

Experimentální **A**nalýza **N**apětí **2005**

THE EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON HEAT TRANSPORT SIMULATION USING THE DELPHIN COMPUTER CODE

VLIV VLHKOSTI NA SIMULACI ŠÍŘENÍ TEPLoty V PROGRAMU DELPHIN

Tomáš Doležel¹, Petr Konvalinka²

This paper presents the effect of moisture content on heat transport simulation using the Delphin computer code. In this project three concrete specimens with different moisture content were loaded with freeze and thaw cycle. Calculated and measured data were analyzed and following conclusion have been made. The difference between calculated and measured data is strongly influenced by the moisture content when the freeze cycle is simulated. There is almost no influence between moisture content and error of calculated and measured data when simulating thaw cycle.

Keywords

moisture, heat transport, computer simulation, porous material

Úvod

Tento příspěvek se zabývá zjištěním přesnosti výpočtu šíření teploty v betonových vzorcích o různé vnitřní vlhkosti při záporných a kladných teplotách prostředí pomocí numerického modelu v programu DELPHIN, který neuvažuje změnu skupenství vody při teplotách pod bodem mrazu. V první části byla provedena měření teploty na třech betonových vzorcích o různých vlhkostech při kladné a záporné teplotě okolí, v další části pak vyhodnocení vypočtených a změřených hodnot.

Největší rozdíl mezi změřenými a vypočtenými hodnotami se předpokládá u vzorku s největší vlhkostí při zatížení zápornou teplotou, nejmenší naopak u vzorku s nízkou vnitřní vlhkostí.

Vzorky a experiment

Jako vzorky pro měření byly použity tři krychle z prostého betonu o rozměrech 100x100x100mm obalené z pěti stran tepelnou izolací z minerální plsti značky ORSIK. Každá krychle byla za

¹ Ing. Tomáš Doležel: ČVUT Fakulta stavební; Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice, ČR, tel.: +420224355417, e-mail: tomas.dolezel@fsv.cvut.cz

² Doc.Ing. Petr Konvalinka, CSc ČVUT Fakulta stavební; Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice, ČR, tel.: +420224354306; e-mail: conwa@fsv.cvut.cz

účelem měření osazena v těžišti teplotním čidlem DS18S20, které vyrábí firma Dallas Semiconductors.

Příprava vzorků

Přípravě zkušebních těles byla věnována velká pozornost. Složení betonové směsi použité na výrobu vzorků je znázorněno v tabulce (Tab. 1). Po odformování byly vzorky na dobu 28 dnů umístěny ve vodní lázni, poté z lázně vyjmuty a udržovány v prostředí s konstantní vlhkostí až do stáří dvou let.

Každý vzorek byl nejprve opatřen jedním teplotním čidlem (Obr. 1) a poté zvážen. Pro zajištění co nejnižší vnitřní vlhkosti byla krychle číslo dvě umístěna po dobu 8 hodin do elektrické pece o teplotě 150°C. Ihned po ukončení sušení byla krychle číslo dvě spolu s krychlí číslo jedna zvážena a zaizolována tenkou vrstvou epoxidové pryskyřice. Epoxidová pryskyřice zabraňuje kolísání vnitřní vlhkosti, které je způsobeno různou vlhkostí tělesa a okolního prostředí. U krychle číslo jedna, která sloužila jako referenční, nebyla měněna vnitřní vlhkost sušením nebo namáčením ve vodě. U posledního vzorku číslo tři bylo požadováno dosažení co největší vnitřní vlhkosti, proto byl na 8 dní umístěn do vodní lázně a poté zvážen a stejně jako krychle jedna a dvě izolován proti ztrátě vlhkosti epoxidem. Rozdíl hmotností před začátkem a koncem sušení nebo vlhčení udává změnu vlhkosti ve vzorku (Tab. 2). Nakonec byly všechny vzorky z pěti stran zaizolovány tepelnou izolací značky ORSIK.



Obr. 1 Teplotní čidlo DS1820

Složky		C 45/55
Portlandský cement CEM II [kg/m ³]		440
Štěrk [kg/m ³]	Frakce 8 - 16 mm [kg/m ³]	720
	Frakce 4 - 8 mm [kg/m ³]	340
	Frakce 0 - 4 mm [kg/m ³]	783
Voda [kg/m ³]		180

Tab. 1 Složení použité betonové směsi

Vzorek	Poznámka	Hmotnost A [g]	Hmotnost B [g]	B - A [g]
Číslo 1	-----	2421	2421	0
Číslo 2	Snížená vlhkost	2367	2360	-7
Číslo 3	Zvýšená vlhkost	2342	2454	115

Tab. 2 Změna hmotnosti způsobená změnou vlhkosti

Měření na vzorcích

Zatěžování teplotou probíhalo v laboratoři experimentálního centra FSV, která je na tato měření plně vybavena. Zatěžovací doba byla stanovena na 40 hodin tak, aby bezpečně došlo k vyrovnání teplot mezi vzorkem a okolím. Výchozí teplota betonu byla před každým zatěžováním zápornou nebo kladnou teplotou pro všechny vzorky stanovena na 0°C. Zatěžování zápornou i kladnou teplotou probíhalo na každém vzorku jednotlivě. Zmrazování proběhlo v mrazícím boxu při teplotě -40°C postupně na všech tělesech. Po ukončení zmrazování, byly vzorky opět uvedeny na výchozí teplotu a poté jednotlivě zatěžovány v termostatické komoře teplotou +40°C.

Teploty při zatěžování byly zaznamenávány pomocí osobního počítače programem DIGITEMP každých 20 sekund. Výsledky měření byly uloženy na pevný disk pro pozdější vyhodnocení.

Měření základních fyzikálních veličin potřebných pro numerickou simulaci proběhlo na měřicím zařízení ISOMET 2104 (Obr. 2). Jedná se o přenosný měřicí přístroj určený k přímému měření součinitele tepelné vodivosti, měrné objemové kapacity a teploty pomocí výměnných jehlových a plošných sond. Na obrázku číslo 3 je fotografie vzorku osazeného teplotními čidly a opatřeného tepelnou izolací.



Obr. 2 ISOMET model 2104

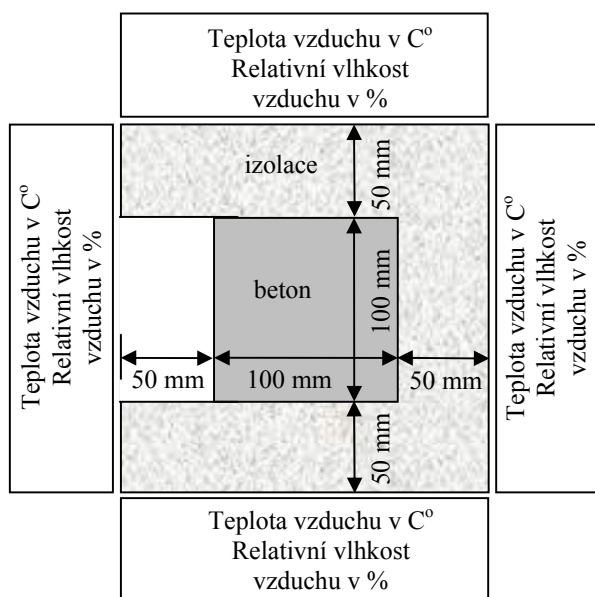


Obr. 3 Testovaný vzorek

Simulace v programu Delphin

Program DELPHIN byl vyvinut na TU v Drážďanech na Institutu Klimatu staveb. Program dokáže simulovat současné působení teploty, solí, vlhkosti atd. Součástí programu je také databáze materiálových charakteristik nejpoužívanějších stavebních materiálů, která byla při výpočtu využita.

Na obrázku 3 je znázorněn použitý model v programu DELPHIN. Okrajové podmínky jsou různé podle toho, zda simulují uložení vzorku v mrazícím boxu nebo v termostatické komoře.



Obr. 3 Použitý model (DELPHIN)

Basic material parameters	
⊖ por	0.14 m ³ /m ³
⊖ eff	0.12 m ³ /m ³
⊖ cap	0.12 m ³ /m ³
ρ	2350 kg/m ³
c	
μ dry	100
Δw*	0.13 kg/m ² h ^{0.5}
Keff*	
λ	

Obr. 4 Základní materiálové charakteristiky betonu společné pro všechny vzorky

Měnící se materiálové charakteristiky betonu použité při výpočtu jsou λ [W/mK] a c [J/kgK] (Tab. 3). Ostatní parametry zůstávají konstantní (Obr. 4). V případě simulace uložení vzorku v mrazícím boxu byla zvolena teplota okolního vzduchu -40°C a relativní vlhkost vzduchu 4%. Teplota vzorku na začátku výpočtu byla 0°C . Při simulaci uložení vzorku v termostatické komoře byla zvolena teplota okolního vzduchu $+40^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkost 40%. Teplota vzorku na začátku výpočtu byla 0°C . Další parametry již jsou stejné pro oba stavy zatěžování, součinitel přestupu tepla na hranici beton-vzduch je $23\text{W/m}^2\text{K}$, výměnný koeficient pro difúzi vodních par je $3,00\text{e}^{-10}\text{ s/m}$.

Vzorek	Poznámka	λ [W/mK]	c [J/kgK]	Relativní vlhkost [%]
Číslo 1	-----	2,08	1050	0,2
Číslo 2	Snížená vlhkost	1,44	950	0,7
Číslo 3	Zvýšená vlhkost	1,83	950	11,5

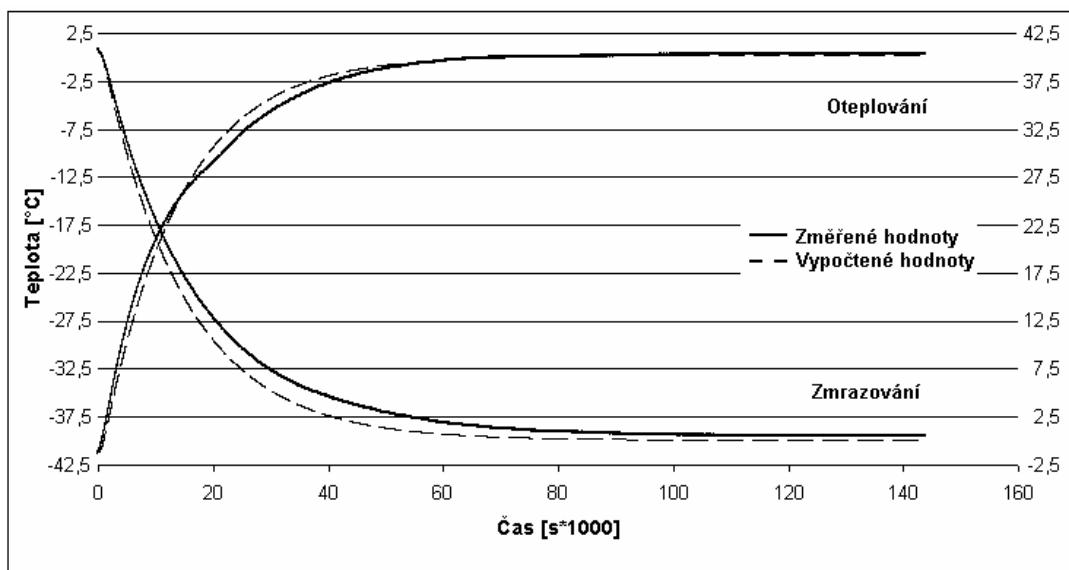
Tab. 3 Změřené materiálové charakteristiky (ISOMET)

Výsledky

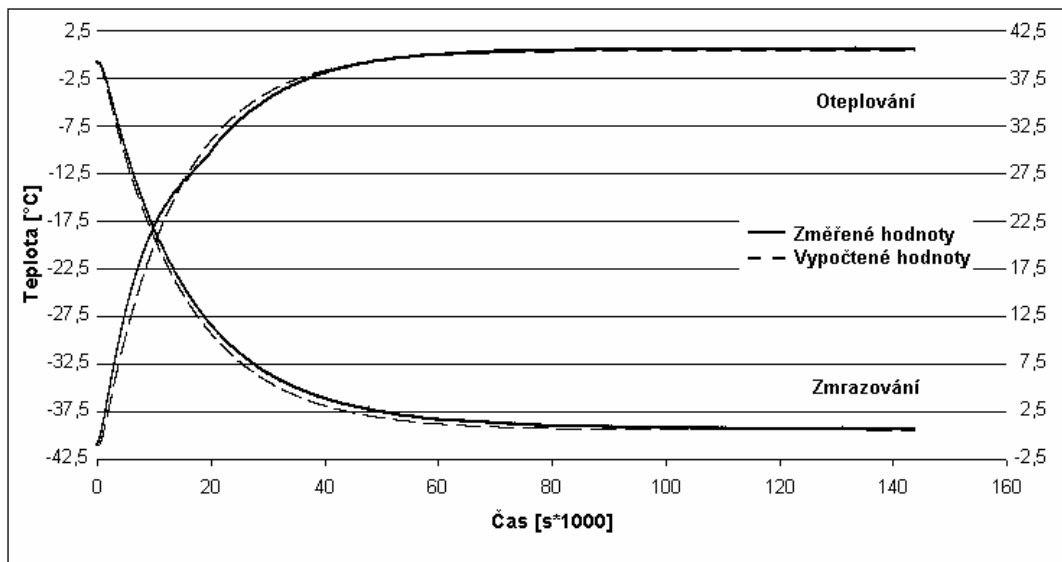
Z grafů průběhu šíření teplot je zřejmé, že chyba mezi změřenými a vypočtenými hodnotami ve větvi znázorňující zahřívání vzorků je velmi malá. Pro všechny vzorky zůstává průměrná chyba do 0,25°C.

Nepřesnost výpočtu při zmrazování vzorku se zvyšuje s rostoucí vlhkostí. Vzorek s nejnižší vlhkostí vykazuje průměrnou chybu mezi měřením a výpočtem 0,49°C a maximální odchylku vypočtených a změřených hodnot rovnu 1,39°C. Vzorek s normální vlhkostí vykazuje průměrnou odchylku 1,17°C s maximální odchylkou vypočtených a změřených hodnot rovnu 2,51°C. U vzorku s vysokou vlhkostí se již hodnoty změřené a vypočtené liší velmi výrazně. Průměrná chyba je 2,16°C a maximální odchylka vypočtených a změřených hodnot dokonce 6,09°C.

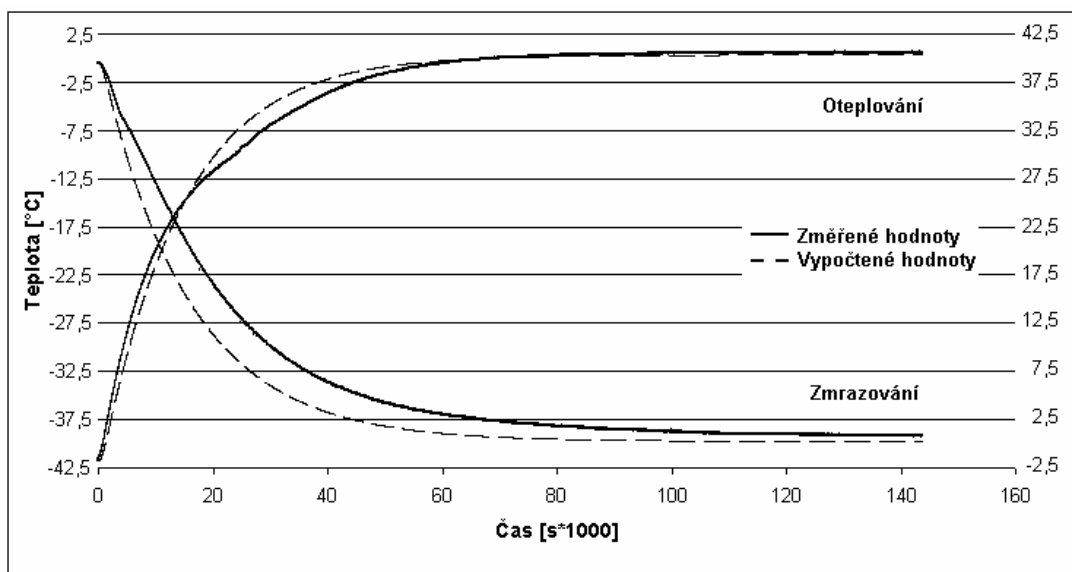
Graf 1,2 a 3 znázorňuje časový průběh teplot v těžišti postupně pro vzorky o normální, snížené a zvýšené vlhkosti. V každém grafu je vykreslen průběh změřené a vypočtené teploty při zahřívání i zmrazování vzorku. Plná čára znázorňuje změřené hodnoty a čárkovaná hodnoty vypočtené. Hodnoty teplot na levé straně grafu patří k datům vyjadřujícím zmrazování a hodnoty teplot na pravé straně grafu k datům znázorňujícím zahřívání vzorku.



Graf 1 Průběh teploty v těžišti vzorku číslo 1



Graf 2 Průběh teploty v těžišti vzorku číslo 2 – nízká vlhkost



Graf 3 Průběh teploty v těžišti vzorku číslo 3 – vysoká vlhkost

Závěr

Výsledky přímého měření teplot ve vzorcích pomocí teplotních čidel porovnané se simulací šíření teploty (DELPHIN) vedou k následujícím závěrům:

- Numerický výpočet v programu Delphin dává velmi spolehlivé výsledky při výpočtu šíření teploty v případě teploty prostředí pohybující se v kladných hodnotách nebo při velmi malé vlhkosti vzorku. V případě simulace zmrazování chyba výpočtu roste s velikostí vnitřní vlhkosti vzorku.
- Největší odchylka mezi změřenými a vypočtenými hodnotami byla zjištěna u vzorku o největší vnitřní vlhkosti při simulaci zmrazování. Velikost maximální odchylky mezi vypočtenými a změřenými hodnotami při zmrazování vzorku je rovna 6,09°C a velikost průměrné odchylky mezi výpočtem a měřením je rovna 2,16°C. Tyto hodnoty jsou při simulaci zahřívání rovny 2,57°C a 0,24°C.

Tato práce byla podpořena grantem CTU0501011.

Literatura

- [1] Černý, R., Rovnaníková, P.: *Transport Processes in Concrete* – Great Britain, Wiltshire, 2002, ISBN 0-415-24264-9.
- [2] Pytlík, P.: *Technologie Betonu* – Vysoké učení technické v Brně, Nakladatelství VUTIUM, 2000, ISBN 80-214-1647-5.
- [3] Grunewald, J.: *Documentation of the Numerical Simulation Program DIM3.1* - University of Technology Dresden, 2000