

TEPLOTNÍ MĚŘENÍ A SIMULACE V MASIVNÍCH BETONOVÝCH KONSTRUKCÍCH

Vít Némčic, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
vit.nemcic@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Masivní konstrukce jsou vystaveny riziku vzniku vysokých teplot v důsledku hydratace cementu. V souladu s požadavky udržitelného rozvoje se v běžně vyráběných cementech snižuje obsah slínku a vznikají tak směsné cementy, které se postupně zavádějí do výroby. Proto je vývoj teplot v masivních betonových konstrukcích obsahujících moderní směsné cementy předmětem experimentálního programu. Jeho výsledky jsou hodnoceny nejen z hlediska vlastností výsledného betonu, ale také z hlediska možnosti výroby betonu a technologie provádění. V závěru jsou uvedena doporučení pro návrh betonových směsí pro masivní konstrukce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, Hydratační teplo, Teplota, Monitoring, Receptura

ABSTRACT

Massive structures are exposed to the risk of high temperatures due to cement hydration. With the requirement for sustainable development, the clinker content of conventionally manufactured cements is being reduced, resulting in the development of blended cements, which are gradually being introduced into production. Therefore, the development of temperatures in massive concrete structures containing modern blended cements is the subject of an experimental programme. Its results are evaluated not only in terms of the properties of the resulting concrete, but also in terms of the possibility of concrete production and the technology of mixing. Finally, recommendations are given for the design of concrete mixtures for massive structures.

KEYWORDS

Concrete, Heat of hydration, Temperature, Monitoring, Recipe

1. ÚVOD

V poslední době se často požaduje sledování vývoje teplot v masivních konstrukcích. Je to zčásti důsledkem používání cementů s jemným mletím, které vyvíjejí více tepla než cementy hrubě mleté. Dalším důvodem je i vývoj nových druhů cementů, které se objevují na trhu z důvodu redukce obsahu

slínku s cílem vyrábět cementy příznivější k životnímu prostředí. Vhodným složením betonu lze dosáhnout nižších teplot od hydratace. Při nižších teplotách klesá riziko opožděného vývoje ettringitu a následného poškození struktury betonu a zároveň i klesají teplotní rozdíly v rámci jednoho konstrukčního prvku, které mohou být příčinou vzniku trhlin. Dále jsou ukázány vývoje teplot u různých složení betonu naměřené na reálných konstrukcích.

2. POŽADAVKY NA KVALITU BETONU

Zajištění kvality a zejména trvanlivosti betonových konstrukcí je základním zájmem zejména velkých investorů dopravních staveb. Požadují proto splnění požadavků norem a dále navazujících rezortních předpisů, a to zejména technicko-kvalitativních podmínek (TKP). Ty jsou dvojí, a to pro objekty pozemních komunikací (TKP vydané Ministerstvem dopravy pro objekty na pozemních komunikacích (MD PK) a TKP vydané Správou železnic (SŽ) pro objekty staveb na železnici. Požadavky na beton jsou často protichůdné a je třeba hledat kompromisní návrhy, aby bylo dosaženo optimální řešení.

Článek se omezuje na problematiku teplot a jejich průběhů v rámci hydratace betonu u masivních konstrukcí, zvláště základových. Cílem je omezení maximálních teplot a teplotních rozdílů v rámci jednoho konstrukčního prvku. Aby nebylo nutné problém teplot řešit u každé konstrukce definují TKP minimální rozměry prvku, kde je požadováno se teplotními průběhy zabývat (Tab.1).

Tabulka 1: *Požadavky technických kvalitativních podmínek na masivní konstrukce a max. teploty*

Organizace	Min. tloušťka konstrukce	Kapitola TKP	Teplota	Kapitola TKP
MD - PK - TKP 18	0,6 m	18.2.3.7	65 °C	8.5 (13)
SŽ - TKP 18	1 m	18.2.7.8	70 °C	18.3.3.7

Hlavním důvodem pro omezení maximálních teplot je riziko vzniku zpožděného vývoje ettringitu, který může díky tomu, že při jeho vývinu dochází k zvětšování jeho objemu, poškodit strukturu betonu i v dlouhodobém časovém horizontu. Dále je třeba omezovat rozdíl teplot v jednotlivých bodech v rámci konstrukčního prvku. Nerovnoměrné ohřátí prvku vede ke vzniku vlastních pnutí, které mohou vyústit ve vznik trhlin. Zejména u vodonepropustných konstrukcí je třeba nerovnoměrná vlastní pnutí omezovat. U konstrukcí, kde jsou

* Školitel: prof. Ing. Jan L. Víték, CSc., FEng.

trhliny přípustné, lze jejich šířku do jisté míry omezovat i vhodným vyztužením.

Omezení vysokých teplot v betonu lze nejlépe dosáhnout vhodným složením betonu. Dalším významným faktorem je teplota čerstvého betonu. Přibližně lze uvažovat, že přírůstek teploty od hydratace je téměř shodný při různých počátečních teplotách. Výsledná maximální teplota v konstrukci je přibližně součtem počáteční teploty betonu a přírůstku teploty od hydratace. Technologická opatření jako chlazení složek betonu nebo chlazení konstrukce během betonáže jsou možná, ale jsou nákladná a jejich účinnost je jen omezená.

Složení betonu a tím i vývoj teplot při jeho tuhnutí a tvrdnutí je ovlivněn dvěma základními parametry: a) požadavky na pevnost a vývoj pevnosti v čase a b) požadavky na odolnost betonu proti účinkům prostředí.

Příklady požadavků na pevnostní třídy a odolnosti betonu základových konstrukcí jsou uvedeny v Tabulce 2 a 3.

Tabulka 2: SŽ_TKP 18 - Tab. A. 1 Požadavky na návrhovou životnost, specifikaci betonu

Řádek	Konstrukce, konstrukční části staveb	Návrhová životnost	Příklad stupně vlivu prostředí	Mn. třída betonu [MPa]	Odolnost ČRHL
1	Základy mimo působení mrazu	100 let	XA1 XA2 XA3	C 25/30 C 30/37	Ne
2	Základy mimo dosah podzemní vody, avšak v dosahu působení klimatických vlivů	100 let	XF1 XF2	C 25/30	Ne Ano
3	Základy v dosahu podzemní vody a v dosahu působení klimatických vlivů mimo dosah ČRHL	100 let	XA1, XF3 XA2, XF3 XA3, XF3	C 25/30 C 30/37	Ne
4	Základy v dosahu podzemní vody a v dosahu působení klimatických vlivů v dosahu ČRHL	100 let	XA1, XF4 XA2, XF4 XA3, XF4	C 30/37	Ano

Tabulka 3: MD-PK_TKP 18 - Tabulka 18-2 Zatržení částí staveb podle stupně vlivu prostředí

Řádek	Konstrukce, konstrukční části staveb	Návrhová životnost	Příklad stupně vlivu prostředí	Mn. třída betonu [MPa]	Odolnost ČRHL
1	Základy mimo působení mrazu	100 let	XA1 XA2 XA3	C 25/30 C 30/37	Ne
2	Základy v dosahu působení mrazu, mimo dosah HPV, avšak v dosahu působení klimatických vlivů	100 let	XF1 XF2	C 25/30	Ne Ano
3	Základy v dosahu působení mrazu, ve vodě nebo v dosahu HPV	100 let	XF3 XF4	C 25/30	Ano

3. EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM ZAMĚŘENÝ NA ZÁKLADOVÉ KONSTRUKCE

Cílem experimentálního programu bylo sledování vzniku maximálních teplot a jejich časového průběhu v masivu monolitického základového tělesa u čtyřech různých betonových směsí. Hodnoty uvedené v Tab. 4 dávají ucelený přehled o teplotách stanovených na podobných základových konstrukcích mostů, které měly shodnou výšku 2 m. Obr. 1 ukazuje typický základ mostního pilíře s hustou výztuží.



Obrázek 1: Foto typického základu

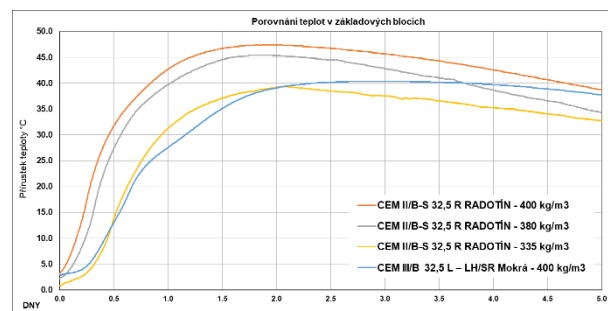
Receptury betonové směsi obsahovaly kombinace různých typů cementů a přísad. V rámci experimentů byly ověřeny vlastnosti betonů s nově zaváděnými typy cementů zejména CEM II/B-S 32,5 R Radotín, dále byly proveden experiment s CEM III/B 32,5 L – LH/SR Mokrá.

Teplotní čidla k sledování maximálních teplot byla umístěná vždy v jádru základového bloku na plastové tyči, která umožnila oddělení čidel od ocelové konstrukce výztuže základu. Záznam teplot byl ukládán do energeticky nezávislé elektronické paměti, kdy odečet naměřených hodnot byl prováděn automaticky v intervalu 5 minut po celou dobu provozu soupravy, kdy byly naměřené hodnoty zaznamenávány.

Tabulka 4: Porovnání teplot jednotlivých betonových směsí

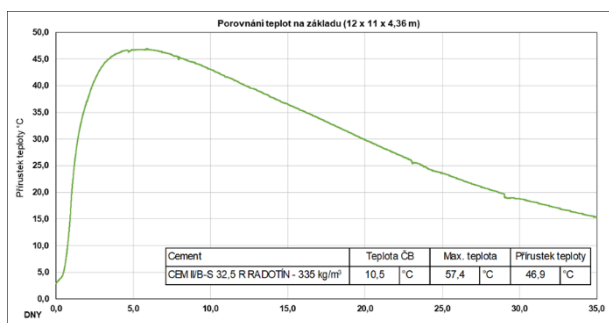
Pevnostní třída betonu		C 30/37	C 30/37	C 30/37 - 90d	C 30/37 - 90d
Označení receptury:		SMĚS 1	SMĚS 2	SMĚS 3	SMĚS 4
CEM II/B-S 32,5 R RADOTÍN	kg / m³	400	380	335	x
CEM III/B 32,5 L – LH/SR Mokrá	kg / m³	x	x	x	400
Teplota čerstvého betonu	°C	21,5	18,8	18,6	19,5
Maximální dosažená teplota	°C	68,9	64,2	57,9	59,9
Čas pro dosažení maximální teploty	hod	45	44	50	70
Přírůstek teploty - měření	°C	47,4	45,4	39,3	40,4
Maximální teplota - analýza	°C	66,7	62,5	55,4	57,4
Přírůstek teploty - analýza	°C	45,2	43,7	36,8	37,9

Tabulka 4 a graf na Obrázku 2 ukazují rozdílný vývoj teplot v základech dle použitého cementu a jeho množství. Dle očekávání největší nárůst teplot je u směsi 1. Tato směs obsahuje 400 kg/m³ CEM II/B-S 32,5 R Radotín. Naopak nejmenší nárůst teplot byl pozorován u směsi 4 se síranovzdorným cementem CEM III/B 32,5 L – LH/SR Mokrá, kde je též nejmenší množství slínku. Podobně pomalý nárůst teplot byl pozorován u směsi 3 s cementem CEM II/B-S 32,5 R, avšak s množstvím pouze 335 kg/m³. U pomalejších náběhů teplot byla též pozorována delší doba, do okamžiku dosažení nejvyšší teploty.



Obrázek 2: Průběhy přírůstků teplot v závislosti na čase

Obrázek 3 znázorňuje průběh ohřátí velkého základu (betonážní díl o rozměrech 12 x 11 x 4,36 m), při použití směsi 3 (dle Tab. 4). Základ je řádově větší než běžné základy, na kterých jsou změřeny výsledky v Tab. 4 a v grafu na Obr. 2. Přesto bylo dosaženo poměrně příznivých teplot betonu. Příklad ukazuje, že vhodným návrhem složení betonu lze teploty snížit bez speciálních opatření i u skutečně velkých objemů betonu. Příznivým výsledným teplotám však přispěla i poměrně nízká teplota čerstvého betonu při ukládce (10,5°C).



Obrázek 3: Průběhy přírůstků teplot v závislosti na čase ve velkém základu

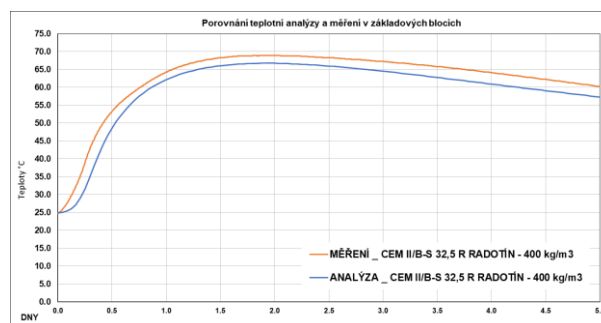


Obrázek 4: Foto velkého základu

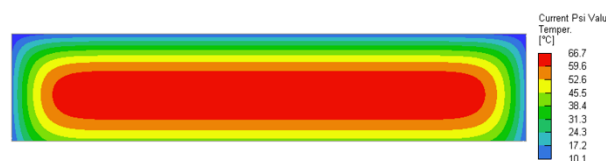
Výsledné maximální teploty při tuhnutí a tvrdnutí betonu jsou nejvíce ovlivněny druhem cementu, množstvím cementu a teplotou čerstvého betonu. Druh a množství cementu je dáno na jedné straně požadavky na výslednou pevnost a na náběh pevnosti a na druhé straně požadavky na trvanlivost, resp. odolnost dle stupňů vlivu prostředí. Je vidět i výrazný vliv velikosti základu. Zatímco stejná směs v základu vysokém 2 m vedla na zahřátí o 39 °C (Tab. 4) u velkého základu došlo k zahřátí o 46,9 °C.

Zjednodušeně lze říci, že pro vyšší pevnost a rychlejší náběh pevnosti je potřeba použít více cementu, resp. vyšší pevnostní třídu cementu. Množství cementu lze snížit, pokud se požaduje dosažení pevnosti v delším časovém horizontu (56 nebo 90 dní místo 28 dní). Požadavek na vyšší odolnost (např. proti CHRL) obvykle znamená též vyšší dávky cementu a následně vyšší teploty při hydrataci. Odolnosti proti CHRL jsou kvantifikovány podle odpadu materiálu při zmrazovacích cyklech, což je metodika s poměrně velkým statistickým rozptylem. Pokud má být receptura dostatečně robustní (malé riziko, že zkouška nevyjde), je potřeba počítat spíše s větším množstvím cementu, než je odzkoušené minimum. Zvyšování množství cementu ale na druhé straně vede k větším teplotám v betonovém masivu.

Dále bylo v rámci experimentálního programu provedeno porovnání experimentální měření a teplotní simulace v programu metrostav TSS, který slouží pro teplotní simulace konstrukcí během tuhnutí betonu. Z porovnání experimentálního měření a teplotní simulace vychází dobrá shoda maximálních teplot mezi simulací s naměřenými daty (Tab. 4). Pro názornou ukázkou je zde uvedeno porovnání teplotní analýzy a měření v základovém bloku s použitím CEM II/B-S 32,5 R 400 kg/m³ (Obr. 5).



Obrázek 5: Porovnání teplotní analýzy a měření v základovém bloku s použitím CEM II/B-S 32,5 R 400 kg/m³



Obrázek 6: Teplotní analýza základové konstrukce – CEM II/B-S 32,5 R 400 kg/m³

3. ZÁVĚR

V rámci experimentálního programu byly odzkoušeny betonové směsi se 3 různými cementy s různým dávkováním. Teploty od hydratačního tepla byly měřeny na základech mostů s tloušťkou 2,0 m. Maximální přípustná teplota betonu je předepsána v TKP a neměla by být překročena. Nejúčinnější způsob, jak teplotu od hydratačního tepla snížit, je vývoj vhodného složení betonu. Protože složení betonu je závislé na požadavcích na pevnost, vývoj pevnosti a na odolnosti proti prostředí je velmi podstatné, jaké parametry se pro beton předepíšu. Např. u základů, které jsou zcela zasypány, není obvykle třeba požadovat odolnost proti CHRL a mrazu. Rovněž zvláště u základů nebývá nutné požadovat rychlý náběh pevnosti, ale bude postačující sledovat pevnost po 56 nebo 90 dnech.

Dosažení přiměřeně nízkých teplot v masivních konstrukcích musí být výsledkem komplexního posouzení konkrétní situace s uvažováním reálných požadavků na pevnost a rychlost jejího vývoje a reálných požadavků na odolnost betonu proti účinkům prostředí. Na základě takto stanovených podmínek, lze navrhnout vhodné složení betonu. Pokud by ani za těchto podmínek teploty nespĺňovaly požadované limity, pak by bylo vhodné se zamyslet nad geometrií konstrukce, zda je požadovaná masivnost skutečně potřeba.

Příklad velkého základu s průběhem teplot dle Obr. 4 ukazuje, že přiměřené řešení i u velkých základů možné je.

Poděkování

V článku byly částečně využity výsledky projektu SGS Číslo grantu: SGS22/035/OHK1/1T/11

Literatura

- [1] *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací – Kapitola 18 betonové konstrukce a mosty*
- [2] *Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah – Kapitola 18 betonové mosty a konstrukce*