

PŘEHLED STAVU POZNÁNÍ O TVORBĚ TRHLIN V BETONU V RANÝCH STADIÍCH A MOŽNOSTECH JEJÍHO OVLIVNĚNÍ STATE OF THE ART REPORT ON CONTROL OF CRACKING IN EARLY AGE CONCRETE

Dokončení článku z 2. čísla časopisu

ANALÝZA SMRŠŤOVÁNÍ A TVORBY TRHLIN V BETONU V RANÝCH STADIÍCH

Analytické modely pro popis vzájemného spolupůsobení dotvarování a smršťování jsou nezbytné, protože metody pro přímé experimentální měření spolupůsobení těchto jevů zatím neexistují. Přestože je deformační chování betonu v raných stádiích neobvykle složité, dá se simulovat numerickou analýzou, pokud je jeho mechanismus popsán konzistentním analytickým modelem a jsou for-

mulovány příslušné konstitutivní rovnice. Simulace chování průběhu smršťování pomocí numerické analýzy je neobvykle důležitá, protože může osvětlit to, jaké faktory mají bezprostřední dopad na vznik a vývoj trhlin při smrštění, a může usnadnit nalezení základních opatření k omezení tvorby a rozvoje trhlin. To je ovšem možné pouze za předpokladu, že analytický model vhodně vyjadřuje skutečný mechanismus a hodnoty materiálových vlastností použité při analýze se co nejvíce blíží realitě. Na obr 5 je uveden „vývojový“ diagram specifikující požadavky na jednotlivé kroky analýzy chování betonu v raných stádiích s uvážením smršťování a současné tvorby trhlin. Je třeba poznamenat, že teplotní účinky diagram nezahrnuje, a proto pokud analyzujeme betonové prvky, u kterých není možné nárůst hydratačního tepla opomenout, např. z vysokopevnostního betonu, je nutné změny v rozložení teplot a jejich účinky zohlednit změnou materiálových vlastností.

Při analýze vzniku a rozvoje trhlin vyvolaných autogenním smršťováním nebo smrštěním v důsledku vysychání, je třeba při posuzování, zda působící napětí vyvolá vznik trhlin, určovat napětí ve vhodných časových intervalech. Nicméně, aby se dala taková napětí vyvolaná smršťováním vypočítat, je především třeba kvantifikovat síly, které je způsobují. Již bylo uvedeno, že tato napětí vznikají následkem omezování betonových prvků volně se deformovat během smršťování. Na druhé straně smršťování je způsobeno vlhkostními gradienty vyvolanými pohybem vody směrem k povrchu. Abychom mohli tato napětí vypočítat, musíme mít přesné znalosti o obsahu vlhkosti působící v různých okamžicích nebo o rychlosti difúze a rozložení vlhkosti v betonovém prvku.

V literatuře [3] je popsána analýza tvorby trhlin následkem smrštění od vysychání prováděná na vzorcích tvaru kruhového prstence metodou konečných prvků (obr. 6). Cílem studie bylo prozkoumat vliv materiálových vlastností na chování betonu během smršťování. První analýzy zaměřené na působení difúze vodních par na tvorbu a růst trhlin ukázaly, že difúzní koeficient betonu hraje významnou roli při tvorbě trhlin. Obr. 7 ukazuje, že čím vyšší je rychlost vodního výparu z betonu, tím dříve se začnou tvořit trhlinky a tím větší je jejich šířka. Později byl zkoumán vliv na vlhkosti závislého koeficientu smršťování $\alpha(h)$, určeného jako první derivace výsledné křivky s ohledem na potenciál vlhkosti h , a to ve vztahu k riziku vzniku trhlin (5).

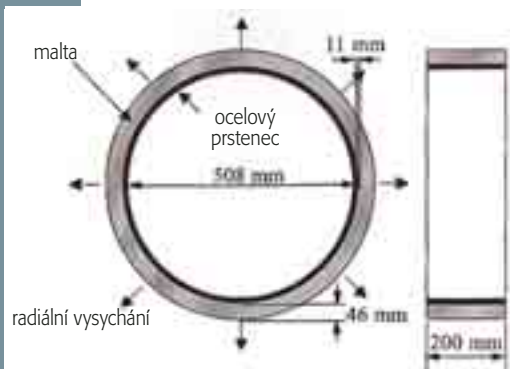
$$\gamma(g) = \frac{c\eta^g(g)}{cg} \quad (5)$$

Obr. 8 ukazuje, že čím je beton sušší, tím větší je poměrné přetvoření od smrštění. To také demonstruje, viz maximální amplituda α_0 , že nejvyšší hodnota koeficientu deformace od smrštění $\alpha(h)$, podstatně ovlivnila chování při smrštění a tvorbě trhlin. Koeficient deformace od smrštění $\alpha(h)$, byl stanoven pro dvě úrovně amplitudy (α_0 a $\alpha_0/2$) a modul pružnosti E byl uvažován ve třech různých hodnotách (15, 25 a 35 GPa). Se zvyšováním modulu pružnosti docházelo snadněji k tvorbě trhlin a zvyšovala se také rychlost rozevírání jejich šířky. Tato tendence se dokonce projevovala silněji, pokud byla hodnota $\alpha(h)$ nastavena na nižší amplitudu $\alpha_0/2$. Kromě toho bylo zjištěno, že změna odporu proti tvorbě trhlin (křivka tahového změkčení a lomová energie G_F) zpozdila tvorbu viditelných trhlin a omezila tendenci ke zvyšování jejich šířky. Navíc se prokázalo, že tvorba viditelných trhlin se dá relativně řídit zvýšením hodnoty G_F (obr. 9). Z řady analýz provedených za použití modelů lomové mechaniky byl vyvozen důležitý závěr: tahová pevnost betonu ovlivňovala tvorbu mikrotrhlin, ale měla jen malý dopad na následný růst šířky trh-

Obr. 5 Vývojový diagram numerické analýzy zahrnující smrštění i tvorbu trhlin

Fig. 5 Flowchart of numerical analysis of shrinkage – cracking

Fáze analýzy	Popis
Stanovení počátečních podmínek	Modelování hydratační reakce a mikrostruktury, vyjasnění okrajových podmínek
Výpočet rozložení obsahu vody uvnitř prvku průřezu (analýza pohybu vody včetně procesu vysychání)	Nelineární teorie difúze vody v porézních médiích, kvantifikace vztahu mezi obsahem vody a difúzním koeficientem
Výpočet poměrného přetvoření od volného smrštění uvnitř prvku	Stanovení vztahu mezi poměrným přetvořením od smrštění a obsahem vody
Výpočet rozdělení napětí od smrštění v betonovém prvku nejsou-li umožněny objemové změny	Charakteristika dotvarování v tahu a modul pružnosti betonu v raných stádiích
Analýza trhlin	Podmínky vzniku a rozvoje trhlin a tahové změkčení



Obr. 6 Zkušební vzorek pro stanovení smršťovacích trhlin omezený ocelovým prstencem (Wittmann a kol. 2002).

Fig. 6 Specimen of the ring-restrained shrinkage cracking

lin, tj. tvorbu a růst trhlin. Z této analytické práce vyplynul důležitý poznatek, že udržování vysoké rychlosti výparu vody a s ním spojené deformace od smrštění představují neefektivnější způsob řízení průběhu smršťování. Ještě účinněji se toho dá dosáhnout, jestliže odolnost proti tvorbě trhlin zůstane co nejvyšší a tuhost co nejnižší.

Proniknutí do podstaty věci poskytlo užitečné typy pro kontrolu a řízení tvorby trhlin vyvolané smršťováním betonu v raných stádiích a vedlo k vybudování teoretického a analytického základu, který podporuje nedávný experimentální výzkum a optimalizuje nově vyvinuté postupy. Např. přísada redukující smrštění a/nebo rozpínavá přísada může pomoci omezit růst deformace od smrštění a přidáním vlhkého, lehkého kamene do vysokopevnostního betonu lze omezit rychlost vodního výparu [3]. Rovněž přidání vláken do betonu může zlepšit jeho odolnost proti tvorbě trhlin a může pomoci kontrolovat jejich růst a rozevírání [17].

Proto jsou analytické metody zcela nezbytné k dosažení optimálního zpomalení rychlosti smršťování pomocí volby parametrů betonové směsi, jejího složení, včetně různých typů cementu, přísad a příměsí. Jsou také potřebné pro odhad vlivu změn velikosti prvků na průběh smršťování, tvorby trhlin a vzniku „nových spár“ v místech trhlin na zmenšení míry omezení posunu konstrukce/prvku.

NEJNOVĚJŠÍ POZNATKY O ZKOUŠENÍ TVORBY TRHLIN V BETONU V RANÝCH STÁDIÍCH NÁSLEDKEM SMRŠŤOVÁNÍ

Obecně můžeme zkoušky betonu v raných stádiích rozdělit na čtyři typy podle jejich účelu:

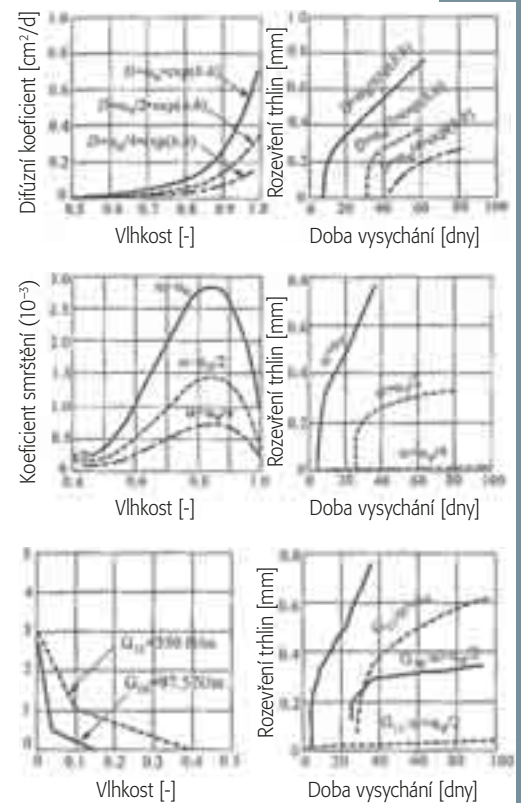
- zkoušení hodnot fyzikálních vlastností;
- zkoušky chování testované konstrukce či prvků ve skutečných podmínkách;
- zkoušky k získání relativního srovnání vlastností a chování;
- zkoušky k řízení kvality a kontroly.

Z toho vyplývá, že výběr zkušební metody závisí na účelu testování. V Japonsku se při sledování tvorby trhlin v betonu od smrštění nejběžněji používá „Zkušební metoda pro sledování tvorby trhlin od smrštění následkem vysychání betonu s omezením objemových změn“, označena jako JIS-A-1151 podle Japonské průmyslové normy. K měře-

Obr. 7 Difúze vodních par a šíření trhlin [3]
Fig. 7 Water diffusion and crack propagation

ní napětí vyvolaného objemovými změnami v důsledku autogenního smrštění, což je parametr, vyžadovaný k prognóze počátku tvorby trhlin ve vysokopevnostním betonu, je užívána revidovaná zkušební metoda „Návrh metody pro zkoušky napětí při autogenním smršťování betonu“. Obě zmíněné metody jsou jednoosého typu s omezením deformace. V první metodě je používáno ocelové bednění k bránění průběhu objemových změn zevnějšku („zkouška s bedněním“). Druhá metoda naopak užívá deformované pruty procházející středem betonového vzorku, které brání objemovým změnám uvnitř („zkouška s armaturou“). První metoda ve skutečnosti umožňuje měřit průměrné tahové napětí působící na průřez prvku, protože napětí vznikající v důsledku bránění objemovým změnám je měřeno příloženým tenzometrem na straně rovnoběžné s formou. U druhé metody je naopak sledován rozdíl mezi poměrným přetvořením v blízkosti armatury, ke které je připevněn tenzometr, a přetvořením na hraně vzorku – na řezu prvkem se vytvoří gradient přetvoření. Vyhodnocení napětí při omezení objemových změn na základě měřených přetvoření poblíž výztuže jako působícího průměrného tahového napětí na průřezu tak může vést k velké chybě [3]. Obě zkušební metody jsou navrženy tak, aby umožnily relativní srovnání odolnosti betonu k tvorbě trhlin, ale neumožňují získat hodnoty fyzikálních vlastností. Jak už jsme se zmínili, fyzikální vlastnosti vzorku procházejí s věkem značnými změnami v souladu s postupem vysychání a hydratace a současně dochází k nárůstu deformací způsobenému dotvarováním a relaxací. Proto se stále mění úroveň omezení objemových změn a nedá se přesně rozlišit napětí vznikající v důsledku tohoto omezení a následkem probíhajícího smršťování.

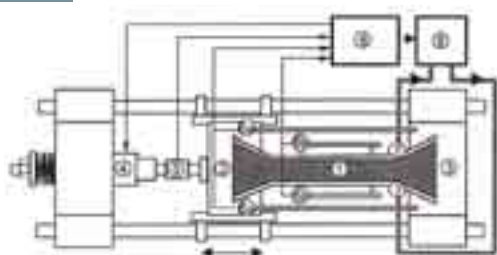
„Metoda rámu“ vyvinutá v Německu v šedesátých letech minulého století k měření tepelného napětí je používána ke kontrole tvorby trhlin v betonu v raných stádiích, zvláště trhlin vzniklých vlivem změn teplotního pole. Přestože je sledovaný prvek upnutý v tuhém ocelovém rámu, míra omezení je mno-



Obr. 8 Koeficient smrštění a šíření trhlin [3]
Fig. 8 Shrinkage coefficient and crack propagation

Obr. 9 Strain softening a růst trhlin [3]
Fig. 9 Strain softening and crack propagation

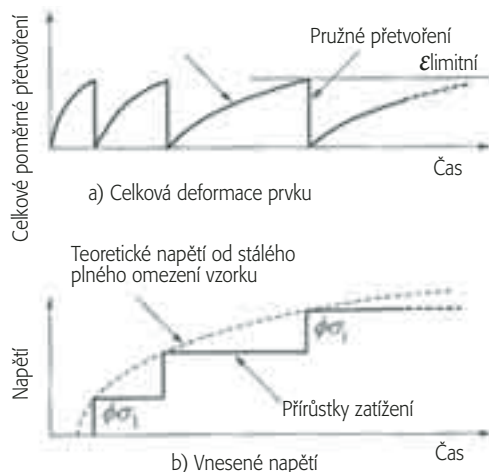
hem menší než 100 %. Omezující sílu měří tenzometry připevněné k rámu. I v Německu [18] byl tento rám zdokonalován tak, aby poskytoval 100% omezení. V novém rámu (obr. 10) označovaném jako Temperature-Stress Testing Maschine (TSTM) byl k „volnému“ konci prvku připojen ovladač k regulaci vzdálenosti mezi kontrolními značkami uprostřed vzorků o stejném průřezu, aby udržoval vzdálenost konstantní [4]. Pomocí deformačních snímačů byla prováděna měření délky prutů z uhlíkových vláken připevněných po obou stranách sledovaného prvku. Byly vyvíjeny i další zkušební přístroje založené na rámu s pohyblivým upevněním konců vzorků zvláště ke zkoušení betonu v raných stádiích. Bylo nalezeno jiné řešení řízení úrovně omezení [17, 19] tak, že sevřel konce vzorku uvnitř omezujícího rámu s jedním pohyblivým koncem připoutaným k zařízení na stlačený vzduch. Zkušební lavice ke zkoušení vzniku a rozvoje trhlin byla pro betonáž prvku uložena



- 1 Vzorek: průřez 150 x 150, délka 1500 mm
- 2 „Volný“ konec vzorku
- 3 Upevněný konec vzorku
- 4 Krokový motor: přesnost posunu 1 μm
- 5 Měření zatížení
- 6a Měření pohybu konce vzorku
- 6b Měření délky pomocí prutů z uhlíkových vláken
- 7 Forma s ohřívacím/chladícím systémem
- 8 PC k řízení a zaznamenávání
- 9 Kryostat na ohřívání/chlazení formy

Obr. 10 Schéma zkušebního stroje na měření teploty a napětí (Springenschmid a kol. 1994)

Fig. 10 Outline of TSTM apparatus

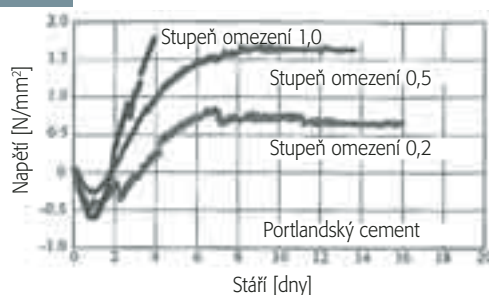


Obr. 11 Princip měření poměrného přetvoření od smrštění

Fig. 11 Principle of the discretized restrained shrinkage test

Obr. 12 Změny v napětí od smrštění dle úrovně omezení

Fig. 12 Changes in shrinkage stress according to restraint levels



vodorovně a po odstranění bednění otočena svisle. Byly použity dva stejné vzorky, z nichž jeden byl omezen a druhý byl ponechán volně, aby se mohl smršťovat. Takové nastavení zkoušky mělo umožnit, aby napětí vyvolané omezenou deformací bylo zaznamenáno, zatímco probíhá měření přetvoření druhého vzorku, ponechaného volně se smršťovat. Údaje o dotvarování je také možné získat, pokud jsou současně zaznamenávána přetvoření v důsledku volného smršťování ve vzorku se stejným poměrem směsi. Možným nedostatkem tohoto návrhu zkoušky je skutečnost, že zkouška je prováděna ve svislé poloze, což způsobuje, že k přetržení dojde v horní části vzorku následkem vlivu jeho vlastní váhy.

Později bylo navrženo zkoušky modifikováno [20] tak, aby se mohla provádět ve vodorovné poloze. Posun volného konce byl sledován a opakovaně manuálně přizpůsoben úpravou zatížení způsobujícího ve vzorku osový tah. Pro zdokonalení přesnosti měření byl vyvinut systém řízení počítačem s uzavřenou smyčkou [21]. S růstem smrštění k dané úrovni přetvoření je vzorek tažen silou tak, že se přetvoření vrátí na nulovou hodnotu (obr. 11a). Při každém kroku, kdy se proces opakuje, je napětí potřebné k výrazné deformaci zaznamenáno a vyneseno do grafu korelace času a napětí k získání historie vývoje napětí od smrštění (obr. 11b). Podobné zkušební metody, znovu postupně nastavující přetvoření na nulu, jsou označovány jako „Discretized restrained shrinkage“ (DRS) testing [22]. Díky tomuto vývoji byla získána cenná experimentální data o vlivu jednotlivých materiálů, poměrech směsi a stupni omezení na vývoj napětí od smrštění. Obr. 11 ukazuje základní koncepci řízení přetvoření od smrštění přijatou pro tyto zkušební metody.

Obr. 12 ukazuje příklad výsledků zkoušek autogenního smrštění u betonu v raných stádiích pomocí popsané metody stoprocentní kontroly přetvoření. Ukazuje se, že růstová tendence napětí od smršťování je do značné míry ovlivněna úrovní omezení. V případě běžných zkušebních metod zaměřených na testování dotvarování, se přetvoření od dotvarování podle zkušeností zmenšuje v souladu s poklesem poměru vody a cementu. Nicméně při zkouškách DRS betonu v raných stádiích funguje spíše mechaniz-

mus relaxace než dotvarování. V každém případě některé výzkumy zdůrazňují, že je nutné zkoumat vlastnosti dotvarování betonu v raných stádiích a nepřehlížet při tom ke znalostem o betonu, který ukončil hydratační proces, jichž už bylo shromážděno dosavadním výzkumem velké množství [22].

KRITÉRIA POČÁTKU SMRŠTOVÁNÍ A TVORBY TRHLIN

Jakmile jsme schopni předpovědět napětí vyvolané smršťováním, které je důsledkem vysychání, nebo přetvořením od autogenního smršťování, potřebujeme určitá kritéria, abychom mohli posoudit, zda vzniklé napětí povede ke vzniku trhlin. Obr. 5 naznačuje obecné požadavky na kritéria pro vznik trhlin, nicméně zatím nebylo žádné obecně přijato. V současné době je jeho nalezení již reálné díky pokroku v oblasti přesnosti hodnotících postupů fyzikálních vlastností, jako jsou např. zkoušky TSTM a DRS, a také v oblasti analytických metod zaměřených na vysoce nelineární chování při deformacích od smršťování. Dva alternativní přístupy ke stanovení kritérií pro vznik trhlin, navržené v nedávné době, si zaslouží zmínku.

Porovnání výsledků zkoušek tvorby trhlin během smršťování a přímé tahové zkoušky pomocí TSTM ukázalo [23], že tahová napětí v době iniciace vzniku trhlin jsou přibližně na úrovni 75 % pevnosti v příčném tahu bez ohledu na rozdíly mezi dvěma druhy použitého cementu (čtyři různé poměry směsi) a na stupni hydratace betonů. Dále uvedli, že jednosá tahová pevnost vzorku ve tvaru štíhlého kvádrů, který byl při testování použit, byla asi 88 % pevnosti v příčném tahu. Na základě těchto výsledků a uvážíme-li jak tahovou pevnost, tak tahové napětí vzorků smršťujících se zkušebními těles popsaných normálním rozdělením, je variační koeficient V , který je poměrem standardní odchylky σ a průměrné hodnoty μ , považován za rovný 10 % prnutí vzniklého smršťováním a 8 % příčné tahové pevnosti. Uvažujeme-li $R - S = Z$, kde R je příčná tahová pevnost a S je napětí vzniklé při smršťování, pravděpodobnost poruchy (vzniku trhliny) P_f je dána vztahem (6)

$$P_f \{Z < 0\} = P_f \{-\beta\} \quad (6)$$

kde β je index bezpečnosti daný vztahem (7)

$$\delta] \frac{\pi_y}{\phi_y}] \frac{\pi_Q 1 \pi_R}{\sqrt{\phi_Q^1 / \phi_Q^1}} \quad (7)$$

A tak když předpokládáme mez spolehlivosti 5 % a zavedeme koeficient bezpečnosti γ , definovaný jako poměr mezi charakteristickými hodnotami pevnosti R_{char} a napětí S_{char} což je běžný postup při řešení inženýrských úloh, dostaneme rovnici (8)

$$\iota] \frac{Q_{bg,q}] \frac{\pi_Q 10 \cdot 53 \phi}{R_{bg,q} \pi_R / 0 \cdot 53 \phi}] \frac{(010 \cdot 53 U_e)}{(0 / 0 \cdot 53 U_e)} \frac{\pi_Q}{\pi_R} \quad (8)$$

Proto je koeficient bezpečnosti γ betonu v raných stádiích při namáhání tahem dán vztahem (9)

$$\iota] \frac{e_{bg,q}] / \cdot 64 e_{bs,rok} (010 \cdot 53 U_e)}{\phi_{bg,q} \phi (0 / 0 \cdot 53 U_e)} \quad (9)$$

kde f_{ctmspl} je průměrná hodnota pevnosti v příčném tahu a hodnota 0,75 f_{ctmspl} je považována za kritérium pevnosti, což odpovídá výše uvedenému empirickému pozorování, že průměrné napětí v době iniciace vzniku trhlin od smršťování je 75 % pevnosti v příčném tahu. Výraz σ představuje průměrnou hodnotu napětí od smrštění. Přípustný poměr napětí η , který odpovídá koeficientu bezpečnosti γ , je dán vztahem (10)

$$\kappa] \frac{\phi}{e_{bs,rok}] \frac{/ \cdot 64 (010 \cdot 53 U_e)}{\iota (0 / 0 \cdot 53 U_e)} \quad (10)$$

Grafy na obr. 13 ukazují vztahy mezi koeficientem bezpečnosti γ , pravděpodobností poruchy P_f a přípustným poměrem napětí η . Grafy umožňují určit povolený poměr napětí η , odpovídající pravděpodobnosti počátku vzniku trhlin P_f , která představuje návrhový požadavek na chování konstrukce. Přípustné hodnoty η je též možné srovnávat s hodnotami získanými numerickou analýzou napětí od smršťování pro daný prvek. Pokud je hodnota odhadovaná při analýze větší než přípustná hodnota η , potom je pravděpodobnost počátku vzniku trhlin vyšší než předem určená hodnota, a proto je nutné provést změny a snížit tak nebezpečí růstu napětí od smršťování.

Podobně byl použit již dříve zmíněný vzorek s omezujícím kruhovým prstencem (obr. 6), byla provedena para-

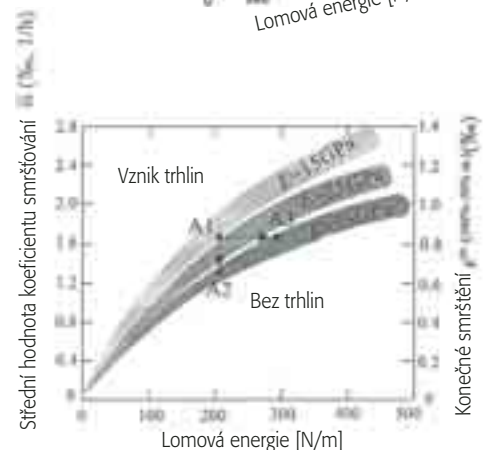
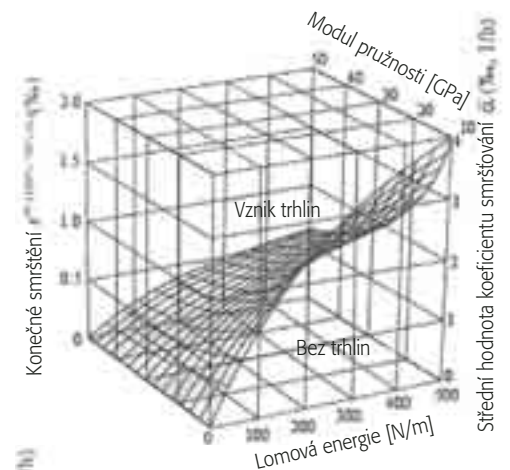
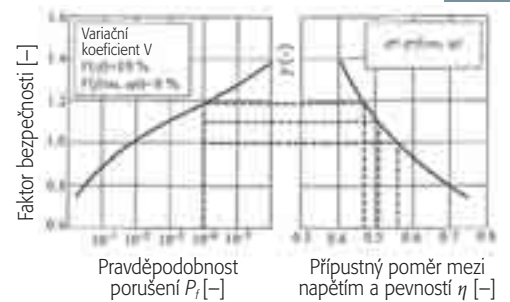
Obr. 13 Návrhový graf znázorňující přípustný poměr mezi napětím a pevností, faktor bezpečnosti a pravděpodobnost porušení [3]

Fig. 13 Design graph for the allowable stress/strength ratio, safety factor and probability of fracture

metrická studie a bylo dokázáno, že kritéria vzniku trhlin by měla být vyjádřena trojrozměrnými funkcemi [24]. Parametry jsou koeficient napětí od smršťování $\alpha(h)$, lomová energie G_F a modul pružnosti E (obr. 14). Pokud předem provedeme zkoušky, abychom získali uvedené tři materiálové vlastnosti betonu, který má být použit, můžeme stanovit počátek vzniku trhlin. Zjistí-li se, že se beton nachází v oblasti počátku vzniku trhlin, musí být v návrhu materiálu provedeny příslušné změny, aby se materiál dostal mimo tuto oblast (obr. 15).

INTELEKTUÁLNÍ MATERIÁLY ZABRAŇUJÍCÍ TVORBĚ TRHLIN NÁSLEDKEM SMRŠTŮVÁNÍ

V tomto desetiletí došlo v mnoha oblastech včetně stavebního inženýrství k výraznému vývoji inteligentních materiálů. Volně lze inteligentní materiály definovat jako materiály vybavené funkcemi, např. vnímání (detekce přítomnosti látky či problému), zpracování (rozhodování o tom, jaká opatření podniknout a/nebo kdy je podniknout) a spouštění (nastartování plánovaných úkonů). Podle této koncepce byly navrženy betonové kompozitní materiály, které mají samočinně kontrolovat problémy spojené se smršťováním a zabránit tvorbě trhlin v betonu v raných stádiích. „Inteligentní“ beton [3] byl vyvinut ke kontrole hydratačního tepla, aby zabránil problémům se vznikem trhlin od změny teploty (obr. 16). Do směsi betonu byla přimíslena parafinová mikrokapsle obsahující prostředek ke zpoždění hydratace. Jakmile teplota betonu stoupne na jistou hodnotu, určenou typem použitého parafinu s různou teplotou tavení, mikrokapsle se roztaví a uvolní retardační hydratační činidlo. Tak lze udržovat teplotu betonu pod určitou hodnotou a je možné omezit tepelné pnutí. Tento nový materiál prokázal svou účinnost při udržování teploty pod stanovenou úroveň vhodnou pro ustálenou hydrataci a ke zmiřování rychlého vzrůstu a poklesu teploty v betonu. Je třeba si všimnout, že výsledek je naprosto odlišný od postupů, při



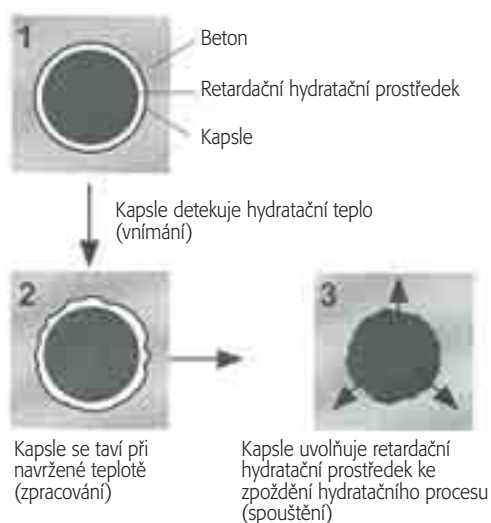
Obr. 14 Riziko tvorby trhlin jako funkce lomové energie, koeficientu smršťování a modulu pružnosti [3]

Fig. 14 Risk of crack formation as a function of fracture energy, coefficient of shrinkage and Young's modulus

Obr. 15 Řízení tvorby trhlin pomocí návrhu materiálů [24]

Fig. 15 Crack control by material design

kterých jsou retardační hydratační příměsi přímo zavedeny do směsi. Hydratační teplo se snižuje v závislosti na velikosti konstrukčního prvku, nicméně teplotní gradienty mohou stále růst od jádra k povrchu. Výsledky experimentů, při kterých byla užitá zmíněná technologie řízení, doka-



Obr. 16 Schematický popis mechanismu inteligentního betonu

Fif. 16 Schematic description of the smart concrete mechanism

zují, že je využitelná v praxi technologie betonu. Byla také navržena směs mikrokapslí vytvořených z různých druhů parafínu, jejichž teplota tavení se může různit. Tak by bylo možné detailněji řídit rostoucí a klesající teplotu. V současné době navržena studie zkoumající účinek použití směsi mikrokapslí s rozličnými teplotami tavení probíhá.

Byl zkoumán i vývoj jiného nového materiálu, který získal chemickými zásahy do hydratačního procesu, což naznačuje slibné možnosti v oblasti kontroly smršťování následkem vysychání [25]. Tato koncepce je založena na úpravě betonových kompozitů přidáním ve vodě rozpustných chemických látek během mísení proto, aby se snížil vodní výpar při volném vysychání betonu na vzduchu. Tímto způsobem by se samočinně ošetřující se beton mohl obejít bez vnějšího ošetřování. Bylo zkoušeno šest různých chemických látek. Pět z nich byly syntetické ve vodě rozpustné polymery a jedna byla přírodní chemická látka. Testy ukázaly, že některé chemické látky mají pozitivní samočinně ošetřovací účinek. Tento výzkum byl prováděn na obyčejném betonu. Tato koncepce si jistě zaslouží další zkoumání, aby se určila její aplikovatelnost na vysokohodnotné betony. Další výzkum [26] byl zaměřen na vliv mikrostruktury na fyzikální vlastnosti samočinně se ošetřujícího betonu. Na vzorcích z nového materiálu byly provedeny standardní tla-

Literatura:

- [17] Paillere A. M., Serrano J. J.: Effect of fiber addition on the autogenous shrinkage of silica fume concrete, *ACI Material Journal*, 86 (2), 139–144, 1989
- [18] Springenschmid R., Gierlinger E., Kernozkycki W.: Thermal stress in mass concrete: a new testing method and the influence of different cements, *Proc. of 15th Internat. congress for large dam*, Lausanne 1985, R4, 57–72
- [19] Paillere A. M., Serrano J. J.: Appareil d'étude de la fissuration di beton, *Bull. Liaison Labo. P et Ch.*, 83, 29–38, 1976
- [20] BloomR., Bentur A.: Free and restrained shrinkage of normal and high-strength concrete, *ACI Material Journal*, 92 (2), 211–217, 1995
- [21] Kovler K.: Testing system for determining the mechanical behaviour of early-age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage, *Materials and Structures*, 27 (170), 324–330, 1994
- [22] BissonnetteB., Marchand J., Charron J. P., Delagrave A., Barcelo L.: Early age behavior of cement-based materials, in *Materials Science of Concrete (VI)*, S. Mindess & J. Skalny, Eds. The American Ceramic Society, 243–326, 2001
- [23] Stress-based crack criterion as a basis for prevention of through-crack in concrete structures at early ages, in *Pre-Proc. of RILEM Internat. Conf. on Early Age Cracking in Cementitious Systems (EAC'01)*, Haifa, Israel, 229–236, 2001
- [24] Martinola G.: Optimizing cement-based coatings with respect to shrinkage crack formation, in *Proc. of 10th Internat. Confer. on Fracture (ICF10)*, CD, 2001
- [25] Dhir R. K., Hewlett P. C., Lota J. S., Dyer T. D.: An investigation into the feasibility of formulating „self-cure“ concrete, *Materials and Structures*, 27 (174), 606–615, 1994
- [26] Dhir R. K., Hewlett P. C., Lota J. S., Dyer T. D.: Influence of microstructure on the physocal properties of self-curing concrete, *ACI Materials Journal*, 93 (5), 465–471, 1996
- [27] Weber S., Reinhardt H.: A blend of aggregates to support curing of concrete, *Proc. of Inter. Symp. on Struct. Lightweight Aggregate Concrete*, Sandefjord, Norway, 662–671, 1996

kové zkoušky i testy počáteční povrchové absorpce. Výsledky naznačují, že chemické látky působí v mikrostruktuře určité změny a že nový materiál vykazuje značné zlepšení kvality povrchu a pevnosti v tlaku ve srovnání s betonem uloženým na vzduchu. Přesto, že je nezbytné další zkoumání proveditelnosti výroby samočinně se ošetřujícího betonu, zvláště co se týče vysokohodnotných betonů, tyto studie přinesly povzbudivé výsledky.

Další postup úpravy materiálu, který přinesl slibné výsledky s ohledem na kontrolu a řízení autogenního smršťování, spočívá v použití promáčeného lehkého kameniva na podporu ošetření vysokopevnostního betonu. V Německu byly zkoumány možnosti nahrazení dílu kameniva o normální váze lehčeným kamenivem, aby byla do betonu dodána voda, a byl tak podpořen proces tvrdnutí [27]. Ukázalo se, že tento postup je efektivní k vyvážení některých účinků vysychání betonu s nízkým poměrem vody a cementu. Tato koncepce je relativně

jednoduchá – voda potřebná k hydrataci je uchovávána uvnitř betonu pomocí lehkého kameniva s vysokým obsahem vlhkosti. Výzkum posuzoval výměnu výhod tvrdnutí s přidanou vlhkostí versus možnou ztrátu pevnosti při použití lehkého kameniva. Necitlivost vysokopevnostního betonu s lehkým kamenivem na druh ošetření byla významnou předností ve srovnání s betonem obsahujícím kamenivo o normální váze. To můžeme přičítat přítomnosti vnitřní vlhkosti z lehkého kameniva umožňující prodloužení hydratace a tvrdnutí, které bylo nezávislé na metodě vnějšího ošetření. Uvnitř betonu s lehkým kamenivem může tvrdnutí pokračovat i poté, co se povrch stane nepropustným, což snižuje potřebu dodatečného vlhkého ošetřování. Pro výzkum bylo použito lehké kamenivo Liapor 9,5 (složené z rozpínavého jílu se sférickou geometrií a objemem pórů přibližně 55 %) [3]. Kulový tvar a relativně hustá vnější slupka lehkého kameniva umožňují jeho spolehlivé využití k výrobě vysokohodnotného

betonu. Tak bylo možné úpravou vnitřních vlhkostních podmínek omezit nebo odstranit autogenní smršťování.

ZÁVĚREČNÉ POZNÁMKY

Vzhledem k tomu, že vznik trhlin v betonu v raných stádiích následkem smršťování je ovlivňován množstvím složitých a vzájemně spolupůsobících faktorů, experimenty přinášely rozporuplné výsledky. Proto byl vývoj opatření na kontroly a řízení tvorby trhlin považován za

neproveditelný úkol. Nicméně pozoruhodný pokrok v oblasti výzkumu postupně osvětlil hlavní faktory těchto jevů. Proto je nyní do jisté míry možné řádně zhodnotit fyzikální vlastnosti, které jsou určující pro zkoumané jevy, a předpovědět chování při smršťování pomocí numerické analýzy s využitím získaných fyzikálních vlastností. Další pokrok ve výzkumu a rozsáhlé využití výsledků zkoumání při vlastním navrhování a výstavbě jsou na dosah.

Český překlad textu byl lektorován.

Profesor Hirozo Mihashi
e-mail: mihashi@timos.str.archi.tohoku.ac.jp

João Paulo de B. Leite, asistent

Oba: Katedra architektury a stavební vědy
Inženýrská škola, Univerzita Tohoku, Japonsko

otřetěno s laskavým souhlasem autorů,
redakčně zkráceno

REKONSTRUKCE DIVADLA LA SCALA V MILÁNĚ

Architektonická renovace milánské La Scaly, jejímž autorem je švýcarský architekt Mário Botta, zahrnovala stavební a technické úpravy, rozšíření plochy určené pro služby a strojní vybavení zákulisí. Součástí projektu je též změna přilehlé budovy bývalé banky.

Historická budova z 18. století postavená dle návrhu italského architekta Piermariniho prošla konzervační restaurací a byla rozšířena o jevištní věž a novou administrativní budovu elipsovitého tvaru nazvanou Elissoide. V souladu s požadavky nové technologie bylo zvýšeno horní patro a rozšířeno dolní patro jeviště. Podlaha hlediště byla nakloněna, aby poskytovala lepší viditelnost. Kromě zvýšené jevištní věže byl zrestaurován prázdný prostor vnitřního nádvoří a původní stavební prvky na střeše byly odstraněny, aby vytvořily prostor pro nový elipsovitý objekt šaten herců. Obě nové budovy přesahují střechu a jsou postaveny z železobetonu obloženého klasickým Botticinovým mramorem. Na budově Elissoide mramorové tyče vytvářejí sérii prázdných a plných prostor, které umožňují přístup denního světla do dynamického interiéru.

Váha mramoru, relativně vysoké riziko odlamování kamene

a nedostatek místa na staveništi vedl konstruktéry fasády ze společnosti Aliva k použití předem smontovaných panelů. Eliptická geometrie byla následně rozdělena do kruhových oblouků.

Celý povrch byl dále rozdělen do tří pásem, každé pro jednotlivé podlaží, která byla poskládána z panelů o váze 2 t. To mělo svůj význam proto, aby konstrukce mohla sloužit i jako sluneční clona.

Každý panel obložený mramorovými lištami má vnitřní kostru z galvanizované pozinkované oceli s prvky z lisovaných trubek. Aby v místech připojení vnějšího pláště na vnitřní betonovou konstrukci nedocházelo k namáhání tahem, jsou vnější panely připevněny izostatickými prvky.

Všechny mramorové tyče jsou uvnitř vyztuženy proužky z ne-rezavějící oceli, které byly lepeny epoxidovou pryskyřicí. Tyto prvky byly poté ukotveny k rámcům a zbylé panely uloženy mezi speciální podpůrné rámy.

Rekonstrukcí divadla La Scala se budeme podrobněji zabývat v 5. čísle časopisu.

Z italského časopisu The Plan, No. 009, April 2005

přeložila Kateřina Jakobcová

