

可用于无钢筋建造的超强超韧水泥基复合材料

陆洲导, 林晨旭, 余江滔, 俞可权

(同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

摘要: 基于断裂力学的设计理念, 使用活性粉末, 并以高强、高弹性模量的聚乙烯纤维作为增强材料, 制备具有超高强度和超高延性的纤维水泥基复合材料(UHDCC)。轴向拉伸试验、轴压试验、弹性模量试验和四点弯曲试验结果表明, UHDCC的极限拉应力强度可达20 MPa, 对应的平均拉伸应变接近9%, 轴向抗压强度超过110 MPa, 四点弯曲试验结果表明, UHDCC的无筋整浇梁的弯曲性能达到配筋率1.5%的普通钢筋混凝土梁的水平, 且具有良好的延性。

关键词: 超高延性水泥基复合材料(UHDCC); 断裂力学; 活性粉末

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

High Strength Ultra-High Ductile Cementitious Composite Developed for Steel-Free Construction

LU Zhoudao, LIN Chenxu, YU Jiangtao, YU Kequan

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, an ultra-high ductile cementitious composite (UHDCC) with a mixture of reactive powder is prepared based on the design concept of fracture mechanics. High strength and high modulus polyethylene fiber is used as reinforced materials in the composite. Axial compression test, elastic modulus test and four-point bending test are conducted to prove that the ultimate tensile stress strength of the material is up to 20 MPa, the corresponding average tensile strain is close to 9%, and the axial compressive strength exceeds 110 MPa. It is proved by four-point bending test that the flexural performance of UHDCC beam reaches the level of ordinary reinforced concrete beam with 1.5% reinforcement ratio and its ductility is good.

Key words: ultra-high ductile cementitious composite (UHDCC); fracture mechanics; reactive powder

现代高性能混凝土可以分成两类:一类是高强度混凝土,如超高性能混凝土^[1]、活性粉末混凝土^[2];另一类是高延性混凝土,如高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC)^[3]、应变强化水泥基复合材料^[4-6]。高强度混凝土可以有效地减小结构构件的截面尺寸,并为结构提供更好的安全保障(尤其是受压)。高延性混凝土可以在极端荷载(如地震、飓风和爆炸)下吸收大量能量,避免灾难性结构崩塌。然而,在荷载作用下,常规的高强度混凝土往往呈现很大的脆性。在开裂或超过极限承载力后,高强度混凝土会突然破坏,迅速丧失其力学性能。另一方面,超高延性混凝土的强度往往不高。材料制备中,为了保证其应变强化特征,设计者需要控制基体的断裂韧性,从而降低了材料的开裂强度和抗压强度。

为了全面提升纤维混凝土的强度和拉伸延性,学者们进行了一系列研究,并取得了意义重大的进展。活性粉末混凝土(RPC)是一种新型的超高强度水泥基材料,其抗压强度为200~800 MPa^[7-9]。RPC由非常细的粉末组成,如粉碎石英岩和硅灰。一般通过优化粉末粒径以获得致密基体,同时使用高效减水剂,大幅度降低水灰比,从而达到高强度目的。在活性粉末混凝土制备中,往往加入高强度、细直径的钢纤维以增加基体脆性,钢纤维的体积分数一般在1%~4%之间^[10]。然而,由于基体强度、纤维力学性能等多方面原因,绝大多数高强度纤维混凝土仍是一种拉伸应变软化材料。许多学者的研究显示:超高性能纤维加强混凝土(UHPFRC)在28 d龄期的抗压强度可达200 MPa,但其峰值拉伸延性不超过0.6%。Ranade等^[11-12]发明了高强度、高延性混凝土(HSHDC),该材料的抗压强度超过150 MPa,直接拉伸强度高达15 MPa,拉伸应变在3%和4%之间。这是水泥基复合材料第一次真正实现了高强度和高延性的结合。然而,直接拉伸试验结果表明,该材料

收稿日期: 2016-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(51478362);上海市工程结构安全重点实验室开放课题(2016-KF08)

第一作者: 陆洲导(1957—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为钢筋混凝土结构抗火性能。E-mail: lzd@tongji.edu.cn

通讯作者: 俞可权(1986—),男,博士生,主要研究方向为超高性能混凝土。E-mail: zjzykq@163.com

的裂缝宽度较大,裂缝密度偏低,而且应力波动较大。

本文基于 ECC 设计中微观力学原理^[13],借鉴 Ranade 等^[11-12]的研究经验,采用活性粉末和特殊纤维配制出了具有超高强度和超高延性的纤维混凝土(UHDCC)。

1 UHDCC 的配方设计

传统聚乙烯醇高延性纤维增强水泥基复合材料(PVA-ECC)的原材料一般不包含粗骨料,水泥用量较大。为了提升搅拌的和易性和材料的环保性,Li^[13]在配方中大量地加入了工业废料——粉煤灰作为水泥的取代物。本文中,为了获得高强性能(包括抗压强度和抗拉强度),采用活性更好的高炉矿渣(GGBFS)取代传统 ECC 中常用的低钙粉煤灰,将水泥的用量控制在 $800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下。此外,复合材料的制备中还使用了硅灰。硅灰可以显著改善水泥和骨料间的界面区,并且促进火山灰效应。同时,为了保证拉伸应变强化特性,借鉴了 Li 提出的拉伸应变强化和多裂缝性能设计的两个准则^[14-15]。第一个准则为强度准则,即基体的拉伸开裂应力 σ_c 不能超过纤维最大桥联应力 σ_0 ,如下所示:

$$\sigma_c \leq \sigma_0 \quad (1)$$

σ_c 由基体断裂韧性 K_m 和存在的内部缺陷尺寸 a_0 确定。第二个准则为裂缝尖端韧性 J_{tip} 要小于余能 J'_b 。余能 J'_b 根据桥联应力 σ 关于裂缝张开度 δ 的曲线关系算出,如图 1 所示^[14-15]。

$$J_{tip} \leq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \equiv J'_b \quad (2)$$

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_m} \quad (3)$$

式中: E_m 为基体弹性模量。

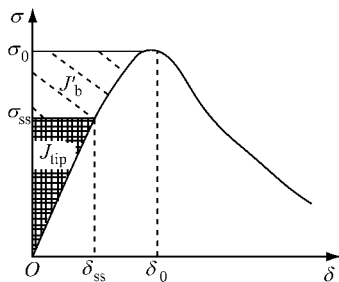


图1 典型的 σ - δ 曲线

Fig.1 Typical σ - δ curve

基于强度准则的式(1)和基于能量准则的式(2)

是多裂缝出现的必要条件,只有同时满足式(1)和(2),才能使得材料获得应变硬化(PSH)性能。应变硬化性能指数被用来定量评价稳态开裂准则的富余程度,并由下式定义^[16]:

$$\gamma_{PSH} = \frac{J'_b}{J_{tip}} \quad (4)$$

γ_{PSH} 的值越大,纤维混凝土材料越容易实现多裂缝开裂和应变强化,这意味着 J'_b 更大而 J_{tip} 更小。从物理学角度来看, J'_b 为同一裂缝截面纤维被拔出的过程中所消耗的能量,而 J_{tip} 是基体断裂能。本文中,一方面采用活性粉末和高效减水剂以增加基体的致密度,大幅度提高基体强度的同时也提高了断裂能 J_{tip} 。由式(4)可知,只有更大幅度地提高 J'_b ,才能继续保持或提升复合材料的延性。另一方面,纤维拔出的过程中,致密的 RPC 基体会产生更强的界面摩擦力,从而导致更大的纤维拉应力。因此,本文中材料对纤维强度的要求远高于普通聚合物纤维和钢纤维。采用了超高分子量聚乙烯(UHMWPE,以下简称 PE)纤维取代 RPC 中常用的弯钩形钢纤维。PE 纤维具有超高拉伸强度,能保证纤维拔出过程中不易被拉断。此外,PE 纤维的憎水特性可以消除纤维/基体间的化学黏结,显著地提高纤维桥联的余能^[11]。UHDCC 的具体配方如表 1 所示。PE 纤维的物理/力学性质以及几何形态如表 2 所示。水泥采用 PII 525 型号水泥。砂的粒径分布如表 3 所示。

表1 UHDCC 组分

Tab.1 Mixture properties of UHDCC

组分	数值
水泥/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	800
硅灰/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	150
高炉矿渣/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	750
砂/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	500
水/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	230
PE 纤维/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	20
高效减水剂/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	25

表2 PE 纤维的特性

Tab.2 Properties of PE fiber

物理力学性质	数值
直径/ μm	35
长度/mm	12
体积分数/%	2
名义强度/MPa	3 000
名义杨氏模量/GPa	100
断裂伸长率/%	2~3
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.97
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	150

本文将介绍直接拉伸试验、抗压强度试验和压缩杨氏模量测试,并进行无筋 UHDCC 的四点弯曲

试验.通过试验观察 UHDCC 的应变强化行为、饱和裂缝现象,并验证材料的拉伸强度和延性.

表 3 砂的粒径分布

Tab.3 Particle size distribution of sand

粒径/ μm	质量分数/%
≤ 45	0
≤ 75	0.18
≤ 100	1.64
≤ 200	32.71
≤ 300	68.05
≤ 400	86.67
≤ 500	95.31
≤ 600	98.98
≤ 700	99.96
≤ 800	100.00

2 试验准备

2.1 试件制备

本试验共浇筑四根狗骨式试件,并在 28 d 龄期下测试其受拉性能.通过试验(试件尺寸如图 2 所示,厚度为 13 mm)测量 UHDCC 在单轴拉伸下的应力-应变关系.狗骨试件的几何特征可使大部分裂纹发生在截面较小的 80 mm 范围内,保证测量结果的可靠性.

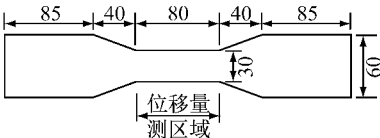


图 2 狗骨试件尺寸(单位:mm)

Fig.2 Dimension of dogbone specimen(unit:mm)

本试验浇筑抗压试块共 18 个,其中边长为 70.7 mm 立方体试块、100 mm 立方体试块和 200 mm \times 100 mm \times 100 mm 的棱柱体试块各六个.棱柱体试块用于测量 UHDCC 的压缩模量,具体形态见图 3.

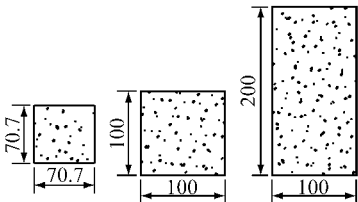


图 3 轴压试件尺寸(单位:mm)

Fig.3 Dimension of compressive specimen(unit:mm)

此外,为了研究无筋 UHDCC 的弯曲性能,试验前浇筑八根长度 500 mm \times 100 mm \times 100 mm 的梁,其中包括六根普通钢筋混凝土梁和两根 UHDCC 梁(其中,钢筋混凝土梁中钢筋的屈服强度约为 600

MPa,箍筋配置情况为 6@100).试验试件的信息如表 4 所示,四点弯曲试验的布置如图 4 所示.

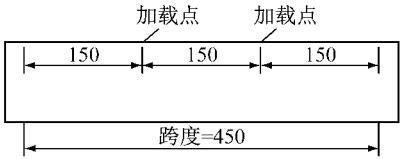


图 4 四点弯曲试验布置(单位:mm)

Fig.4 Dimension of four-point bending test(unit:mm)

表 4 四点弯曲梁试验试件

Tab.4 Specimens of four-point bending test

试件编号	试件名称	纵筋	配筋率/%	箍筋
1	2@混凝土	2@6	0.57	有
2	3@8 混凝土	3@8	1.51	有
3	3@10 混凝土	3@10	2.36	有
4	2@6 混凝土	2@6	0.57	无
5	3@8 混凝土	3@8	1.51	无
6	3@10 混凝土	3@10	2.36	无
7	无筋 UHDCC-1	无	无	无
8	无筋 UHDCC-2	无	无	无

2.2 试验过程

根据规范 JSCE 2008^[17],以 0.5 mm \cdot min⁻¹ 的恒定加载速度进行拉伸试验.两只位移计安装于试件两侧,测量整个试验过程中长度为 100 mm 规定区域的位移.此外,利用数字图像相关技术(DIC)^[18-19]进行裂缝分布的观测.数字图像相关技术是一种非接触式的测量手段,可定量观测试验对象的位移和应变场.试验前,对试件表面喷涂黑白喷漆,形成随机的散斑图像.拉伸和弯曲试验中,在试验机前安置数码相机,以 20 s 的时间间隔采集数码图像信息.试验后运用图像相关性分析软件 VIC 2D 进行后处理,得到位移和应变场.

UHDCC 梁的四点弯曲试验中,在支座处、加载点和跨中处安装五个位移传感器进行挠度检测.同时采用 DIC 方法监测整个加载过程的裂缝变化.试验采用位移加载,速度统一为 1 mm \cdot min⁻¹.

受压立方体试件(70.7 mm 和 100 mm)的受压加载速率为 1 MPa \cdot s⁻¹.棱柱体试件的加载速度固定在 0.04 mm \cdot s⁻¹,以确保获得稳定的荷载-位移曲线.在棱柱体的侧表面放置有两个高精度的位移传感器,用来测量试件的压缩变形.

3 结果和讨论分析

3.1 拉伸性能

根据拉伸试验的应力-应变曲线,所有 UHDCC 试件都显示出拉应变硬化性能.狗骨试件的平均极

限受拉强度达到 19.2 MPa,相应的平均拉应变为 8.7%,平均初始裂缝应力为 10.23 MPa. UHDC 试件的拉伸弹性模量可通过拉应力-应变曲线的斜率求得,平均值为 41.2 GPa. 在拉伸荷载下, UHDC 的实际断裂能超过了 $1\,500\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$, 大约为普通 ECC 的 10 倍.

裂缝宽度的大小对混凝土材料的力学性能起控制作用,并且对耐久性有直接影响^[20]. 数字图像相关技术的处理结果显示(见图 5),随着应变水平的增加, UHDC 出现裂缝,裂缝不断增多,并最终趋于饱和. 值得注意的是,即使应变程度很高,裂缝也不会出现局部化集中;拉伸试件的残余裂缝宽度低于 $100\text{ }\mu\text{m}$. 与普通 ECC 相比, UHDC 的纤维和基体之间的界面间没有化学黏结,但具有更高的纤维/基体界面摩擦力. 因此,其裂缝宽度略大但极限拉应力更高^[11]. 在高应变的情况下, UHDC 有远高于普通钢筋混凝土的抗渗透性和耐久性.

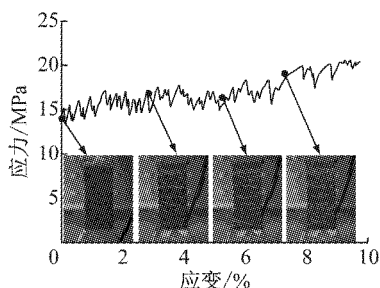


图5 试件在加载过程中多裂缝的形成

Fig.5 Formation of multiple cracks during loading

3.2 轴压性能

六个边长 70.7 mm 和六个边长 100 mm 的立方体抗压强度结果如表 5 所示. 两种尺寸试件的平均抗压强度分别为 121.50 MPa 和 111.38 MPa. 由于尺寸效应的影响,随着试件尺寸的增大,抗压强度略微减小. 100 mm 立方体试件与 70.7 mm 立方体试

表5 UHDC 的抗压性能

Tab.5 Compressive properties of UHDC

编号	峰值应力/MPa			峰值应变 (棱柱体)/ 10^{-6}	杨氏模量 (棱柱体)/ GPa
	70.7 mm 立方体	100 mm 立方体	棱柱体		
1	125.00	108.46	123.70	3 582.84	38.51
2	110.51	104.77	121.06	2 847.74	43.76
3	122.54	113.93	101.94	2 789.98	44.61
4	126.36	112.72	119.53	3 678.24	36.99
5	125.78	113.63	—	—	—
6	118.84	114.72	—	—	—
平均值	121.50	111.38	116.56	3 224.70	
标准差	6.05	3.91	9.90	470.83	3.78
协方差	0.050	0.035	0.085	0.146	0.092

件的抗压强度比为 0.92. 这与早期的试验结果是一致的^[21-22].

200 mm×100 mm×100 mm 棱柱体的压应力-应变曲线见图 6. 应力未达到顶峰时, UHDC 表现为线弹性. 在 80% 的峰值应力附近, 棱柱体出现了微裂缝, 应力-应变曲线的斜率变缓. 由于纤维的桥联作用, 裂缝扩展稳定. 超过峰值后, 抗压强度显著减少, 但没有出现普通高强混凝土的断崖式陡降^[23-25]. 综上所述, 压应力达到峰值前, UHDC 呈现出近乎线弹性的抗压应力-应变行为. 可以认为 UHDC 在受压开裂后, 高强纤维约束了裂缝的发展, 从而减缓了抗压刚度的明显下降. 超过峰值后, UHDC 的抗压强度出现下降, 但相比普通高强度混凝土, 其应力-应变行为呈现出明显的延性. 通过线弹性段的斜率计算 UHDC 的受压杨氏弹性模量, 平均值为 40.9 GPa, 高于普通混凝土. 当达到最大压应力时, 应变达到 $3\,224.70\times 10^{-6}$, 大约为传统高强混凝土的 1.3 倍^[23-25].

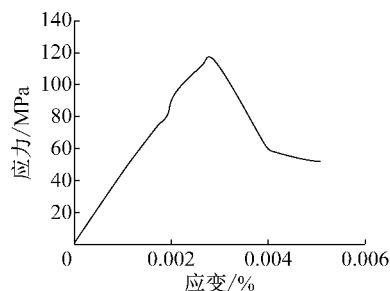


图6 UHDC 棱柱体试件的压应力-应变曲线

Fig.6 Compressive stress-strain curve of UHDC prism

3.3 UHDC 的弯曲性能

共进行六根尺寸为 500 mm×100 mm×100 mm 的普通钢筋混凝土梁和两根 UHDC 梁 (UHDC-1、UHDC-2) 的四点弯曲试验, 梁的荷载-挠度曲线见图 7. 当荷载在 31 kN 阶段, UHDC 梁出现第一条裂缝. 当荷载在 42 kN 阶段, 裂缝数量随着荷载增加而增加, 但是裂缝的宽度基本保持不变. 达到最大荷载时, 试件在纯弯段形成了密集的微裂缝.

由图 7 可知, UHDC 梁的抗弯强度明显大于配筋率 0.57% 的钢筋混凝土梁, 相当于配筋率 1.51% 的钢筋混凝土梁; 与无箍筋的普通配筋率 1.51% 的梁相比, UHDC 梁具有更好的延性. 极限状态下, 梁的挠跨比达到了 1/40, 完全可以满足工程需求. UHDC 梁的破坏更接近于剪切破坏, 如果能提高其抗剪性能, UHDC 梁的延性将进一步提高.

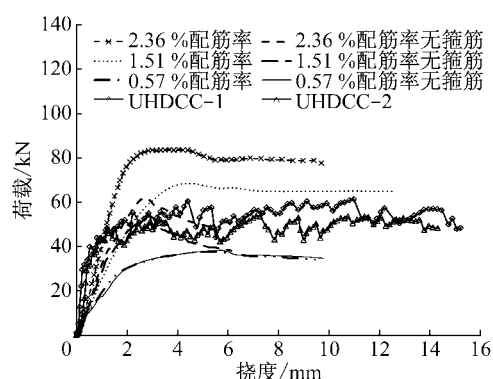


图 7 UHDC 梁的荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curve of UHDC beam

4 结论

(1) UHDC 的平均极限拉伸强度达到了 19.2 MPa, 相应的平均拉伸应变为 8.7%, 平均初始开裂应力为 10.23 MPa. 在直接拉伸下, UHDC 的断裂能大于 $1\,500\text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$, 是普通 ECC 的 10 倍.

(2) 边长 70.7 mm 和 100 mm 的两种立方体试块的平均抗压强度分别为 121.50 MPa 和 111.38 MPa. UHDC 的平均压缩杨氏模量为 40.9 GPa. 另外, 峰值强度对应的应变达到了 $3\,224.70 \times 10^{-12}$, 大致是传统高强混凝土的 1.3 倍.

(3) UHDC 无筋梁的抗弯性能达到配筋率 1.51% 的钢筋混凝土梁水平, 且具有令人满意的延性, 是现有水泥基材料中少有达到无筋建造水平的高性能混凝土.

参考文献:

- [1] WILLE K, DONG J K, NAAMAN A E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents [J]. *Materials & Structures*, 2011, 44(3): 583.
- [2] CHEYREZY M, MARET V, FROUIN L. Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete) [J]. *Cement & Concrete Research*, 1995, 25(7): 1491.
- [3] WANG S, WU C, LI V C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC) [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(6): 483.
- [4] JUN P, MECHTCHERINE V. Behaviour of strain-hardening cement-based composites (SHCC) under monotonic and cyclic tensile loading. Part 1: experimental [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2010, 32(10): 801.
- [5] ZIJL G P A G, WITTMANN F H, OH B H, *et al.* Durability of strain-hardening cement-based composites (SHCC) [J]. *Materials & Structures*, 2012, 45(10): 1447.
- [6] ZIJL G P A G. Improved mechanical performance: shear behaviour of strain-hardening cement-based composites (SHCC) [J]. *Cement & Concrete Research*, 2007, 37(8): 1241.
- [7] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes [J]. *Cement & Concrete Research*, 1995, 25(7): 1501.
- [8] ZHENG W, LUO B, WANG Y. Compressive and tensile properties of reactive powder concrete with steel fibres at elevated temperatures [J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 41(2): 844.
- [9] YIGITER H, AYDIN S, YAZICI H, *et al.* Mechanical performance of low cement reactive powder concrete (LCRPC) [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(8): 2907.
- [10] RICHARD P, CHEYREZY M. Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength [J]. *ACI Special Publication*, 1994, 114: 507.
- [11] RANADE R, LI V C, STULTS M D, *et al.* Composite properties of high-strength, high-ductility concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2013, 110(4): 413.
- [12] RANADE R, C. LI V, STULTS M D, *et al.* Micromechanics of high-strength, high-ductility concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2013, 110(4): 375.
- [13] LI V C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98: 483.
- [14] MARSHALL D B, COX B N. A J-integral method for calculating steady-state matrix cracking stresses in composites [J]. *Mechanics of Materials*, 1988, 7(2): 127.
- [15] 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.
- [16] KANDA T, LI V C. Multiple cracking sequence and saturation in fiber reinforced cementitious composites [J]. *Concrete Research & Technology: Japan Concrete Institute*, 2011, 9(2): 19.
- [17] JSCE. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composite with multiple fine cracks [S]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2008.
- [18] KOZICKI J, TEJCHMAN J. Experimental investigations of strain localization in concrete using digital image correlation (DIC) technique [J/OL]. *Archives of Hydro*, 2007, 54(1) [2016-07-02]. https://www.researchgate.net/publication/266234085_Experimental_Investigations_of_Strain_Localization_in_Concrete_using_Digital_Image_Correlation_DIC_Technique.
- [19] SHAH S G, KISHEN J M C. Fracture properties of concrete: concrete interfaces using digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(3): 303.
- [20] LEPECH M D, LI V C. Application of ECC for bridge deck link slabs [J]. *Materials & Structures*, 2009, 42(9): 1185.
- [21] GRAYBEAL B, DAVIS M. Cylinder or cube: strength testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) ultra-high-performance fiber-reinforced concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2008, 105(6): 603.
- [22] VISO J R D, CARMONA J R, RUIZ G. Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete [J]. *Cement & Concrete Research*, 2008, 38(3): 386.
- [23] GRAYBEAL B A. Compressive Behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2007, 104(2): 146.
- [24] WEE T H, CHIN M S, MANSUR M A. Stress-strain relationship of high-strength concrete in compression [J]. *American Society of Civil Engineers*, 2014, 8(2): 70.
- [25] MANSUR M A, CHIN M S, WEE T H. Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1999, 11(1): 21.