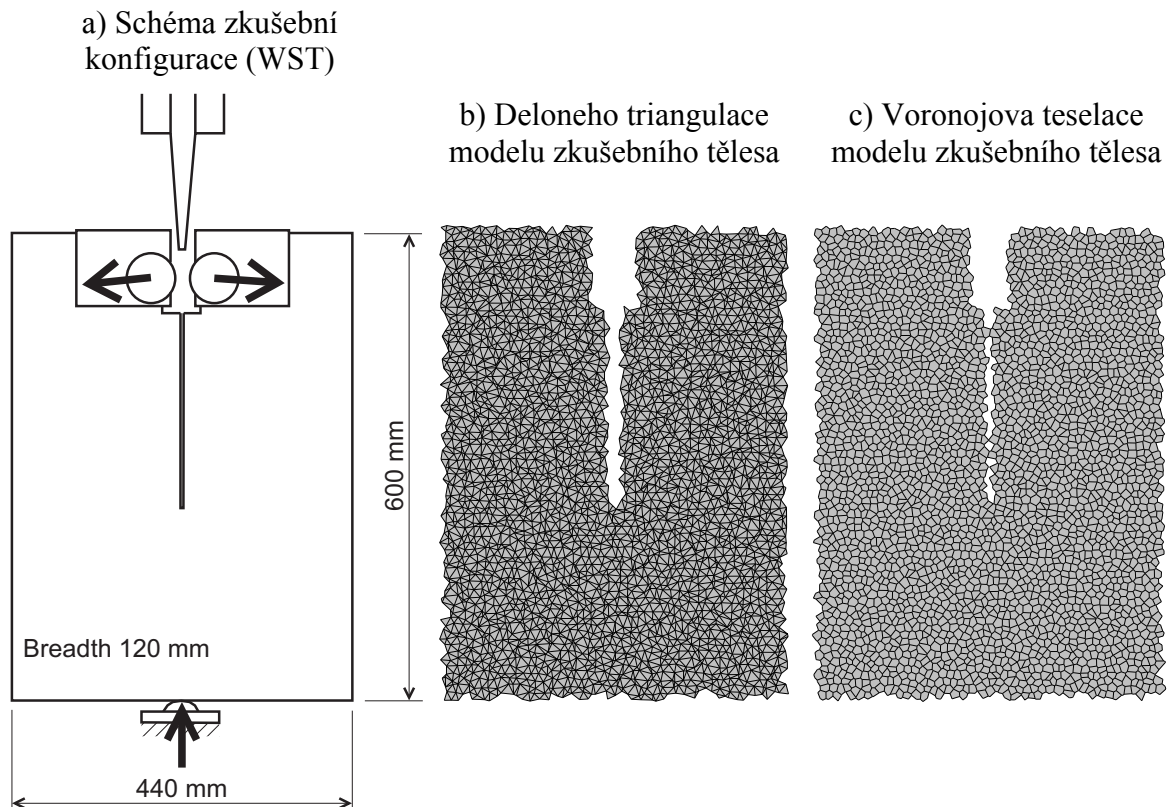
Jedním z aktuálních úkolů je zpracování výsledků simulací do podoby experimentálně naměřených histogramů popisujících četnosti událostí způsobujících EME/AE (procesy porušování) v závislosti na vzdálenosti od akustického senzoru umístěného na povrchu vzorku. Pro vybrané vzorky experimentální sady AI a BII jsou tyto histogramy zobrazeny na obr. 4 – je z nich patrné nerovnoměrné, avšak v zásadě ani vhodně lokalizované, porušení pro sadu AI a relativně úzce lokalizované porušení pro sadu BII (oba histogramy v tomto aspektu dobře korespondují se zobrazeními porušení v obr. 3). Tato analýza je v současnosti rozpracována.



Obr. 4. Histogramy četnosti emitujících událostí v závislosti na vzdálenosti mezi vnikajícími trhlinami a akustickým senzorem pro vybraná tělesa ze sady AI (vlevo) a BII (vpravo) [12]

2.2 Fyzikální diskretizace kontinua, program FyDiK

Druhá metoda, kterou je možno využít pro zkoumání charakteru procesů porušování vyvolávajících akustickou emisi, je metoda založená na fyzikální diskretizaci kontinua. Hypotetické kontinuum je zde nahrazeno sítí hmotných bodů vzájemně spojených pružinami. Tato metoda umožňuje snadno řešit nelineární úlohy a zároveň nevyžaduje komplikované modely porušování materiálu. Nevýhodou je relativně velká výpočetní náročnost při požadavku dostatečné hustoty sítě. Tuto závislost lze do jisté míry účinně eliminovat použitím paralelního zpracování, které lze pro takové modely snadno implementovat [7]. Zde použitý model je implementován v aplikaci FyDiK [5].



Obr. 5. a) Schéma zkušební konfigurace testu z [13], b) a c) tvorba modelu pro simulaci zkoušky metodou vyvinutou pro Rigid Body Spring Network [2], [4]

Možnosti této metody a její využití byly prozatím testovány na fragmentaci při impaktu [6] a skrze simulace experimentu publikovaného v [13]. Jedná se o wedge-splitting test prováděný na tělesech relativně velkých rozměrů (viz obr. 5a) vyrobených z betonu dvou složení (lišících se velikostí maximálního zrna kameniva) a malty. K tomuto experimentu byly publikovány také záznamy AE zobrazující lokalizace jednotlivých událostí porušování materiálu.

Model a výsledky

Materiál vzorku je diskretizován množinou hmotných bodů generovaných v hexagonální mřížce s určitou mírou náhodného šumu. Pro tuto množinu je vytvořena Deloneho triangulace a Voronojova teselace. Triangulace určuje geometrii pružinové sítě a teselace vlastnosti pružin, viz obr. 5. Tento postup vychází z techniky, vyvinuté pro tzv. Rigid Body Spring Network, viz [2], [4]. Pružiny jsou modelovány jako kvazikřehké s bilineárním pracovním diagramem. V průběhu simulace je zaznamenáváno množství energie disipované vlivem porušování pružin. Intenzita této disipace v konkrétní pružině je na obr. 6 znázorněna barvou (od žluté po modrou vzestupně). Odhady rozsahu porušované oblasti tělesa jsou v dobré shodě s experimentálními daty.

3 Závěr

Článek prezentuje dva přístupy k modelování procesů porušování těles/konstrukcí z cementových kompozitů, jež lze detekovat pomocí experimentálních technik založených na akustické a elektromagnetické emisi, resp. jejich kombinaci. Pochopení a správné interpretace výsledků měření za použití těchto metod lze dosáhnout pomocí detailní analýzy porušování materiálu numerickými nástroji. V článku byly ukázány některé z možností těchto výpočetních nástrojů.

Experimentální techniky využívající EME/AE mají velký potenciál zodpovědět klíčové otázky související se vznikem a šířením porušení v kvazikřehkých materiálech, které je spojeno s vývojem tzv. lomové procesní zóny u vrcholu makroskopické trhliny, což jsou témata, jimž se autorský kolektiv dlouhodobě zabývá [17], [18], [19], [22], [23], [24].

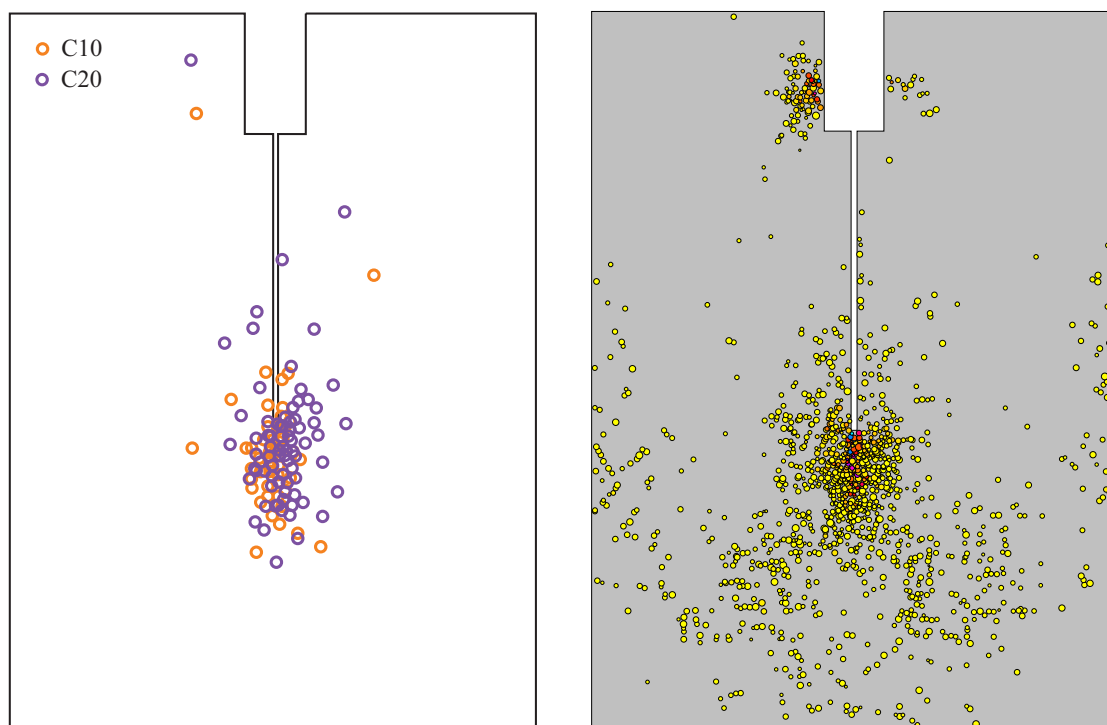
Poděkování

Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT, projekt 1M0579 (CIDEAS), a GA ČR, projekt P104/11/0734.

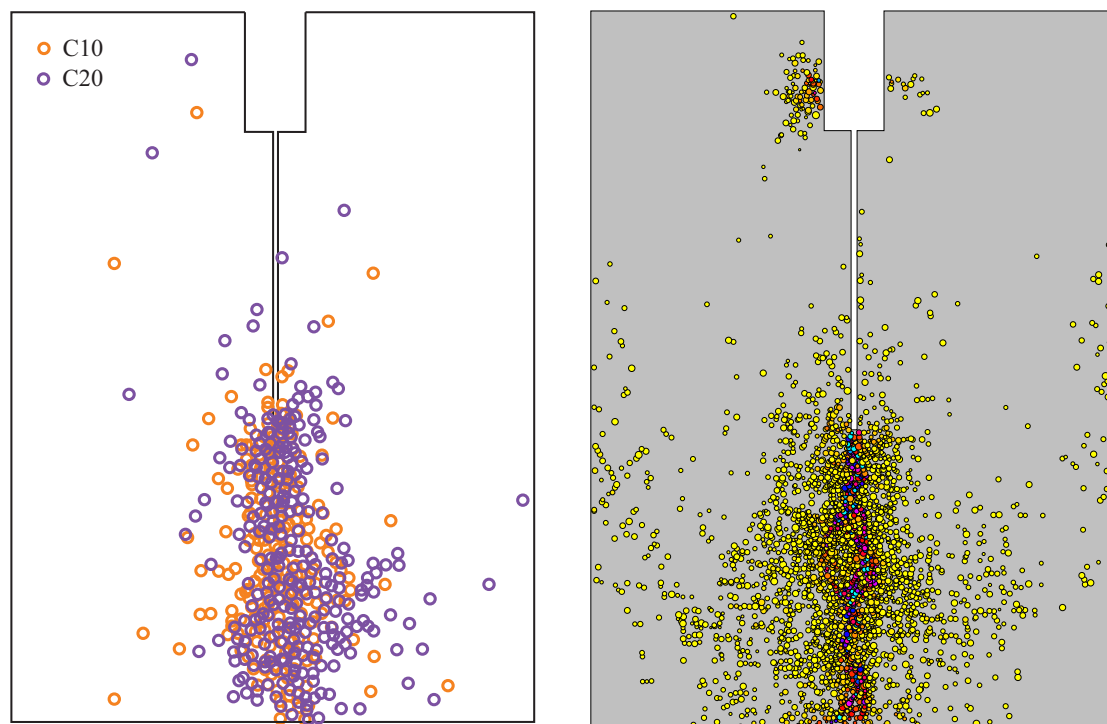
Literatura

- [1] BAŽANT, Z.P., PLANAS, J. 1998. *Fracture and size effect in concrete and other quasi-brittle materials*. Boca Raton: CRC Press, 1998.
- [2] BOLANDER, J. E., YOSHITAKE, K., THOMURE, J. 1999. Stress analysis using elastically uniform rigid-body-spring network. *J. Struct. Mech. Earthquake Eng.*, 633, 125–132, 1999.
- [3] ČERVENKA, V. et al. 2005. *ATENA Program Documentation, Theory and User Manual*. Prague: Cervenka Consulting, 2005.
- [4] ELIÁŠ, J. 2009. *Discrete simulation of fracture processes of disordered materials*. Ph.D. thesis, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, 2009.
- [5] FRANTÍK, P. FyDiK application, <http://www.kitnarf.cz/fydik>, 2007–2011.

Stádium lomu při maximálním dosaženém zatížení (vrchol zatěžovacího diagramu)



Konec sestupné větve zatěžovacího diagramu (konec lomového procesu)



Obr. 6. Porovnání záznamů AE pro dvě zkušební tělesa (ozn. C10 a C20) [13] – vlevo – a výsledek dynamické simulace modelem FyDiK – vpravo – pro dvě stádia zatěžování

- [6] FRANTÍK, P., KERŠNER, Z., VESELÝ, V., ŘOUTIL, L. 2009. Fractality of simulated fracture. *Key Engineering Materials*, Vol. 409, 154–160, 2009.
- [7] FRANTÍK, P., VESELÝ, V., KERŠNER, Z. 2011. Efficient Lattice Modelling of the Fracture Process Zone Extent in Cementitious Composites. Accepted to: *The Second International Conference on Parallel, Distributed, Grid and Cloud Computing for Engineering – PARENG 2011*. Ajaccio, Korsika, Francie.
- [8] GORDEEV, V. F. et al. 1994. Electromagnetic emission of dielectric materials due to the static and dynamic loading. *Journ. Tech. Phys.* 64 (4), pp 57–67, 1994.
- [9] KARIHALOO, B. L. 1995. *Fracture mechanics and structural concrete*. New York: Longman Scientific & Technical, 1995.
- [10] KOKTAVÝ, B., KOKTAVÝ, P., ŠTEFKOVÁ, M. 2007. On the effect of mechanical loading method on rectangular concrete specimen electromagnetic and acoustic emission signals. In: *Experiment 2007*, FCE BUT Brno, pp 211–216 (in Czech), 2007.
- [11] KOKTAVÝ, B., KOKTAVÝ, P., VESELÝ, V., FRANTÍK, P., KERŠNER, Z. 2008. Utilization of electromagnetic and acoustic emission in monitoring the tensile failure of cementitious composites. In books of abstracts of conference *Mechanics of Composite Materials – MCM 2008*, Riga, Latvia, 26–30 May 2008. V. Tamužs, K. Cīrule and A. Lagzdīņš (eds.). Institute of Polymer Mechanics, University of Latvia, 138–139, 2008.
- [12] KOKTAVÝ, P., VESELÝ, V., KERŠNER, Z., FRANTÍK, P., KOKTAVÝ, B. 2011. Utilization of Electromagnetic and Acoustic Emission in Monitoring of Fracture of Cementitious Composites. *Key Engineering Materials*, 2011, vol. 465, pp. 503–506, 2011.
- [13] MIHASHI, H., NOMURA, N. 1996. Correlation between characteristics of fracture process zone and tension-softening properties of concrete. *Nuclear Engineering and Design*, 165, 359–376, 1996.
- [14] SKLARCZYK, CH., ALPETR, I. 2001. The electric emission from mortar and concrete subjected to mechanical impact. *Scripta mater.*, Vol. 44, pp 2537–2541, 2001.
- [15] SHAH, S. P., SWARTZ, S. E., OUYANG, C. 1995. *Fracture mechanics of structural concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock, and other quasi-brittle materials*. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [16] VAN MIER, J. G. M. 1997. *Fracture Processes of Concrete: Assessment of Material Parameters for Fracture Models*. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [17] VESELÝ, V., FRANTÍK, P. ReFraPro – Reconstruction of Fracture Process, Java application, 2008–2011.
- [18] VESELÝ, V., FRANTÍK, P. 2009. Development of fracture process zone in quasi-brittle bodies during failure. In: *Proc. of National Conference with International Participation Engineering Mechanics 2009* (book of extended abstracts + CD ROM), Svratka, 11–14 May 2009. J. Náprstek a C. Fischer (Eds), Institute of Theoretical and Applied Mechanics, v.v.i., Academy of Sciences of the Czech Republic, 288–289 + 1393–1404 (CD), 2009.
- [19] VESELÝ, V., FRANTÍK, P. 2011. Reconstruction of a fracture process zone during tensile failure of quasi-brittle materials. *Applied and Computational Mechanics* (in print), 2011.
- [20] VESELÝ, V., FRANTÍK, P., KERŠNER, Z. 2007. Analýza napjatosti a šíření trhlin ve zkušebních vzorcích pro měření poškození kvazikřehkého materiálu pomocí elektromagnetické emise. Sborník abstraktů a sborník příspěvků (CD)

- konference *Modelování v mechnice 2007*, Ostrava, 14.–15. 2. 2007. Ostrava: Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava, 11–12 + CD 21 s, 2007.
- [21] VESELÝ, V., KERŠNER, Z., KOKTAVÝ, P., KOKTAVÝ, B. 2007. Studie průběhu porušení betonových vzorků při zatěžování příčným tahem. Sborník konference *Experiment – významný zdroj poznání a verifikace metod navrhování nosných stavebních konstrukcí*, Brno, 25.–26. 10. 2007. J. Melcher a M. Karmazínová (Eds.). Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 511–516, 2007.
- [22] VESELÝ, V., FRANTÍK, P., KERŠNER, Z. 2009. Cracked volume specified work of fracture. In: *Proc. of the 12th Int. Conf. on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, B.H.V. Topping, L.F. Costa Neves and R.C. Barros (eds.), Funchal, Civil-Comp Press, 2009.
- [23] VESELÝ, V., FRANTÍK, P., SEITL, S. 2010. Fracture process zone development and energy dissipation during fracture in concrete wedge-splitting specimens. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS7) – Recent Advances in Fracture Mechanics of Concrete* (CD), Jeju, Korea, May 23–28, 2010, B. H. Oh et al. (Eds.). Korea Concrete Institute, Seoul, 2010. Vol 1, pp. 46–54, 2010.
- [24] VESELÝ, V., KERŠNER, Z., NĚMEČEK, J., FRANTÍK, P., ŘOUTIL, L., KUCHARCZYKOVÁ, B. 2010. Estimation of fracture process zone extent in cementitious composites. *Chem. Listy*, 104, 382–385, 2010.
- [25] YAMADA, I., MASUDA, K., MIZUTANI, H. 1989. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture. *Phys. of the Earth and Plan. Inter.*, Vol. 57, pp 157-168, 1989.