

文章编号:1673-2049(2015)04-0086-06

PVA 纤维增强型水泥基复合材料高温后力学性能试验

白文琦, 吕 晶, 杜 强, 白 亮, 吴函恒

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:为了研究聚乙烯醇(PVA)纤维增强型水泥基复合材料高温后的力学性能,对 30 组共 90 个试件进行了力学性能试验,测得材料的立方体抗压强度、抗折强度、弹性模量、轴心抗压强度以及棱柱体单轴抗压应力-应变全曲线,并与相应基体的力学性能进行对比分析。结果表明:当加热温度低于 200 ℃时,PVA 纤维的掺入可有效改善水泥基复合材料的抗折强度和棱柱体单轴受压峰值荷载后的延性性能和韧性性能,降低弹性模量,对立方体抗压强度和棱柱体轴心抗压强度影响不大;温度高于 200 ℃后,抗折强度、弹性模量和峰值荷载后的延性性能与韧性性能与基体接近,立方体抗压强度和轴心抗压强度均低于基体,轴心抗压强度下降幅度远远大于立方体抗压强度。

关键词:高温;纤维增强型水泥基复合材料;聚乙烯醇;力学性能;应力-应变全曲线

中图分类号:TU528.043

文献标志码:A

Experiment on Mechanical Behaviors of PVA Fiber Reinforced Cementitious Composite After High Temperature

BAI Wen-qi, LU Jing, DU Qiang, BAI Liang, WU Han-heng

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the mechanical behaviors of polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced cementitious composite, 90 specimens divided into 30 groups after high temperature treatment were tested. The material cubic compressive strength, flexural strength, elasticity modulus, axial compressive strength and the prism uniaxial compressive stress-strain curves were obtained. The mechanical behavior of corresponding matrix was also tested for comparison. The results show that when the heating temperature bellows 200 ℃, flexural strength, ductility property and toughness property after the prism uniaxial compressive peak load of cementitious composite can effectively improve with PVA fiber mixing. Meanwhile, while elasticity modulus decreases, PVA fiber has little effect on cubic compressive strength and the prism axial compressive strength. When the heating temperature is higher than 200 ℃, flexural strength, elasticity modulus, ductility property and toughness property after the prism uniaxial compressive peak load of PVA fiber reinforced cementitious composite is close to the matrix. Cubic compressive strength and axial compressive strength of PVA fiber reinforced cementitious composite is lower than the matrix. Axial compressive strength decreases much more than the cubic compressive strength.

收稿日期:2015-01-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51208058);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310828151065);西安建设科技项目(SJW201225,SJW201322)

作者简介:白文琦(1985-),女,陕西西安人,工程师,工学博士研究生,E-mail:lvjing21@chd.edu.cn。

Key words: high temperature; fiber reinforced cementitious composite; PVA; mechanical behavior; stress-strain curve

0 引 言

PVA 纤维增强型水泥基复合材料(PVA-ECC)是采用聚乙烯醇纤维来改善水泥基材料抗拉强度低、韧性差、抗震和抗冲击强度较低的一种新型复合材料。自 20 世纪 90 年代 Li 等^[1]提出超高韧性水泥基复合材料的基本设计理论以来,各国学者对该材料基本力学性能和耐久性进行了一系列试验研究,取得众多研究成果^[2-7],并在桥面板的耐久性修补^[8]、大坝维修^[9]、铁路高架桥维修^[10]、输水渡槽维修^[11]、ECC-钢混杂结构^[12]等实际工程中得到应用。

目前,大部分的研究集中在室温状态下的材料性能,主要是由于所使用的结构部位大部分处于室外,无需考虑火灾对结构物的影响。随着 PVA-ECC 应用范围的不断拓宽,部分学者在其作为修补材料来提高混凝土结构耐久性和作为耗能材料提高结构抗震性等方面开展了大量研究^[12-14],研究结果表明,该类材料在室温状态时,较普通混凝土具有卓越的力学性能、良好的抗震性能和耐久性。对高温后该类材料性能的变化规律各国鲜有报道,且 PVA 纤维属于高分子有机纤维,耐热性较差,作为结构材料,其高温后性能尤为重要。在此背景下,本文研究温度对 PVA-ECC 力学性能的影响规律,为 PVA-ECC 构件和结构的抗火设计及火灾后的诊断、加固提供试验依据。

本文对相同配合比 PVA-ECC 基体(以下简称基体)和 PVA-ECC 在室温及不同温度下的立方体抗压强度、抗折强度、弹性模量、轴心抗压强度及抗压应力-应变全曲线等进行试验研究,考察高温后 PVA-ECC 及其基体力学性能的变化规律和破坏形式,并对试验结果进行对比分析,提出高温后 PVA-ECC 及其基体各性能的演变规律。

1 试验概况

1.1 试验原材料

试验用水泥采用陕西秦岭水泥厂生产的 P.C32.5 复合硅酸盐水泥,主要性能指标见表 1。粉煤灰为户县电厂生产的Ⅱ级粉煤灰;砂为渭河河砂,细砂,细度模数 1.87;PVA 纤维为山东泰安同伴纤维有限公司生产,主要性能指标见表 2。

PVA 纤维的热分析试验采用美国 TA 仪器公

表 1 水泥物理力学性能

Tab. 1 Physical and Mechanical Properties of Cement

0.08 mm 筛余/%	凝结时间/min		安定性 (沸煮法)	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
5.0	96	218	合格	3.3	6.8	15.2	35.1

表 2 PVA 纤维的性能

Tab. 2 Properties of PVA Fiber

长度/mm	长径比	弹性模量/ GPa	伸长率/%	抗拉强度/ MPa	密度/ (g·cm ⁻³)
6~8	200	≥35	6~8	1 600	1.3

司生产的 SDTQ600 型热重差热联用热分析仪,升温速率为 10 ℃·min⁻¹。试验测得 PVA 纤维失重曲线(TG 曲线)如图 1 所示。

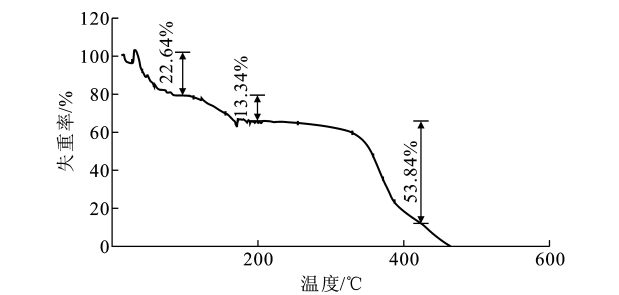


图 1 PVA 纤维 TG 曲线
Fig. 1 TG Curve of PVA Fiber

由图 1 可知,在 100 ℃,200 ℃,400 ℃三个温度时,PVA 纤维均发生较大的质量损失,500 ℃之后 PVA 纤维质量几乎为 0,此时纤维完全分解。因此,本文将加热温度设定为 100 ℃,200 ℃,300 ℃,400 ℃四个温度,分别研究不同温度下 PVA-ECC 及其基体性能的变化规律。

1.2 试验配合比

试验配合比设计采用基于微观力学的性能驱动设计方法^[1],各组成材料用量如表 3 所示。

表 3 PVA-ECC 配合比

Tab. 3 Mix proportions of PVA-ECC

					kg·m ⁻³
试件编号	水泥	粉煤灰	细骨料	水	PVA 纤维
ECC1	728	146	631	411	
ECC2	728	146	631	411	26

1.3 试验方法

试验共制作 30 组试件分别研究 PVA-ECC 及其基体的立方体抗压强度、抗折强度、弹性模量以及单轴抗压应力-应变曲线。每组试件分别成型,40 mm×40 mm×160 mm 的 PVA-ECC 及其基体

试件各 5 组,每组 3 个,70.7 mm×70.7 mm×210 mm 的 PVA-ECC 及其基体试件各 10 组,每组 3 个。试验共制作试件 90 个。试件成型 1 d 后拆模,标准养护 28 d 后进行试验。

将养护至龄期的试件表面晒干后,放入 SX2-16G 系列箱式电阻炉内进行加热处理,加热制度为:升温速率为 10 ℃·min⁻¹,恒温 6 h,打开炉门冷却 1 h 后,取出试件置于室内。设计加热温度为 100 ℃,200 ℃,300 ℃,400 ℃。

立方体抗压、抗折试验依据《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—1999)^[15]中相关规定进行,弹性模量试验依据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)^[16]中相关规定进行,

采用 WAW31000 微机控制电液伺服万能试验机测试单轴抗压应力-应变曲线,加载速率为 0.5 mm·min⁻¹,试验力通过试验机自带的力传感器采集,受压变形通过视频引伸计采集。

2 试验结果分析

本文试验得到 40 mm×40 mm×160 mm 试件的抗折强度 R_f ,立方体抗压强度 R_c ,70.7 mm×70.7 mm×210 mm 试件的弹性模量 E_m ,轴心抗压强度 f_m ,峰值应变 ϵ_m ,试验结果见表 4。

2.1 抗折强度、立方体抗压强度

PVA-ECC 的抗折强度、抗压强度是其力学性能中最基本、最重要的两项,常作为基本参数确定材

表 4 试验结果

Tab. 4 Experiment Results

试件编号	R_f /MPa	R_c /MPa	E_m /GPa	f_m /MPa	$\epsilon_m/10^{-3}$	$\frac{R_f}{R_c}$	加热温度/℃
ECC1-0	5.58	43.1	15.2	39.5	6.65	0.129	25
ECC1-1	4.12	42.5	14.4	32.2	5.13	0.097	100
ECC1-2	5.51	48.6	13.6	35.1	6.06	0.113	200
ECC1-3	5.53	44.4	12.3	38.4	7.19	0.125	300
ECC1-4	5.78	46.0	10.9	33.1	8.38	0.126	400
ECC2-0	10.14	43.8	13.3	32.5	6.72	0.232	25
ECC2-1	9.88	41.6	12.9	31.2	6.28	0.238	100
ECC2-2	8.69	49.5	11.9	37.4	7.34	0.176	200
ECC2-3	5.61	37.3	11.1	28.1	5.54	0.150	300
ECC2-4	5.69	37.1	10.4	18.1	7.45	0.153	400

料的强度等级和质量标准,并决定着其他力学性能指标。PVA-ECC 在不同温度时的抗折强度、抗压强度也是研究其构件和结构高温性能的基础。试验得到的 PVA-ECC 及其基体抗折强度、抗压强度如表 4 所示。不同温度 PVA-ECC 基体与 PVA-ECC 抗折强度如图 2 所示。从图 2 可以看出,室温状态下,PVA-ECC 抗折强度较其基体提高约 1.8 倍,随着加热温度的提高,二者抗折强度值趋于接近,加热温度超过 300 ℃后,PVA-ECC 与基体的抗折强度值几乎相等,表明 PVA-ECC 经 300 ℃以上高温处理后,PVA 纤维几乎完全失去对复合材料抗拉强度的贡献。

不同温度 PVA-ECC 基体与 PVA-ECC 立方体抗压强度如图 3 所示。从图 3 可以看出,加热温度在 200 ℃以下,PVA-ECC 与基体的立方体抗压强度值较为接近,表明在加热温度 200 ℃以下 PVA 纤维的掺入对基体抗压强度影响不大。加热温度超过 200 ℃后,PVA-ECC 的立方体抗压强度值较其

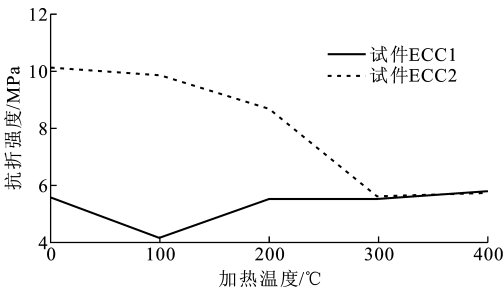


图 2 不同温度 PVA-ECC 基体与 PVA-ECC 抗折强度

Fig. 2 Flexural Strength of PVA-ECC Matrix and PVA-ECC at Different Temperatures

基体下降明显,经 400 ℃加热处理后的 PVA-ECC 的立方体抗压强度值只有其基体的 81%,主要原因是加热温度较高时纤维发生熔融,基体内孔隙率增大,抗压强度降低。

2.2 弹性模量

弹性模量是混凝土的重要力学性能,它反映了混凝土所受应力与所产生应变之间的关系,是计算混凝土结构变形、裂缝开展和温度应力所必需的参

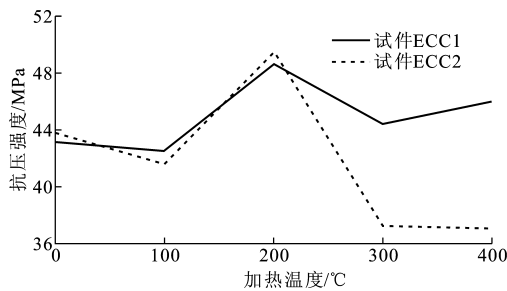


图 3 不同温度 PVA-ECC 基体与 PVA-ECC 立方体
抗压强度

Fig. 3 Cubic Compressive Strength of PVA-ECC
Matrix and PVA-ECC at Different Temperatures

数之一。试验测得的弹性模量与加热温度的关系如图 4 所示。对比 PVA-ECC 及其基体的弹性模量可以看出,随着加热温度的提高,PVA-ECC 与基体的弹性模量均降低,PVA-ECC 弹性模量均小于其基体,表明 PVA 纤维的掺入可有效降低基体的刚度,且随着加热温度的提高,降低的幅度逐渐减小。

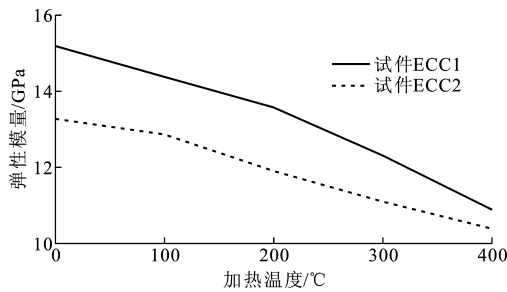
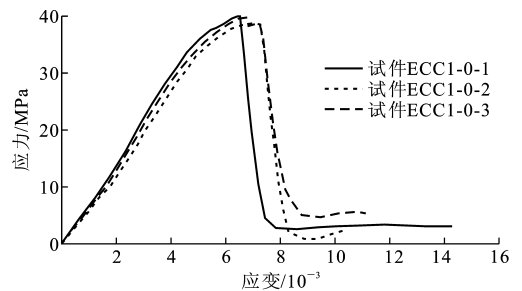


图 4 弹性模量与加热温度的关系

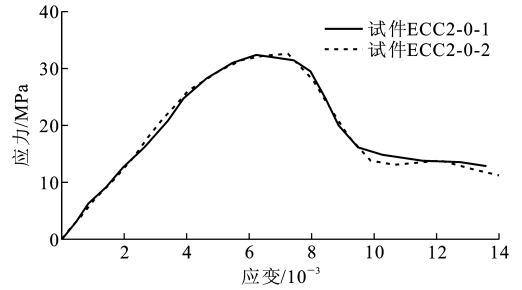
Fig. 4 Relations Between Elasticity Modulus and
Heating Temperature

2.3 单轴抗压应力-应变全曲线

单轴受压状态下的应力-应变关系全面地反映了各个受力阶段的变形特点和破坏全过程,包含了重要的力学性能指标,是结构和构件设计、非线性分析所必需的材料物理条件。试验得到的棱柱体抗压应力-应变全曲线(由荷载-变形曲线经计算得到)如图 5~9 所示。从图 5~9 可以看出,尽管 PVA-ECC 及其基体的全曲线和混凝土棱柱体抗压应力-应变全曲线类似,亦属于偏态的单峰曲线,但是其塑性变形能力明显优于普通混凝土,PVA-ECC 及其基体的峰值应变较为接近,均出现在 0.005~0.008 之间,但峰值应变后延性性能和韧性性能随加热温度的不同而差异性较大。加热温度在 200 °C 以下,基体在峰值荷载后,均突然发生破坏,表现出明显的脆性破坏,而 PVA-ECC 在峰值荷载后应力-应变曲线较基体趋于平缓,表现出良好的延性性能和韧性



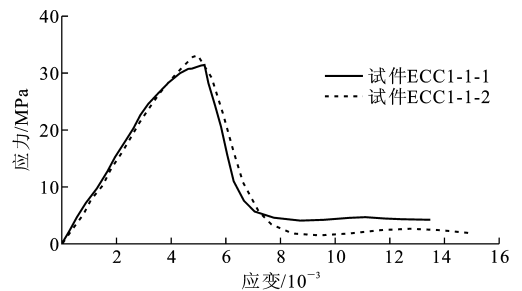
(a) 试件ECC1-0-1,ECC1-0-2,ECC1-0-3



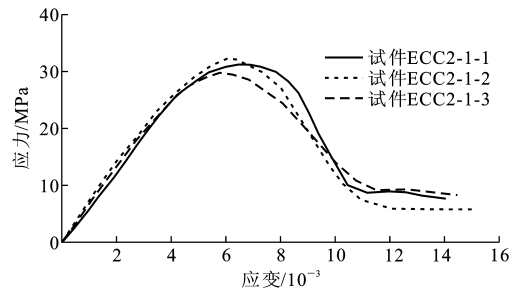
(b) 试件ECC2-0-1,ECC2-0-2

图 5 试件 ECC1-0,ECC2-0 的抗压应力-应变全曲线

Fig. 5 Compressive Stress-strain Curves of
Specimens ECC1-0, ECC2-0



(a) 试件ECC1-1-1,ECC1-1-2



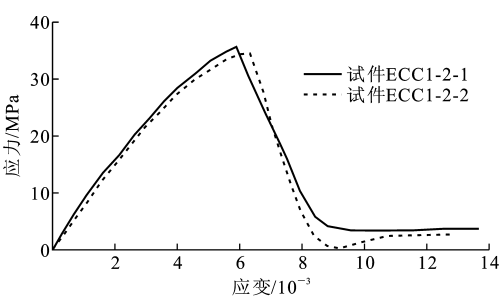
(b) 试件ECC2-1-1,ECC2-1-2,ECC2-1-3

图 6 试件 ECC1-1,ECC2-1 的抗压应力-应变全曲线

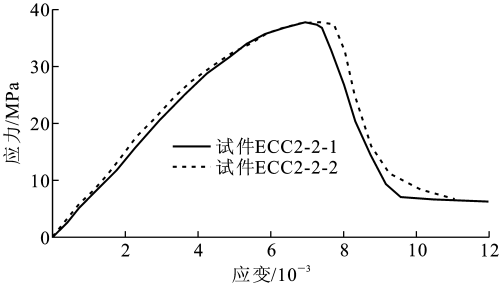
Fig. 6 Compressive Stress-strain Curves of
Specimens ECC1-1, ECC2-1

性能。

加热温度超过 200 °C 后,PVA-ECC 及其基体的抗压应力-应变曲线渐趋扁平,峰值点下降且右移,表明高温轴心抗压强度 f_m 降低,峰值应变 ϵ_m 增大,经 400 °C 处理后的 PVA-ECC 极限抗压强度只有室温状态的一半左右,而 PVA-ECC 立方体试件



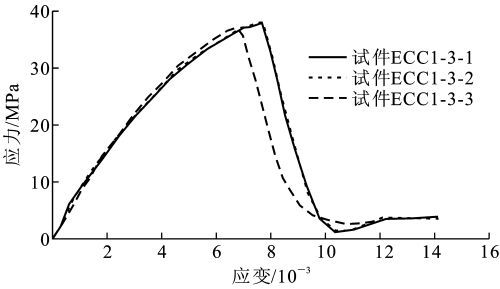
(a) 试件ECC1-2-1,ECC1-2-2



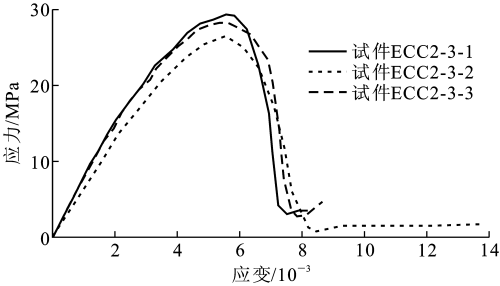
(b) 试件ECC2-2-1,ECC2-2-2

图 7 试件 ECC1-2,ECC2-2 的抗压应力-应变全曲线

Fig. 7 Compressive Stress-strain Curves of Specimens ECC1-2, ECC2-2



(a) 试件ECC1-3-1,ECC1-3-2,ECC1-3-3



(b) 试件ECC2-3-1,ECC2-3-2,ECC2-3-3

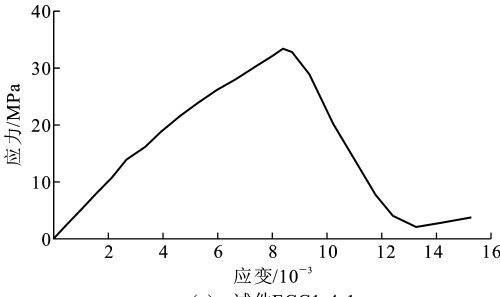
图 8 试件 ECC1-3,ECC2-3 的抗压应力-应变全曲线

Fig. 8 Compressive Stress-strain Curves of Specimens ECC1-3, ECC2-3

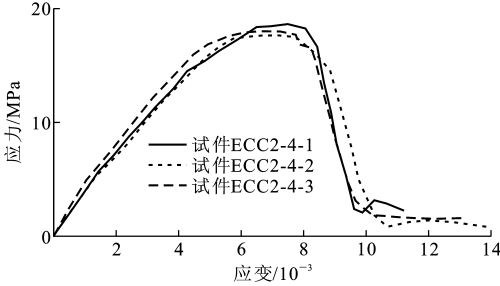
抗压强度经 400 ℃ 处理后约为室温状态的 85%，这主要是因为试件增大导致试件内部纤维对试件抗压强度的敏感性增大。

3 结 语

(1)加热温度低于 200 ℃ 时,PVA 纤维可有效



(a) 试件ECC1-4-1



(b) 试件ECC2-4-1,ECC2-4-2,ECC2-4-3

图 9 试件 ECC1-4,ECC2-4 的抗压应力-应变全曲线

Fig. 9 Compressive Stress-strain Curves of Specimens ECC1-4, ECC2-4

提高基体的抗折强度,对立方体抗压强度影响较小。加热温度高于 200 ℃ 时,PVA 纤维对基体抗折强度的改善作用逐步减小,加热温度高于 300 ℃ 后,PVA-ECC 与其基体的抗折强度十分接近,PVA-ECC 抗压强度明显低于基体。

(2)室温状态下,PVA 纤维的掺入可有效降低基体的弹性模量。随着加热温度的提高,PVA-ECC 与其基体的弹性模量均呈下降趋势,且 PVA 纤维对基体弹性模量的改善效果降低。

(3)试验测得 PVA-ECC 及其基体在室温、100 ℃、200 ℃、300 ℃、400 ℃ 处理后的单轴抗压应力-应变全曲线,并对两者进行了对比分析,结果表明:加热温度在 200 ℃ 以下 PVA 纤维的添加使基体的韧性大幅度提高,并将抗压破坏模式由脆性破坏转变成延性破坏;当加热温度超过 200 ℃ 时,随着加热温度的提高,PVA 纤维对基体韧性的改善作用逐步降低,轴心抗压强度较基体发生大幅度下降。

(4)200 ℃ 可以作为 PVA-ECC 正常使用的极限温度,PVA-ECC 工作的环境温度超过 200 ℃ 时,该类材料的各项性能会发生较大的改变,在结构设计中需要慎重考虑。

参考文献:

References:

[1] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites [J].

- Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118 (11): 2246-2264.
- [2] 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- LI He-dong. Experimental Research on Ultra High Toughness Cementitious Composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [3] KAMAL A, KUNIEDA M, UEDA N, et al. Evaluation of Crack Opening Performance of a Repair Material with Strain Hardening Behavior[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(10): 863-871.
- [4] FISCHER G, LI V C. Effect of Matrix Ductility on Deformation Behavior of Steel-reinforced ECC Flexural Members Under Reversed Cyclic Loading Conditions[J]. ACI Structural Journal, 2002, 99 (6): 781-790.
- [5] LEPECH M, LI V C. Preliminary Findings on Size Effect in ECC Structural Members in Flexure[C]// BRANDT A M, LI V C, MARSHALL I H. Proceedings of the Seventh International Symposium on Brittle Matrix Composites. Warsaw: ZTUREK RSI and Woodhead Publication, 2003: 57-66.
- [6] WANG X G, WITTMANN F H, ZHAO T J. Comparative Study of Test Methods to Determine Fracture Energy of Strain Hardening Cement-based Composites (SHCC)[J]. Restoration of Buildings and Monuments, 2006, 12(2): 169-178.
- [7] AHMED S F U, MIHASHI H. A Review on Durability Properties of Strain Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites (SHFRCC)[J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 29 (5): 365-376.
- [8] LI V C, LEPECH M. Crack Resistant Concrete Material for Transportation Construction [C]//TRB. Proceedings of Transportation Research Board 83rd Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2004: 1-10.
- [9] KOJIMA S, SAKATA N, KANDA T, et al. Application of Direct Sprayed ECC for Retrofitting Dam Structure Surface: Application for Mitaka-dam [J]. JCI Concrete Journal, 2004, 42(5): 135-139.
- [10] INAGUMA H, SEKI M, SUDA K, et al. Experimental Study on Crack-bridging Ability of ECC for Repair Under Train Loading[C]//FICSHER G, LI V C. Proceedings of International RILEM Workshop on HPFRCC in Structural Applications. Hawaii: RILEM Publications SARL, 2005: 499-508.
- [11] ROKOGO K, KANDA T. Presentation "Recent HPFRCC R&D Progress in Japan"[C]//RILEM Publications SARL. Proceedings of International Workshop on HPFRCC in Structural Applications. Bagneux: RILEM Publications SARL, 2005: 23-26.
- [12] FISCHER G, FUKUYAMA H, LI V C. Effect of Matrix Ductility on the Performance of Reinforced ECC Column Members Under Reversed Cyclic Loading Conditions[C]//ROKUGO K, FUKUYAMA H. JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC). Takayama: JCI, 2002: 269-278.
- [13] PARRA-MONTESINOS G, WIGHT J K. Seismic Response of Exterior RC Column-to-steel Beam Connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126 (10): 1113-1121.
- [14] KESNER K, BILLINGTON S L. Investigation of In-fill Panels Made from Engineered Cementitious Composites for Seismic Strengthening and Retrofit[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131 (11): 1712-1720.
- [15] GB/T 17671—1999, 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)[S].
- GB/T 17671—1999, Method of Testing Cements-determination of Strength[S].
- [16] JGJ/T 70—2009, 建筑砂浆基本性能试验方法标准[S].
- JGJ/T 70—2009, Standard for Test Method of Basic Properties of Construction Mortar[S].