

# 纤维增强混凝土导电性能的研究与应用

陈 兵<sup>1</sup>, 吴科如<sup>2</sup>, 姚 武<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学建筑工程与力学学院, 上海 200240; 2. 同济大学混凝土材料研究国家重点实验室, 上海 200092)

**[摘要]** 纤维增强混凝土的导电行为作为一个新的研究方向日渐成为研究热点。本文研究了碳纤维增强水泥混凝土的电导性能, 讨论了纤维掺量和纤维长度对导电性能的影响, 并通过扫描电镜观察, 探讨体系导电行为与体系内碳纤维渗流结构关系。另外还研究了体系在三点弯曲荷载下, 电阻相对变化与荷载挠度曲线对应关系。研究结果表明, 碳纤维增强水泥混凝土材料结构中存在电导渗流现象, 能够作为本征机敏材料反应试件受载时的应力应变关系。

**[关键词]** 纤维增强混凝土; 碳纤维; 电阻率; 机敏材料

**[中图分类号]** TU 528.572    **[文献标识码]** A    **[文章编号]** 1002-3550(2002)07-0023-05

## 1 引言

近年来, 不断有文献报道有关水泥混凝土材料的导电行为<sup>[1~4]</sup>。众所周知, 由水泥、砂和石子与水拌和经水化形成的混凝土材料, 由于具有良好的力学性能和耐久性, 多年来一直是结构工程的主要材料。然而, 传统的水泥混凝土在干燥情况下是电的不良导体, 其电阻率变化范围为  $10^4 \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 。这大大限制了水泥混凝土材料的应用, 尤其是因为社会的进步和科技的发展, 人们对建筑结构的要求愈来愈高。因此, 具有功能特性的水泥混凝土的研究和开发已逐渐成为研究热点。

最近研究<sup>[5~7]</sup>表明, 水泥混凝土材料的导电性能可以用于结构损伤自诊断, 因为体系在荷载作用下产生的裂缝和损伤引起了体系的电阻率的变化。而将具有导电功能的碳纤维掺入水泥混凝土中, 由于其在体系内形成导电网络, 显著提高了

水泥混凝土材料的导电性。这使得能够更方便和经济地探测和监控水泥混凝土结构的安全性, 同时碳纤维的掺入也赋予了水泥混凝土结构优良的力学行为。

尽管对碳纤维增强水泥混凝土材料的力学行为进行了不少研究, 但有关其导电性能方面的研究不多, 而且许多研究之间还存在着矛盾。本文采用直接测量法研究短切碳纤维增强水泥混凝土导电行为, 分析材料电导行为与显微结构的关系, 阐述电导性能的研究意义。

## 2 试验方法

### 2.1 原材料与样品制备

本试验选用PAN基高强碳纤维, 其性能指标见表1。碳纤维的长度依据试验进行人工短切, 其长度分别为1mm, 5mm, 10mm和15mm。

表1 碳纤维的性能

| 直径/ $\mu\text{m}$ | 密度/( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 抗拉强度/GPa | 弹性模量/GPa | 延伸率/%     | 碳含量( $w_c$ )/% | 电阻率/( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) |
|-------------------|-------------------------------|----------|----------|-----------|----------------|----------------------------------|
| 7±0.2             | 1.78                          | >3.0     | 220~240  | 1.25~1.60 | >95            | $10^{-2} \sim 10^{-3}$           |

**普通硅酸盐水泥和掺加水泥用量15%的硅灰作为制备试样的胶凝材料。**采用ISO标准砂和甲基纤维素作为分散剂。

试样制备是在试验室中进行。首先称取30%的水, 将甲基纤维素分散于其中, 同时用玻璃棒搅拌, 静置20分钟左右确保甲基纤维素完全溶解, 随后将碳纤维加入溶液中, 并不断搅拌。将剩下的70%的水加入搅拌锅中, 分次加入硅灰、水泥和标准砂, 最后将分散有碳纤维的溶液加入搅拌, 一共需搅拌3分钟左右。搅拌完毕, 将拌合料装入各自的试模中, 进行高频振动成型, 并按规定尺寸预埋不锈钢电极, 见图1。试样脱模后, 送入标准养护室中进行养护。

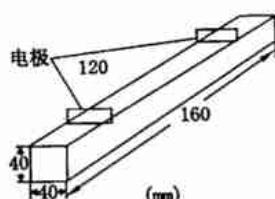


图1 样品尺寸及电阻测试示意图

### 2.2 样品测试

#### 2.2.1 理论

通常, 固体材料电阻测试是通过直流电直接进行测试。依据欧姆定律:

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

式中 I——通过试件的电流;

V——测试试件两端的电压降。

则试件的电阻率为:

$$\rho = R \frac{A}{L} \Omega \cdot \text{m} \quad (2)$$

式中 R——测得的试件电阻值;

A——电流通过的截面面积,  $\text{m}^2$ ;

L——测试试件段的长度, m。

本试验所采用的试件尺寸见图1。

尽管有不少研究者采用直接测试方法研究水泥基材料的电阻率, 但水泥基体存在的离子在电极上会发生反应产生极化, 用此方法很难获得水泥基材料真实的电阻率。

## 2.2.2 极化作用

普通水泥基材料主要由离子在水泥基体的孔隙中的溶液中移动进行导电<sup>[8]</sup>。由此,引起在电极上发生化学反应,产生的氧气和氢气在电极附近形成一层薄膜。这层薄膜产生了极化电势,通常称为反电势(back emf)。而产生的极化电势与电流方向相反,造成给定电压下的电流减小:

$$I = \frac{V - V_p}{R} \quad (3)$$

式中  $V_p$ ——极化电势。

这样,如果采用直流电进行测试,不能简单地认为电压与电流的比值就是试样的电阻。

## 2.2.3 选用交流电

为了避免极化现象,一方面在试样测试前,对其进行干燥处理;另一方面,可采用交流电。据研究表明:在通交流电的过程中,极化并非避免了,而是以另一种方式出现。极化可以理解为一个电容与电阻进行串联或并联的方式进行,但无论是并联还是串联,对于在交流电下,方程(1)可以写为:

$$Z = \frac{V}{A} \quad (4)$$

式中  $Z$  为整个体系的阻抗。阻抗  $Z$  由体系在交流电下的电阻( $R$ )和电容( $C$ )决定,以电容与电阻并联方式为例:

$$Z = \frac{R}{\sqrt{(1 + \omega^2 C^2 R^2)}} \quad (5)$$

式中,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为交流电的频率,单位 Hz;  $C$  为电容。

从式(5)可见,当交流电频率逐渐增大时,电容的影响渐渐减小,这样在高频下,体系的阻抗就接近于试样的电阻。因此,采用交流电能够较真实地测出试样的电阻。

本研究中采用的交流阻抗设备是由 EG&G Princeton Applied Research Co. 制造的 273 型恒电位仪/恒电流仪和 5210 型锁相放大器组成的测量系统,测量频率范围 100kHz~0.01Hz,交流振幅为 5mV,每数量级频率区间测点数目为 5。

## 2.2.4 交流电频率的选择

式(5)表明测试电阻与交流频率有很大关系。图 2 给出了典型的阻抗与频率的变化关系,图中所示的电阻值都进行了归一化,即所测的阻抗值都除以初试的阻抗值。本研究中选用频率为 0.01Hz 时所测的阻抗值。通常,随着频率的增加,测得体系的阻抗值减小。从图中可见,对于碳纤维水泥基材料,当频率达到某一值时,其阻抗值趋于一个常数,而没有掺加碳纤维的普通砂浆仍继续下降,但下降的幅度很小。在本研究中,所有试样电阻值的获取都是在交流电频率为 100kHz 下所测得的体系阻抗中的实部。

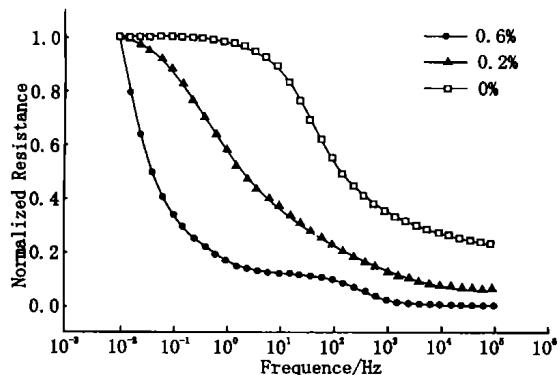


图 2 体系电阻随交流电频率变化归一化变化曲线

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 体系电阻与碳纤维掺量的关系

图 3 给出了不同水灰比下体系电阻率随碳纤维体积掺量变化关系。从图中可见,体系的电阻率随碳纤维体积掺量的增加而降低,当碳纤维体积掺量高于某一临界值( $V_d$ )时,体系的电阻率迅速下降,此后体系电阻率随碳纤维体积掺量增加无显著降低,对于不同水灰比的水泥混凝土试件均出现类似的结果。这种现象可以用描述连通介质数和量随机变化的渗流理论来分析。

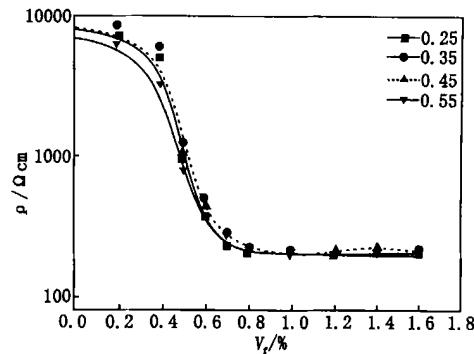


图 3 体系电阻率随碳纤维掺量及水灰比的变化

实际上,体系电阻率随碳纤维体积掺量的变化反应了均匀分散于水泥基体中碳纤维的相互搭接的情况。当碳纤维掺量较低时,碳纤维均匀地分散于水泥基体中,彼此之间很少存在相互搭接,随着碳纤维掺量的不断增大,相邻的碳纤维间开始出现相互搭接,形成纤维的聚集团簇,但团簇之间仍然是断开的。当碳纤维体积掺量达到和超过渗流临界体积  $V_d$ ,全部团簇形成渗流网络。因此,提出图 4 所示对应碳纤维不同体积掺量区的碳纤维在水泥基体中分散搭接模型。

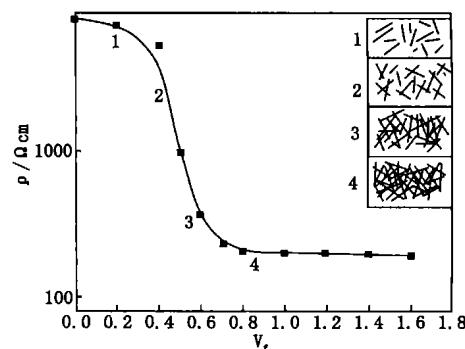


图 4 体系导电率与渗流结构关系

图 5 是我们在电镜下观察到不同体积碳纤维掺量下碳纤维在水泥基体内的分散与搭接情况。从图(a)中可看出,当碳纤维掺量很小时,碳纤维在三维空间随机分布,但尚未接触。随着碳纤维掺量的增加,达到  $\Phi_{cl}$ , 进入渗流转变区时,逐渐形成了纤维的聚集团簇,团簇内纤维彼此联结,但团簇之间仍然是断开的,当碳纤维掺量超过  $\Phi_{cl}$  时,全部团簇形成渗流网络,见图(d)。与我们所提出的不同体积掺量碳纤维在水泥基体中的分散与搭接模型一致。

通常,复合材料中出现电导现象是由于足够数量的导电相粒子相互接触,渗流阈值依赖于材料结构、基体和导电粒子的

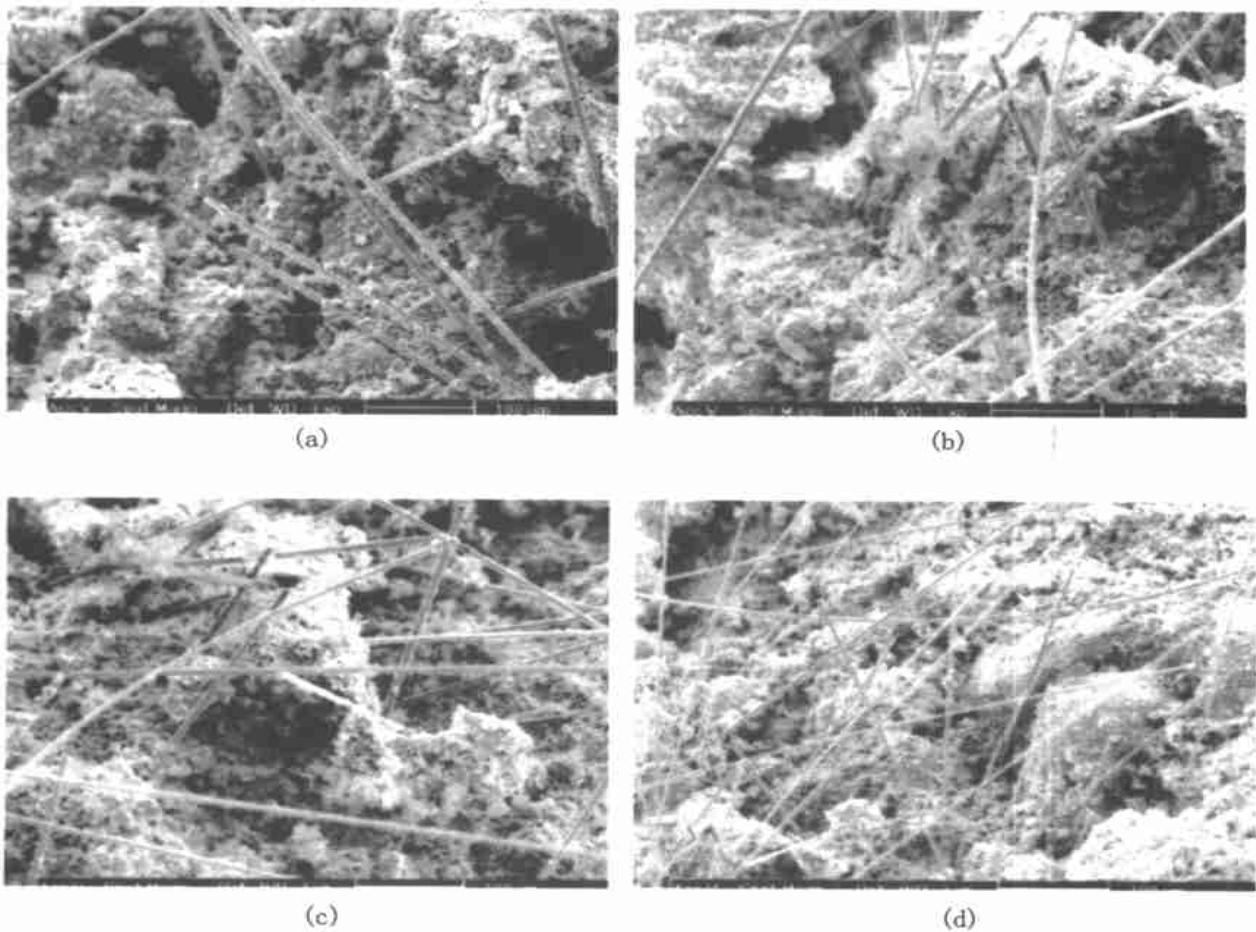


图 5 不同碳纤维掺量试件电镜照片

(a)  $V_f = 0.20\%$ ; (b)  $V_f = 0.40\%$ ; (c)  $V_f = 0.55\%$ ; (d)  $V_f = 0.80\%$

电导率及它们之间的界面状况、导电粒子几何形状等因素。含有导电碳纤维的水泥混凝土材料在干燥状况下的导电机制是导电相中自由电子的运动。由于碳纤维与基体的电阻率的巨大差异,基体的性质和显微结构对材料电阻率的影响非常小。所以,碳纤维是系统电阻率的决定因素。

### 3.2 体系电阻与碳纤维掺量的关系

图 6 给出了碳纤维长度对体系电阻率的影响。由图可见,碳纤维长度对体系的渗流临界体积产生较大的影响,碳纤维长度较长时,其出现渗流临界现象的体积较小。本研究中,碳纤维平均长度为 15mm 左右时,其出现渗流现象的临界体积约为 0.3%;而碳纤维平均长度约为 1mm 左右时,其临界体积约为 0.6% 左右。但在试件成型过程中,发现当碳纤维长度较

长时,碳纤维不易于分散和搅拌,且在水泥混凝土内部形成较大的空隙和纤维定向团聚,这些都不利于碳纤维水泥混凝土材料性能的稳定和均一性。因此,碳纤维的长度应选择适中,一般选择在 5mm 左右。

### 3.3 材料在三点弯曲负荷下电阻率的变化

三点弯曲梁是研究水泥基材料断裂特性常用的一种试件形式。图 7 是碳纤维体积掺量分别为 0%、0.20%、0.55% 和 0.80% 的水泥基材料在三点弯曲负荷下对应的电阻变化与荷载——挠度曲线对应关系,图中,不同碳纤维体积掺量水泥基材料电阻相对变化与荷载——挠度曲线有着不同的对应关系。研究结果表明:

(1) 在碳纤维体积掺量为 0.55% 左右时,相对电阻的变化随荷载的增大而减小,当荷载达到峰值荷载时,其变化幅度减小,且随荷载——挠度曲线下降而渐进平缓。此现象可以理解为:当碳纤维体积掺量达到 0.55% 左右,处于临界态,但并未形成渗流网络,当受到外界作用力时,纤维间的间隔势垒减小,同时水泥基体由于外界作用力的增大而产生破坏,使得彼此临近的纤维增大接触的机会,产生渗流结构,引起电阻降低;而当变形继续增大,由于渗流结构已经形成,其变化幅度减小最终平缓。

(2) 当碳纤维体积含量较少( $V_f = 0.20\%$ )或较多( $V_f = 0.80\%$ )时,其相对电阻变化与荷载——挠度曲线有着很好地对应关系。在荷载——挠度曲线上升段,相对电阻变化随荷载的

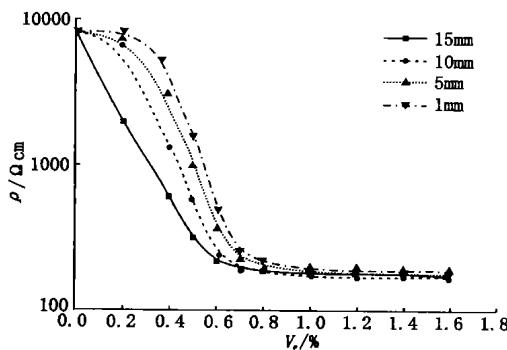


图 6 碳纤维长度对体系电阻的影响

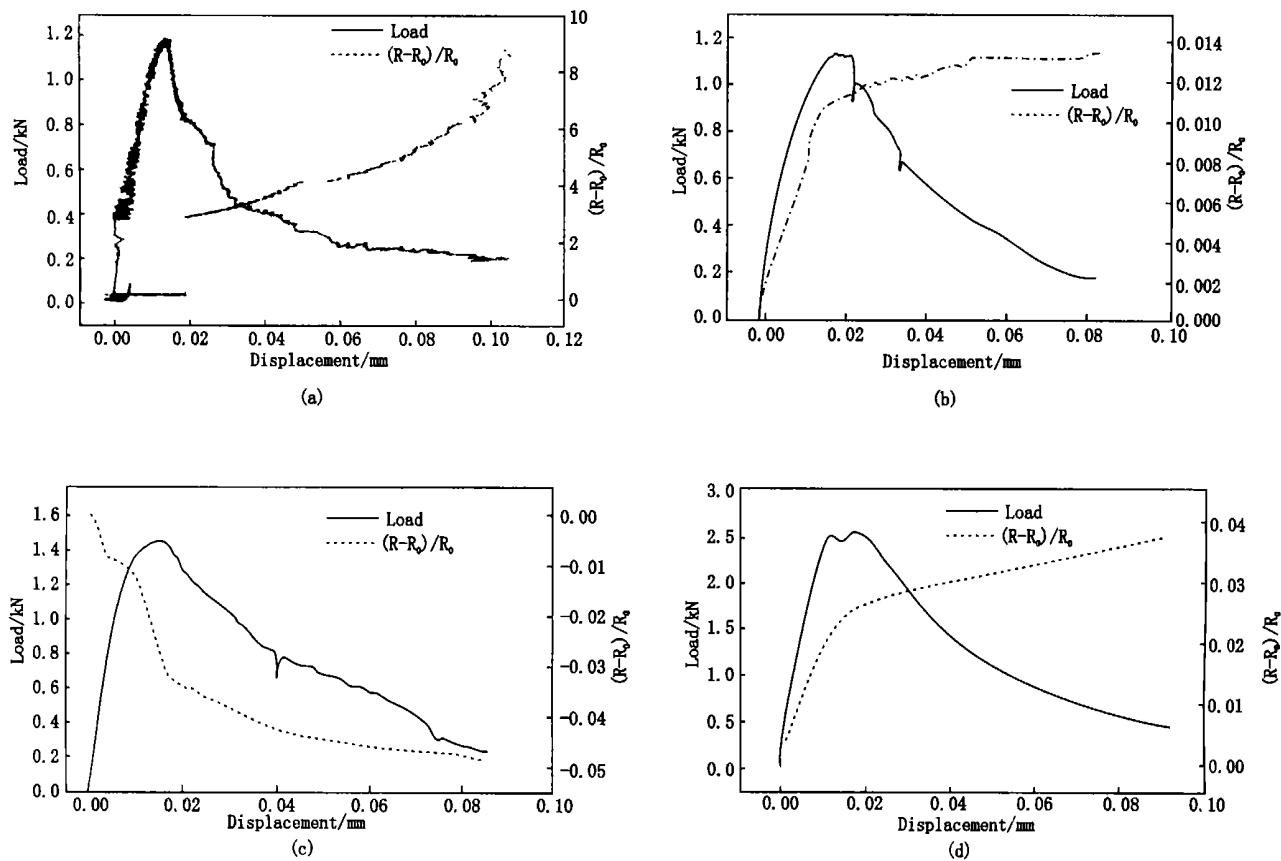


图 7 三点弯曲负荷下试件相对电阻变化与荷载——挠度曲线对应关系

(a)  $V_f = 0\%$ ; (b)  $V_f = 0.20\%$ ; (c)  $V_f = 0.55\%$ ; (d)  $V_f = 0.80\%$

增大而增大;在下降段,其增大的幅度渐进平缓。因为纤维含量太少,分散在基体中的纤维间距大,不仅电阻率大,受力后势垒虽有减小,但基体受力后产生的裂缝足以抵消其对电阻的影响,故电阻随挠度的增大而增大;纤维掺量过多,基体中的纤维已有相当程度的搭接,此时试件主要以沿纤维网络通道传导为主,当基体受力后,引起纤维的拉断或产生裂缝,从而导致电阻率的增大。

(3) 未掺加碳纤维的试件,在荷载—挠度曲线上升段,其电阻基本未发生变化;而在试件出现明显裂缝时,其电阻突然增大。

(4) 不同碳纤维体积掺量的试件对受载的敏感性不同,以试件出现可见裂缝时的电阻相对变化为例,即电阻相对变化幅度减小,见表 2。当  $V_f$  处于非临界态时,  $V_f$  较高时,其对受载较为敏感;而  $V_f$  接近临界值时,其对受载最为敏感。

表 2 不同碳纤维体积掺量试件对受载敏感性

| 性 能            | 碳纤维体积掺量 / % |        |         |        |
|----------------|-------------|--------|---------|--------|
|                | 0           | 0.20   | 0.55    | 0.80   |
| 极限荷载值 / kN     | 1.17        | 1.18   | 1.45    | 2.52   |
| 出现可见裂缝荷载值 / kN | 1.05        | 1.098  | 1.40    | 2.50   |
| 相对电阻变化         | 2.8000      | 0.0105 | -0.0325 | 0.0267 |

## 4 结论

(1) 短切碳纤维增强水泥混凝土材料电阻率与碳纤维体积

掺量的变化关系可以用渗流理论进行描述。体系结构中存在电导渗流现象,渗流临界体积是植被机敏和导电水泥混凝土材料的重要参数。

(2) 碳纤维长度是影响体系形成渗流临界体积的一个重要因素。碳纤维愈长,形成渗流导电现象的临界体积越小,但不易成型和搅拌。一般条件下,碳纤维平均长度选择为 5mm。

(3) 在三点弯曲负荷下,材料电阻率随受载过程而变化,与试件荷载—挠度曲线有着很好的对应关系,这表明碳纤维水泥基复合材料本身可以作为传感器进行损伤自诊断。

## [参考文献]

- [1] Farhad Reza B. Batson, Jerry A. Yamamuro, and Jong S. Lee, Volume electrical resistivity of carbon fiber cement, *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No. 1, pp: 25– 35, 2001.
- [2] N. Bonthia, S. Djerdane and M. Pigeon, Electrical resistivity of carbon fiber and steel micro-fiber reinforced cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, No. 5, pp: 804– 814, 1992.
- [3] Ping Xie, Ping Gu, and B. J. Beaudoin, Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibers, *Journal of Materials Science*, Vol. 31, No. 8, pp: 4093– 4097, 1996.
- [4] X. Fu, D. D. L. Chung, Self monitoring of fatigue damage in carbon fiber reinforced cement, *Cem Concr Res*, Vol. 26, No. 1, pp: 15– 19, 1996.
- [5] Chen Puwei, D. D. L. Chung, Carbon fiber reinforced concrete for smart structure capable of non-destructive flaw detection, *Smart Material Structure*, No. 2, pp: 22– 32, 1993.

• 下转第 22 页 •

3) 达极限状态时, SW-1, SW-2 最外侧受压纵筋的应变超过 0.012, 根据文献[2], 配箍特征值为 0.25 的混凝土的极限压应变可取 0.01~0.012, 因此, 可以认为这两个试件已达到破坏状态; SW-3 最外侧受压纵筋的应变不到 0.01, 但混凝土已压碎, 可以认为达到破坏状态; SW-4 最外侧受压筋的应变不到 0.006, 可以认为尚未达到破坏状态;

4) 达到极限状态时, SW-1 和 SW-2 约束边缘构件最内侧纵筋的压应变已超过 0.004, 若认为钢筋与混凝土共同工作, 则非约束部分混凝土的压应变超过了素混凝土的极限压应变;

5) 达到极限状态时, 试件分布纵筋的拉应变不超过 0.01, 大大低于最大平均伸长率, 分布纵筋不会拉断。

(注: SW-3 未获得部分钢筋的应变, 在图 6(c) 中未标出。)

#### 4 结论

1) 在水平力作用下, 分布筋为 HRB400 级钢筋焊接网中高剪力墙的破坏形态为钢筋受拉屈服、压区混凝土受压损坏, 以弯曲变形为主;

2) 按《规程》计算矩形端受压得到的受弯承载力均小于实测值, 但误差不大于 12%, 翼墙端受压得到的受弯承载力与实

测值符合良好;

3) 轴压比设计值为 0.5 的矩形截面墙, 位移延性系数不小于 3.0, 极限位移角不小于 1/120; 轴压比设计值为 0.5 的工形截面墙, 位移延性系数不小于 4.0, 极限位移角不小于 1/100; 按《规范》要求设置约束边缘构件的 HRB400 级钢筋焊接网剪力墙在中、高轴压比作用下, 具有较大延性和变形能力, HRB400 级钢筋焊接网可以用作抗震剪力墙的分布钢筋。

#### [参考文献]

- [1] 中华人民共和国国家标准.《建筑抗震设计规范》GB50011-2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [2] 钱稼茹, 周栋梁, 程丽荣. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能 [J]. 清华大学学报, 2002, 10.
- [3] 《钢筋混凝土高层建筑结构设计与施工规程》JOJ3-91 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [4] 过镇海. 钢筋混凝土原理(第一版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

[作者简介] 陈勤(1974-), 女, 博士生(在读), 结构工程专业; 顾万黎(1935-), 男, 研究员。

[单位地址] 北京市海淀区清华大学土木工程系(100084)

[联系电话] 010-62788620(陈); 010-84272233-2507(顾)

## Experiment study on shear walls with welded HRB400 steel fabric

CHEN Qin<sup>1</sup>, LI Geng-qin<sup>1</sup>, QIAN Jia-ru<sup>1</sup>, GU Wan-li<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Structural Institute, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Experiments of four shear wall specimens with welded HRB400 steel fabric as distributed reinforcement under horizontal cyclic loading are introduced in this paper. The specimens are rectangular section, I section and T section respectively. Boundary zones of specimens are confined according to "Code for seismic design of buildings" GB50011-2001. Behaviors of the shear wall such as bending bearing capacity, deformation capacity, ductility and failure mode under middle and high axial load ratio are studied. The experiment results indicate that shear wall specimens have enough ductility and large energy dissipation capacity. Experimental basis of seismic resistant design of the shear wall with welded HRB400 steel fabric as distributed reinforcement are obtained.

**Key words:** HRB400 reinforcement; welded steel fabric; shear wall; experiment

#### • 上接第 26 页•

[6] Norio Muto, Hiroaki Yangida et. Preventing fatal fractures in carbon-fiber-glass-fiber-reinforced plastic composites by monitoring change in electrical resistance, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 76, No. 4, pp: 319-323, 1995.

[7] 吴科如, 陈兵, 姚武. 碳纤维机敏水泥基材料性能研究 [J]. 同济大学学报, 2002, 30(4): 456-463.

[8] Hansson, I. L. H. and Hansson, C. M., Electrical resistivity measurements of Portland cement based materials, Cement and Concrete Research, Vol. 13, No. 5, pp: 675-683, 1983.

[作者简介] 陈兵(1973-), 男, 博士。研究领域为: 水泥基材料的组成、结构与性能, 无机-有机新型复合建筑材料的制备与性能分析, 机敏水泥基复合材料的研究以及水泥基材料的无损检测。

[单位地址] 上海交通大学建筑工程与力学学院(200240)

[联系电话] 021-54744095

## Studies on the electrical conductivity of carbon fiber reinforced concrete and its applications

CHEN Bing<sup>1</sup>, WU Ke-ru<sup>2</sup>, YAO Wu<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Shanghai Jiaotong University, 200240, China;

2. State Key Laboratory of Concrete Materials Research, Tongji University, Shanghai, 200092, China)

**Abstract:** Study of electrical conductivity of carbon fiber reinforced concrete has become the hot research topic because of the potential applications. In the paper, electrical resistivity of carbon fiber reinforced concrete was measured and emphasis was discussed on the dependence of system resistance on the volume fraction and length of carbon fiber. The microstructure associated with electrical percolation phenomena was also observed. Additionally, the change of electrical resistance for system under three point-bending test was also studied. It is shown that it exists percolation phenomena in the carbon fiber reinforced concrete and smart behavior during loading.

**Key words:** fiber reinforced concrete; carbon fiber; electrical resistivity; smart materials