含水率及加载速率对纤维增韧喷射 混凝土弯曲韧性的影响

苏安双1, 宁逢伟1, 韩旭东2, 丁建形1, 蔡跃波1

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081)

摘要:试验中观察到含水率及加载速率对钢纤维、粗合成纤维增韧喷射混凝土弯曲韧性测试中的脆断概率影响显著,为此,研究了这2个试验条件对弯曲韧性测试的影响.试件在(20±2)℃、(60±5)%相对湿度条件下分别干燥0,16,24及72h,获得不同程度的干湿状态;然后按照ASTM C1609及 CECS 13的三分点加载,以0.05mm/min加载速率测试弯曲韧性.对于干燥时间分别为24和72h的试件,以0.05,0.10及0.20mm/min加载速率分别测试其弯曲韧性.结果表明,随着含水率降低,第一峰值弯曲强度明显降低;未经干燥的水饱和试件弯韧试验中均发生脆断,但经干燥非饱和试件的特定挠度下残余弯曲强度、弯曲韧性 *T*_{100,20}随含水率降低而呈现降低趋势.纤维增韧喷射混凝土第一峰值强度、残余弯曲强度、弯曲韧性随加载速率提高而增大;配合比相同时,相对含水率较高,上述抗弯性能随加载速率提高而增大的趋势更为明显;其原因可以解释为受孔隙中自由水 Stefan 效应引发黏聚力作用.

关 键 词:纤维增韧喷射混凝土;弯曲韧性;含水率;加载速率;粗合成纤维

中图分类号: TU528.572 文献标志码: A 文章编号: 1009-640X(2013)05-0046-08

喷射混凝土被广泛应用于隧道、洞室及地下工程的支护.近年来,工程界经常使用钢纤维、粗合成纤维增韧的方法,提高喷射混凝土的抗拉、抗剪、抗弯、抗疲劳及抗冲击性能,这种情况在具有高地应力、高岩爆风险的支护施工中尤为常见.与素混凝土相比,纤维增韧混凝土具有更高的弯曲韧性^[1].纤维增韧混凝土弯曲韧性测试方法的国内外标准包括 CECS 13:2009、JSCE-SF4 及 ASTM C1609^[2-4].按照上述标准,从材料和配合比角度针对纤维增韧喷射混凝土(FRSC)弯曲韧性影响因素的试验研究不断展开^[5-9].然而,含水率与加载速率这 2 个试验条件对 FRSC 弯曲韧性影响的相关研究却极为少见.

对于进行弯曲韧性测试的试件的含水率,CECS 13:2009、JSCE-SF4 及 ASTM C1609 均要求将试件从标 准养护条件下取出后,立即进行弯曲韧性测试,以防止水分散失.参照这一规定,笔者进行了若干组 FRSC 弯 曲韧性测试.结果表明,试件在测试过程中发生脆断的概率较高.一些相关研究则指出,在进行弯曲韧性测试 之前,混凝土试件须在干燥环境条件下放置 3~4 h^[8-9].由此可见,含水率可能在很大程度上影响 FRSC 的弯 曲韧性测试结果,需要对此开展研究.

对于弯曲韧性测试过程中的加载速率,ASTM C1609、JSCE-SF4 及 CECS 13:2009 的规定分别为 0.05 ~ 0.10 mm/min,0.10 ~ 0.20 mm/min 和 0.10 mm/min.由于加载速率会影响混凝土的强度测值,因而加载速率 也可能对弯曲韧性测值产生影响.笔者进行的初步试验结果也表明,在较高的加载速率下,粗合成 FRSC 试 件在弯韧测试过程中更易发生脆断.

本文参照 CECS 13:2009 及 ASTM C1609,分别在 0.05,0.10 及 0.20 mm/min 加载速率条件下,测试了 经过不同干燥处理的粗合成纤维、钢纤维增韧喷射混凝土的弯曲韧性. 以第一峰值弯曲强度、特定挠度下残

收稿日期: 2013-02-20

作者简介:苏安双(1980-),男,辽宁铁岭人,工程师,博士,主要从事混凝土材料研究. E-mail: assu@nhri.cn 通信作者:丁建彤(E-mail: jtding@nhri.cn)

余弯曲强度及弯曲韧性为考核指标,考察了含水率及加载速率对粗合成纤维、钢纤维增韧喷射混凝土弯曲韧性的影响.

1 原材料及配合比

1.1 原材料

水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,其物理力学性能指标见表 1. 特种掺合料采用市售产品,该产品主要成分为高 SiO₂ 含量的掺合料与高效减水剂,其平均粒径 D(4,3)为 128 nm,比表面积为 21.6×10³ m²/kg. 增韧纤维采用 2 种市售聚丙烯粗合成纤维,以及 1 种市售端钩型钢纤维,生产厂家提供的性能指标见表 2. 速凝剂采用市售无碱液体速凝剂,掺量为水泥的 8%时,按照 JC/T 477 标准检测的初凝时间 3.3 min,终凝时间 8.5 min.细骨料采用大理岩人工砂,细度模数 2.8,石粉含量 12.5%,饱和面干吸水率 1.3%. 粗骨料采用 最大粒径 15 mm 的大理岩人工米石.

Tab. 1 Mechanical properties of cement									
水泥品种	密度/	比表面积/	标准稠度	凝结时间/min		抗折强度/ MPa		抗压强度/ MPa	
	$(g \cdot cm^{-3})$	$(m^2\boldsymbol{\cdot}kg^{-1})$	用水量/ %	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
P • 0 42.5	3.11	340	26.0	140	215	6.7	8.4	30.3	53.0

表1 水泥物理力学性能

表 2 粗合成纤维及钢纤维性能 Tab 2 Properties of macro synthetic and steel fibers

		rub.2 rropon	les of indero synthetic	und steer moen		
编号	类型	长度/ mm	当量直径/mm	长径比	抗拉强度/ MPa	初始模量/ GPa
PPF1	聚丙烯粗合成纤维	38	1.00	38	488	5.6
PPF2	聚丙烯粗合成纤维	30	0.81	37	474	6.0
SF	钢纤维	35	0.55	65	1 250	200

1.2 配合比

FRSC 配合比见表 3. 其中,钢纤维的体积掺量为 0.5%, 粗合成纤维体积掺量为 0.9%; 特种掺合料掺量 为 10% (外掺); 速凝剂掺量为水泥质量的 4%; 砂率为 60%; 水胶比=水/(水泥+特种掺合料)为 0.44.

```
表3 纤维增韧喷射混凝土配合比
```

	ナ肪レ	动变/ 01	材料用量/ (kg ⋅m ⁻³)							
细亏	小放比	119年/%	水泥	水	砂	米石	钢纤维	粗合成纤维	特种掺合料	速凝剂
SC-PPF1	0.44	60	419	201	1 006	670	/	8 (PPF1)	41.9	1.68
SC-PPF2	0.44	60	419	201	1 006	670	/	8(PPF2)	41.9	1.68
SC-SF	0.44	60	419	201	1 006	670	40	/	41.9	1.68

Tab. 3 Mix proportions of fiber reinforced shotcrete

2 试验研究

2.1 搅拌与成型

参照美国硅粉协会推荐的硅粉混凝土的搅拌顺序^[10],确定振动成型的掺加特种掺合料混凝土的搅拌工 艺:约一半的拌合水+粗骨料+特种掺合料,搅拌3 min;加入水泥等其他胶凝材料,搅拌3 min;加细骨料+粗 合成纤维/钢纤维+剩余的拌合水,搅拌3 min.在上述搅拌程序完成之后,考虑现场实际施工条件,为确保试 验程序尽量模拟现场施工操作、考察喷射时拌合物性能对喷射混凝土性能影响规律、如实反映胶凝材料水化 后加入速凝剂的效果,将拌合物静置 30 min,然后再加无碱速凝剂.无碱速凝剂推荐掺量为胶凝材料的 8%, 此掺量下混凝土拌合物无法振动成型.试验表明,满足振动成型前提下,速凝剂最大掺量为4%.故按此掺量加入无碱速凝剂,搅拌30s,出机成型.

2.2 干燥处理

试件拆模后,标准养护至28 d. 随后,将试件置于标准干缩试验条件下分别干燥0,16,24 及72 h. 选用这样的干燥时间,一方面考虑到试件内部含水率的变化主要发生在干燥初期,另一方面尽可能消除龄期增长对试件弯曲性能的影响.将经过不同干燥处理的试件在105℃下分别烘干至恒重,测试其相对含水率,按式(1) 计算.

$$W = \frac{(m_o - m_c) - (m_o - m(t))}{(m_o - m_c)} \times 100\%$$
(1)

式中:W为相对含水率(%); m_{o} 为28d标准养护后试件初始质量(g); m_{o} 为试件烘干至恒重后质量(g);t为干燥时间(h);m(t)为经过t时间干燥后试件的质量(g).

2.3 弯曲韧性测试

试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm. 参照 ASTM C1609 及 CECS 13:2009 标准,采用进口自动伺服控

制抗弯试验机,测试弯曲韧性.试验采用三分点加载方式,跨 距为300 mm,加载速率分别为0.05,0.10及0.20 mm/min. 荷载-挠度曲线通过自动数据采集系统获取.

典型荷载-挠度曲线如图 1 所示. 依据 ASTM C1609,确 定第一峰值荷载 P_1 、特定挠度残余荷载 $P_{100,0.50}$, $P_{100,1.0}$ 及 $P_{100,2.0}$;通过计算获得 $T_{100,2.0}$. 其中 $P_{100,0.50}$, $P_{100,1.0}$ 及 $P_{100,2.0}$ 分别为宽和高均为 100 mm 的棱柱体试件在弯韧测试过程中 挠度达到 0.5,1.0 及 2.0 mm 时对应的荷载;由 P_1 , $P_{100,0.50}$, $P_{100,1.0}$ 及 $P_{100,2.0}$ 计算的强度分别为第一峰值强度 f_1 ,以及挠 度分别为 0.5,1.0 和 2.0 mm 时对应的残余弯曲强度 $f_{100,0.50}$, $f_{100,1.0}$, $f_{100,2.0}$. $T_{100,2.0}$ 为荷载-挠度曲线在(0~2.0) mm 挠度区间内荷载-挠度曲线的积分面积.



Fig. 1 First-peak load, residual load at prescribed deflection and flexural toughness $T_{100,2.0}$ determined according to ASTM C1609

3 结果分析与讨论

3.1 含水率的影响

经干燥后试件的相对含水率见表4.结果表明,随着干燥时间延长,3组混凝土相对含水率逐渐降低,且 0~16h的降低速率明显高于0~24h及0~72h的降低速率,表明混凝土内部水分散失主要发生在干燥初 期;经过相同干燥时间,2组聚丙烯纤维增韧混凝土相对含水率基本相同,均高于钢纤维增韧喷射混凝土,表 明相同干燥条件下,钢纤维增韧喷射混凝土较聚丙烯纤维增韧喷射混凝土更易失水.

已有研究结果表明,聚丙烯纤维体积掺量为0.1%时,即可显著提高透水压力及抗渗等级;而钢纤维体积掺量为0.6%时,透水压力及抗渗等级并未提高,仅是渗水高度小幅降低^[11].渗透性的降低,在一定程度上阻碍了聚丙烯纤维混凝土在干燥环境下的水分散失.

	Tab. 4 Relative moist	ure content of FRSC after v	arious drying durations				
心日							
细亏	干燥0h	干燥 16 h	干燥 24 h	干燥 72 h			
SC-PPF1	100	97.4	97.0	95.7			
SC-PPF2	100	97.4	97.0	95.9			
SC-SF	100	96.9	96.5	95.0			

表4 不同干燥时间后纤维增韧喷射混凝土相对含水率

C DD C C

在 0.05 mm/min 加载速率下,不同相对含水率的 FRSC 的第一峰值强度 f₁ 见图 2.可见,3 组 FRSC 在相对含水率降低 4% ~5% 时,第一峰值强度降低了 38% ~50%,即第一峰值强度随着含水率的减少明显降低;在最初干燥 16 h 内,相 对含水率降低 3% 左右,第一峰值强度降低 25% ~40%,表明干燥初期第一峰值强度降低最为明显,这与相对含水率的明显降低相对应;在相对含水率为 100% 时,聚丙烯纤维增韧喷射混凝土第一峰值强度达到甚至超过钢纤维增韧混凝土; 干燥失水后,后者的第一峰值强度高于前者.



在 0.05 mm/min 加载速率下,未经干燥的试件均发生脆 moisture cd moisture

初裂前试件发生弹性变形,压力机所施加荷载做功转化为试件弹性应变能,能量值为0至初裂之前的荷载--挠度曲线的积分面积.根据断裂力学理论,初裂后弹性应变能转化为新表面能导致断面裂缝的扩展及纤维的脱黏、变形、拔出或断裂.

比较弹性应变能可得,SC-PPF1 水饱和状态下弹性应变能分别较干燥 16,24 及 72 h 试件增加 126%, 126%及135%;SC-PPF2 的分别增加 153%,172%及202%;SC-SF 的分别增加 111%,112%及230%.弹性应 变能显著增加导致初裂瞬间裂缝扩展、纤维脱黏及破损的速度加快,这有可能是水饱和试件发生脆断的主要 原因.另一方面,水饱和试件发生脆断也有可能与喷射混凝土特殊的原材料及配合比相关,例如在有速凝剂 条件下水化形成的针棒状钙矾石结晶较多、凝胶状的水化硅酸钙产物较少,这有待进一步研究.

不同相对含水率的 FRSC 的残余弯曲强度、弯曲韧性分别见图 3 和 4. 相对含水率为 100% 的试件,弯韧测试过程中均脆断,因而残余弯曲强度和弯曲韧性均无法获取.





随着相对含水率的降低,3 组 FRSC 的残余弯曲强度、弯曲韧性均呈现降低趋势,且在干燥初期,残余弯曲强度、弯曲韧性降低的趋势尤为明显.与粗合成纤维增韧喷射混凝土相比,干燥初期钢纤维喷射混凝土的残余弯曲强度、弯曲韧性的降低更为明显,这可能由于其在干燥环境下更易失水、相对含水率下降幅度更大.

比较图3的结果可得,在相对含水率相同时,SC-SF组混 凝土 f_{100,0.50}最大,其次为 f_{100,1.0}, f_{100,2.0}最小,表明钢纤维增韧 喷射混凝土残余弯曲强度随挠度增大而逐渐降低.可见,SC-SF组混凝土在峰值荷载后仍可保持较高的承载能力,其失



various relative moisture contents

效是随挠度增大而逐渐进行的.

而在相对含水率相同时,SC-PPF1、SC-PPF2 组混凝土的 f_{100,0.50}, f_{100,1.0}及 f_{100,2.0}几乎相等, 表明峰值荷载 过后, 混凝土承载能力很快出现明显降低, 且维持在比较稳定水平.

干燥时间相同时,SC-SF的残余弯曲强度、弯曲韧性均明显高于 SC-PPF1 和 SC-PPF2,表明体积掺量为 0.5% 的钢纤维对喷射混凝土的增强、增韧效果明显优于体积掺量 0.9% 的聚丙烯粗纤维.

随着挠度逐渐增大,SC-PPF1、SC-PPF2的残余弯曲强度与 SC-SF 的差值逐渐减少,表明随挠度变形增大,聚丙烯纤维增韧优势逐渐显现.

SC-PPF1的残余弯曲强度、弯曲韧性均高于 SC-PPF2,表明体积掺量相同条件下,长度更长、长径比更大的聚丙烯粗纤维峰值荷载后的增强、增韧效果更优.

关于干燥养、潮湿养护对普通或纤维混凝土力学性能的影响的研究较多,普遍结论是干燥降低了抗压强度、抗折强度、初裂弯曲强度、弯曲韧性^[12-17].由于干燥初期 FRSC 表层失水更多,因而干缩变形较内部更为明显^[18].这种由表及里的不均匀收缩变形,使表层混凝土的收缩受到约束而产生拉应力.由于跨中处试件下表面在弯曲中受到拉应力最大,收缩应力必在一定程度上降低表层混凝土承载能力;同时,收缩应力弱化了表层混凝土中纤维与基体的黏结;且收缩应力可能导致表层混凝土产生微裂缝^[17],微裂缝在弯曲荷载作用下易扩展、延伸,从而降低初裂荷载,使得抗弯性能对微裂缝较为敏感^[12].上述原因导致干燥初期 FRSC 的抗弯性能随含水率减小而下降的趋势更加明显,即图 3 和 4 中,干燥时间从 16 h 到 24 h,残余弯曲强度与弯曲韧性显著降低.而针对标准条件养护后的试件,研究干燥引发的含水率变化对抗弯性能影响的文献未见报道.本文的研究结果和上述文献的结论有相似之处,即潮湿试件在经过干燥后,初裂强度、弯曲韧性均降低. 但本文中标准养护后未干燥的水饱和试件在弯韧测试过程中发生脆断.根据 3.1 论述,未干燥试件初裂前弹性应变能显著增加,初裂后弹性应变能转化为新表面能导致断面裂缝的扩展及纤维的脱黏、变形、拔出或断裂.由于粗合成纤维掺量有限,断面上分布的纤维已无法防止高弹性应变能导致的脆断的发生.因而,对于有水潮湿条件下的 FRSC,例如隧道、洞室的初期支护用喷射混凝土,若工程的埋深大、地应力高,需要考虑增加纤维的设计掺量.

3.2 加载速率影响

不同加载速率下不同含水率的 FRSC 的第一峰值强度 f_1 见图 5. 可见,经过 24 h 干燥、相对含水率较高的 FRSC 的 f_1 总体 上 随 着 加 载 速 率 的 增 加 而 增 加: 加 载 速 率 从 0.05 mm/min提高至 0.20 mm/min, SC-PPF1、SC-PPF2 及 SC-SF的 f_1 分别提高 4%,6%及 27%. SC-SF 的 f_1 随加载速 率提高而增加的趋势更为明显.

经过 72 h 干燥的 FRSC 中,随着加载速率增加,SC-SF 的 f_1 仍然增加,但 SC-PPF1、SC-PPF2 的 f_1 都表现出降低的 趋势.





对于同一配合比,相对含水率较高的 FRSC 在各加载速率下的 f_1 均高于相对含水率低时的值;干燥时间相同时,各加载速率下 SC-SF 的 f_1 总体高于 SC-PPF1、SC-PPF2,纤维长径比较大的配合比 SC-PPF1 的 f_1 高于 SC-PPF2 的.这与上一节的规律一致.

不同加载速率下不同含水率的 FRSC 的残余弯曲强度见图 6. 结果表明,随着加载速率提高,FRSC 的残余弯曲强度总体上呈现增加趋势;加载速率从 0. 05 mm/min 提高至 0. 20 mm/min,经 24 h 干燥的 SC-PPF1 的 $f_{100,0.50}$, $f_{100,1.0}$ 及 $f_{100,2.0}$ 分别增加 31%, 36% 及 40%, SC-PPF2 的分别增加 18%, 19% 及 14%, SC-SF 的分别 增加 53%, 52% 及 28%;加载速率从 0. 05 mm/min 提高至 0. 20 mm/min,经 72 h 干燥的 SC-PPF1 的 $f_{100,0.50}$, $f_{100,1.0}$ 及 $f_{100,2.0}$ 分别增加 19%, 19% 及 21%, SC-PPF2 的分别增加 21%, 16% 及 11%, SC-SF 的分别增加 0, 18% 及 38%.



Fig. 6 Residual strength of fiber reinforced shotcrete with different moisture contents at various loading rates

不同加载速率下 FRSC 的弯曲韧性 *T*_{100,2.0} 见图 7. 结果表明,随着加载速率提高,FRSC 的 *T*_{100,2.0} 总体上呈增加趋势. 加载速率 从 0. 05 mm/min 提高至 0. 10 mm/min,经 24 h 干燥的 SC-PPF1, SC-PPF2 及 SC-SF 的 *T*_{100,2.0}分别增加 16%,13% 及 21%;经 72 h 干燥的 SC-PPF1 及 SC-SF 的 *T*_{100,2.0}分别增加 15% 及 13%;加载 速率 从 0. 05 mm/min 提高至 0. 20 mm/min,经 24h 干燥的 SC-PPF1,SC-PPF2 及 SC-SF 的 *T*_{100,2.0}分别增加 31%,19% 及 43%;经 72 h 干燥的 SC-PPF1,SC-PPF2 及 SC-SF 的 *T*_{100,2.0}分别增加 19%,8% 及 16%.



moisture contents at various loading rates

对同一配合比,相对含水率较高时,加载速率提高引起的残 余弯曲强度、弯曲韧性增加的趋势更明显,相对含水率较高的

FRSC 在各加载速率下的残余弯曲强度总体上高于相对含水率低时的值;总体上,FRSC 的残余弯曲强度、弯曲韧性越高,提高加载速率引起的残余弯曲强度、弯曲韧性增加越明显.

干燥时间相同时,各加载速率下 SC-SF 的残余弯曲强度、弯曲韧性高于或明显高于 SC-PPF1、SC-PPF2, 纤维长径比较大的 SC-PPF1 的残余弯曲强度、弯曲韧性高于 SC-PPF2.

P. Rossi 等^[19]在 10⁻⁶/s 至 10^{0.2}/s 的应变速率范围内,测试了含水率不同的混凝土单轴拉伸强度,表明 加载速率提高可导致强度测试值增加,湿混凝土较干燥混凝土表现出更为明显的速率敏感性,并指出强度对 速率的敏感性是由于试件中所含水分引起的. 王海龙等^[20]也观测到应变速率从 10⁻⁶/s 提高至 10⁻⁴/s,水饱 和混凝土的抗压强度增长较干燥混凝土的更加明显. 根据 X. X. Zhang 等^[21]的测试结果,加载速率从 5.5×10⁻⁴ mm/s 提高至 5.5×10⁻¹ mm/s,三点弯曲下高强混凝土峰值弯曲荷载提高 30% 左右,他们认为低加载速 率下这种结果主要源于孔隙中自由水产生的黏滞效应.

P. Rossi^[22]和 D. Zheng^[23]等人根据物理学中的 Stefan 效应推导得出:在2个距离为h、半径为r的圆盘中间如果有黏度为 η 的液体存在,当圆盘沿着其法向以速率v作垂直运动时,液体的黏滞作用将对圆盘产生黏聚反力,由此产生的反向拉应力 σ_{v} 为:

$$\sigma_v = \frac{3\eta r^2 v}{2h^3} \tag{2}$$

由式(2)可见,圆盘分离的速度越快,对应混凝土中孔隙、裂纹面扩展及分离的速度越快,孔隙或裂缝中 自由水对孔隙或裂缝壁产生黏性反力越大,越利于抑制裂纹增长.潮湿混凝土孔隙中自由水含量较高,随加 载速率提高,产生的 Stefan 效应愈加明显^[21].相比之下,干燥混凝土内部自由水含量小,对加载速率变化不 敏感,除非在很高的应变速率情况下.

综合分析结果可见,对于本文掺加超细掺合料的纤维增韧喷射混凝土,标准养护后未经干燥的饱和试件 在弯韧测试过程中发生脆断;干燥初期,含水率变化对抗弯性能影响显著;而干燥 24 h 后,含水率变化对测 试的抗弯性能的影响较小;因此,建议标准养护至规定龄期后,置于标准干缩试验条件下干燥 24 h 后,进行 弯曲韧性测试.同时,加载速率对测得的抗弯性能具有一定的影响作用;试件抗弯性能越好、含水率越高,测得的抗弯性能指标随加载速率提高而增加的趋势越明显;因此,建议采用尽可能小的加载速率;针对本文研究的3种加载速率,建议采用0.05 mm/min的加载速率,即现有国内外相关标准中规定的最低的加载速率.

4 结 语

(1)加载速率相同时,FRSC的第一峰值强度随含水率降低而明显下降;未经干燥的水饱和试件弯韧试 验中均发生脆断,经干燥非饱和试件残余弯曲强度及弯曲韧性随含水率降低呈现降低趋势;在干燥初期,上 述抗弯性能随相对含水率降低而下降的趋势尤为明显.这主要由于干燥环境下 FRSC 内部水分散失,干缩变 形明显,且不均匀收缩可能导致表层混凝土内部产生收缩应力并有可能引发微裂缝产生,从而弱化了纤维与 基体的黏结及 FRSC 承受弯曲荷载的能力.

(2)随着加载速率提高,经干燥非饱和 FRSC 的第一峰值强度、残余弯曲强度及弯曲韧性总体上呈现增加趋势;对同一个配合比,相对含水率较高时,上述抗弯性能随加载速率提高而增大的趋势更为明显.这可能与加载速率变化时,FRSC 内部自由水产生的 Stefan 效应相关.

(3) FRSC 的第一峰值强度、残余弯曲强度及弯曲韧性越高,加载速率增大对上述抗弯性能的提高作用 越显著.

(4)对于纤维增韧喷射混凝土,建议标准养护至规定龄期后,置于标准干缩试验条件下干燥24h后,进行 弯曲韧性测试;同时,建议采用0.05 mm/min的加载速率,即现有国内外相关标准中规定的最低的加载速率.

参考文献:

- SUKONTASUKKUL P. Toughness evaluation of steel and polypropylene fiber reinforced concrete beams under bending [J]. Thammasat International Journal of Science and Technology, 2004, 9(3): 35-41.
- [2] CECS 13: 2009, 纤维混凝土试验方法标准[S]. (CECS 13:2009, Standard test methods for fiber reinforced concrete[S]. (in Chinese))
- [3] JSCE-SF4, Method of test for flexural strength and flexural toughness of steel-fiber-reinforced concrete[S].
- [4] ASTM C1609, Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete[S].
- [5] 陈景涛,张楠,许巍,等. 层布氏混杂纤维混凝土弯曲韧性试验研究[J]. 华中科技大学学报:城市科学版,2005,22 (4):72-74. (CHEN Jing-tao, ZHANG Nan, XU Wei, et al. Experiment study on flexural toughness of layered hybrid fiber reinforced concrete
 [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2005, 22(4):72-74. (in Chinese))
- [6] 赵顺波,孙晓燕,李长永,等. 高强钢纤维混凝土弯曲韧性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(1): 95-99. (ZHAO Shun-bo, SUN Xiao-yan, LI Chang-yong, et al. Flexural toughness of steel fiber reinforced high-strength concrete[J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(1): 95-99. (in Chinese))
- [7] 张昉,齐静,陈鹏柱. 聚丙烯长纤维混凝土的抗弯曲韧性试验研究[J]. 山西建筑, 2009, 35(7): 179, 213. (ZHANG Fang, QI Jing, CHEN Peng-zhu. The experimental study on the anti-bending flexural toughness for the polypropylene long fiber concrete[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(7): 179, 213. (in Chinese))
- [8] 邓宗才,张鹏飞,薛会青,等.纤维素纤维及混杂纤维混凝土的弯曲韧性[J].北京工业大学学报,2008,34(8):852-855,877. (DENG Zong-cai, ZHANG Peng-fei, XUE Hui-qing, et al. Flexural toughness of cellulose and hybrid fiber reinforced concrete beams[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(8): 852-855, 877. (in Chinese))
- [9] 邓宗才,李建辉,孙宏俊. 新型腈纶纤维混凝土的弯曲韧性试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2004(6):39-41. (DENG Zong-cai, LI Jian-hui, SUN Hong-jun. Experimental Study on flexural toughness of a new acrylic fiber reinforced concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2004(6):39-41. (in Chinese))
- [10] HOLLAND T. C. Proportioning silica-fume concrete [R]. Silica Fume User's Manual, FHWA-IF-05-016, 1999: 64-65.
- [11] 童常荣,秦鸿根,朱晓斌,等.不同品种纤维对混凝土抗渗透性能的影响[J].商品混凝土,2010(11):33-35.(TONG Chang-rong, QING Hong-gen, ZHU Xiao-bin, et al. The influence of different kinds of fibers on anti-permeability of concrete [J]. Ready-Mixed Concrete, 2010(11):33-35.(in Chinese))
- [12] TOUTANJI H A, BAYASI Z. Effect of curing procedures on properties of silica fume concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(4): 497-501.

- [13] BANGI M R, HORIGUCHI T. Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(11): 1150-1156.
- [14] ALUBAIDI I H K. Effect of curing conditions on the mechanical properties of steel fiber reinforced self compacting concrete [J]. Al-Qadisiya Journal for Engineering Sciences, 2011, 4(4): 528-536.
- [15] TOUTANJI H, BAYASI Z. Effect of manufacturing techniques on the flexural behavior of steel fiber-reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(1): 115-124.
- [16] BERNARD E S, PIRCHER M. The influence of thickness on performance of fiber-reinforced concrete in a round determinate panel test[J]. Cement, Concrete, and Aggregate, 2001, 23(1): 27-33.
- [17] BERNARD E S. The influence of curing on the mechanical performance of fiber reinforced shotcrete [A]. Shotcrete for underground support X[C]. Portland: Book News, Inc., 2006: 176-193.
- [18] POPOVICS S. Effect of curing method and final moisture condition on compressive strength of concrete [J]. ACI Materials Journal, 1986, 83(4): 650-657.
- [19] ROSSI P, MIEX V. Effect of loading rate on the strength of concrete subjected to uniaxial tension [J]. Material and Structures, 1994, 27(5): 260-264.
- [20] 王海龙,李庆斌.不同加载速率下干燥与饱和混凝土抗压性能试验研究分析[J].水利发电学报,2007,26(1):84-89.
 (WANG Hai-long, LI Qing-bin. Experiments of the compressive properties of dry and saturated concrete under different loading rates[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1):84-89. (in Chinese))
- [21] ZHANG X X, RUIZ G, YU R C, et al. Fracture behaviour of high-strength concrete at a wide range of loading rates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(10): 1204-1209.
- [22] ROSSI P. A physical phenomenon which can explain the mechanical behavior of concrete under high strain rates [J]. Materials and Structures, 1991, 24(6): 422-424.
- [23] ZHENG D, LI Q. An explanation for rate effect of concrete strength based on fracture toughness including free water viscosity [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71(16-17): 2319-2327.

Influences of moisture content and loading rate on flexural toughness of fiber reinforced shotcrete

SU An-shuang¹, NING Feng-wei¹, HAN Xu-dong², DING Jian-tong¹, CAI Yue-bo¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Sinohydro Bureau 7 Company, Ltd., Chengdu 610081, China)

Abstract: Influences of moisture content and loading rate on flexural toughness were experimentally studied for fiber reinforced shotcrete (FRSC) with steel fiber or macro synthetic polypropylene fiber. According to the fourpoint bending test method specified in ASTM C1609 and Chinese standard CECS 13, the flexural toughness of specimens after drying for 0 h, 16 h, 24 h and 72 h under conditions of (20 ± 2) °C and (60 ± 5) % relative humidity was tested at a loading rate of 0.05 mm/min. For the specimens dried for 24 h or 72 h, the flexural toughness was tested at loading rates of 0.05 mm/min, 0.10 mm/min, and 0.20 mm/min respectively. With the moisture content decreasing, the first-peak flexural strength decreased visibly. Brittle fracture happened to all the saturated FRSC specimens without drying during the bending tests. However, for the non-saturated specimens after drying for different periods, the residual flexural strength at prescribed deflections and flexural toughness $T_{100,2.0}$ of FRSC increased with the increase of loading rate. Given the same mix proportions, FRSC with higher relative water content presented more obvious increase of the mentioned flexural properties with loading rate increasing. This may be explained by the cohesive force caused by the Stefan effect.

Key words: fiber reinforced shotcrete; flexural toughness; moisture content; loading rate; macro synthetic fiber