

文章编号:1005-0523(2011)05-0046-06

碳纤维水泥砂浆柱体轴压下力电性能尺寸效应研究

童谷生, 吴秋兰

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:采用54个3种尺寸的几何相似碳纤维水泥砂浆试样,在给定电压下测试柱体电极间的电流;测试轴向应变下电阻率和柱体的极限荷载,分析给定应力下试件的灵敏度系数,计算轴压下柱体的抗压强度。研究表明:碳纤维水泥砂浆柱体具有压敏特性,可以利用电阻变化率来监控构件的自损伤;碳纤维水泥砂浆柱体的电阻率随着试件尺寸的增大而减小,即试样的电阻率存在尺寸效应现象;碳纤维水泥砂浆柱体试件在单向加载作用下试样的灵敏度系数随尺寸的增大而增大;抗压强度随着试件几何尺寸的增大而降低,可以用Bazant的尺寸效应律来拟合。

关键词:CFRM;力电效应;体积电阻率;强度

中图分类号:TU58

文献标志码:A

在普通水泥基材料中掺入少量的带电短切碳纤维,形成碳纤维增强水泥基复合材料(carbon fiber reinforced cement based composites, CFRC),改善了复合材料的导电性能,并使其具有电阻敏感性,形成智能材料。利用CFRC压敏性制作用于土木结构健康监测的传感器,不仅可克服传统传感器耐久性低和稳定性差的缺点,而且价格低廉、工艺简单,因此有望成为土木结构健康监测的理想传感器之一^[1-2]。目前已有不少CFRC制备工艺,碳纤维的分散性、长度及含量等因素对CFRC力学和导电性能影响方面的研究^[3-7],并由定性转向定量研究^[8-9]。但对这类材料力电性能尺寸效应的研究却很少,对尺寸效应规律的研究是建立CFRC力学与电学性能本构模型的基础,因此具有理论和实际意义。

拟在试验的基础上研究碳纤维增强水泥砂浆(CFRM)柱体在轴压下的强度以及电阻率的变化,研究几何相似的柱体在相同应力下的灵敏度系数以及极限荷载下尺寸效应率等问题,并初步分析其有关机理。

1 试样制备

试验研究表明^[5-7],碳纤维的类型、表面处理工艺、长度、含量及分散性等因素都影响碳纤维复合材料的力电性能。在研究碳纤维水泥砂浆力电性能前,制备分散均匀、粘结性能好且灵敏度试样是减小和获得稳定电阻率的基础。参考已有资料,在多次初步试验后,选择了如下材料与配合比。采用的水泥是普通硅酸盐水泥(P·O42.5),由南昌万年青水泥有限责任公司生产,细骨料采用本地标准砂(筛选细度模数为2.43的中砂),减水剂是由江西省创新外加剂有限公司生产,采用的短切碳纤维是由上海新卡碳素科技有限公司提供的硼基碳纤维,其性能指标如表1所示。所采用的配合比: $m(\text{水泥}):m(\text{砂}):m(\text{硅灰}):m(\text{水})=1:1:0.15:0.45$ 。按占水泥质量百分比计算,碳纤维水泥砂浆的配合比为碳纤维0.6%,聚羧酸高效减水剂2%,消泡剂(磷酸三丁酯)0.13%,CMC(羧甲基纤维素钠)掺量为0.8%。

收稿日期:2011-06-16

基金项目:江西省自然科学基金项目(2009GZC0019);铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心项目(10TM07)

作者简介:童谷生(1962—),男,教授,博士,研究方向为材料与结构强度。

表1 碳纤维的主要技术指标

Tab.1 Main technical indexes of carbon fiber

种类	抗拉强度/MPa	抗拉模量/GPa	密度/g·cm ⁻³	直径/μm	电阻率/10 ⁻³ Ω·cm
PAN基	2 000~3 000	175~215	1.74~1.76	7	2.1

为了研究碳纤维水泥砂浆力电性能的尺寸效应,试验研究设计制作了64个几何相似的短切碳纤维水泥砂浆棱柱体,其尺寸为 $b\times h$ (b 为正方形截面边长, h 为柱高)。为使试件中部摆脱端部摩擦阻力的影响,处于单轴均匀受压状态,在本试验中,试件的高径比取2。试件尺寸见表2所示。

表2 CFRM试件尺寸及编号

Tab.2 Size and serial number of CFRM specimens

型号	尺寸/mm×mm×mm	根数/根	编号
CFA	66.7×66.7×133.3	18	CFA-01,CFA-02,⋯,CFA-17,CFA-18
CFB	100×100×200	18	CFB-01,CFB-02,⋯,CFB-17,CFB-18
CFC	150×150×300	18	CFC-01,CFC-02,⋯,CFC-17,CFC-18

对碳纤维水泥基复合材料的力电性能进行研究,通常利用二电极法或四电极法电极来测量其体积电阻率。试验和分析表明:四电极法测量得到的压敏性能较好反映碳纤维复合材料的真实压敏性,本实验采用四电极法测量试样的电阻率。把搅拌好的碳纤维水泥砂浆倒入准备好的油模具中,振实成型后插入不锈钢丝网(孔径6 mm)电极。测试混凝土及砂浆类电阻率的电极制作目前没有标准,本文电极的制作参考文献[10]的制作方法,电极与邻近受压面的距离均为10 mm,可保证受压时电极与试验压头绝缘。试块成型后24 h拆模,在标准养护条件下养护至28 d。

试样养护完成后,在碳纤维水泥砂浆棱柱体表面正中位置(除插有电极的表面)粘贴竖向应变片(试验所用的是浙江黄岩测试仪器厂生产的电阻应变片,应变片型号为BX120-50AA,电阻为119.8 Ω,灵敏系数为2.06%)。纵向应变片粘贴位置及制作好的试样分别见图1和图2。

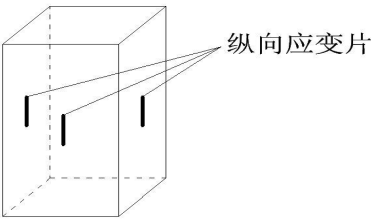


图1 棱柱体表面应变片布置

Fig.1 Layout of the prism surface strain



图2 几何相似试件

Fig.2 Test specimens of geometrical similarity

2 试件力电性能测试结果及讨论

2.1 电阻率测试

CFRM压敏特性基于碳纤维水泥砂浆的电学性能,需对碳纤维水泥砂浆的导电性能进行测试,即测量碳纤维水泥砂浆的电阻率。而能反映碳纤维水泥砂浆内部应力、应变和裂纹变化情况的电阻率是体积电阻率。本试验采用数字万用表测量试件的电阻率,电源为直流稳压稳流电源LW10J2,测试电压为5 V。由于试验模具的关系,试件分3批浇注,每一批次制作18个试样。试件养护28 d后的测试电阻率,每批次测试所得到的电阻率值的算术平均值、标准差和变异系数如表3~5。

表3 第一批碳纤维水泥砂浆28 d后电阻率测试值

Tab.3 Test value of CFRM resistivity for specimen after 28 d in the first batch

试件编号	电阻率平均值/Ω·cm	电阻率标准差	变异系数
CFA-01-06	4 943.48	375.59	7.59
CFB-01-06	4 168.29	292.43	5.93
CFC-01-06	3 465.17	292.43	8.43

表4 第2批碳纤维水泥砂浆28 d后电阻率测试值

Tab.4 Test value of CFRM resistivity for specimen after 28 d in the second batch

试件编号	电阻率平均值/ $\Omega \cdot \text{cm}$	电阻率标准差	变异系数
CFA-07-12	4 633.26	399.37	8.61
CFB-07-12	3 991.72	327.42	8.20
CFC-07-12	2 793.70	201.33	7.21

表5 第3批碳纤维水泥砂浆28 d后电阻率测试值

Tab.5 Test value of CFRM resistivity for specimen after 28 d in the third batch

试件编号	电阻率平均值/ $\Omega \cdot \text{cm}$	电阻率标准差	变异系数
CFA-13-18	3 979.80	361.68	9.08
CFB-13-18	3 173.28	284.23	8.95
CFC-13-18	2 814.48	221.06	7.85

从表3~5可见,3批次的试件所测得的体积电阻率有相同的特性,随着试件尺寸的增大,所测得的试件电阻率在减小,可以认为碳纤维水泥砂浆的电阻率存在尺寸效应现象,主要原因由于试样尺寸的增大使试样有更多的导电通路。

2.2 轴向荷载作用下的载荷—应变曲线与载荷—电阻率曲线

2.2.1 力电性能曲线

试验主要研究是3种几何相似碳纤维水泥砂浆的单向加载的压敏性和试件几何尺寸的变化对碳纤维水泥砂浆棱柱体单轴抗压强度的影响。测试试件共18个,其中尺寸大小为66.7 mm×66.7 mm×133.3 mm的试件6个,100 mm×100 mm×200 mm的试件6个,150 mm×150 mm×300 mm的试件6个。对柱体进行轴心抗压试验的同时测量它的电阻率的变化。对柱体进行轴心抗压试验,必须保证压板的中心与试样的轴心对准,并在试样的上下放置绝缘薄膜防止试件和其他的金属器材接通。测试加载装置如图3所示。

体积电阻率采用公式(1)计算:

$$\rho = R \frac{L}{S} \quad (1)$$

式中: L 和 S 分别为两电极间的距离和试件的横截面面积。由(1)式可知,只要试件电阻测量准确,那么体积电阻率的相对变化值就等于电阻的相对变化值,即假设 ρ_0 、 ρ 分别代表初始电阻率和瞬时电阻率,则与相应的电阻 R_0 、 R 之间有如下关系:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (2)$$

试验数据整理后,绘制出各组试件电阻率变化与压应力之间的关系曲线及应力-应变关系曲线,如图4~图9所示。

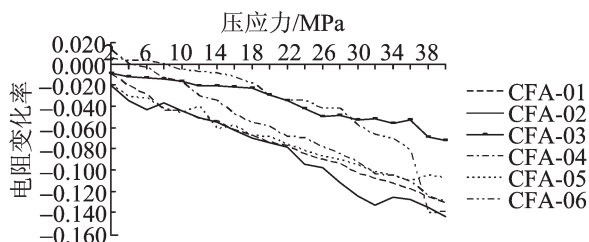


图4 碳纤维水泥砂浆柱体压应力-电阻率变化曲线
Fig.4 Curves of CFRM cylinder pressure stress and resistivity



图3 试验仪器与测试设备
Fig.3 Testing and measuring equipment

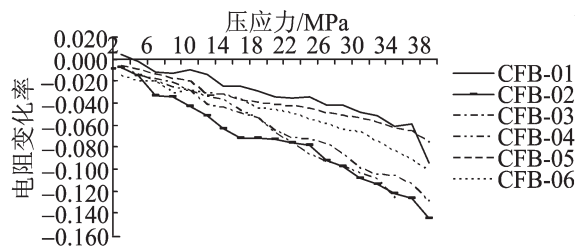


图5 碳纤维水泥砂浆柱体压应力-电阻率变化曲线
Fig.5 Curves of CFRM cylinder pressure stress and resistivity

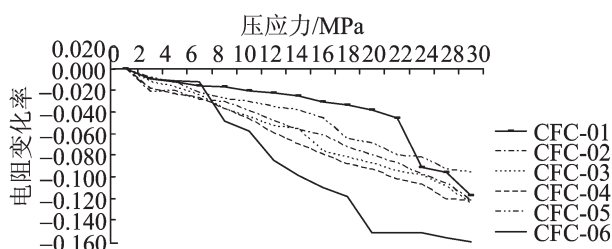


图6 碳纤维水泥砂浆柱体压应力—电阻率变化曲线

Fig.6 Curves of CFRM cylinder pressure stress and resistivity

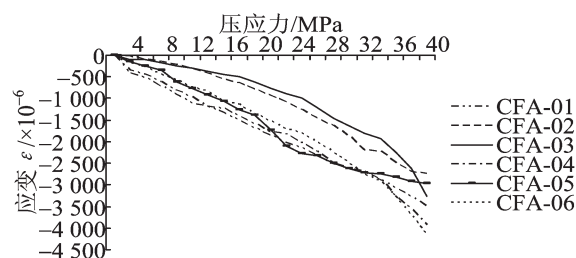


图7 碳纤维水泥砂浆柱体压应力—应变曲线

Fig.7 Curves of CFRM cylinder pressure stress and resistivity

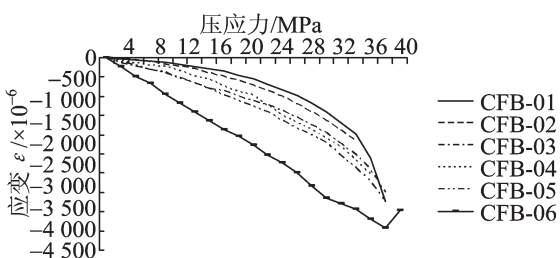


图8 碳纤维水泥砂浆柱体压应力—应变曲线

Fig.8 Curves of CFRM cylinder pressure stress and resistivity

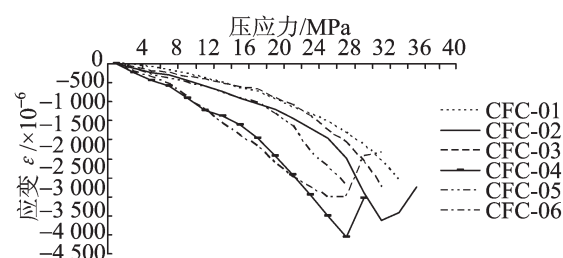


图9 碳纤维水泥砂浆柱体压应力—应变曲线

Fig.9 Curves of CFRM cylinder pressure stress and resistivity

由图4~9可见,试件的电阻率都有明显的变化,其电阻率与应变的变化趋势是一致的,表明可以利用电阻率变化来反映试件的受压以及整体损伤情况,进一步的工作是建立碳纤维水泥砂浆在受压下应力与电阻率之间的定量变化关系,从而以砂浆的电阻率的变化来直接监控试件的损伤变化。

2.2.2 灵敏度系数

碳纤维水泥砂浆的压敏特性是指试件的电阻率随着应变的变化而发生变化的现象。碳纤维复合材料的灵敏度系数 K 是指单位应变的电阻率相对变化量。灵敏度系数 K 可通过公式(3)计算:

$$K = \frac{\Delta(\Delta R/R_0)}{\Delta \varepsilon} \quad (3)$$

式中: $\Delta \varepsilon$ 为应变的改变量。对3类不同尺寸的同应力值进行平均计算,如表6给出。

表6 同一应力下的试件灵敏度系数 K 计算值Tab.6 Calculated value of sensitivity coefficient K of specimens under the same stress

试件编号	电阻变化率	应变/ 10^{-6}	K
CFA	-0.0157	-298	54.89
CFB	-0.0210	-344	70.71
CFC	-0.0333	-365	96.52

试件的灵敏度系数反映了电阻率变化对应变和应力的敏感程度,从表6可见,随着试件尺寸的增大,试件的电阻率变化也逐渐增加,即尺寸较大的试件表现出更好的压敏特性,这与文献[11]的试验结果一致,不同的是文献[11]中采用的是横截面尺寸相同而高度不同的试样(一维相似),而本文采用的是三维几何相似试样。尺寸效应的原因同样可以认为高试样在相同的应力下有更大的变形,使得更多的碳纤维相互靠近、接触,从而导致电阻率降低较快。

2.2.3 轴心抗压强度

为了研究碳纤维水泥砂浆的极限承载力与试件尺寸的关系,对同一批试件在轴压下加载至破坏,通过极限荷载除以试件横截面面积,可以得到试件的轴心抗压强度,试验结果见表7。

表7 CFRM试样轴心抗压强度试验值

Tab.7 Axial compressive strength of CFRM specimens

试件类型	强度平均值/MPa	标准差	变异系数
CFA	41.40	1.96	4.73
CFB	37.85	2.44	6.44
CFC	31.26	1.87	5.97

由表7可见,3种几何相似碳纤维水泥砂浆试件的强度与普通混凝土强度一样,具有尺寸效应,碳纤维水泥砂浆棱柱体试件的轴心抗压强度随着试件几何尺寸的增加而降低。其原因在于,从碳纤维水泥砂浆的细观结构来看,碳纤维水泥砂浆是由水泥浆、骨料与碳纤维之间的粘结带所形成的复合材料,试件的宏观破坏实质上是细观结构损失断裂行为的积累和发展,试件尺寸越大,各材料之间的粘结带也就越多,越容易受载开裂,因此大试件的宏观强度要低于小试件的宏观强度,即表现为宏观强度的尺寸效应。对准脆性材料强度尺寸效应,一般认为应满足Bazant的尺寸效应律^[11-12]。

$$\sigma_n = \frac{Bf_t}{\sqrt{1+\beta}} \quad (4)$$

式中: $\beta = \frac{D}{D_0}$, β 为脆性指数; D 为试件尺寸; D_0 为依赖于结构的几何参数; B 为无量纲参数; f_t 为准脆性材料的抗拉强度。

记 $x = D$, $y = \frac{1}{\sigma_n}$, $C = \frac{1}{(Bf_t)^2}$, $A = C/D_0$, 可将方程(4)表示为

$$y = Ax + C \quad (5)$$

通过试验结果拟合后得到 $D_0 = 40 \text{ mm}$, $Bf_t = 70.71 \text{ MPa}$, 代入 $C = \frac{1}{(Bf_t)^2}$, $A = C/D_0$ 可得 $C = 0.0002$,

$A = 5.0 \times 10^{-6}$, 式(5)即可表示成 $y = 5.0 \times 10^{-6}x + 0.0002$, 可以给出相应的Bazant尺寸效应律。

由试验结果可见,尽管在水泥砂浆中加入碳纤维可以起到增韧作用,但总体上仍呈现准脆性的性质,其尺寸效应可以用Bazant的尺寸效应律来拟合,这与普通混凝土强度特性类似。

3 结论

通过几何相似水泥砂浆试样电阻率及荷载作用下电阻率的变化和极限荷载的测试与分析,可以得到如下的结论:

- 1) 碳纤维水泥砂浆棱柱体的电阻率随着试件尺寸的增大而减小,即碳纤维水泥砂浆棱柱体的电阻率存在尺寸效应现象;
- 2) 碳纤维水泥砂浆棱柱体具有压敏特性,可以利用电阻变化率来监控构件的自损伤;
- 3) 尺寸几何相似的碳纤维水泥砂浆棱柱体试件在单向加载作用下表现出的压敏特性有所不同,碳纤维水泥砂浆棱柱体的压敏特性随尺寸增大,即电学性能具有尺寸效应;
- 4) 碳纤维水泥砂浆棱柱体试件的轴心抗压强度随着试件几何尺寸的增加而降低,具有尺寸效应现象。

参考文献:

- [1] WANG WEI, WU SIGANG, DAI HONGZHE. Fatigue behavior and life prediction of carbon fiber reinforced concrete under cyclic flexural loading [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 434: 347-351.
- [2] 郑立霞, 宋显辉, 李卓球. 利用CFRC压敏性监测钢筋锈蚀的模拟实验研究[J]. 实验力学, 2004, 19(2): 206-210.
- [3] WEN SIHAI, WANG SHOUKAI, CHUNG D L. Piezoresistivity in continuous carbon fiber polymer-matrix and cement-ma-

- trix composites[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35: 3669-3675.
- [4] CHEN BING, WU KERU WU, YAO WU. Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites[J]. Cement & Concrete Composites, 2004, 26: 291-297.
- [5] 孙明清, 张晖, 李卓球. CFRC 机敏混凝土中碳纤维的分散性研究[J]. 混凝土及水泥制品, 2004(5): 38-41.
- [6] 王大鹏, 侯子义. 碳纤维表面处理对纤维的分散性和 CFRC 压敏性的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(2): 265-268.
- [7] 王闯, 李克智, 李贺军, 等. 碳纤维的分散性与 CFRC 复合材料的导电性[J]. 功能材料, 2007, 10(38): 1641-1644.
- [8] XU JING, YAO WU, WANG RUIQING. Nonlinear conduction in carbon fiber reinforced cement mortar[J]. Cement & Concrete Mortar, 2011, 33: 444-448.
- [9] WEN SIHAI, CHUNG D D. Effect of strain and damage on strain-sensing ability of carbon fiber cement[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(3): 355-360.
- [10] 张滇军, 徐世烺, 孙进. 碳纤维砂浆与碳纤维混凝土导电性能实验研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(3): 347-352.
- [11] SUN MINGQING, MAO QIZHAO, LI ZHUOQIU. Size effect and loading rate dependence of the pressure-sensitivity of carbon fiber reinforced concrete (CFRC)[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1998, 13(3): 58-61.
- [12] 童谷生, 刘永胜, 邱虎, 等. BFRP 约束钢筋混凝土轴压圆柱的尺寸效应研究[J]. 功能材料, 2009(12): 2044-2046.

Size Effect of Electrical Properties of Carbon Fiber Reinforced Mortar Prism under Axial Pressure

Tong Gusheng, Wu Qiulan

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The 54 geometrically similar carbon fiber reinforced mortar prism specimens are adopted and electrical current at given voltage, electrical volume resistivity under axial strain, extreme load are tested. The gauge factor (fractional change in resistance per unit strain) at a given stress is analyzed and the strength of mortar prism specimen is calculated. The experimental results show that carbon fiber reinforced mortars have compression sensibility and the change rate of electrical volume resistivity can be used as a self-diagnosis indicator of damage. The resistivity of carbon fiber reinforced mortar prism decreases with specimen size, and size effect of electrical volume resistivity exists. The gauge factor of carbon fiber reinforced mortar prisms increases with the specimen size. The strength of specimen under axial pressure decreases with its size, experimental result of strength has a good agreement with Bazant size-effect law.

Key words: CFRM (carbon fiber reinforced mortar); electrical volume resistivity; electromechanical effect; strength