



OPTIMALIZACE SLOŽENÍ ALUMOSILIKÁTOVÝCH MATERIÁLŮ PRO TRVANLIVÉ DOPRAVNÍ STAVBY

Zpracoval: Doc. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D. (Fakulta stavební VUT v Praze)

Souhrn

Trvanlivost alumosilikátových (betonových) materiálů je nejvíce ovlivněna jejich složením, technologií výroby, ošetřováním a prostředí expozice. Většina degradací procesů (korozní vlivem karbonátů a chloridů, kyselých prostředí, zmrazovací cykly, síranové vody) je významně urychlena trhlinami, které vznikají při tvrdnutí vlivem ochlazení, autogenního smrštění i vysychání. Pro modelování těchto jevů byl vytvořen termo-mechanický model, který byl ověřen na několika příkladech masivních betonových konstrukcí z celého světa [1]. Výsledkem je předpověď šířky trhlin na základě kinetiky cementu, složení betonu a okrajových podmínek. Model byl implementován do prostředí softwaru OOFEM [2].

Oblast použití

Termo-mechanický materiálový model lze použít na výpočet napětí, deformací i šířky trhlin na hydratujících betonových konstrukcích. Nejlépe se model hodí na masivní betonové konstrukce, které mají nejmenší rozměr orientovaně nad 0,5 m. V těchto případech lze zanedbat smrštění od vysychání pro potlačení vzniku hlubokých trhlin.

Metodika a postup řešení

Teplotní pole se získá řešením nestacionárního vedení tepla

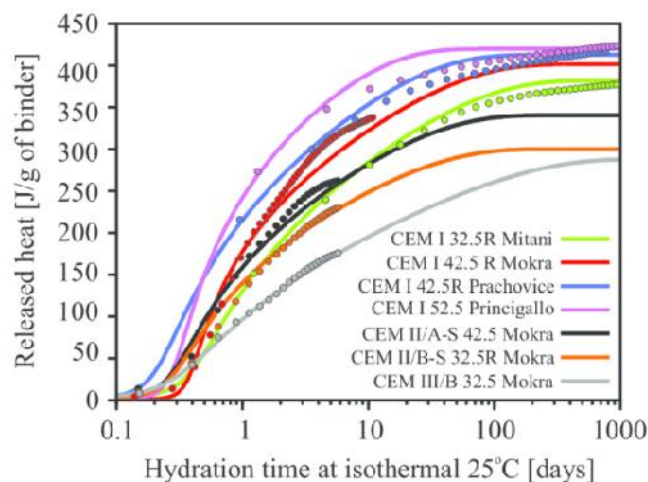
$$-\nabla^T q(\mathbf{x}) + \bar{Q}(\mathbf{x}, t) = \dots(\mathbf{x}) c_V(\mathbf{x}) \frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t}$$

kde \bar{Q} je uvolněný výkon z hydratačního tepla cementu (W/m^3). Pro tyto účely byl zkalibrován typ parametrický afinní hydratační model [3] pro různé typy cementů, viz Obr. 1.

Mechanická část používá materiálový zákon ve tvaru

$$\Delta \dagger_{eff} = \bar{E} \mathbf{D}_V (\Delta V - \Delta V'' - \Delta V_{sh,aut} - \Delta V_T)$$

kde $\Delta \dagger_{eff}$ je přírůstek efektivního napětí, \bar{E} je teplotní modul, ΔV přírůstek deformace, $\Delta V''$ přírůstek od dotvarování, $\Delta V_{sh,aut}$ přírůstek autogenního smrštění, ΔV_T přírůstek deformace od teploty, \mathbf{D}_V je jednotková elastická matice.



Obr. 1 Afinní hydratační model.

Nominální napětí se vypočte dle zákona poškození

$$\dagger = (1 - \check{S}) \dagger_{eff}$$

kde \check{S} je parametr izotropního poškození z exponenciálního zmršnění betonu. Šířka trhlin se určuje z první hlavní deformace, která je zmenšena o autogenní smrštění a teplotu

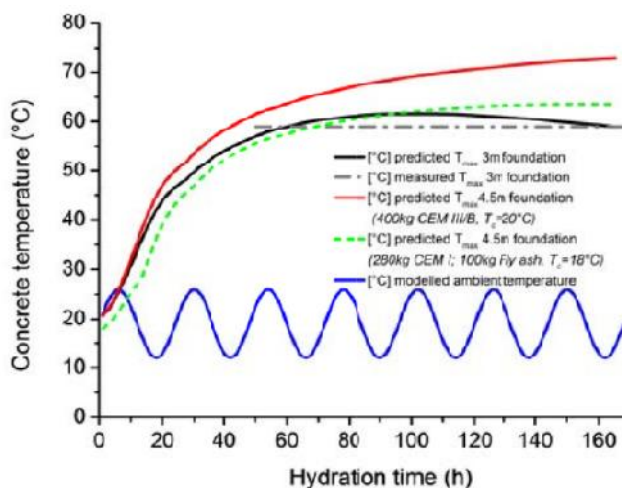
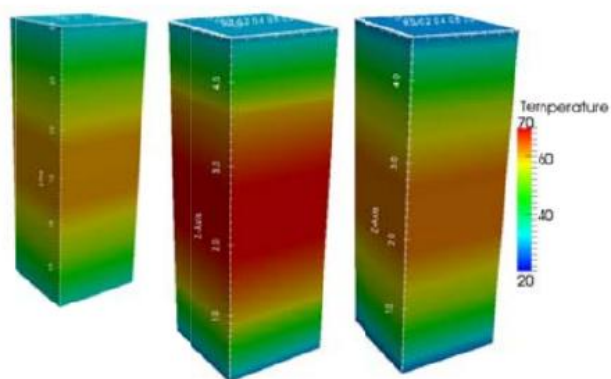
$$w = L_{ch} \check{S} V_{I,red}$$

a kde L_{ch} je délka na konečném prvku odpovídající průměru hlavního napětí.

Výsledky

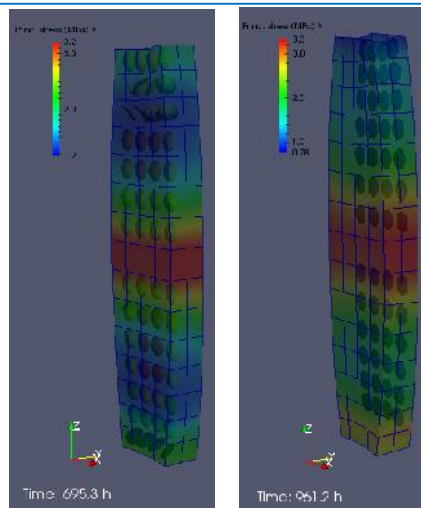
V roce 2016 byla optimalizace ověřena pomocí betonážních mostních bloků ve Švýcarsku [4]. Základním kritériem bylo omezení rozdílu teplot mezi středem a povrchem bloku na 30°C. Při vodním návrhu použitím CEM III/B 370 kg/m³, kdy maximální změna teploty dosáhla 59°C a rozdíl k povrchové teplotě se blížil k limitním 30°C pro blok výšky 3 m. Pro bloky výšky 4,5 m byla obava, že kritérium maximálního rozdílu již nevyhoví, což se potvrdilo simulací, která předpovídala teplotu 73°C. Proto bylo provedeno úpravy receptury betonu, sníženo množství cementu na CEM I 280 kg/m³ a přidáno 100 kg/m³ úletového popílku. Tím se podařilo teploty udržet pod 63°C, viz Obr. 2.

a) 3m, b) 4.5m, c) 4.5m, 280kg CEM I, 370kg CEM III/B 400kg CEM III/B 100kg fly ash



Obr. 2 Validace při optimalizaci mostních bloků.

Vývoj trhlin na blocích výšky 4,5 m je patrný na Obr. 3. Jedná se o nevyztužené bloky omezené ve směru osy y (podobně stavu rovinné deformace). Tyto okrajové podmínky odpovídají nejhoršímu stavu pro nekonečně dlouhý blok. Blok s 280 kg/m³ vykazuje svislou trhlinu v ose 961 hodin (vlevo), zatímco blok s 400 kg/m³ (vpravo) se poruší již v ose 695 hodin.



Obr. 3 Vývoj trhlin v závislosti na porušení bloku.

Závěr

Uvedený termo-mechanický model byl použit na několika konstrukcích pro předpověď teplot a trhlin [1] a pro ověření nové technologie [4]. Model byl také použit pro nosníky omega od firmy Eurovia, kdy se provedl výpočet dodatečného vnesení napětí do skoepiny díky předepnutí a zavírání trhlin od ochlazování a smrštění trámy.

Literatura

- [1] Šmilauer, V., Baquerizo, L., Matschei, T., Havlásek, P., Leal Da Silva, W., Hájková, K. ConTemp – A virtual thermo-mechanical simulator for hydrating reinforced concrete blocks with extension to service life. In *Service Life of Cement-Based Materials and Structures. Materials, Systems and Structures in Civil Engineering 2016*. Lyngby, 2016.
- [2] B. Patzák. OOFEM - an object-oriented simulation tool for advanced modeling of materials and structures. *Acta Polytechnica*, 52,59-66, 2012.
- [3] Leal Da Silva, W., Šmilauer, V., Štemberk, P. Upscaling semi-adiabatic measurements for simulating temperature evolution of mass concrete structures. *Materials and Structures* 48, 1031-1041, 2015.
- [4] Šmilauer, V., Matschei, T. Optimalizace vývoje teplot v masivních betonových konstrukcích s použitím semi-adiabatické kalibrace a víceúrovňového modelování, nová technologie, VUT, 2016.