

TEPLOTNÍ A OBJEMOVÉ ZMĚNY SAMOZHUTNITELNÉHO BETONU MĚŘENÉ NA VELKOROZMĚRNÝCH MODELECH

TEMPERATURE AND VOLUME CHANGES OF SELF-COMPACTING CONCRETE MEASURED ON LARGE ELEMENTS

JIŘÍ HOŠEK, JAN L. VÍTEK, VÁCLAV KURÁŽ, JIŘÍ LITOŠ, JAN MATOUŠEK

Samozhutnitelný beton se stává populárním materiálem. Kromě obvyklých testů na zpracovatelnost je třeba ověřit účinky hydratačního tepla a vývoj dlouhodobých deformací. Experimenty provedené na velkorozměrných vzorcích ukazují vývoj teplot v tlustých a tenkých stěnách a vliv tloušťky stěn na deformace od smršťování při vysychání. Získané hodnoty se významně neliší od hodnot známých u běžných betonů.

Self-compacting concrete becomes a popular material. Beside the usual tests, which verify the workability, it is necessary to check the effects of hydration heat and the long term strain development. The tests executed on the large elements illustrate the temperature development in thick and thin walls and the effect of element thickness on the drying shrinkage strains. The obtained values are not significantly different from those obtained at ordinary concrete

Úvod

Poznatky o vlastnostech jedné z nejdůležitějších a nejrozšířenějších stavebních hmot betonu získávané v průběhu minulých let jsou v současné době shrnuty a utříděny a lze prohlásit, že teorie potvrzená praxí umožňuje určit optimální poměrné zastoupení jednotlivých složek čerstvé betonové směsi, způsob výroby a ošetření i předpovědět výslednou kvalitu betonu.

Překročení limitních fyzikálních parametrů tradičního betonu a zjednodušení technologie výroby umožnily až zásadní změny v jeho složení. Základní tříložkový systém se změnil v multikompozitní soustavu aplikací přísad, které „na míru“ upravily technologické chování čerstvé směsi, modifikovaly průběh tvrdnutí a zlepšily fyzikální parametry betonu. Beton o pevnosti v tlaku vyšší než 100 MPa, který je vysoce nepropustný pro vodu a navíc zpracovatelný bez použití vibrace či propařování, je dnes jedním z hlavních trendů ve stavební výrobě. Samozhutnitelný beton (SCC – Self Compacting Concrete) je nejen kvalitnější, ale i ekonomicky výhodnější [1]. V současné době se prosazují i betony navrženy specificky pro daný typ konstrukce (DPC – Defined Performance Concrete).

K rychlému rozšiřování výroby samozhutnitelného betonu přispěly zvýšené nároky na trvanlivost betonových konstrukcí v podmínkách současného vysokého zatížení staveb atmosférickými vlivy. Vžitá představa o neomezené životnosti betonu ve světle



Obr. 1
Stěnové vzorky ze samozhutnitelného betonu

Fig. 1
Wall specimens made of SCC

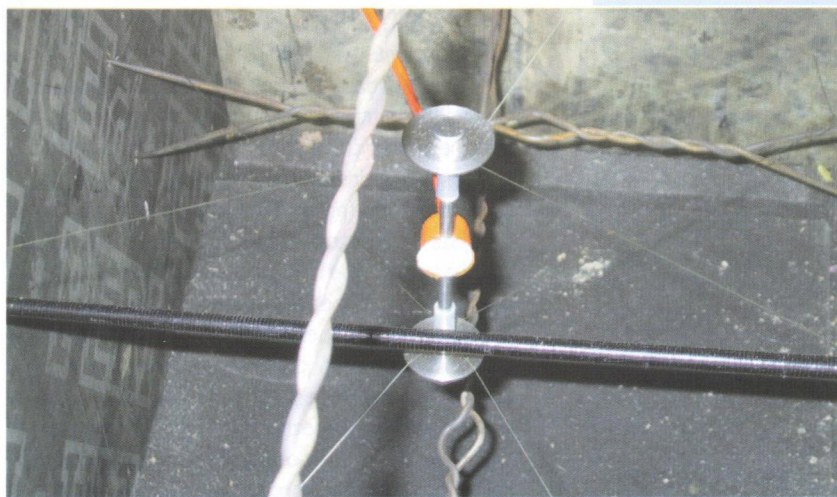
četných poruch železobetonových konstrukcí vlivem koroze výztuže a degradace struktury betonu působením agresivních látek v ovzduší vzala za své. Chyby ve zpracování a složení se projevily především v nižších fyzikálních parametrech daných porézností, mikrotrhlinami ve struktuře, objemovou nehomogenitou a nízkou kvalitou povrchové vrstvy betonu, což je jistě významným zdrojem poruch současných betonových konstrukcí.

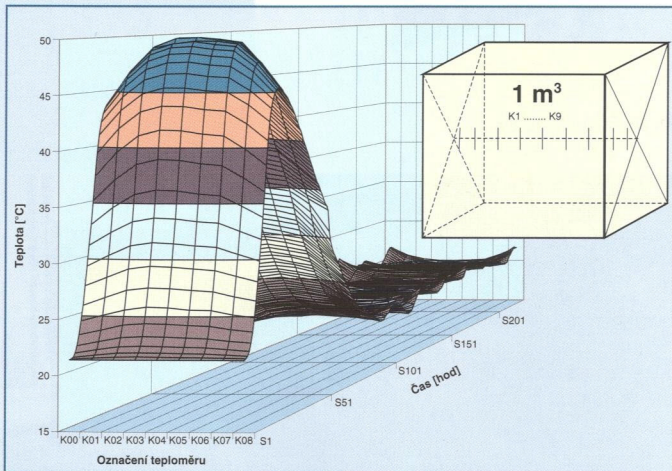
SAMOZHUTNITELNÝ BETON

Samozhutnitelný beton splňuje tři zásadní technologické požadavky pro dosažení vysoké kvality a dlouhé životnosti konstrukcí: 1) reologické chování čerstvé směsi zaručuje dokonalé vyplnění prostoru bednění, 2) obtékání výztuže nevede k lokálnímu rozměšování a blokáci velkých zrn kameniva, 3) nedochází k prosto-

Obr. 2 Strunový tenzometr pro měření poměrných deformací

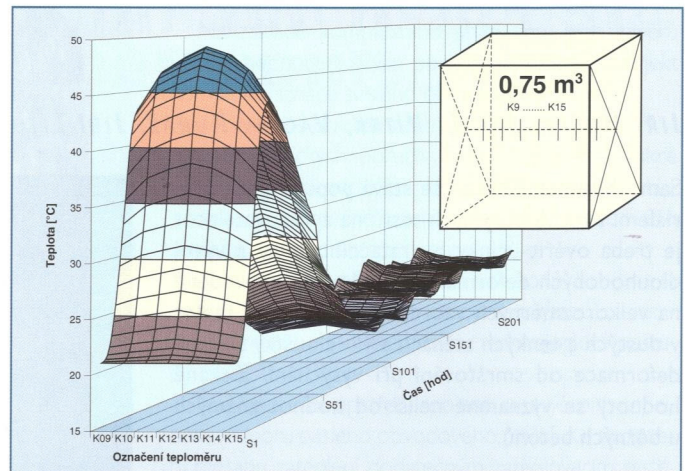
Fig. 2
Vibrating wire strain gauge for strain easurement





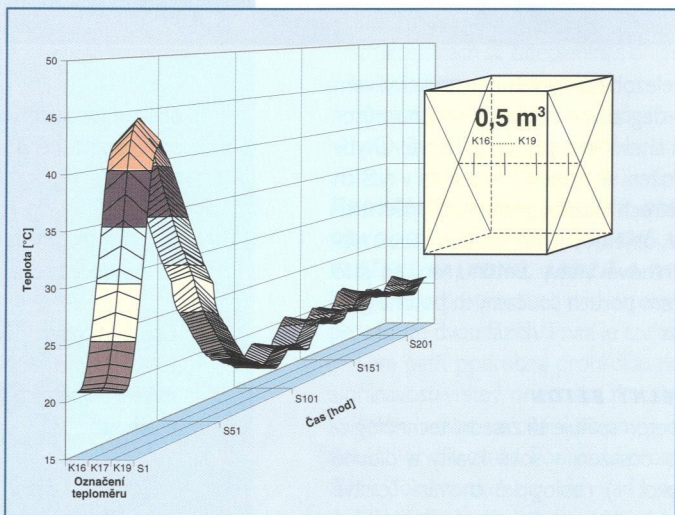
Obr. 3a Průběh teplot vzorku 1 m³

Fig. 3a Temperature variation in concrete element 1 m³



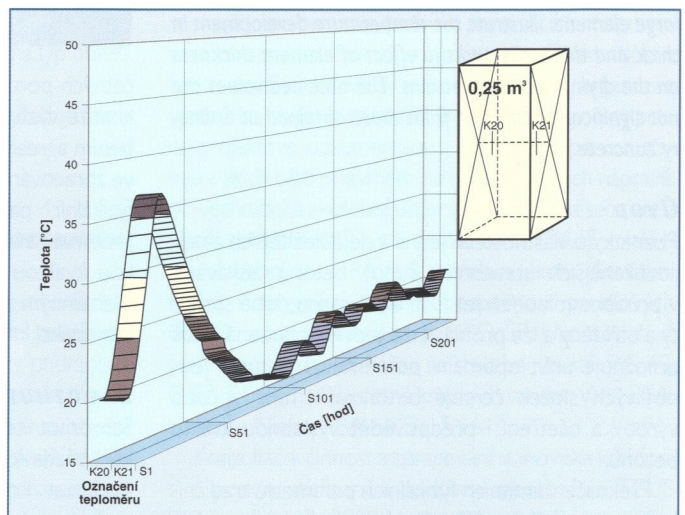
Obr. 3b Průběh teplot vzorku 0,75 m³

Fig. 3b Temperature variation in concrete element 0,75 m³



Obr. 3c Průběh teplot vzorku 0,5 m³

Fig. 3c Temperature variation in concrete element 0,5 m³



Obr. 3d Průběh teplot vzorku 0,25 m³

Fig. 3d Temperature variation in concrete element 0,25 m³

rovému rozměšování sedáním – je odstraněna segregace. Po zatvrdnutí je proto výsledná hmota vysoce kompaktní, hutná a výsledné fyzikální parametry jsou vyšší, než u tradičního betonu.

V průběhu dnes již četných aplikací samozhutnitelného betonu (prioritu má Japonsko, např. aplikací při výstavbě mostu v roce 1991 [2]) se ukázalo, že skladba směsi, kde se uplatňují velmi jemná plniva (křemičité úlety, popílek, kamenná moučka, mikromletá struska), superplastifikátory (nejúčinnější na bázi karboxyleterů), další specifické přísady a nízký vodní součinitel, vede k tomu, že ve struktuře zůstává zvýšený podíl nezhydratovaných cementových zm. Při jejich časově posunuté hydrataci pak dochází k objemovým změnám evokujícím vznik mikrotrhlin.

Tyto změny v již zatvrdlém betonu působené zbytkovou hydratací cementového podílu, jakési sekundární autogenní smršťování, může vést ke vzniku mikrotrhlin ve struktuře jednoznačně negativně ovlivňujících trvanlivost betonu [3].

Vzhledem k nedostatku příslušných předpisů musí být aplikace samozhutnitelného betonu na reálné stavbě u nás vždy projednána a odsouhlasena s investorem, projektantem a dodavatelem. Teprve na základě úspěšných průkazných zkoušek lze pak danou aplikaci připustit. Zkušenosti z dosud provedených staveb v našich podmínkách potvrdily podstatně lepší zpracovatelnost, obvykle vyšší pevnost a především vyšší kvalitu povrchu ve srovnání s tradičním betonem [3].

Krátkodobé zkoušky se provádějí relativně snadno a lze je realizovat v průběhu přípravy stavby. Dlouhodobé zkoušky však vyžadují speciální zařízení a přístroje, které běžné podnikové laboratoře nemají k dispozici. Proto se pracovníci stavební fakulty ČVUT a Metrostavu, a.s., dohodli provést dlouhodobé zkoušky sledující vývoj a průběh objemových změn v závislosti na vnitřní teplotě a úbytku technologické vody v průběhu hydratace cementového pojiva. Kromě laboratorních zkoušek vzorků byly vybetonovány modely stěn o různé tloušťce (obr. 1), což umožnilo sledovat současně několik faktorů. V první fázi byl sledován vývoj hydratačního tepla, teplota uvnitř a vně zkušebních bloků a smršťování v průběhu tvrdnutí. Druhou fází zkoušek je dlouhodobé měření objemových změn a ztráty vlhkosti od vysychání. Výsledky měření budou sloužit jako podklad pro porovnání s výpočtovými modely a stanovení odchylek chování samozhutnitelného a tradičního betonu.

USPOŘÁDÁNÍ ZKOUŠKY

Objemové změny betonové směsi v průběhu tvrdnutí jsou zdrojem poruch konstrukcí nejčastěji se projevujících vznikem trhlin. Běžně vznikají smršťovací trhliny například ve stěnách nabetonovaných na základové desky. Snaha modelovat alespoň přibližně působení reálné konstrukce a zjistit příčiny, které vedou k těmto poruchám, vedla k rozhodnutí měřit časový průběh smršťování na prvcích rozměrově přizpůsobených poměrům ve stavební praxi. Kvádry jsou umístěny ve stínu a kryty před deštěm, takže teploty nejsou ovlivněny přímým osluněním nebo ochlazováním při namočení povrchu (obr. 1).

Měření probíhalo na kvádrech o průřezové ploše 1×1 m a v rozdílných tloušťkách 0,25, 0,5, 0,75, a 1 m, které lze již považovat za elementy stěn reálných konstrukcí. Vždy v těžišti jednotlivých kvádrů byly umístěny ve svislé poloze strunové tenzometry odměrné délky 140 mm britské firmy Gauge Technique (obr. 2). Tyto tenzometry byly již v minulosti zabetonovány do některých staveb, například do mostu přes Ohři u Doksan, nebo do stropní konstrukce administrativní budovy v Praze - Karlíně a poskytují velmi kvalitní informace mnoho let. Zahraniční zkušenosti jednoho z autorů ukazují, že tenzometry dobře fungují i po 15 letech a spolehlivě měří i v heterogenním materiálu typu betonu.

Tenzometry byly fixovány pomocí závěsů na silonovém vlasci. Hodnoty se odečítaly po celou dobu zkoušky v různých časových intervalech. První 3 dny u režimu autogenního smrštění, kdy byla horní deska překryta tak, aby nedocházelo k odparu vody z konstrukce, se prováděl odečet po 4 hodinách. Další hodnoty byly pravidelně odečítány v týdenních intervalech. Tak bylo

možno vystihnout vliv postupného vysychání betonové směsi v závislosti na tloušťce zkušebních kvádrů.

Zaznamenávání průběhů teplot probíhalo kontinuálně s ukládáním naměřených dat na PC. Celkem bylo použito 24 ks polovodičových teploměrů, se kterými má laboratoř Experimentálního centra fakulty stavební bohaté zkušenosti a již je bez problémů používá řadu let. Teploměry byly umístěny vždy napříč průřezem elementu v ose, která byla 50 mm vzdálena od osy procházející těžištěm, z důvodu vyhnout se již osazeným tenzometrům. Vzdálenost jednotlivých čidel od sebe se pohybovala v rozsahu od 100 do 190 mm s tím, že první čidlo bylo umístěno vždy 30 mm od povrchu zkoušených kvádrů. Pro jednotlivé kvádry bylo použito 9, 7, 4 a 2 kusy teplotních čidel podle tloušťky průřezu a další 2 čidla měřila teplotu venkovního prostředí. Fixní polohu čidel v průřezu zajišťovala sklolaminátová tyč připevněná k bednění vzorků. Jednotlivá čidla byla z důvodu možného poškození vodou zalita do ochranného pouzdra.

Pro měření změn vlhkosti betonu v průběhu hydratace a další fáze tuhnutí byl použit dielektrický měřič vlhkosti. Zařízení, původně vyvinuté pro měření vlhkosti zemin bylo úspěšně testováno a inovováno pro měření vlhkosti betonových vzorků. Byly použity měřící elektrody s rozptylovým polem.

Před betonáží byly do bednění osazeny novodurové přístupové trubky, které umožňovaly měření v jednotlivých betonových kvádrech ve zvolených ekvidistantních vzdálenostech 50 mm.

V počátečním stádiu hydratace, kdy je měření ovlivněno teplotními změnami, byly pro korekci naměřených hodnot použity výsledky výše uvedených měření teploty.

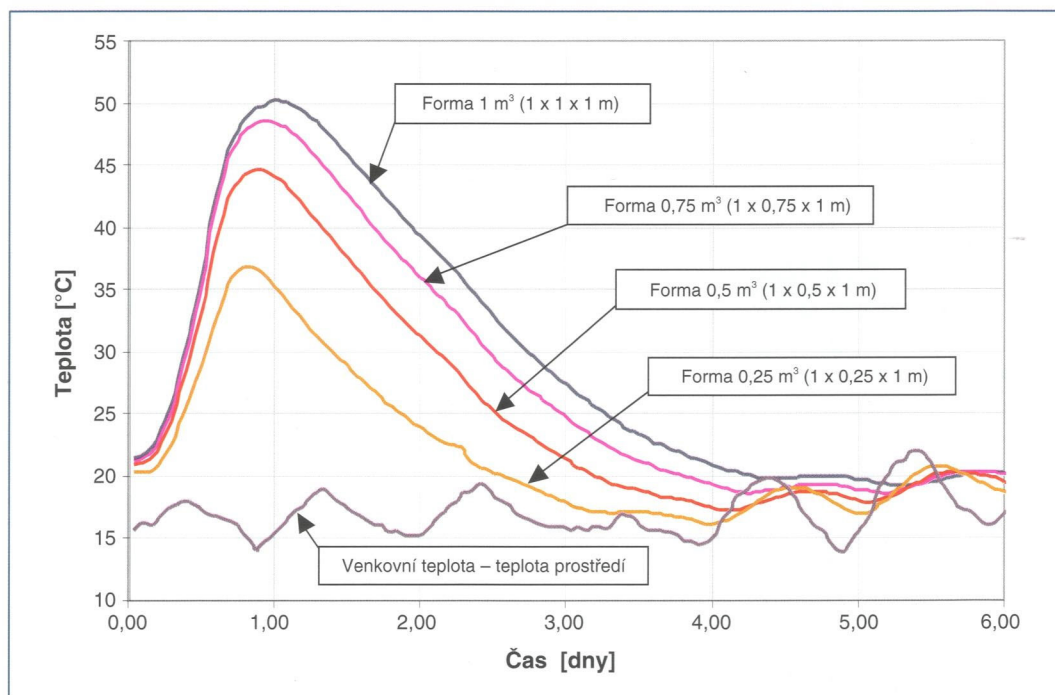
VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Měření hydratačního tepla jasně prokázalo závislost vlivu rozměrů betonových prvků na průběh smrštění i pro SCC. Ve stěně tloušťky 1 m byla uprostřed tělesa naměřena extrémní teplota o cca 13°C vyšší, než ve stěně tlusté jen 0,25 m. Důvodem je zřejmě pomalejší odvod hydratačního tepla z tlustší stěny. To prokázal naměřený rozdíl teplot na povrchu krychle o hraně 1 m, který činil cca 7°C , zatímco u prvku tloušťky 0,25 m byla naměřena prakticky stejná teplota po celém průřezu. Tím je možné teoreticky vysvětlit, že při postupné betonáži konstrukcí v důsledku rozdílných vnitřních pnutí vznikají trhliny (obr. 3 a 4).

Smršťování SCC vlivem vysychání (drying shrinkage) probíhá, jak vyplývá z obr. 5, v závislosti na velikosti prvků různou rychlostí. Je třeba poznamenat, že obvykle uváděné hodnoty naměřené na laboratorních vzorcích nelze považovat za směrodatné pro rozměrné konstrukce. Naměřené hodnoty již reprezentují velikost smrštění na reálných konstrukcích. Výsledky uká-

Obr. 4
Časový průběh
teplot uprostřed
jednotlivých vzorků

Fig. 4
Time variation
of measured
temperature in the
middle of the
specimens



zaly, že prvek o tloušťce 1 m má výrazně nižší deformaci, než prvek tlustý jen 0,25 m. Z průběhu smršťovacích křivek je také jasně patrné, že smršťování není ukončeno již po 3 měsících, jak se často předpokládá. Deformace probíhá dlouho a čím je prvek tlustší, tím déle. Naměřený rozdíl pro stáří betonu 1 rok u prvku tloušťky 1 m vykazuje deformaci pouze 60 microstrain, zatímco prvek 0,25 m tlustý 180 microstrain.

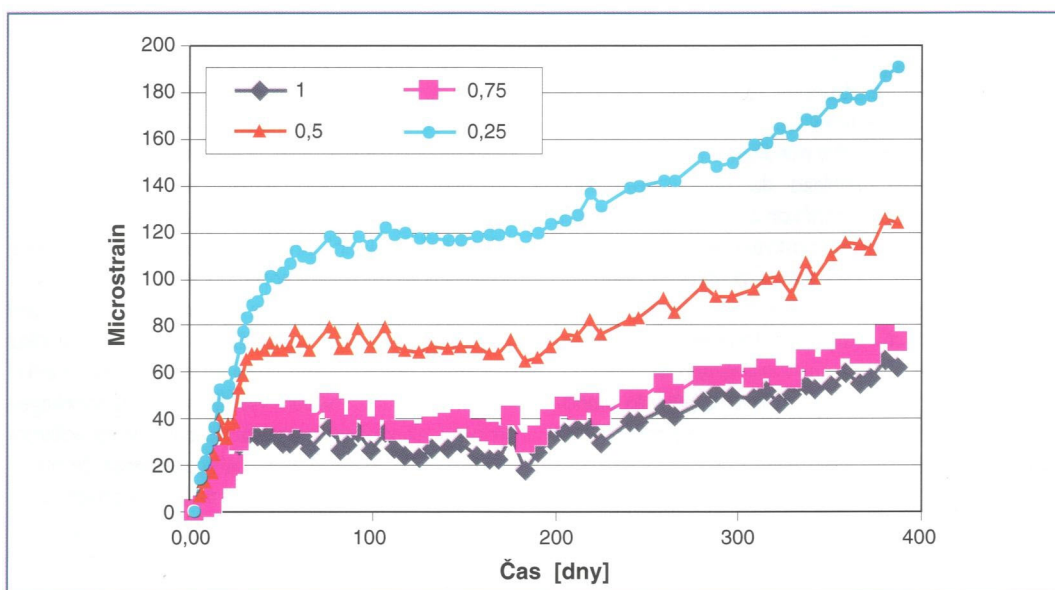
Zkoušky vývoje pevnosti v tlaku byly prováděny na kontrolních zkušebních válcových tělesech o průměru 150 mm a výšce 300 mm v časových intervalech 3, 28 a 90 dnů. Výsledky ukazuje graf na obr. 6.

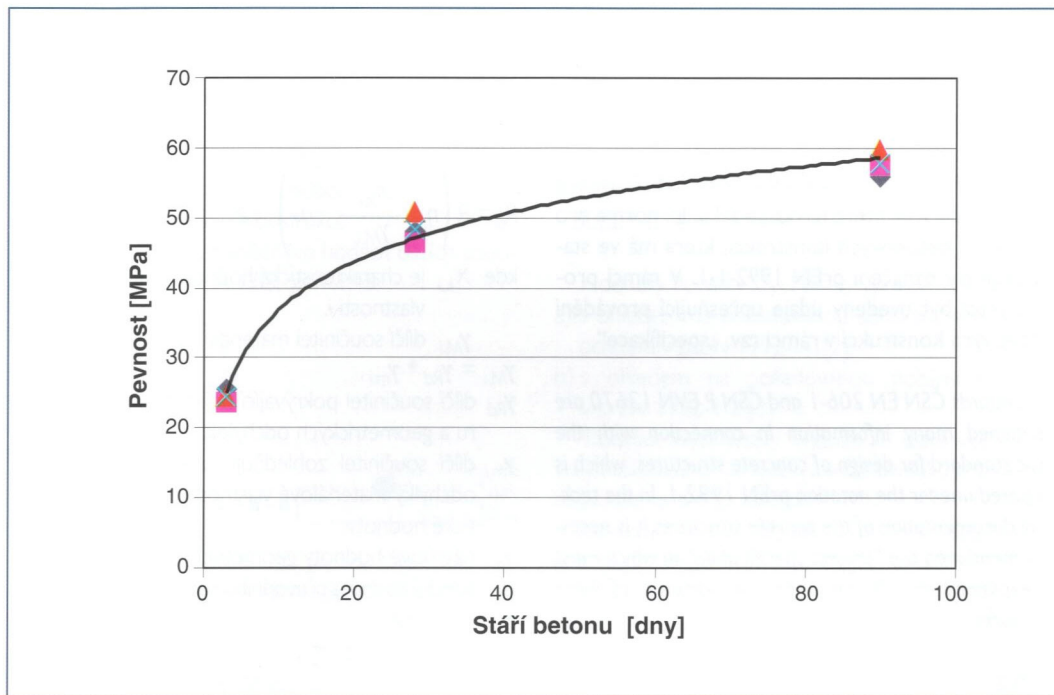
ZÁVĚR

Provedené měření ukázalo, že při betonáži masivních konstrukcí s vysokými nároky na pevnostní parametry, vodotěsnost a trvanlivost betonu v agresivním prostředí je vždy nutno zabývat se problémem teplotních gradientů daných exotermickým průběhem hydratace cementového pojiva. Vznik trhlin v povrchové zóně betonové konstrukce vlivem teplotního gradientu podél tloušťky stěny je v praxi známým častým projevem faktu zanedbání skutečnosti, kdy povrch prvku je ochlazován a jádro má vyšší teplotu. Řešením obtíží je izolace povrchu při betonáži v zimních měsících a jejich

Obr. 5
Časový vývoj
deformací
od smršťování
při vysychání

Fig. 5
Time development
of strains due to
drying shrinkage





Obr. 6
Náběh tlakové
pevnosti v čase

Fig. 6
Growth
of the compression
strength

postupná betonáž po vrstvách s dostatečným časovým odstupem zahájení betonáže jednotlivých vrstev.

Z grafů na obr. 3 a 4 je vidět, kdy je dosaženo maximální teploty a jak probíhá ochlazování. Tyto informace je možno považovat za vstupní data pro provedení numerické analýzy vedení tepla, která určí nejhodnější postup betonáže.

Značně rozdílný časový průběh a velikost smrštění v průběhu tvrdnutí vlivem výrazně rozdílných deformací v povrchové vrstvě a uvnitř konstrukce vysvětluje vznik trhlin u konstrukcí, kde se spojují tenké a tlusté prvky. Rozdíl 100 microstrain znamená diferenci 0.1 mm/m. Při vzdálenosti 2 m je šířka vzniklých trhlin 0,2 mm a při dalším zrání betonu se trhlinka může ještě rozšířit.

Měření smršťování též ukazuje, že tento druh SCC není z hlediska objemových změn příliš odlišný od běžného betonu.

Zkoušený beton byl vyroben a poskytnut TBG/Metrostav. Dosažené výsledky včetně modelových zkoušek byly získány za podpory grantových projektů GAČR č. 103/00/0615 a 103/99/0767

Literatura:

- [1] Okamura, H., Ouchi, M.: Self-compacting concrete. Development, Present Use and Future. "Proc. of the First Int. RILEM Symposium", Stockholm, 1999, 3-14.
- [2] Sakamoto, J. a kol.: An application of Super Workable Concrete to Constriction of Actual Structures. "Transactions of the Japan Concrete Inst.", 13, 1991.

- [3] Tazawa, E., Miazawa, S.: Influence of Constituents and Composition on Autogenous shrinkage of Cementious Materials. Mag. Conc. Res., 12997, 49, 178, 15-22.

Prof. Ing. Jiří Hošek, DrSc.

ČVUT – Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Tel.: 02 2435 3844, fax.: 02 2435 3843

e-mail: hosek@fsv.cvut.cz

Doc. Ing. Jan L. Vítek, CSc.

Metrostav a.s. Koželužská 5, 180 00 Praha 8

tel.: 02 6670 9317, fax: 02 6670 9193

e-mail: vitek@metrostav.cz

a ČVUT – Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Doc. Ing. Václav Kuráž, CSc.

ČVUT – Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6

tel.: 02 2435 4741, fax: 02 2435 3843

e-mail: kuraz@fsv.cvut.cz

Ing. Jiří Litoš

ČVUT – Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6

tel.: 02 2435 5429, fax: 02 2435 3843

e-mail: litos@fsv.cvut.cz

Ing. Jan Matoušek

ČVUT – Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6

tel.: 02 2435 4351, fax: 02 2435 3843

e-mail: matousek@fsv.cvut.cz