

GSIFCON 材料压敏特性及对梁构件机敏检测研究

洪 雷*

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: GSIFCON(graphite slurry infiltrated steel fiber concrete, 石墨水泥砂浆注浆钢纤维混凝土)是由 SIFCON(slurry infiltrated fiber concrete, 水泥砂浆注浆钢纤维混凝土)改性而成的一种导电机敏混凝土材料. 为了利用 GSIFCON 材料检测梁构件内部损伤, 采用 3 根混凝土棱柱体试件对 GSIFCON 的压敏特性进行了研究. 采用 GSIFCON 与钢筋混凝土梁叠合的方法, 测定在不同应力作用下, 梁构件破坏过程中 GSIFCON 的电阻相对变化, 来监测梁构件内部损伤情况. 试验结果表明, GSIFCON 电阻相对变化可灵敏地感知压应力的变化. 在不同应力作用下, 梁构件受压区 GSIFCON 的电阻相对变化始终与梁构件损伤过程保持对应关系, 可对梁构件损伤进行检测.

关键词: 压敏特性; 损伤; 电阻; 监测

中图分类号: TU528.572 **文献标志码:** A

0 引言

GSIFCON(graphite slurry infiltrated steel fiber concrete, 石墨水泥砂浆注浆钢纤维混凝土)是经石墨等导电相材料对注浆材料进行导电改性后制成的一种具有良好导电性能的钢纤维机敏混凝土材料^[1]. GSIFCON 具有很高的抗拉强度和韧性, 并且导电性能良好, 电阻率小于 $5 \Omega \cdot \text{cm}$ ^[2~5]. 其内部分布丰富的钢纤维和石墨粒子的复合导电网络, 在不同的受力范围内, 材料导电相能会发生敏感的变化, 因此可实时有效地对构件内部的破坏程度进行监控. 根据 GSIFCON 的这一特性, 本文将 GSIFCON 与钢筋混凝土梁叠合, 进行梁破坏全过程的机敏监控试验研究.

1 原材料及配合比

原材料如下: P·II42.5R 硅酸盐水泥; 细度模数 2.7 河砂; 石灰石质碎石, 粒径 5~20 mm, 连续级配优质石灰石; SiO₂ 含量 96% 硅灰; 异形钢纤维, 长度 32 mm, 等效直径 0.64 mm, 长径比 53.33; 0.3 mm 厚不锈钢薄板电极. GSIFCON 配合比见表 1.

2 GSIFCON 压敏特性

2.1 试验设计

试验电极为 80 mm×80 mm 厚度 0.3 mm 不锈钢板, 极板上四角开设 $\phi 20$ mm 孔, 中心开设 $\phi 30$ mm 孔以增强电极两侧料浆及钢纤维的连接性能, 见图 1.

表 1 石墨水泥砂浆注浆钢纤维混凝土配合比

Tab. 1 The mixture proportions for GSIFCON

水胶比	胶砂比	w/%				钢纤维体积含量/%
		硅灰	石墨	高效减水剂	阻锈剂	
0.50	1:1	10	8	1.0	0.5	8

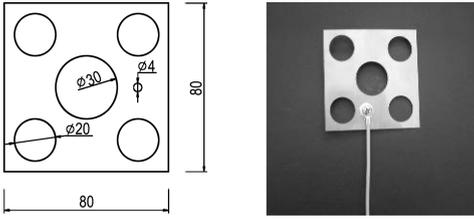


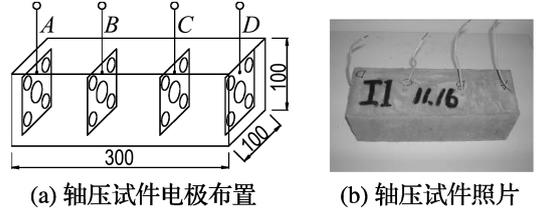
图 1 电极示意图和照片

Fig. 1 The sketch of the electrode and picture

采用 3 个 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体试件进行 GSIFCON 压敏性能测试, 试验结果取平均值, 电极在试件中的位置及试件照片见图 2.

采用 2 000 kN 试验机进行分级加载测试 GSIFCON 棱柱体试件的应变和自身内部损伤与

棱柱体试件 BC 段的电阻相对变化之间的关系, 在棱柱体中间 1/3 部分沿纵向和横向分别粘贴 100 mm 标距和 80 mm 标距的电阻应变片测试 BC 段的纵向和横向应变, 见图 3. 试验电路采用交流 V-A 法, 连接方式为四极法, 试验时使用变阻器始终保持电路中的电流 1 A.



(a) 轴压试件电极布置 (b) 轴压试件照片

图 2 电极位置及照片

Fig. 2 The location of the electrodes and photo

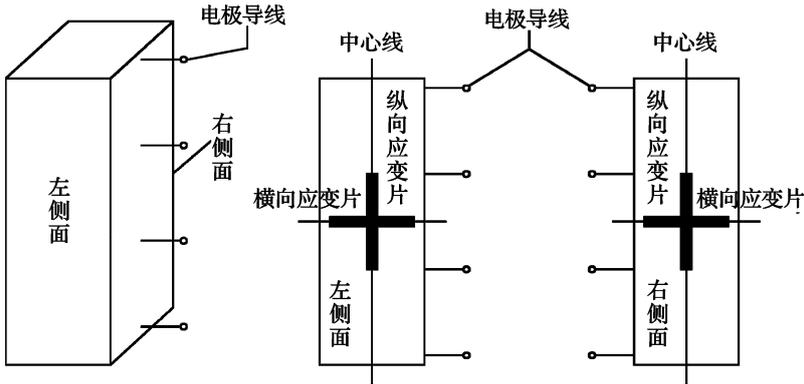


图 3 电阻应变片位置

Fig. 3 Location of resistance strain gauges

2.2 试验结果与分析

对 3 个 100 mm×100 mm×300 mm 试件进行了交流 V-A 法单轴受压试验, 纵向应变 ϵ_v 、横向应变 ϵ_h 、荷载 P 及 GSIFCON 电阻相对变化 $(R - R_0)/R_0$ 之间的关系 (R_0 为试件加载前电阻值, R 为不同荷载下试件的电阻值) 见图 4 及图 5 (试验结果取平均值).

由图 4 可见, 单轴受压试验时, GSIFCON 电阻相对变化与荷载、应变具有良好的——对应关系. 试件达到极限荷载时仍表现为脆性破坏, 此时电阻相对变化增大为 16, 其值之所以不是无穷大, 原因是材料完全破坏后仍有部分钢纤维互相搭接. 这充分表明 GSIFCON 材料对压应力对构件的破坏过程感知的灵敏度较高, 并且远高于碳纤维导电混凝土的灵敏度^[6~8].

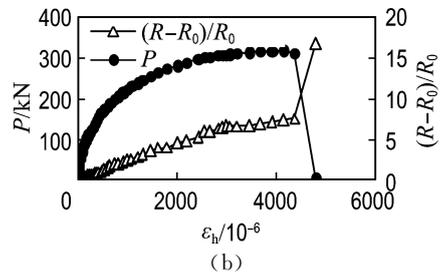
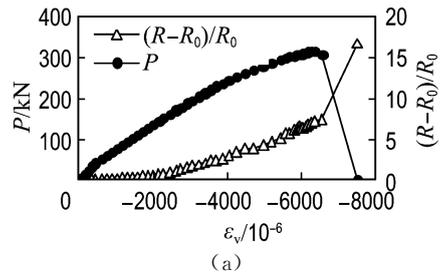


图 4 电阻相对变化和荷载与纵、横向应变的关系曲线比较

Fig. 4 Comparison of curves of fractional resistance increase and load with vertical and horizontal strains

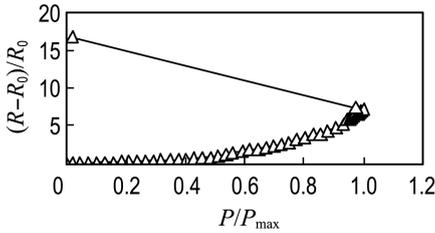


图5 电阻相对变化随相对荷载的关系曲线

Fig. 5 Curve of fractional resistance increase with P/P_{max}

3 GSIFCON 与钢筋混凝土梁叠合机敏性能

3.1 试验设计

(1) 梁构件尺寸

采用 $b \times h = 150 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$, 跨度为 1 600 mm, 净跨为 1 400 mm 的矩形截面钢筋混凝土梁, 箍筋为 $\phi 8$ 的 HPB235 钢筋, 2 根 $\phi 10$ HPB235 架立钢筋, 2 根 $\phi 16$ HRB335 受拉纵筋. 试验共浇筑了 8 根梁, 其中 6 根在梁的上层叠合了 GSIFCON, 见图 6.

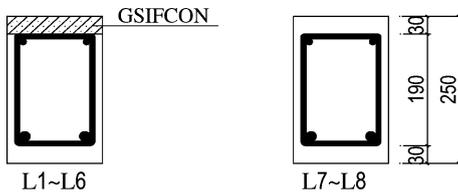


图6 叠合梁构造图

Fig. 6 Configuration of composite beams

(2) 电极的布置

6 根含有 GSIFCON 的梁中, 在 GSIFCON 层中共布置了 8 个电极, 其中在梁的跨中布置 4 个电极, 电极布置见图 7, 图中阴影为 GSIFCON, 短线为电极.

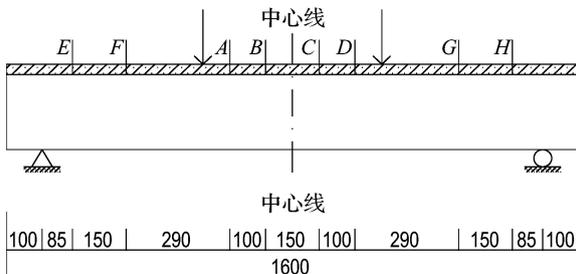


图7 电极布置图

Fig. 7 Arrangement of electrode boards

(3) 加载方案

根据循环加载时的幅度不同, 进行不同的分级加载. 先将 L7、L8 梁进行每级 5 kN 的单调分级加载直至破坏, 破坏时极限荷载平均值为 156.5 kN, 故近似取 150 kN 为其他梁的极限荷载, 不同加载幅度的加载制度见表 2, 加载方案见表 3.

表2 加载制度

Tab. 2 Order of loading

加载幅度	各加载幅度一个循环的加载制度/kN
30%的极限荷载	0, 10, 20, 30, 40, 45, 40, 30, 20, 10, 0
50%的极限荷载	0, 20, 40, 60, 70, 75, 70, 60, 40, 20, 0
70%的极限荷载	0, 20, 40, 60, 80, 100, 105, 100, 80, 60, 40, 20, 0

表3 加载方案

Tab. 3 Program of loading

方案编号	加载方案
1	分级单调加载, 直至破坏, 每级 5 kN
2	按照极限荷载的 30%、50% 和 70% 三个幅度依次加载, 每个加载幅度按照表 2 所示的次序循环加载 10 次, 最后单调分级加载, 直至破坏, 每级 5 kN
3	按照极限荷载的 70%、50% 和 30% 三个幅度依次加载, 每个加载幅度按照表 2 所示的次序循环加载 10 次, 最后单调分级加载, 直至破坏, 每级 5 kN

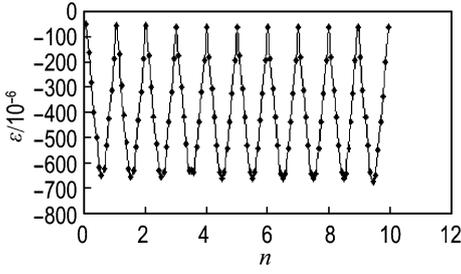
3.2 不同等级荷载作用下梁受压区 GSIFCON 机敏特性

(1) 递增循环荷载作用下

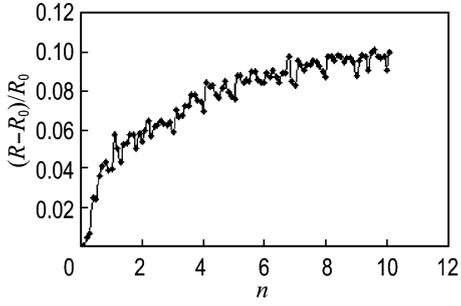
按表 3 加载方案 2, 对梁 L1~L3 进行递增循环加载, 试验数据取 3 根梁的平均值. 图 8~10 为 L1~L3 梁分别在 30%、50% 和 70% 极限荷载下 10 个加卸载循环过程中的荷载、应变(对应于 BC 段 GSIFCON 的应变)和 BC 段电阻相对变化的关系曲线. 由图可见, 在 3 个等级循环荷载作用下, 电阻相对变化始终与荷载、应变呈较好的对应关系, 随着循环荷载等级的加大, 其变化幅度也明显增大, 即 GSIFCON 受压内部损伤的增加与其电阻相对变化有一致的对应关系, 但其敏感度要低于受拉敏感度^[9].

(2) 递减循环荷载作用下

按表 3 加载方案 3, 对梁 L4~L6 进行递减循环加载, 试验数据取 3 根梁的平均值. 图 11~13 为 L4~L6 梁分别在 70%、50% 和 30% 极限荷载下 10 个加卸载循环过程中的荷载、应变(对应于



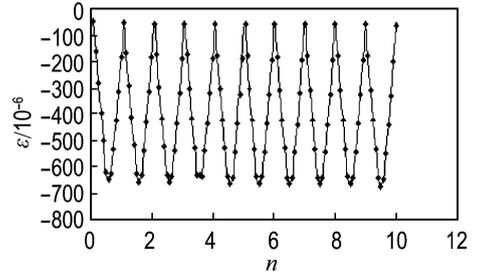
(a) 应变



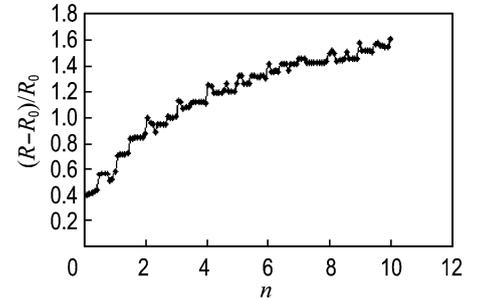
(b) 电阻相对变化

图 8 L1~L3 梁对应于 30% 极限荷载循环时的应变和电阻相对变化曲线

Fig. 8 Curves of strain and fractional resistance increase with cycle loading in 30% bearing capacity of beam L1-L3



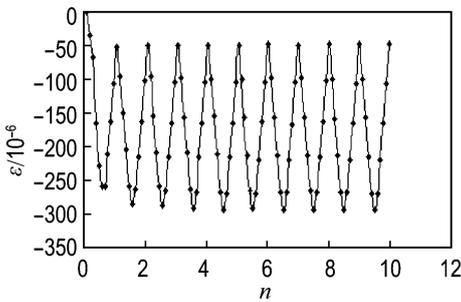
(a) 应变



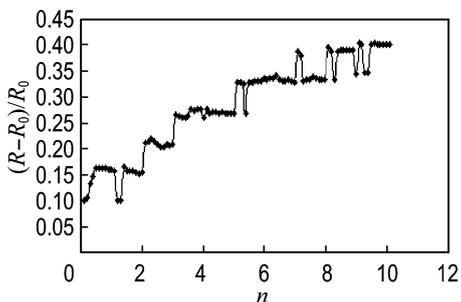
(b) 电阻相对变化

图 10 L1~L3 梁对应于 70% 极限荷载循环时的应变和电阻相对变化曲线

Fig. 10 Curves of strain and fractional resistance increase with cycle loading in 70% bearing capacity of beam L1-L3



(a) 应变

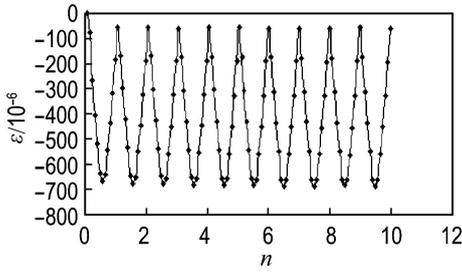


(b) 电阻相对变化

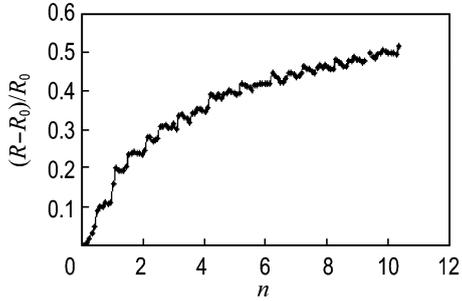
图 9 L1~L3 梁对应于 50% 极限荷载循环时的应变和电阻相对变化曲线

Fig. 9 Curves of strain and fractional resistance increase with cycle loading in 50% bearing capacity of beam L1-L3

BC 段 GSIFCON 的应变)和 BC 段电阻相对变化的关系曲线.由图 11 可见,在施加 70% 极限荷载的循环过程中 GSIFCON 电阻相对变化与荷载、应变对应关系良好,而在图 12 和 13 中,电阻相对变化趋势和周期与荷载和应变的变化趋势和周期仍有良好的对应关系,但电阻相对变化值却呈现跳跃变化状态.这是因为第一次加载时所施加的循环荷载较大,钢筋接近屈服状态,GSIFCON 内部受到了较大程度的损伤,此时再对梁施加较小的循环荷载对 GSIFCON 自身的开裂情况产生的影响已经较小,对梁及 GSIFCON 造成的损伤也较小,只能使得一些开裂宽度较小的裂缝宽度略有增加,同时加载会使梁的挠度有所增加,使得 GSIFCON 受到一定的压应力,而这样的压应力反而使得其内部裂纹部分愈合,或纤维间的搭接机会增加,从而 GSIFCON 的电阻降低,这种作用要比裂缝变宽导致的 GSIFCON 电阻增大的作用更大,使得此时 GSIFCON 的电阻反而比不加载时的电阻要小,在图 12 和 13 中表现出电阻相对变化值呈跳跃式改变.



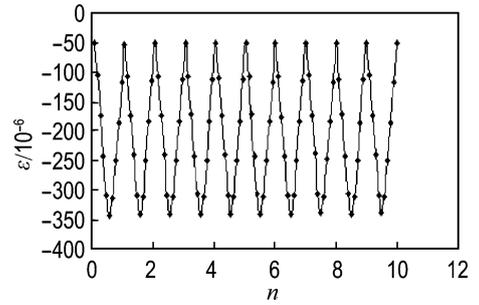
(a) 应变



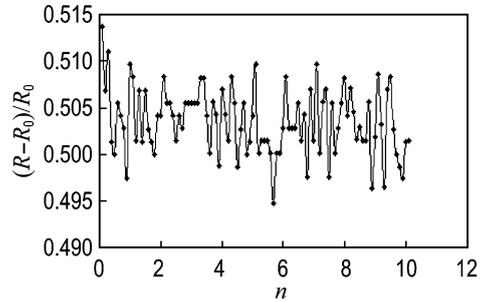
(b) 电阻相对变化

图 11 L4~L6 梁对应于 70% 极限荷载循环时的应变和电阻相对变化曲线

Fig. 11 Curves of strain and fractional resistance increase with cycle loading in 70% bearing capacity of beam L4-L6



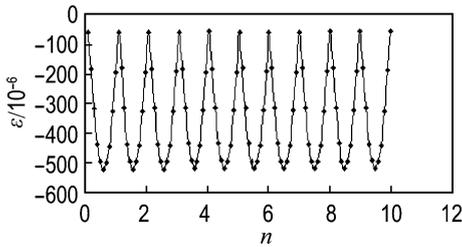
(a) 应变



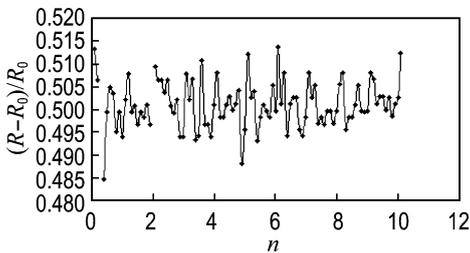
(b) 电阻相对变化

图 13 L4~L6 梁对应于 30% 极限荷载循环时的应变和电阻相对变化曲线

Fig. 13 Curves of strain and fractional resistance increase with cycle loading in 30% bearing capacity of beam L4-L6



(a) 应变



(b) 电阻相对变化

图 12 L4~L6 梁对应于 50% 极限荷载循环时的应变和电阻相对变化曲线

Fig. 12 Curves of strain and fractional resistance increase with cycle loading in 50% bearing capacity of beam L4-L6

4 结 论

(1) GSIFCON 棱柱体试件受压试验表明, GSIFCON 受压破坏全过程中, 其电阻相对变化始终与荷载、应变呈较好的对应关系, 可较敏感地反映出 GSIFCON 内部受压损伤程度。

(2) 对梁按 30%、50% 和 70% 的极限荷载递增分级循环加载过程中, 梁的受压区 GSIFCON 的电阻相对变化与荷载、应变存在良好的一一对应关系, 可以较灵敏地感知外部荷载的变化。

(3) 按 70%、50% 和 30% 的极限荷载递减分级循环加载时, GSIFCON 的电阻相对变化与荷载、应变变化趋势和周期仍保持良好的——对应关系, 但在较低级别极限荷载作用时, 由于高级别荷载循环作用时对梁的破坏程度较大, GSIFCON 的电阻相对变化值呈跳跃式改变。

参考文献:

[1] 洪 雷. 水泥基钢纤维复合导电材料制备方法: 中

- 国, ZL2005102007576 [P]. 2007-12-18
- [2] 洪雷. 混凝土特性及新型混凝土技术[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005
- [3] HONG Lei. Study on the mechanism of the electrical conductivity of infiltrated steel fiber concrete [J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2006, **21**(4): 295-300
- [4] 洪雷, 宋玉普. 石墨水泥砂浆渗浇钢纤维混凝土导电性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2006, **9**(6): 649-653
- [5] 洪雷, 孙维才, 孙宏伟. 石墨砂浆注浆钢纤维混凝土的导电性能及机敏性能研究[J]. *混凝土*, 2006 (11): 16-19
- [6] 姚武, 陈兵, 吴科如. 碳纤维水泥基材料的机敏特性研究[J]. *复合材料学报*, 2002, **19**(2): 49-53
- [7] REZA F, BASTON G B, JERRY A, *et al.* Volume electrical resistivity of carbon fiber cement composites [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, **98**(1): 25-35
- [8] WEN Shi-hai, CHUNG D D L. Carbon fiber-reinforced cement as a strain-sensing coating [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, **31**: 665-667
- [9] 洪雷, 孙维才, 黄圆圆. GSIFCON 材料特性及对钢筋混凝土梁损伤监控试验研究[J]. *土木工程学报*, 2008, **41**(7): 7-13

Study of compressive sensitivity character of graphite slurry infiltrated steel fiber concrete and smart monitoring of beam specimens

HONG Lei*

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: GSIFCON (graphite slurry infiltrated steel fiber concrete) is a type of conductive smart concrete modified from SIFCON (slurry infiltrated fiber concrete). In order to use GSIFCON smart material to monitor the internal damage of the beam specimens, the compressive sensitivity characters of GSIFCON were studied by tests with 3 concrete prismatic specimens. For monitoring the internal damage of the beam specimens, the relative variations of GSIFCON resistance during the destructive process were measured under different stresses with reinforced concrete beams laminated by GSIFCON. The experimental results show that the relative variations of GSIFCON resistance are in sensitive response to the change of the compressive stress. The relative variations of GSIFCON resistance in the compressive parts keep correspondence with the process of the beam damage, so the beam internal damage can be supervised by monitoring the relative variations of GSIFCON resistance.

Key words: compressive sensitivity character; damage; resistance; monitoring