

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0197-05

# 纤维增强复合材料与现代基础设施建设<sup>①</sup>

岳清瑞, 杨勇新

(国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心, 北京 100088)

**摘 要:** 高性能纤维增强复合材料(Advanced Fiber Reinforced Polymer, 简称 FRP)应用于基础设施建设中是近年来国际上研究的热点, 结合“八六三”项目开展了基础设施建设用高性能低成本的 FRP 材料及其关键应用技术的开发工作, 取得了一系列成果。在材料改性研究以及产品开发方面, 通过纤维混杂改性, 开发出适用于不同工程要求的单一品种纤维和混杂纤维的 FRP 产品及配套树脂材料、配套设备机具等; 在关键应用技术开发方面, 根据工程需要, 开发出钢结构加固技术、砌体结构加固技术、预应力加固技术、结构无损检测技术等基础设施建设中应用 FRP 材料的关键技术; 在规范标准编制方面, 主持编制国家标准 4 项, 1 项已获批准实施, 其它 3 项正在按计划进行; 在工程应用方面, 应用自主开发的材料和技术, 改造、加固工程 100 多项, 创造了巨大的经济效益及广泛的社会效益。这些工作极大地推进了我国在基础设施建设用 FRP 技术领域的发展。

**关键词:** 纤维增强复合材料; 基础设施; 产品; 技术; 规范; 应用

## Fiber reinforced polymer materials and foundational establishment of society

YUE Qing-rui, YANG Yong-xin

(National Diagnosis and Rehabilitation of Industrial Building Engineering Research Center,  
Beijing 100088, China)

**Abstract:** The application of fiber reinforced polymer (FRP) materials in foundational establishment is a growing field in the world. The authors have investigated a series of FRP materials and application techniques in foundational establishment construction field based on “The National Advanced Materials Committee of China” foundation item (2001AA336010). Properties of FRP materials have been improved by experimental and analysis on hybrid of two or three kinds of fiber, and various products have been manufactured accordingly. At the same time, the resin and equipment that are suitable for those FRP materials have been developed. A series of key applied techniques, such as strengthening of steel structures, masonry structures and concrete structures reinforced with prestressed FRP, lossless inspectability of structures and so on, have been developed through experimental research according to requests of engineering. There are four codes and guidelines for applying FRP techniques to construct foundational establishment. Among them, one technical specification was published in May 2003. It can be standardization of applying FRP materials on engineering. There have been more than one hundred engineerings strengthened with FRP materials since 1999 based on research and investigation of FRP materials and techniques. There is a huge advance to use FRP on foundational establishment of society in China.

**Key words:** fiber reinforced polymer materials; foundational establishment; products; techniques; codes; application

高性能纤维增强复合材料(Advanced Fiber Reinforced Polymer, 简称 FRP)应用于基础设施建设

中是近年来国际上研究的热点。纤维增强复合材料由于具有轻质、高强、耐腐蚀、可设计等优点在其

① 基金项目: 国家“八六三”计划资助项目(2001AA336010)

作者简介: 岳清瑞(1962-), 男, 教授级高工。

通讯作者: 杨勇新, 电话: 010-82227636, 13511077879; 传真: 010-82227636

它领域已得到大量的应用,随着研究不断深入,许多基础理论、方法已趋于完善,新型 FRP 材料不断涌现,新应用技术层出不穷,在基础设施建设中的应用正呈现出高速发展的趋势。在我国,尤其在国家各级科研计划项目的支持下,FRP 材料的研究开发及其在基础设施建设中的应用也得到飞速发展,FRP 材料、产品开发、技术开发、工程应用以及标准化工作得到了广泛的重视,取得了许多成果。可以预测,FRP 材料作为新兴的高性能材料,在国家基础设施建设中应用的深度和广度将超过传统的建筑材料,成为新一代建筑材料的首选。

纤维增强材料具有弹性材料的性质,强度较高,但极限断裂延伸率相差较多,是一种脆性很大的材料,其基本应力-应变关系如图 1 所示。而基础设施工程结构对材料的性质除了要求有较高的强度以外,必须具有足够大的延伸率(如图 2 所示),以保证结构安全性,尤其在需要抗震设防的结构中更是如此。为了使在结构中应用的 FRP 材料满足这种要求,必须对已有的 FRP 材料进行改性,并开发相应的产品。作者承担的国家“八六三”计划项目正是基于这种背景而实施的,经过努力,目前在许多方面取得了突破性进展,部分研究成果已达到国际先进水平。

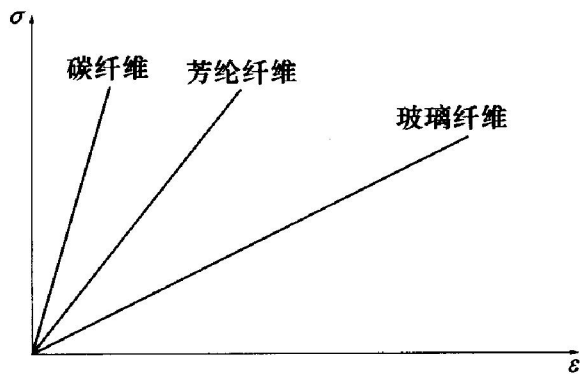


图 1 各种纤维应力-应变关系

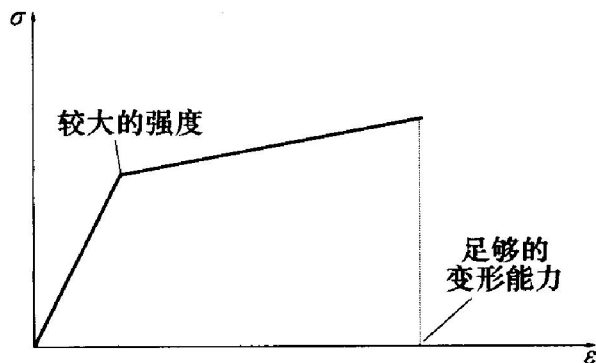


图 2 结构要求材料具备的性质

## 1 材料及技术开发现状

### 1.1 FRP 材料改性研究与评价

首先对混杂纤维结构材料的性能进行了全面的理论分析和试验研究,通过多种高强度和高延性纤维混杂复合,提高材料的延性和承载能力。在混杂纤维复合材料的改性研究中,主要考虑材料的强度、延性等性能。纤维混杂设计主要考虑各种纤维的力学性能及纤维在混杂材料中的分布及配比,在混杂纤维复合材料中,高模量纤维用来提高材料的刚度,高强度纤维用于提高高模量纤维断后材料的安全性,高延性纤维用于改善延性。研究表明:对于多种纤维混杂的复合材料应力-应变关系一般都可以形成多段比较明显的台阶和应变强化阶段,而且台阶和强化阶段的数量与纤维的种类有直接关系,这种阶梯状的变化,可以满足材料的强度和延性要求。混杂改性后纤维的应力-应变关系可以用图 3 来表示。

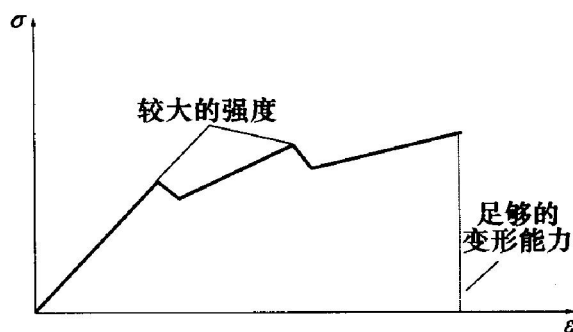


图 3 混杂纤维应力-应变关系

根据数千个试件的性能检测结果,目前已开发出以碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维为主的不同种类纤维以不同方式混杂的片材、筋材以及型材,纤维总含量可达 65%。可应用于结构加固及新建的 FRP 产品已有数十种投入使用或正在中试阶段。

检测结果表明混杂纤维的力学性能、耐久性能及使用性能均较单一品种的纤维复合材料性能指标有较大的改善,性能满足土木工程要求,且成本有较大幅度降低。根据课题研究成果,结合基础设施建设特点,初步建立了工程用纤维增强复合材料性能评价体系。该评价体系从材料力学、物理化学、耐久性、使用性能以及成本等方面对工程结构用 FRP 材料的性能进行综合评价。该体系的建立,带动了我国基础设施工程用纤维增强复合材料的研制、生产和应用,使纤维增强复合材料在工程中的

应用快速增长, 形成了新的经济增长点。

FRP 材料的性能评价体系框图如图 4 所示。

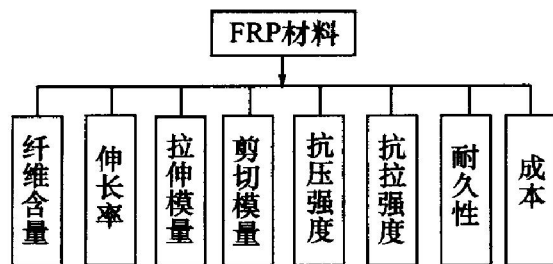


图 4 纤维增强复合材料性能评价体系框图

## 1.2 工程用配套材料及设备开发

为了配合纤维增强复合材料在工程中的应用, 形成高性能纤维增强复合材料应用成套技术, 结合工程实际环境条件, 完成了不同要求的配套材料以及设备开发, 初步形成体系, 并在工程中得到应用。

1) 开发出低温( $-5^{\circ}\text{C}$ )、高湿(相对湿度 95% 以上)等工程环境要求条件下使用的与纤维材料配套的树脂材料, 在相应的环境条件下, 这些树脂材料可以正常固化, 与纤维的粘结性能达到使用要求。

2) 开发出钢结构加固、预应力加固专用粘结树脂材料, 这些材料专门用于钢结构加固修复、预应力加固工程使用。

3) 开发出 5 种预应力张拉设备及锚、夹具, 专用于碳纤维布张拉加固等配套设备。适用于不同纤维材料、不同施工工艺与不同纤维增强复合材料预应力片材、筋材配套使用, 经过试验检验, 满足土木工程应用要求。

## 1.3 关键应用技术开发研究

在材料改性研究的同时, 如何将新材料应用于工程当中也是“八六三”计划项目需要解决的问题。通过大量的试验研究, 目前国内在 FRP 材料关键应用技术方面也取得了很大的进展。

1) 钢结构加固技术。适用于金属压力容器、生命线管道等工程加固。

2) 预应力加固结构技术。适用于大跨度结构(桥梁)的加固改造, 作者自主开发的预应力纤维增强复合材料加固结构成套技术预应力水平达到 30%, 材料应用效率可以大幅提高, 达到了国际先进水平。

3) 砌体结构加固技术。适用于砌体(砖石)结构建筑抗震、抗爆改造、加固, 工程应用市场潜力巨大。

4) 结构无损检测技术。利用纤维材料高耐久性、导电性等特点, 进行结构无损检测, 减少经济投入并提高结构使用安全性。

这些关键的应用技术首先是建立了设计理论和方法, 形成了成熟的技术, 目前正在基础设施建设中发挥作用, 创造着巨大的直接经济效益和间接社会效益。

## 2 规范标准体系的建立

目前在基础设施建设工程领域应用 FRP 材料的规范标准共有 4 项, 即国家标准《高性能纤维增强复合材料应用技术规范》、建设部标准《结构加固修复用碳纤维片材产品标准》、建设部标准《结构加固修复用树脂产品标准》以及中国工程建设标准化协会标准《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》。这些标准规范在内容上包括: 各种纤维增强复合材料的取样、试样制备、试验设备与机具、试验方法、试验结果评价、设计取值标准、应用界限与范围等; 在指标范围上包括: 材料的力学性能指标、耐久性性能指标、使用性能指标等。该体系涵盖了基础设施建设工程用纤维增强复合材料的检测标准与方法、产品标准、工程设计、施工、质量检验与管理标准等各个方面。目前已出版一部加固规程, 这些规范标准全部完成后, 将基本形成我国自己的基础设施建设工程应用 FRP 材料的标准规范体系。

## 3 工程应用

将开发出的 FRP 产品及关键技术应用于工程, 形成生产力, 创造经济效益是“八六三”计划项目的主要目的和发展方向。结合研究成果, 我们已完成工程应用项目百余项、创造直接经济效益 6 000 多万元, 在全国范围内的效益则高达几亿元。

目前国内主要使用 FRP 材料进行工程结构改造、加固, 以提高工程安全性、耐久性以及使用性等。已有的应用工程使用的 FRP 材料涉及碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维; 涉及到的结构有混凝土结构、砌体结构、钢结构、木结构等; 结构形式包括建筑物、构筑物、桥梁、工业厂房、机场、码头、市政工程、道路以及生命线管道工程等。

部分工程应用项目见图 5。

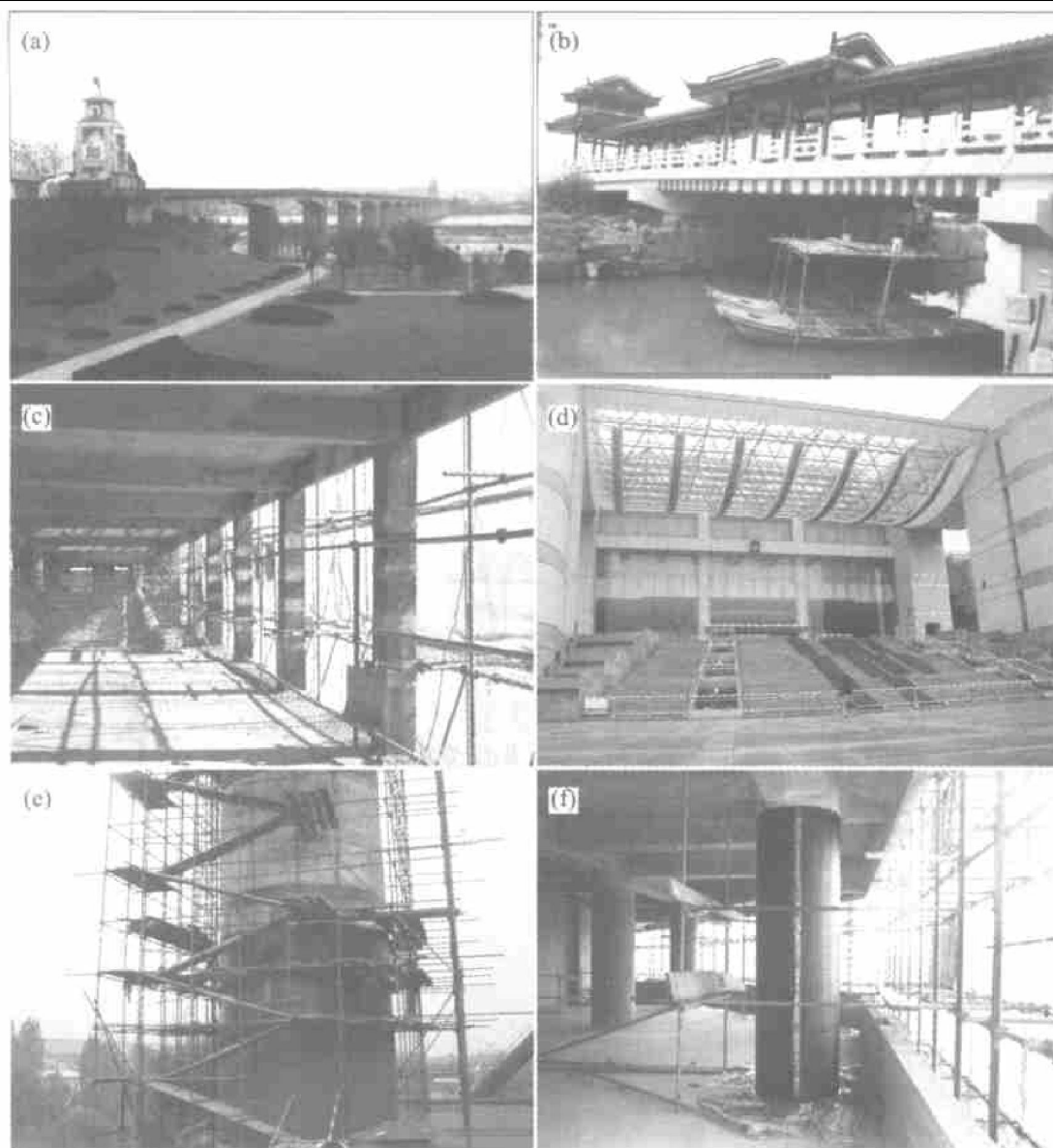


图 5 部分应用 FRP 材料工程的照片  
(a), (b) 一桥梁加固; (c), (d) 一建筑物加固; (e) 一砌体构筑物加固; (f) 一结构抗震加固

## 4 发展前景

纤维增强复合材料在基础设施建设工程中得到广泛应用是基于材料的优良性能,目前国际上应用纤维增强复合材料的模式已发展到第 3 代,我国在这个领域的研究与应用与国外基本同步,具有很大的发展潜力。

### 1) FRP 材料性能不断改善

基础设施建设工程应用 FRP 材料从最早的单一品种玻璃纤维发展到碳纤维、芳纶纤维,进一步是混杂纤维,目前又出现了性能更适合建设工程应用的 PBO 纤维以及其它新型纤维。随着纤维种类的增多,性能也逐渐改良,这为基础设施建设工程应用 FRP 材料提供了物质基础。

### 2) FRP 材料需求量呈几何级数增长

据不完全统计,我国基础设施建设工程应用纤维增强复合材料的数量自 1998 年以来呈几何级数增长,2003 年至今仅碳纤维片材使用量已达到  $60 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,约 130 t,价值达 4 亿元人民币以上。由于我国基础设施工程面大量广,环境条件千变万化,对 FRP 材料的需求巨大,随着不同品种以及混杂纤维增强复合材料在工程中的使用,用量将进一步增长。

### 3) 应用领域不断扩大

目前国内主要应用 FRP 材料的领域是工程结构加固,随着研究的不断深入,FRP 材料用于大跨结构、高层结构、悬索结构、索膜结构、海洋工程结构、交通工程结构、新形势下的反恐抗爆结构(或加固)方面已有了新的进展。在特殊环境条件下结构中应用纤维增强复合材料替代传统建材的研究也取得很大进展,使得 FRP 材料在基础设施建设

工程中的应用领域将进一步扩大。

## 5 结束语

基于高性能纤维增强复合材料优良的性能, 国内外在纤维增强复合材料应用于基础设施建设方面得到了广泛的重视和发展, 形成了新的高性能材料与工程建设相结合的热潮, 我国在这个领域的发展基本与国际发展趋势接轨, 随着研究的不断深入, 材料的国产化进程加快, 必将对全国基础设施建设的发展起到革命性的推动作用。

### 参考文献

- [1] Arduini M, Nanni A. Parametric study of beams with externally bonded FRP reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 1997, 94(5): .
- [2] 服部笃史. コンクリートのひび割れが連続繊維シートに与える影響[A]. 連続繊維補強コンソリートに関するシンポジウム論文集[C]. 1998, 5: 1-6.
- [3] YUE Qing-rui, YANG Yong-xin. FRP for structural rehabilitation in China[J]. Advances in Structural Engineering, 2003, 6(3): 257-261.
- [4] YANG Yong-xin, YUE Qing-rui, YE Lie-ping, et al. Flexural capacity of RC beams strengthened with carbon fiber sheets[A]. The Proceedings of International Conference on Advances in Concrete and Structure (ICACS2003)[C]. Xuzhou, China, 2003. 9.
- [5] Teng J G, Zhang J W, Smith S T. Interfacial stresses in a RC beams bonded with a soffit plate: a finite element study[J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(1): 1-14.
- [6] YI Lie-ping, YUE Qing-rui, ZHAO Shu-hong, et al. Shear strength of reinforced concrete columns strengthened with carbon fiber reinforced plastic sheet[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2002. 12.
- [7] YUE Qing-rui, YANG Yong-xin. Study and application of strengthening structure using fiber reinforced polymer in China[A]. The Seventh International Symposium on Structural Engineering for Young Experts (ISSEYE-7) [C]. Tianjin, China, 2002.
- [8] 岳清瑞, 杨勇新. 《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》简介[J]. 建筑结构, 2003, 33(6):
- [9] 杨勇新, 岳清瑞, 胡云昌. 碳纤维布与混凝土粘结性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(3): 36-42.
- [10] Katsuki F, et al. Experimental study on deterioration of adhesion properties of continuous fiber sheet [A]. Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures[C]. ACI, 1999. 45-56.
- [11] Malek A M, et al. Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end[J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(1): 142-152.
- [12] Roberts T M. Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plated RC beams[J]. The Structural Engineer, 1989, 67(2).
- [13] 吴智深. FRP 复合材料在基础工程设施的增强和加固方面的现状与发展[A]. 中国首届增强塑料混凝土结构学术交流会论文集[C]. 北京: 2000. 5-20.

(编辑 杨 兵)