

MANAGEMENT OF HYDRATATION HEAT EVOLUTION

R. Valenta, J. Šejnoha, M. Šejnoha, T. Krejčí*

Summary: *In this contribution the influence of casting procedure in layers together with application of H-Krystal catalyst on water tightness and volume stability of concrete structures of considerable thickness is investigated. Proposed procedures are verified by both the numerical and physical experiments. Reaching the volume stability results in the significant reduction of crack evolution. The compact concrete therefore provides protection for reinforcement, and so these structures can also be used in an aggressive environment. The goal of this work is to propose a methodological approach ensuring the highest possible reduction of crack evolution and yielding watertight concretes. The main causes of crack evolution in an early stage of concrete are the hydration heat and shrinkage. To reach the water tightness and the volume stability of concrete, suitable casting procedures such as casting in layers and an application of H-Krystal in dilatation joints are proposed, which allows us to control the evolution of hydration heat.*

1. Úvod

Záměrem této práce je navrhnout metodologický postup poskytující technologickou podporu pro návrh a provádění vodotěsných a objemově stálých normálních a samozhutnitelných betonů pro základové konstrukce, jako jsou podzemní stěny a základové desky. Tyto konstrukce dosahují často značných objemů (například značná tloušťka základové desky), které způsobují problémy spojené s vývinem hydratačního tepla a následně s propagací trhlin.

Hlavním cílem je tak omezení těchto jevů dávkováním betonové směsi, ukládáním betonu na stavbě a přijetím dalších opatření. V tomto pojednání detailněji zkoumáme vliv postupu betonáže ve vrstvách spolu s aplikací katalyzátoru H-Krystal na vodotěsnost a objemovou stálost betonových konstrukcí značných tloušťek. Navržené postupy jsou ověřovány jak experimentálně tak analyticky.

Výsledky tohoto výzkumu poslouží při návrhu základových desek a obecně při návrhu všech plošných betonových konstrukcí značné tloušťky. Obdobná metodika je aplikovatelná i na podzemní stěny. Vzhledem k tomu, že dosažením objemové stálosti dojde k výraznému omezení vzniku trhlin, budou takovéto plošné konstrukce vhodné i pro použití v agresivním prostředí, neboť ocelová výztuž bude proti agresivním látkám chráněna kompaktním betonem.

* Ing. R. Valenta, Prof. Ing. J. Šejnoha, DrSc., Doc. Ing. M. Šejnoha, Ph.D., Ing. T. Krejčí, Ph.D.:
Fakulta stavební, ČVUT v Praze; Thákurova 7, 166 29 Praha 6; tel.:+420 224 354 472; e-mail:
richard.valenta@fsv.cvut.cz

2. Způsob řešení

K dosažení vodonepropustnosti a objemové stálosti betonu se využívá vhodného postupu betonáže po tloušťce ve vrstvách spolu s uplatněním katalyzátoru H-Krystal v přechodových vrstvách, čímž lze regulovat vývin hydratačního tepla.

H-Krystal je katalyzátor způsobující zpoždění hydratace cca o 7 hodin a zajišťující nepropustnost betonu. Chemické látky obsažené v H-Krystalu využívají vody v kapilárách jako difúzní medium k migraci skrz kapilární systém betonu. Tento proces vyvolává chemickou reakci mezi složkami H-Krystalu, vlhkostí a zbytkovými produkty cementové hydratace (hydroxid vápenatý, anorganická sůl, oxidy a nehydratované a částečně hydratované cementové části), což způsobí masivní růst krystalů uvnitř kapilárního systému a tím uzavření kapilárních cest uvnitř betonu. Pórová struktura betonu se za těchto okolností stane nepropustnou jak pro vodu tak i ostatní tekutiny. Jinými slovy, H-Krystal je tedy katalyzátor v cementopískovém nosiči, který dokáže v prostředí kapiláry, za pomoci vody v kapiláře obsažené, iniciovat růst krystalů a tím zajistit masivní nepropustnost betonu.

Zpožděním hydratace a tudíž počátku tuhnutí a následně i smršťování v přechodových vrstvách dojde k nerovnoměrnému rozdělení počátečních napětí v betonu. Tímto řízeným nerovnoměrným rozdělením napětí lze docílit jistého předpětí betonu v předem vybraných vrstvách.

Jak bylo naznačeno dříve, nalezení vývoje teplotních a vlhkostních polí je nezbytným základem analýzy vzniku a vývoje trhlin v betonu. Aniž bychom zabíhali do podrobností, poznamenejme, že transportní problém se řeší jako sdružená nelineární úloha, která vyžaduje simultánní numerickou integraci tří skupin rovnic. První skupinu tvoří Fickův, Darcyho a Fourierův zákon, druhou bilanční rovnice pro vlhkost a teplo, třetí rovnice materiálové (retenční vztahy) [Krejčí, 2003]. K analýze teplotního a vlhkostního pole využíváme model autorů Künzela a Kiessla [Künzel – Kiessl, 1977] rozšířený o soubor klimatických podmínek a model vývinu hydratačního tepla v betonu.

Při výpočtech poškození se vychází z dekompozice celkové deformace na elastickou část deformace, na část deformace od poškození, dotvarování, smršťování a vlivu změny teploty. Vlivy smršťování a dotvarování betonu společně s přetvořením od změny teploty mají značný vliv na celkové přetvoření, které je rozhodující pro to, zda dojde k vytvoření trhliny či nikoliv. Pro modelování smršťování a dotvarování mladých betonů lze použít model B3 popsany např. v [Bažant – Baweja, 1995/1,2]. Oba vlivy jsou v něm zahrnuty a jsou závislé na teplotě a vlhkosti. Pro modelování poškození betonu využíváme model skalárního izotropního poškození. Evoluční vztah pro parametr poškození je definován ve tvaru

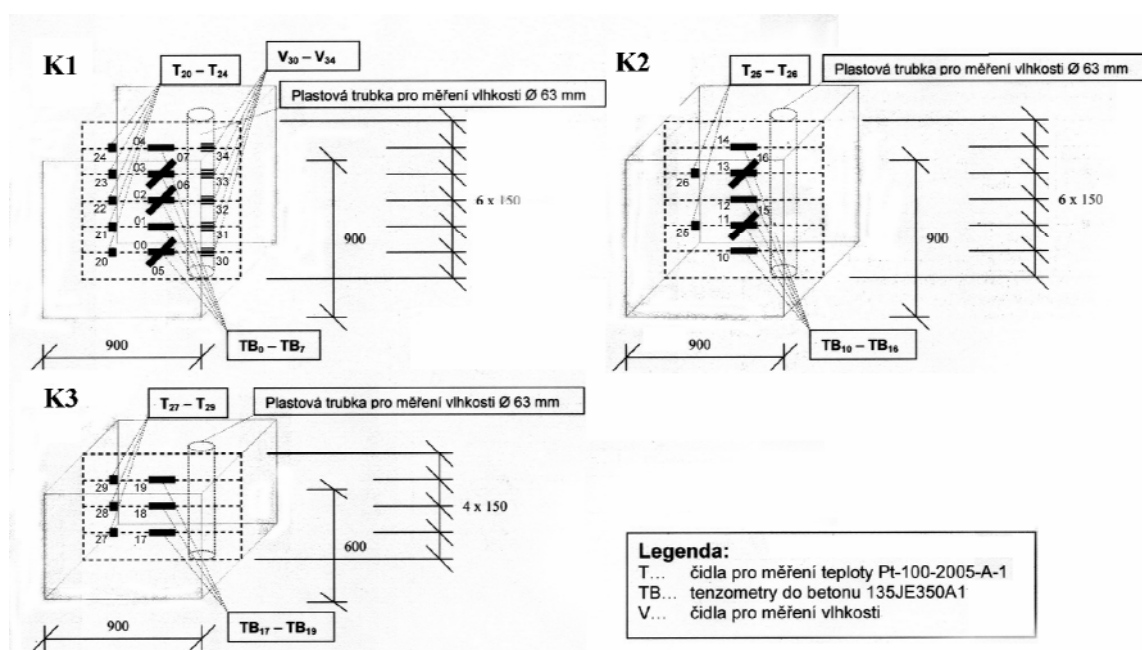
$$\omega = 1 - \left(\frac{f_t}{E \varepsilon_{eq}} \right) \exp \left(- \frac{\varepsilon_{eq} - \frac{f_t}{E}}{u_f - \frac{f_t}{E}} \right) \quad (1)$$

kde u_f definuje sklon změkčení a f_t je tahová pevnost. Modul pružnosti, tahová a tlaková pevnost betonu jsou závislé na stáří betonu. Popis modelu lze nalézt např. v [Pijaudier-Cabot – Jason, 2002], [Sluys, 2003] a [Bittnar - Šejnoha, (1992)].

3. Výsledky řešení

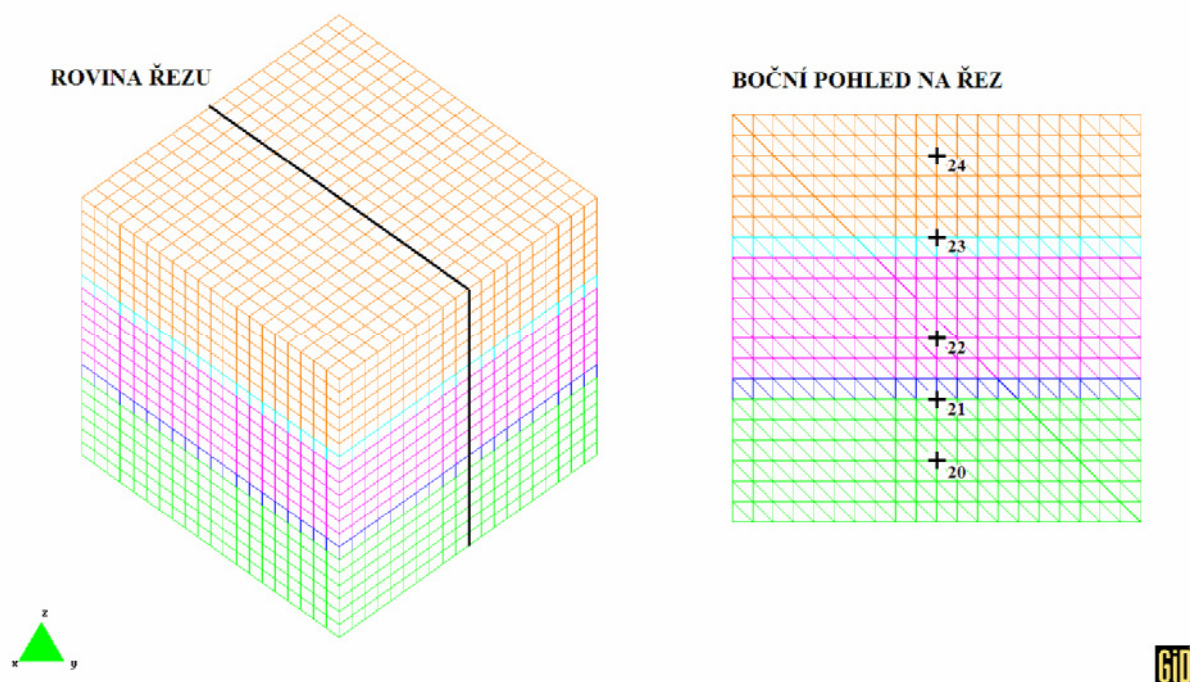
Pro ověření výše popsanych předpokladů a numerického modelu termomechanického chování betonu raného stáří byl proveden pilotní experiment, při němž byly sledovány termomechanické vlastnosti tří betonových kvádrů.

Dvě kostky mají rozměry 900x900x900 mm a jedna 900x900x600 mm. Betonáž u větších kostek (K1, K2) proběhla ve třech vrstvách, vždy s časovým odstupem tří hodin, nižší kvádr (K3) byl vybetonován pouze ve dvou fázích. Na mezivrstvy krychle K1 byl posypem aplikován katalyzátor H-Krystal, zatímco u ostatních betonových kostek krystalizace použita nebyla. Zabetonovanými čidly byla po výšce kostek měřena teplota, vlhkost a poměrné vodorovné přetvoření, schéma čidel viz obr. 1, kde T značí teplotní čidla, V vlhkostní a TB čidla deformační.



Obr. 1: Schéma čidel v betonových kvádrech

Pro numerickou analýzu zkoumaného problému je využíván konečně prvkový program SIFEL, který umožňuje řešit dříve zmíněný sdružený problém mechaniky poškození a transportních jevů. Modelována byla kostka K1, která byla betonována ve třech vrstvách s časovým odstupem betonáže jednotlivých vrstev tří hodiny. Na mezivrstvy byl posypem aplikován katalyzátor H-Krystal, což bylo v modelu zahrnuto zpožděním hydratace v tenké přilehlé vrstvě o dalších 7 hodin. Schéma numerického modelu je znázorněno na obr. 2.



Obr. 2: Schéma numerického modelu kostky K1

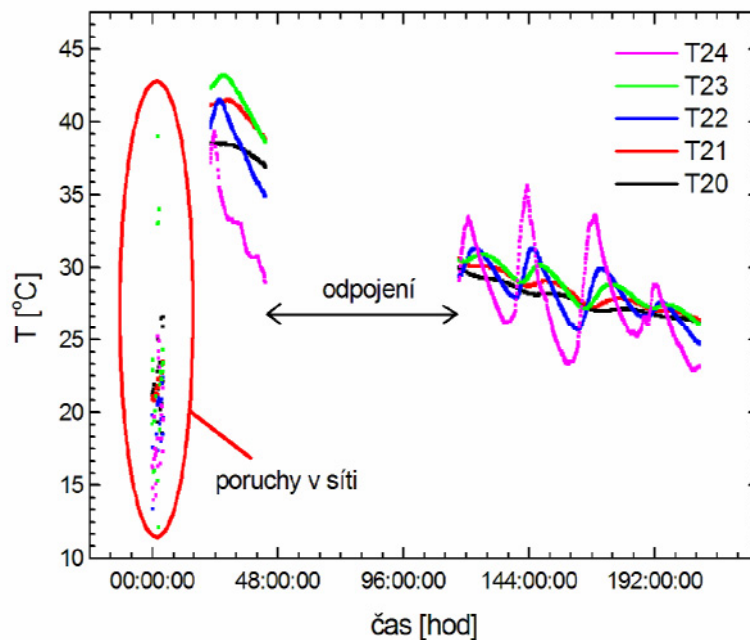
Boční hrany krychle byly modelovány jako izolované vůči prostupu tepla i vlhka, neboť bednění kostek bylo vytvořeno z dostatečně silných polystyrénových desek obalených hydroizolační fólií. V numerickém modelu kostky K1 byl spodní povrch izolován pouze proti prostupu vlhkosti a byla mu předepsána konstantní teplota, což ve skutečnosti simuluje kontakt s betonovým podložím oddílaným fólií. Na horním povrchu krychle byly předepsány reálné klimatické podmínky odpovídající skutečnosti z doby experimentálního měření. Transport tepla a vlhkosti v kostce byl simulován od okamžiku vybetonování, zatímco mechanická část výpočtu byla spuštěna v době jeden den od ukončení betonáže, kdy se předpokládá ukončený proces tuhnutí.

Měření na kostkách byla značně ovlivněna negativními vlivy, jako např. kolísáním napětí v elektrické síti způsobené okolním stavebním provozem a dokonce i odpojením měřicí armatury. Tyto jevy negativně ovlivnily nejvíce výsledky měření poměrných deformací, které vykazují nesmyslné hodnoty a výsledky deformací jsou proto nepoužitelné.

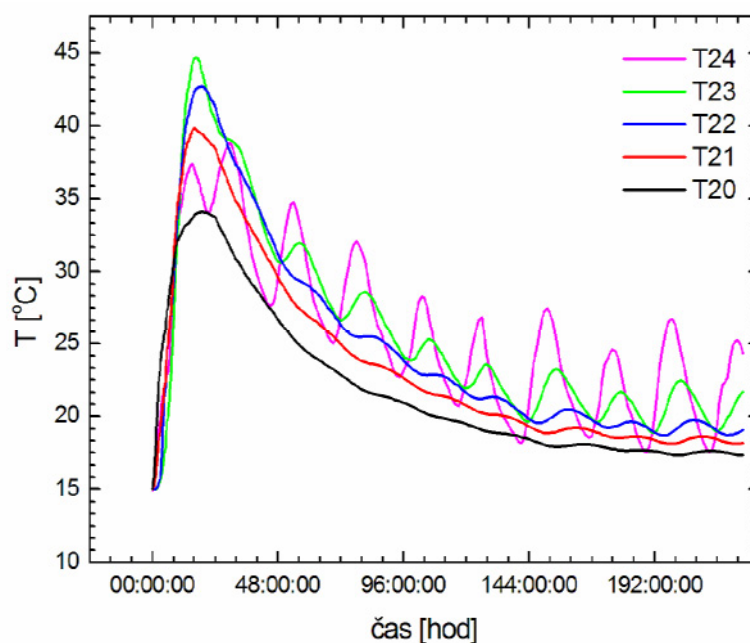
Teplotní pole získané numerickou analýzou je konzistentní s naměřenými výsledky z experimentu a analýza také potvrdila nerovnoměrnost rozložení napětí po výšce průřezu. Na obr. 3 jsou vykresleny experimentálně získané průběhy teplot v kostce K1, zatímco teploty obdržené z numerické analýzy jsou znázorněny v grafu na obr. 4. Pozice měřících bodů je patrná ze schématu kostky na obr. 2. Z porovnání grafů je zřejmé, že vývin teplotního pole získaný z numerické analýzy vykazuje velice podobné charakteristiky jaké jsou patrné z naměřených hodnot. Pouze střední teplota, kolem které teploty v jednotlivých bodech oscilují, je u numerické analýzy nižší. Tato nepřesnost se eliminuje modifikací okrajových podmínek, zejména předepsáním vyšší teploty podloží.

Dle výpočtu se tahová napětí od smršťování v povrchových vrstvách téměř nevyskytují a jsou soustředěna do střední vrstvy. V povrchových vrstvách se nachází téměř výhradně

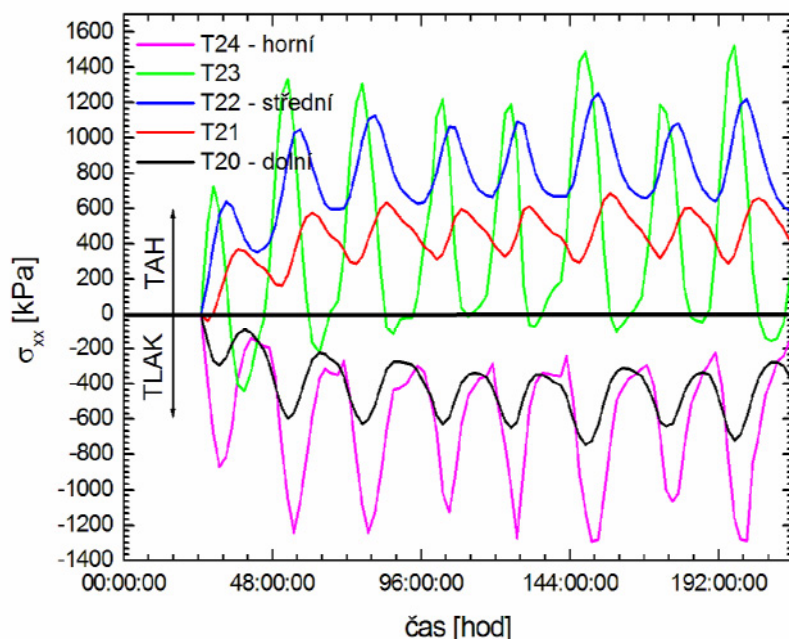
tlačené oblasti, čímž je zamezeno vzniku trhlin. Průběh napětí je znázorněn na obr. 5. Pozice zkoumaných bodů je shodná s body u teplotního pole. Míra poškození je závislá na vývinu tahové pevnosti a způsobu vyztužení ve střední části desky..



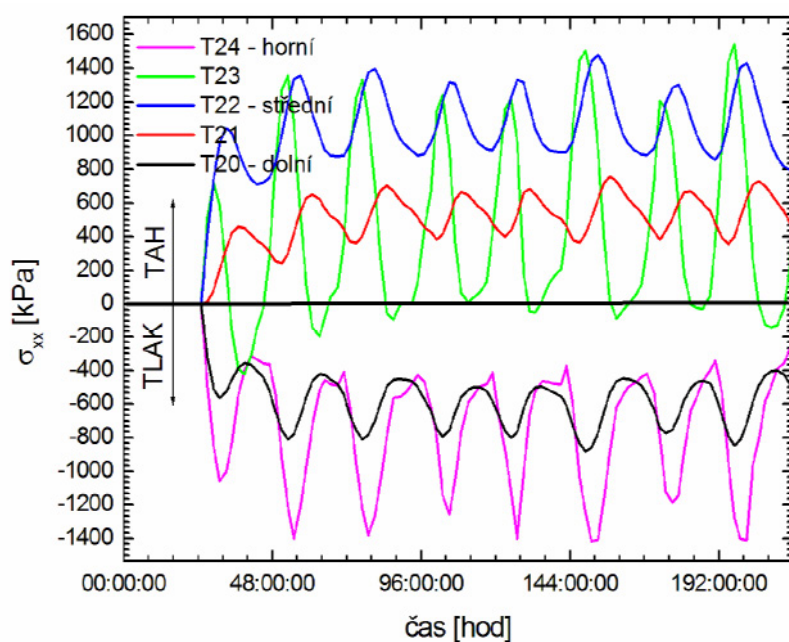
Obr. 3: Průběh teplot v kostce K1 – experiment



Obr. 4: Průběh teplot v kostce K1 - simulace



Obr. 5: Průběh napětí v kostce K1 - aplikace katalyzátoru v mezivrstvách - simulace



Obr. 6: Průběh napětí v kostce K1 - aplikace katalyzátoru v celé vrstvě - simulace

Tloušťka vrstvy, v které došlo ke zpoždění hydratace působením katalyzátoru H-Krystal, byla odhadnuta a přesná hodnota bude určena analýzou odvrtů. Pomocí elektronového mikroskopu můžeme upřesnit do jaké hloubky proběhla krystalizace.

Byl také uvažován stav, kdy byl H-Krystal aplikován do celé prostřední vrstvy a betonáž proběhla shodným způsobem jako u výše popsané metody s aplikací katalyzátoru pouze na kontaktní vrstvy. Výsledná napětí jsou znázorněna obr. 6. Tato metoda je vhodnější, neboť

rozložení napětí je téměř shodné a aplikace přimícháním H-Krystalu betonové směsi ještě před betonáží je výhodnější.

3. Závěr

Výše navrženým postupem betonáže ve vrstvách spolu s uplatněním katalyzátoru H-Krystal lze dle výpočtu do předem vybraných vrstev vnést jisté předpětí a tím omezit vznik trhlin v povrchových vrstvách betonové plošné konstrukce. Jak je uvedeno výše, bylo dosaženo velmi dobré shody mezi numerickou analýzou a naměřenými daty z experimentů. Nutno ale poznamenat, že experimentálně naměřená data byla negativně ovlivněna okolním stavebním provozem, nejvíce pak měření poměrných deformací. V současné době se připravují nové experimenty, které budou provedeny v laboratorních podmínkách a kde budeme moci tyto negativní vlivy odstranit.

4. Poděkování

Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT ČR, projekt 1M6840770001, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

5. Literatura

- Krejčí, T. (2003) Time– dependent behavior of concrete and other porous materials, ČVUT, Praha, disertační práce.
- Künzeli, H. M. – Kiessl, K. (1977) Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components. Int. J. Heat Mass Transfer, 40, 159 – 167.
- Bažant Z. P. – Baweja S. (1995/1) Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures – Model B3. RILEM Recommendation, Mater. Struc., 28, p. 357-365
- Pijaudier-Cabot, G. – Jason, L. (2002) Continuum damage modeling and some computational issues. RFGC – 6/2002, Numerical Modelling in Geomechanics, p. 991-1017
- Sluys, B. (2003) Constitutive modeling of concrete and nonlinear computational dynamics. RFGC – 7-8/2003, Geodynamics and Cycling Modelling, p. 911-973
- Bittnar, Z. – Šejnoha, J. (1996) Numerical methods in structural mechanics, ASCE Press USA and Thomas Telford UK, 1996