

EXPERIMENTÁLNÍ METODY PRO MĚŘENÍ SMRŠŤOVÁNÍ BETONU

EXPERIMENTAL METHODS FOR CONCRETE SHRINKAGE MEASUREMENT

Veronika Mártonová, Pavel Veselý,
Jitka Vašková

V první části článku je uveden přehled vybraných metod pro experimentální i praktické měření smršťování betonu. Každá z metod je krátce popsána a zhodnocena např. podle nákladovosti, přesnosti a použitelnosti. V druhé části je popsán experiment srovnávající dvě metody nejlépe použitelné pro testování konstrukčního betonu v laboratorních, resp. in situ podmínkách, demonstrující, jak je důležité určit reálnou přesnost metod. Pozornost je zaměřena také na související normy. ■ This article presents an overview of selected concrete shrinkage measurement methods for both the laboratory and construction site deployment. Each of the methods is shortly described and evaluated based on e.g. accuracy, repeatability or price. Besides this, results of an experimental evaluation of the accuracy of two well-documented methods are presented indicating that the real accuracy of shrinkage measurement methods is questionable and therefore needs to be examined and experimentally verified. The article also reports on the current legal standards related to the concrete shrinkage measurement.

Jednou ze základních vlastností betonu je jeho smršťování. V betonových konstrukcích smršťování významně ovlivňuje vývoj napětí a může způsobovat trhliny, nechtěnou redistribuci vnitřních napětí nebo nepředpokládané deformace prvků. Nejmarkantnější vliv smrš-

ťování betonu lze pozorovat na štíhlých konstrukčních prvcích (trám, sloup), ale patrné je i na deskových konstrukcích či masivních tělesech.

Smršťování je způsobeno především odpařováním přebytečné vody v počáteční fázi tuhnutí, hydratačními procesy během chemické reakce vody s cementem a poté vysycháním po celou dobu životnosti konstrukce. Vliv na jeho velikost má mnoho faktorů, např. vodní součinitel a okolní podmínky (stáří betonu, vzdušná vlhkost, změny teplot či proudění vzduchu během zrání betonu aj.). Velikost objemových změn betonových konstrukčních prvků je zpravidla největší v raném stáří betonu, ale zejména kvůli vlivům prostředí je lze pozorovat během celé doby životnosti konstrukce.

Vyhodnocování vlastností konkrétní betonové směsi z pohledu smršťování je tak nezbytnou součástí stavebního zkušebnictví.

Tento článek prezentuje přehled vybraných metod pro experimentální i praktické měření smršťování betonu, rozebírá současný stav souvisejících norem v České republice a předkládá výsledky experimentálního ověření přesnosti konkrétní vybrané metody. Z výsledků tohoto ověření vyplývá, že výrobcem udávaná přesnost zařízení nutně neodpovídá reálné chybě měření metodou, která zařízení používá. V závěru jsou výsledky zhodnoce-

ny a předloženy náměty k dalšímu výzkumu v této oblasti.

NORMY PRO MĚŘENÍ SMRŠŤOVÁNÍ

V principu je možné smršťování modelovat a jeho hodnotu vypočítat na základě experimentálně určených vztahů podle normy (např. ČSN EN 1992-1-1 [1], ČSN EN 1992-2 [2] apod.). Tyto výpočetní vztahy jsou ale založeny na dnes již zastaralých experimentech a součinitelích, a tak je otázkou, jestli dostatečně přesně reflektují chování konstrukčních betonů používaných dnes ve stavebnictví. Pomocí experimentálně naměřených dat lze zpřesnit hodnoty konkrétních součinitelů vstupujících do výpočtu, ale pro toto měření není normami jednoznačně daný postup.

Druhým způsobem určení velikosti smršťování je přímé experimentální měření. V ČR platí pro měření objemových změn ztvrdlého betonu již od roku 1987 norma ČSN 73 1320 [9]. Pro měření objemových změn ztvrdlých vzorků podlahových stěrkových hmot (trámečky 10 × 40 × 160 mm nebo 40 × 40 × 160 mm) platí norma ČSN EN 13872 [3] a pro určení bobtnání cementové pasty (nikoliv betonu) platí ČSN EN 196-3 [4], která se zmiňuje o Le Chatelierově objímce.

Žádná z norem neřeší vhodnost metod pro použití v konkrétních podmín-

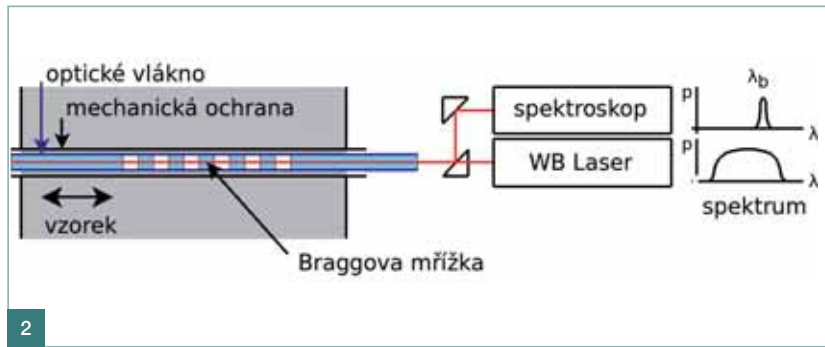
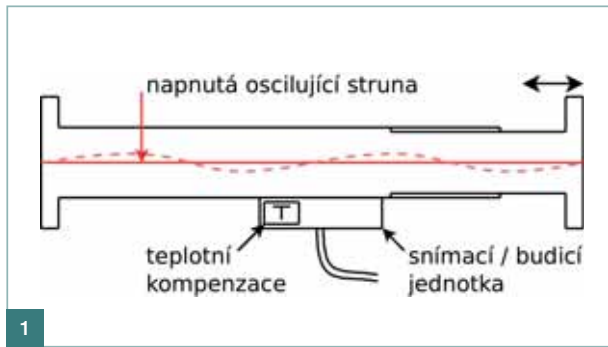
Tab. 1 Metody včetně základních charakteristik ■ Tab. 1 Methods including basic characteristic

Skupina	Podskupina	Metoda	Cena zařízení [€]	Přesnost	Primární určení ⁽¹⁾	Velikost zkušebního vzorku	Počátek měření ⁽²⁾	Použitelnost ⁽³⁾
Tenzometry	Strunové	Strunové tenzometry	500 – 1 000 ⁽⁵⁾	± 0,5 μm	B	PTZ ⁽⁷⁾	Z	L, S
	Optické	Optická vlákna s Braggovou mřížkou	2 000 ⁽⁵⁾	± 1 μm	B	280 × 75 × 75 mm	K	L
	Mechanické	Přenosný deformetr	1 500 ⁽⁵⁾	± 10 μm	B	PTZ ⁽⁷⁾	T	L, S
	Elektrické	Elektrické tenzometry	440 ⁽⁸⁾ – 1 000 ⁽⁵⁾	± 2-10 μm	B	PTZ ⁽⁷⁾	T	L
		Smršťovací žlab	1 000 ⁽⁴⁾	± 2 μm	B	PTZ ⁽⁷⁾	K	L
		Ohýbací žlab	2 × 1 000 ⁽⁴⁾	± 3 μm	B	1000 × 100 × 50 mm	K	L
		Metoda vinovce	1 000 ⁽⁴⁾	± 2 μm	CP	N.Z.	K	L
		Zařízení pro měření ztvrdlých trámů a válců	1 000 ⁽⁴⁾	± 2,6 μm	B	280 × 75 × 75 mm	T	L
Smršťovací prstenec	2 × 1 000 ⁽⁵⁾	± 0,5 μm	B	Ø 405 mm	Z	L		
Ostatní	Optické	CRM	N.Z.	N.Z.	CP	Ø 28 mm	T	L
		Digitální fotogrametrie	2 × 222 ⁽⁶⁾	0,15 mm	B	220 × 40 × 40 mm	T	L
		Fotogrammetrická mikroskopie	N.Z.	N.Z.	B	900 × 300 × 150 mm	Z	L
	Laserové	Smršťovací kužel	2 000 – 20 000 ⁽⁵⁾	± 1 μm	B	0,35 l	K	L
		Tenkovrstvé vzorky	2 000 – 20 000 ⁽⁵⁾	0,1 μm	CP	300 × 25 × 5 mm	Z	L
	Ostatní	Tazavova metoda	N.Z.	N.Z.	CP	N.Z.	K	L

Poznámky:

⁽¹⁾ CP – cementová pasta, B – beton; ⁽²⁾ K – vzorek ihned po zamíchání, Z – začátek tuhnutí vzorku, T – ztvrdlý vzorek; ⁽³⁾ L – laboratoř, S – staveniště;

⁽⁴⁾ cena pouze za jednu měřicí sondu, zdroj [8]; ⁽⁵⁾ zdroj [8]; ⁽⁶⁾ zdroj [13]; ⁽⁷⁾ PTZ – podle typu zařízení; ⁽⁸⁾ zdroj [20].



kách a také neuvažuje měření smršťování v počáteční fázi tuhnutí. Vzhledem k množství různých metod, z nichž každá má svoje výhody, nevýhody a meze použitelnosti, začíná být v dnešním stavebním zkušebnictví vyhodnocení správné metody pro konkrétní aplikaci zásadním problémem. Proto považujeme za nezbytné popsat různé, dosud nestandardizované experimentální metody pro měření smršťování betonu, vyhodnotit jejich skutečnou přesnost, stanovit podmínky jejich použitelnosti a v budoucnu je ukotvit v normách.

EXPERIMENTÁLNÍ METODY

Smršťování je z pohledu experimentálního měření de facto velmi malé přetvoření v poměru k celkové velikosti testovaného prvku, a to buď na povrchu prvku, nebo přímo v jeho objemu. Je třeba také připomenout, že v neobvyklých případech dochází i k expanzi – bobtnání betonu, ale tyto jevy jsou způsobeny obvykle nepředpokládanými chemickými reakcemi, někdy spojenými se znatelným vývinem tepla či extrémním prostředím. Pro běžné účely predikce chování betonu se uvažuje pouze s negativní délkovou změnou, tedy se smršťováním. Následující kapitola prezentuje výčet a stručný popis vybraných metod pro experimentální měření smršťování betonu. Metody včetně základních charakteristik jsou přehledně uvedeny v tab. 1, která zohledňuje možnosti počátku měření, rozměry testovaného vzorku, časovou a finanční náročnost metody a také využitelnost ve stavební praxi. Důležitým parametrem je také přesnost měřícího zařízení udávaná výrobcem. Tento údaj nemusí odpovídat skutečné přesnosti měřící metody, jak je důkladně popsáno a zhodnoceno v kapitole věnující se experimentálnímu ověření přesnosti měření ručním deformetrem.

Je také nutné zmínit, že autoři se neseťkali se všemi uvedenými metodami v praxi, jedná se tedy o zhodnocení stavu poznání z hlediska aplikace sta-

vebního zkušebnictví do praxe. Ve stavební i zkušební praxi a ve výzkumných projektech existuje mnohem více cest, jak odhadnout objemové změny betonu. Jedná se o kombinace vyčtených metod či o čistě empirické způsoby stanovování smršťovacích procesů, u kterých již nelze uvažovat s normalizací metod pro diagnostiku smršťování betonu.

Strunové tenzometry

Strunové tenzometry (obr. 1) se používají na měření smršťování pro svoji vysokou přesnost. Strunový tenzometr se skládá ze dvou kotevnicích bloků, mezi kterými je napjatá harmonicky oscilující ocelová struna buzená elektromagnetem. Poměrná deformace se projeví změnou délky struny, a tedy změnou měřené frekvence jejího kmitání.

Strunové tenzometry jsou vyráběny z nerezové oceli a jsou opatřeny mechanickou ochranou, která zajišťuje jejich odolnost proti korozi a vodě. Obvykle jsou také vybaveny teplotním čidlem, které slouží ke kompenzaci teplotní závislosti. Strunové tenzometry mohou být použity jako externí příložené zařízení nebo mohou být zabudovány přímo do betonové konstrukce, což zajistí možnost dlouhodobého měření smršťování přímo na staveništi.

Tato metoda je díky dlouhodobému využívání zřejmě nejbližší tomu, aby byla zakotvena normativně.

Optická vlákna s Braggovou mřížkou

Optická vlákna s Braggovou mřížkou patří mezi optické tenzometry. Jejich princip (obr. 2) spočívá v odrazu světla konkrétní vlnové délky, procházejícího optickým vláknem díky difrakční mřížce vyleptané do povrchu vlákna. Deformací vlákna vlivem přetvoření dochází k posunu vlnové délky, kterou vlákno odráží. Spektrální analýzou je možné zjistit odráženou vlnovou délku, a tím i velikost přetvoření.

Vlákno samotné je obaleno poly-

Obr. 1 Strunový tenzometr | Fig. 1 Wire strain gauge

Obr. 2 Optická vlákna s Braggovou mřížkou | Fig. 2 Fibre Bragg gratings sensor

merovým krytem, který slouží jako mechanická ochrana a zároveň jako ochrana proti vlhkosti. Vlákna jsou aplikována přímo do bednění budoucího vzorku, ale lze je i přilepit k povrchu. Kompenzace teplotní závislosti se řeší přidáním druhého vlákna nezatíženého smršťováním.

Výhodami této metody je vysoká přesnost a možnost použití v oblastech velkých deformací. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena a náchylnost k mechanickému poškození [5], [6], [7].

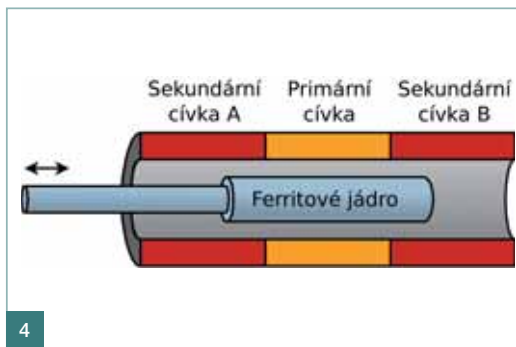
Elektrické tenzometry

Elektrické tenzometry se dají obecně rozdělit na odporové, piezorezistivní, indukční a kapacitní.

Velmi používané jsou odporové tenzometry, protože mají nízkou pořizovací cenu a dostatečnou přesnost pro měření smršťování. Nejpoužívanější odporové tenzometry jsou ve formě tenké fólie s tištěnými elektrickými spoji (obr. 3). Při deformaci v podélném směru dochází ke změně měřené impedance, ze které se vypočte velikost výsledného přetvoření. Odporové tenzometry mají ve stavebnictví využití především u ocelových konstrukcí.

Piezorezistivní tenzometry fungují na podobném principu jako odporové tenzometry, ale fólie je nahrazena piezoelektrickým krystalem, který při deformaci mění svou impedanci. Tento typ tenzometrů má svou výhodu v malé velikosti a nízké ceně.

Často používaným typem tenzometrů jsou indukční tenzometry fungující na principu lineárního diferenciálního transformátoru (LVDT sondy). Son-



dy se skládají ze dvou částí – statické a pohyblivé. Pohyblivá část je tvořena feromagnetickým jádrem pohybující se v diferenciálním transformátoru (obr. 4) složeném z jedné primární a dvou sekundárních cívek. Při pohybu jádra se mění napětí indukované v sekundárních cívkách, z jejichž poměru se vypočte velikost dislokace sondy. Výhodou LVDT sond je malý rozměr (obr. 5), a proto jsou používány v mnoha zařízeních pro měření smršťování betonu [8], [9]. LVDT sondy jsou vhodné hlavně pro laboratorní práce nebo pro měření krátkodobých deformací.

Kapacitní elektrické tenzometry jsou pro měření smršťování nevhodné, protože nedosahují dostatečné přesnosti měření.

Přenosný deformetr

Přenosný deformetr měří deformaci na povrchu vzorku pomocí trnů nebo bří-

tů, které zapadnou do terčičků umístěných na povrchu vzorku. Princip měření odpovídá mechanickému tenzometru (též úchytkoměru), kdy se změna vzdálenosti pomocí mechanických převodů zesílí a měří přímo indikátorovými hodinami (obr. 6).

Přenosný deformetr je vhodný pro měření jak v laboratoři, tak i na stavbě. Jeho výhodou je přijatelná cena, nevýhodou nižší přesnost v porovnání s jinými metodami pro měření smršťování betonu. Stejně tak je nutné dobře chránit měřená stanoviště na konstrukci. Tento typ zařízení má pro interpretaci výsledků mírné omezení v tom, že měří změny na povrchu prvku, kde mohou sledované veličiny nabývat odlišných hodnot než v jádru (hmotě).

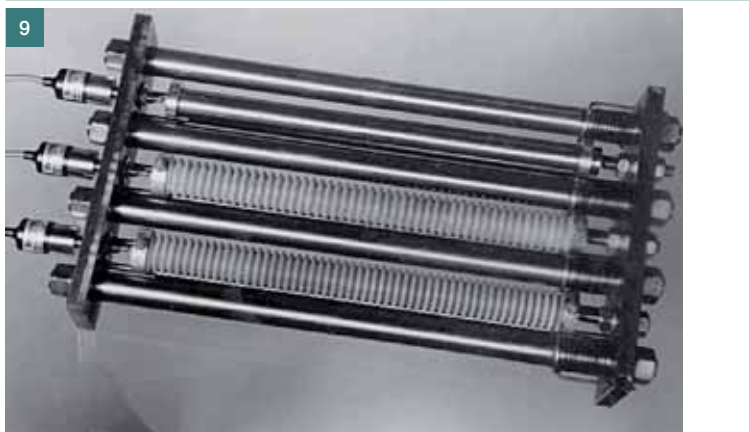
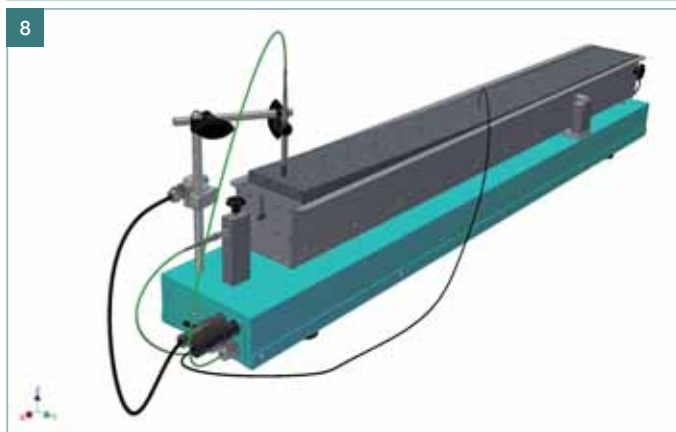
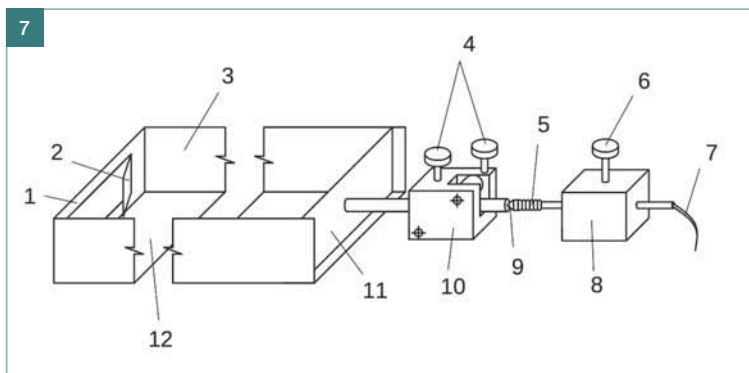
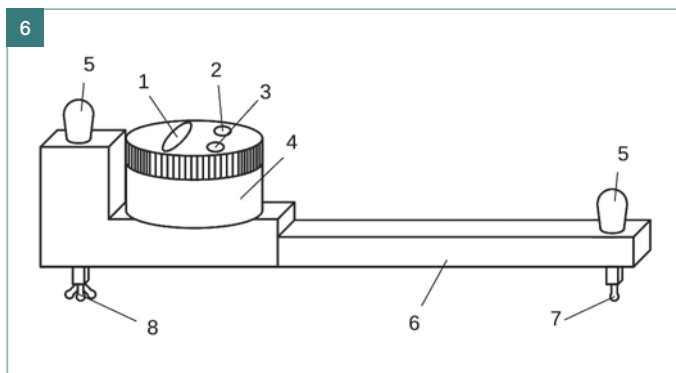
Smršťovací žlab

Smršťovací žlab [8] se používá pro měření smršťování betonových prvků obvykle o délce 1 m a průřezu 60 až

100 mm (obr. 7). Zkušební zařízení se skládá ze žlabu s fixním čelem opatřeným kotvou, která fixuje vzorek k tomuto čelu, a posuvným čelem, které se pohybuje společně s objemovými změnami vzorku. Žlab je vyložen nepřilnavou fólií (např. neoprén nebo mirelon), která umožňuje volné smršťování vzorku. Posuvné čelo se může pohybovat pouze ve směru žlabu a je spojeno s LVDT sondou s rozsahem pohybu ± 7 mm, která automaticky odečítá hodnoty pretvoření.

Výhodou této metody je, že umožňuje měření smršťování ihned po naplnění žlabů betonovou záměsí, tedy ještě v čerstvém stavu. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena a rozměrnost zařízení, a proto se jedná o výhradně laboratorní metodu.

Při měření pomocí smršťovacího žlabu [10] je možné zároveň měřit i hmotnost vzorku a z průběhu hmotnostních ztrát zapříčiněných odpařováním vody



Ize získat více informací o vlastnostech testované záměsi.

Ohýbací žlab

Ohýbací žlab (obr. 8) je zařízení velmi podobné smršťovacímu žlabu, který díky speciální konstrukci umožňuje měřit smršťování betonu ve dvou směrech. Na straně neposuvného čela jsou kromě kotvy ještě příčné ocelové tyče, které v této části zabraňují nadzvedávání betonového vzorku. U posuvného konce je jedna sonda připevněna stejně jako u smršťovacího žlabu a druhá sonda je upevněna svisle směrem k povrchu betonu.

Stejně jako u smršťovacího žlabu lze měřit smršťování čerstvého betonu. Ohýbací žlab je navíc vhodný pro měření smrštění tepelně namáhaných materiálů (např. podlahových stěrek) [8].

Metoda vlnovce

Metoda vlnovce [11] se používá pro měření chemického a autogenního smršťování jemnozrnných betonů. Podlouhlý pružný polymerový obal se naplní cementovou pastou a vodotěsně se uzavře. Vlnovec se umístí do kovového rámu, jeden konec vlnovce je k rámu připevněn pevně, druhému konci je umožněn posun v podélném směru (obr. 9). Tento posun je měřen LVDT sondou. Celý rám se ponoří do vodní lázně s regulovatelnou teplotou, čímž je zajištěno definované prostředí během měření. To umožňuje přesně regulovat podmínky uložení a získat velmi přesné hodnoty smrštění.

Metoda vlnovce je nevhodná pro standardní betonové směsi z důvodu velikosti složek kameniva, protože pokud beton obsahuje větší frakci kameniva, nelze běžně používané vlnovce takovým betonem naplnit.

Zařízení pro měření ztvrdlých trámů a válců

Pro měření smršťování ztvrdlých vzorků [8] se používá zařízení, které se vyskytuje v různých obměnách (obr. 10). V principu se jedná o konstrukci tvořenou z podstavce s kovovou kuličkou o průměru 10 mm a měřicí jednotkou s měřicí sondou umístěnou nad podstavcem. Mezi kuličku a měřicí sondu se umístí obvykle betonový kvádr nebo válec o výšce 280, resp. 300 mm. Ve většině případů jsou objemové změny měřeny LVDT sondou, případně mechanickým úchylkoměrem.

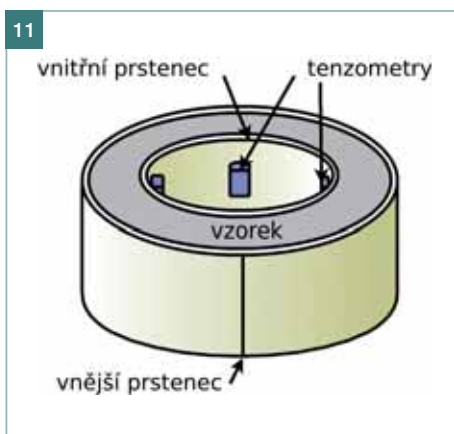
Tento způsob měření je základem užívaného zkušebního normativu [3],



případně jeho mutací (potěry, AKR kameniva). Nevýhodou je v tomto případě skutečnost, že se obvykle vzorek uchovává v jednom prostředí a je možné jej zkoušet nejdříve 24 h od výroby betonové směsi.

Smršťovací prstenec

Tato metoda je jako jedna z mála normativně zakotvena v americké normě ASTM C1581/ C1581M – 09a [12] pro použití k experimentálnímu měření smršťování. Smršťovací prstenec se skládá z kruhové formy s mezikružím, která se vyplní čerstvým betonem (obr. 11). Před plněním formy se na vnitřní mezikružím umístí tenzometry, které po odbednění měří napětí vyvolané smršťováním.



Obr. 3 Fóliový tenzometr, převzato z [21]
■ Fig. 3 Film strain gauge, courtesy of [21]

Obr. 4 Princip LVDT sond
■ Fig. 4 Principle of the LVDT probes

Obr. 5 LVDT sonda, převzato z [19]
■ Fig. 5 LVDT probe, courtesy of [19]

Obr. 6 Schéma ručního deformometru (1 – display, 2 – tlačítko on/off, 3 – tlačítko nulové reference, 4 – měřicí jednotka, 5 – manipulační úchyt, 6 – měřicí tyč, 7 – nepohyblivá hlava, 8 – pohyblivá hlava) ■ Fig. 6 Schema of a portable deformeter (1 – display, 2 – on/off button, 3 – reset button, 4 – measurement unit, 5 – manipulation handle, 6 – rod, 7 – stationary head, 8 – movable head)

Obr. 7 Schéma smršťovacího žlabu (1 – neposuvné čelo, 2 – kotevní prvek, 3 – stěna žlabu, 4 – upevňovací šrouby, 5 – dilatometrické čidlo, 6 – rektifikační šroub, 7 – vývod datové sběrnice, 8 – fixační kvádr dilatometrického čidla, 9 – železná špička dilatometrického čidla, 10 – fixační kvádr posuvného čela, 11 – posuvné čelo, 12 – dno žlabu) ■ Fig. 7 Schema of a shrinkage drain (1 – non-sliding end, 2 – anchor, 3 – wall of the drain, 4 – adjusting screws, 5 – probe, 6 – adjusting screw, 7 – probe data bus, 8 – fixation block, 9 – head of the probe, 10 – fixation block, 11 – sliding end, 12 – bottom of the drain)

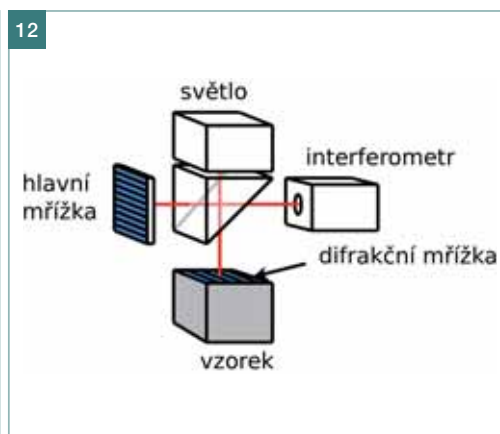
Obr. 8 Ohýbací žlab, převzato z [8]
■ Fig. 8 Bending drain, courtesy of [8]

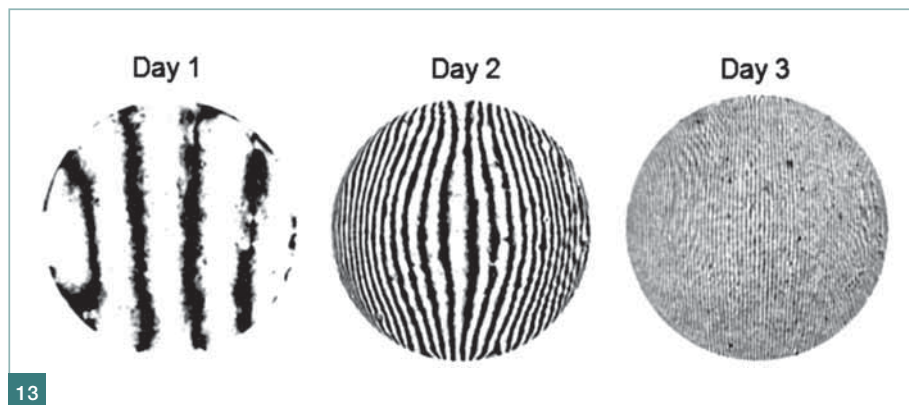
Obr. 9 Vlnovce, převzato z [8]
■ Fig. 9 Corrugated Polyethylene Moulds, courtesy of [8]

Obr. 10 Zařízení pro měření ztvrdlých vzorků ■ Fig. 10 Gauge for hardened specimen

Obr. 11 Smršťovací prstenec ■ Fig. 11 Shrinkage ring

Obr. 12 Princip Cure Reference Method ■ Fig. 12 Principle of the Cure Reference Method





13

V českém prostředí není tato metodika příliš rozšířená.

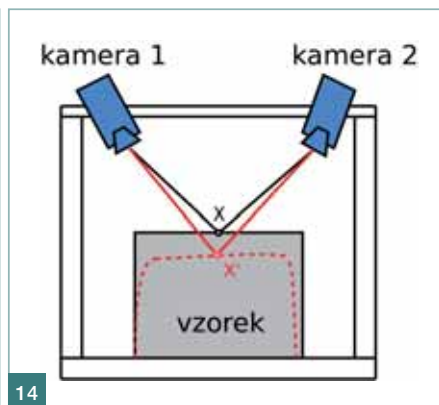
Cure Reference Method

Cure Reference Method (CRM) využívá principů interferometrie [13], [14] a spočívá v otisknutí fotorezistivní difrakční mřížky do epoxidové pryskyřice na povrchu měřeného vzorku (obr. 12). Vlivem smršťování dochází k deformacím difrakční mřížky, při jejímž osvětlení jsou společně s originální mřížkou vyvolány interferenční obrazce, které jsou zachyceny kamerou. Z interferenčního obrazce se poté vypočítá smrštění (obr. 13).

Výhodou metody je měření napětí na celém povrchu vzorku. Nevýhodou je značně omezená velikost testovaného prvku (válec o průměru 28 mm a výšce 11 mm) a vysoká pořizovací cena zařízení. Metoda je vhodná pro jemnozrné materiály a mohla by být proto využívána pro ověřování vlastností UHPC směsí.

Digitální fotogrammetrie

Digitální fotogrammetrie [15] je jednou z nových optických metod pro měření smršťování na ztvrdlých vzorcích. Metoda využívá dvojice statických kamer (obr. 14) sledujících vzorek, z jejichž snímků se rekonstruuje 3D model vzorku. Změnu polohy jednotlivých bodů vzorku je možné určit triangulací díky apriorní znalosti polohy obou kamer.



14

Porovnáním modelů v čase lze odečíst posuny v jednotlivých bodech modelu.

Tato metoda je zajímavá pro použití i mimo laboratoř vzhledem k jednoduchosti aplikace i nízké ceně. V současné době však metoda ještě nedosahuje potřebné přesnosti (chyba v řádech desetin milimetru). Analogická metodika se používá i při měření deformací zkušebních těles např. během zkoušky tahu ohybem. Nutnou podmínkou použití je absolutní fixace všech záměrných bodů a optických zařízení.

Fotogrammetrická mikroskopie

Fotogrammetrická mikroskopie [16] používá sledování fotogrammetrického terče statickým digitálním mikroskopem (obr. 15). Terčik o velikosti 14 × 14 mm je umístěn na plastovém plováku uloženém na povrchu vzorku. Vlivem přetvoření dochází k unášení plováku, a tedy pohybu terče pod mikroskopem. Analýzou obrazu z mikroskopu, kdy je sledován pohyb terče, je získána hodnota přetvoření.

Přesnost metody je v řádech mikrometrů, ale je ovlivněna přesným umístěním zařízení. Z toho plyne, že je vhodná pro laboratorní prostředí.

Smršťovací kužel

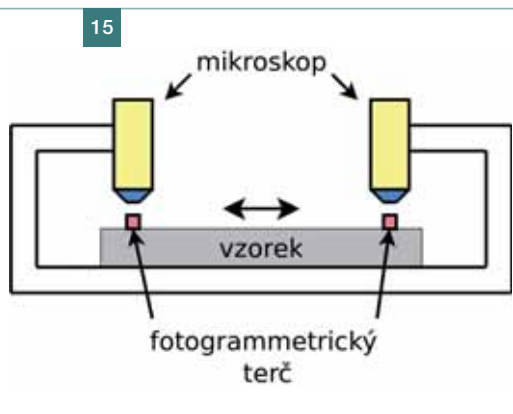
K měření objemových změn čerstvého betonu či cementové pasty se často využívá smršťovací kužel popsany

v americké normě ASTM C 827-95a [17]. Jedná se o laboratorní metodu, která je vhodná zejména pro pozorování prvotních objemových změn zapříčiněných chemickými procesy v čerstvém materiálu.

Metoda je založená na vlastnosti tvaru obráceného kužele, kdy při úbytku materiálu uvnitř kužele dochází k rovnoměrné změně výšky. Zařízení se skládá z dvouplášťové nádoby ve tvaru obráceného kužele a rámu, na kterém je umístěna měřicí jednotka s laserovým dálkoměrem (obr. 16). Kužel se vyplní záměsí a na její povrch se umístí plovák s odrazným terčem. Vlivem smršťování dochází k rovnoměrné změně výšky kuželu měřené laserem, ze které lze vypočítat úbytek objemu, a tím i velikost smrštění.

Tenkovrstvé vzorky

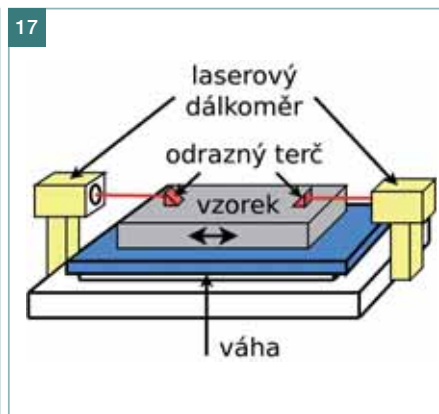
Metoda pro měření smršťování tenkovrstvých vzorků využívá měření laserovými dálkoměry a je vhodná především pro maltoviny a potěry [8], zároveň umožňuje i měření čerstvých záměsí. Princip metody spočívá v laserovém měření vzdálenosti mezi fixním rámem s měřicí jednotkou a terčíky umístěnými na plovácích volně unášených testovanou záměsí (obr. 17), která je uložena na podložku s plastovou fólií, zajišťující volné smršťování vzorku. Metoda zároveň umožňuje měření



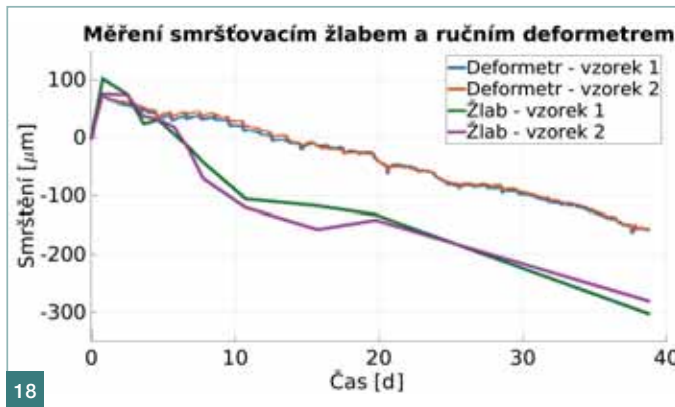
15



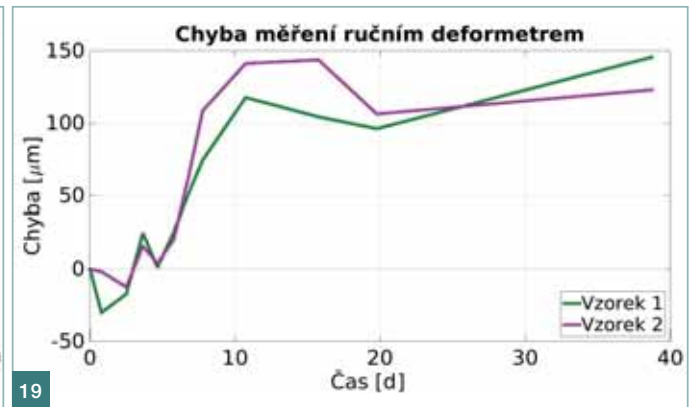
16



17



18



19

hmotnostních úbytků směsi, a tím získání více informací o vlastnostech testovaného materiálu. Metoda je velmi vhodná pro stanovení délkových změn ve dvou směrech, lze jí použít i pro vázané smršťování a má velký potenciál v laboratorním stanovování vlastností stavebních materiálů.

Tazawova metoda

Tazawova metoda [18] se používá pro měření chemického smršťování cementových past. Nádoba, do které je ze shora zavedena tenká pipeta, se naplní cementovou pastou. Pasta se zalije vodou, která v pipetě dosahuje definované výšky. Během smršťování se hladina v pipetě snižuje. Po ukončení měření se odečte konečná výška hladiny a celkové smrštění se dopočítá z úbytku hladiny a za pomoci chemické rovnice reakce v cementové pastě.

EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ RUČNÍM DEFORMETREM

Cílem experimentálního měření ručním deformetrem bylo ověřit přesnost měření smršťování touto metodou, neboť nabízí možnost měření objemových změn přímo na staveništi. Dalšími výhodami ručního deformetru jsou jeho přenositelnost a relativně nízká pořizovací cena. Jediným zásahem do konstrukce při jeho použití je aplikace měřících markerů, mezi kterými je měřena vzdálenost.

Provedený experiment porovnával výsledky souběžného měření ručním deformetrem a smršťovacím žlabem, který byl v tomto experimentu považován za přesnou referenci.

Během experimentu bylo nutné upravit standardní měřící markery pro deformetr tak, aby byly zafixovány bez lepení na vzorek a mohlo se začít s měřením v co nejnižším stáří betonové směsi. Betonová směs byla navržena tak, aby relativně rychle získala „manipulační“ pevnost a aby se na ní prů-

běhu času projevilo dostatečně rozdílné a relativně vysoké smrštění. Pro experiment byla zvolena směs o složení:

- cement CEM I – 300 kg/m³,
- popílek – 150 kg/m³,
- kamenivo frakce 0/4 – 1 100 kg/m³,
- kamenivo frakce 4/8 – 320 kg/m³,
- voda – 300 kg/m³.

Smršťovací žlab o délce 1 m byl naplněn záměsí a současně byl opatřen upravenými markery. Měření probíhalo zároveň ve dvou smršťovacích žlabech. Žlaby se záměsí byly uloženy v běžném laboratorním prostředí, a to z důvodu dobrého přístupu pro ruční měření. První záznam mohl být proveden po 10 h od styku cementu s vodou. V prvních dnech probíhalo měření ručním deformetrem intenzivně, s postupem doby se intervaly měření počítaly na jednotky dnů. Celková doba měření přesáhla jeden měsíc. Směs vykazovala 28denní pevnost v tlaku 32 MPa. Výsledky obou měření jsou na obr. 18, kde je od cca 5. dne patrný odklon křivek zaznamenaných ručním deformetrem od křivek zaznamenaných LVDT sondou, který se vyrovnává okolo 20. dne měření. Tato systematická chyba měření je pravděpodobně způsobena kroucením vzorků, při kterém dochází k relativní změně polohy jednotlivých markerů pro ruční deformetr a kterou sonda, připevněná k smršťovacímu žlabu, nezaznamenává. Kroucení vzorků je však eliminováno v čase, čímž velikost chyby dále neroste.

Graf na obr. 18 ukazuje, že při shodném průběhu smrštění na dvou vzorcích stejné šarže betonu vykazuje měření deformetrem odlišné hodnoty oproti referenci. Vizualně je však patrné, že trend průběhu je jak u deformetru, tak měřícího žlabu stejný. V grafu na obr. 19 je vynesena chyba měření, která je odvozena od reference žlab-sonda a je vztažena k ručnímu deformetru. Střední hodnota uvedené chyby mě-

Obr. 13 Změna mřížky během smršťování, převzato z [14] ■ Fig. 13 Fringe pattern during shrinkage, courtesy of [14]

Obr. 14 Konfigurace kamer pro digitální fotogrammetrii ■ Fig. 14 Camera configuration for digital photogrammetric method

Obr. 15 Zařízení pro fotogrammetrickou mikroskopii ■ Fig. 15 Experimental setup for photogrammetric microscopy

Obr. 16 Smršťovací kužel ■ Fig. 16 Shrinkage cone

Obr. 17 Zařízení pro měření smršťování tenkovrstvých vzorků ■ Fig. 17 Thin layer shrinkage measurement system

Obr. 18 Porovnání měření smrštění ručním deformetrem se smršťovacím žlabem ■ Fig. 18 Shrinkage measurement by portable deformeter in comparison with the shrinkage drain

Obr. 19 Chyba měření ručním deformetrem ■ Fig. 19 Error of the portable deformeter

ní je 59,7 μm, resp. 60,4 μm pro první a druhý vzorek.

Kromě tohoto experimentu bylo dříve provedeno dalších 16 experimentů, trvajících téměř jeden rok, při kterých sice nebyly hodnoty z ručního deformetru porovnávány s přesnou referenční měřícího žlabu, ale vždy bylo provedeno několik měření, z nichž se určila střední hodnota a rozptyl.

Výrobce deklarovanou přesnost ručního deformetru ± 10 μm se vztahuje na rozlišení měřícího zařízení, ale ne na chybu měřící metody. Z výše popsaného experimentu a zhodnocení výsledků dalších experimentů byla střední hodnota reálné chyby metody měření ručním deformetrem odhadnuta na 60 μm. Tato celková chyba v sobě obsahuje jak nejistotu typu A, tedy náhodné jevy, tak nejistotu typu B, tedy chyby přístrojů. Vypočtená chybovost měření na žlabu s LVDT sondou je o řád nižší.

Zdroje:

- [1] ČSN EN 1992-1-1. Eurokód 2. *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2006.
- [2] ČSN EN 1992-2. Eurokód 2. *Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*. Praha: ČNI, 2007.
- [3] ČSN EN 13872. *Metody zkoušení hydraulicky vytvrzovaných podlahových stěrkových hmot – Stanovení rozměrových změn*. Praha: ČNI, 2004.
- [4] ČSN EN 196-3. *Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. Praha: ČNI, 2008.
- [5] OTHONOS, A. Fiber Bragg gratings. *Review of scientific instruments*. 1997, Vol. 68, No. 12, p. 4309–4341.
- [6] KERSEY, A. D., DAVIS, M. A., PATRICK, H. J., LEBLANC, M., KOO, K. P., ASKINS, C. G., PUTNAM, M. A., FRIEBELE, E. J. Fiber grating sensors. *Journal of lightwave technology*. 1997, Vol. 15, No. 8, p. 1442–1463.
- [7] WONG, A. C. L., CHILDS, P. A., BERNDT, R., MACKEN, T., PENG, G.-D., GOWRIPALAN, N. Simultaneous measurement of shrinkage and temperature of reactive powder concrete at early-age using fibre bragg grating sensors. *Cement and Concrete Composites*. 2007, Vol. 29, No. 6, p. 490–497.
- [8] *Schleibinger Testing Systems*. [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Shrinkage>
- [9] ČSN 73 1320. *Stanovení objemových změn betonu*. Praha: ČNI, 1987 + Z1, ČNI, 2003.
- [10] VYMAZAL, T., KUCHARCZYKOVÁ, B., MISÁK, P., DANĚK, P. *Způsob kontinuálního měření hmotnostních úbytků cementových kompozitů v raném stadiu tuhnutí a tvrdnutí a zařízení k provádění tohoto způsobu*. Česká republika. Patentový spis, 304898. leden 2015.
- [11] JENSEN, O. M., HANSEN, P. F. A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening portland cement paste. *Materials and structures*. 1995, Vol. 28, No. 7, p. 406–409.
- [12] ASTM C1581/ C1581M – 09a. *Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
- [13] CHEN, T. C., YIN, W. Q., IFJU, P. G. Shrinkage measurement of concrete using phase shifting. In: *Proceedings of the XIth International Congress and Exposition*. Florida, USA, 2008.
- [14] CHEN, T. C., YIN, W. Q., IFJU, P. G. Shrinkage measurement in concrete materials using cure reference method. *Experimental mechanics*. 2010, Vol. 50, No. 7, p. 999–1012.
- [15] YILMAZTÜRKA, F., KULUR, S., PEKMEZCİA, B. Y. Measurement of shrinkage in concrete samples by using digital photogrammetric methods. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 34, 2004.
- [16] NOVÁČEK, J. *Studium objemových změn pojivových silikátových směsí*. Brno, 2013. Disertační práce. VUT v Brně. Fakulta stavební.
- [17] ASTM C827-95a. *Standard Test Method for Change in Height at Early Ages of Cylindrical Specimens from Cementitious Mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.
- [18] TAZAWA, E., MIYAZAWA, S., KASAI, T. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste. *Cement and concrete research*. 1995, Vol. 25, No. 2, p. 288–292.
- [19] *DirectIndustry*. [online]. [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/megatron-elektronik-ag-co/product-13783-1026959.html>
- [20] *Alibaba.com*. [online]. [cit. 2016-01-08]. Dostupné z: http://www.alibaba.com/product-detail/Low-cost-price-high-useful-pressure_670144433.html?spm=a2700.7724838.29.225.jhEWQh
- [21] TME Czech Republic. [online]. [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: http://www.tme.eu/cz/details/ten-tfs5_120-w/dotyko-va-cidla/tenmex/tfs5120-w/

Porovnání je samozřejmě nutné provést na více druzích betonu jak z hlediska pevnostního, tak v kombinaci s třídami konzistence či druhy a účely použitých přísad. Během podobných experimentů je možné přistoupit také k porovnání stavebně užitných metod, tedy strunového tenzometru a ručního deformetru. Jedině bohatá sada dat může vést k vytvoření směrných kalibračních vztahů jednotlivých metod a teprve potom mohou být tyto vztahy normativně zakotveny.

DISKUZE

Výsledky výše popsaného experimentu a studium metod pro měření smršťování betonu vyvolávají několik zásadních otázek, které lze rozdělit do dvou hlavních kategorií.

První kategorií jsou otázky vázané k samotným metodám. Důležitým faktorem každé metody je její přesnost. Ta je dána, kromě rozlišení a chyby měřicího přístroje udávané výrobcem, také mnoha dalšími faktory, včetně lidského. Provedený experiment po-

rovnávající měření smršťovacím žlabem a ručním deformetrem je typickým příkladem situace, kdy je nutné přesnost celé metody experimentálně ověřit. Navíc je nutné rozlišovat metody měřící absolutní změnu délky a změnu relativního napětí v konkrétním bodě konstrukce. Typickým zástupcem relativních měřicích zařízení jsou často používané LVDT senzory, oproti tomu absolutní změnu rozměrů podchycují nejlépe optické metody.

Druhou kategorií jsou otázky týkající se používání metod v praxi stavebního zkušebnictví. Většina metod je určena pro použití v laboratorních podmínkách (tab. 1). Okolní podmínky na staveništích jsou často velmi odlišné od laboratorních podmínek, což může vést ke zkreslení velikosti skutečného smrštění betonové konstrukce. Dále je důležité upozornit na určení specifikace a hodnocení shody betonových směsí. Při specifikaci betonové směsi pro prvek, který bude namáhán smrštěním, musí být jasně řečeno,

jakou metodou se bude měřit smrštění, a tím i hodnotit shoda betonové směsi se specifikovanými vlastnostmi. Je nezbytné zdůraznit, že je třeba metody normativně zakotvit, aby nemohly vznikat rozpory v hodnocení shody.

Z provedených experimentů a dlouhodobých pozorování lze vyvodit předpoklad užívání strunových tenzometrů v konstrukcích, případně měřicích trať pro ruční tenzometry na povrchu konstrukčních prvků. Tyto ale musí být navázány kalibračními vztahy na laboratorní testování, kde se jako nejvhodnější způsob zkoušení jeví metoda žlabu s LVDT senzorem. Náklady na toto zařízení jsou nezanedbatelné, ale stabilní konstrukce senzorů, robustní konstrukce měřicích žlabů a spolehlivost záznamových zařízení zajišťuje jedné měřicí soupravě mnohaletou životnost i při každodenním používání. Samozřejmě je vhodné tuto zkušební metodu doplnit o další údaje, jako jsou např. teplota vzorku či úbytek hmotnosti [10].

ZÁVĚR

Vědecké a technické zázemí v ČR i ve světě dokázalo během minulého století získat mnoho výsledků a vytvořit výpočetní vztahy pro popis objemových změn konstrukčního betonu. Samotný konstrukční beton se ale v posledních cca dvaceti letech proměnil z konvenčního tříslložkového (kamenivo, cement, voda) materiálu na multisložkovou směs, která i při zachování stejné funkce může projevoval velmi rozdílné vlastnosti.

Velký objem výroby betonu, vyčerpání velmi kvalitních zdrojů a ekologická omezení vedou k rychlým změnám kvalitativních parametrů vstupních materiálů. I z hlediska měření objemových změn betonu je tedy nutné vytvořit přehlednou metodiku, jak rych-

le a přesně odhadovat chování betonu v konstrukci z výsledků laboratorních zkoušek.

Pro měření délkových změn betonu se prozatím ukazuje jako nejvhodnější kombinace tří metod, a to strunové tenzometry, dilatometrický žlab a ruční deformetr. V budoucnu lze očekávat vývoj nových metod měření smršťování betonu založených na principech fotogrammetrie. Výhodou těchto optických metod by měla být možnost zaznamenávat přetvoření celého měřeného prvku, a to jak v laboratorních, tak i in situ podmínkách.

Projekt byl zpracován za podpory projektu SGS15/036/OHK1/1T/11. Poděkování patří panu Vladimíru Veselému, který projekt zaštiťoval ze strany akreditované laboratoře Betotech, s. r. o.

Bc. Veronika Mártonová
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných
konstrukcí
e-mail: veronika.martonova
@fsv.cvut.cz



Ing. Pavel Veselý
Betotech, s. r. o.
e-mail: pavel.vesely@betotech.cz



doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných
konstrukcí
e-mail: jitka.vaskova@fsv.cvut.cz



Text příspěvku byl posouzen odborným lektorem.
The text was reviewed.

ZA PROF. ING. BOHUMÍREM VOVSEM, DRSC.

Dne 10. února 2016 nás navždy opustil prof. Ing. Bohumír Voves, DrSc.

Narodil se v roce 1924 v Praze. Maturitu složil na dvou školách – Masarykově reálce v roce 1942 a také na abiturient-ském kurzu na Vyšší průmyslové škole v roce 1945. V květnu 1945 nastoupil ke studiu na Vysoké škole inženýrského stavitelství do tzv. letního semestru. Druhou státnici vykonal v březnu 1948. Při vysokoškolském studiu navštěvoval v pobočce Sorbony v Praze dvouletý kurz soustředěný na francouzské výrazy v oblasti inženýrských staveb. Prázdninovou praxi absolvoval v roce 1948 na stavbě vodní elektrárny ve francouzských Alpách. Přítomnost ve Francii využil k poznávací cestě po historických i stavebních památkách. Koncem roku 1948 nastoupil do Výzkumného ústavu hmot a konstrukcí v Praze, kde měl za úkol analýzu francouzských norem, které měly být spolu s ověřovacími zkouškami našich materiálů podkladem při tvorbě českých norem pro předpjatý beton. Dále zde spolupracoval na výrobní technologii předpínacích ocelí. Později přesídlil do Výzkumného ústavu pozemních staveb, kde se dále věnoval zkouškám stavebních materiálů a řešil základní technologické a teoretické otázky, které využíval při projektování konstrukcí z předpjatého betonu, zejména mostů. Poznatky získané při provádění konstrukcí z předpjatého betonu a ze zatěžovacích zkoušek mostních konstrukcí, jakož i z výsledků laboratorních zkoušek využil při zpracování norem platných pro navrhování, provádění a kontrolu konstrukcí z předpjatého betonu i dalších norem. Prosazoval zavádění nových materiálů, např. rychlovazného cementu, pórovitého kameniva z expandované břídlíce, patentovaných drátů s vtisky, předpínacích lan, předpínací tyčové výztuže, kotev, aktivované malty aj. Výsledky výzkumu zpracoval do technických podmínek. Spolupracoval na Metodických pokynech pro používání výztuže do



betonu a zpracoval Technologická pravidla pro kabelobeton.

Od roku 1966 působil jako docent na Stavební fakultě ČVUT, kde se kromě bohaté pedagogické činnosti nadále věnoval výzkumu předpjatého betonu, např. v oblasti trvanlivosti, požární odolnosti a chování za velmi nízkých teplot. Další zkoušky a získané poznatky uplatnil při zpracování norem pro ocelové kotvy, navrhování konstrukcí z lehkého betonu, navrhování mostů z předpjatého betonu, jakož i novelizaci normy pro navrhování, provádění, zkoušení a kontrolu konstrukcí z předpjatého betonu.

Po odchodu do důchodu v roce 1989 se prof. Voves věnoval projektování konstrukcí pozemních i inženýrských staveb z předpjatého betonu, posudkové a znalecké činnosti.

Bohatá je i jeho publikační činnost zaměřená převážně na předpjatý beton. Napsal několik knižních publikací, skript a řadu odborných článků a příspěvků. Získané zkušenosti přednášel na odborných konferencích a školeních pro pracovníky z praxe. Byl činný i v mezinárodní společnosti pro předpjatý beton FIP. Měl velký přehled v oblasti historie i kultury. V roce 2014 vyšla jeho poslední knižní publikace „Počátky předpjatého betonu v ČR“, v níž popisuje svoji účast na různých stavbách a při tvorbě předpisů a norem.

V jeho osobě ztrácí inženýrská veřejnost, akademická obec Fakulty stavební ČVUT v Praze, jeho spolupracovníci i blízcí nejen předního odborníka v oboru betonových konstrukcí, ale také neuvěřitelně pracovitého a pilného vědeckého a pedagogického pracovníka, autora vědeckých publikací i učebních textů a člověka širokého kulturního rozhledu.

Všichni budeme na prof. Vovse s úctou vzpomínat jako na mimořádnou osobnost, přímého a čestného člověka, našeho učitele a rádce.

prof. Ing. Jaroslav Procházka, CSc.