

NOVÝ ZPŮSOB STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU S VYUŽITÍM METOD PRO SLEDOVÁNÍ PORUCH STRUKTURY ■ NEW WAY OF FROST RESISTANCE DETERMINATION OF CONCRETE BY USING METHODS FOR STRUCTURAL DAMAGE MONITORING

Petr Cikrle, Ondřej Pospíchal

Článek pojednává o nových metodách určených pro zkoušení odolnosti betonu a kamene proti střídavému zmrazování a rozmrazování. Nové zkušební postupy jsou založeny na sledování poruch struktury pomocí nedestrukтивních elektroakustických metod. Návrat zde slaví zejména metoda rezonanční, ovšem ve výrazně jednodušší impulsní podobě. Novou veličinou pro hodnocení míry porušení betonu je relativní dynamický modul pružnosti, vypočtený buď z rezonančních frekvencí, anebo z rychlosti šíření impulzů ultrazvukového vlnění. V experimentální části článku jsou porovnané výsledky zkoušek na zmrazovaných betonech různé kvality. ■ The paper deals with new testing methods for determination of freeze-thaw resistance of concrete and stone. The new methods are based on monitoring of structural damage by using non-destructive electroacoustic methods. There is above all a comeback of the resonance method, but in the markedly more simple impulse form. The relative dynamic modulus of elasticity is a new parameter for the assessment of damage volume, calculated either from resonance frequencies or from propagation velocity of ultrasonic waves. In the experimental part of this paper there is a comparison of the tests results of various kinds of frozen concrete.

Trvanlivost materiálů a výrobků je v současnosti velmi aktuálním tématem, o čemž svědčí i to, že je orgány Evropské unie navržena v dokumentu CPR (Construction Products Regulation) jako nový – sedmý základní požadavek na stavby a stavební výrobky.

Trvanlivost lze u materiálů hodnotit z různých úhlů pohledu a v závislosti na tom, jací činitelé ji ovlivňují. U betonových konstrukcí vystavených venkovnímu prostředí patří bezesporu mezi nejvýznamnější činitele mraz a jeho účinky, hodnocení mrazuvzdornosti je tedy třeba věnovat náležitou pozornost. Opakovaným rozpínáním a smršťováním ledu, respektive vody obsažené v pórech či vnitřní struktuře betonu, dochází během střídavého zmrazování a rozmrazování k rozvoji trhlin a ke vzniku prnutí v konstrukci, které vede k jejímu postupnému porušování. Během zmrazování se také výrazněji snižuje tuhost prvku v ohybu a kroucení, méně pak osová tuhost [1].

V této oblasti zůstává mnoho nezodpovězených otázek, mezi něž patří například vliv provzdušnění na mrazuvzdornost betonu, vhodnost současných normových metod a výběr té nejvhodnější pro posouzení mrazuvzdornosti [2].

Nová norma na hodnocení poruch struktury cyklickým zmrazováním [4] upřednostňuje nedestrukтивní zkoušky a zřejmě správně požaduje stanovení příčných rezonančních frekvencí, které na porušení vnitřní struktury reagují nejrychleji. Ultrazvuková metoda sice nereaguje tak hbitě, výsledky této metody však o něco lépe souhlasí s výsledky zjištěnými zkouškami destruktivními.

Ačkoliv však u nás zmíněná norma na hodnocení poruch struktury cyklickým zmrazováním platí již pátým rokem, velká část odborné veřejnosti hodnotí mrazuvzdornost betonu podle normy vydané na konci šedesátých let minulého století a novější normu k hodnocení nevyužívá.

POROVNÁNÍ METODIK PRO STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI

Stanovení mrazuvzdornosti betonu dle ČSN 73 1322 [3]

Tato norma, která beze změn platí již od roku 1969, se zabývá stanovením mrazuvzdornosti na zkušebních tělesech betonů hutných z hutného i pórovitého kameniva.

Principem metody je střídavé zmrazování a rozmrazování vodou nasycených betonových těles na počet cyklů daný příslušnými normami, předpisy nebo projektem. Po předepsaném počtu cyklů se zkouškami stanoví míry porušení zkušebních těles. Jelikož základní zkouškou je **pevnost v tahu za ohybu**, používají se jako zkušební tělesa nevyztužené trámce čtvercového průřezu s rozměry 100 × 100 × 400 mm. Počet zkušebních trámců se určí v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů – pro každou zmrazovací etapu je třeba zhotovit jednu sadu trámců (nejméně tři zkušební tělesa) zmrazovaných a jednu sadu trámců nezmrzovaných pro porovnávací účely.

Vlastní zmrazovací cyklus sestává ze 4 h zmrazování (teplota v rozmezí -15 až -20 °C nebo v rozmezí -18 až -23 °C) a 2 h rozmrazování ve vodě o teplotě +20 °C.

Po ukončení každé zmrazovací etapy se vždy jedna sada zkušebních trámců (tři trámce) zkouší na pevnost v tahu za ohybu a zpravidla pevnost v tlaku na koncích trámců. Tím samým způsobem se po ukončení zmrazování zkušebních těles vyzkouší také sada porovnávacích (nezmrzovaných) trámců. Norma připouští i použití nedestrukтивní metody zjišťování změny jakosti betonu při zmrazování, což umožňuje snížit počet těles.

Jako výsledek zkoušky se pro každou ukončenou etapu zmrazování a pro celou zkoušku zmrazování uvádějí:

- zjištěné úbytky hmotnosti zkoušených zmrazovaných trámců v % hmotnosti,
- pevnosti betonu v tahu za ohybu a zpravidla i pevnost konců trámců v tlaku, a to jak zmrazovaných, tak i porovnávacích,
- součinitel mrazuvzdornosti betonu po jednotlivých etapách a po ukončení zkoušky (součinitel mrazuvzdornosti je poměr hodnoty aritmetického průměru pevnosti zmrazovaných trámců v tahu za ohybu k hodnotě aritmetického průměru pevnosti porovnávacích trámců v tahu za ohybu),
- změna sledovaného parametru nedestrukтивní metody, bylo-li použito nedestrukтивního vyšetřování dynamickou metodou.

Beton je mrazuvzdorný na ten počet cyklů, při kterém součinitel mrazuvzdornosti není menší než 75 % nebo ukazatel nedestrukтивní zkoušky dosáhl hodnoty určující mrazuvzdornost podle příslušných norem nebo předpisů (není stanovení přesněji).

Porušení vnitřní struktury betonu dle ČSN 73 1380 [4]

Podstata zkoušky odolnosti proti zmrazování a rozmrazování podle této normy spočívá ve stanovení jednotlivých dynamic-

kých modulů pružnosti buď z doby průchodu UZ impulsů, nebo vlastní příčné frekvence a následném výpočtu relativní změny dynamického modulu pružnosti po 56 zkušebních zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech. ČSN 73 1380 zahrnuje celkem tři metody zjišťování porušení vnitřní struktury a žádná z nich není určena jako referenční. Jedná se o:

- zkoušku na trámci,
- zkoušku na desce,
- zkoušku CIF.

Dvě z nich (zkouška na desce a zkouška CIF) jsou však dle našich zkušeností poměrně složité na provádění a navíc nejsou příliš citlivé. Metoda na trámci se naopak jeví jako poměrně snadno proveditelná a navíc má mnoho společného s původním zkušebním postupem podle ČSN 73 1322 [3].

Hlavním rozdílem proti původní normě je důraz kladený na nedestruktivní zkoušení betonu pomocí ultrazvukové a rezonanční metody. Novou veličinou, podle níž se posuzuje míra porušení vnitřní struktury betonu, je **relativní dynamický modul pružnosti** (dále *RDM*).

Vhodným tělesem pro zkoušení odolnosti proti střídavému zmrazování a rozmrazování je referenční trámec o rozměrech 100 × 100 × 400 mm. Pro korektní provedení zkoušky je vhodné použít nejméně tři zkušební trámece.

Pro stanovení vlastní příčné frekvence musí být zkušební těleso při zkoušce umístěno na pružné podložce, např. z molitanu, aby nedošlo k ovlivnění vlastní frekvence materiálu. Snímač se umístí pomocí přílnavého materiálu, který je schopen zajistit dobrý akustický kontakt, na povrch zkoušeného tělesa do polohy dle obr. 1.

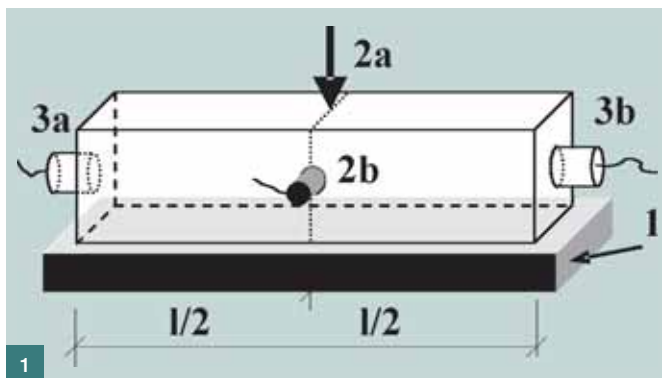
Mechanickým impulsem, nejčastěji pomocí kladívka, je vyvoláno vlastní kmitání částic zkušebního tělesa a příslušná hodnota je zaznamenána s přesností 10 Hz. Zkouška se doporučuje opakovat nejméně třikrát za účelem získání průměrné hodnoty a směrodatné odchylky max. 100 Hz.

Relativní dynamický modul pružnosti pomocí rezonanční frekvence se stanoví pomocí vztahu:

$$RDM(F) = \left(\frac{f_n}{f_0} \right)^2 100 [\%],$$

kde f_n je vlastní frekvence měřená po n zmrazovacích cyklech [Hz] a f_0 je počáteční vlastní frekvence [Hz].

Pro stanovení doby průchodu ultrazvukových impulsů se používá ultrazvukový přístroj, který sestává z budiče, snímače a vyhodnocovacího zařízení. U kontaktních ploch budiče i snímače musí být zajištěna dobrá akustická vazba s povrchem zkoušeného materiálu a jsou umístěny vždy na protilehlá čela zkoušených těles (obr. 1) tak, aby dráha pro průchod UZ vlnění byla v rámci jednoho zkušebního tělesa vždy shodná. Doba průchodu UZ vlnění se snímá s přes-



ností na 0,1 μs a sondy jsou přitlačovány k povrchům vždy stejně velkou silou.

Relativní dynamický modul pružnosti pomocí měření doby průchodu UZ impulsů se stanoví pomocí vztahu:

$$RDM(U) = \left(\frac{t_{s,0}}{t_{s,n}} \right)^2 100 [\%],$$

kde $t_{s,0}$ je počáteční doba průchodu UZ impulsů zkušebním tělesem [μs] a $t_{s,n}$ je doba průchodu UZ impulsů tělesem po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech [μs].

Zkouška zmrazování a rozmrazování začíná po 28 dnech po zhotovení zkušebních těles. Na každém tělese se odečte počáteční hodnota měření pomocí zkušební metody rezonanční a současně ultrazvukové a data se zaznamenají.

Zmrazovací fáze každého cyklu trvá 8 h, nejpozději do 15 min po jejím ukončení následuje čtyřhodinová rozmrazovací fáze, v níž jsou trámece polévány vodou o teplotě 13 ± 8 °C nebo jsou vloženy do vodní lázně o téže teplotě.

Poznámka: Délka zmrazování i rozmrazování je zásadně odlišná od dosavadních zvyklostí, neboť prodlužuje čas potřebný k provedení zkoušky na dvojnásobek. Jeden **cyklus tak trvá 12 h**.

Po každém měření po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech se pro každé zkušební těleso stanovuje *RDM* dle odpovídající použité metody. Jednotlivé hodnoty *RDM*, průměrná hodnota a směrodatná odchylka z každého zkušebního tělesa po ukončení zmrazování se použije pro vyhodnocení porušení vnitřní struktury betonu zkoušeného tělesa.

Jako dodatková informativní hodnota se používá absorpce vody, což je změna hmotnosti po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech.

NÁVRAT K REZONANČNÍ METODĚ

Metodiky měření rezonančních frekvencí

V předchozí části článku byla hojně zmiňována rezonanční metoda, která je schopná poskytnout důležité informace o změnách ve vnitřní struktuře betonu i dalších stavebních materiálů. Metoda je známa již dlouho, avšak od 90. let 20. století v naší stavební praxi postupně upadala v zapomnění a příslušná norma ČSN 73 1372 [6] byla dokonce navržena ke zrušení se zdůvodněním, že rezonanční metodu stejně nikdo nepoužívá. Příčiny nezájmu o rezonanční metodu lze hledat jednak v nedostatku kvalitních přístrojů a rovněž v poměrně složitém provádění a vyhodnocování zkoušky.

V poslední době se však situace změnila. Z evropských zemí k nám začaly přicházet nové zkušební postupy, v nichž rezonanční metoda hraje prakticky hlavní roli. Jedná se např. o normu ČSN EN 12 371 [5] pro zkoušení mrazuvzdornosti přírodního kamene, v níž je měření dynamického elastické-

Obr. 1 Uspořádání při zkoušce porušení vnitřní struktury na trámci:

1 – podložka z pěnového materiálu; 2a – místo vyvození impulsu kladívkem; 2b – snímač zrychlení; 3a, 3b – umístění ultrazvukových sond
 Fig. 1 Arrangement of the test of internal structural damage on the prismatic specimen: 1 – foam material support; 2a – point of mechanical impulse; 2b – frequency sensor; 3a, 3b – placement of ultrasonic sensors

ho modulu pomocí základní rezonanční frekvence základní identifikační zkouškou. Tato norma byla navíc doplněna normou ČSN EN 14 146 [7], která obsahuje podrobný postup rezonanční zkoušky vycházející ze stejného teoretického základu jako starší betonářská ČSN 73 1372 [6]. Bylo jen otázkou času, kdy se rezonanční metoda objeví v nových normách pro zkoušení betonu. Podstatné však je, že přichází v **nové impulsní podobě**, která je výrazně jednodušší než dřívější metoda spojitá.

Metodiky měření rezonančních frekvencí

Každý předmět z tuhého materiálu se po mechanickém impulsu rozkmitá. Toto kmitání se může uskutečnit mnoha způsoby, k vyhodnocení dynamických materiálových charakteristik pravidelných těles používáme vlastní frekvence podélného (FL), kroutivého (FT) a příčného (FF) kmitání. Při rezonanci výrazně roste amplituda vynucených kmitů zkoušeného tělesa na maximum v okamžiku, kdy frekvence vnější budící síly je shodná s vlastní (rezonanční) frekvencí tělesa.

Základní rezonanční frekvence se určují pomocí dvou metod závislých na kmitání zkušební tělesa, které jsou založeny na:

- nepřerušovaném (spojitém) kmitání – původní metoda,
- přerušovaném (impulsním) kmitání – nová metoda.

V prvním případě potřebujeme rezonanční přístroj, který vysílá do materiálu zkušební tělesa spojitě mechanické kmitání. Kmitočet je plynule laditelný, obvykle od 30 Hz do minimálně 20 kHz. Přístroj dále měří odezvu vzorku na vysílaný kmitočet, měří a případně zobrazuje amplitudu kmitání vzorku na obrazovce osciloskopu. Každý druh kmitání vyžaduje odlišné podepření zkušební tělesa a rovněž odlišný způsob přiložení budiče a snímače kmitání [6].

Podstatně odlišný je druhý – impulsní – způsob stanovení vlastních frekvencí. Namísto složité aparatury s osciloskopem je nyní použito mnohem jednodušší zařízení, které má tři základní části:

- Fourierův analyzátor (v podstatě software v libovolném počítači),
- impulsní kladívko,
- snímač zrychlení.

Měření rezonančních frekvencí impulsní metodou

Pomocí impulsní aparatury je možné zobrazit celé spektrum rezonančních frekvencí současně, což zjednodušuje měření a výrazně snižuje riziko hrubých chyb. Ukázka měření pomocí nové aparatury pro zjišťování vlastních frekvencí kmitání je uvedena na obr. 2. Na obr. 3 jsou dále znázorněna mís-



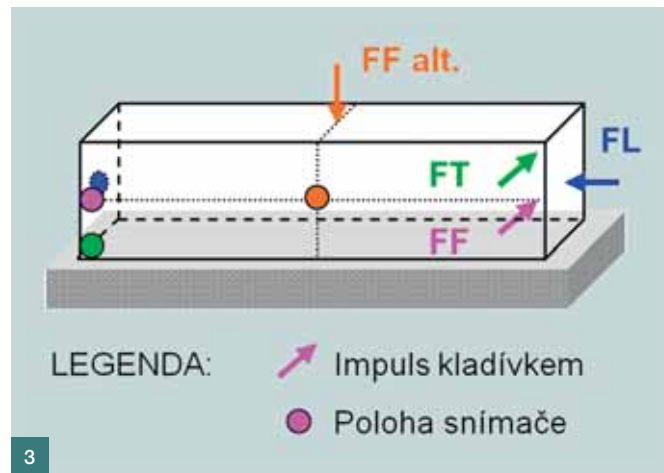
2

ta provádění impulsů a místa přiložení snímačů pro správné změření vlastních frekvencí podélného (FL), příčného (FF) a kroutivého (FT) kmitání betonového hranolu.

Výstupem měření je diagram, v němž je na vodorovné ose zvolené frekvenční spektrum a na svislé ose relativní amplituda kmitání. Příklad měření na neporušeném betonovém trámci o rozměrech 100 × 100 × 400 mm je znázorněn na obr. 4. Modrá křivka je záznamem měření, při němž bylo preferováno podélné kmitání trávce – impuls byl veden z čela zkušební tělesa. Nejvyšší vrchol modré křivky odpovídá 1. vlastní frekvenci podélného kmitání (FL = 5,58 kHz). Podobně nejvyšší růžový vrchol náleží 1. vlastní frekvenci příčného kmitání, která je však poměrně dobře zřetelná při libovolném způsobu vyvození impulsu, tedy i na zelené křivce kroutivého kmitání. Zde se však objevily i nové výrazné vrcholy 1. a 2. vlastní frekvence kroutivého kmitání (FT = 3,29 kHz, FT₂ = 2 FT = 6,58 kHz). Naměřené hodnoty velmi dobře odpovídají teoretickému poměru vlastních frekvencí pro daný typ tělesa podle [6], kdy FF : FT : FL = 0,43 : 0,59 : 1.

Hodnota vlastní frekvence vypovídá o kvalitě betonu. Čím lepší je beton zejména z hlediska modulu pružnosti, tím vyšší vlastní frekvence kmitání naměříme. Pokud dojde v průběhu střídavého zmrazování a rozmrazování ke vzniku poruch ve struktuře betonu, vlastní frekvence kmitání tělesa se snižují. Betonový trámec, jehož rezonanční frekvence v neporušeném stavu byly znázorněny na obr. 4, byl podroben střídavému zmrazování a rozmrazování a byl změřen po 0, 50, 75, 100, 125 a 150 cyklech. Z obr. 5 je zřejmé, že kromě snížení rezonanční frekvence příčného kmitání, jejíž počáteční hodnota byla FF = 2,41 kHz, dochází navíc k zaoblování vrcholů v měřených křivkách. Podobný jev nastává i u kmitání podélného a kroutivého.

Z naměřených vlastních frekvencí (FL, FF, FT) a rovněž z doby průchodu ultrazvukového vlnění (U) jsou dále vypočteny hodnoty relativních dynamických modulů pružnosti RDM. Vývoj relativních dynamických modulů RDM pro betonový trámec podrobený 150 cyklům střídavého zmrazování a rozmrazování je na obr. 6 znázorněn plnými čarami, zatímco čáry přerušované náleží trámci srovnávacímu – nezmrzovanému. Z průběhů relativních dynamických modulů je zřejmé, že k výraznému porušení struktury zmrazovaného trávce došlo již mezi 75. a 100. zmrazovacím cyklem, kdy zejména relativní dynamický modul z příčného kmitání klesl na 60 % původní hodnoty. Hodnoty RDM u srovnávacího trávce naopak mírně rostly na 102 až 104 % v souvislosti s dozráváním betonu v čase.



3

Obr. 2 Nová aparatura pro stanovení rezonančních frekvencí
 Fig. 2 New equipment for measuring of resonance frequencies

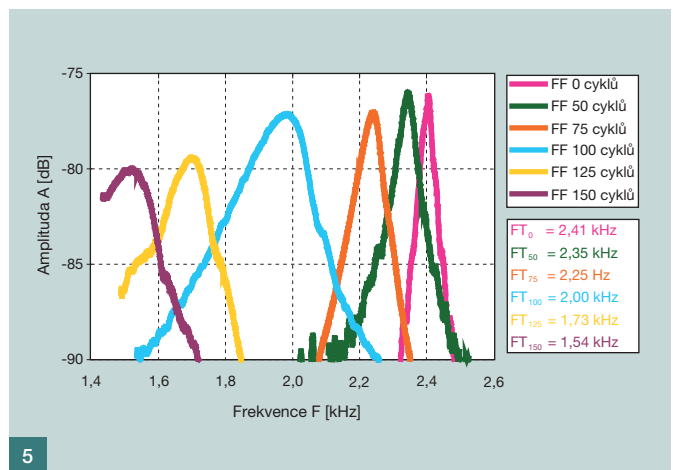
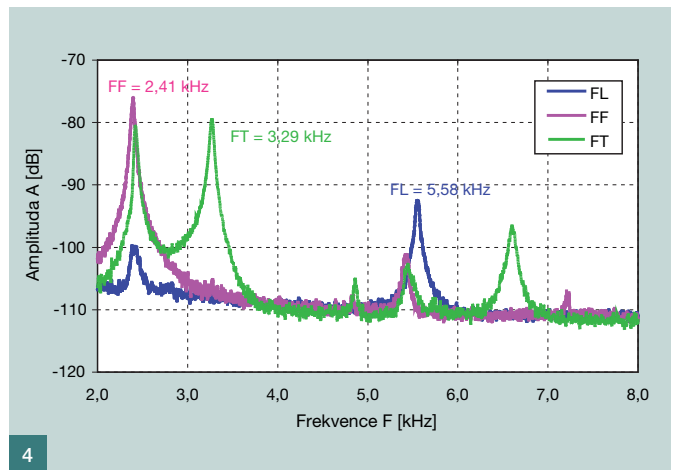
Obr. 3 Způsoby stanovení vlastních frekvencí kmitání podélného (FL), příčného (FF) a kroutivého (FT)
 Fig. 3 Test arrangement for measuring of longitudinal (FL), flexural (FF) and torsion (FT) resonance frequency

Obr. 4 Rezonanční frekvence trámce o rozměrech 100 × 100 × 400 mm naměřené impulsní metodou při preferenci podélného (FL), příčného (FF) a kroutivého (FT) kmitání
 Fig. 4 Resonance frequencies of the prismatic specimen with dimensions 100 × 100 × 400 mm obtained by the impulse method – longitudinal (FL), flexural (FF) and torsion (FT) oscillation

Obr. 5 Snižování rezonanční frekvence příčného kmitání (FF) betonového trámce při střídavém zmrazování a rozmrazování
 Fig. 5 Decreasing of resonance frequency of flexural oscillation (FF) of concrete prismatic specimen during the cyclical freezing and thawing

Obr. 6 Relativní dynamické moduly po *n* cyklech střídavého zmrazování a rozmrazování pro hranol zmrazovaný (plně) a nezamrazovaný (čárkovaně)
 Fig. 6 Relative dynamic moduli of elasticity after *n* cycles of freezing and thawing of the prismatic specimen – frozen (solid line) and non-frozen (dashed line)

Obr. 7 Odběr vzorků provzdušněného betonu na stavbě
 Fig. 7 Sampling in situ of air-entrained concrete



POROVNÁNÍ NEPROVZDUŠNĚNÉHO A PROVZDUŠNĚNÉHO BETONU – PŘÍKLAD Z PRAXE

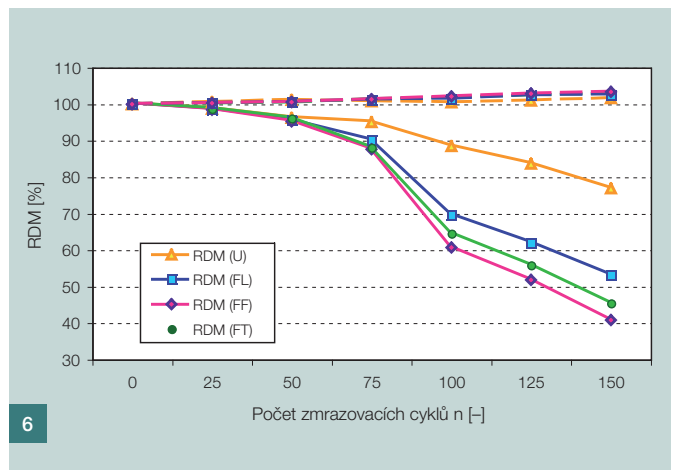
Nová metodika sledování poruch struktury betonu byla vyzkoušena v rámci výzkumu prováděného ve spolupráci s firmou OHL ŽS, a. s. Cílem experimentu bylo nejen prokázat odolnost mostního betonu proti střídavému zmrazování a rozmrazování na 150 cyklů, ale zejména ověřit citlivost nové metodiky. Nad rámec zkoušek předepsaných normou [4] byly proto na zmrazovaných i srovnávacích tělesech stanoveny rovněž hodnoty statického modulu pružnosti ze dvou různých způsobů zatěžování – v tlaku a v tahu za ohybu podle [8, 9].

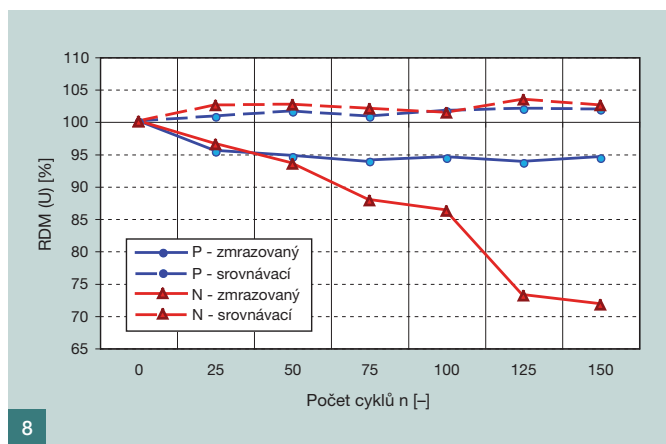
Použitý beton

Zkoušeným betonem byl provzdušněný beton (dále „P“) pevnostní třídy C30/37 XF4, odebraný přímo na stavbě v rámci betonáže mostního pilíře mimoúrovňové křižovatky Svitavská v Brně (obr. 7). Jelikož se u tohoto betonu neočekávaly příliš velké poruchy struktury ani po 150 cyklech, byl pro porovnání v laboratoři vyroben ještě neprovzdušněný beton obdobného složení a taktéž pevnostní třídy C30/37 (označen „N“). Z každého druhu betonu bylo vyrobeno třicet trámců 100 × 100 × 400 mm, rozdělených do pěti sad po šesti trámcích. Dvě sady byly použity jako srovnávací (S) před začátkem zmrazování (S0) a po konci zmrazování (S150). Další tři sady po šesti trámcích byly určeny pro zkoušku mrazuvzdornosti po 50, 100 a 150 cyklech zmrazování (M50, M100, M150). Pevnost v tlaku byla stanovena na krychlicích. U obou betonů vyšla velmi podobně – 56,5 MPa (P) a 58 MPa (N) po 28 dnech zrání.

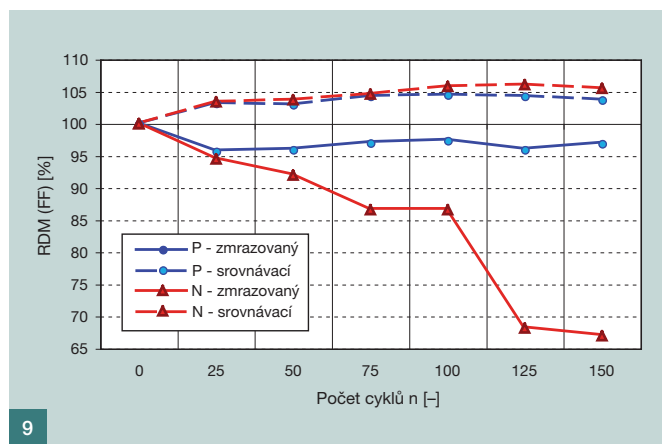
Výsledky zkoušek

Zmrazování nebylo prováděno podle ČSN 73 1380 [4], ale podle starší normy ČSN 73 1322 [3]. V principu se oba postupy nijak zásadně neliší, jde zejména o dobu zmrazování, která by podle [4] pro počet cyklů sto padesát přesáhla tři měsíce, což bylo z hlediska vytižení mrazícího boxu neúnosné. I tak trvalo zmrazování a rozmrazování každého druhu betonu déle než šest týdnů.





8



9

Grafické porovnání vývoje relativních dynamických modulů pružnosti zjištěných ultrazukovou metodou je pro oba druhy betonu znázorněno na obr. 8, to samé porovnání s výsledky stanovenými měřeními vlastních frekvencí příčného kmitání je na obr. 9. Měření bylo provedeno na počátku zmrazování a poté vždy po skončení dvaceti pěti zmrazovacích cyklů. Vývoj RDM vypočtených z ultrazvuku i rezonanční frekvence je velmi podobný a potvrdil rozdílné chování obou druhů betonu.

Tabelární porovnání statických modulů pružnosti zjištěných zkouškou v tlaku i v ohybu je pro oba druhy betonu uvedeno v tab. 1, statické moduly pružnosti v tlaku zmrazovaných i srovnávacích zkušebních těles jsou graficky znázorněny na obr. 10 pro provzdušněný beton (P) a na obr. 11 pro beton neprovzdušněný (N).

Zajímavé je číselné porovnání vývoje relativního dynamického modulu pružnosti s vývojem relativního statického modulu pružnosti (dále RSM), uvedené pro provzdušněný beton v tab. 2 a pro beton neprovzdušněný v tab. 3. Relativní statický modul byl vypočten podle stejných zásad jako relativní dynamický modul, tzn. jeho počáteční hodnota po 28 dnech zrání byla uvažována jako 100 %. Z obou tabulek je patrné, že trend změny relativních modulů pružnosti je obdobný pro hodnoty dynamické i statické.

Na rozdíl od hodnot dynamických i statických modulů pružnosti betonu, které spolu byly v souladu, vycházejí průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu značně odlišně (tab. 4). Tyto pevnosti byly stanoveny na trácích po zkoušce modulu pružnosti v tahu za ohybu, tedy po cyklickém namáhání vzorků. Skutečná pevnost v tahu za ohybu zjištěná kontinuálním zatěžováním dle příslušné normy by patrně vykazovala mírně odlišné (vyšší) hodnoty. Všechny série však byly zkoušeny naprosto stejným způsobem, a pro-

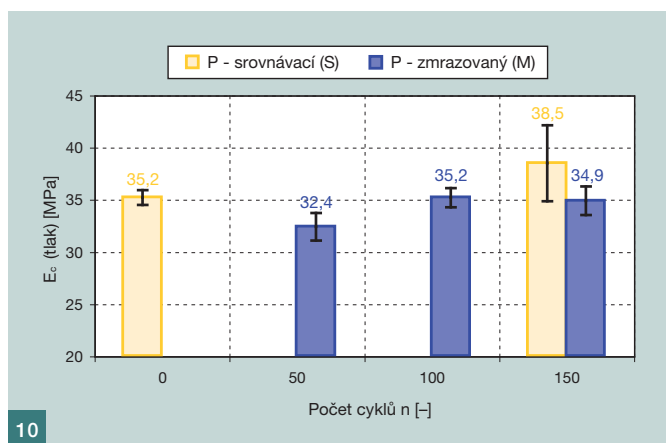
to vzájemný poměr hodnot by měl být stejný jako při standardní zkoušce pevnosti v tahu za ohybu.

Pro beton provzdušněný byl zjištěn součinitel mrazuvzdornosti po sto padesáti cyklech 1,24, přičemž pro sto cyklů byla jeho hodnota dokonce 1,47! Rovněž beton neprovzdušněný by vyhověl normě ČSN 73 1322, neboť po sto padesáti cyklech byl součinitel mrazuvzdornosti 0,83. Ve srovnání nejen s dynamickými, ale i se statickými moduly pružnosti se pevnost v tahu za ohybu jeví jako výrazně méně citlivá na poruchy struktury betonu. Jak je patrné z tab. 4, výsledky zkoušek navíc vykazují značný rozptyl a kolísání hodnot. Ačkoliv je tato zkouška v naší stavební praxi pro posuzování mrazuvzdornosti velmi oblíbená, otázkou je, zda dostatečně vystihuje skutečné porušení struktury betonu.

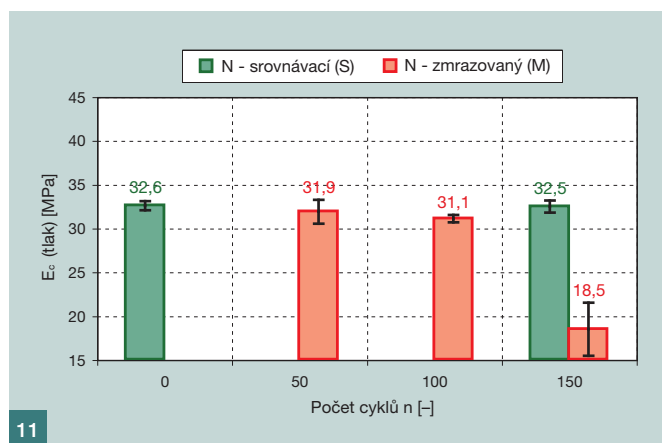
ZÁVĚR

Hlavní výhodou nové metodiky stanovení odolnosti betonu proti střídavému zmrazování a rozmrazování je získání komplexního obrazu o chování každého jednotlivého tránce v celém průběhu zkoušky, což je velmi přínosné zejména při návrhu nových receptur. Ultrazuková a ještě více rezonanční metoda jsou citlivé na změny probíhající ve struktuře betonu. Navíc byla zjištěna i značná míra shody mezi hodnotami dynamických modulů pružnosti a hodnotami statických modulů, a to jak ze zkoušky v tlaku, tak i ze zatěžování v tahu za ohybu. Nutno však říci, že statické moduly byly zjišťovány nad rámec metodiky ČSN 73 1380. Právě ve srovnání se zkouškami dynamických i statických modulů pružnosti se ukázalo, že doposud téměř výhradně používaná zkouška pevnosti v tahu za ohybu reaguje méně citlivě na poruchy struktury betonu a výsledky této zkoušky vykazují větší rozptyl.

Zkouška na trácích podle ČSN 73 1380 má však i své nevý-



10



11

Tab. 1 Průměrné hodnoty statických modulů pružnosti betonu (P, N) ■ Tab. 1 Mean values of static moduli of elasticity of concrete (P = air-entrained, N = non-air-entrained)

Počet cyklů	Modul pružnosti E_c (tlak) [GPa]		Modul pružnosti E_t (ohyb) [GPa]	
	P – provz.	N – neprovz.	P – provz.	N – neprovz.
S 0	35,2	32,6	39,5	37,1
M 50	32,4	31,9	36,1	29,5
M 100	35,2	31,1	38,1	32,5
M 150	34,9	18,5	38	22,6
S 150	38,5	32,5	42,7	39,5

Tab. 2 Relativní dynamické a statické moduly provzdušněného betonu (P) ■ Tab. 2 Relative dynamic and static moduli of elasticity of air-entrained concrete (P)

Počet cyklů	Relativní dynamické moduly [%]		Relativní statické moduly [%]	
	RDM (U)	RDM (FF)	RSM (E_c)	RSM (E_t)
0	100	100	100	100
25	95,4	95,7	–	–
50	94,6	96	92	91,4
75	93,9	97	–	–
100	94,4	97,4	100	96,5
125	93,7	96	–	–
150	94,4	96,9	99,1	96,2
S 150	101,9	103,7	109,4	108,1

Tab. 3 Relativní dynamické a statické moduly neprovzdušněného betonu (N) ■ Tab. 3 Relative dynamic and static moduli of elasticity of non-air-entrained concrete (N)

Počet cyklů	Relativní dynamické moduly [%]		Relativní statické moduly [%]	
	RDM (U)	RDM (FF)	RSM (E_c)	RSM (E_t)
0	100	100	100	100
25	96,5	94,5	–	–
50	93,5	92	97,9	79,5
75	87,8	86,6	–	–
100	86,2	86,6	95,4	87,6
125	73,1	68,2	–	–
150	71,7	67,0	56,7	60,9
S 150	102,5	105,5	99,7	106,5

Tab. 4 Pevnost v tahu za ohybu a součinitelé mrazuvzdornosti betonu (P, N) ■ Tab. 4 Bending strength and frost resistance coefficients of concrete (P = air-entrained, N = non-air-entrained)

Počet cyklů	Provzdušněný beton (P)		Neprovzdušněný beton (N)	
	f_{ct} [MPa]	f_{ct} [%]	f_{ct} [MPa]	f_{ct} [%]
0	4,5	100	5,2	100
50	5,2	115,6	4,2	80,8
100	6,6	146,7	5,4	103,8
150	5,6	124,4	4,3	82,7
S 150	5,3	117,8	5,2	100

Obr. 8 Znárodnění vývoje RDM (U) z doby průchodu ultrazvuku pro oba druhy betonu ■ Fig. 8 Development of RDM (U) determined from propagation time of ultrasonic waves for both types of concrete

Obr. 9 Znárodnění vývoje RDM (FF) z vlastní frekvence příčného kmitání pro oba druhy betonu ■ Fig. 9 Development of RDM (FF) determined from flexural resonance frequency for both types of concrete

Obr. 10 Grafické vyjádření statických modulů pružnosti v tlaku zjištěných na vzorcích provzdušněného betonu ■ Fig. 10 Comparison of static moduli of elasticity in compression of air-entrained concrete specimens

Obr. 11 Grafické vyjádření statických modulů pružnosti v tlaku zjištěných na vzorcích neprovzdušněného betonu ■ Fig. 11 Comparison of static moduli of elasticity in compression of non-air-entrained concrete specimens

Literatura:

- [1] Cikrle P., Hlaváč Z., Králová L., Bílek V.: Sledování vnitřních poruch struktury zmrazovaného betonu, Sb. konf. Experiment '07, Brno, Akad. nakl. CERM, s. r. o, 2007, ISBN 978-80-7204-543-3
- [2] Aitcin P.: Vysokohodnotný beton. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 80-86769-39-9
- [3] ČSN 73 1322: Stanovení mrazuvzdornosti betonu, ÚNM, Praha, 1969
- [4] ČSN 73 1380: Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – Porušení vnitřní struktury, ČNI, Praha, 2007
- [5] ČSN EN 12371: Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení mrazuvzdornosti, ČNI, Praha, 2010
- [6] ČSN 73 1372: Rezonanční metoda zkoušení betonu, ÚNM, Praha, 1983
- [7] ČSN EN 14146: Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení dynamického modulu pružnosti (pomocí základní rezonanční frekvence), ČNI, Praha, 2005
- [8] ČSN ISO 6784: Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, ČNI, Praha, 1993
- [9] ČSN 73 6174: Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem, ČNI, Praha, 1994
- [10] Vrbický A.: Sledování vývoje modulu pružnosti zmrazovaných betonů, dipl. práce, Brno, 2011, VUT v Brně, Fakulta stavební

hody. Hlavní nevýhodou je absence hodnotícího kritéria pro mrazuvzdornost betonu. Lze však předpokládat, že klesne-li hodnota modulu pružnosti o 25 %, beton již nelze považovat za mrazuvzdorný pro daný počet cyklů. Značnou nevýhodou je rovněž dvanáctihodinová délka jednoho zmrazovacího cyklu, dvojnásobná proti normě ČSN 73 1322. Kupříkladu zkoušky pražcového betonu, u něhož je předepsána odolnost na dvě stě cyklů, by tak trvaly minimálně sto dnů, což je z hlediska stavební praxe v podstatě nepřijatelné.

Ačkoliv posuzovaná metodika přináší v určitých aspektech podstatně vyšší kvalitu zkoušení betonu, vzhledem k výše uvedeným nedostatkům zřejmě nebude v této podobě naší odbornou veřejností přijata. Prospělo by jí zkrácení doby jednoho cyklu, přidání jednoznačného kritéria pro posouzení mrazuvzdornosti a rozšíření o destruktivní zkoušky po skončení zmrazování, nejlépe o stanovení statického modulu pružnosti. V případě dalšího používání staré normy ČSN 73 1322 by bylo nanejvýš žádoucí doplnit problematické stanovení součinitele mrazuvzdornosti pomocí pevnosti v tahu za ohybu právě o nedestruktivní rezonanční a ultrazvukové zkoušky, což tato norma umožňuje.

Uvedených výsledků bylo dosaženo díky finanční podpoře specifického výzkumu reg. č. FAST-J-11-39 a výzkumného záměru MSM 0021630511.

Autoři děkují za podporu firmě OHL ŽS, a. s., a Ing. Aleši Vrbickému za spolupráci při provádění a vyhodnocení experimentů.

Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
tel.: 541 147 814
e-mail: cikrle.p@fce.vutbr.cz



Ing. Ondřej Pospíchal
tel.: 541 147 811
pospichal.o@fce.vutbr.cz



oba: Fakulta Stavební VUT v Brně
Veveří 95, 602 00 Brno
www.fce.vutbr.cz