



冻融损伤喷射混凝土本构关系及微观结构

王家滨, 牛荻涛, 袁斌

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

摘要:采用棱柱体试件,通过快速冻融试验方法,对冻融损伤后同配合比普通混凝土、喷射混凝土及钢纤维喷射混凝土单轴受压应力-应变全曲线进行研究。对应力-应变关系中相关参数进行回归分析,得出冻融循环后试件应力-应变全曲线方程。结果表明:随着冻融循环次数增加,受压应力-应变曲线趋于扁平;峰值应力降低,峰值应变增大,分别与冻融循环次数呈线性和指数变化。与普通混凝土相比,喷射混凝土峰值应力下降速率小,而钢纤维喷射混凝土的下降速率进一步减小。而后,采用扫描电子显微镜及压汞法,对损伤后试件微观结构和孔结构进行观察分析,发现随着冻融循环次数增加,在渗透压和冻胀压力综合作用下,试件内部微裂纹及气孔增多,孔径增大,试件密度显著降低;而钢纤维喷射混凝土中仅出现少量连通毛细孔,这与宏观力学性能变化呈现一致性。

关键词:隧道工程;喷射混凝土;冻融损伤;应力-应变曲线;微观结构

中图分类号:TU502.6;TU528.53 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)01-0030-10

Constitutive relation and microstructure on shotcrete after freeze and thaw damage

Wang Jiabin, Niu Ditao, Yuan Bin

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: Using prismatic specimens of concrete, we examined the uniaxial compression stress-strain curve of ordinary concrete (mixture C43F10), ordinary shotcrete (mixture S43F10) and steel fiber reinforced shotcrete (mixture S43F10SF50) with the same mixture by using the accelerating freeze-thaw method. By fitting the relationship between parameters and the number of freeze-thaw cycles, the stress-strain curve of specimens under damaging was calculated. The test results show that with the increase of freezing and thawing cycles, the peak stress is low and has a liner relation with the freezing and thawing cycles. However, the peak strain is bigger and demonstrates an exponential relationship. The peak stress of shotcrete decreases more slowly than that of ordinary concrete, and that of shotcrete with steel fiber reduces much more slowly. We also observed and analyzed the microstructure and pores of specimens after damage by using scanning electron microscope and the mercury intrusion method. The result shows that

收稿日期:2015-11-03

基金项目:国家自然科学基金(51278403);教育部创新团队发展计划(IRT13089);西安建筑科技大学博士研究生创新基金项目

作者简介:王家滨(1986-),男,博士生,主要从事混凝土结构耐久性研究,(E-mail)lty20020931@163.com。

牛荻涛(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)niudidao@163.com。

Received:2015-11-03

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51278403); Program for Innovative Research Team in University of Ministry of Education of the PRC(No. IRT 13089), the Doctor Innovation Foundation of Xi'an University of Architecture and Technology

Author brief: Wang Jiabin (1986-), PhD candidate, main research interest: reinforced concrete structure durability, (E-mail)lty20020931@163.com.

Niu Ditao (corresponding author), professor, doctor supervisor, (E-mail)niudidao@163.com.

with an increase number of freeze-thaw cycles, the amount of micro-creaks and pores and the diameter of pores increase by the effect of osmotic pressure and frost heave pressure while the specimens' density decreases. In the same situation, there are only several connected capillary pores in steel fiber reinforced shotcrete, which is consistent with macro-mechanical properties.

Keywords: tunnel engineering; shotcrete; freeze and thaw damage; stress-strain curve; microstructure

喷射混凝土是在高压空气作用下,通过管道将混凝土均匀喷射在受喷面上的一种特殊混凝土^[1-3]。因速凝剂的掺入,喷射混凝土具有极短的终凝时间、高早龄期强度,其1 h抗压强度可达2 MPa,故广泛应用在隧道衬砌结构、矿山巷道支护、边坡工程及桥梁结构维修加固等场所^[4-7]。随着现代隧道施工技术进步,喷射混凝土及钢纤维喷射混凝土单层永久衬砌成为隧道衬砌结构发展趋势^[8]。中国地域辽阔,有相当大的地区处于严寒地带,尤其在北方、高原及山岭地区,冻融破坏成为混凝土结构耐久性主要病害。而在这些地区修建的隧道工程,因其内部风速较自然风速大,温度远低于周围环境,致使隧道衬砌混凝土冻融损伤严重^[9]。

目前,关于冻融损伤后普通混凝土及钢纤维混凝土的研究成果很多^[11-15],但关于冻融损伤后喷射混凝土性能研究较少,仅集中在损伤后喷射混凝土基本性能,包括:相对动弹性模量、质量损失率、抗压及劈裂抗拉强度和孔结构变化等方面^[16-19]。而关于冻融损伤后喷射混凝土应力-应变全曲线、微观结构研究则非常少。笔者通过对同配合比普通混凝土、喷射混凝土及钢纤维喷射混凝土棱柱体进行了单轴受压试验,绘出冻融损伤后混凝土应力-应变全曲线,并得出冻融循环作用下喷射混凝土及钢纤维喷射混凝土应力-应变方程。同时,对冻融损伤后混凝土

土进行微观结构及孔结构分析。

1 试验

1.1 原材料及配合比

水泥为陕西宝鸡海螺水泥有限责任公司生产的海螺牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥,粉煤灰为陕西宝鸡宝源集团粉煤灰分公司生产的II级粉煤灰,细集料为细度模数为3.4的河砂,粗集料为5~10 mm连续级配瓜子石,钢纤维为上海青浦商榻金属纤维厂生产的冷压剪切波浪形钢纤维,等效长径比35。速凝剂为山西桑穆斯建材化工有限公司生产的低碱速凝剂,主要成分为偏铝酸钠、硅酸二钙及石灰,减水剂为山西凯迪建材有限公司生产的聚羧酸系高性能减水剂,减水率27%,原料矿物组成见表1。喷射混凝土水胶比为0.43,砂率为50%,减水剂及速凝剂添加量为胶凝材料质量的1%及4%。喷射混凝土配合比及抗压强度和劈裂抗拉强度见表2及表3。

表1 水泥矿物组成及性能

Table 1 Properties and mineral composition of cement

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
				3d	28d	3d	28d
52.70	23.04	6.37	11.76	6.2	8.2	29.8	56.0

表2 喷射混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of shotcrete

试件编号	水泥	瓜子石	砂	粉煤灰	水	钢纤维	减水剂	速凝剂
C43F10	411	892	892	46	197		4.56	
S43F10	411	892	892	46	197		4.56	18.24
S43F10SF50	411	892	892	46	197	50	4.56	18.24

表3 喷射混凝土抗压强度及劈裂抗拉强度

Table 3 Compressive strength and splitting tensile strength of shotcrete for curing ages

试件编号	抗压强度			劈裂抗拉强度		
	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d
C43F10		40.14	57.34		3.68	4.52
S43F10	23.49	28.78	41.63	2.54	3.18	4.14
S43F10SF50	28.13	36.08	46.49	3.01	3.81	4.68

1.2 试验制作

喷射混凝土试件取自宝鸡至兰州客运专线麦积山隧道施工现场,采用喷大板法进行制作,大板尺寸为1 000 mm×500 mm×120 mm。大板成型3 h后拆模,放入隧道中自然养护7 d,而后使用岩石切割机将喷射混凝土大板切割成标准试件(100 mm×100 mm×400 mm)并将其置于标准养护室(温度20±

2℃、相对湿度 95%) 养护至 28 d, 最后将试件置于室外自然养护至 90 d。试件制作过程见图 1。

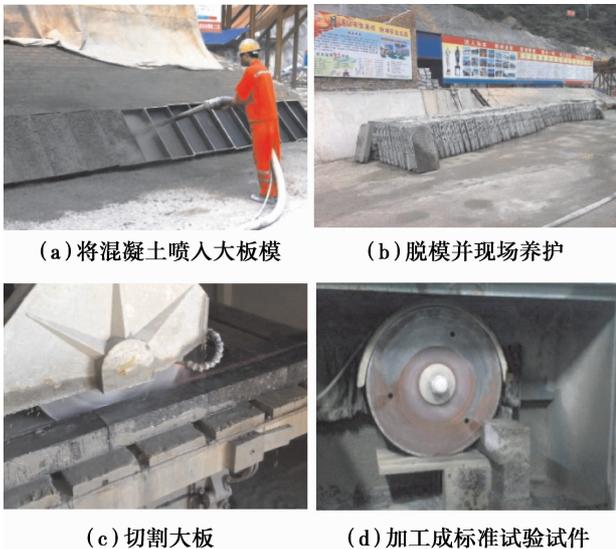


图 1 喷射混凝土试件制作过程

Fig. 1 Sprayed process and equipment

1.3 试验方法

冻融损伤后喷射混凝土本构关系试验采用 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体试件。冻融循环按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009) 中快冻法进行, 试验温度为 -18~5℃。试验冻融循环次数分别为 0、50、100、(125)150、200 次。冻融循环过程中, 每 25 次将试件进行一次翻转, 防止试件因冻融试验箱内部温度梯度造成温度应力集中而破坏。

冻融循环完成后, 将位移采集装置(江苏溧阳 YHD-10 型位移传感器, 精度 400 με/mm, 量程 ±5 mm) 固定于试件上并置于上海华龙 WAW-1 000 型微机控制电液伺服万能试验机(精度 0.001 N, 最大量程 1 000 kN, 最小加载速率 0.01 mm/min) 中进行单轴抗压试验。同时, 将万能试验机中力传感器信号和位移传感器位移信号同时引入 TDS-602 型数据采集仪中, 实现对力和位移的同步采集, 绘出冻融损伤后试件应力-应变全曲线。试验装置固定示意图如图 2。

试验开始加载前, 先以 0.5 mm/min 的速率预加载至 5 kN, 观察 4 个位移计的度数是否接近, 若相差较大, 即 4 个位移计度数偏差在 ±20 με, 则立即停止试验, 调整试件位置, 再重复前者的过程, 直至位移计读数相接近后, 正式开始试验。试验采用位移控制方式, 初始加载速率为 0.3 mm/min, 当压应力超过预估峰值应力的 70% 后, 将加载速率调整为

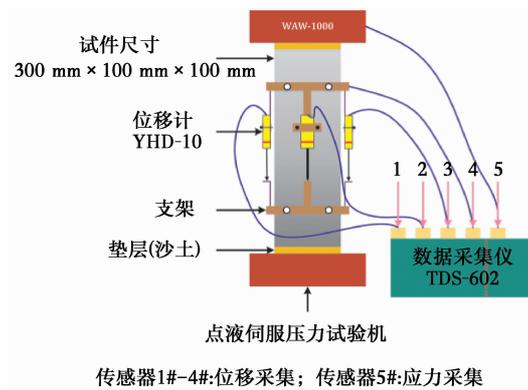


图 2 应力-应变曲线试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test equipment on stress-strain curves

0.05 mm/min, 直至试件完全破坏。试验时每组 9 个试件, 当发现试验结果离散型较大时, 则再增加 3 个试件, 以确保试验结果的完整准确。

试件单轴受压应力及应变按式(1)、(2)计算

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

式中: σ 为试件压应力, MPa; F 为作用在试件上荷载, kN; A 为试件加载面积, mm²; ϵ 为试件均匀受压区的纵向压应变; ΔL 试件纵向变形量, mm; L 为试件测量标距, mm, 试验中 $L=200$ mm。

2 单轴受压试件破坏过程

图 3 给出了喷射混凝土单轴受压的破坏过程。由图 3 可知, 试件加载初期(压应力小于 0.5 f'_c), 喷射混凝土内部微裂缝因尖端应力集中而沿界面过渡区略有发展, 但大部分微裂缝及孔隙在压应力作用下而闭合, 试件中水泥砂浆基体尚未开裂。此时, 试件内部微裂缝进入稳定期, 试件表面尚无明显损伤微裂缝出现(图 3(a)); 随着荷载不断增大(压应力大于 0.5 f'_c , 小于 0.75 f'_c), 试件界面过渡区微裂缝再次开始扩展生长, 微裂缝系统处于不稳定阶段。当试件内部集聚的能量超过其开裂临界能量时, 微裂缝快速发展, 裂纹系统变得不稳定, 试件端部表皮少量剥落。同时, 在加载过程中, 可听到混凝土试件内部被压裂而产生的劈裂声, 但试件表面依然没有可见裂缝(图 3(b)); 荷载继续增加(压应力大于 0.75 f'_c), 试件内部处于不稳定的微裂缝开始快速扩展, 界面过渡区裂缝发展进入砂浆基体中, 且与基体中裂缝相互贯通, 试件破坏, 承载力达到最大值; 之

后,随着压应变增大,试件表面出现第一条可见裂缝且平行于加载方向,试件承载开始力降低(图 3(c));应变继续增大,试件表面可见裂缝的数量和宽度逐渐增加,纵向裂缝相互贯通,导致喷射混凝土承载能力迅速下降,并最终破坏,完全丧失承载能力(图 2(d))。

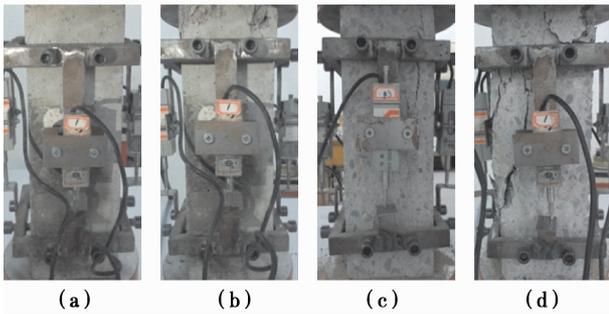


图 3 喷射混凝土单轴受压破坏过程

Fig. 3 Damage process of mixture S43F10 under

3 冻融损伤前后试件应力-应变关系

3.1 应力-应变全曲线

3.1.1 未损伤试件应力-应变全曲线 未经冻融循环试件应力-应变曲线示于图 4。从图 4 可看出,普通混凝土应力-应变上升段较为圆滑,下降段初期平缓后期急速下降;喷射混凝土峰值应力小但峰值应力基本一致,与普通混凝土相比,其上升段较为平直,下降段变化规律相似;而钢纤维喷射混凝土峰值应力及应变均比普通混凝土大,上升段平直,下降段抬高且平缓。在相同应变时,应力-应变曲线下面积从大到小依次为:钢纤维喷射混凝土,普通混凝土及普通喷射混凝土。曲线面积越大,说明试件延性越好,在相同应力作用下试件变形性能越好。故钢纤维加入可弥补由于喷射混凝土快速水化而带来的强度降低,增大喷射混凝土延性。这是因为喷射混凝土在速凝剂作用下,胶凝材料快速水化硬化,使其内部水化产物晶粒异常长大,结晶粗糙且晶粒之间出现大量空隙;同时,在混凝土喷射过程中,压缩空气未及时排出而残留在混凝土中,形成微气孔,致使喷射混凝土气孔率稍大,强度降低,脆性增大;对于钢纤维喷射混凝土,在钢纤维的阻裂效应作用下,微裂缝扩展至钢纤维表面时,因钢纤维抗拉强度高,微裂缝发生偏转并沿钢纤维上下表面扩展及延伸,有效减缓或消除裂缝尖端应力集中,在粘结应力共同作用下,使试件断裂能提高,试件韧性增大。

3.1.2 冻融损伤后试件应力-应变全曲线 试件冻

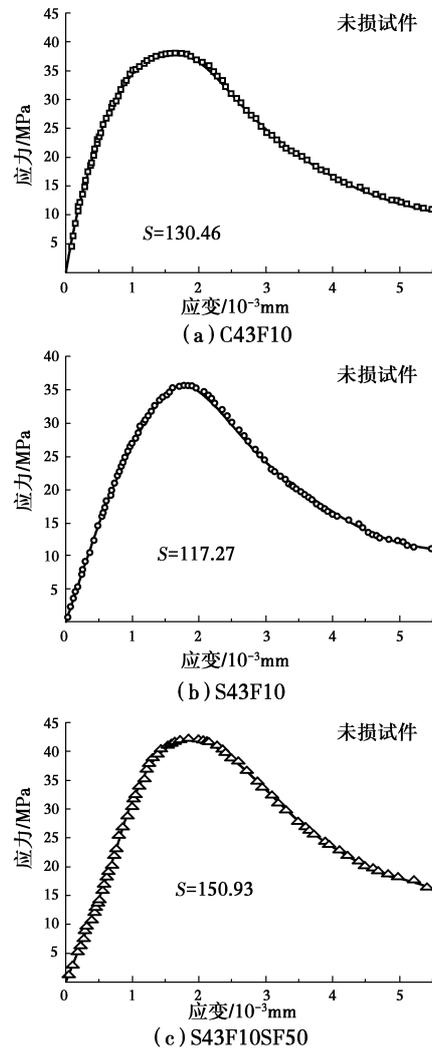
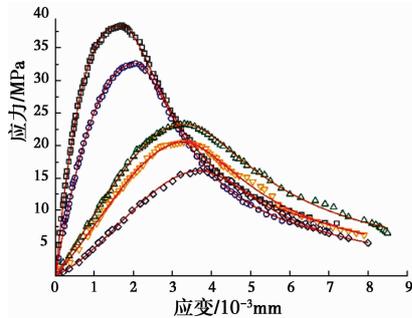


图 4 未损伤试件应力-应变曲线及积分面积

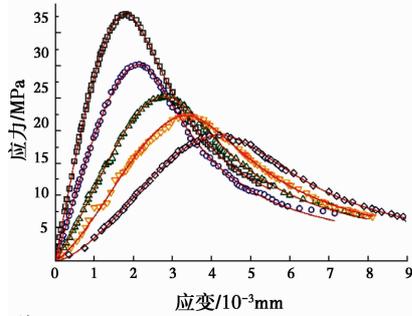
Fig. 4 Stress-strain curve and integral area of undamaged specimen

融循环 0、50、100、150 及 200 次应力-应变曲线示于图 5。对图 5 中试件应力-应变曲线进行分析,可以看出喷射混凝土应力-应变曲线与模筑混凝土相似。试件未冻融损伤时,其破坏过程可分为 3 个阶段:1) 弹性变形阶段,此时试件应力小于 $0.3f'_c$,应力-应变曲线接近于直线,试件内部界面过渡区形成第一批稳定、不发展的微裂纹;2) 弹塑性变形阶段,此阶段按照裂纹发展过程可以分为微裂纹发展阶段和裂缝开展阶段:当应力为 $0.3f'_c \sim 0.75f'_c$,此时试件处于微裂纹发展阶段。随着应变继续增加,试件塑性变形增长,应力-应变曲线斜率减小,试件内部界面过渡区微裂缝开始缓慢、稳定发展,应变增长速度大于应力增长,应力-应变曲线呈上凸状;当应力为 $0.75f'_c \sim f'_c$,此时试件处于微裂缝开展阶段。试件内部界面过渡区微裂纹急剧扩展并与水泥砂浆中微裂

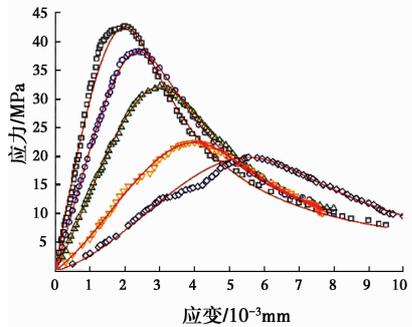
纹贯通,形成连续裂缝。试件切线模量逐渐减小,上升段出现拐点即峰值应力,对应的应变即为试件的峰值应变,应力-应变曲线呈外凸状,故第 1)及 2)阶段统称为弹塑性变形阶段;3)破坏阶段,此时应力-应变曲线进入下降段,试件内部连续裂缝快速发展,并在试件中部表面出现第一条宏观裂缝,其方向平行于受力方向。随着应变的继续增大,裂缝向两端发展并向角部偏转,形成压溃型斜裂缝破坏。此时试件应力值降低,应变值迅速增大。钢纤维的加入可显著提高试件的延性和韧性,使其峰值应变增长幅度加大。



注: □ 0 ○ 50cycles △ 100cycles
▽ 125cycles ◇ 150cycles — Fit curve
(a) C43F10



注: □ 0 ○ 50cycles △ 100cycles
▽ 150cycles ◇ 200cycles — Fit curve
(b) S43F10



注: □ 0 ○ 50cycles △ 100cycles
▽ 150cycles ◇ 200cycles — Fit curve
(c) S43F10SF50

图 5 冻融损伤后试件应力-应变全曲线
Fig. 5 Stress-strain curve of specimen under freezing-thawing cycle

根据图 6 中曲线可以得出冻融损伤前后试件峰值应力 σ_c , 峰值应变 ϵ_c 、初始弹性模量 E_C (取 $0.4\sigma_c$ 处割线模量值^[20]) 及极限压应变 $\epsilon_{c,u}$ 等参数,其相对值示于图 6。由图 5 和图 6 综合分析可以看出,随着冻融循环次数增加,试件峰值应力及弹性模量逐渐降低,峰值应变和极限应变增大,应力-应变曲线趋于扁平状且向右移动。同时,当冻融循环大于 100 次时,试件中弹塑性变形阶段显著减小,即试件经过弹性变形阶段后迅速达到峰值应力,试件抵抗变形的能力减弱,脆性增大。冻融循环次数继续增加,试件应力-应变曲线初期由近似线性变为下凹趋势,其原因为冻融损伤后,试件由于冻胀压力循环作用导致内部酥松,在加载初期,内部微裂缝被压实,裂缝闭合,切线模量缓慢增大,使其出现下凹状^[21]。对试件材料特征常数与冻融循环次数进行拟合,得出峰值应力与冻融循环次数呈线性关系,而峰值应变、初始弹性模量及极限压应变与冻融循环次数呈指数型关系,拟合方程列于表 4。

冻融损伤后钢纤维喷射混凝土应力-应变曲线虽与普通喷射混凝土相同,但其 E_C 、 σ_c 、 ϵ_c 及 $\epsilon_{c,u}$ 随冻融循环次数变化幅度较小,且峰值应变和极限压应变显著增大。说明钢纤维的加入可以提高喷射混凝土的延性和韧性,使其抗冻性能提升。

表 4 拟合方程

Table 4 Fitting function of specimens

编号	峰值应力		峰值应变	
	方程	R^2	方程	R^2
C43F10	$\frac{\sigma_{CN}}{\sigma_{C0}} =$	0.99	$\frac{\epsilon_{CN}}{\epsilon_{C0}} =$	0.897
	$1 - 0.0038 N$		$\exp(0.06N \cdot f_{cu}^{-0.06})$	
S43F10	$\frac{\sigma_{CN}}{\sigma_{C0}} =$	0.92	$\frac{\epsilon_{CN}}{\epsilon_{C0}} =$	0.996
	$1 - 0.0027 N$		$\exp(10.702N \cdot f_{cu}^{-2.102})$	
S43F10SF50	$\frac{\sigma_{CN}}{\sigma_{C0}} =$	0.97	$\frac{\epsilon_{CN}}{\epsilon_{C0}} =$	0.972
	$1 - 0.0028 N$		$\exp(9.391N \cdot f_{cu}^{-1.91})$	
编号	初始弹性模量		极限压应变	
	方程	R^2	方程	R^2
C43F10	$\frac{E_{CN}}{E_{C0}} =$	0.926	$\frac{\epsilon_{(c,u),N}}{\epsilon_{(c,u),0}} =$	0.846
	$\exp(-0.00776 N)$		$\exp(0.00458 N)$	
S43F10	$\frac{E_{CN}}{E_{C0}} =$	0.877	$\frac{\epsilon_{(c,u),N}}{\epsilon_{(c,u),0}} =$	0.900
	$\exp(-0.00528 N)$		$\exp(0.00297 N)$	
S43F10SF50	$\frac{E_{CN}}{E_{C0}} =$	0.938	$\frac{\epsilon_{(c,u),N}}{\epsilon_{(c,u),0}} =$	0.965
	$\exp(-0.00527 N)$		$\exp(0.00309 N)$	

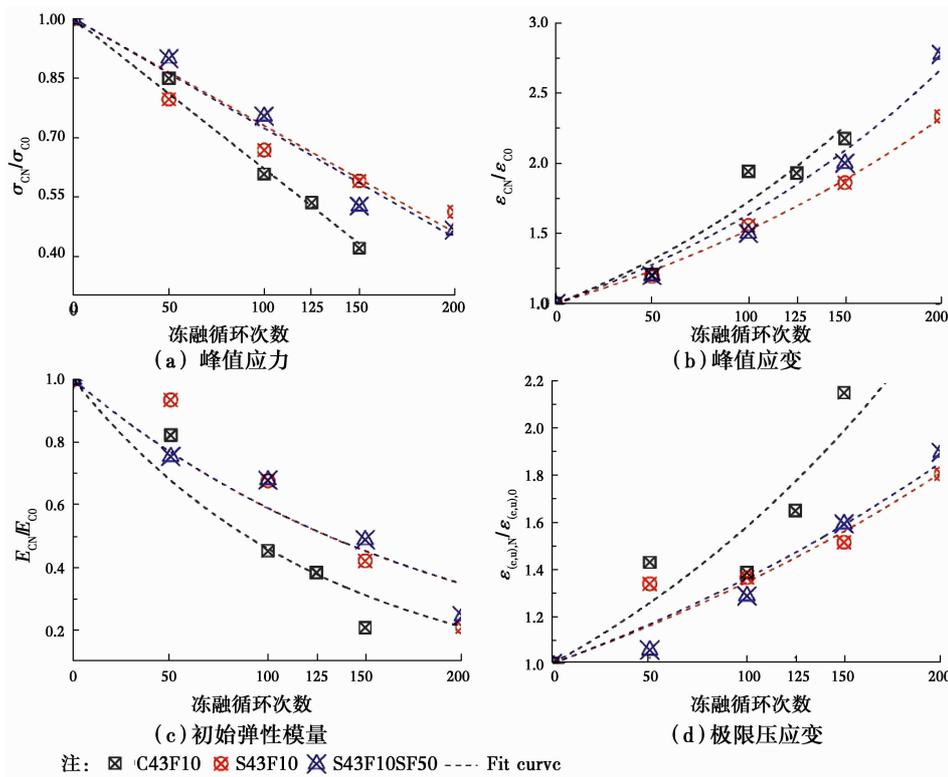


图 6 冻融损伤试件材料特征常数

Fig. 6 Material characteristics parameters of specimen after freeze-thaw damage

3.2 应力-应变全曲线方程

通过以上分析,喷射混凝土及钢纤维喷射混凝土应力-应变全曲线与普通混凝土相似,故采用分段拟合即将应力-应变曲线上段和下降段分别采用多项式和有理分式进行拟合,得出冻融损伤后喷射混凝土应力-应变全曲线方程。

表 5 为经 Matlab 拟合后试件应力-应变曲线上段及下降段参数 a 和 b 值。从表 5 中可看出,随着冻融循环次数增加, a 值逐渐减小, b 值逐渐增大,表明试件延性及塑性变形能力逐渐降低,混凝土急速破坏且残余强度低。

表 5 冻融损伤后试件应力-应变曲线参数 a 与 b

Table 5 Parameter a and b of specimen stress-strain curve under damage

冻融循环次数	C43F10		S43F10		S43F10SF50	
	a	b	a	b	a	b
0	2.760	1.638	1.527	1.752	1.624	1.561
50	2.271	2.341	1.428	2.344	1.255	1.649
100	1.252	2.269	1.034	2.390	1.104	2.009
125	1.061	2.700				
150	0.576	3.522	0.644	2.653	0.794	2.487
200			0.323	3.163	0.400	2.962

对参数 a 及 b 与冻融循环次数之间关系进行拟合,并将其带入应力-应变全曲线方程中,得出试件冻融损伤后应力-应变全曲线方程

1) 试件 C43F10 单轴受压应力-应变全曲线方程

$$y = \begin{cases} (2.76 - 0.014N)x + (0.028N - 2.52)x^2 + (0.76 - 0.014N)x^3, & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{x}{(2.576 \times 10^{-6} N^3 - 5.261 \times 10^{-4} N^2 + 0.034N + 1.638)(x-1)^2 + x}, & x \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

2) 试件 S43F10 单轴受压应力-应变全曲线方程

$$y = \begin{cases} (1.957 - 0.006N)x + (0.012N - 0.914)x^2 - (0.043 + 0.006N)x^3, & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{x}{(5.287 \times 10^{-7} N^3 - 1.571 \times 10^{-4} N^2 + 0.017N + 1.762)(x-1)^2 + x}, & x \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

3) 试件 S43F10SF50 单轴受压应力-应变全曲线方程

$$y = \begin{cases} (1.624 - 0.006N)x + (0.012N - 0.248)x^2 - (0.376 + 0.006N)x^3, & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{x}{(2.729 \times 10^{-5} N^2 + 0.002N + 1.561)(x-1)^2 + x}, & x \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

内部贯通微裂纹增多且较密,但裂纹宽度小且不明显。试件凝胶体部分无明显气孔出现。说明钢纤维的加入,可以显著改善冻后喷射混凝土内部微观结构,提高试件抗冻性。

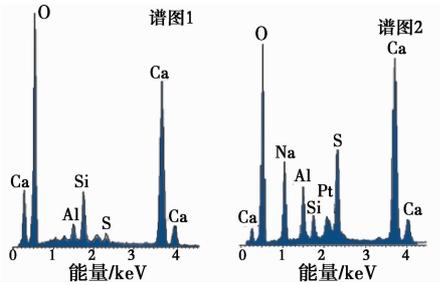


图9 图7(j)和(k)中微区EDS能谱图

Fig. 9 EDS patterns of micro-area in fig. 7 (j) and (k)

4.2 孔结构变化

冻融损伤后试件孔结构参数示于表7。吴中伟^[22]将混凝土中孔划分为4类,分别为:无害孔(孔径 $<20\text{ nm}$)、少害孔($20\text{ nm} \leq \text{孔径} < 50\text{ nm}$)、多害孔($50\text{ nm} \leq \text{孔径} < 200\text{ nm}$)和有害孔(孔径 $>200\text{ nm}$)。从表7中可看出,对于未冻融损伤试件,普通喷射混凝土无害孔含量最少、钢纤维喷射混凝土其次,普通混凝土最多。同时,普通喷射混凝土中有害孔含量最多,普通混凝土最少,且普通喷射混凝土气孔率最高。这是因为喷射混凝土试件在制作过程中,高压压缩空气未及时排出而留在试件内部,形成均匀分布独立的微气孔,从而使喷射混凝土多害孔和孔隙率高于普通混凝土。

表7 冻融损伤后试件孔结构参数

Table 7 Pore structure parameter of specimen after freeze and thaw damage

试件编号	孔径分布	冻融循环次数					
		0	50	100	125	150	200
C43F10	$<20\text{ nm}$	68.73	61.37	49.32	42.47	37.19	
	$20\text{ nm} \leq d < 50\text{ nm}$	21.31	24.94	31.13	33.52	35.27	
	$50\text{ nm} \leq d < 200\text{ nm}$	8.15	11.49	13.27	17.31	19.21	
	$d > 200\text{ nm}$	1.81	2.20	4.28	6.70	8.33	
	孔隙率/%	8.26	9.21	11.79	14.21	18.33	
S43F10	$<20\text{ nm}$	52.39	46.07	39.22		32.21	28.29
	$20\text{ nm} \leq d < 50\text{ nm}$	30.51	34.62	38.21		41.09	42.18
	$50\text{ nm} \leq d < 200\text{ nm}$	13.29	15.15	17.18		20.43	22.22
	$d > 200\text{ nm}$	3.81	4.17	4.89		6.27	7.31
	孔隙率/%	14.58	14.92	15.90		17.21	18.35
S43F10SP50	$<20\text{ nm}$	65.26	60.17	54.32		47.63	41.02
	$20\text{ nm} \leq d < 50\text{ nm}$	22.21	26.28	30.50		33.94	37.56
	$50\text{ nm} \leq d < 200\text{ nm}$	9.24	10.01	11.17		13.24	15.21
	$d > 200\text{ nm}$	3.29	3.54	4.01		5.19	6.21
	孔隙率/%	10.01	10.41	10.92		11.32	11.89

随着冻融循环次数增大,试件内部无害孔含量降低,少害孔、多害孔和有害孔含量均增大,试件孔隙率同步增大。对于普通混凝土来说,其无害孔含量随着冻融循环次数增大快速降低,有害孔和多害孔含量迅速增大。这是因为普通混凝土表面浮浆层水胶比大,微裂缝及气孔率大,在冻胀压力及渗透压共同作用下,表面浮浆层剥落并产生大量微裂缝,试件渗透性增大,微裂缝快速扩展至试件内部,试件中孔结构劣化,毛细孔孔径增大,孔隙率快速上升。而对于喷射混凝土来说,因其内部含有大量微气孔,其

作用相当于引气剂,可缓解冻融循环过程中形成的冻胀压力和过冷水迁移形成的渗透压,故冻融损伤后喷射混凝土内部不同级别孔含量变化幅度较普通混凝土小。钢纤维喷射混凝土各级别孔含量和孔隙率变化幅度更小。

另外,随着冻融循环次数增大,试件中孔隙率和有害孔含量增大幅度逐渐加快。当冻融循环150次时,普通混凝土气孔率为初始气孔率的2.22倍,有害孔含量为初始的4.6倍;当冻融循环200次时,普通喷射混凝土及钢纤维喷射混凝土气孔率为初始气

孔率的 1.23 倍和 1.19 倍,有害孔含量为初始的 1.92 倍和 1.89 倍。在受压过程中,压应力促使试件内部孔闭合。故当冻融损伤 150 次和 200 次时,试件应力-应变曲线出现初始下降段,即应变增大程度大于应力增长幅度。同时,从上述比较可以看出,钢纤维可显著抑制喷射混凝土中冻胀裂缝的产生和扩展,使试件抗冻性能得到提高。

5 结 论

1)从冻融损伤后试件应力-应变曲线可以看出,喷射混凝土应力-应变曲线与模筑混凝土相似,均可分为弹性变形、弹塑性变形及破坏 3 个阶段。随着冻融循环次数增加,试件峰值应力、弹性模量降低,峰值应变及极限应变增大,试件应力-应变曲线趋于扁平且向右移动。随着冻融次数继续增加,应力-应变曲线初期由近似线性变为下凹状;钢纤维掺入后对冻融损伤后试件峰值应力提高不明显,但可显著提高试件峰值应变及极限应变,说明钢纤维可以提高试件延性及韧性,使其抗冻性能增强。

2)对冻融损伤后试件微观结构进行观察分析,得出随着冻融循环次数的增加,试件内部微气孔相互连通,孔径增大并出现贯通型微裂缝。凝胶体在水冻胀压力及渗透压作用下结构酥松且部分流失,内部被包裹的氢氧化钙晶体和钙矾石晶体外露,致使试件抗冻性能减弱。钢纤维的掺入可显著改善冻后试件内部微观结构,提高试件的抗冻性能。

3)喷射混凝土气孔率、有害孔和多害孔含量高于普通混凝土,但这有利于喷射混凝土抗冻性的提升。冻融损伤后,试件无害孔含量降低,其余指标数值均增大,试件内部密实度下降、结构酥松。与普通混凝土相比,普通喷射混凝土各级别孔含量变化幅度较小,而钢纤维喷射混凝土孔含量变化幅度最小,钢纤维可显著抑制冻胀裂缝产生及扩展,减缓其力学性能劣化程度,提高喷射混凝土抗冻性。

参考文献:

- [1] Hemphill G B. Practical tunnel construction [M]. Hoboken: Jone Wiley & Sons, 2013: 309-322.
- [2] Austin S A, Goodier C I, Robins P J. Low-xolume wet-process sprayed concrete: pumping and spraying [J]. Materials and Structure, 2005, 38(3): 229-237.
- [3] Adam Hubáček, Jiří Brožovsky, Rudolf Hela. Comparison of properties of shotcrete teated using destructive and non-destructive method [J]. Procedia Engineering, 2013, 65: 63-68.
- [4] Maltese C, Pistolesi C, Bravo A, et al. A case history: Effect of moisture on the setting behavior of a Portland cement reacting with an alkali-free accrlerator [J]. Cement Concrete Research, 2007, 37(6): 856-865.
- [5] Won J P, Hwang U J, Kim C K, et al. Mechanical performance of shotcrete made with a high-strength cement-based mineral acceleator [J]. Constructure and Building Materials, 2013, 49(12): 175-183.
- [6] Li L, Wu A X, Wang Y M, et al. Mechanism of wet shotcrete interacting with rock in support systems [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(3): 821-829.
- [7] Leung C K Y, Lai R, Lee A Y F. Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(4): 788-795.
- [8] 关宝树. 隧道及地下工程喷射混凝土支护技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 57.
- [9] 曹大富, 富立志, 杨忠伟, 等. 冻融循环作用下混凝土受压本构特征研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 17-23.
- [10] Cao D F, Fu L Z, Yang Z W, et al. Study on constitutive relations of compressed concrete subjected to action of freezing-thawing cycles [J]. Journal of building materials, 2013, 16(1): 17-23. (in Chinese)
- [11] Chen J X, Zhao X Z, Luo Y B, et al. Investigating freeze-proof durability of C25 shotcrete [J]. Construction and Building materials, 2014, 61(1): 33-40.
- [12] 王海涛, 范文晓, 刘天云, 等. 全级配混凝土冻融循环后单轴动态抗压性能试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(6): 732-738.
- [13] Wang H T, Fan W X, Liu T Y, et al. Experimental study on properties of fully-graded concrete under uniaxial dynamic compressive stress state after freezing-thawing cycles [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 732-738. (in Chinese)
- [14] 冀晓东, 宋玉普, 刘建. 混凝土冻融损伤本构模型研究 [J]. 计算力学学报, 2011, 28(3): 461-467.
- [15] Ji X D, Song Y P, Liu J. Study on frost damage constitutive model of concrete [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(3): 461-467. (in Chinese)
- [16] 商怀帅, 宋玉普. 不同水胶比混凝土冻融循环后双轴压试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(6): 862-866.
- [17] Shang H S, Song Y P. Experiential investigation on different W/C concrete under biaxial compression after

- freeze-thaw cycles [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2007, 47(6): 862-866. (in Chinese)
- [14] 李燕, 申向东. 不同纤维掺量轻骨料混凝土冻融循环后力学性能及损伤量的研究[J]. 工程力学, 2009, 26 (Sup1): 81-83.
Li Y, Shen X D. The research on mechanics and blemish degree of different fiber content lightweight aggregate concrete agter freeze-thaw cycles [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (Sup1): 81-83. (in Chinese)
- [15] 陈霞, 杨华全, 周世华, 等. 混凝土冻融耐久性与气泡特征参数的研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(2): 257-262.
Chen X, Yang H Q, Zhou S H, et al. Research on concrete freezing and thawing durability and characteristic parameters of bubbles [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14 (2): 257-262. (in Chinese)
- [16] Park S W, Kwon S J, Lee Y S, et al. An experimental study on the effect of accelerator and chemical admixture type for the durability of shotcrete [J]. Journal of the KIIS, 2003, 18(3): 109-113.
- [17] Jong P W, Hwang H K, Chang I J, et al. Durability characteristics of high performance shotcrete for permanent support of large size underground space [J]. Journal of the Korea Concrete Institute, 2007, 19 (6): 701-706.
- [18] Hae G P, Sang K S, Chan G P, et al. Influence of a $C_{12}A_7$ mineral-cased accelerator on the strength and durability of shotcrete [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(3): 379-385.
- [19] 罗彦斌, 陈建勋, 段献良, 等. C20 喷射混凝土冻融力学试验[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 113-119.
Luo Y B, Chen J X, Duan X L, et al. Mechanical testing on frozen-thaw C20 shotcrete [J]. China Journal of Highway and Transport. 2012, 25(5): 113-119. (in Chinese)
- [20] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 19.
Guo Z H, Shi X D. Reinforced concrete principle and analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 19. (in Chinese)
- [21] 段安. 受冻融混凝土本构关系研究和冻融过程数值模拟[D]. 北京: 清华大学, 2009.
Duan A. Research on constitutive relationship of frozen-thawed concrete and mathematical modeling of freeze-thaw process [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [22] 吴中伟. 混凝土科学技术近期发展方向的探讨[J]. 硅酸盐学报, 1979, 7(3): 262-270.
Wu Z W. An approach to the recent trends of concrete science and technology [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1979, 7(3): 262-270. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)