

MOŽNOSTI STANOVENÍ MODULU PRUŽNOSTI A POISSONOVA ČÍSLA V RANÉ FÁZI ZRÁNÍ CEMENTOVÝCH MATERIÁLŮ

POSSIBILITIES OF DETERMINATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY AND THE POISSON'S RATIO IN THE EARLY AGE OF CEMENTITIOUS MATERIALS

Romana Halamová, Dalibor Kocáb, Barbara Kucharczyková

Ve stavební praxi se lze setkat s případy, kdy je vhodné, či dokonce nutné znát hodnotu nebo vývoj modulu pružnosti materiálu na bázi cementu i ve velmi raném stádiu. Typickými příklady jsou předpjaté konstrukce nebo konstrukce, kterým hrozí nadměrné deformace v důsledku předčasného odstranění bednění kvůli nutnosti rychle pokračovat ve výstavbě. Tento článek je především určitou rešerší či přehledem, jakými způsoby je možné stanovit modul pružnosti ve velmi raném stadiu tuhnutí a tvrdnutí betonu a jemu podobných materiálů. Článek se také zabývá možnostmi stanovení hodnoty a vývoje Poissonova čísla, které souvisí s vývojem dynamického modulu pružnosti vypočteného na základě ultrazvukového měření. ■ *Civil engineering sometimes encounters cases that require knowledge of the modulus of elasticity or its development in young cement composites. Typical examples are pre-stressed structures and structures that face the risk of severe strain, because their construction plan requires early removal of formwork. This paper reviews and describes the means of measuring the modulus of elasticity at very early ages. It also analyses the issue of determining the value and progress of Poisson's ratio; which closely follows the progress of the modulus of elasticity.*

V moderním stavitelství se v posledních letech dostávají do popředí zájmu kromě pevnosti v tlaku i další materiálové charakteristiky betonu, jako je např. smršťování, trvanlivost nebo modul pružnosti [1], [2], který je aktuálním tématem zejména v souvislosti s vývojem vysokohodnotných betonů s jemnozrnnou strukturou. Modul pružnosti v tlaku a tahu (především v zahraniční literatuře též zvaný Youngův modul) je deformační charakteristika, na které jsou závislé průhyby, smršťování, dotvarování nebo kmitání konstrukcí a která je vyjádřena pomocí Hookova zákona jako:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (1)$$

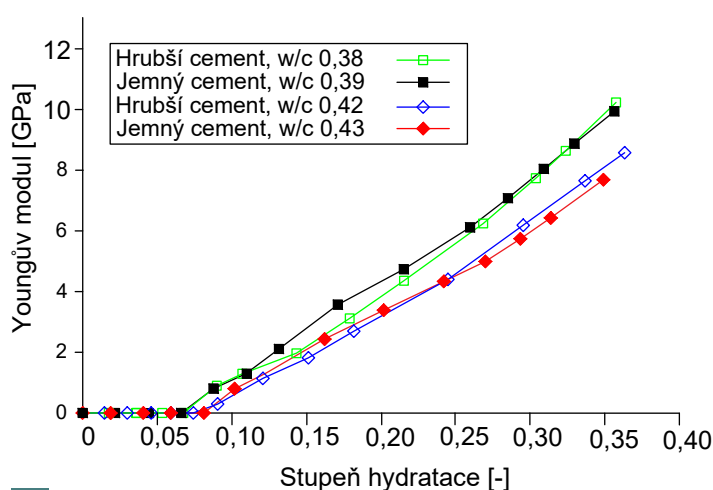
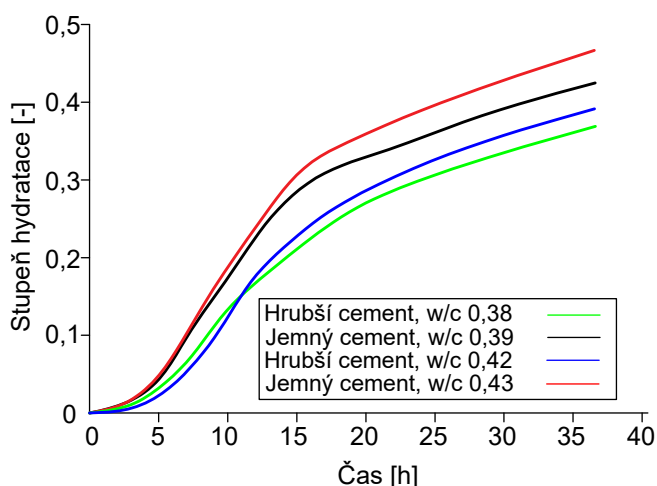
kde E je modul pružnosti, σ napětí a ε poměrné přetvoření [3].

Čím je modul pružnosti vyšší, tím menší jsou deformace prvku nebo konstrukce. Význam modulu pružnosti narůstá se snahou o navrhování čím dál tím štíhlejších a subtilnějších, často předpjatých konstrukcí. Zatímco pevnost v tlaku je výrobcem betonu jasně garantována, u modulu pružnosti je při návrhu konstrukcí většinou uvažována tabulková hodnota v závislosti na pevnostní třídě daného betonu. Během několika posledních desetiletí však beton prošel obrovským vývojem, zejména z pohledu technologického. Při výrobě betonu se začaly

ve velké míře používat různé přísady a příměsi, čímž vznikl takzvaný moderní beton [4], [5], u kterého se modul pružnosti nemusí odvíjet od jeho pevnostní třídy. Ve skutečnosti se reálná hodnota modulu pružnosti může velmi lišit oproti hodnotě, se kterou se při návrhu počítá. Mnohdy je tak skutečná hodnota modulu pružnosti betonu výrazně menší než hodnota, která je udávána pro pevnostní třídu, což dokazují např. články [6], [7]. Z tohoto důvodu se v posledních letech mnoho odborných pracovišť zaměřilo na zkoumání aspektů, které hodnotu modulu pružnosti betonu ovlivňují, viz např. články [8], [9], [10]. Ve většině tuzemských i zahraničních publikací je modul pružnosti zjišťován až po vytvrdnutí betonu a nikoli v počáteční fázi jeho zrání. Přitom existují případy, kdy je nutné znát modul pružnosti dříve než po 28 dnech, a to zejména v prefabrikaci, v mostním stavitelství, ale i při výstavbě předpjatých konstrukcí či konstrukcí, které je třeba rychle odbednit. Informace o průběhu

1 a) Graf závislosti stupně hydratace na vodním součiniteli a jemnosti mletí cementu v čase, b) graf závislosti modulu pružnosti na stupni hydratace (zdroj: [17]) 2 Ultrazvukový přístroj Vikasonic

1 a) Dependence of the degree of hydration on the w/c ratio and cement fineness over time graph, b) dependence of the Young's modulus on the degree of hydration graph (source: [17]) 2 Ultrasonic testing instrument Vikasonic



1a

1b

vývoje modulu pružnosti v rané fázi zrání cementových materiálů by mohly přinést i jisté povědomí o jeho výsledné hodnotě.

Raná fáze zrání betonu je poněkud vágní pojem, který si může každý vyložit trochu jinak. V tomto článku je jako raná fáze zrání betonu uvažováno prvních 24 h od okamžiku namíchání čerstvého betonu.

ZPŮSOBY ZJIŠŤOVÁNÍ MODULU PRUŽNOSTI A POISSONOVA ČÍSLA V RANÉM STÁŘÍ

Podle normy ČSN EN 1992-1-1 [11] je možné určit orientační hodnotu modulu pružnosti v čase dle vztahu:

$$E_{cm(t)} = \left(\frac{f_{cm(t)}}{f_{cm}} \right)^{0,3} \cdot E_{cm}, \quad (2)$$

kde $E_{cm(t)}$ a $f_{cm(t)}$ jsou hodnoty modulu pružnosti a pevnosti v tlaku ve stáří t dní, E_{cm} a f_{cm} jsou tytéž hodnoty po 28 dnech zrání betonu. Hodnota $f_{cm(t)}$ se vypočítá dle vztahu:

$$f_{cm(t)} = \beta_{cc} \cdot f_{cm}, \quad (3)$$

kde β_{cc} je součinitel závislý na stáří betonu od doby jeho namíchání.

Vztah (2) je pouze orientační, neboť existuje mnoho faktorů, které ovlivňují vývoj modulu pružnosti v počáteční fázi tvrdnutí cementového kompozitu a které by se měly brát v úvahu. Tyto faktory by se daly rozdělit na vnější a vnitřní [10]. Mezi vnitřní faktory patří složení cementového kompozitu, jako je např. druh použitého cementu, vodní součinitel, množství a druh kameniva nebo druh použitých přísad. Mezi vnější faktory patří způsob ošetřování betonu či teplota okolního prostředí při tuhnutí a tvrdnutí.

Způsobů určování modulu pružnosti je mnoho a lze je rozdělit podle více kritérií, přičemž základní rozdělení by mohlo být na metody statické a metody dynamické. Normou definované postupy v České republice jsou:

- stanovení statického modulu pružnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-13 [12] nebo dle ČSN ISO 1920-10 [3],
- stanovení statického modulu pružnosti ze zkoušky v tahu ohybem dle ČSN 73 6174 [13],
- stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou dle ČSN 73 1371 [14],
- stanovení dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou dle ČSN 73 1372 [15].

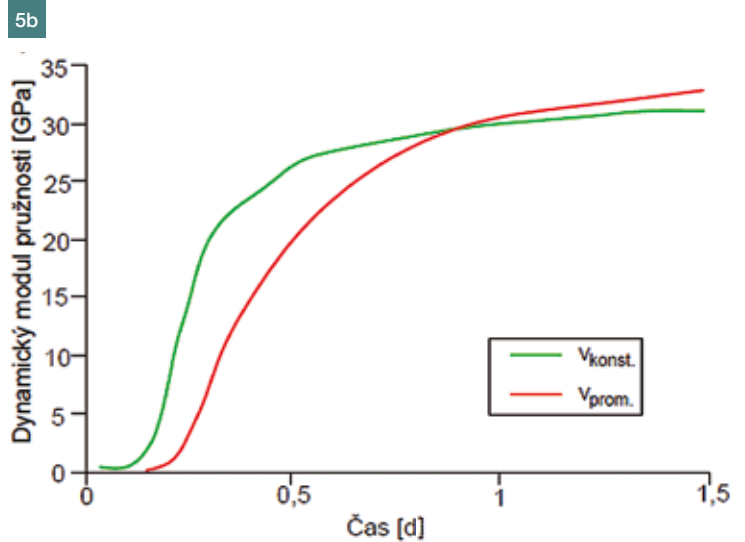
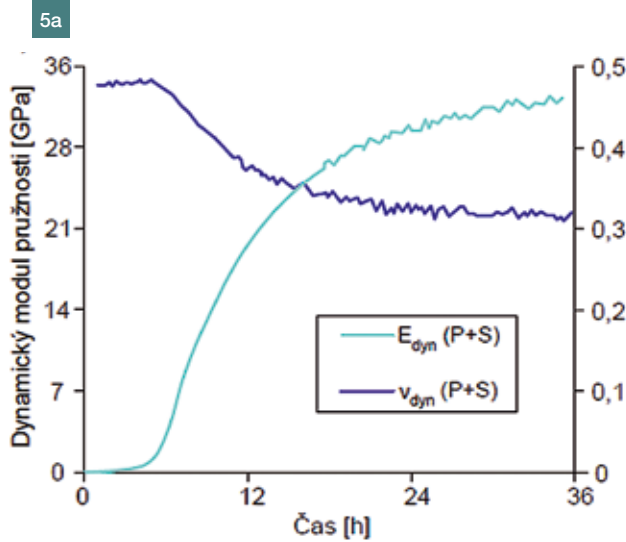
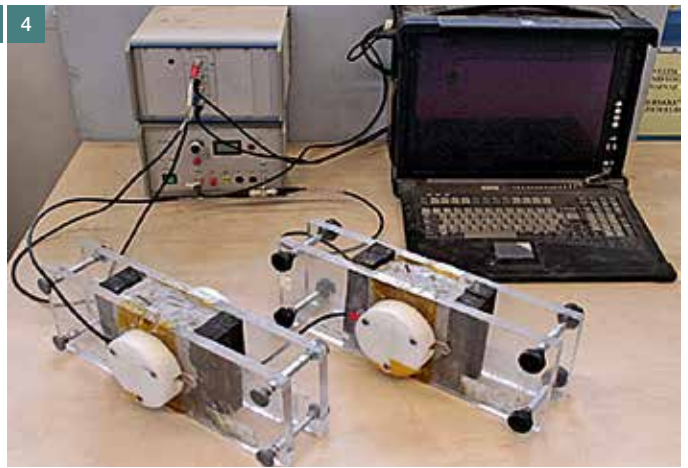
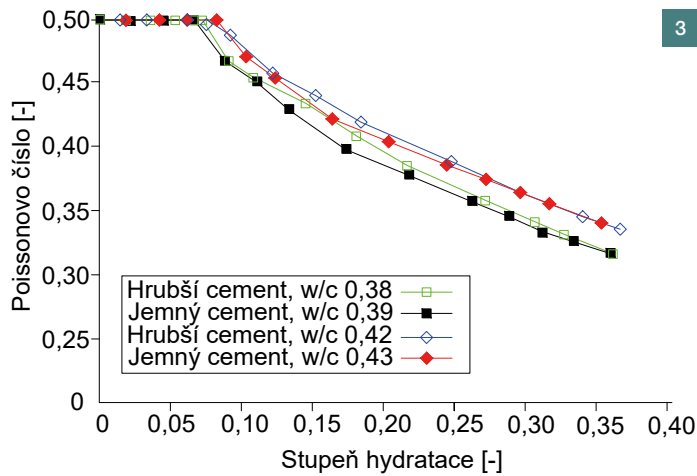


Žádný z uvedených postupů však neumožňuje měření modulu pružnosti již od počáteční fáze tuhnutí, a proto je ve většině odborné literatury modul pružnosti vyhodnocován nejdříve po 24 hodinách od namíchání, kdy je cementový materiál dostatečně ztvrdlý, aby bylo možné tyto metody použít.

Pokud bychom chtěli zjistit průběh vývoje modulu pružnosti od počátku tuhnutí, dostaneme se do poměrně složité problematiky, která úzce souvisí s vývojem hydratace cementu. O tuto problematiku začíná být poslední dobou zájem, neboť poznatky o vývoji charakteristik v rané fázi by mohly předpovídat rizika vzniku trhlin a poruch, které ovlivňují budoucí trvanlivost betonu [16]. Jednou z možností, jak určit průběh modulu pružnosti v počáteční fázi tuhnutí, je zjištění průběhu hydratace cementu v čase pomocí kalorimetrie. Na základě výsledků chemické analýzy a následného matematického modelování lze přibližně odvodit průběh vývoje modulu pružnosti, což dokazuje práce [17], v níž jsou uvedeny výsledky matematického modelování, které jsou ověřovány po 12, 18 a 24 hodinách standardní statickou zkouškou modulu pružnosti cementových past. Na obr. 1 je zobrazen vývoj hydratace cementu v čase v závislosti na vodním součiniteli a jemnosti mletí cementu a s tím související vývoj modulu pružnosti. Pokud bychom chtěli z grafů na obr. 1 zjistit hodnotu modulu pružnosti ve stáří např. 24 hodin, bylo by to poněkud složitější, neboť křivky v pravé části obrázku jsou závislé na křivkách v jeho levé části. Stupeň hydratace (u past po-

užitých v [17]) je více závislý na jemnosti mletí cementu než na vodním součiniteli – pasta z jemně mletého cementu (dále též dle [17] „jemný cement“) dosahuje v prvních hodinách vyššího stupně hydratace než pasta z hruběji mletého cementu (dále též „hrubší cement“). Při zhodnocení závislosti modulu pružnosti na stupni hydratace lze říci, že vyšších modulů pružnosti dosahuje pasta s nižším vodním součinitelem, zatímco vliv jemnosti mletí není natolik výrazný. Při zkompletování údajů z obou grafů lze zjistit, že nejvyšších hodnot modulu pružnosti v čase 24 hodin dosahuje pasta s jemným cementem a vodním součinitelem 0,39. Rozhodně však není možné závěry z obr. 1 zobecnovat – primárně zde slouží jako ukázka, že lze určit modul pružnosti cementového materiálu v rané fázi jeho zrání pouze pomocí chemické analýzy a matematického modelování (i když je tento postup poměrně složitý).

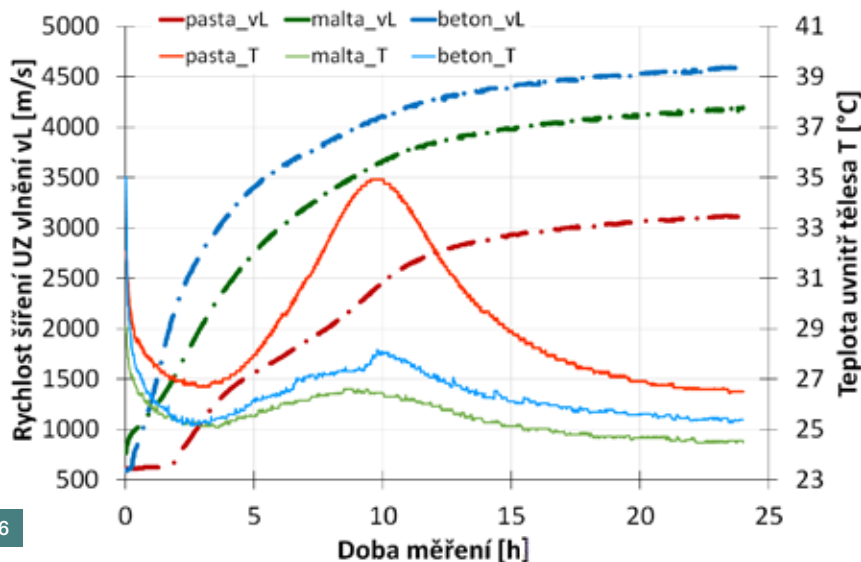
V poslední době se jeví jako vhodný způsob určování průběhu modulu pružnosti v rané fázi zrání betonu ultrazvuková metoda. Ta je dnes běžně používána pro měření dynamického modulu pružnosti u ztvrdlých cementových kompozitů, nicméně v posledních letech byly vyvinuty přístroje, které dokáží měřit dobu průchodu ultrazvuku již od namíchání kompozitu. Jedním z takových přístrojů je i ultrazvukový přístroj Vikasonic od firmy Schleibinger (obr. 2). Přístroj se skládá z objímky ve tvaru Vicatova prstence a dvou sond, z nichž jedna slouží jako přijímač a druhá jako vysílač. Součástí přístroje je i záznamo-



3 Vývoj Poissonova čísla v čase v závislosti na stupni hydratace cementového kompozitu s různým vodním součinitelem a cementem (zdroj: [17]) 4 Ultrazvukový přístroj FreshCon (zdroj: [21]) 5 a) Příklad měření dynamického modulu pružnosti přístrojem FreshCon (zdroj: [21]); b) modul pružnosti zjištěný různými metodami, křivky ukazují rozdíl mezi modulem pružnosti vypočítaným s konstantním a s proměnným Poissonovým číslem (zdroj: [22]) 6 Příklad měření rychlosti ultrazvukových impulzů a teploty přístrojem Vikasonic | 3 Development of the Poisson's ratio in dependence on the degree of hydration (source: [17]) 4 Ultrasonic testing instrument FreshCon (source: [21]) 5 a) Example of measuring the dynamic Young's modulus using FreshCon (source: [21]); b) dynamic Young's modulus measured by various methods, curves show the difference between the modulus of elasticity calculated with a constant and variable Poisson's ratio (source: [22]) 6 Example of measuring the ultrasonic pulse velocity and temperature using Vikasonic

vé zařízení s displejem, na kterém se zobrazují měřené hodnoty. Ty se současně ukládají na flash disk. Do objímky je uložen čerstvý cementový kompozit (nejčastěji pasta nebo malta, ale úspěšně lze měřit také beton) a spolu s objímkou je vložen mezi sondy. Přístroj pak vysílá ultrazvukové impulzy a kontinuálně měří dobu jejich průchodu materiálem. Přístroj byl primárně vyvinut pro určování začátku a konce doby tuhnutí cementu, nicméně se dá použít i pro měření modulu pružnosti. Jeho značnou výhodou je možnost měření teploty uvnitř zkoušeného tělesa, což dodává jistotu informací i o průběhu hydratace ve zkoušeném kompozitu.

Nevýhodou tohoto měření pro potřeby stanovení modulu pružnosti je však fakt, že do výpočtu jeho hodnoty standardně vstupuje hodnota Poissonova čísla [14], zatímco výrobci přístroje Vikasonic Poissonovo číslo ve výpočtu, který uvádí v manuálu k přístroji, nijak nezohledňují. Dynamický modul pružnosti se podle výrobců vypočítá jako:



$$E = \rho \cdot v_l \quad (4)$$

kde E je modul pružnosti, ρ objemová hmotnost a v rychlost ultrazvukového impulzu [18], zatímco česká norma ČSN 73 1371 [14] uvádí pro výpočet dynamického modulu pružnosti vztah:

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}{(1-\mu)}, \quad (5)$$

kde E_{cu} je dynamický modul pružnosti, ρ objemová hmotnost, v_L rychlost ultrazvukového impulzu a μ Poissonovo číslo.

Na tomto místě by bylo jisté vhodné krátce popsat, co to Poissonovo číslo vlastně je. Nejdříve se však budeme věnovat termínu Poissonova konstanta, což není totéž jako Poissonovo číslo. Poissonova konstanta, která se značí m , je definována jako poměr relativního prodloužení materiálu k jeho relativnímu příčnému zkrácení při tahovém namáhání. Poissonova konstanta je bezrozměrná, v absolutní hodnotě je větší než 1 a pro každý materiál nabývá jiných hodnot. V praxi se však výrazně častěji používá Poissonovo číslo, což je převrácená hodnota Poissonovy konstanty. Poissonovo číslo je značeno μ nebo ν (záleží na zdroji – v tomto článku se objevují obě označení, neboť respektujeme citovanou literaturu), taktéž se jedná o bezrozměrnou veličinu a určí se dle vztahu:

$$\mu = \frac{1}{m} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}, \quad (6)$$

kde μ je Poissonovo číslo, m Poissonova konstanta, ε_y poměrná deformace ve směru namáhání a ε_x poměrná deformace ve směru kolmém na namáhání.

Pro drtivou většinu materiálů nabývá Poissonovo číslo hodnot z intervalu 0 až 0,5. Výjimku tvoří tzv. auxetické materiály, které při namáhání tahem vykazují v příčném směru nabývání. Jejich Poissonovo číslo je tedy záporné.

Vzhledem k problematice modulu pružnosti, o které tento článek primárně pojednává, je Poissonovo číslo důležité, neboť u izotropních materiálů (což beton bezpochyby je) dává do souvislosti Youngův modul a modul pružnosti ve smyku:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1+\mu)}, \quad (7)$$

kde G je modul pružnosti ve smyku a E Youngův modul [19].

Při důkladnějším zkoumání problematiky stanovení Poissonova čísla v raném stáří se ukazuje, že tato oblast výzkumu je podrobněji řešena až nyní a že v současné době stále není snadné tuto problematiku v jiné literatuře najít. Ve výše zmiňované práci [17] je Poissonovo číslo řešeno simulací pomocí matematického modelování, které vychází z chemické analýzy. Jeho průběh je zobrazen na obr. 3. Práce [17] i v tomto případě uvažuje různé vodní součinitele a různou jemnost mletí cementu. Ze zjištěných výsledků ale vyplývá, že jemnost mletí cementu nemá na Poissonovo číslo nijak významný vliv. Data z obr. 3 je opět nutné dát do souvislosti s grafem na obr. 1a, pokud chceme získat představu o vývoji Poissonova čísla v čase. I zde platí, že obr. 3 je zde použit jako ukázka možnosti určení Poissonova čísla pomocí chemických procesů a matematického modelování.

Problém se stanovením Poissonova čísla byl vyřešen u přístroje FreshCon (obr. 4). Tento přístroj byl vyvinut na univerzitě ve Stuttgartu a funguje obdobně jako výše zmiňovaný Vikasonic. Skládá se ze dvou plastových desek, které jsou spojeny čtyřmi šrouby. Formou je zde pryžový prvek ve tvaru písmena U s vysokými tlumivými vlastnostmi, objem formy je 45 cm³. Přístroj je opatřen dvěma sondami, přičemž jedna slouží jako vysílač a druhá jako přijímač [20]. Původně byl stejně jako Vikasonic vyvinut pro zjišťování doby počátku a konce tuhnutí cementu – výhodou těchto ultrazvukových přístrojů, na rozdíl od metody určení počátku a konce doby tuhnutí klasickou metodou pomocí Vicatova přístroje, je možnost měřit i cementové malty, nejen cementové pasty.

Přístroj FreshCon umožňuje měření rychlosti podélných ultrazvukových

vln (P-vln) a také rychlosti příčných ultrazvukových vln (S-vln). Pomocí těchto údajů lze dle článku [21] určit také Poissonovo číslo jako:

$$\nu_{dyn} = \frac{1-2 \cdot \frac{V_s^2}{V_p^2}}{2-2 \cdot \frac{V_s^2}{V_p^2}}, \quad (8)$$

kde ν_{dyn} je dynamické Poissonovo číslo, V_s rychlost příčných ultrazvukových vln a V_p rychlost podélných ultrazvukových vln. Modul pružnosti se poté vypočítá dle rovnice (5). Příklad výsledků měření pomocí přístroje FreshCon je zobrazen na obr. 5a [21]. Graf ukazuje vývoj modulu pružnosti cementového kompozitu v čase od jeho namíchání do stáří 36 h a zároveň i vývoj Poissonova čísla během této doby. Graf na obr. 5b znázorňuje rozdíl mezi modulem pružnosti, který je vypočítán s konstantním Poissonovým číslem (zelená křivka), a modulem pružnosti, který je vypočítán s proměnným Poissonovým číslem (červená křivka) [22]. Na základě citovaných dat (obr. 5) je možné učinit závěr, že během rané fáze zrání cementových materiálů je Poissonovo číslo pro výpočet modulu pružnosti v určitých časových intervalech důležité (zde ve stáří materiálu přibližně 8 h). Pro finální hodnotu modulu pružnosti (zde 24 nebo 36 h) však není vývoj Poissonova čísla natolik zásadní, aby se musela jeho hodnota určovat přesně v celém průběhu sledovaného období – postačí znát Poissonovo číslo pouze v požadovaném stáří stanovení modulu pružnosti.

Jako další příklad měření pomocí ultrazvukové metody jsou zde uvedeny výstupy měření autorského kolektivu přístrojem Vikasonic (obr. 6). V grafu jsou zobrazeny rychlosti šíření ultrazvukového vlnění a teploty měřené uvnitř zkušebních těles v průběhu prvních 24 hodin zrání použitých materiálů. Zkušební tělesa byla vyrobena z cementové pasty, malty a betonu (vodní součinitel vždy 0,40; cement CEM I 52,5 R; hmot-

10. ročník mezinárodní vědecké konference

FIBRE CONCRETE 2019

Termín konání: 17. – 20. září 2019

Odborné příspěvky budou zařazeny v databázi SCOPUS, online sběrna je k dispozici na webu konference.

Podrobnější informace naleznete na concrete.fsv.cvut.cz/fc2019



Literatura:

- [1] KUCHARCZYKOVÁ, B., DANĚK, P., KOCÁB, D., MISÁK, P. Experimental Analysis on Shrinkage and Swelling in Ordinary Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. USA: Hindawi Publishing Corporation, 2017. ID 3027301. 11 s.
- [2] fib Bulletin No. 28. *Environmental Design*. Lausanne, Switzerland: fib, 80, 2004.
- [3] ČSN ISO 1920-10. *Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [4] COLLEPARDI, M. *The New Concrete*. Treviso: Grafiche Tintoretto, 2006.
- [5] NEVILLE, A., BROOKS, J. *Concrete technology*. Prentice Hall: Harlow, 2010.
- [6] MISÁK, P., VYMAZAL, T. Modul pružnosti vs. pevnost v tlaku. *Beton TKS*. 2009, roč. 9, č. 2, s. 58–59.
- [7] HUŇKA, P., KOLÁŘ, K., KOLÍSKO, J. Porovnání výsledků statického modulu pružnosti v tlaku s hodnotami uvedenými v ČSN EN 1992-1-1. *Beton TKS*. 2013, roč. 13, č. 6, s. 53–55.
- [8] KŘÍŽOVÁ, K., HELA, R. Selected Technological Factors Influencing the Modulus of Elasticity of Concrete. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*. 2014, Vol. 8, No. 6, p. 593–595.
- [9] BEUSHAUSEN, H., DITTMER, T. The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2015, Vol. 74, p. 132–139.
- [10] HUŇKA, P., KOLÍSKO, J., VOKÁČ, M., ŘEHÁČEK, S. Test and Technological Influences on Modulus of Elasticity of Concrete – Recapitulation. *Procedia Engineering*. 2013, Vol. 65, p. 266–272.
- [11] ČSN EN 1992-1-1 ed. 2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2011.
- [12] ČSN EN 12390-13. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [13] ČSN 73 6174. *Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem*. Praha: ČNI, 1994.
- [14] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [15] ČSN 73 1372. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [16] BOULAY, C., CRESPINI, M., CARETTE, J., STAQUET, S. Elastic properties of concrete at early age: monitoring of the E-modulus and Poisson's ratio with cyclic loadings and ultrasonic measurements. In: *14th International Conference and Exhibition: Structural Faults and Repair*. Edinburgh, UK, 2012.
- [17] CHAMROVA, R., SCRIVENER, K., GUIDOUM, A. *Modelling and measurement of elastic properties of hydrating cement paste*. Lausanne: EPFL, 2010.
- [18] Vikasonic - The Schleibinger Ultrasonic Data Logger: User manual. In: *Schleibinger Testing Systems* [online]. Dostupné z: http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Setting_and_Maturity:Ultrasonic_Setting_Measurement
- [19] ŠMÍŘÁK, S. *Pružnost a plasticita I*. Brno: CERM, 2006.
- [20] DE BELIE, N., GROSSE, C. U., KURZ, J., REINHARD, H.-W. Ultrasound monitoring of the influence of different accelerating admixtures and cement types for shotcrete on setting and hardening behaviour. *Cement and concrete research*. 2005, Vol. 35, No. 11, p. 2087–2094.
- [21] CARETTE, J., DUMOULIN, C., KARAIKOS, G., DERAEMAEKER, A. Monitoring of the E-modulus in early age concrete since setting time with embedded piezoelectric transducers. In: *Structural Faults & Repair – 2012*. Edinburgh, 2012.
- [22] BOULAY, C. et al. Monitoring elastic properties of concrete since very early age by means of cyclic loading, ultrasonic measurement, natural resonance frequency of composite beam (EMM-ARM) and with smart aggregates. In: *8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures / FraMCoS 8*. 2013.
- [23] HALAMOVÁ, R., KOCÁB, D., KUCHARCZYKOVÁ, B., MISÁK, P., ALEXA, M. Vliv Poissonova čísla na hodnotu dynamického modulu pružnosti cementových materiálů v rané fázi zrání. In: *25. Betonářské dny 2018 Sborník příspěvků konference*. Praha: ČBS ČSSI, 2018, s. 1–6.
- [24] KUCHARCZYKOVÁ, B., ROVNANÍKOVÁ, P. Studium smrštění cementové pasty v počátečních stádiích hydratace. In: *40. Mezinárodní český a slovenský kalorimetrický seminář*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2018. s. 135–138.

nostní poměr kamenivo ku cementu u malt a betonů je 3:1). Jak je vidět, výstupy z Vikasonice jsou velmi podobné výstupům z FreshConu. Trend vývoje rychlosti ultrazvukových impulzů (a tím pádem i dynamického modulu pružnosti) je u obou přístrojů podobný, pravděpodobně se zjištěné veličiny budou lišit pouze v absolutních hodnotách. Korekci hodnot dynamického modulu pružnosti řešíme pomocí doprovodného měření jiným ultrazvukovým přístrojem a pomocí rezonanční metody, viz [23].

Během prováděných experimentů jsme dále zjistili úzkou souvislost mezi ultrazvukovým měřením a kalorimetrií (u cementových past), kdy křivka teploty ve zkušební tělese Vikasonice odpovídá tepelnému toku stanovenému v kalorimetru a křivka rychlosti šíření ultrazvukového vlnění odpovídá křivce hydratačního tepla, viz [24]. Spojením kalorimetrického a ultrazvukového měření lze v raném stádiu odhadnout nejen

vývoj dynamického modulu pružnosti, ale také např. vývoj smršťování, a to i u malt a betonů.

ZÁVĚR

Vývoj modulu pružnosti cementových kompozitů v rané fázi jejich zrání je velmi aktuální téma, jehož podrobnější poznání by jistě dokázalo přinést nové poznatky o faktorech, které ovlivňují výslednou hodnotu modulu pružnosti, a také obecně o chování cementového kompozitu od chvíle jeho namíchání. Tato problematika navíc úzce souvisí i s rizikem vývoje trhlin během tuhnutí.

Ukazuje se, že nejjednodušším způsobem, jak stanovit vývoj modulu pružnosti, je zkoušení pomocí ultrazvukové impulzové metody, neboť je touto metodou možné měřit již od namíchání cementového kompozitu. Výzkum této oblasti je však na svém počátku a zmiňovaná problematika si rozhodně zasluhuje větší pozornost.

Příspěvek vznikl za podpory projektu GAČR č. 17-14302S „Experimentální analýza objemových změn cementových kompozitů v raném stádiu tuhnutí“.

Ing. Romana Halamová
144455@vutbr.cz



Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
dalibor.kocab@vutbr.cz



Ing. Barbara Kucharczykova, Ph.D.
barbara.kucharczykova@vutbr.cz



všichni: Fakulta stavební VUT
Ústav stavebního zkušebnictví

Článek byl posouzen odborným lektorem.
The article was reviewed.