

ČERPÁNÍ SAMOZHUTNITELNÉHO BETONU: SKRYTÁ REALITA PUMPING OF SELF-COMPACTING CONCRETE: THE HIDDEN REALITY

DIMITRI FEYS, RONNY VERHOEVEN,
GEERT DE SCHUTTER

Příspěvek po krátkém úvodu do reologických vlastností čerstvého betonu popisuje výsledky zkoušek čerpání betonu na Univerzitě v Ghentu. Článek není kompletním návodem pro čerpání SCC, nicméně některé důležité kroky jsou zdůrazněny.

This contribution describes, after a short introduction into the rheological properties of fresh concrete, the results of full scale pumping tests executed at Ghent University. It does not contain any guidelines for pumping of SCC, but some point of attention will be highlighted.

Objevení samozhutnitelného betonu Japonci na konci osmdesátých let dvacátého století [1] otevřelo betonářskému průmyslu zcela nové perspektivy. Díky použití samozhutnitelného betonu (SCC) se snižuje nejen hlučnost a vibrace při výrobě, ale také rizika, že navržená konstrukce ztratí na kvalitě v důsledku nedostatečného zhutnění [2]. Zavedení SCC může navíc urychlit proces lití, protože již nejsou vyžadovány přestávky na zhutnění a nově, ve výhledu je i čerpání betonu do bednění zesponu namís-

to shora. Dosažení tohoto cíle v současné době brání určité nejasnosti ohledně tlaků v bednění, nicméně za několik let bude jistě tento proces tvořit základ plně automatizované průmyslové výroby betonu.

Výzkumná centra a laboratoře se v současnosti zaměřují na různé vlastnosti SCC:

- použité materiály a složení betonu [5], [6],
- vlastnosti a reologie čerstvého betonu včetně simulací [7], [8], [9],
- plnění bednění SCC a jeho vliv na tlaky v bednění [3], [4], [10],
- chování SCC při tuhnutí, tvrdnutí, dotvarování a smršťování [11],
- pevnost SCC včetně mechanismu vazby na výztuž [12], [13],
- Mikrostruktura a trvanlivost SCC [14], [15], [16], [17].

Je patrné, že seznam zkoumaných témat je velmi rozsáhlý, přesto v něm však jeden specifický krok chybí: „Co se děje během ukládání pomocí čerpadla?“ Tento krok se nalézá mezi kontrolou kvality betonu v čerstvém stavu a vyplňováním bednění. Jediná doporučení pro čerpání tradičního betonu, která jsou v současnosti dostupná, nalezneme v literatuře [18], [19], [20]. Tato doporučení se

zabývají spíše tím, jaké má být složení tradičního betonu, aby byl čerpatelný, a již méně se dočteme o vztahu mezi požadovanou rychlostí tečení a ztrátami tlaku, ke kterým zde dochází. Pro samozhutnitelný beton takováto doporučení v současné době zcela postrádáme. Zvládnutí čerpání SCC ve stavební praxi tedy vychází ze zkušenosti obsluhy a doporučení pro tradiční beton. V některých případech však současná doporučení nepokryjí všechny požadavky na SCC a zkušenosti obsluhy nejsou dostatečné. Následkem toho může dojít k nepříjemným překvapením, ohrožujícím mnoho lidí, kteří si často vůbec neuvědomují, že vzniklé situace mohou být i kritické.

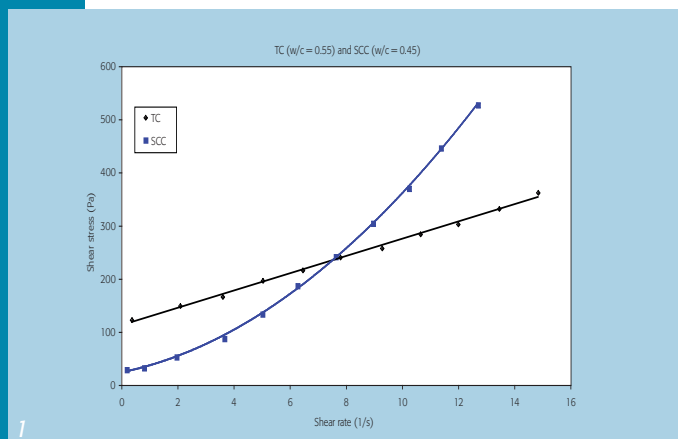
REOLOGICKÉ VLASTNOSTI BETONU

Klidový stav

Reologické vlastnosti čerstvého tekutého betonu jsou vyjádřeny jako vztah mezi smykovým napětím [Pa] a deformační rychlostí [1/s]. Všeobecně se předpokládá, že v klidovém stavu se čerstvý beton chová jako Binghamův materiál [21]. Tento model naznačuje, že vztah mezi smykovým napětím a deformační rychlostí je lineární, avšak průsečík s osou smykového napětí neprochází

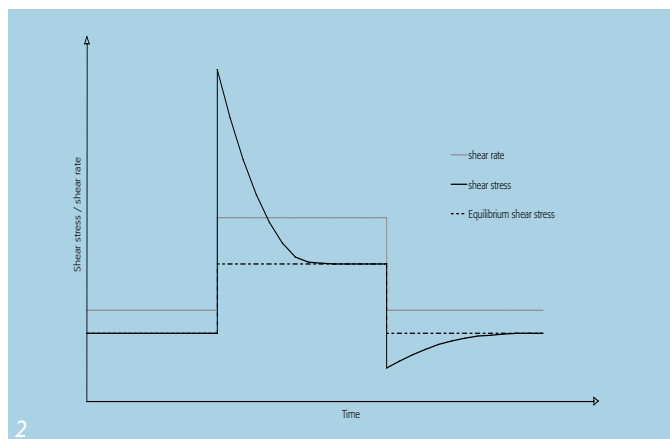
Obr. 1 Reologické vlastnosti běžného betonu (černě) a SCC (modře), povšimněte si nižšího napětí na mezi kluzu u SCC a nelinearity vztahu

Fig. 1 Rheological properties for TC (black) and SCC (blue), remark the lower yield stress of the SCC and the non-linear relationship



Obr. 2 Odezva smykového napětí netixotropického (černá, přerušovaná) a tixotropického (černá plná) materiálu na náhlý nárůst nebo pokles deformační rychlosti (šedá)

Fig. 2 Response in shear stress of a non-thixotropic (black, dashed) and a thixotropic (black, full) material to a sudden increase or decrease in shear rate (grey)



počátkem. Sklon přímky se nazývá plastická viskozita [Pa.s] a průsečík s osou smykového napětí je definován jako napětí na mezi kluzu [Pa] [21]. Napětí na mezi kluzu je dobře patrné při provedení zkoušky rozlítím: jakmile se hromádka betonu přestane deformovat, je smykové napětí způsobené gravitací v každé části betonu menší, než napětí na mezi kluzu a v důsledku toho se tok zastaví. Čím vyšší je napětí na mezi kluzu, tím nižší je hodnota rozlítí.

Na celém světě je v současnosti k dispozici SCC mnoha různých složení. Základním principem SCC je však vždy snížení napětí na mezi kluzu pomocí superplastifikátorů, aby beton získal schopnost rozlítí. Na druhé straně se však zvětšuje riziko rozměšování a proto je zapotřebí vyšší viskozita, aby beton zůstal stabilní. Výroba samozhutnitelného betonu spočívá v nalezení optimální rovnováhy mezi hodnotami napětí na mezi kluzu a viskozity, spolu s dostatečně vysokou odolností proti rozměšování. Způsob dosažení tohoto optima se může v různých zemích a regionech lišit [22].

V belgickém regionu byla při práci s SCC objevena jedna zvláštnost. Na základě

měření s pomocí různých reometrů se ukázalo, že vztah mezi smykovým napětím a deformační rychlostí není lineární, protože sklon přímky (viskozita) se s rostoucí deformační rychlostí zvětšuje: zdá se, že s rostoucím smykovým napětím SCC houstne (shear thickening) [23], [24], [25]. To je patrné na obr. 1, kde jsou zobrazeny reologické vlastnosti tradičního betonu (TC) s hodnotou vodního součinitele 0,55 a SCC s vodním součinitelem 0,45. Pověšimněte si nižšího napětí na mezi kluzu u SCC a nelinearity křivky pro SCC.

Časová závislost

Reologické vlastnosti se v průběhu času před začátkem tuhnutí neustále mění. Je tomu tak v důsledku neustále probíhající koagulace (= vytváření spojení) a disperze (= rušení spojení) cementových částic [8]. Čím větší je počet koagulovaných cementových částic, tím vyšší je napětí na mezi kluzu a viskozita. Tento jev je příčinou tuhnutí betonu. Čím větší je množství rozptýlených cementových částic, tím nižší je napětí na mezi kluzu a viskozita. Pokud nelze spojení mezi částicemi za vynaložení určitého množství energie porušit, nazýváme tento nárůst reologických vlastností

ztrátou zpracovatelnosti. Je-li možné spojení mezi částicemi porušit, definujeme tento efekt jako tixotropii [8].

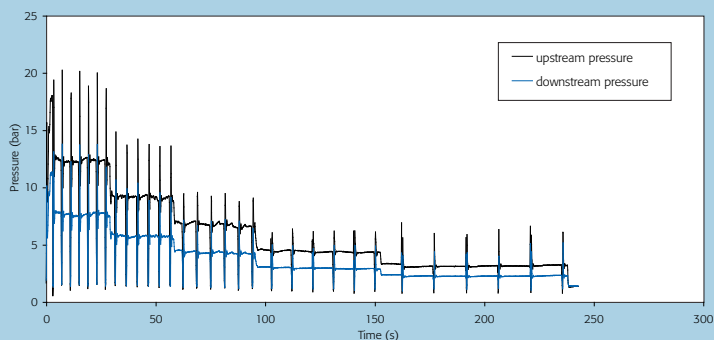
Ztráta zpracovatelnosti způsobuje permanentní nárůst napětí na mezi kluzu a viskozity, jejichž hodnoty již nikdy nepoklesnou. V případě tixotropie se počet spojení částic mění, je-li proměnlivá deformační rychlost. Při zvýšení deformační rychlosti se poruší větší počet spojení a beton se stává tekutějším. Při snížení deformační rychlosti se vytváří nové vazby a beton tuhne. Předpokládá se, že u každé deformační rychlosti, s výjimkou velmi nízkých, existuje mezi spojeními rovnováha. Čím vyšší je počet spojení, tím vyšší je zdánlivé napětí na mezi kluzu a viskozita. Vliv náhlého zvýšení nebo snížení deformační rychlosti na výsledné smykové napětí netixotropického (přeru-

Obr. 3 Pístové čerpadlo na beton
Fig. 3 Concrete piston pump

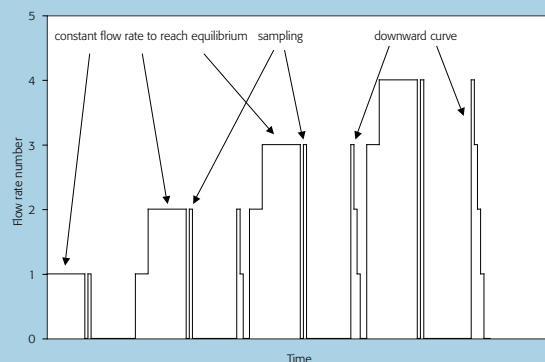
Obr. 4 Krátký okruh (25 m)
Fig. 4 Short circuit (25 m)

Obr. 5 Dlouhý okruh (105 m)
Fig. 5 Long circuit (105 m)

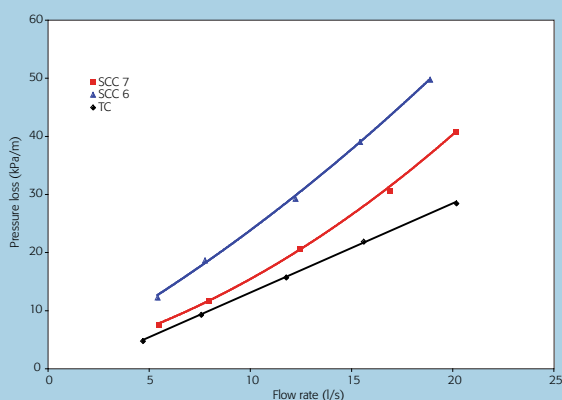




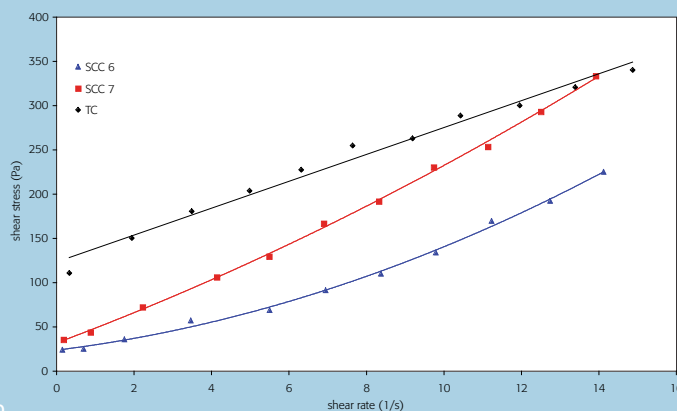
6



7



8



9

šovaná čára) a tixotropického materiálu (plná čára) je znázorněn na obr. 2 [26].

ZKOUŠKY ČERPÁNÍ V PLNÉM ROZSAHU

Uspořádání zkoušky

Zařízení určené pro zkoušku čerpání v plném rozsahu sestávalo z běžně dostupného průmyslového čerpadla betonu a dvou typů okruhů: dlouhého a krátkého. Čerpadlo na beton je pístového typu, namontované na vozidle (obr. 3), s maximálním čerpaným průtokem 150 m³/h a maximálním tlakem 95 bar. Dva písky čerpadla střídavě vtlačují beton do potrubí nebo jej nasávají ze zásobníku. Jakmile je jeden válec prázdný a tudíž druhý plný, přepne výkonný systém čerpadla spojení mezi válci a potrubím. Každý z válců má teoretický objem 83,1 l a vyprázdnění jednoho válce se nazývá zdvih.

Celková délka krátkého okruhu (obr. 4) je 25 m, z čehož první horizontální část měří 12 m, druhá část stoupá vzhůru a uzavírá okruh. Na konci okruhu je umístěn zásobník, z něhož lze odebírat vzorky a kde lze kalibrovat rychlost průtoku. Při normálním testování je ventil dna zásob-

níku otevřen, aby mohl beton proudit zpět do zásobníku čerpadla. Takto bylo provedeno mnoho testů s omezeným množstvím betonu.

Dlouhý okruh (obr. 5) má celkovou délku 105 m a je rozdělen na pět přímých horizontálních úseků a nakloněnou část. Okruh je uspořádán jako smyčka na stejném principu, jako okruh malý. Oba okruhy jsou sestaveny z ocelového potrubí s vnitřním průměrem 106 mm a tloušťkou stěny 3 mm. Některé úseky jsou vzájemně propojeny pomocí gumového těsnění a ocelových svorek.

V jednom přímém úseku dlouhého okruhu a v jediném přímém úseku okruhu krátkého jsou nainstalována čidla tlaku, která měří rozdíly tlaku v rámci určité vzdálenosti. U čidel tlaku jsou umístěny i tenzometry, které slouží jako záložní měřidla. Na vnějším povrchu potrubí jsou umístěna i čidla teploty za účelem měření teplotních změn způsobených čerpáním. Průtok se měří pomocí záznamu délky času uplynulého mezi určitým počtem zdvihů podílem výsledného objemu (= počet zdvihů * 83,1 l) a naměřeného času. Kalibrace pomocí vzorkovacího zásobníku, který je k pojez-

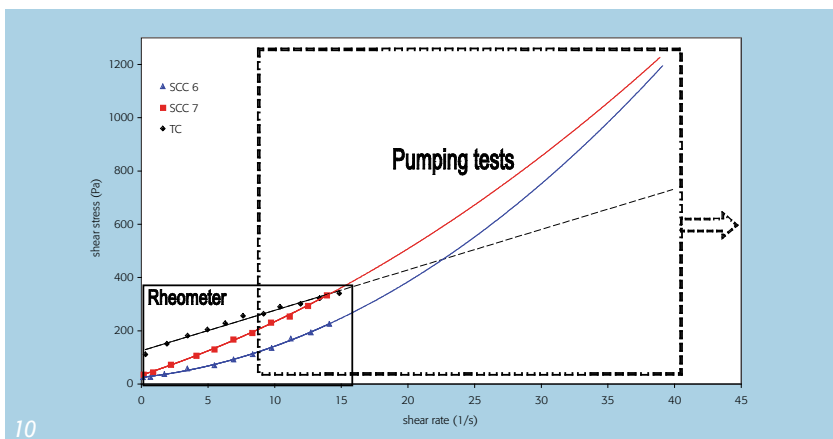
dovému mostu připevněn přes silový snímač, potvrzuje validitu metody u průtoků použitých během zkoušky.

Postup zkoušky

Před testováním se beton opatrně načerpá do potrubí. U krátkého okruhu se nevyskytly žádné problémy, nicméně u dlouhého došlo k několika případům zablokování. U krátkého okruhu se před začátkem zkoušky odejmulo prvních 250 l betonu. U dlouhého okruhu se toto množství zvýšilo na 500 l.

Běžný postup zkoušky se skládá z čerpání betonu při pěti nejnižších možných rychlostech průtoku v sestupné řadě, vždy po pěti zdvihích. Tento „cyklus“ se opakuje každých 30 min až do celkového počtu dvou až šesti cyklů. Typický výsledek hodnoty tlaku jako funkce času je uveden na obr. 6. Před každým cyklem je odebrán vzorek betonu za účelem testování reometrem Tattersall Mk-II [21] a k provedení standardních testů SCC, jako je rozlití kužele, V-funnel, ... [2] Toto pravidelné testování bylo provedeno pouze u krátkého okruhu.

Byly vypracovány i speciální testovací postupy na tixotropii, aby se zjistil vliv čer-



Obr. 6 Tlak vzhledem k času v průběhu jednoho běžného cyklu

Fig. 6 Pressure versus time during one regular cycle

Obr. 7 Speciální zkouška tixotropie: u každé rychlosti je beton nejprve čerpán delší dobu, aby bylo dosaženo rovnováhy. Poté je odebrán vzorek a následuje rychlý stupňovitý sestup z aktuální rychlosti toku na rychlost nejnižší. Poté se rychlost toku opět zvýší a všechny kroky se znovu opakují.

Fig. 7 Special thixotropy test: for each flow rate, the concrete is pumped first for a long time to reach equilibrium. After that, a sample is taken, followed by a fast stepwise decrease from the current flow rate to the lowest one. Later, flow rate is increased and all steps are repeated.

Obr. 8 Ztráty tlaku jako funkce rychlosti toku u běžného betonu (TC) (černě) a SCC (barevně), ukazují, že u SCC dochází k větším ztrátám tlaku než TC

Fig. 8 Pressure losses in function of flow rate for TC (black) and SCC (coloured), showing that SCC causes higher pressure losses than TC

Obr. 9 Reologická data pro SCC a TC k obr. 8, podle nichž má SCC vyšší tekutost než TC

Fig. 9 Rheological data for the SCC and TC of figure 8, showing that SCC is more fluid than TC

Obr. 10 Extrapolace reologických křivek na základě smykových napětí ukazují, že viskozita (a houžvnatí s rostoucím smykovým napětím – shear thickening) značně ovlivňuje čerpací tlaky na rozdíl od napětí na mezi kluzu

Fig. 10 Extrapolation of the rheological curves, based on the shear stresses shows that viscosity (and shear-thickening) influence the pumping pressures a lot, and not the yield stress

pání velkými rychlostmi na vlastnosti čerstvého SCC. Postup je znázorněn na obr. 7 a tento typ testu byl prováděn na obou okruzích. V průběhu vzorkování se pokračuje provedla kalibrace rychlosti průtoku.

BĚŽNÝ POSTUP ZKOUŠKY

Samozhutnitelný beton versus tradiční beton

Běžným postupem bylo zkoušeno několik typů SCC a TC. Na obr. 8 je znázorněna ztráta tlaku na jednotku délky v závislosti na rychlosti toku u dvou typů SCC (barevně) a TC (černě). Je zřejmé, že zejména při vyšších průtocích způsobuje SCC větší ztráty tlaku než TC. To je bezpochyby neobvyklý jev, protože SCC je tekutější než TC. Reologické vlastnosti tří betonů na obr. 8 jsou uvedeny v obr. 9, a prokazují, že SCC betony mají skutečně vyšší tekutost než TC. Např. při deformační rychlosti 10/s vykazuje SCC nižší smyková napětí než TC.

Pokud však extrapolujeme reologické údaje na základě smykových napětí, ke kterým dochází v porubí, je situace zcela odlišná. To je znázorněno na obr. 10, kde SCC vykazuje vyšší smyková napětí. To ukazuje na fakt, že během čerpání má na ztrátu tlaku značný vliv viskozita (a případné houžvnatí s rostoucím smykovým napětím – shear thickening) a nikoliv napětí na mezi kluzu. A protože viskozita SCC je obecně vyšší než viskozita TC, bude SCC vykazovat větší ztráty tlaku.

Experiment versus teorie

Princip extrapolace, který je použit v obr. 10, je velmi nebezpečným způsobem, jak ukázat vliv viskozity. Srovnání experimentálních výsledků s teoretickými výpočty prokazuje značné rozdíly. Teoretické

výsledky založené na rozšířené verzi Poiseuillovy formulace laminárního proudění při předpovědi nadhodnocují ztráty tlaku s faktorem 10 a více. Toto je s nejvyšší pravděpodobností důsledek nedodržení všech požadovaných kritérií proto, aby mohla být tato formulace použita. Jedním z kritérií je podmínka, že materiál musí zůstat během toku homogenní. Existují však tři příčiny, které homogenitu betonu při čerpání eliminují:

Geometrický efekt stěn: Protože hrubé kamenivo nemůže proniknout do stěny potrubí, vytváří se v blízkosti stěny vrstva s nižší koncentrací (hrubého) kameniva. Snížení koncentrace způsobuje snížení viskozity v této vrstvě. S klesající viskozitou roste deformační rychlost v této vrstvě, což vede k vysokému gradientu rychlosti v blízkosti stěn a následně k vyšší rychlosti toku při stejné ztrátě tlaku. Předpokládaná velikost této vrstvy je polovina maximální zrnitosti kameniva, což je v tomto případě 8mm. K tomuto jevu s určitostí dochází při tečení jakéhokoliv betonu.

Tixotropie: Protože smyková napětí a v důsledku toho i deformační rychlosti jsou největší v blízkosti stěny potrubí, bude v této oblasti docházet i k větší disperzi betonu. To má za následek i vyšší tekutost betonu kvůli snížení napětí na mezi kluzu a viskozity. Snížení viskozity způsobuje další nárůst rychlosti toku. K tomuto jevu pravděpodobně dochází v průběhu tečení, zkoumání a určení specifických hodnot je však velmi obtížné.

Dynamická segregace: Hrubé kamenivo má tendenci přesunovat se do zón s nižším smykovým napětím, následkem čehož se jemné částice chovají opačným způsobem. Tím se sníží koncentrace hrubého kameniva ještě více a rychlost toku dále vzroste. Přestože autoři nejsou plně přesvědčeni, zdali k tomuto jevu dochází v případě SCC, zmiňujeme jej z důvodů úplnosti. Toto konstatování bude plně prokazatelné, jakmile budou řádně určeny tixotropické vlastnosti materiálu nebo jakmile dokážeme přímo měřit distribuce rychlosti při toku betonu.

Kvantifikace těchto účinků je však velice podnětným úkolem, protože zmíněné účinky mají velký význam. U některých z nich, např. tixotropie, nemáme k dispozici žádné parametry popisu. Dynamická segregace je taktéž velmi obtížně kvantifikovatelná. Možným řešením je provedení numerických simulací pohybu částic

v průběhu čerpání, avšak tato možnost je zatím hubdou budoucnosti.

Teplota

V průběhu čerpání všech betonů byl naměřen nárůst teploty v potrubí. Na obr. 11 je znázorněn vývoj teploty vztahený k času u jednoho běžného testovacího cyklu. Pokaždé, když je snížena rychlost průtoku, je čas nastaven na 0. Z tohoto obrázku je patrné, že teplota roste rychleji u vyšších rychlostí průtoku. Na obr. 12 je nárůst teploty vztahen ke ztrátě tlaku, pozorovaná závislost je lineární. Další výzkum vývoje teploty během čerpání bude proveden

v budoucnu, důležitost tohoto jevu však nesmíme podcenit. Naroste-li teplota přes 30 až 35 °C, může dojít ke značným ztrátám zpracovatelnosti, čímž se omezí časový rámec ukládání.

SPECIÁLNÍ ZKOUŠKY TIXOTROPIE

Výsledky

Účelem tohoto typu zkoušky je výzkum vlivu vyšší rychlosti toku na vlastnosti čerstvého SCC. Tato zkouška byla provedena na pěti různých SCC, jeden z těchto testů byl proveden na krátkém okruhu. Postup zkoušky je znázorněn na obr. 7, kde je patrné, že pokaždé byly provedeny tři

různé kroky. Prvním krokem je čerpání SCC na relativně velkou vzdálenost při konstantní rychlosti toku, dokud se neustálila rovnováha. Něco podobného vidíme i na obr. 2: s rostoucí deformační rychlostí v čase klesá smykové napětí. Druhým krokem je vzorkování, při kterém bylo kalibrováno měření rychlosti toku. Každý vzorek byl testován reometrem Tattersall Mk-II [21], rozlítím kužele, V-funnel, byly určeny hodnoty stability na síť, hustoty a obsahu vzduchu [2]. Třetím krokem, který není přítomen u rychlosti toku č. 1, je snížení rychlosti toku v krátkých krocích z aktuální hodnoty až na hodnotu 1. Po dokončení tohoto kroku je rych-

Obr. 11 Vývoj teploty v průběhu jednoho běžného cyklu čerpání, teplota roste pomaleji při nižších rychlostech toku

Fig. 11 Temperature evolution during one regular pumping cycle, temperature increases slower with decreasing flow rate

Obr. 12 Lineární vztah mezi nárůstem teploty a ztrátou tlaku

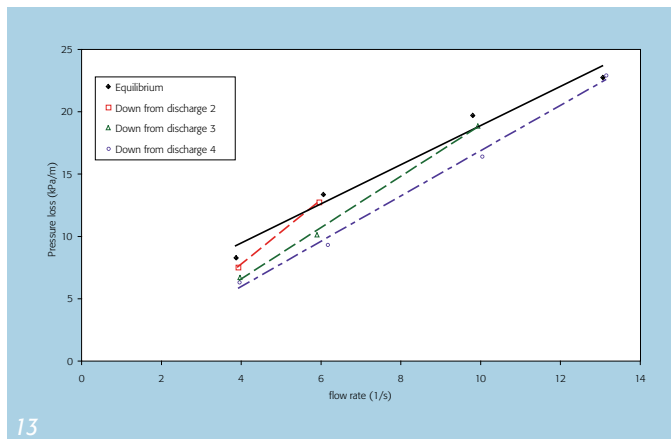
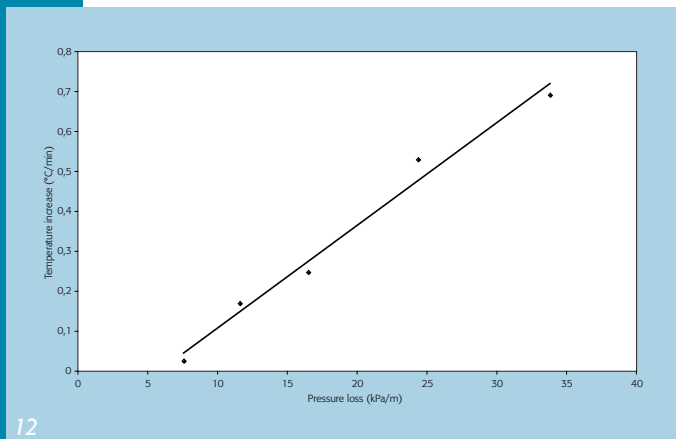
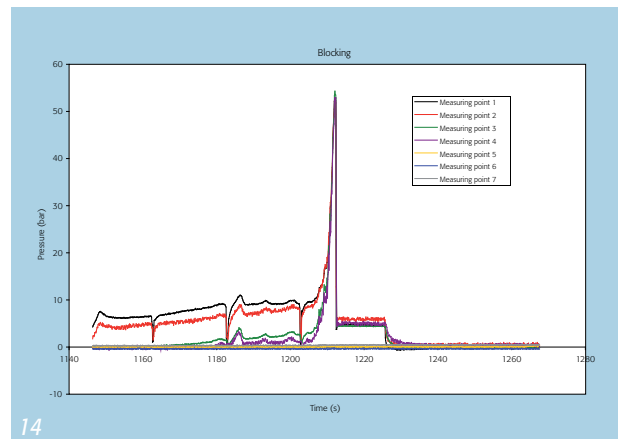
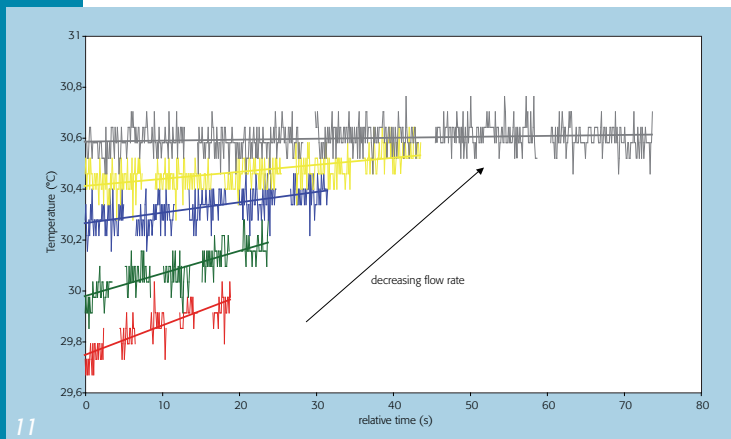
Fig. 12 A linear relationship between the temperature increase and the pressure loss

Obr. 13 Výsledky zkoušky tixotropie: ztráty tlaku při určité rychlosti toku jsou menší, pokud byla předtím použita vyšší rychlost toku

Fig. 13 Results of the special thixotropy test: the pressure losses at a certain flow rate decrease when a higher flow rate is applied before.

Obr. 14 Zablokování: první část obrázku znázorňuje nárůst tlaku v důsledku vtačování betonu do potrubí, přibližně kolem 1210 s došlo k zablokování, což vedlo k náhlému nárůstu tlaku až na 55 bar, rychlý pokles je způsoben vypnutím čerpadla

Fig. 14 Blocking: the first part of the figure shows the increase in pressure due to the insertion of the concrete in the pipes, at around 1210 s, blocking occurred, resulting in a very sudden increase in pressure up to 55 bar, the sharp decrease is due to the shut-down of the pump



lost toku opět navýšena na vyšší hodnotu a všechny kroky se opakují znovu.

Na obr. 13 jsou znázorněny výsledné ztráty tlaku – křivky rychlosti toku. Horní (černá) linie je propojením rovnováhy stavů získaná během kompletní zkoušky. Barevné křivky znázorňují klesající sekvence. Z obr. 13 můžeme vyvodit, že po aplikaci vyšší rychlosti toku se snížily ztráty tlaku při nižších rychlostech toku. To znamená, že při vyšší rychlosti toku se počet propojení mezi cementovými částicemi zmenší a SCC se stává tekutě-

ším. Výsledky z měření reometrem tento závěr potvrzují a indikují i snížení viskozity. Taktéž hodnota času naměřená v testu V-funnel klesá.

Důsledky

Zmíněný vliv tixotropie může mít z praktického hlediska několik důsledků:

SCC je navržen tak, aby mezi napětím na mezi kluzu a tixotropií byla rovnováha, přičemž kombinace těchto dvou hodnot zajišťuje odolnost proti rozměšování. Když v průběhu čerpání následkem tixot-

ropie dojde k poklesu napětí na mezi kluzu i viskozity, zvyšuje se tak nebezpečí segregace. Toto bylo prokázáno při speciální sérii zkoušek čerpání u posledního SCC. Vzorek betonu po čerpání rychlostí 1 vykazoval výsledek stability na síť okolo 10 %, přičemž tato hodnota vzrostla po zvýšení rychlosti čerpání až na 18,5 % při nejvyšší rychlosti, což ukazuje na značné nebezpečí rozměšování.

Z hydrauliky víme, že čerpací tlak je lineárně závislý na délce potrubí [27]. Pokud do hry přistupuje ještě tixotropie a čer-

Literatura:

- [1] Okamura H., Ozawa K.: Mix design for Self-Compacting Concrete, Concrete library of JSCE, No. 25 (1995), pp. 107–120
- [2] De Schutter G., Bartos P., Domone P., Gibbs J.: Self-Compacting Concrete, Whittles Publishing, Caithness (2008), 296 p.
- [3] Billberg P.: Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete – Influence of Thixotropy and Structural Behaviour at Rest, Ph-D-thesis, School of Architecture and the Built Environment, Stockholm (2006)
- [4] Assaad J., Khayat K. H.: Formwork pressure of self consolidating concrete made with various binder types and contents, ACI materials journal, july/august (2005), pp. 215–223
- [5] Flatt R. J.: Towards a prediction of super-plasticized concrete rheology, Mater. Struct. 27 (2004), 289–300
- [6] Bonen D., Deshpande Y., Olek J., Shen L., Struble L., Lange D., Khayat K.: Robustness of Self-Consolidating Concrete, Proc. of the 5th Int. Symp. on Self-Compacting Concrete, Gent (2007), pp. 33–42
- [7] Wallevik O. H.: Rheology – A scientific approach to develop self-compacting concrete, Proc. of the 3rd Int. Symp. on Self-Compacting Concrete, Reykjavik (2003), pp. 23–31
- [8] Wallevik J. E.: Rheology of particle suspensions, Ph-D-thesis, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim (2003)
- [9] Roussel N., Geiker M. R., Dufour F., Thrane L. N., Szabo P.: Computational modeling of concrete flow: a general overview, Cem. Conc. Res. 37 (2007), pp. 1298–1307
- [10] Thrane L. N., Stang H., Geiker M. R.: Flow induced segregation in full scale castings with SCC, Proc. of the 5th Int. Symp. on Self-Compacting Concrete, Gent (2007), pp. 449–454
- [11] Poppe A-M: Influence of filler on hydration and properties of Self-Compacting Concrete, Ph-D-thesis (in Dutch), Ghent University, Gent (2004)
- [12] Domone P. L.: A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, Cem. Conc. Res. 29 (2007), pp. 1–12
- [13] Desnerck P., De Schutter G., Taerwe L.: Experimental Determination of Bond Strength of Reinforcing Bars in Self-Compacting Concrete, Proc. of the 5th Int. Symp. on Self-Compacting Concrete, Gent (2007), pp. 659–664
- [14] Audenaert K.: Transport Mechanisms in Self-Compacting Concrete in relation to carbonation and chloride penetration, Ph-D-thesis (in Dutch), Ghent University, Gent (2006)
- [15] Boel V.: Microstructure of Self-Compacting Concrete in relation to gas permeability and durability aspects, Ph-D-thesis (in Dutch), Ghent University, Gent (2006)
- [16] Audenaert K., De Schutter G.: Chloride penetration in self-compacting concrete, Proc. of the 3rd Int. Symp. on Self-Compacting Concrete, Reykjavik (2003), pp. 818–825
- [17] Boel V., Cnudde V., De Schutter G., Jacobs P.: Exploring the potential of X-ray tomography in microstructural studies of cementitious systems, Proc. of the 2nd Int. RILEM Symp. on Advances in Concrete through Science and Engineering, Québec City (2006)
- [18] Kaplan D.: Pumping of concretes, Ph-D-thesis (in French), Laboratoire Central des Ponts et des Chaussées, Paris (2001)
- [19] Crepas R. A.: Pumping Concrete, techniques and applications, 3rd edition, Elmhurst (Ill.): Crepas & Associates, Inc. (1997)
- [20] Guptill N. R. et al: Placing Concrete by pumping methods, Report of ACI committee 304, American Concrete Institute (1996)
- [21] Tattersall G. H., Banfill P. F. G.: The rheology of fresh concrete, Pitman, London (1983).
- [22] Wallevik O. H.: Why is SCC different from country to country?, Proc. of the 4th Int. Symp. on Self-Compacting Concrete, Chicago (2005)
- [23] Feys D., Verhoeven R., De Schutter G.: Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh Self-Compacting Concrete, Appl. Rheol. 17:5 (2007) 56244
- [24] Feys D., Verhoeven R., De Schutter G.: Fresh self compacting concrete, a shear thickening material, Cem. Conc. Res. 38 (2008), pp. 920–929
- [25] Heirman G., Vandewalle L., Van Gemert D., Wallevik O. H.: Integration approach of the Couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer, J. non-Newtonian Fluid Mech. 150 (2008), pp. 93–103
- [26] Barnes H. A.: Thixotropy – a review, J. non-Newtonian Fluid Mech. 70 (1997), pp. 1–33
- [27] Fox J. A.: An introduction to engineering fluid mechanics, The MacMillan Press, London (1974)

stvý beton je stále dodáván do autodomíchače, tento lineární vztah se ztratí v důsledku dodatečného tlaku, který je nezbytný pro rozrušení propojení mezi částicemi cementu, aby bylo možné dosáhnout rovnovážné hodnoty.

Profil rozložení rychlostí v potrubí je sám o sobě velmi složitý, ale kvůli tixotropii se stává navíc ještě závislým na čase a na délce potrubí. Tento jev komplexitu dále zvyšuje.

V současné době se výzkum zaměřuje na odstranění tlaku na bednění způsobeného vývojem tixotropie v betonu [3][4]. Vystává však otázka, zda čerpání a následná disperze betonu toto odstranění tlaku nějak ovlivní?

Další vlivy

V průběhu čerpání neovlivňuje výsledky jenom tixotropie. Po delší době může výsledky ovlivnit i ztráta zpracovatelnosti. Další výzkum by se měl zaměřit na důležitost ztráty zpracovatelnosti a určení specifických stádií a teplot betonu.

Při čerpání bylo zaznamenáno i zvýšení obsahu vzduchu. V případě tekutého SCC má vzduch stále možnost uniknout, pokud však beton poněkud ztuhne, může se obsah vzduchu zvýšit významně. Takovýto nárůst obsahu vzduchu může ovlivnit trvanlivost betonu, proto je třeba tomuto problému věnovat zvláštní pozornost. Tyto dva vlivy byly pozorovány při provádění testů, při kterých se beton čerpá několikrát za sebou. V praxi je důležitost ztráty zpracovatelnosti a zvýšení obsahu vzduchu menší, protože beton se čerpá pouze jednou. Protože však obsah vzduchu roste rychleji při vyšších rychlostech čerpání, může tento jev být důležitý při rychlém čerpání.

Postup čerpání může být nadto ovlivněn jakýmkoliv dalšími vlivy, kterých si autoři v současné době nejsou vědomi.

NEBEZPEČÍ ZABLOKOVÁNÍ

Obsluha čerpadel tento jev dobře zná. Ve většině případů se ucpávka vytvoří zkraje čerpání nebo v zákrutech a zúženích [18]. Následky mohou být velmi závažné bez ohledu na příčinu zablokování. Při zkouškách čerpání v laboratoři došlo k několika zablokováním při zahájení čerpání. Na obr. 14 je uveden vývoj tlaků v čase, z kterého je patrné, že k zablokování dochází bez výstrahy při zvýšení tlaku z 10 na 50 bar během několika sekund. Pokud v takovémto př-

padě nějaká část potrubí tlak nevydrží, může dojít k celkovému selhání systému nebo v horším případě k poranění i smrcení obsluhy. Autoři by zde rádi zmínili, že při zahájení čerpání bylo čerpadlo nastaveno na nejnižší tlak a rychlost. Vyšší tlaky jsou ovšem také dosažitelné a v praxi se jich používá zejména k odstranění zablokování. Zvýšení tlaku však ještě více zvyšuje riziko poškození a úrazu.

JAK JE TO S TRADIČNÍM BETONEM

Nebylo by správné říci, že výsledky tohoto výzkumu neplatí pro tradiční beton. Částice cementu jsou stále jemnější a beton obsahuje stále více dalších prvků, jako je popílek, mikrosilika, disperzní činidla, proto citlivost na tixotropii v čase roste. Následkem toho jsou výše zmíněné výsledky platné i pro TC s výjimkou zvýšené odolnosti proti rozměšování. V současné době nevíme, do jaké míry ovlivňuje tixotropie beton v průběhu čerpání a to ani u SCC, ani u TC.

Pokud jde o obsah vzduchu, mají autoři dojem, který však není prokázán, že TC je přinejmenším stejně citlivý na zvýšení obsahu vzduchu během čerpání jako SCC. Bublínky vnesené při čerpání jsou navíc velice malé, takže existuje možnost, že je nelze řádně odstranit při zhutňování.

Protože důležitost všech zmíněných vlivů, jako je tixotropie, zvýšení teploty, obsah vzduchu, roste při vyšších rychlostech průtoku, radí autoři, aby se s každým betonem zacházelo opatrně a aby se nejvyšší možné rychlosti při čerpání nepoužívaly.

ZÁVĚR

Z hlediska reologie můžeme beton popsat jako Binghamovský materiál, který vykazuje napětí na mezi kluzu a plastickou viskozitu. V důsledku tixotropie a ztráty zpracovatelnosti se tyto parametry v čase neustále mění. Ve srovnání s tradičním betonem má samozhutnitelný beton nižší hodnotu napětí na mezi kluzu, je však požadována vyšší viskozita, aby se zabránilo rozměšování.

Čerpání SCC způsobuje větší ztráty tlaku než čerpání TC, a to zejména při vyšších rychlostech, protože viskozita má na ztrátu tlaku značný vliv na rozdíl od napětí na mezi kluzu. Výsledkem porovnání teoretických výpočtů a výsledných údajů z experimentů je nadhodnocení předpovědi ztráty tlaku s faktorem 10. Toto je s největší pravděpodobností způsobeno

heterogenitou betonu během toku, která má příčinu v geometrickém účinku stěn, tixotropii a možné dynamické segregaci.

Tixotropie způsobuje to, že ztráty tlaku při určité rychlosti jsou nižší, pokud bylo předtím provedeno čerpání s vyšší rychlostí. Vyšší rychlost čerpání způsobuje vyšší tekutost betonu. V důsledku tixotropie může poklesnout odolnost proti rozměšování, tlak ztrácí lineární závislost na délce potrubí, rozdělení rychlosti je krajně složitě a čas potřebný k odstranění tlaku na bednění může být pozmeněn.

Při čerpání betonu mohou mít vliv i další efekty, jako je ztráta zpracovatelnosti a obsah vzduchu.

K zablokování může dojít při zahájení čerpání nebo provozu, což může mít za následek velmi náhlý nárůst tlaku. Následkem toho vzniká velmi nebezpečná situace, která může vést nejen k selhání některé části systému, ale také ke zraněním a to i smrtelným.

Hlavním závěrem tohoto příspěvku je doporučení autorů, aby se snížily rychlosti čerpání za účelem zachování dobré kvality betonu.

Autoři by rádi vyjádřili poděkování Fondu vědeckého výzkumu (FWO) ve Flandrách za finanční podporu a technickému personálu v Mangelově laboratoři i v laboratoři hydrauliky za přípravu a provedení zkoušek čerpání betonu v plném rozsahu. Náš další dík patří českému „Betonářskému časopisu“ za příležitost podělit se o naše zkušenosti a za překlad.

*Dimitri Feys
Magnet Laboratory for Concrete Research
Department of Structural Engineering
Faculty of Engineering
Ghent University, Belgium
Hydraulics Laboratory
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Ghent University, Belgium
e-mail: Dimitri.Feys@UGent.be*

*Ronny Verhoeven
Hydraulics Laboratory
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Ghent University, Belgium*

*Geert de Schutter
Magnet Laboratory for Concrete Research
Department of Structural Engineering
Faculty of Engineering
Ghent University, Belgium*