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

HIROZO MIHASHI,
JOÃO PAULO DE B. LEITE

Trvanlivost betonových konstrukcí vážně ohrožuje vznik a rozvoj trhlin v betonu v raných stádiích, především to platí pro vysokopevnostní betony a/nebo masívní betonové konstrukce. Protože časnou tvorbu trhlin ovlivňují rozličné vzájemně propojené faktory, které mají vliv i na hydratační proces a průběh napětí a namáhání, je chování betonu velice složité a prozatím nebyla vytvořena žádná racionální metodika jeho kontroly a řízení. Na druhé straně však požadavky na vysokou pevnost a masívnost betonových konstrukcí stále rostou, a to i přes četné potíže s trvanlivostí. Proto je nevyhnutelné navrhnout ucelenou metodiku, která by zajistila udržitelnost zmíněných konstrukcí. Zpráva uvádí přehled současného stavu výzkumu mechanizmů spojených s tvorbou trhlin v raných stádiích a nové metody užívané k omezení jejich rozvoje.

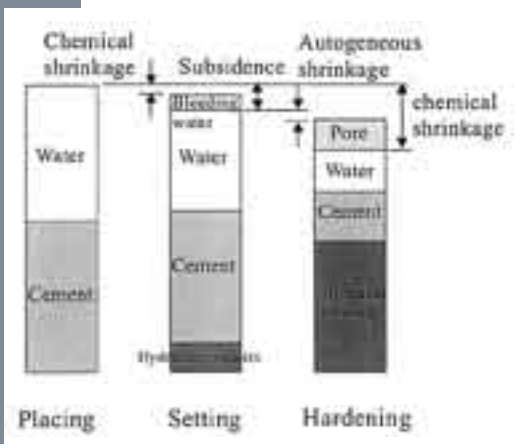
Durability of concrete structures is seriously compromised by cracking in early age concrete, particularly in high-strength or massive concrete structures. Since early age cracking is influenced by various highly interrelated factors that affect the hydration process and stress/strains development, its behaviour is highly complex and no rational methodologies for its control have yet been established. On the other hand, demands for high strength and massive concrete structures in modern cities are ever growing, regardless of the many durability problems. More comprehensive methodologies for the control are therefore essentials to ensure sustainability of such structures. This report reviews state of art research on mechanisms that cause complex cracking phenomena and newly developed methodologies to control early age cracking.

Vznik a rozvoj trhlin v betonových konstrukcích často vážně ohrožují nejen konstrukční integritu, ale také jejich trvanlivost a dlouhou životnost. Trhliny v betonu v raných stádiích představují trvalý problém, který je způsoben interakcí betonu s okolím a komplexními fyzikálně-chemickými změnami, kterými beton prochází. Z toho důvodu se tvorbou trhlin intenzívně zabývá výzkum. Vzhledem k velkému množství zúčastněných okolností a komplexní povaze vzájemně na sebe působících jevů se projektanti spoléhají především na empirická pravidla založená na dobře vymezených a idealizovaných předpokladech pro experimentální podmínky. V posledních letech získal výzkum této problematiky realističtější zásobu vědomostí. Výzkum, který prováděla komise RILEM, se týkal např. vzniku trhlin v betonu následkem tepelného pnutí, včetně trhlin v mladém betonu; na vznik trhlin v masivním betonu se zaměřila vědecká komise Japonského ústavu pro beton (Japan Concrete Institute – JCI). Stále širší užívání vysokopevnostního betonu a masivních betonových konstrukcí však vyžaduje ustanovení a prosazení komplexní metodiky zaměřené na předcházení vzniku trhlin v betonu v raných stádiích.

Betonové konstrukce vykazují objemové změny v důsledku smršťování ovlivněného teplotními a vlhkostními faktory. Objemová nestabilita negativně ovlivňuje chování a trvanlivost betonových konstrukcí, neboť deformace nosných prvků jsou obvykle omezené vnějšími vazbami a okolními prvky. Pokud se beton nemůže volně smršťovat, vzniká napětí v tahu, které v kombinaci s nízkou lomovou odolností betonu má často za následek tvoření trhlin. Je třeba navrhnout opatření ke kontrole vzniku trhlin na základě zvážení mnoha faktorů, včetně rozvoje materiálových vlastností závislých na stáří materiálu, volného smršťování, rychlosti smrštění, dotvarování betonu, míry omezení deformací a vnějších podmínek prostředí. Měření volného smrštění mohou poskytnout užitečné informace, které však nepostačují k určení toho, zda v použitém betonu vzniknou trhliny. Na druhé straně stálé zpřesňování zkušebních metod pro měření smršťování prvků upnutých vnějšími vazbami odhalilo rozporuplné výsledky v porovnání s existujícími daty.

K tomu, abychom spolehlivě porozuměli a efektivně ovlivňovali vznik trhlin v betonu v raných stádiích, musíme v kombinaci s exaktními testovacími metodami smršťování zapojit vhodné vyhodnocení a modelování materiálových vlastností a přesnou metodiku numerické analýzy. V těchto souvislostech se začal projevovat výrazný trend přezkoumat informace shromážděné dosavadním výzkumem a na základě jejich revize určit směr budoucího výzkumu [1, 2, 3].

Příspěvek podává přehled současného stavu výzkumu tvorby trhlin v betonu v raných stádiích a její kontroly, tedy témat, která přitahují stále více pozornosti. Cílem je poskytnout odborníkům povědomí o této nanejvýš důležité problematice.



Obr. 1 Definice autogenního smršťování
Fig. 1 Definition of autogeneous shrinkage

MECHANIZMY VYVOLÁVAJÍCÍ TVORBU TRHLIN V BETONU V RANÝCH STÁDIÍCH

Napětí vznikající v betonu v raných stádiích, které způsobuje tvorbu trhlin, je obvykle spojováno s třemi druhy přetvoření

- s autogenním smršťováním, vyvolaným absorbcí vody během hydratace cementových částic,
- smršťováním následkem vysychání, způsobeném vypařováním vody během zrání betonu,

• smršťování následkem teplotních změn vzhledem k nedostatečné disipaci tepla vzniklého v důsledku hydratace cementu a chladnutí horkého betonu.

Definice autogenního smrštění je stále předmětem diskuzí díky nejednoznačnému chápání tohoto úkazu. V literatuře je autogenní smršťování definováno jako zmenšení celkového objemu pojivového materiálu způsobeného hydratací cementu během a po ukončení tuhnutí betonu (obr. 1). Na druhé straně smršťování následkem vysychání se běžně považuje za deformaci objemu způsobenou výparem vody ze ztvrdlého betonu do okolního ovzduší. Co se týče rozdílů v mechanizmu smršťování, vysokopevnostní betony s nízkým vodním součinitelem jsou náchylné více k autogennímu smrštění, zatímco běžné betony s vysokým poměrem vody a cementu vykazují spíše smrštění následkem vysychání. Pokud vysychání povrchu betonu v raných stádiích probíhá spolu s úbytkem vlhkosti během hydratace, je nemožné oddělit smršťování následkem vysoušení od autogenního smršťování. Mohou probíhat současně.

Autogenní smršťování a smršťování následkem vysychání mají podobné vlastnosti v tom smyslu, že představují zmenšení objemu po poklesu relativní vlhkosti během tvrdnutí betonu. Značně se však liší v načasování průběhu růstu napětí a v mechanizmech zmíněných výše.

Zatímco autogenní smršťování může probíhat několik hodin až několik dní po počátku tuhnutí až do té doby, než skončí hydratace, smrštění následkem vysychání může nastat pouze tehdy, až je povrch po odbednění vystaven vnějším podmínkám, tedy několik dní po počátku tuhnutí až do konce procesu ošetřování betonu. Dalším významným rozdílem je, že autogenní smršťování je rovnoměrná deformace bez rovinného gradientu přetvoření, pokud se teplo z hydratace nešíří uvnitř dílce nehomogenně anebo pokud není deformace lokálně omezena. Na druhé straně, protože je smrštění následkem vysoušení způsobeno ztrátou vody uvnitř betonu povrchem prvku, vzniká nerovnoměrné rozložení vlhkosti v prvku a v rámci konstrukčních prvků pozorujeme vždy gradienty přetvoření (obr. 2).

Když povrch vysychá a chce se smršťovat, omezuje ho objem vnitřního jádra prvku. Proto tvorba trhlin následkem vysychání začíná od povrchových oblastí. Později, když vysychá jádro prvku, podrobuje se deformaci smršťováním. Pokud je této deformaci zabráněno, vyvolává tahové napětí, které vede ke vzniku trhlin v celém objemu. Přitom prvotní trhliny vzniklé v důsledku autogenního smršťování zde již mohou existovat.

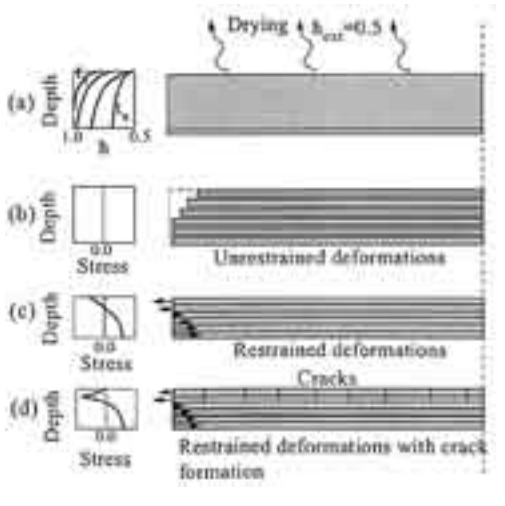
Přibližně pět až deset hodin po začátku hydratace, v době, kdy se začíná formovat mikrostruktura betonu, autogenní smršťování, pokud probíhá volně, v průběhu hydratace narůstá. Pokud je omezeno, může vyvolávat značné tahové napětí, jehož následkem dojde k tvorbě trhlin.

Smršťování následkem teplotních změn se liší od obou popsaných typů smršťování tím, že není spojené s pohybem vlhkosti, ale s výkyvy vnitřních a vnějších teplot. Teplem způsobené smršťování zahrnuje účinky denních teplotních změn i odezvu masívních betonových konstrukcí na teplo vznikající během hydratace. Při hydrataci cementu v exotermické reakci se uvolňuje velké množství tepla. Rozptyl tohoto tepla je ve velkých konstrukcích relativně pomalý. Nadměrný vzrůst tepla akceleruje hydratační proces a způsobuje zatvrdnutí betonu v roztaženém stavu. Když potom beton chladne, dojde ke smrštění, které často způsobí vznik trhlin. V nedávné době se objevilo několik prací, které se věnují výpočtu tepelných napětí a jejich schopnosti vyvolávat trhliny [4].

V některých praktických případech jsou betonové prvky už v raném stádiu zatíženy, čímž dochází k deformacím od dotvarování, které časem pod trvalým zatížením postupně narůstá. Dotvarování betonu se liší od dotvarování pozorovaného u jiných stavebních materiálů tím, že probíhá při běžné teplotě.

Je-li přetvoření betonového dílce omezeno, můžeme pozorovat opačný úkaz – dochází k postupnému uvolnění – relaxaci napětí. Napětí se uvolňuje nejen v případě vnějšího zatížení, ale také v případě napětí od smrštění, což celou věc ještě více komplikuje.

Povšimněme si, že zatímco dotvarování a relaxace jsou v literatuře konvenční mechaniky dva oddělené procesy, řádně odlišující stavy napětí a přetvoření, v odborné literatuře o betonu se naopak často vzájemně zaměňují a popisují jeden jev, protože jsou zde jako jeden a týž jev také chápány.



Obr. 2 Rozdělení napětí a tvorba trhlin ve vysychajícím betonovém prvku

Fig. 2 Stress distribution and crack formation in a drying concrete element

Mechanizmus tvorby trhlin v raném stádiu je tudíž složitá souhra růstu pevnosti, vývoje autogenního smršťování a/nebo smršťování následkem vysychání, deformací od dotvarování a relaxace. Při zkoumání tohoto mechanizmu je důležité uvažovat přetvoření každého příčinného faktoru zvlášť. Tak je možné definovat celkové přetvoření v čase *t* rovnicí (1) [5]:

$$\varepsilon_T(t) = \varepsilon_{pružné}(t) + \varepsilon_{dotvarování}(t) + \varepsilon_{smrštění}(t) + \varepsilon_{tepelné}(t) \qquad (1)$$

Součet $\varepsilon_{pružné}$ a $\varepsilon_{dotvarování}$ představuje mechanickou reakci materiálu na napětí, tj. přetvoření závislá na napětí, zatímco $\varepsilon_{smrštění}$ a $\varepsilon_{tepelné}$ jsou objemové změny na napětí nezávislé a způsobené pohybem vlhkosti a kolísáním teploty. Tudíž napětí vyvolávající tvorbu trhlin v betonu v raném stádiu jsou v případě absence externího zatížení způsobená omezením deformací.

V betonu nosných konstrukcí může působit celá řada různých zdrojů omezení deformací. Omezení mohou vyvodit cizí tělesa působící na beton, např. tyčová výztuž uvnitř nosného prvku. Může být také zapříčiněno tuhostí styčníkových spojení připojujících jeden prvek k sousednímu prvku o vysoké tuhosti. A může je dokonce vyvolat beton v „jádru" nosného prvku, když uvnitř dojde k nerovnoměrnému rozdělení přetvoření, jež odpovídá rozložení teploty a vlhkosti, jak bylo

vysvětleno v případě smršťování následkem vysychání.

V praxi dochází k omezení deformací betonových konstrukcích téměř vždy a do značné míry, ale stěží zcela vyloučí pohyby betonových nosných prvků. Proto je obvykle obtížné, avšak nezbytné, zhodnotit efektivní úroveň omezení, závisející na poměru mezi místní tuhostí betonu a tuhostí okolního betonu nebo sousedních nosných prvků. Podle parametrických studií [6] pokles stupně omezení zpožďuje počátek vzniku trhlin, což naznačuje, že úroveň omezení λ je klíčovým faktorem při předvídání počátku tvorby trhlin v betonu. Studie také poukazují na vliv podílu rychlosti smršťování na růstu napětí a době vzniku a rozvoje trhlin. Při vysokém stupni omezení deformací způsobí rychlejší smršťování dřívější vznik trhlin. Když je naopak stupeň omezení nízký, trhliny se tvoří pomaleji, jak rychlost smrštění narůstá. To znamená, že vysoký stupeň omezení je více znepokojující v betonu s nízkým vodním součinitelem *w/c*, protože pokles tohoto poměru zvyšuje rychlost a intenzitu autogenního smršťování.

MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI BETONU V RANÝCH STÁDIÍCH

Přesnost analýzy napětí vyvolaného omezováním smršťování záleží hlavně na tom, jak jsou popsány požadované mechanické vlastnosti. Většina mechanických vlastností se v raných stádiích tuhnutí a tvrdnutí rychle mění, zvláště v období, kdy beton přechází z kapalného stavu do pevného. Nejdůležitější mechanické vlastnosti nezbytné pro analýzu v počáteční době tuhnutí jsou modul pružnosti, pevnost v tahu a vlastnosti určující viskoelastické chování materiálu. V podstatě každá materiálová vlastnost ovlivňující smršťování a časnou tvorbu trhlin závisí na vývoji hydratace cementu nebo produktů hydratace. Značně se různí podle stáří betonu, dílčích materiálů, dávkování směsi a prostředí zrání. Tato kapitola se zaměřuje na výsledky nedávného výzkumu týkajícího se průběhu dotvarování za tahového napětí, které způsobuje tvorbu trhlin, nevyhnutelného vzrůstu hydratačního tepla během hydratačního procesu vysokopevnostního betonu, který prochází značným autogenním smršťováním, a koeficientu lineární roztažnosti spojeného s teplotní roztažností, která doprovází růst hydratačního tepla.

Modul pružnosti a pevnost

Někdy v době, kdy se začne, v důsledku vzniku vzájemných vazeb a spojování hydratačních produktů, vytvořených v souladu s postupem hydratační reakce cementových částic, tvořit mikrostruktura, mladý beton začíná získávat pevnost a tuhost, které v čase rostou. Bylo poukázáno na skutečnost [7], že po tří- až čtyřhodinovém tuhnutí obsahuje beton velmi nepružné složky i za nízkého napětí a většina jejich deformací je trvalá. Po osmi až deseti hodinách tuhnutí začnou vznikat jasně vymezené pružné a nepružné oblasti. Po čtrnácti až osmnácti hodinách začne beton vykazovat podobné vlastnosti, jako má ztvrdlý beton.

Zvláště modul pružnosti vysokopevnostního betonu už v časném stádiu dosahuje vysokých hodnot modulu pružnosti ve srovnání s obyčejným betonem. Tuto skutečnost ilustruje fakt, že druhého dne je modul pružnosti roven přibližně 80 % či více ve srovnání s modulem po 28 dnech. Rychlost nárůstu vysokých hodnot modulu pružnosti je vyšší než rychlost vývoje pevnosti v tlaku. Modul pružnosti se většinou měří na základě nárůstu přetvoření oproti napětí. Dle výzkumu [3] jsou hodnoty modulu pružnosti v tahu asi 1,1 až 1,2 krát vyšší než hodnoty modulu pružnosti v tlaku.

Rovněž byl názorně prokázán vliv hydratačního tepla na vývoj pevnosti a modulu pružnosti [3] se zaměřením pozornosti na dílčí materiály, které mohou podstatně ovlivňovat rozvoj mechanických vlastností.

Charakteristika dotvarování v tahu

Výzkum dlouhou dobu považoval dotvarování betonu v tahu a dotvarování v tlaku za stejné. Protože dotvarování v tahu značně ovlivňuje tvorbu trhlin vzniklých následkem tepelného pnutí a smrštění, soustředil se výzkum v poslední době především na ně.

Výsledky ukazují, že dotvarování v tlaku je markantnější než dotvarování v tahu při stejném poměru napětí a pevnosti a že čím je beton starší v době zatížení, tím menší je rozdíl mezi oběma druhy dotvarování [3]. Jednotkové dotvarování v tahu (deformace na jednotku napětí) je přibližně 75 % jednotkového dotvarování v tlaku, a to bez ohledu na dobu, kdy dojde k zatížení, a na délce jeho trvání. Na druhé straně zkoušky dotvarování v podmínkách, za nichž byla hydratační reakce omezena, ukázaly, že jednotkové dotvarování v tahu bylo znatelně větší než jednotkové dotvarování v tlaku. Bylo poukázáno na to, že průběh hydratační reakce má velký vliv na dotvarování v tahu i tlaku, přestože mezi oběma mechanizmy je zřejmý rozdíl.

Koeficient lineární roztažnosti betonu v raných stádiích

Koeficient lineární roztažnosti betonu je obecně určován ze vztahu mezi teplotou a přetvořením, stejně jako u ostatních pevných materiálů. Tento vztah je určován z měření délkových změn způsobených změnou teploty. Nicméně v případě čerstvě uloženého vysokopevnostního betonu se závislost mezi teplotou a přetvořením separuje velice obtížně, protože teplota vzrůstá podle průběhu hydratační reakce a je tedy obtížné ji řídit. Dochází k autogennímu smršťování současně s neustálými změnami mikrostruktury v reakci na průběh hydratace. Teprve zcela nedávno byla uveřejněna spolehlivá experimentální data o koeficientu lineární roztažnosti betonu v raných stádiích. Značné úsilí bylo věnováno hledání lepších postupů měření. Byla navržena metoda izolování přetvoření vyvolaných teplotními změnami a podařilo se změřit koeficient lineární roztažnosti tak, že byla udržována nízká teplota vzorku, mezi −1 až 5 °C tak, aby byl omezen postup hydratační reakce a byla získána kontrola nad autogenním smršťováním. I díky dalším výsledkům výzkumu začalo být postupně jasné, že koeficient lineární roztažnosti je obvykle vyšší u betonu v raných stádiích než u zralého betonu a že je výrazně závislý na čase.

NUMERICKÉ MODELY K SIMULACI A ANALÝZE DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ

I přes značně složitou povahu těchto jevů je obvykle možné experimentálně najít určující materiálové vlastnosti, pokud se dají rozložit na jednotlivé nezávislé reakce. Nicméně, jak bylo zmíněno, hydratace představuje neustále pokračující reakci doprovázenou nelineárním růstem teploty, tepelným rozpínáním, současnými změnami mikrostruktury a autogenním smršťováním. Všechny tyto procesy probíhají současně a ovlivňují je rozličné faktory. Proto je stěží myslitelné při hledání na čase závislých materiálových vlastností betonu v raných stádiích spoléhat pouze

na experimenty. I přes značnou složitost a nelineárnost těchto jevů se dají vlastnosti materiálů určit, pokud jsou pečlivě prováděné experimenty kombinovány s vhodnými analytickými modely.

V posledních letech bylo dosaženo nemalého pokroku v oblasti tvorby analytických modelů hydratačního procesu. Analytické modely simulace procesu hydratace cementu je možné obecně rozdělit do tří kategorií podle měřítka popisu hydratačního procesu.

První typ, klasifikovaný jako mikroskopický model, může krok za krokem simulovat náhodnou hydrataci každé chemické složky cementových částic.

Druhý typ, nazývaný mezomodel, přímo simuluje růst cementových částic při průběhu hydratačního procesu až po vytvoření kostry (středního rozsahu) ztvrdlé cementové kaše.

Třetí typ promítá vliv hydratační reakce na materiálové odlišnosti modelů makroskopických částí, aniž by se jednotlivá částice brala jako explicitní. Tento model je znám jako makromodel.

Byla vyvinuta metoda přímého zobrazení chemických složek tvořících mikrostrukturu cementu [8]. Chemické složky jako data zobrazení se vztahují k prvku zobrazení, čímž se simuluje náhodná hydratační reakce probíhající v každém obrazovém prvku zobrazení bod za bodem. Tento model umožňuje studovat hydratační proces a následnou tvorbu mikrostruktury velmi přesným způsobem. Podobně poskytuje příležitost zkoumat růstové chování pórových struktur. Výsledky modelování lze také použít k simulaci procesu nárůstu pevnosti a smršťování.

Byl vyvinut mezomodel pro numerickou analýzu [9], v němž jsou přímo reprezentovány částice cementu s ohledem na náhodné rozložení částic nejrůznějších velikostí. Ze skupiny cementových částic, jejichž uspořádání závisí na poměru w/c a rozložení velikosti částic, byl izolován jednotkový prostor kolem větší cementové částice, která je jádrem hydratační reakce. Byl stanoven předpoklad, že hydratační produkt se tvoří a roste uvnitř jednotkového prostoru, který posléze přijme menší částice i s jejich hydratačními produkty, vytvoří hydratační shluky a zpevní je. „Zesíťované" částice ukazují úroveň zpevnění (konsolidace) uvnitř cementové kaše, což úzce souvisí s mechanizmem přenosu napětí, jako je např. nárůst pevnosti a modulů pružnosti. Model byl dále rozšířen [10] o zobrazení změny složení cementové kaše v průběhu hydratačního procesu, což umožnilo popsání raného dotvarování. Později byl hydratační model ještě dále rozšířen [3] a vytvořen trojrozměrný systém k rozboru pórových struktur, změn tuhosti, vzniku tepelného pnutí a určení rizik tvorby trhlin věrnějším způsobem.

Jako příklady makromodelů můžeme uvést několik reologických modelů, ve kterých se materiálové vlastnosti ovlivňující dotvarování připisují pružným a viskózním prvkům položeným v sériovém a/nebo paralelním propojení. Ve většině případů takové modely umožňují fenomenologický popis odezvy betonu na základě empirických analýz, avšak neříkají nic o aktuálním mechanismu dotvarování. Na čase závislé aspekty základního dotvarování jsou matematicky zpracovávány s uvážením materiálových parametrů přítomných v modelu dotvarování jako empirické funkce stáří betonu. Na druhé straně experimentální data týkající se vlastností dotvarování jsou velmi kontroverzní. Takové předpovědní modely

Literatura:

[1] *Mihashi H. and Leite J. P. De B.:* State of the art report on control of cracking in early age concrete. J. of ACT, Vol. 2, No. 2, 141–154, June 2004, JCI

[2] Kovler K. and Bentur A. Eds., Pre-Proc. of RILEM Inter. Conf. on Early Age Cracking in Cementitious Systems (EAC_01), Haifa 2001, Izrael

[3] Mihashi H. and Wittmann F. H., Eds., "Control of Cracking in Early Age Concrete", Balkema, Rotterdam 2002

[4] *Springenschmid R., Breitenbuecher R. and Mangold M.:* "Development of the Cracking frame and the temperature-stress testing machine", in Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, R., Springenschmid, Eds. E&FN Spon, Londýn 1994, 137–144

[5] CEB-FIP "CEB-FIP Model Code 1990", Comité Euro-International du Béton, final draft, Thomas Telford, Londýn 1991

[6] *Weiss W. J., Yang W. and Shah S. P.:* "Factors influencing durability and early-age cracking in high strength concrete structures, in SP 189-22 High Performance Concrete: Research to Practice, Farmington Hills MI 1999, 387–409

[7] B*erggstrom. S. G. and Byfors J.:* "Properties of concrete at early ages", Material and Structures, 13, 1980, (75), 265–274

[8] *Bentz D. P., Garboczi E. J. and Martys N.:* "Application of digital-image--based models to microstructure, transport properties and degradation of cement-based materials" in The Modelling of Microstructure and its Potential for Studying Transport Properties and Durability, H. Jennings, J. Kropp & K. Scrivener, Eds., Kluwer Academic Publishers 1996, NATO ASI Series, Series, E: Applied Science, 304, 167–185

[9] *Breugel K. van:* "Numerical simulation of hydration and microstructural development in hardening cement--based materials", Heron, 37 (3), 1996

[10] *Lockhorst S. J. and Breugel K. van:* "Simulation of the effect of geometrical changes of the microstructure on the deformational behavior of hardening concrete", Cement and Concrete Research, 27 (10), 1997, 1465–1479

[11] *Bažant Z. P.:* "Viscoelasticity of solidifying porous media-concrete", ASCE J. of the Eng. Mech. Division, 103, (EM6), 1977, 1049–1067

[12] *Bažant Z. P. and Prasannan S.:* "Solidification theory for concrete creep: formulation", ASCE J. of Engineering Mechanics, 115, (8), 1989, 1691–1703

[13] *Maekawa K., Chaube R. and Kishi T.:* Modelling of Concrete Performance – Hydration, Microstructure Formation and Mass TRansport", E & FN Spon, Londýn 1999

[14] *Gilbert R. I.:* "Shrinkage cracking in fully restrained concrete members", ACI Structural Journal, 89 (2), 1992, 141–149

[15] *Thelanderson S., Martensson A, Dahlblom O.:* "Tension softening and cracking in drying concrete", 21 (126), 1989, 416–424

[16] *Gryzbowski M. and Shah S. P.:* "Model to Predict Cracking in Fiber Reinforced Concrete due to Restrained Shrinkage", Magazine of Concrete Research, 41 (148), 1989, 125–135

mohou vnášet značné nepřesnosti. Byly navrženy průkopnické teorie [11], které umožnily modelování dotvarování s uvážením mikromechaniky procesu tvrdnutí připisovaného hydratační reakci cementu. Z toho začalo být zřejmé, že závislost veškerého makroskopického dotvarování na době zrání (stáří betonu) se dá připsat na vrub změnám v mikroskopickém složení. Později se podařilo zjednodušit matematické zpracování vlivu času na dotvarování [12]. Průběh hydratační reakce nebyl považován za proces změn materiálových vlastností samotných produktů hydratace, ale za proces tvorby/akumulace jednotlivých vrstvových materiálů s vlastnostmi nezávislými na době tvrdnutí. Základní hypotézou demonstrovanou tímto modelem, je, že se jednotky objemu $dv(t)$ ztvrdlé v různých časech podrobí stejnému přetvoření $\varepsilon v(t)$. Nejdůležitější předností této teorie tuhnutí (solidifikace) je, že nosný objem je nezávislý na době tvrdnutí.

Pokrok, jehož bylo dosaženo v oblasti zkoušení smršťování betonu, jehož deformaci je bráněno, přenesl pozornost k experimentálnímu určení účinků na ranou tvorbu trhlin. Zatím jen málo pozornosti bylo věnováno teoretické předpovědi doby počátku tvorby trhlin. Lze uvést příklady různých přístupů k danému problému. Byl aplikován přístup založený na pevnosti společně s účinkem souvislého vyztužení [14], aby mohlo být zkoumáno chování betonu obsahujícího ocelovou vyztuž. Přístup založený na pevnosti materiálů je hodně používán, ale má jasná omezení, protože nemůže objasnit mechanizmy absorbující energii, jako je vyztužení vlákny. Bylo uskutečněno několik studií zkoumajících průběh smršťování/tvorbu trhlin pomocí modelování konečnými prvky [15] k simulaci chování betonových desek a prstenců. Byl navržen model založený na mechanice poškození [16] a nalezeno vhodné srovnání mezi experimentálním chováním a simulací. Nicméně tento přístup je závislý na rozsáhlých informacích o materiálových parametrech a realizace modelu je poněkud těžkopádná. Byla provedena řadu simulací vzorků prstencového a deskového typu [6], jimž bylo bráněno ve smršťování, pro zhodnocení možné tvorby trhlin. K prognóze poruchy byl použit přístup založený na mechanice lomu a zbytková napětí byla odhadnuta pomocí rovnice (2):

$$d\varepsilon_T(t,t') = d\sigma(t')\left[\frac{1}{E(t')} + \frac{\varphi(t,t')}{E_{28d}}\right] + d\varepsilon_{smrštění}(t'), \qquad (2)$$

kde $d\varepsilon_T(t,t')$ je celkový přírustek přetvoření v čase t, $E(t')$ je modul pružnosti a $d\sigma(t')$ je napětí působící v době zatížení t', E_{28d} je modul pružnosti po 28 dnech, $\varphi(t, t')$ je koeficient dotvarování a $d\varepsilon_{smrštování}(t')$ je součet autogenního smršťování následkem vysychání a smrštění následkem teplotních změn v čase t' při absenci omezení deformací betonu. Je-li uvažována úroveň účinného omezení deformací λ, rovnici (2) je možné upravit takto:

$$d\sigma(t')\left[\frac{1}{E(t')} + \frac{\varphi(t,t')}{E_{28d}}\right] = \lambda d\varepsilon_{smrštění}(t'), \qquad (3)$$

kde

$$\lambda = [d\varepsilon_T(t, t') - d\varepsilon_{smrštění}(t')] / d\varepsilon_{smrštění}(t') \quad (0 \le \lambda \le 1) \qquad (4)$$

Rovnice (3) jednoduše vyjadřuje složitost problémů spojených s tvorbou trhlin v důsledku smrštění betonu v raných stádiích.

Konec 1. části, dokončení článku bude zařazeno do příštího čísla časopisu.

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

otištěno s laskavým souhlasem autorů, redakčně zkráceno

Dokončení ze str. 23

barevných složek kameniva (obr. 12).

Při použití reaktivních pigmentů je nutné předem vyzkoušet jejich vliv na vlastnosti betonu.

Obr 10. Lazurované povrchy bloku bytových domů v Mustankivi, Helsinky, ARK-House Arkkitehdit Oy [1]

Fig. 10 Glazing finishes of housing complex in Mustankivi, Helsinki, ARK-House Arkkitehdit Oy [1]

PIGMENTY

Do betonu jsou používány buď syntetické nebo přírodní minerální pigmenty (tab. 3 – str. 39). Přírodní barviva jsou ve většině nevyhovující. Nejčistších barev lze dosáhnout kombinací pigmentů a bílého cementu. Jediná použitelná bílá barva je oxid titaničitý, čistý TiO_2.

STÁRNUTÍ POVRCHŮ A JEJICH ÚDRŽBA

Vzhled vnějšího betonového povrchu se jeho stárnutím mění hlavně vlivem prachu, deště a zarůstáním mechem. Znečištění může být způsobeno také úniky vápna a rostlinami, které zapustí kořeny do povrchu. Stárnutím získává povrch také patinu, která však obvykle nenarušuje požadovaný vzhled.

Údržbu betonového povrchu je nutné plánovat společně s údržbou celého