

EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ PEVNOSTI VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU V TROJOSÉM TLAKU ■ EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE STRENGTH OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE UNDER TRIAXIAL COMPRESSION

Filip Vogel, Radoslav Sovják,
Petr Máca, Birgit Beckmann

Cílem tohoto příspěvku je popsat trend zvyšující se pevnosti vysokohodnotného betonu při různých úrovních rostoucího bočního tlaku. Vysokohodnotné betony je možno charakterizovat jako cementový kompozitní materiál s vysokou pevností v tlaku, nízkým poměrem vody k pojivu, velmi vysokým obsahem cementu a mikrosiliky a absencí kameniva se zrny většími než 4 mm. Takový beton má vynikající materiálové charakteristiky, jakými jsou samozhutnitelnost, mimořádně vysoké mechanické vlastnosti a nízká permeabilita, která se projevuje výbornou odolností proti vlivům okolního prostředí. ■

The aim of this paper is to describe the trend of increasing strength of high performance concrete under increasing levels of confinement pressure. High performance concrete can be described as a cementitious composite material with high compressive strength, low water-binder ratio, high silica-fume and cement content and with no presence of aggregate larger than 4 mm. This material possesses superior properties such as self-consolidating workability, high compressive and tensile strength, increased ductility and low permeability.

V dnešním moderním stavitelství jsou často navrhovány velice štíhlé konstrukční prvky, na které jsou kladey velmi vysoké nároky, např. vysoká pevnost v tlaku a tahu, odolnost proti vlivům vnějšího prostředí a vysoká schopnost absorpce energie. Ty-

to nároky dobře splňují pokročilé kompozitní materiály, kterými jsou právě vysokohodnotné betony. I přesto, že se v takovýchto konstrukcích často vyskytují víceosé stavy napjatosti, používá se ve velkém množství případů pro jejich návrh a posouzení pevnost betonu v jednoosém tlaku.

Cílem tohoto příspěvku je rozšířit povědomí o chování vysokohodnotných betonů při víceosém stavu napjatosti a kvantifikovat pevnosti vysokohodnotných betonů při různých úrovních bočního tlaku. Výsledky uvedené v této studii mohou sloužit jako cenné informace pro statiky při tvorbě a upřesňování materiálových modelů pro betony vysokých pevností.

Zkoušení vysokohodnotného betonu v trojosém tlaku bylo provedeno dvěma způsoby.

Prvním bylo zkoušení betonových vzorků válcového tvaru v triaxiální komoře, kde (obr. 1a) na plášť válcového vzorku působila kapalina natlakovaná na požadovaný boční tlak. Na podstavu válce bylo přenášeno napětí pomocí hydraulického lisu. Válcové zkušební vzor-

ky pro triaxiální komoru měly 100 mm v průměru a byly 200 mm vysoké.

Druhým způsobem bylo zkoušení betonových krychlí v triaxiálním lisu (obr. 1b), kde na každou z šesti stran krychle působil zatěžovací lis. Pro zkoušení betonu v triaxiálním lisu byly vyrobeny krychle s hranami o délce 100 mm.

PŘÍPRAVA SMĚSI

Vysokohodnotný beton zkoumaný v této práci byl vyvinut v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze. Hlavní myšlenkou při návrhu vysokohodnotného betonu bylo vyrobit beton pouze z materiálů lokálně dostupných v České republice bez použití speciálních postupů při míchání betonové směsi, ale i bez speciálních nároků na ošetřování v raném stáří betonu [1].

Tento vysokohodnotný beton se svým specifickým složením velice odlišuje od běžných betonů, neboť se zde vůbec nenachází hrubé kamenivo s velikostí zrna větší než 4 mm, ale pouze jemnozrnné kamenivo o maximální velikosti zrna 0,8 mm. Dále se v tomto vysokohodnotném betonu na-

Obr. 1 a) Triaxiální komora (Experimentální centrum, ČVUT v Praze), b) triaxiální lis (Otto-Mohr-Laboratory, TU Dresden) ■ Fig. 1 a) Triaxial chamber (Experimental centre, CTU in Prague), b) multiaxial testing machine (Otto-Mohr-Laboratory, TU Dresden)

Obr. 2 Přípustná oblast napětí při víceosém stavu napjatosti ■ Fig. 2 Failure surface for multiaxial stress states

Obr. 3 Historie napětí, a) v triaxiální komoře, b) v triaxiálním lisu ■ Fig. 3 Stress path a) in triaxial chamber, b) in multiaxial testing machine



cháží křemičitá moučka a velké množství mikrosiliky. Jeden z dalších znaků tohoto vysokohodnotného betonu je značný obsah cementu (až 800 kg/m³) a malé množství vody (vodní součinitel byl 0,22). Zpracovatelnost byla zajištěna superplastifikačními přísadami.

Při stanovení pevnosti v triaxiálním tlaku nebyla použita žádná rozptýlená výztuž ve formě drátků, neboť bylo prokázáno, že rozptýlená výztuž nemá na triaxiální pevnost žádný zásadní vliv [2].

Takto navržený vysokohodnotný beton je velmi citlivý na správné dodržování technologických postupů, jako je postup míchání, přesné časové intervaly pro míchání jednotlivých složek, ukládání do forem, hutnění a ošetřování.

CHOVÁNÍ BETONU V TROJOSÉM TLAKU

Význam triaxiální zkoušky spočívá především v prostorovém zatížení vzorku, které lépe simuluje skutečné zatížení materiálu v konstrukci, než klasické jednoosé zkoušky pevnosti.

Obecně lze chování betonu ve víceosém napětí popsat několika způsoby. Nejznámější je vykreslení křivky určující přípustnou oblast napětí pro rovinnou napjatost. Pro materiály s vnitřním třením, jako je beton, se používá Drucker-Pragerův nebo Mohr-Coulombův model. V případě obecné napjatosti, kdy jsou všechny tři složky napětí různé od nuly, vznikne obecné těleso vymezující přípustnou oblast napětí (obr. 2). Mohr-Coulombův model má přípustnou oblast napětí ve tvaru šesti-bokého jehlanu. Drucker-Pragerův model má přípustnou oblast napětí ve tvaru rotačního kužele.

Vzhledem k použité měřicí technice během experimentálního programu, kterou je triaxiální komora, nebylo možné získat takové výsledky, které by umožnily sestavení trojrozměrné oblasti přípustného napětí. Pro sestavení přípustné oblasti napětí pro obecnou napjatost má triaxiální komora velmi limitující pracovní rozsah a také s její pomocí není možné docílit rovinné napjatosti nebo různých bočních tlaků.

Pevnost v trojosém tlaku byla v této studii stanovena jako trend zachycující pevnost v tlaku v jednom směru (σ_1) v závislosti na bočním tlaku ze dvou zbylých směrů (σ_2 a σ_3). V případě víceosé napjatosti je možné si tento trend představit jako řez obecnou oblastí přípustných napětí za předpokladu stejných bočních tlaků ($\sigma_2 = \sigma_3$).

EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Pro zkoušení válcových vzorků ve víceosém napětí byla použita triaxiální komora dostupná na Stavební fakultě ČVUT v Praze. V této triaxiální komoře byly zkoušeny válcové vzorky o výšce 200 mm a průměru 100 mm.

Betonové válce musely být před vlastní zkouškou upraveny. Nejprve byla zaříznuta vrchní nerovná podstava válce na pile a následně byl na plášť válce nanesen penetrační nátěr a stěrková hydroizolace. Plášť válce byl takto ošetřen z důvodu zabránění pronikání tlakového media (oleje) v triaxiální komoře do struktury betonu. Bylo ověřeno, že tato úprava nemá na tlakovou pevnost betonu žádný vliv.

Použitá triaxiální komora vyvozuje napětí (σ_1) ve svislém směru pomocí hydraulického lisu a ve vodorovných směrech ($\sigma_2 = \sigma_3$) je napětí vyvíjeno pomo-

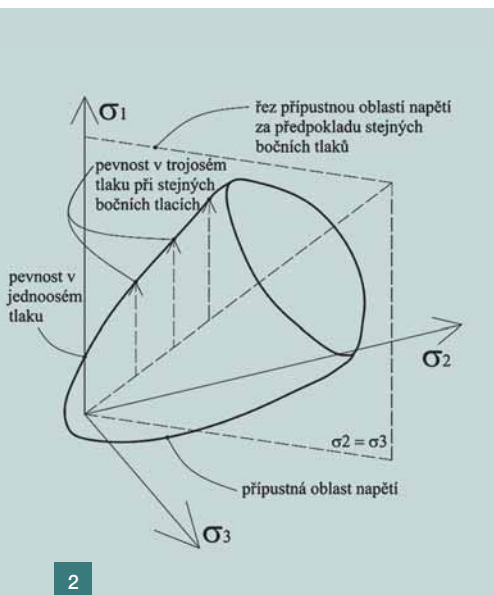
ci minerálního oleje. Celkem byly připraveny čtyři série válcových vzorků, které byly zkoušeny ve čtyřech úrovních bočního komorového tlaku – 0, 10, 20 a 30 MPa. Série vzorků zkoušených při nulovém bočním napětí byly zkoušeny pouze v lisu bez použití triaxiální komory.

Po připojení přírodní hadice a datových kabelů byl vzorek v triaxiální komoře předepnut přitížením pomocí spuštění ocelového přičníku lisu. Dalším krokem bylo naplnění triaxiální komory olejem a natlakování komory na požadovaný boční tlak. Po natlakování komory bylo spuštěno zatěžování válcového vzorku, a tím se začalo zvyšovat svislé napětí (σ_1) působící na vzorek (obr. 3). Boční komorový tlak ($\sigma_2 = \sigma_3$) zůstával během zkoušky konstantní. Vývoj síly byl řízen pomocí přírůstku deformace o velikosti 0,005 mm/s až do úplného porušení vzorku.

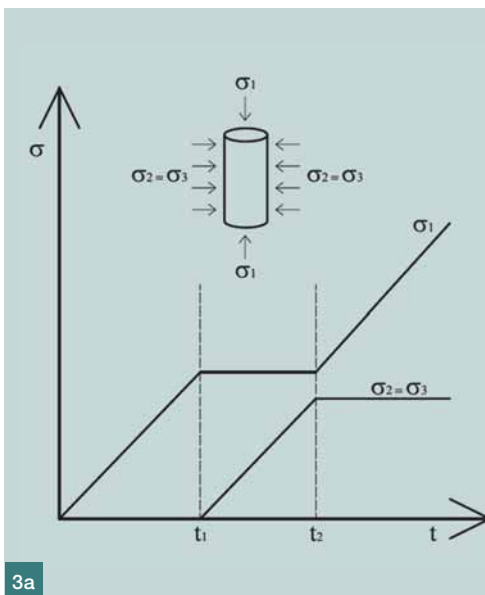
Pracovní hodnoty použitelného bočního tlaku v triaxiální komoře a maximální kapacita lisu (2 500 kN) byly pro zkoumání betonů vysokých pevností částečně omezující. Z tohoto důvodu bylo využito možnosti použít triaxiální lis na Technické univerzitě v Drážďanech, který má maximální kapacitu 5 000 kN.

V triaxiálním lisu se na rozdíl od triaxiální komory zkouší betonové vzorky ve tvaru krychlí s délkou hrany 100 mm. Na každou ze stran krychle vyvíjí napětí jeden lis. Na rozdíl od triaxiální komory nemusí být obě napětí na boční strany stejná, ale lze na zkušební krychli vyvozovat mnoho kombinací napětí. Podrobný způsob měření na tomto přístroji popisuje Hampel et al. ve své práci [3].

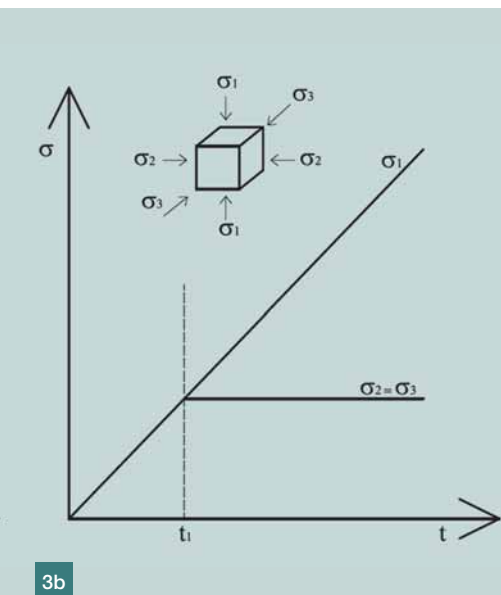
V našem experimentálním programu byl použit triaxiální lis k dosažení větších bočních tlaků působících



2



3a



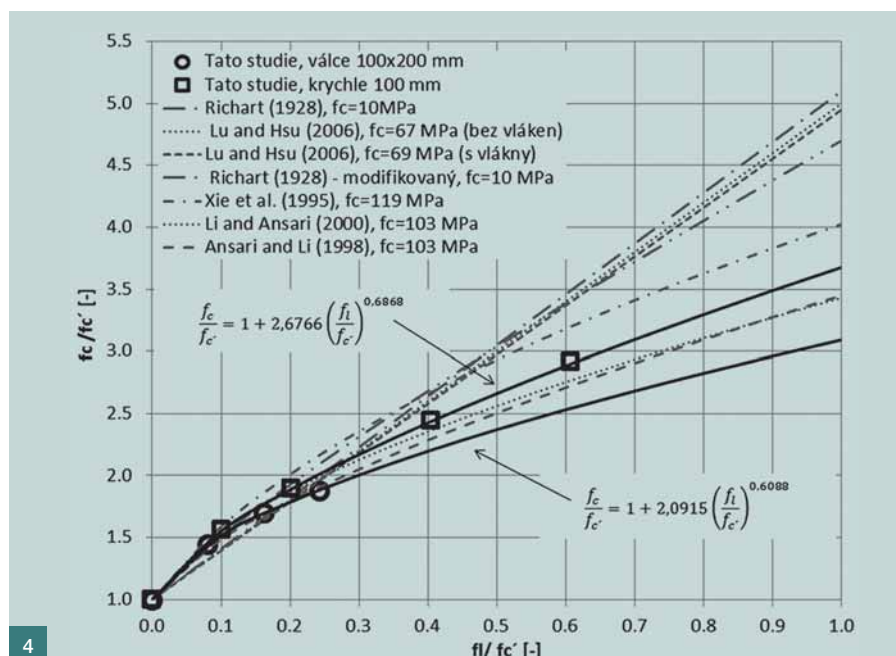
3b

Tab. 1 Přehled průměrných hodnot ze zkoušek na válci v triaxiální komoře
 Tab. 1 Test results of triaxial cylinder compressive strength

Komorový tlak f_1 [MPa]	Mez pevnosti f_c [MPa]	Směr. odchylka [MPa]	Počet vzorků	f_1/f'_c [-]	f_c/f'_c [-]
0	123 (f'_c)	5,6	3	0	1
10	178	7,3	3	0,08	1,45
20	209	0,4	2	0,16	1,7
30	231	9,3	3	0,24	1,88
				$\frac{f_c}{f'_c} = 1 + 2,0915 \left(\frac{f_1}{f'_c} \right)^{0,6088}$	

Tab. 2 Přehled průměrných hodnot ze zkoušek na krychlich v triaxiálním lisu
 Tab. 2 Test results of triaxial cube compressive strength

Boční tlak f_1 [MPa]	Mez pevnosti f_c [MPa]	Směr. odchylka [MPa]	Počet vzorků	f_1/f'_c [-]	f_c/f'_c [-]
0	148 (f'_c)	1,3	3	0	1
15	231	4,3	3	0,1	1,56
30	280	2,2	3	0,2	1,89
60	362	2,4	3	0,4	2,44
90	432	0,2	2	0,61	2,91
				$\frac{f_c}{f'_c} = 1 + 2,6766 \left(\frac{f_1}{f'_c} \right)^{0,6868}$	



na krychli, než bylo možné dosáhnout v triaxiální komoře. Po vložení zkušební krychle do lisu začalo zatěžování. Všechny lisy začaly vyvíjet stejné napětí na všechny strany krychle. V momentě dosažení předepsaného tlaku ze dvou směrů ($\sigma_2 = \sigma_3$) bylo toto napětí zafixováno a zvyšovalo se pouze napětí ve třetím směru (σ_1), (obr. 3).

VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V tab. 1 a 2 jsou vypsané získané výsledky z experimentálního programu v triaxiální komoře a triaxiálním lisu. V tabulce jsou vždy uvedeny průměrné hodnoty pro celou skupinu vzorků zkoušených při stejném bočním tlaku. Výsledky jsou rozděleny do skupin podle bočního tlaku. Ve druhém sloupci je

uvedena hodnota maximálního napětí v tlaku v okamžiku porušení.

Cílem vyhodnocení výsledků je zachytit a popsat trend vývoje maximálního tlakového napětí v okamžiku porušení v závislosti na bočním tlaku v triaxiální komoře a triaxiálním lisu.

Protože pevnost betonu v trojosém tlaku závisí na stejných vlastnostech jako pevnost v jednoosém tlaku, byl vývoj pevnosti v trojosém tlaku popsán na základě pevnosti jednoosé. Pro takového zhodnocení byly použity dva parametry. Prvním parametrem byl poměr komorového tlaku (f_1) a meze pevnosti v prostém tlaku (f'_c). Druhým použitým parametrem byl poměr napětí ve vzorku v okamžiku porušení (f_c) a meze pevnosti v prostém tlaku (f'_c). Oba parametry

Literatura:

- [1] Maca P., Zatloukal J., Konvalinka P.: Development of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete mixture, In Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA), 2012 IEEE Symposium, pp. 861–866. IEEE, 2012
- [2] Lu X., Hsu C. T.: Behavior of high strength concrete with and without steel fiber reinforcement in triaxial compression, Cem. Concr. Res. 36 (2006) 1679–1685
- [3] Hampel T., Speck K., Scheerer S., Ritter R., Curbach M.: High-Performance Concrete under Biaxial and Triaxial Loads, Journal of Eng. Mech. 135 (2009) 1274–1280
- [4] Richart F. E.: A study of the failure of concrete under combined compressive stresses, University of Illinois Engineering Experiment Station Bulletin. 185 (1928)
- [5] Li Q., Ansari F.: High-strength concrete in triaxial compression by different sizes of specimens, ACI Mater. J. 97 (2000)
- [6] Xie J., Elwi A., MacGregor J.: Mechanical properties of three high-strength concretes containing silica fume, ACI Mater. J. 92 (1995)
- [7] Ansari F., Li Q.: High-strength concrete subjected to triaxial compression, ACI Mater. J. 95 (1998)

Obr. 4 Vývoj pevnosti vysokohodnotného betonu v závislosti na bočním tlaku
 Fig. 4 Test results of triaxial compressive strength

try jsou vhodné pro vyhodnocení výsledků a především jsou univerzálně používány i v mnoha zahraničních studiích na obdobné téma [2 až 7].

Na naměřených hodnotách pro oba typy vzorků lze pozorovat vzrůstající trend, který lze nejlépe aproximovat pomocí metody nejmenších čtverců mocninou funkcí (obr. 4).

ZÁVĚR

Válcové vzorky zkoušené v triaxiální komoře byly zkoušeny až do hodnoty bočního tlaku 30 MPa, což odpovídalo 24% pevnosti v prostém tlaku. Při této hodnotě bočního tlaku byla naměřena průměrná pevnost vysokohodnotného betonu 231 MPa.

V triaxiálním lisu byly zkoušené krych-

**NOVÁK &
PARTNER**INŽENÝRSKÁ
PROJEKTOVÁ
KANCELÁŘNOVÁK & PARTNER, s.r.o.
Perucká 2481/5, 120 00 Praha 2
tel.: +420 221 592 050, tel.: +420 221 592 053
e-mail: info@novak-partner.cz
www.novak-partner.cz

Firemní prezentace

PU 2013
Povrchové úpravy
ve stavebnictvíKulturní centrum Novodvorská, Praha 4
18. a 19. září 20131. ročník odborné konference **Povrchové úpravy ve stavebnictví 2013**

- Normalizace, věda a výzkum
- Nátěry (na beton, ocel, dřevo a další podklady)
- Povrchové úpravy v interiérech
- Povrchové úpravy v exteriéru
- Fasádní a zateplovací systémy

- Pohledové betony
- Střešní krytiny
- Nová progresivní technická zařízení v povrchových úpravách ve stavebnictví
- Povrchové úpravy z pohledu památkové ochrany

V Rovinách 123, 140 00 Praha 4
e-mail: konference@konferencepovrchoveupravy.cz
tel/fax: +420 244 401 879, www.betonconsult.cz

Sekretariát konference

BETONCONSULT®Odborný garant
Doc. Ing. Jiří Dohnálek, CSc.
e-mail: jiri.dohnalek@betonconsult.cz,
tel.: +420 602 324 116**www.konferencepovrchoveupravy.cz**

Firemní prezentace

le až do hodnoty bočního tlaku odpovídající 61 % pevnosti v jednoosém tlaku. Při této hodnotě bočního tlaku byla naměřena průměrná pevnost 432 MPa. Z důvodu maximální kapacity zkušebního lisu (500 MPa), bylo zkoušení na této úrovni bočního tlaku ukončeno. U všech vzorků zkoušených ve víceosém stavu napjatosti byl pozorován smykový mód porušení, který je charakteristický omezeným počtem trhlin s rovnoběžnou orientací se středním hlavním napětím.

Hodnoty maximálních tlakových napětí byly vždy normovány příslušnými hodnotami pevností v jednoosém tlaku. Naměřená data vykazují dobrou shodu s obdobnými studiemi vysokohodnotných betonů a nejvyšší míru spoleh-

livosti při aproximaci mocninou funkcí. Při bočním tlaku rovném pevnosti v jednoosém tlaku je s použitím stanovených mocninných funkcí maximální očekávaná pevnost stanovena pro válece jako 3,09 a pro krychle jako 3,68 násobek pevnosti v jednoosém tlaku. Přípustná oblast napětí u vysokohodnotných betonů tak spadá mnohem níže než u betonů běžných pevností, a to zejména v případě vyšších bočních tlaků.

Tento příspěvek byl vypracován za podpory Ministerstva vnitra České republiky jako projekt číslo VG20102014003. Autoři rovněž oceňují podporu techniků Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT v Praze, zaměstnanců Otto-Mohr-Laboratory na TU Dresden a studentů, kteří se na řešení projektu podíleli.

Ing. Filip Vogel
e-mail: filip.vogel@fsv.cvut.cz

Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.
e-mail: sovjak@fsv.cvut.cz

Ing. Petr Máca
e-mail: petr.maca@fsv.cvut.cz

všichni: Fakulta stavební ČVUT
v Praze
Experimentální centrum

Dipl.-Ing. Birgit Beckmann
Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden
e-mail: birgit.beckmann@tu-dresden.de

Text článku byl posouzen odborným lektorem.