

ÚČINKY MRAZU NA BETON EFFECTS OF FROST ATTACK ON CONCRETE

**BŘETISLAV TEPLÝ,
PAVEL ROVNANÍK**

Předkládaný článek referuje o problematice poškozování betonu mrazem ve světle výsledků výzkumů publikovaných v posledních létech. Popisuje souvislosti a důsledky dvou různých typů poškozování betonu: povrchu betonu odlupování a porušení vnitřní struktury betonu. Naznačuje možnosti numerického modelování těchto jevů a stručně zmiňuje související české předpisy.

Presented paper reports on damage of concrete due to frost attack in the view of recently published research results. The context and consequences of two different effects are described: scaling and internal damage. The feasibility of numerical modelling of those effects is mentioned together with a brief list of relevant Czech standards.

S důsledky působení mrazu, resp. zmrazovacích cyklů na betonovou konstrukci, se projektanti, technologové i uživatelé staveb musí potýkat již velmi dlouho. Se stále širším uplatněním betonu, se vzrůstajícími požadavky na jeho vlastnosti, s používáním nových technologických postupů a s aplikací různých přísad a příměsí se však nutně zvyšuje také snaha po důkladnějším pochopení mechanismů poškozování betonu mrazem. Je potřeba zvýšit mrazuvzdornost a vytvořit vhodné modely, které by umožnily předpovídat chování betonu a účelněji navrhovat

betonové konstrukce s ohledem na požadovanou životnost a spolehlivost.

Odolnost betonu proti mrazu lze považovat za materiálovou vlastnost. Opakované zmrazování a rozmrazování (zmrazovací cykly) vede k postupnému rozrušování struktury betonu. Voda mrznoucí v kapilárních pórech zvětšuje svůj objem asi o 9 %, a mohou tak vznikat mikrotrhliny, což vede ke snížení pevnosti betonu i dalších jeho mechanických vlastností.

Článek si klade za úkol shrnout poznání v této oblasti a naznačit možnosti modelování tohoto jevu, s využitím publikovaných poznatků jiných autorů (zejména [1] až [5]) i chystaného fib Model Code [7].

ZPŮSOBY POŠKOZENÍ BETONU PŮSOBENÍM MRAZU

Obecně jsou rozlišovány dva typy účinku mrazu na beton:

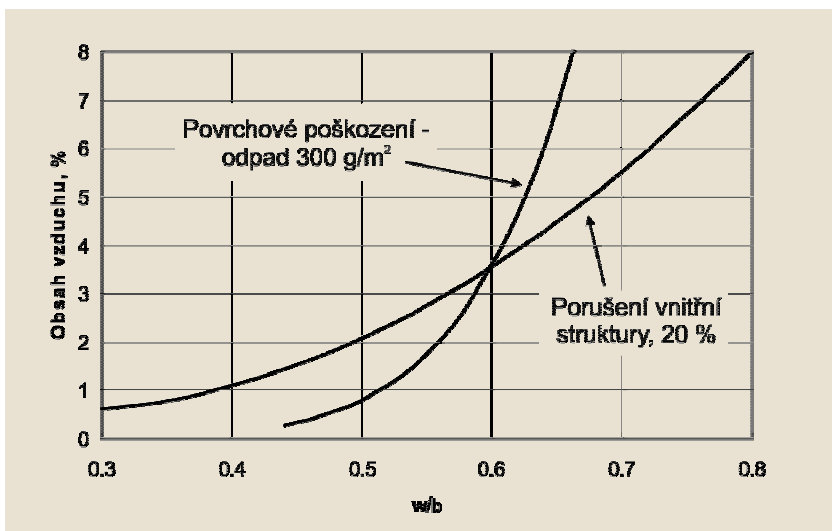
- **Povrchové poškozování.** V české dokumentaci se používá výraz **odpad**, v angličtině **scaling**. Vzniká v povrchové vrstvě betonu, obvykle za přítomnosti solných roztoků a stupeň poškozování je vyjádřen hmotností odloučeného betonu (tj. odpadem). Důsledkem tohoto typu poškozování může být kromě estetických změn zejména snížená životnost betonového prvku. Krycí vrstva betonu je narušena, dochází ke vzniku trhlin, dřívější depasivaci výztuže a následně k akceleraci koroze výztuže.
- **Porušení vnitřní struktury** je způsobeno zmrznutím vody uvnitř betonu v těch jeho částech, kde nasycení vodou dosáhlo jistého stupně. Dochází k degradaci fyzikálně-mechanických vlastností betonu, což je významné z hlediska trvanlivosti i z hlediska mezních stavů únosnosti či použitelnosti. Tento druh poškozování je obvykle kvantifikován pomocí poklesu dynamického modulu pružnosti E , méně často prostřednictvím délkového přetvoření, někdy též (nepříliš výstižně) pevností v tahu za ohybu.

V obou případech je pro mrazuvzdornost betonu jedním z rozhodujících činitelů jeho **pórová struktura**. Zde je významným údajem součinitel prostorového rozložení pórů – viz ČSN EN 480-11, který je definován jako maximální vzdálenost jakéhokoliv bodu v cementovém tmelu od okraje vzduchového póru (měřeno v cementovém tmelu [mm]). Nelze stanovit obecně platné pravidlo o obsahu vzduchu nutného pro zajištění odolnosti proti mrazu. Je to způsobeno tím, že není vždy zaručena stejná „kvalita“ pórové struktury, která může být různě ovlivněna při výrobě, ukládání a ošetřování betonu. Proto je požadováno, aby obsah vzduchu byl stanoven/ověřen laboratorním testem.

Odolnost betonu proti mrazu je tedy ovlivněna provzdušněním, poměrem w/c či w/b (b = pojivo), složením betonu a jeho ošetřováním v počátcích tuhnutí. V této souvislosti může být instruktivní závislost obsahu vzduchu v betonu na poměru w/b pro vnitřní poškozování vyjádřené poklesem E o 20 %, resp. při odpadu 300 g/m² (obr. 1).

Na poškozování betonu mají vliv **vnější podmínky**: vlhkost, chemické rozmrazovací látky (CHRL) a jejich koncentrace, frekvence a trvání zmrazovacích cyklů a extrémní teploty. Byla rozpracována řada **teorií** pro popis procesu poškozování betonu mrazem: teorie hydraulického tlaku, teorie osmotického tlaku, koncepce kritického stupně nasycení betonu vodou a teorie založené na zákonech ter-

Na poškozování betonu mají vliv **vnější podmínky**: vlhkost, chemické rozmrazovací látky (CHRL) a jejich koncentrace, frekvence a trvání zmrazovacích cyklů a extrémní teploty. Byla rozpracována řada **teorií** pro popis procesu poškozování betonu mrazem: teorie hydraulického tlaku, teorie osmotického tlaku, koncepce kritického stupně nasycení betonu vodou a teorie založené na zákonech ter-



Obr. 1 Závislost obsahu vzduchu a poměru w/b [6]

Fig. 1 Entrained air content as a function of water to binder ratio [6]

modynamiky. Je snaha vysvětlit či popsat **mechanizmy poškození**, přitom povrchové poškození podle řady autorů odpovídá jiným mechanismům než poškození vnitřní struktury betonu.

Kvantifikace odolnosti betonu proti mrazu, resp. stanovení stupně poškození betonu je úloha **stochastické povahy** a na rozdíl od většiny jiných degradačních procesů (které mají obvykle kumulativní charakter) nemůže být jednoznačně definována jako funkce času: zvýšení doby expozice nemusí nutně znamenat zvýšení rizika poškození – např. již první vystavení dostatečně nízké teplotě u betonu s nadkritickým obsahem vlhkosti způsobí vážné vnitřní poškození; nezáleží zde tedy na expozičním čase ani počtu cyklů. Posuzování **životnosti** je proto v případech působení mrazu obtížné; může se snad opírat o transformaci charakteristik působení prostředí na časově závislé pole vnitřní vlhkosti betonu nebo o počet zmrazovacích cyklů, limitujícím přijatelný rozsah poškození. Celou problematiku ještě komplikuje řada **synergických efektů**: důsledky odpadu povrchové vrstvy betonu na životnost a také změny mechanických vlastností betonu v důsledku poškození vnitřní struktury již byly zmíněny výše. Kromě toho se v [8] uvádí, že také alkaliové rozpínání kameniva, podobně jako proces vyluhování hydroxidu vápenatého, může snižovat odolnost betonu proti mrazu.

Poškození betonu mrazem je již delší dobu věnována pozornost; první testy byly publikovány asi před padesáti lety – svědčí o tom i existence řady norem a doporučení pro zkoušení mrazuvzdornosti. U nás např. [9] s platností již od roku 1969, dále [10, 11] a posléze novější dokumenty [12, 13] založené na doporučeních RILEM z roku 1996 a 2004. Byla publikována i řada prací, např. Bílek [14] uvádí důležitá teoretická vysvětlení v souvislosti s mechanismem porušování mrazem a zabývá se také úlohou příměsí [15].

POVRCHOVÉ POŠKOZENÍ – ODPAD

Obecně lze říci, že při působení mrazu v povrchové vrstvě betonu za přítomnosti **roztoků solí** je tento povrch náchylný k odlučování částic, tzv. **odpadu**, současně však nemusí docházet k vnitřnímu poškození. V práci [4] se uvádí, že nejvíce nebezpečné jsou roztoky o koncentraci 2 až 4 % (v případech roztoků chlo-

ridu vápenatého, chloridu sodného i dalších CHRL). Poznamenejme, že naopak vysoké koncentrace chloridů mohou způsobit chemické poškození betonu i bez působení mrazu.

Byla vyslovena řada hypotéz o mechanismu vzniku odpadu. Jmenujme např. úvahu opřenou o termodynamické zákonitosti a energetickou rovnováhu mezi nezmrzlým roztokem, pórovou kapalinou a ledovými částicemi v pórech i roztoku [4]. V práci je také odhadováno, že tloušťka mrazem poškozeného materiálu je v každém cyklu asi 0,5 mm. Jak již bylo uvedeno výše, příznivý vliv má provzdušnění. Je nutno připomenout, že není rozhodující jen množství vzduchu v betonu, ale velký význam má **velikost, tvar a uspořádání pórů**.

Podrobně se jevem odpadu betonu při zmrazování zabývá již zmíněná přehledová práce [4], která mj. jako nejhodnější vysvětlení procesu vzniku odpadu jmenuje tzv. „glue-spall“ mechanismus a podrobně se věnuje vlivu druhu a množství příměsí betonu. Je také zdůrazněn vliv kvality povrchu betonu, jeho pevnost a druh konečné úpravy povrchu. Vlivem úpravy povrchu se zabývali také pracovníci KÚ ČVUT Praha [24], kteří zjistili dramatický rozdíl odpadu pro hlazený či řezaný povrch testovaných vzorků. Jisté i stupeň hydratace betonu dosažený před zmrazováním ovlivňuje odolnost.

Odpad způsobený mrazem za přítomnosti roztoku soli v povrchu je téměř přímo úměrný **počtu mrazových cyklů** za teoretického předpokladu stejné rychlosti změny teploty, minimální teploty, jejího trvání a také stejné koncentrace roztoku soli ve všech cyklech. Vliv na odol-

nost proti odpadu mají ovšem také další veličiny: druh cementu, druh a množství příměsí, vodní součinitel a druh kameniva [4, 14].

Důsledky poškození odpadem

- estetické důsledky;
- zmenšení efektivního průřezu nosného prvku;
- zkrácení životnosti zmenšením tloušťky krycí vrstvy betonu a zhoršení její kvality, tj. zkrácení iniciačního času zrychlení postupu koroze výztuže;
- snížení soudržnosti výztuže s betonem.

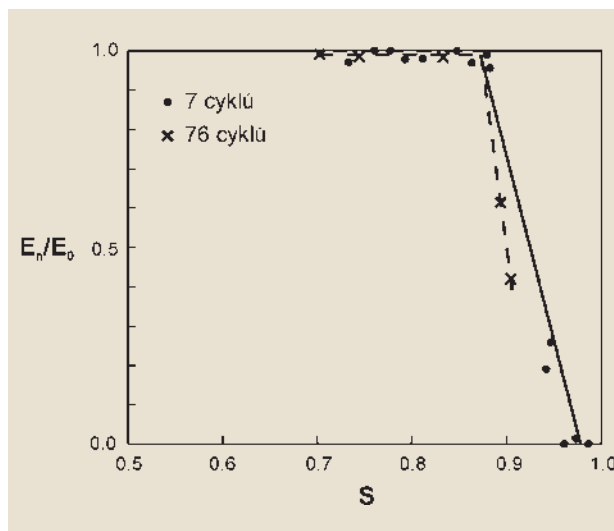
Je nutno poznamenat, že laboratorní zkoušky mrazuvzdornosti jsou pracné a časově dosti náročné (min. osm týdnů) [9 až 13]. Do jisté míry je lze nahradit požadavkem na dodržení hodnoty kritického součinitele prostorového rozložení pórů, tj. asi 250 μm při $w/c < 0,45$ [22].

POŠKOZENÍ VNITŘNÍ STRUKTURY

U tohoto druhu poškození převládá názor, viz [5, 17], přejato i do [7], že pro každý beton existuje **kritický obsah vlhkosti**, tj. stupeň nasycení vodou, při jehož překročení je jisté, že beton bude významně poškozen mrazem. Naopak při nižším obsahu vlhkosti k poškození nedochází, i když je beton vystaven velkému počtu mrazových cyklů. Odtud plyne potřeba znát či předvídat rozdíly vlhkosti u jednotlivých částí navrhované betonové konstrukce. Dostatečně výstižné teoretické stanovení vlhkosti v betonu výpočtem se zatím ukazuje nedostupné. Proto jsou navrhovány experimentální metody [17] i s pokusy využít je pro odhad pravděpodobnosti vzniku poškození mrazem jako

Obr. 2 Příklad závislosti stupně nasycení a změny dynamického modulu po 7 a 76 cyklech

Fig. 2 Example of determination of the critical degree of saturation by the change of dynamic E-modulus after 7 or 76 freeze-thaw cycles



funkce expozičního času, tj. jakýsi přechod ke stanovení životnosti.

Při transportu vlhkosti v betonu hraje nepochybně význačnou roli jeho pórovitá struktura, jejíž charakteristiky vystupují i při snahách popsat možný destrukční mechanismus. Jedná se například o mechanismus růstu mikroskopických ledových čoček [8, 14].

K porušení vnitřní struktury betonu mrazem dochází bez souvislosti s přítomností roztoků solí na jeho povrchu. Stupeň porušení vnitřní struktury je v podstatě přímo úměrný hodnotě, o kterou byla přestoupena hodnota kritického obsahu vlhkosti. Přitom konstanta této úměrnosti se zvětšuje při nárůstu zmrazovacích cyklů, avšak ne příliš výrazně. Ale již malý počet cyklů způsobuje velký nárůst poškození, lze tedy hovořit o období „nízko-cyklové únavy“ při působení cyklického zatížení mechanického typu. Závislost stupně poškození na počtu cyklů je proto v praxi nevýznamná. Situaci ilustruje příklad na obr. 2 [7], kde je zřetelně vidět:

- náhlý nárůst poškození při dosažení kritického stupně nasycení betonu vodou ($S_{cr} = 88 \%$);
- malý vliv zvýšení počtu cyklů.

Změna mechanických vlastností betonu při vnitřním poškození

Porušení vnitřní struktury betonu mrazem se projevuje vznikem mikrotrhlin, postupně se propojujících a narůstajících. To má za následek změny mechanických vlastností, jejichž znalost může být nezbytná při posuzování únosnosti či tuhosti betonové konstrukce vystavované mrazu a vlhku. Vnitřní poškození je obvykle kvantifikováno pomocí poklesu dynamického modulu pružnosti E [%]. Přitom se zdá, že korelace mezi E a dalšími mechanickými vlastnostmi betonu není obecně a jednoznačně stanovitelná. Jelikož z pohledu projektanta jde ale o zásadní údaje potřebné pro statický výpočet/posouzení, uvádíme zde proto alespoň informace o hodnotách, které byly experimentálně stanoveny pro betony o různých hodnotách w/c a při vážném poškození mrazem [8]. Bylo shledáno, že čím vyšší je překročení kritického obsahu vlhkosti betonu, tím výraznější je zhoršení jeho mechanických vlastností.

Krychelná pevnost: pokles střední hodnoty asi o 10 MPa, největší zaznamenané snížení bylo 35 %.

Pevnost v tahu: bylo zaznamenáno výraznější snížení než u tlakové pevnosti – až na 70 % hodnoty pro neporušený beton; střední hodnotu lze stanovit přibližně pomocí vztahu

$$f_{t,D} = 1,2 f_{t,0} - 3 \text{ [MPa]},$$

kde $f_{t,0}$ je tahová pevnost betonu, který nebyl vystaven působení mrazu.

Dynamický modul: pokles modulu je značný, někdy až totální; statický modul nebyl zkoušen, je pravděpodobně vyšší než dynamický.

Soudržnost betonu s výztuží: střední hodnota pro žebírkovou výztuž poklesla asi na polovinu; maximální pozorovaný pokles byl 70 %. U hladké výztuže byl zaznamenán pokles soudržnosti o 90 %.

VÝPOČETNÍ MODEL

Je zřejmé, že při hodnocení poškozování betonu mrazem se v současnosti neobejdeme bez náročných a zdoluhavých laboratorních zkoušek. Proto je pochopitelná snaha po vytvoření vhodných výpočetních modelů, které by mohly návrh/posouzení usnadnit, zrychlit, resp. doplnit. Další výhodou znalosti vhodného modelu může být to, že při použití pravděpodobnostního postupu lze vzít v úvahu také stochastickou povahu jevu a získat tomu odpovídající kvalitu výsledků.

Publikovaných pokusů o prezentaci modelu procesu odpadu povrchu betonu při zmrazování či narušení vnitřní struktury je poskrovnu (pokud je autorům známo). Jmenujme nejprve dva případy vyžití metody konečných prvků.

V práci [25] byl vyvinut 3D konečný prvek pro nelineární analýzu se statistickým rozdělením materiálových parametrů; byl využit přístup rozmazaných trhlin, řešilo se namáhání měnící se teplotou (mrazem). Tvorba ledových čoček byla simulována změnami hodnot součinitelů tepelné roztažnosti při mrznutí kapilární vody, byly určovány trvalé deformace.

V příspěvku [26] byl odvozen a aplikován speciální konečný prvek a použit v Galerkinově metodě pro řešení okrajového problému s přihlédnutím k procesu mrazových cyklů.

V obou případech se jedná o velmi specializované postupy, které nejsou zatím schůdné při praktickém používání. Zde je uvádíme jen pro úplnost.

Naopak velmi jednoduchý je japonský model [19, 20], který hodnotí pokles dynamického modulu (experimentální

hodnoty) s jistým součinitelem spolehlivosti, ale bez dalších údajů o vlastnostech betonu a vlivech prostředí (např. nasycení vodou, mrazové cykly apod.). Model by proto mohl sloužit jen pro orientační účely.

Další japonský model [21a] se taktéž opírá o vyjádření dynamického modulu, tentokrát i s ohledem na počet cyklů, stáří konstrukce, w/c a obsah vzduchu pomocí koeficientů, které nejsou, bohužel, v [21b] blíže uvedeny. Podrobnější popis existuje zatím jen v japonštině.

Pentala v práci [23] poskytuje velmi jednoduché numerické modely pro stanovení hodnot odpadu i vnitřního poškození. Vztahy jsou odvozené nelineární regresí z výsledků čtyřiceti pěti testů, resp. dvanácti druhů betonu. Tyto modely mají proto jen omezenou vypovídací schopnost.

Modely připravené pro *fib* – Model Code [7] se opírají o výzkumy [2, 5, 17, 18] a hodnotí mrazuvzdornost pravděpodobnostními postupy v souladu se současnými trendy. Vyžadují však provedení řady laboratorních zkoušek; nejde tedy v pravém slova smyslu o numerické modelování.

ZÁVĚREČNÉ POZNÁMKY

V souladu s výsledky výzkumů citovaných v příspěvku se jeví poškození vnitřní struktury betonu mrazem oproti odlupování povrchu betonu jako zásadní z hlediska posouzení únosnosti a deformovatelnosti konstrukčních betonových prvků (viz pokles fyzikálně-mechanických vlastností betonu). Ve starších ČSN [9, 10] nejsou uvedené dva způsoby porušení vždy důsledně odlišeny.

Podle normy [9] se hodnotí úbytky hmotnosti (tj. odpad) a součinitel mrazuvzdornosti, což je poměr pevnosti zmrazovaných trámečků v tahu za ohybu k pevnosti porovnávacích trámů v tahu za ohybu. Tento součinitel má být pro mrazuvzdorný beton větší než 0,75. Poznamenejme, že při tahu za ohybu rozhodují vlastnosti „krajních vláken“, tedy hodnotí se vlastně stav povrchu betonu, nikoliv vlastnosti jeho vnitřní struktury.

Dle normy [10] se stanovuje nasákavost betonu během 24 h a jsou pak dány meze mrazuvzdornosti; tento postup tedy představuje spíše hodnocení vnitřní struktury betonu. Dle stejné normy se hodnotí také součinitel mrazuvzdornosti a úbytky hmotnosti při různých počtech

zmrazovacích cyklů. Zkoušky se ukončí, když:

- tělesa byla podrobena předepsanému počtu zmrazovacích cyklů;
- při ukončení zmrazovací etapy, při které byl zjištěn úbytek hmotnosti větší než 5 % celkového úbytku, nebo součinitel mrazuvzdornosti poklesl pod 0,75;
- nedestruktivním vyšetřením (není blíže specifikováno) byl zjištěn nevyhovující průběh měřených hodnot při určitém počtu cyklů.

Norma [11] je již jednoznačně věnována odolnosti povrchu betonu pomocí měření mrazivosti odpadu, podobně jako nový dokument [13]. Definice stupňů porušení a tomu příslušné mezní hodnoty odpadu jsou uvedeny jen v [11]. Další nová norma [12] je určena k posouzení porušení vnitřní struktury ultrazvukem, resp. měřením změny délky vzorku; limity mrazuvzdornosti však nejsou uvedeny. Při zkoušení pomocí ultrazvukových impulzů ale nelze oddělit vliv narušení povrchových vrstev od vlivu porušení vnitřní struktury (trámečky průřezu 100 x 100 mm). Připomeňme také, že ČSN EN 206-1 ve své připravované změně Z3 bude uvádět, že odolnost betonu proti působení vody, mrazu a chemických rozmrazovacích látek je zajištěna správnou volbou vlivu prostředí, jsou-li dodrženy požadavky tabulek F 1.1 až 3 (mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu).

Tento příspěvek si neklade za cíl hodnotit postupy jednotlivých normativních dokumentů, jen je stručně zmiňuje a charakterizuje pro snazší orientaci čtenáře. Snahou autorů bylo souhrnně referovat o problematice poškozování betonu mrazem ve světle výsledků výzkumů publikovaných v posledních letech.

Příspěvek vznikl za podpory výzkumného projektu MSM 0021630519, financovaného MŠMT ČR.

Prof. Ing. Břetislav Teplý, CSc.
tel.: 541 147 642, fax: 541 147 667
e-mail: teply.b@fce.vutbr.cz
www.fce.vutbr.cz/CHE/teply.b/

RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.
tel.: 541 147 636, fax: 541 147 667
e-mail: rovnanik.p@fce.vutbr.cz

oba: Stavební fakulta VUT v Brně
Žitkova 17, 602 00 Brno

Literatura:

- [1] Bager D. H., Jacobsen S.: A Conceptual Model for the Freeze-Thaw Damage in Concrete. In Proc of the 3rd Nordic Research seminar (edit K. Fridh), Lund, 1999, 1–17
- [2] Fagerlund G.: Modified procedure for determination of internal frost resistance by the critical degree of saturation method. *ibid.*, 29–49
- [3] Sarja A., Vesikari E.: Durability Design of Concrete Structures. RILEM report 14, E & FN SPON, London, 1996
- [4] Valenza II J. J., Sherer G.W.: A review of salt scaling: Part I. Phenomenology; Part II: Mechanisms, Cement and Concrete Research, 2007, (v tisku)
- [5] Fagerlund G.: Mechanical damage and fatigue effects associated with freeze-thaw of materials. In: Frost resistance of concrete from nano-structure and pore solution to macroscopic behaviour and testing, (edit by M. J. Setzer), Essen, Germany, 2002, 117–132
- [6] Penttala V.: From freezing and thawing pore water pressure to concrete stresses, *ibid.*, 147–160
- [7] Service Life Design – Part of the future fib Model Code, *fib* Bulletin No. 34, 2006
- [8] CONTECVET: Manual for assessing concrete structures affected by frost. Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 2001
- [9] ČSN 73 1322: Stanovení mrazuvzdornosti betonu, 1969
- [10] ČSN 73 1325: Stanovení mrazuvzdornosti betonu zkrácenými zkouškami, 1971
- [11] ČSN 73 1326: Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, 1985
- [12] ČSN 73 1380: Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – Porušení vnitřní struktury. ČNI, 2007
- [13] ČSN P CEN/TS 12390-9 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 9: Odolnost proti zmrazování a rozmrazování – Od lupování. ČNI, 2007
- [14] Bílek V.: Mrazuvzdornost betonu z druhého konce, Sborník Betonářské dny 2005, 109–114
- [15] Bílek V.: Freezing and thawing resistance of Self-Compacting Concrete with different mineral admixtures, in Proc. of Seventh CANMET/ACI International Conference (Supplementary papers, edit. P. Gupta), 2006, Montreal, Canada, 107–115
- [16] Lifecon (5FP GROWTH), Deliverables D 3.2: Probability service life models for reinforced structures
- [17] Fagerlund G.: A service life model for internal frost damage in concrete, report TVBM-3119, Div of BM, Lund IT, Sweden, 2004
- [18] Petersson P.E.: A service life model for scaling resistance of concrete – reflections. Contribution to fib task group 5.6, Lund, 2004
- [19] Japan Society of Civil Engineering (JSCE), Standard Specifications for concrete structures – 2002, materials and construction
- [20] Sakai K.: The JSCE durability design of concrete structures and a proposal for Vietnam construction industry, JSCE Newsletter No. 5, 2006, Concrete Committee, 19 stran
- [21] a) Architectural Institute of Japan (AIJ): Recommendations for Durability Design and Construction Practice of Reinforced Concrete, 2004 (v japonštině); b) Noguchi, T. et al.: Outline of Recommendations for Durability Design and Construction Practice of Reinforced Concrete Buildings in Japan. Proc. of Seventh CANMET/ACI International Conference (edit. By V.M. Malhotra), 2006, Montreal, Canada, 347–372
- [22] Aitcin P.-C.: Vysokohodnotný beton, ČKAIT, Praha, 2005
- [23] Penttala V.: Surface and internal deterioration of concrete due to saline and non-saline freeze-thaw loads. Cement and Concrete Research 36, 2006, 921–928
- [24] Projekt ministerstva dopravy 1F55F/015/120 Stanovení převodního vztahu pro parametry odolnosti stanovené zkouškami mrazuvzdornosti betonu, KÚ ČVUT Praha, 2005–6
- [25] Hoersch T., Wittmann F. H.: Simulation of damage and crack formation in the composite structure of concrete under freeze-thaw cycles. In: Frost resistance of concrete from nano-structure and pore solution to macroscopic behaviour and testing, (edit by M. J. Setzer), Essen, Germany, 2002, 225–234
- [26] Kruschwitz J., Bluhm J.: Modeling of ice formation in porous solids with regard to the description of frost damage. Computational Materials Science 32, 2005, 407–417