

SIMULACE PRACOVNÍHO DIAGRAMU BETONU V BRAZILSKÉM TESTU

SIMULATION OF WORKING DIAGRAM OF CONCRETE IN BRAZILIAN TESTS TITLE

Pavel PADEVĚT, Bořek PATZÁK¹

Abstrakt

Příspěvek je zaměřen na simulaci pracovního diagramu betonu v Brazilském testu. Experimentální část byla zaměřena na zjištění materiálových vlastností betonu v příčném tahu (Brazilský test). Testován byl beton pevnosti 50MPa. Druhá část práce byla zaměřena na fitování vlastností betonu pro simulaci pracovního diagramu. Byly měněny materiálové charakteristiky (pevnost a modul pružnosti) pro správnou korelaci mezi experimentem a modelem. Pracovní diagramy byly získávány pro různá stáří betonu (3, 7, 14 a 30 dní). Taktéž model chování betonu se snažil postihnout vliv stáří betonu. Modelem měl být zachycen proces porušení betonu v příčném tahu. Pro modelování byl použit výpočetní program OOFEM.

Klíčová slova: beton, Brazilský test, OOFEM, materiálové charakteristiky, příčný tah.

Abstract

Paper is focused on the simulation of working diagram of concrete in Brazilian test. Experimental part of research was focused on investigation of material properties of concrete in lateral tension (Brazilian test). Concrete 50 MPa strong was tested. Second part of research was focused on the simulation of the working diagram. Material properties (like a strength, Modulus of elasticity) were measured for right correction between experiments and simulation of working diagram. Working diagrams were measured for concrete 3, 7, 14 and 30 days old. Theoretical model noticed age of concrete too. Modelling of concrete is notice of cracking of concrete in lateral tension. Program software OOFEM was used for modelling of processes.

Keywords: Concrete, Brazilian test, OOFEM, material properties, lateral tension.

ÚVOD

Testováním betonu v příčném tahu se získává dostatečné množství parametrů pro modelování betonu a konstrukcí. Materiálové charakteristiky získané testováním slouží jako vstupní parametr pro materiálový model při výpočtu metodou konečných prvků. Vývoj výpočetních modelů s sebou nese potřebu kvalitních a reálných vstupních dat pro správný výpočetní model. Pro modelování porušení betonu pomocí výpočetního programu OOFEM jsou důležitými charakteristikami modul pružnosti, a několik hodnot poměrného přetvoření na křivce pracovního diagramu. Hodnotami poměrného přetvoření jsou určeny body pro správné modelování tvaru pracovního diagramu. Modul pružnosti, který je vstupním parametrem výpočetního modelu se určuje z pracovního diagramu.

¹ Ing. Pavel PADEVĚT, Ph.D, doc., Dr., Ing. Bořek PATZÁK, ČVUT v Praze, Stavební fakulta, borek.patzak@fsv.cvut.cz

Lektoroval: doc. Ing. Ľudovít NAĐ, CSc., KBKaM, SvF TU v Košiciach, ludovit.nad@tuke.sk

V literatuře je popsán Brazilský test pro cementové pasty a cementové malty[1]. V našem případě je modelováno porušení betonu obsahující frakci hrubého kameniva v příčném tahu pomocí výpočetního modelu. Použitím parametrů z experimentů provedených na betonových tělesech [2] je pak použitím materiálového modelu odvozeno postupné porušení betonu, lokalizace napětí v místě podpory. Vzájemným porovnávacím parametrem je pracovní diagram betonu v porovnání s pracovním diagramem z počítačového modelu.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Zkoušky betonu v Brazilském testu byly prováděny na krychlích o hraně 100mm. Složení betonové směsi je popsáno v následující tabulce. Betonová směs obsahovala kamenivo od nejjemnější frakce po frakci 8-16mm. Zrání betonu probíhalo ve vodní lázni za teploty 20°C. Po 28 dnech byla tělesa podrobena testování a jejich vlastnosti byly následně modelovány.

Složka	Beton (kg/m ³)
Písek 0-4	462
Kamenivo 4-8	528
Kamenivo 8-16	660
Cement CEM III 32,5 A-N	446
Voda	181



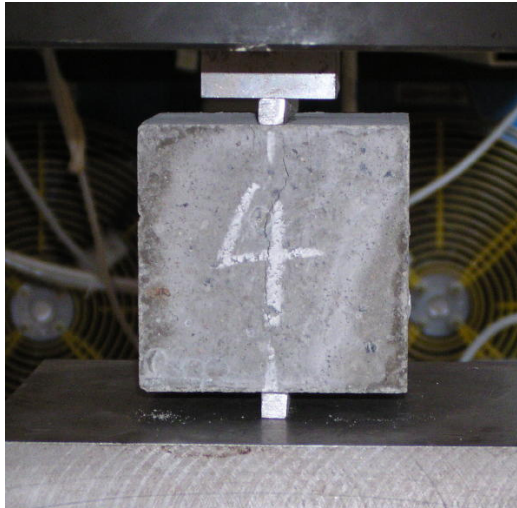
Obr.1 Betonové těleso po zkoušce v příčném tahu



Obr.2 Těleso upnuté do zkušebního zařízení

Na obrázcích jsou zobrazeny zkušební tělesa testovaná v příčném tahu. Na prvním obrázku je těleso porušené příčným tahem se zobrazením lomové plochy. Na druhém obrázku je těleso umístěné ve zkušebním zařízení Inova DSM 2500. Zatížení do betonu bylo realizováno přes ocelové profily délky 100mm a šířky 10mm. Při zkoušce byla měřena celková deformace tělesa mezi deskami pomocí 4 tenzometrických snímačů umístěných mezi zatěžovacími deskami. Dále byla měřena zatěžovací síla a to i na sestupné větvi pracovního diagramu.

Na třetím obrázku je těleso po ukončené zkoušce v příčném tahu. K porušení dochází mezi zatěžovacími ocelovými profily. Trhlina je patrná z obrázku. Porušené těleso je pak možné rozdělit na dvě části, jak je vidět na prvním obrázku.



Obr.3 Detail tělesa a zatěžovacích tyček ve zkušebním stroji

NUMERICKÝ MODEL

Beton patří mezi tzv. kvazikřehké materiály, jejichž tahové porušení je charakterizováno postupným rozvojem nelineární zóny poškození a následnou lokalizací deformace. Realistická analýza tahového porušení musí nutně zahrnout popis poškození vlivem vzniku mikrotrhlin v zóně tahového porušení, charakterizované poklesem napětí s rostoucí deformací po dosažení tahové pevnosti, což vede na konstitutivní modely s tzv. tahovým změkčením. Pokud takový model použijeme v kontextu klasického kontinua, vede to špatně podmíněný problém z důvodu ztráty elipticity diferenciální rovnice. Numerické řešení pak není objektivní vzhledem k použité diskretizaci a totální disipovaná energie jde k nule se zjemňující se hustotou sítě. Objektivní modely zavádějí další materiálový parametr – tzv. charakteristickou délku, jenž kontroluje šířku zóny tahového porušení (vlastně vynucují její nenulovou minimální šířku) a tím zabraňují lokalizaci deformace do nekonečně úzké zóny. Takové metody jsou založeny na nelokálním průměrování, gradientních teoriích, či viskozní regularizaci.

V tomto příspěvku je použit nelokální materiálový model izotropního poškození. Nelokální modely obecně nahrazují vhodnou lokální proměnnou její nelokální variantou, která se obdrží váhovým průměrováním lokální hodnoty na jistém okolí každého materiálového (integračního) bodu. Velikost tohoto okolí a tvar váhové funkce určují jsou svázány s charakteristickou délkou, jenž závisí na mikrostruktuře materiálu. Takto získaná nelokální hodnota se potom použije v originálním konstitutivním vztahu. Kromě toho, že nelokální průměrování funguje jako omezovač lokalizace, tak také významně omezuje závislost řešení na tvaru sítě a zlepšuje konvergenci iteračního řešení výsledných nelineárních rovnic.

LOKÁLNÍ MODEL IZOTROPNÍHO POŠKOZENÍ

Model skalárního poškození je popsán následujícími konstitutivním vztahem

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - \omega) \mathbf{D}^e \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

zákonem poškození

$$\omega = f(\kappa), \quad (2)$$

a podmínkami zatěžování

$$g(\boldsymbol{\varepsilon}, \kappa) \equiv \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(\boldsymbol{\varepsilon}) - \kappa \leq 0, \quad \dot{\kappa} \geq 0, \quad \dot{\kappa} g(\boldsymbol{\varepsilon}, \kappa) = 0, \quad (3)$$

kde $\boldsymbol{\sigma}$ je vektor napětí, $\boldsymbol{\varepsilon}$ odpovídající vektor deformace, \mathbf{D}^e matice elastické tuhosti materiálu, ω skalární hodnota charakterizující poškození, $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$ ekvivalentní deformace a κ je vnitřní proměnná odpovídající maximálně dosažené úrovni ekvivalentní deformace během zatěžování. Funkce g definuje elastickou oblast v prostoru deformací a funkce f určuje tvar pracovního diagramu.

V použité implementaci je ekvivalentní deformace definována jako

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{E} \max_{I=1,2,3} \boldsymbol{\sigma}_{el}, \quad (4)$$

kde $\boldsymbol{\sigma}_{el}$ jsou hodnoty hlavních efektivních napětí $\boldsymbol{\sigma}_e = \mathbf{D}^e \boldsymbol{\varepsilon}$ a E je modul pružnosti. Tato definice odpovídá obálce porušení Rankinova typu, protože elastická oblast efektivních napětí je shodná s elastickou oblastí skutečných napětí. Vznik poškození je iniciován, když hlavní napětí dosáhne kritické hodnoty tahové pevnosti $f_t = E\varepsilon_0$. Funkce rozvoje poškození, jenž má tvar

$$f(\kappa) = \begin{cases} 0 & \text{if } \kappa \leq \varepsilon_0 \\ 1 - \frac{\varepsilon_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{\kappa - \varepsilon_0}{\varepsilon_f - \varepsilon_0}\right) & \text{if } \kappa > \varepsilon_0, \end{cases} \quad (5)$$

je konstruována tak, že změkčující větev pracovního diagramu je exponenciální křivka. Parametr ε_f kontroluje sklon pracovního diagramu po dosažení pevnosti a je svázán s lomovou energií.

NELOKÁLNÍ MODEL

Nelokální varianta modelu vychází z lokální formulace, přičemž ekvivalentní deformaci $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$ nahrazuje její nelokální variantou $\tilde{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}}$

$$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}} = \int_{\Omega} \alpha(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} \, d\mathbf{x}_i, \quad (6)$$

kde $\alpha(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$ je váhová funkce. V nekonečném, homogenním tělese velikost interakce závisí pouze na vzdálenosti $r = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|$ mezi zdrojovým bodem \mathbf{x}_i a cílovým bodem \mathbf{x} . V okolí hranice se váhová funkce často upravuje tak, aby nelokální průměrování nezměnilo konstantní pole, tedy

$$\int_{\Omega} \alpha(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) \, d\mathbf{x}_i = 1. \quad (7)$$

Toho lze dosáhnout jednoduše např. jejím normováním

$$\alpha(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \frac{\alpha_0(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|)}{\int_{\Omega} \alpha_0(|\mathbf{x} - \boldsymbol{\zeta}|) \, d\boldsymbol{\zeta}}, \quad (8)$$

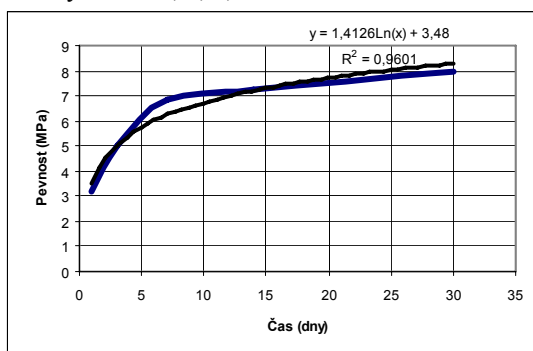
kde $\alpha_0(r)$ je nenulová funkce, monotónně klesající pro $r \geq 0$. V tomto příspěvku je použita váhová funkce zvonovitého typu s omezeným nenulovým nosičem

$$\alpha_0(r) = \begin{cases} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^2 & \text{if } |r| \leq R \\ 0 & \text{if } |r| \geq R, \end{cases} \quad (9)$$

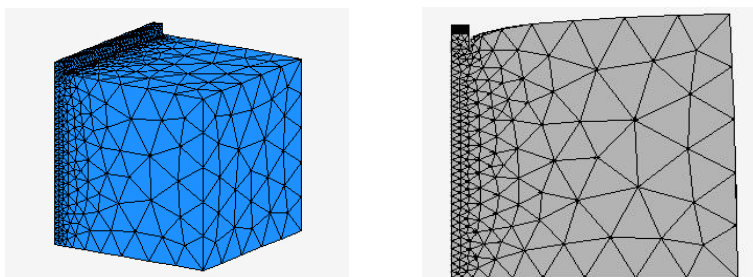
kde R je parametr vztažený k charakteristické délce materiálu.

ZÁVĚR

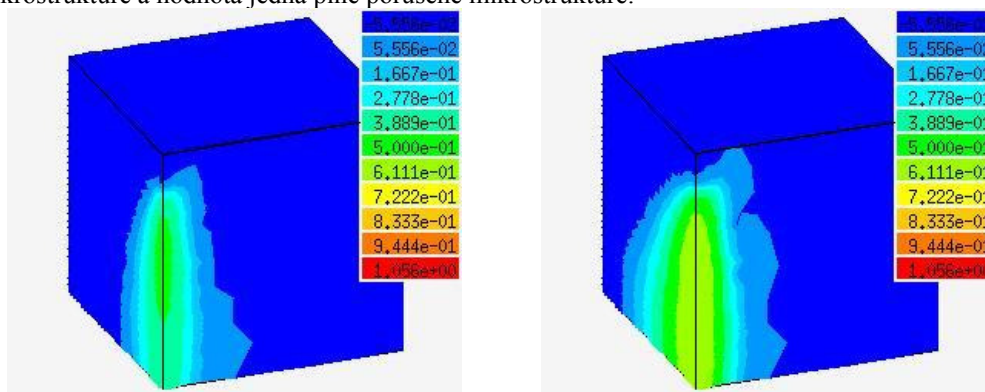
Z experimentů byl vytvořen vývoj pevnosti v čase. V grafu je zobrazen vývoj pevnosti v čase. Pevnosti byly zkoušeny v čase 1, 3, 7, 14 a 30 dní.

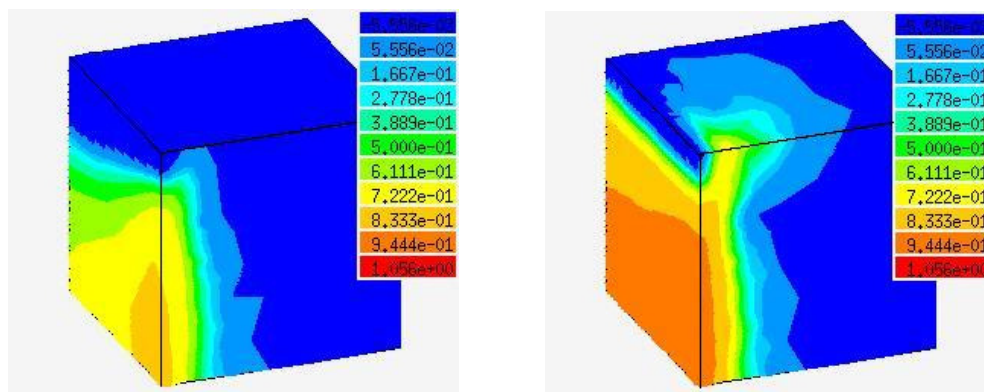


Výsledky modelování porušení betonu v Brazílském testu jsou zobrazeny v následujících obrázcích. Na prvním obrázku je zobrazeno těleso se sítí použitou pro výpočet. Na druhém obrázku je model zdeformovaného tělesa na konci testu. Pro modelování byla použita 1/8 skutečného tělesa. Síť byla zhuštěna v oblasti předpokládaného porušení. Použitá prostorová síť konečných prvků (vytvořená programem T3D) sestávala z 6020 uzlů a 28900 prvků – čtyřstěnnů s lineární aproximací pole posunutí.



Na následujících obrázcích je zkázněn postupný rozvoj poškození během zatěžování. Barevné izolinie zobrazují parametr poškození, kde nulová hodnota odpovídá nepoškozené mikrostruktuře a hodnota jedna plně porušené mikrostruktuře.





Tento článek vznikl za podpory grantu GAČR 103/04/1394.

LITERATURA

- [1] KASTAND, T., HAMMER, T. A., BJONTEGAARD, O.: *Mechanical properties of young concrete: Part I: Experimental results related to test methods and temperature effects*, Materials and Structures, Volume 36-No.258, 2003, ISSN 1359-5997.
- [2] PADEVĚT, P.: *Návrhy a ověření vlastností betonů s vyšší pevností 50MPa*, Dílčí výzkumná zpráva za rok 2005, Cideas , 2005.
- [3] PATZÁK, B., JIRÁSEK: *Adaptive resolution of localized damage in quasibrittle materials*. Journal of Engineering Mechanics Division ASCE, 130:720--732, 2004.
- [4] PATZÁK, B.: OOFEM home page, <http://www.oofem.org>.
- [5] RYPL, D.: *Sequential and Parallel Generation of Unstructured 3D Meshes*, Ph.D. thesis, CTU Reports 2 (3), 1998.