

Termomechanický model CB vozovky ve fázi tuhnutí a tvrdnutí betonu

¹Veselý Jakub, ²Pánek Petr, ³Vébr Ludvík

¹Jakub Veselý, Bc., ČVUT v Praze, ČR, tel.: +420728944051, e-mail: jakub.vesely.2@fsv.cvut.cz

²Petr Pánek, Ing., Ph.D., ČVUT v Praze, ČR, tel.: +420224354418, e-mail: petr.panek@fsv.cvut.cz,

³Ludvík Vébr, Doc., Ing., CSc., ČVUT v Praze, ČR, tel.: +420224354420, e-mail: vebr@fsv.cvut.cz

Abstrakt

Článek je zaměřen na problematiku analýzy cementobetonových vozovek pomocí metody konečných prvků (MKP). Konkrétně se zabývá analýzou teplot v počátečních fázích tvrdnutí. Vysoké teploty od hydratace i klimatických podmínek v rané fázi tvrdnutí betonu spolupůsobí a mohou iniciovat vznik sítě mikrotrhlin na povrchu cementobetonové (CB) desky. Výsledné průběhy teplot (od hydratace i klimatu) je teoreticky možné pozitivně ovlivnit stanovením počátku betonáže tak, aby se maximální teploty neseťkaly ve stejném čase. Z praktického hlediska je ale reálnější využití zpomalovačů tuhnutí. Další možností je snižování hydratačního tepla změnou složení betonové směsi (množství cementu, druh cementu, využití alternativních pojiv). Zohlednění materiálového složení CB a teplotních průběhů během pokládky zlepší predikci životnosti CB krytu.

Abstract

This paper is focused on the analysis of concrete pavements using finite element method (FEM). Specifically, it deals with the analysis of temperatures in the initial phases of hardening. High temperatures from hydration and climatic conditions in the early phase of concrete hardening co-operate and may initiate the formation of a network of micro-cracks on the surface of the concrete slab. The resulting temperatures (from hydration and climate) can theoretically be positively influenced by determining the start of concreting so that the maximum temperatures do not meet at the same time. However, from a practical point of view, the use of retarders is more realistic. Another possibility is to reduce the hydration heat by changing the composition of the concrete mixture (amount of cement, type of cement, use of alternative binders). Based on the knowledge of the material composition of the concrete and the specific temperature behaviour during the concrete laying, it will be possible to predict the durability of concrete pavement.

Klíčová slova

Termo-mechanická analýza, cementobetonové vozovky, metoda konečných prvků, vývoj tepla

Key words

Thermo-mechanical analysis, concrete pavements, Finite elements method, heat development

1. Úvod

U tuhých vozovek se v současné době stanovují hodnoty účinků kolového zatížení pro výpočet provozní výkonnosti vozovky pouze s přihlédnutím ke zvýšenému namáhání cementobetonového (dále CB) krytu v důsledku nerovnoměrného rozdělení teploty po jeho tloušťce. Účinky teplotního namáhání se určují pro maximální teplotní rozdíly horního a spodního povrchu většinou za předpokladu lineárního rozdělení teploty po tloušťce CB desky. Při zjišťování účinků od teploty je nezanedbatelným vlivem vlastní tíha kvůli napětím vznikajícím aktivací ohybového momentu při prohnutí desky (kladný, nebo záporný teplotní gradient). Nejvýznamnější únavové namáhání (tahové napětí) CB vozovky vznikající během její životnosti jsou od kombinace v čase proměnných teplotních a kolových zatížení.

Pro správnou predikci budoucího chování CB krytu vozovky je ale nutné věnovat pozornost již samotné pokládce CB krytu a zohlednit podmínky, za kterých byl zhotoven (teplota vzduchu, podkladu, sluneční záření, ošetřování), resp. sledovat a vhodným způsobem ovlivňovat průběhy teplot při tuhnutí betonové směsi. Prvotním předpokladem pro přesnější stanovení životnosti je správnost vstupních údajů, tedy konkrétní receptura CB (vodní součinitel, množství cementu, druhy a množství přísad a příměsí atd.), konkrétní podmínky při pokládce (ovlivňující rychlost tuhnutí a tvrdnutí) a následně i informace ze zkoušek hotového vozovkového betonu. V současné době se diskutují změny přístupu k recepturám vozovkových betonů [7], které by měly vést spíše k houževnatějším betonům a nikoli k dosažení co nejvyšší pevnosti (tzn. použití menšího množství cementu, využití směsných cementů, vyšší vodní součinitel). Výše uvedeným lze ovlivnit rychlost (zpomalení) hydratace a omezit tak vznik mikrotrhlin, které do budoucna mohou být významným zdrojem poruch CB krytu vozovky a snižovat tak její celkovou životnost.

2. Měření teplot – dálnice D1

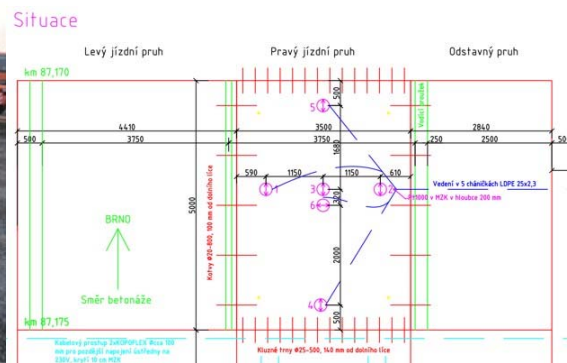
V létě 2018 proběhlo (v rámci projektu TE01020168 a výzkumného projektu ISPROFIN 500 115 0001 (Ověření nové receptury betonu pro CBK)) osazování čidel a následné měření teplot a deformací v krytu CB vozovky na zkušebním úseku D1 (úsek mezi Přerovem a Lipníkem nad Bečvou). Měření probíhalo a stále probíhá ve spolupráci ČVUT, VUT, Skanska a ŘSD pod vedením Doc. Ing. Víta Šmilauera, Ph.D., z FSv, ČVUT.

Na tomto zkušebním úseku se testuje použití cementu s příměsí strusky (CEM I 75% a 25% struska), namísto (v ČR pro CB vozovky výhradně používaného) cementu portlandského (CEM I 100%). Kryt vozovky je tvořen prostými CB deskami, prováděnými pomocí dvouvrstvé betonáže. Do příčných spár byly standardně vloženy kluzné trny a do podélných spár byly umístěny kotvy, sloužící k zamezení vzájemného posunu desek. Čidla byla umístěna tak, aby byla v bezpečné vzdálenosti od smršřovacích spár. Dolní vrstva betonu byla položena v tl. 240 mm a horní vrstva v tl. 50 mm.

V rámci měření bylo osazeno celkem 18 čidel na 6 místech (viz obr. 1 a 2), na každém místě byla osazena nad sebou 3 čidla ve výšce -50, -140 a -240 mm vůči povrchu vozovky (viz obr. 3 a 4). Zároveň byla osazena čidla pro měření oslunění (radiace) a teploty vzduchu (obr. 5).



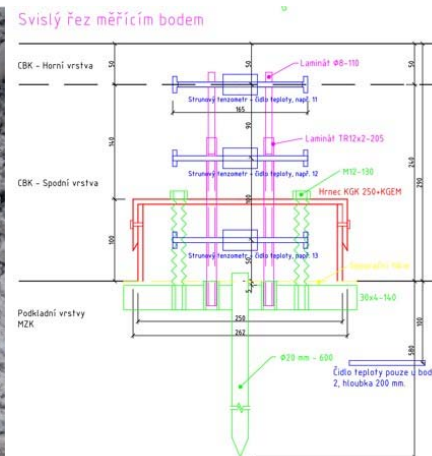
Obr. 1 Rozmístění čidel (Foto: S. Šulc)



Obr. 2 Situace rozmístění čidel



Obr. 3 Svislý řez měřícím bodem (Foto: S. Šulc)



Obr. 4 Svislý řez měřícím bodem

3. Využití měření pro termomechanickou analýzu

Po provedení experimentálního měření bylo nutno zpracovat velké množství dat a vytvořit matematický popis funkcí, které by dané jevy co nejlépe popsaly. Takto byly postupně vytvořeny dvě funkce, které popisují povětrnostní podmínky během čtyř dnů po betonáži, funkce vystihují reprezentativní letní dny. Nejprve funkce (1), která popisuje průběh teploty vzduchu. Tento jev je v dlouhodobém měřítku nepopsatelný jedinou jednoduchou funkcí, nicméně pro numerickou analýzu stačilo pouze vystihnout rozsah, který bylo nutno simulovat (v tomto případě čtyři dny). Dále byla vytvořena složitější funkce (2), která popisuje oslunění (na základě Stefan-Boltzmannova zákona) opět během čtyř dnů po betonáži. Tyto funkce je možné upravit pro konkrétní povětrnostní podmínky, pouhou změnou konstant.

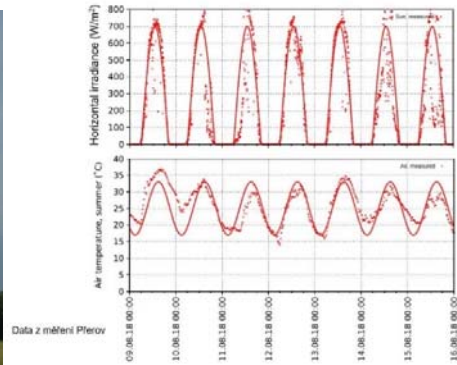
$$f(t) = 8 \sin((2\pi/86400)(t-93600)) + 25 \quad (1)$$

$$f(t) = 700 \sin(0.85(2\pi/86400) * (\text{int}(t-6*3600) \% 86400)) * H(\sin(0.85(2\pi/86400) * (\text{int}(t-6*3600) \% 86400))) \quad (2)$$

kde: t je čas
H je Heavisidova funkce



Obr. 5 čidla pro měření oslunění (radiace) a teploty vzduchu (Foto: S. Šulc)



Obr. 6 Porovnání funkcí (1) a (2) s experimentálně naměřenými daty

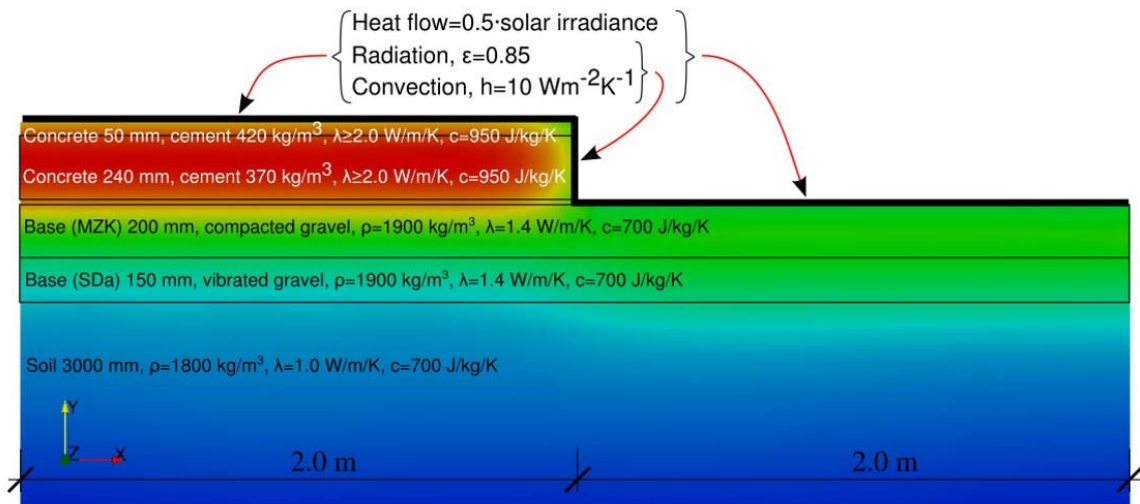
4. 2D Termická analýza CB vozovky

Na základě naměřených dat byl vytvořen 2D model, který obsahuje výše uvedené funkce jako okrajové podmínky úlohy (1) a (2), dále hydratační model („HydratingConcreteMat“ [8]), který na základě materiálových parametrů (potenciální hydratační teplo, obsah cementu, aktivační energie a další, získané z měření izotermálním kalorimetrem) pracuje s hydratací cementu v čase. 2D model vedení tepla řeší bilanční rovnici

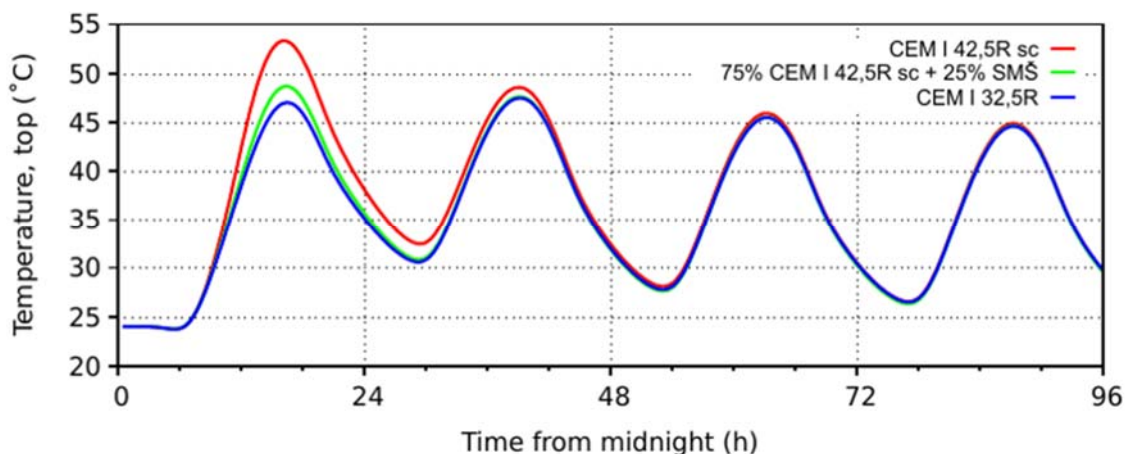
$$-\nabla^T q(x) + \bar{Q}(x, t) = \rho(x)c_v(x) \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad (3)$$

kde: q je teplotní tok
 Q je teplo uvolněné hydratací cementu
 T je teplotní pole

Model byl z důvodu optimalizace výpočetní úlohy vytvořen jako jedna polovina CB desky (řez v podélném směru) díky předpokladu osové symetrie. Je známo, že vyšší průběhy teplot mají přímý vliv na snížení trvanlivosti vozovky, protože vyšší teplota urychluje hydrataci cementu a zvyšuje smrštění. Smršťování nelze plně odstranit, ale jeho velikost lze do určité míry redukovat. Existuje několik způsobů jak tohoto snížení docílit. Např. je možné použití jiných druhů cementů, čímž by se značně zpomalila tzv. „kinetika“ cementu, omezil by se vývoj hydratačního tepla (obr. 8) a omezil se tak i vznik trhlin. Vliv různých cementů na výslednou teplotu je jasně patrný z obr. 8. Materiálové parametry byly převzaty z literatury ([2] a [5]). Vytvořený model tedy umožňuje nastavení konkrétních podmínek při tuhnutí a tvrdnutí cementového betonu z hlediska teplotních i materiálových vstupních faktorů. Jeho využití pro různé analýzy je zřejmé.



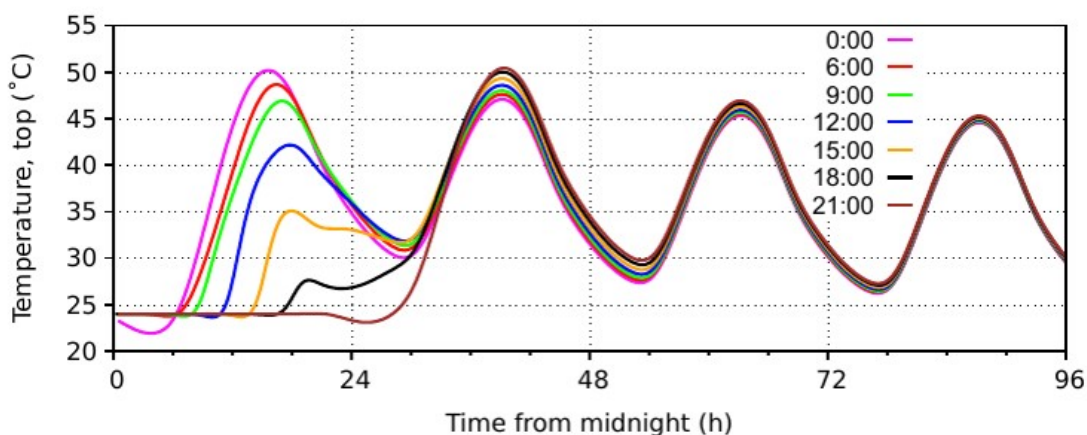
Obr. 7 Schéma 2D modelu Vedení tepla s materiálovými parametry [7]



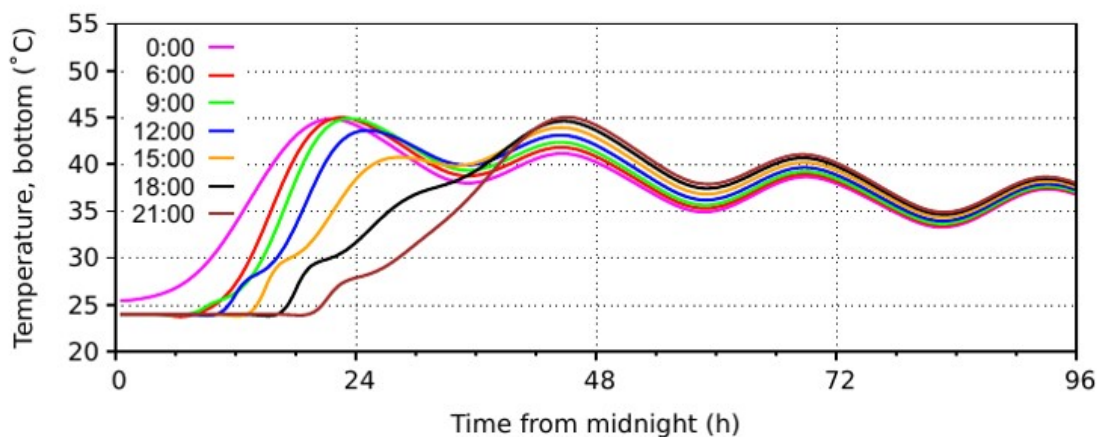
Obr. 8 Vliv druhu cementu na celkový vývoj teploty v desce [1]

5. Vliv počátku betonáže na teplotu betonu

Vytvořeným 2D modelem pro vedení tepla byla následně provedena analýza vlivu počátku betonáže (během čtyř letních dnů) na výslednou teplotu v CB desce. Výsledky jsou skutečně velice zajímavé. Stavební firmy (z praktických důvodů) obvykle začínají betonovat v letních měsících ráno. Tento postup vede k tomu, že teplota, která se uvolní hydratací cementu, postupně narůstá a její hodnota dosáhne maxima společně s nejvyšší denní teplotou vzduchu. Celkové průběhy teplot na horním a spodním povrchu desky v závislosti na počátku betonáže jsou patrné z obr. 9 a obr. 10. Teoreticky by tedy bylo vhodnější začínat v letních dnech s betonáží až v odpoledních hodinách. Prakticky bude ale nutno uplatnit jiné opatření ke snížení výsledné teploty ve směsi.



Obr. 9 Graf průběhu teploty na povrchu desky během prvních čtyř dnů v závislosti na počátku betonáže [1]

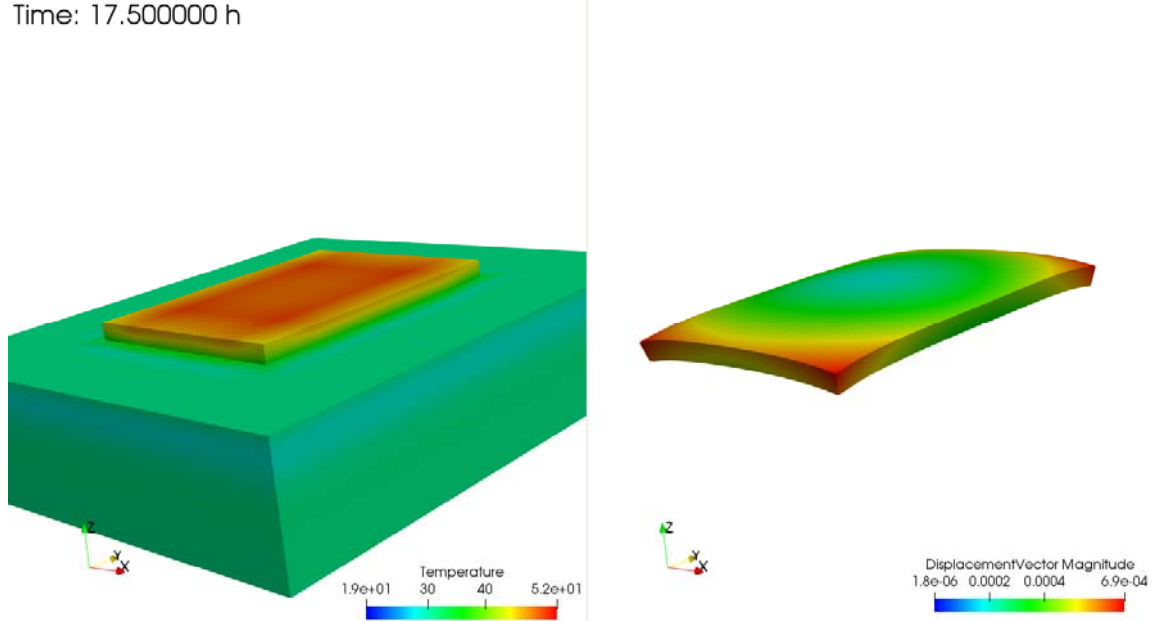


Obr. 10 Graf průběhu teploty pod deskou během prvních čtyř dnů v závislosti na počátku betonáže [1]

6. 3D Termomechanická analýza CB vozovky

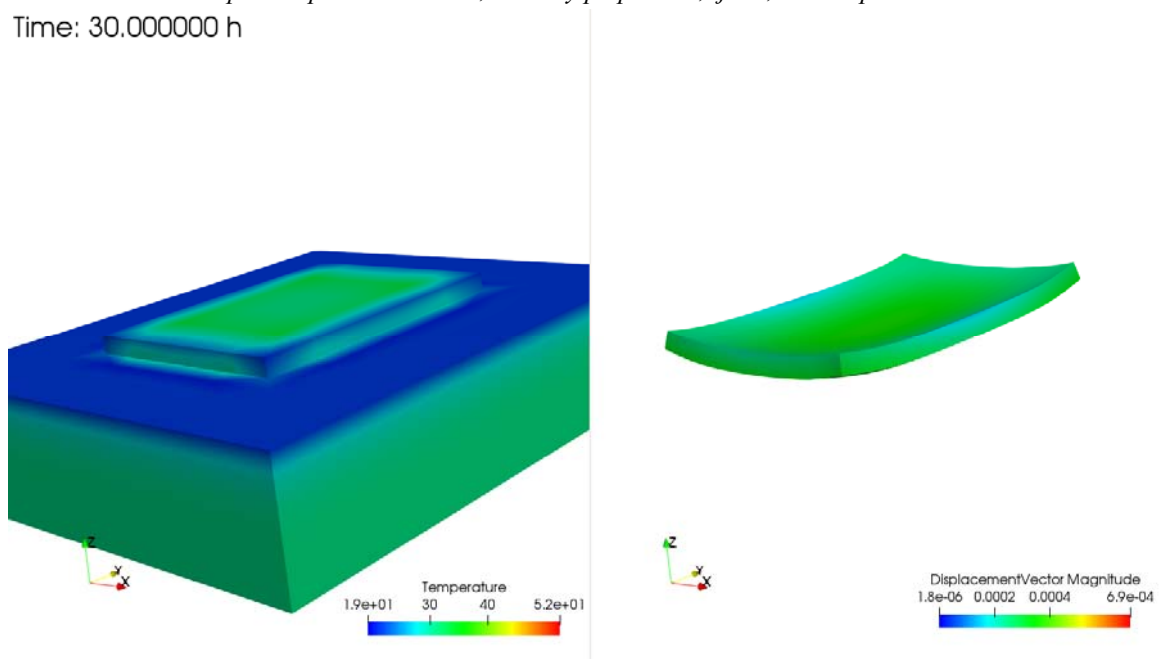
Po vytvoření a korekcích modelů „3D – mechanického“ a „2D - modelu vedení tepla“, bylo nutné spojení obou úloh. Princip byl takový, že v každém jednotlivém kroku (stepu) výpočtu se nejdříve pomocí modelu vedení tepla vypočítá teplotní pole a to se následně „exportuje“ do „mechanického“ modelu. Toto si vyžádalo vytvoření „3D - modelu vedení tepla“ s přiřazením odpovídajících parametrů CB desce. Ve výsledném modelu byly použity parametry pro směsný cement a začátek betonáže byl uvažován v 6:00 hod. 3D mechanický model byl ve sružené úloze uvažován jako 3D deska na Winkler – Pasternakově podloží. Bylo zde nutné jednotlivým materiálům přiřadit také parametry, týkající se tepelné kapacity, tepelné vodivosti a teplotní roztažnosti. Materiál byl prozatím uvažován jako elastický. Do budoucna se předpokládá rozvoj a přesnější modelování tohoto materiálu, ve fázi tvrdnutí se totiž značně mění tuhost průřezu a pro přesnější popis bude nutné použít viskoelastický materiál se stárnutím. Kontakt mezi uvažovaným mechanicky zpevněným kamenivem (MZK) a CB deskou byl modelován pouze pomocí elastických prvků, které mají stejné vlastnosti v tahu i tlaku. V budoucnu je nutné nahradit složitějšími prvky, které budou mít menší pevnost v tahu a po překročení tahové pevnosti se začnou deformovat. Zjednodušení bylo přijato z důvodu zvýšení stability výpočtu.

Time: 17.500000 h



Obr. 11 Teplota a posun v čase 17,5 hodiny po půlnoci, tj. 11,5 hodin po začátku betonáže

Time: 30.000000 h



Obr. 12 Teplota a posun v čase 30 hodin po půlnoci, tj. 24 hodin po začátku betonáže

7. Závěr

Termomechanický model CB krytu vozovky pomáhá lépe pochopit procesy vznikající v cementovém betonu během tuhnutí a tvrdnutí, se zohledněním druhu materiálu a při nastavených vnějších teplotních podmínkách. Budoucí analýzy a výsledky termomechanických modelů s variantami materiálových složek a teplotních podmínek nás mohou dovést k určení ideálních parametrů při výstavbě. Snahou by mělo být omezení tvorby většího množství mikrotrhlin v počáteční fázi vzniku betonu. Tím by se pozitivně ovlivnila (prodloužila) životnost CB krytu. Další využití těchto modelů je možné při predikci zbytkové životnosti CB krytu a tedy budoucí uplatnění v systémech hospodaření s vozovkou.

Poděkování

Tento výsledek byl vytvořen s finanční podporou programu Centra kompetence TA ČR, projekt č. TE01020168.

Literatura

- [1] Patzák, B. *OOFEM - an object-oriented simulation tool for advanced modeling of materials and structures [software]*. *Acta Polytechnica*, 52(6):59–66, 2012. Dostupné z: <http://oofem.org/cz/download>
- [2] Luxemburk F., Věbr L., Kudrna J., Varaus M., Racek I., Fiedler J. *TP 170 Navrhování vozovek pozemních komunikací [online]*. *Technický předpis*. Ministerstvo dopravy České republiky, 2006. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_170_upraveny_dotisk.pdf
- [3] Věbr, L., Pánek P. *Implementace vybraných faktorů do 3D modelu CB vozovky – společný účinek*. Dílčí výzkumná zpráva. CIDEAS, 2009
- [4] Věbr, L., Pánek P., Novotný B., Slánský B., Šrůtka J., Vladík T., Stehlik D. *Zpřesnění technického návrhu CB vozovek, včetně předpovědi degradace vozovky v závislosti na vnějších a vnitřních parametrech*. Dílčí výzkumná zpráva. CESTI, 2013
- [5] Šmilauer, V. *Termo – mechanické analýzy nezeslabených a zeslabených cementobetonových desek dálničních krytů*. Výzkumná zpráva. ČVUT FSv, 2017.
- [6] Open Cascade. *Salome 9.2 [software]*. 2019. Dostupné z: <https://www.salome-platform.org/>
- [7] Šmilauer, V.: *Betony odolné ke vzniku mikro a makrotrhlin na CB krytech*, SBORNÍK BETONOVÉ VOZOVKY 2018, 7. konference s mezinárodní účastí ISBN 978-80-906541-2-9
- [8] Šmilauer, V., Bittnar, Z., *Effects of Representative Cube Size on the Simulation of Portland Cement Hydration in CEMHYD3D Model*, 5th International PhD Symposium in Civil Engineering. Lisse: A. A. Balkema Publisher, 2004. pp. 581-587. ISBN 90-5809-676-9.