

·实践与探讨·

# FRP在土木工程领域中的应用

田洪臣<sup>1</sup>, 康梅林<sup>2</sup>, 催千祥<sup>1</sup>

(1.山东农业大学, 山东 泰安 271018; 2.山东水利职业学院, 山东 日照 276826)

[摘 要] 本文通过对传统土木工程材料进行比较, 简要介绍了 FRP 复合材料的特性; 阐述了在建筑工程、岩土工程、桥梁工程以及海洋和近海结构等工程当中的应用; 分析了在国内的应用现状, 并提出了 FRP 复合材料在我国的发展趋势。

[关键词] FRP; 纤维; 复合材料; 土木工程

[中图分类号] G640

[文献标识码] A

[文章编号] 1814-9723(2010)03-0076-04

## 一、前言

纤维增强复合材料 (Fiber-Reinforced Plastic, 简称FRP)是由多股连续纤维,如玻璃(glass)纤维、碳(carbon)纤维以及阿拉米德(aramid)纤维等,采用基底材料(例如聚酰胺树脂、聚乙烯树脂、环氧树脂等)胶合后,经过特制的模具挤压、拉拔而形成的复合材料<sup>[1,2]</sup>。这种材料强度很高,接近高强预应力钢筋。与传统结构材料相比,FRP具有高强、轻质、耐腐蚀和施工方便等优点<sup>[1]</sup>。

FRP复合材料能适应现代工程结构向大跨、高耸、重载、高强和轻质发展以及承受恶劣条件的需要,符合现代施工技术的工业化要求,因此正被越来越广泛地应用于桥梁、各类民用建筑、海洋和近海、地下工程等结构<sup>[2]</sup>。

## 二、FRP的特点<sup>[2,3]</sup>

常见的FRP包括玻璃纤维增强塑料(GFRP)、碳纤维增强塑料和阿拉米德纤维增强塑料(AFRP)等。不同的纤维化学成分不同,力学性能也有较大差异,相应FRP的力学性质表现出很大的差异。常见的几种纤维力学性能见表1,相应FRP的力学性能见表2。

### 1.抗拉强度高、延性差

三种FRP的抗拉强度均明显超过了钢筋,与高

强钢丝相差不多,且FRP的比强度一般是钢材的20~50倍,采用FRP材料会大大减轻结构自重。由表中数据可以发现,FRP材料在达到抗拉强度之前,几乎没有塑性变形产生,表现出不良的延性。

### 2.抗腐蚀性和耐久性好

与钢材相比,FRP均具有很好的抗腐蚀性和耐久性,可以在酸、碱、氯盐和潮湿的环境中抵抗化学腐蚀,这是传统结构材料难以比拟的,因而可提高结构使用寿命,使得结构的维护费用和周期都将大大降低,尤其用于腐蚀性较大的环境时效果更为明显。

### 3.自重轻,施工方便

FRP密度仅为钢材的25%左右,而且FRP产品非常适合于在工厂生产、现场安装的工业化施工过程,有利于保证工程质量。这样,当建筑结构中采用FRP时,施工非常方便,可降低劳动力费用。当用于旧有结构的维修加固时效果更为明显。

### 4.热膨胀系数与混凝土相近

由于这一优点,在环境温度发生改变时,FRP与混凝土协同工作,两者间不会产生比较大的温度应力。

### 5.弹性模量小

FRP的弹性模量约为普通钢筋的25%~70%,这样,FRP混凝土结构的挠度较大和裂缝开展较宽将不可避免。

收稿日期:2009-8-1

作者简介:田洪臣(1963-),男,同济大学,工业与民用建筑专业,现为副教授,主要从事土木工程施工、管理及再生混凝土的研究。

表1 纤维的力学性能

| 纤维类别<br>fiber category      | 密度density         | 弹性模量elastic modulus  | 抗拉强度tensile strength | 极限应变limit strain |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|------------------|
|                             | kg/m <sup>3</sup> | MPa                  | MPa                  | %                |
| 普通钢筋regular reinforcement   | 7850              | 2.1×10 <sup>5</sup>  | 400                  | 10.0             |
| 高强钢丝high tensile steel wire | 7850              | 2.0×10 <sup>5</sup>  | 1800                 | 4.0              |
| 玻璃纤维glass fiber             | ≈2580             | ≈6.6×10 <sup>4</sup> | ≈2890                | ≈2.4             |
| 碳纤维carbon fiber             | ≈1800             | ≈2.0×10 <sup>5</sup> | ≈3600                | ≈1.6             |
| 阿拉米德纤维Aramid fiber          | ≈1440             | ≈1.2×10 <sup>5</sup> | ≈3500                | ≈2.8             |

表2 FRP复合材料的力学性能

| FRP 类型<br>FRP category      | 密度 density        | 弹性模量 elastic modulus | 抗拉强度 tensile strength | 极限应变 limit strain |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|
|                             | kg/m <sub>3</sub> | MPa                  | MPa                   | %                 |
| 普通钢筋regular reinforcement   | 7850              | 2.1×10 <sup>5</sup>  | 400                   | 10.0              |
| 高强钢丝high tensile steel wire | 7850              | 2.0×10 <sup>5</sup>  | 1800                  | 4.0               |
| 玻璃纤维 glass fiber            | ≈2000             | ≈5.1×10 <sup>4</sup> | ≈1670                 | ≈3.3              |
| 碳纤维 carbon fiber            | ≈1500             | ≈1.5×10 <sup>5</sup> | ≈1700                 | ≈1.1              |
| 阿拉米德纤维 Aramid fiber         | ≈1300             | ≈6.4×10 <sup>5</sup> | ≈1610                 | ≈2.5              |

6.抗剪强度低

FRP 抗剪强度很低,通常不超过其抗拉强度的 10%左右,而金属的剪切强度约为其拉伸强度的 50%。这使得 FRP 构件的连接成为突出问题。在 FRP 结构中,连接部位通常都是整个构件的薄弱环节。在将 FRP 用作预应力筋以及进行 FRP 的材性试验时,相应的锚、夹具需专门研制。

7.其它方面

由于 FRP 的生产加工制作工艺较为复杂,一般采用专门的长线挤压台座才能完成,所以材料造价比较昂贵;与混凝土相比,一般 FRP 材料的防火性能较差;与传统结构材料不同,FRP 材料通常表现为各向异性,纤维方向的强度和弹性模量较高,而垂直纤维方向的强度和弹性模很低。FRP 产品还有一些其它优势,如透电磁波、绝缘、隔热、热胀系数小等等,这使得 FRP 结构和 FRP 组合结构在一些特殊场合能够发挥难以取代的作用。

三、FRP 在土木工程领域中的应用

FRP 复合材料在土木工程领域的应用快速增长,可用于包括柱、墙、梁、板及面板的抗震及补强加固,新的增强构件、结构形式及结构体系也正在研究、开发和应用<sup>[4]</sup>。

1.建筑工程

FRP 筋已被应用于建筑结构中,分别于 1986

年和 1988 年建成的美国 Texas University 和 Hospital Building 均采用了 FRP。FRP 还被大量应用于旧有民用建筑的维修加固,美国 Texas Hamilton 饭店部分柱子采用 FRP 进行了维修加固;美国 Bergstroms 机场的 Hilton 饭店的柱结构也采用了类似的加固办法,上述两个工程的加固均由美国 Delta 结构技术公司负责完成<sup>[2]</sup>。

现在结构设计正转向基于性能的设计,对结构及材料性能的要求也提高了。FRP 材料已用于新建结构的框架以提高其结构性能。瑞士一座五层的高性能建筑由分离的玻璃纤维加强聚酯标准构件装配而成,构件之间由双组分环氧树脂胶粘合,为了减少连接构件的数量,框架做成多层拼接,类似于传统的木结构。楼板梁由粘合的箱形构件制成,柱为槽形截面,位于楼板梁的两侧,贯穿整个建筑全高。为防止层间柱子屈曲,使用 I 形构件插入并粘合在槽形构件之间<sup>[4]</sup>。

2.岩土工程

FRP 纤维复合材料在长期恶劣的地质条件下具有良好的耐腐蚀性能,已广泛用于加筋土中;FRP 复合材料易被掘进机具切断,故可用于盾构法掘进竖井的混凝土墙、土钉及临时支护用的复合材料地锚(如用钢锚则会导致挖掘机机头的断裂)。因 GFRP 复合材料价格低廉,安装方便,耐久性强,已用于潮汐变化的干湿交替的挡土墙、地基锚杆及喷射混凝土筋等<sup>[4]</sup>。

### 3. 桥梁工程<sup>[4,5]</sup>

FRP 复合材料应用于桥梁工程起始于 70 年代末和 80 年代初期。可用作悬索桥及斜拉桥的缆索、预应力混凝土桥中的预应力筋,甚至可以用于整个桥梁体系;另外,在桥梁补强加固方面也有应用。

内填混凝土的纤维壳体系的结构构件,薄壳由纤维/环氧树脂预制而成,混凝土于现场浇筑以承受压力,使薄壳构件保持稳定,混凝土对相连构件可起锚固作用,壳对混凝土芯起增强和模板作用,其长向纤维抗弯,横向纤维抗剪且对其内的混凝土起约束作用,分层敷设的纤维/环氧树脂复合材料可以控制其强度和刚度。为传递壳与混凝土间的剪力,纤维壳内设有横向加劲肋。这种纤维壳体系对梁柱都适用,以此为基础,还研制开发了纤维壳梁板桥体系和组合管体系,显著减轻了结构自重,大大提高了其抗震能力。

为恢复和提高既有桥梁承载能力,在既有混凝土桥受拉侧用环氧树脂粘贴复合材料板加固桥梁,具有施工简便、加固费用低、不减少桥下净空、加固材料带来的恒载不多等优点,并且加固施工能在不影响或少影响交通的情况下进行,同时可克服粘贴钢板受运输长度的限制、钢板锈蚀引起钢板与混凝土梁之间粘贴层损坏之不足。有关研究表明先进复合材料板代替钢板加固混凝土梁可节约资金 25%。粘贴复合材料板后的混凝土梁,平面假定仍然是成立的,混凝土的剪切裂缝可能导致粘贴板的脱落,保证胶粘剂的性能和施工质量是粘贴复合材料板成功的关键,用环氧树脂粘贴玻璃布形成玻璃钢,可以大大提高粘贴梁的抗弯刚度。国内在这方面的研究和应用工作起步较早,但发展不快。

### 4. 海洋结构和近海结构

海洋结构和近海结构的腐蚀问题一直比较突出,对于钢结构更是如此,因而采用抗腐蚀性能良好的 FRP 可以很好地解决该问题,因而 FRP 被应用于海洋结构和近海结构具有很好的发展前景<sup>[2]</sup>。目前在建的海洋钢筋混凝土结构,采用最厚的混凝土保护层(一般为 150mm 左右,相当于陆地混凝土结构保护层的 5 倍以上)及防腐措施,其对内部钢筋防氯盐腐蚀也仅有 15 年左右,这与永久或半永久性的海洋结构耐久要求相距甚远。采用 FRP 混凝土或 FRP-

混凝土组合结构就可以从根本上解决海洋工程中的钢筋(钢材)腐蚀问题,其重大意义不言而喻<sup>[1]</sup>。

实际工程近些年已开始出现,例如日本 Ni-hama 市 Sumitomo 化工有限公司兴建的一座海港码头,采用了预应力混凝土面板,板宽 13.8m,长 61m,宽度方向由 17 根简支空心梁组成,长度方向共分为 5 跨,其中的 4 跨采用了高强钢绞线作预应力束,另一跨采用 AFRP 作预应力束(跨度 9m)。码头建成后,进行了 50t 起重机和 35t 挖土机的荷载试验,对实测结果的分析表明,采用 FRP 的混凝土梁完全可满足正常使用要求<sup>[2]</sup>。

### 5. 其它领域

#### (1) 预制 FRP 管<sup>[2]</sup>

除上述应用领域外,尚有 FRP 在塔桅结构、储液罐、管道和烟囱结构应用的报道。例如由美国 Delta 结构技术公司负责加固完成的 Alamo Quarry Market 烟囱采用了 FRP 的加固方法。除了作为 FRP 筋直接应用于建筑结构和维修加固外,预制 FRP 管还可能替代钢管而被应用于柱结构中,即在其核心中浇灌混凝土后而成为所谓的 FRP 约束混凝土柱。该类柱的特点是:利用 FRP 和混凝土两种材料在受力过程中的相互作用,即 FRP 对混凝土的约束作用使混凝土处于复杂应力状态之下,从而使混凝土的强度得以提高,塑性和韧性性能大为改善。同时,由于混凝土的存在可以避免或延缓 FRP 管过早地发生局部破坏,从而可以保证其材料性能的充分发挥;另外,在 FRP 约束混凝土柱的施工过程中,FRP 管还可以作为浇筑其核心混凝土的模板,与钢筋混凝土相比,可节省模板费用,加快施工速度。总之,通过 FRP 复合材料和混凝土组合而成为 FRP 约束混凝土柱,不仅可以弥补两种材料各自的缺点,而且能够充分发挥二者的优点,预计这类结构在实际工程中具有良好的应用前景。

#### (2) 高寒环境下免维护应用技术研究<sup>[1]</sup>

高寒环境下,基础设施建设与维护费用昂贵,建设周期过长。因此,对于再建或拟建的各种基础设施项目(主要是公路与铁路等交通项目),提高其建设质量,减少维护费用是一个重大的技术问题。用 FRP 筋代替钢筋,做成免维护复合材料混凝土结构,从而达到提高基础设施耐久性与延长寿命的目的。

## 四、FRP 在我国土木工程领域中的应用现状与展望

### 1. 应用现状

1997 年我国由国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心最早开展了碳纤维布补强加固钢筋混凝土构件的研究工作,并于 1998 年开始了实际的工程应用,之后,许多高校和科研单位也相继进行了 FRP 的研究,但主要是对 FRP 补强加固钢筋混凝土构件开展工作,并取得了许多成果,如外贴 FRP 增强了钢筋混凝土梁、板、柱的承载能力,提高了柱的延性;探讨剥离破坏的机理,对剥离破坏进行力学分析,提出了防剥离的措施;分别建立了考虑纤维构件二次受力的实用计算方法和数值计算方法<sup>[7]</sup>。

### 2. 展望<sup>[1,2,6]</sup>

21 世纪,随着 FRP 的国产化进程和材料技术的不断进步,FRP 无疑将会带来相当大的经济效益和社会效益,因此,研究这种新兴材料的设计原理和设计方法及有关施工技术具有十分重要的意义。为更好地应用这项新材料,还须进一步研究:

(1)加强对 FRP 预应力加固法的研究。为解决 FRP 加固构件的过早粘结破坏和充分发挥 FRP 的高强性能,FRP 预应力加固法的研究是非常重要的。

(2)FRP 复合材料施工质量问题控制。FRP 与混凝土共同组成组合结构,保证 FRP 和混凝土间的粘结和共同工作非常重要,为了保证设计和施工目的实现,必须制定相应的验收标准,尤其当采用 FRP 约束混凝土柱结构时,FRP 管内混凝土的施工有特殊性,即混凝土被外围 FRP 管所包覆,造成浇筑质量控制的难度。混凝土浇灌质量的好坏将直接

影响到 FRP 管约束混凝土构件设计目标的实现。正是由于混凝土被外围 FRP 管所包覆,也造成研究其浇筑质量控制问题的复杂性。如何根据 FRP 管约束混凝土的特点,提供既合理,且又便于实际操作的核心混凝土质量控制和检测办法显得突出和重要。

(3)自诊断智能纤维的开发。通过优化 FRP 复合材料,并利用结构材料中不同阶段的纤维材料的断裂特性和不同的导电性能,再配置先进的自感和测量系统,开发自诊断智能纤维及智能结构是具有重要意义的。

(4)建立我国有关 FRP,材料的检测评价系统,为保证工程应用提供科学依据。

(5)进一步对 FRP 加固技术做深入系统地研究,以使 FRP 加固技术规范化,并得到进一步推广应用。

(6)从环境条件和可持续发展出发,要求废旧结构材料能回收并再生利用。

### [参考文献]

- [1]朱健,童谷生,万军.浅谈 FRP 在土木工程中的应用研究[J].山西建筑,2006(3).
- [2]于青.FRPP 的特点及其在土木工程中的应用[J].哈尔滨建筑大学学报,2000(6).
- [3]张元凯,肖汝诚.FRPP 材料在大跨度桥梁结构中的应用展望[J].公路交通科技,2004(4).
- [4]周长东,黄承逵.FRPP 复合材料在国外土木工程中的应用[J].建筑技术,2002(11).
- [5]曾宪桃,车惠民.复合材料 FRPP 在桥梁工程中的应用及前景[J].桥梁建设,2000(2).
- [6]曹征,张俊海,曹小静.土木工程中 FRPP 的应用状况及发展动向[J].南通职业大学学报,2002(2).
- [7]朱梦君,刘宏伟.纤维增强复合材料(FRP)的研究与应用[J].淮海工学院学报,2002(3).

### Application of FRP in Civil Engineering

TIAN Hong-chen<sup>1</sup>, KANG Mei-lin<sup>2</sup>, MCUI Qian-xiang<sup>1</sup>

(1.College of Water Conservancy and Civil Eeg., Shandong Agri.Univ., Taian 271018, China;

2.Shangdong Water Polytechnic, Rizhao 276826, China)

Abstract: In this paper,the character of FRP will be introduced by comparing with the traditional building material;the application of FRP in the diverse aspects of civil engineering will be introduced either;at last the using situation and the trend of development in our country will be analyzed.

Key words: FRP;Fiber;Reinforced Plastic;Civil Engineering