

## CFRP 预警传感器的研究

黄盛楠<sup>1</sup> 叶列平<sup>1</sup> 陆新征<sup>1</sup> 冯 鹏<sup>1</sup> 杨才干<sup>2</sup> 吴智深<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>清华大学土木工程系, 北京 100084)

(<sup>2</sup>日本国立茨城大学都市系统工程系, 日立 316-8511)

**摘要:** 利用碳纤维增强复合材料 (CFRP) 的导电性和压电效应, 根据碳纤维断裂时所形成的电阻阶跃信号, 分别采用直接铺层和预先铺层 2 种方法制成对结构不同状态进行监测的 CFRP 预警传感器, 该预警传感器具有造价低、耐腐蚀、监测信号易于获取等优点, 并将此传感器应用于 5 根钢筋混凝土梁的试验研究. 结果表明, CFRP 预警传感器对于钢筋混凝土梁宏观行为的预测具有较好的效果, 在混凝土开裂、钢筋屈服等关键时刻, 其电阻信号发生突变, 触发预警信号, 该传感器对于钢筋混凝土类构件的监测具有实用性.

**关键词:** CFRP; 传感器; 结构健康监测; 预警

**中图分类号:** TU317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0505(2006)05-0810-05

### Research on CFRP alarm sensors

Huang Shengnan<sup>1</sup> Ye Lieping<sup>1</sup> Lu Xinzheng<sup>1</sup> Feng Peng<sup>1</sup> Yang Caiqian<sup>2</sup> Wu Zhishen<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(<sup>2</sup>Department of Urban and Civil Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316-8511, Japan)

**Abstract:** Utilizing the electrical conductivity and piezoresistivity of CFRP (carbon fiber reinforced polymer), alarm sensors are produced by two methods, the post-layered method and the pre-layered method. This kind of sensor has obvious merits, such as low cost, corrosion free, and easy to acquire monitoring signals. It can give different alarm sounds according to the rupture of different CFRPs, which means it can distinguish the work phase of the structure. The experimental research of five reinforced concrete beams by using this alarm sensor was conducted. Test results show that CFRP alarm sensors can give good prediction to the macroscopical behavior of reinforced concrete beams. Especially, the electrical resistance variation in CFRP may produce an obvious signal at the moment when concrete cracks and steel yields, therefore an alarm is presented. It is concluded that the CFRP alarm sensor is practical for monitoring reinforced concrete elements.

**Key words:** CFRP; sensor; structure health monitoring; alarm

随着现代大型工程建设的发展以及近年来出现的各种工程结构事故, 世界各国对工程结构的安全性和健全性都给予了很高的重视. 在采取各种加固补强措施的同时, 对工程结构的健康安全监测也越来越成为日益关注的问题. 虽然近年来对结构监测技术和方法进行了很多的研究, 然而由于影响工程结构因素的复杂性, 目前借助于监测传感器信号

对结构的损伤识别和安全评价在技术上和理论上依然存在很大困难.

近年来, 碳纤维增强复合材料 (CFRP) 以其轻质高强、高弹模、耐腐蚀等优点, 在结构加固中已得到广泛应用<sup>[1,2]</sup>. 另一方面, 碳纤维还具有导电性和压电效应, 尤其在其断裂时具有显著的电阻信号突变, 可以对结构的工作状态进行预警, 并已有学者在这方面进行了研究<sup>[3-10]</sup>. 本文利用不同类型碳纤维的混合, 利用其断裂应变不同导致的电阻信号阶跃变化制成 CFRP 预警传感器, 使其在被测部位的工作状态超过阶跃值时触发相应的预警信号, 这种直接预警的监测技术, 在其测量范围内无需借助

收稿日期: 2006-02-20

基金项目: 国家自然科学基金海外青年基金资助项目 (50228808).

作者简介: 黄盛楠 (1982—), 女, 博士生, huangcn03@mails.tsinghua.edu.cn; 叶列平 (联系人), 男, 教授, 博士生导师, ylp@mail.tsinghua.edu.cn

于专门的损伤识别方法和干扰信号处理方法,对工程结构的安全评价更为实用,而且 CFRP性能具有很好的耐久性和稳定性,不会因环境变化而发生变化,有利于工程结构的长期安全监测.

预警效果.本文试验研究中为保证测量精度更高,采用直接铺层法进行制作.本文用于制作 CFRP预警传感器的碳纤维品种和参数见表 1.

### 1 CFRP预警传感器

CFRP的电阻变化主要由 2 部分引起:一部分是由于 CFRP受拉后截面变小导致的传导电阻增大;另一部分是由于 CFRP中的碳纤维丝逐步断裂导致的电阻增大.在小应变阶段,主要是第一种原因导致的电阻变化,但这种电阻的变化幅度小,很难精确测量,且量测结果离散性大;随着应变增大,特别是当被测结构的应力或应变发生突变时,会导致 CFRP中的部分碳纤维断裂,第二种电阻变化趋于明显,而当达到其断裂应变,则会导致电阻急剧变化.为了能够对结构不同工作状态具备预警能力,采用不同品种的碳纤维制成的 CFRP传感器,利用不同品种碳纤维的断裂应变差别使得电阻形成阶跃变化,这就是 CFRP预警传感器的原理.

CFRP预警传感器的制作有 2 种方法:直接铺层法,即用环氧树脂将不同品种的碳纤维布逐层粘贴在被测结构或构件上,并用导电胶引出导线,如图 1(a)所示;预先铺层法,即首先用环氧树脂将不同品种的碳纤维布逐层粘贴并引出导线预先制成传感器,如图 1(b)所示,然后再采用粘贴或两端固定的方法将传感器安装在被测结构上.直接铺层法能将 CFRP与被测结构更为紧密地粘贴在一起,从而更好地保证二者共同工作,但其对于粘贴工作面的要求较高,即需要被测结构或构件有一个较为光滑、平整的粘贴面,且制作速度慢;预先铺层法,无需对被测结构或构件进行任何处理,只需要将制作好的传感器安装在被测部位即可,其制作速度快,适合于批量制作安装.作者曾对 2 种制作方法进行比较,结果显示 2 种方法都可以较好地实现

(a) 钢筋试样上用直接铺层法制成的 CFRP 传感器

(b) 预先铺层法制成的 CFRP 传感器

图 1 CFRP传感器

表 1 制作 CFRP传感器的 CFRP种类及其参数

CFRP种类	厚度 /mm	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa
C1	0.111	3 400	230
C5	0.165	2 900	390
C8	0.143	1 900	640

### 2 CFRP预警传感器应用于钢筋混凝土梁的试验研究

为检验 CFRP预警传感器的监测效果,进行了 5 个钢筋混凝土梁的试验.试验梁的基本参数如图 2 所示,在每根梁纯弯段的受拉钢筋上均布置了 CFRP传感器和钢筋应变计,传感器的初始电阻见表 2.5 个试验梁中,B1~B3 梁完全相同,以检验 CFRP传感器的可靠性,B4 与 B5 梁分别采用不同的方法进行加固,以检验 CFRP传感器对于加固后的结构具有相同的敏感性.

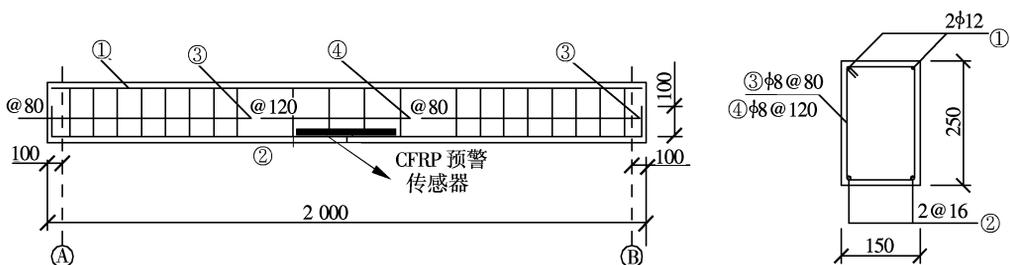


图 2 试验梁的基本参数 (单位: mm)

表 2 CFRP传感器的初始阻值

梁的编号	是否加固	CFRP传感器初始电阻 $R_0 /$
B1	否	2.489
B2	否	2.398
B3	否	2.490
B4	混杂碳纤维加固	2.163
B5	钢板加固	2.333

B1梁的荷载-挠度曲线和 CFRP传感器电阻变化率  $\Delta R/R_0$  与跨中挠度的关系曲线如图 3 所示. 当荷载达到 20 kN时,梁开始出现细微的裂缝,荷载-挠度曲线出现拐点,梁的刚度开始下降. 从图 3(b)中可以清晰地看出,在梁开裂瞬间 CFRP传感器的电阻变化率有一个小的突增. 此后,随着荷载的增加,裂缝不断开展,但 CFRP传感器的电阻变化不明显. 在荷载达到 95 kN时,受拉钢筋屈服,梁刚度明显下降,从图 3(a)中可以看出,此时电阻变化率突然增大,有明显的预警信号.

B2,B3梁的荷载-挠度曲线以及 CFRP传感器的电阻变化率与跨中挠度的关系如图 4和图 5所示,结果与 B1梁的情况基本类似,即当梁开裂时,CFRP传感器的电阻变化率有一个小的突增;当达到屈服荷载时,CFRP传感器的电阻变化率突然增大,有明显的预警信号. 图 3~图 7中,在小应变阶段阶段跃信号的位置已在图中标出.

为验证 CFRP预警传感器对加固以后梁具有同样的敏感性,将 B4,B5梁分别利用 CFRP布和钢板进行加固,其电阻变化与荷载-挠度曲线的关系分别如图 6和图 7所示. 结果表明,CFRP传感器对

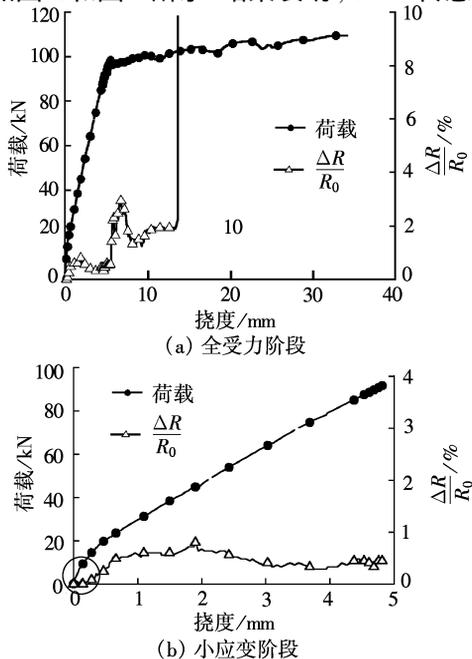


图 3 B1梁荷载挠度曲线与电阻变化的关系

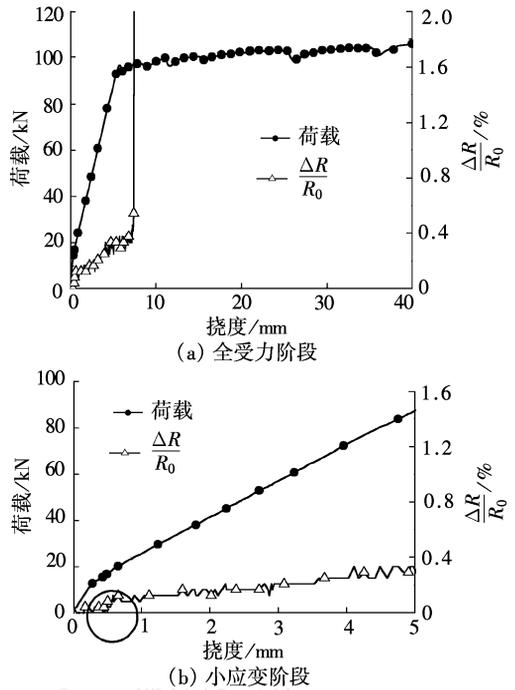


图 4 B2梁荷载挠度曲线与电阻变化的关系

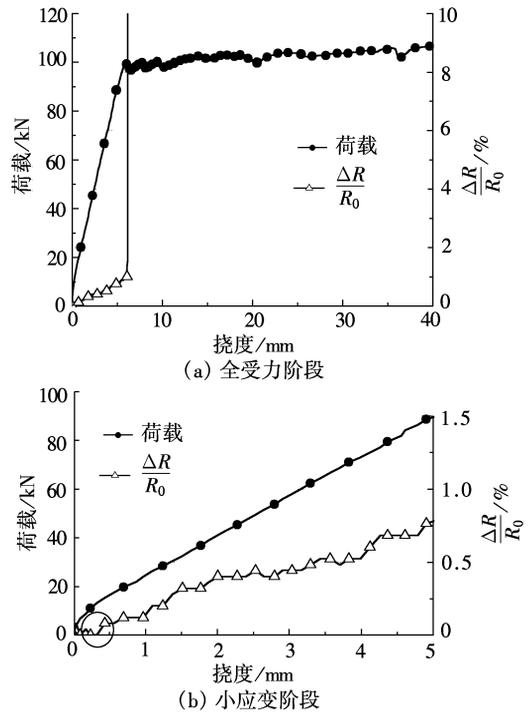
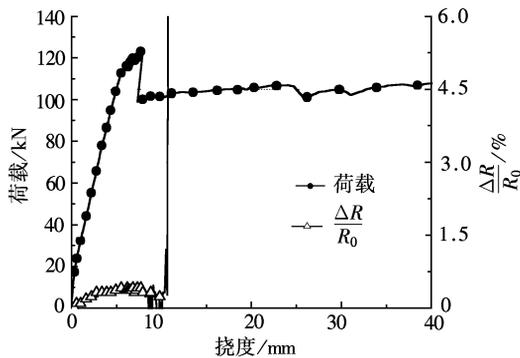


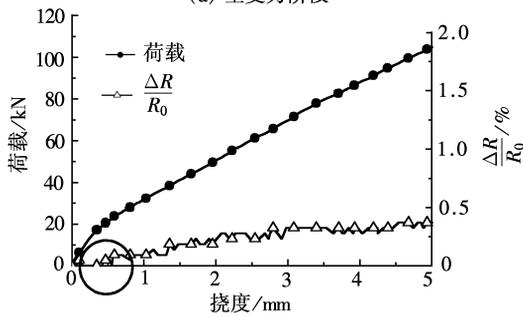
图 5 B3梁荷载挠度曲线与电阻变化的关系

于加固结构具有同样的预警效果.

通过对 B1~B5梁监测结果的分析,可以看出 CFRP传感器对于梁宏观行为的预测具有较好的效果. 其中,图 4(a)、6(a)和 7(a)曲线的拐点与 CFRP传感器阶跃点并非完全一致,这是由于 B2,B4,B5梁钢筋开始发生屈服的位置并非发生在 CFRP传感器处,此时的阶跃信号略有滞后,但其仍可较好预测钢筋屈服的产生.

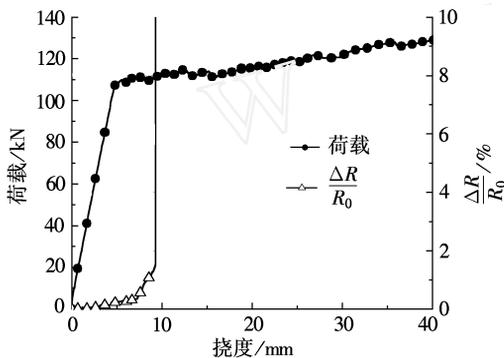


(a) 全受力阶段

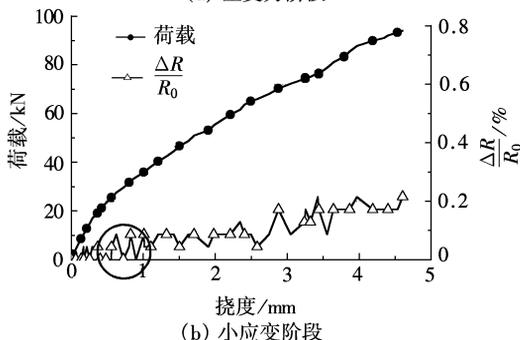


(b) 小应变阶段

图 6 B4梁荷载挠度曲线与电阻变化的关系



(a) 全受力阶段

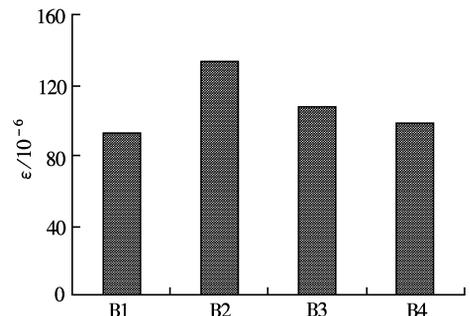


(b) 小应变阶段

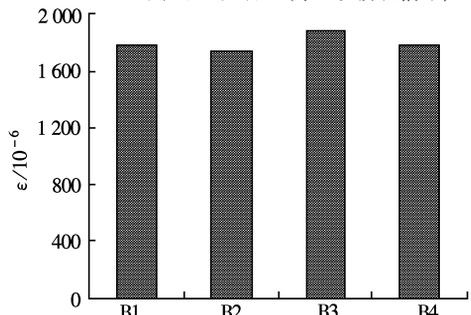
图 7 B5梁荷载挠度曲线与电阻变化的关系

各试验梁中,CFRP传感器的 2次阶跃信号所对应的钢筋应变值的对比如图 8所示.由于 B2钢筋应变片与 CFRP传感器处钢筋未同时屈服,没有达到预想效果,图 8中未作比较.由图 8可见,当钢筋应变分别为  $108 \times 10^{-6}$ 和  $1794 \times 10^{-6}$ (4根梁钢筋应变量测结果的平均值)时,CFRP传感器的电阻会发生突变,这 2次突变的钢筋应变值未超过

CFRP传感器中任一碳纤维的断裂应变,因此阶跃并非因达到某碳纤维断裂应变所引起,而是由于混凝土开裂和钢筋屈服使得 CFRP传感器中部分碳纤维断裂所致,不同种类 CFRP制作传感器的优势在本试验中未能体现.开裂时,由于裂缝部位的局部应变突增,导致 CFRP传感器中少量碳纤维断裂,引起电阻小幅度增加;屈服时,钢筋应变在瞬时会有较大发展,CFRP传感器中碳纤维的断裂量较大,其电阻在此时有较大变化.



(a) 小应变阶段(第1次阶跃信号)



(b) 大应变阶段(第2次阶跃信号)

图 8 阶跃信号与钢筋应变的关系

虽然 CFRP预警传感器的测量精度有限,且阶跃大小有一些离散度,但通过大量的重复性试验可以看出 CFRP预警传感器能较为准确地对钢筋混凝土梁的开裂和钢筋屈服等关键点给出阶跃预警信号.

### 3 结 语

本文通过钢筋混凝土梁的试验,初步验证了 CFRP传感器在开裂和钢筋屈服时具有阶跃信号预警的性能,且性能较为稳定.由于钢筋屈服应变小于所选用碳纤维的断裂应变,在钢筋混凝土梁的正常使用阶段,CFRP传感器的阶跃信号并不显著.为改善这一缺陷,可以通过对不同品种的碳纤维施加不同预应力,使得 CFRP传感器在较低应变值区段具有更多的阶跃信号台阶,可提高其工程结构工作状态监测的敏感程度,从而可以实现对不同工作状态的预警,有关工作将在后续研究中进行.

CFRP预警传感器的环境适应能力强,耐久性好,并可根据被测结构的需要,制作成任意形状、任意长度、任意宽度的传感元件,从而可实现分布式大范围测量,而且具有监测手段简单、长期稳定等优势,是结构安全监测值得发展的一种实用预警传感器。

### 参考文献 (References)

- [1] 叶列平,冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 25-37.  
Ye Lieping, Feng Peng. Application and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(3): 25-37. (in Chinese)
- [2] 王勃,何政,张新越,等. 纤维聚合物筋在土木工程中的应用[J]. 建筑技术, 2003, 34(2): 134-135.  
Wang Bo, He Zheng, Zhang Xinyue, et al. Fiber reinforced polymer bars applied to civil engineering[J]. *Architecture Technology*, 2003, 34(2): 134-135. (in Chinese)
- [3] 欧进萍,周智,王勃. FRP-OFBG智能复合筋及其在加筋混凝土梁中的应用[J]. 高技术通讯, 2005, 15(4): 23-28.  
Ou Jinping, Zhou Zhi, Wang Bo. Smart FRP-OFBG bars and their application in reinforced concrete beams[J]. *High Technology Letters*, 2005, 15(4): 23-28. (in Chinese)
- [4] Wu Zhishen, Yang Caiqian, Takahashi T, et al. Self-diagnosis of concrete beams reinforced with hybrid CFRP rods [C]// Chang F K, ed. *Proc of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford, CA, 2003: 155-162.
- [5] 张新越. FRP筋及其混凝土构件的力学性能与感知特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2002.
- [6] Bakis C E, Nanni A, Trosky J A, et al. Self-monitoring, pseudo-ductile, hybrid FRP reinforcement rods for concrete applications[J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(6): 815-823.
- [7] Abry J C, Choi Y K, Chateauinois A, et al. In-situ monitoring of damage in CFRP laminates by means of AC and DC measurements[J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(6): 855-864.
- [8] Muto N, Arai Y, Shin S G, et al. Hybrid composites with self-diagnosing function for preventing fatal fracture [J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(6): 875-883.
- [9] 沈烈, 益小苏. 一个单向碳纤维增强树脂基复合材料导电结构模型[J]. 复合材料学报, 1998, 15(3): 66-70.  
Shen Lie, Yi Xiaosu. Model of conductive structure of unidirectional CFRP[J]. *Acta Material Compositae Sinica*, 1998, 15(3): 66-70. (in Chinese)
- [10] Chung D D L. Strain sensors based on the electrical resistance change accompanying the reversible pull-out of conducting short fibers in a less conducting matrix[J]. *Smart Materials and Structures*, 1995, 4(1): 59-61.