

文章编号:1673-9469(2012)04-0024-04

## 新型 FRP 筋在混凝土结构中的应用及研究

王伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国建筑科学研究院 上海分院, 上海 200023; 2. 上海建科结构新技术工程有限公司, 上海 200023)

**摘要:** 钢筋锈蚀是影响混凝土结构耐久性的首要因素, 而纤维增强聚合物筋(FRP 筋)是一种具有高强、轻质、耐腐蚀、耐疲劳等特点的新型复合材料, 用其代替钢筋是解决钢筋锈蚀问题的新途径之一。本文对新型 FRP 筋的基本性能及特点进行分析, 并介绍了国内外有关 FRP 筋的最新研究进展。

**关键词:** 纤维塑料筋(FRP 筋); 力学特点; 粘结; 耐久性

**中图分类号:** TU524

**文献标识码:** A

### Application of new fiber reinforced plastics in concrete structures and its durability development

WANG Wei<sup>1,2</sup>

(1. China Academy of Building Research Shanghai Branch, Shanghai 200023, China; 2. Shanghai Advanced Technology of Building Construction Co, LTD, Shanghai 200023, China)

**Abstract:** Steel reinforcement corrosion is the chief influencing factor of durability of concrete structures. Fiber reinforced polymer(FRP) bars, a new compound material with high tensile strength, light weight, strong resistance to corrosion and fatigue, is a new solution to the corrosion of steel reinforcement in concrete if replaced by FRP bars. This paper discusses the basic behaviors and features of the FRP bars and describes the latest research and application progress of the FRP bars reinforced concrete.

**Key words:** Fiber reinforced polymer bars (FRP Bars); mechanical characteristic; bonding; durability

随着混凝土结构在土木工程中的应用, 人们逐步发现影响混凝土结构耐久性最主要因素是钢筋的锈蚀<sup>[1]</sup>。自上世纪 60 年代起, 国内外学者就开始研究防止钢筋锈蚀的措施, 经过近五十年的研究分析<sup>[2]</sup>, 研究者普遍认为采用新型的聚合物材料 FRP(Fiber Reinforced Polymer)筋替代钢筋是较为可行的方法。新型 FRP 筋<sup>[3]</sup>是由多股连续纤维采用基底材料胶合后, 经过挤压、拉拔等工艺制成。相对而言, 所谓的传统 FRP 筋, 主要是指我国在 20 世纪五、六十年代采用手糊工艺生产的 FRP 筋, 具有较低的抗拉强度和弹性模量, 文中以下 FRP 筋均是指新型 FRP 筋。

### 1 FRP 筋的生产工艺和分类

FRP 筋生产工艺类型主要包括编织型、绳索型、拉挤型等。一般认为, FRP 筋强度与纤维含量成正比, 但当纤维含量较高时, 采用挤压成型工艺生产起来也越困难。纤维种类、基体材料类型、纤维方向及其与基体间的界面构造决定了 FRP 筋的力学性能。为改善 FRP 筋的力学性能, 克服没有屈服点呈脆性破坏的缺点, 常常采用混杂配筋以同时达到增强和增韧的目的<sup>[4]</sup>。

FRP 筋一般按照纤维种类进行分类<sup>[5]</sup>, 常见的有 GFRP 筋、CFRP 筋和 AFRP 筋等三种, 目前,

GFRP 筋在土木工程中的应用最为广泛。按照配筋形式的不同,FRP 筋可分为光圆筋、螺纹筋、矩形截面筋以及工字型截面筋等四种,这也是国内外常用的 FRP 筋的形状。此外,也可直接将 FRP 筋制作成网板用于板的配筋。各种形式的 FRP 筋如图 1 所示。

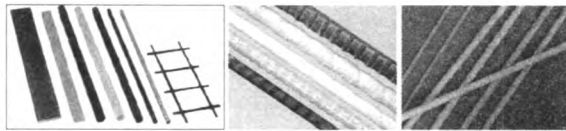


图1 各种形式的FRP筋

Fig.1 All kinds of FRP bars

## 2 FRP 筋的力学特性

不同的连续纤维化学成分不同,其力学性能差别很大,相应的 FRP 筋也表现出了差别很大的物理力学性质。常见的 FRP 筋的力学性能见表 1<sup>[5]</sup>。

表 1 FRP 筋的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of the FRP bars

纤维筋	密度 /t. m <sup>-3</sup>	弹性模量 /MPa	抗拉强度 /MPa	极限延伸率 /%
普通钢筋	7.85	2.1 × 10 <sup>5</sup>	400	10.0
高强钢丝	7.85	2.0 × 10 <sup>4</sup>	1 800	4.0
GFRP 筋	2.00	5.1 × 10 <sup>5</sup>	1 670	3.3
CFRP 筋	1.50	1.5 × 10 <sup>5</sup>	1 700	1.1
AFRP 筋	1.30	6.4 × 10 <sup>5</sup>	1 610	2.5

FRP 筋具有许多与传统结构材料所不同的特点<sup>[6]</sup>,FRP 筋的基本性能有:

1) 基本物理特性:FRP 筋质量较轻,这使得 FRP 筋混凝土结构自重减轻,也使得桥梁极限跨度有所提高;此外,FRP 筋的弹性模量低于钢筋的弹性模量,一般不超过钢材的 75%。

2) 基本力学特性:FRP 筋的抗拉强度较高,但 FRP 筋在受拉破坏前仍然呈现线性特征,也即 FRP 筋为一线弹性材料,并不具有延性,在用于抗震设计时需注意;FRP 筋抗压强度较低,约为抗拉强度的 1/3 ~ 1/2,这主要是因为 FRP 筋抗压强度主要取决于基体材料的抗压强度,而基体材料的强度较低;剪切强度较低是 FRP 筋的又一特点,FRP 筋抗剪强度通常不足其抗拉强度的 5% ~ 20%;FRP 筋都具有良好的疲劳性能。纤维的种类、表面形状、环境条件和加载频率等是影响 FRP 筋的疲劳强度的主要因素。

## 3 在混凝土结构中的应用

### 3.1 国外研究和应用进展<sup>[6]</sup>

1941,美国人 Jackson 首次将 GFRP 筋运用到混凝土结构中,并申请了专利。20 世纪 60 年代,为解决恶劣气候下的钢筋混凝土结构耐久性问题,CFRP 筋首次被美国 Marshall. Vega 公司作为增强筋用于混凝土结构中,这是对 CFRP 研究和应用的开始。FRP 加强筋自 20 世纪 80 年代初起逐渐应用在有特殊性能要求的结构物中,尤其是受有严重化学侵蚀的结构物。美国 ACI440 委员会于 2001 年提出了 FRP 筋混凝土结构的设计和施工准则(ACI 440. R - 01)。随后,ACI440 委员会根据各国学者的最新研究成果,不断对 ACI 440. R 准则进行修正,日前 ACI 440. R - 07 已投入使用。

20 世纪 70 年代,日本开始 FRP 筋增强混凝土的研究,生产工艺采用试配法。1988 年,日本首次将 CFRP 筋应用在一座 7 m 宽 5.76 m 跨的公路桥梁中应用了 CFRP 预应力筋。1990 年又应用 AFRP 筋修建了一座长 54.5 m,宽 2.1 m 的茨城悬带桥。

1951 年,欧洲学者 Rubinsky. I. A. 和 Rubinsky. A. 首次研究了将 GFRP 筋作为预应力筋应用到混凝土结构中的受力性能。20 世纪 70 年代,德国 stuttgart 大学的 Rehm 教授的研究成果表明,GFRP 筋可以作为预应力筋用于混凝土结构中。1980 年,德国的 Muster 用 GFRP 筋修建了一座人行桥,并于 1986 年修建了世界上第一座两跨 GFRP 预应力混凝土公路桥。

### 3.2 国内研究进展<sup>[7]</sup>

国内对 FRP 筋以及 FRP 筋混凝土结构的研究虽然起步较晚,但是最近国内关于 FRP 筋的研究越来越广泛,并得到一些具有远见卓识的企业家的关注和大力支持,使得我国在该领域的基础研究从开始就沿着“高起点发展,高水平推进,高效益应用”的方针迅速发展。1995 年由水利部专门立项,同济大学薛伟辰教授在国内首次开展了 FRP 筋的研究与应用。1997 年,薛伟辰教授在河海大学完成国内首例混凝土结构中配置新型配筋 FRP 筋的试验研究。郑州大学高丹盈教授等根据拉拔试验和梁式试验结果推导出 FRP 筋锚固长度

的计算模型,该模型提出了影响 FRP 筋与混凝土粘结性能的影响参数,其中包括混凝土强度、锚固长度、FRP 筋直径、混凝土浇筑深度等。

在上述研究的基础上,国家和专业部门已颁布多部相关规程,主要包括《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS146:2003)、《纤维增强复合材料加固混凝土结构技术规程》(DG/TJ08-012-2002 J10158-20)、《结构加固修复用碳纤维片材》(JG/T167-2004)和国家标准《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》(GB50608-2010)。

#### 4 FRP 筋耐久性研究进展

研究者对 FRP 筋在土木工程中的应用开展了一系列研究,而对 FRP 筋耐久性的研究较少。国外学者在上个世纪 90 年代中期以后,才开始进行 FRP 筋在不利环境下的力学性能退化规律的研究,并取得相应的进展;国内研究者对 FRP 筋的耐久性才刚刚开始起步。

##### 4.1 酸碱盐环境下

张新越,欧进萍<sup>[3]</sup>等对自制的 FRP 筋产品进行酸碱盐介质腐蚀试验,结果表明,玻璃纤维筋(GFRP 筋)具有很好的耐酸、盐性能,但耐碱性相对较差。碳纤维筋(CFRP 筋)具有很好的耐酸、耐碱、耐盐溶液腐蚀的性能,可以很好的满足混凝土结构耐久性的要求,但碳纤维和环氧树脂的界面比较薄弱,没有玻璃纤维和环氧树脂的界面密实和坚固。Taketo Uomoto<sup>[8]</sup>等对酸性环境下 FRP 筋的耐久性进行研究,结果表明,当温度达到 80℃ 时,才能观察到酸性环境下 FRP 筋性能退化,而在 40℃ 以下,FRP 筋一般不会发生退化现象。可见,FRP 筋的抗酸性很强。

##### 4.2 冻融循环试验

Renée Cusson 和 Yunping Xi<sup>[9]</sup>开展了冻融环境下 FRP 筋耐久性试验,试件数量为 105 根,冻融循环时间为 750h,温度在 -29℃ ~ 20℃ 之间,经历 250 次冻融循环后,结果表明,FRP 筋的抗拉强度、弹性模量、极限应变及水平剪切强度等均有不同程度变化,影响程度取决于冻融循环的次数及温度的变化幅度。

欧进萍、张新越等对 GFRP 筋和 CFRP 筋进行了冻融试验<sup>[3]</sup>,冻融循环温度控制在 -17.8℃ -

7℃ 之间,试验结果表明:在经历 300 次冻融循环后,GFRP 筋抗拉强度下降 9.4%,弹性模量上升 5.79%,CFRP 筋的抗拉强度上升 2.16%,弹性模量上升 5.38%。

##### 4.3 紫外线辐射环境下

Kato<sup>[10]</sup>等人对紫外线辐射环境下 FRP 筋耐久性进行了加速试验。试验温度为 26℃,紫外线照射强度 0.2MJ/m<sup>2</sup>/h。试验结果表明,除 CFRP 筋性能基本没有发生变化外,GFRP 筋和 AFRP 筋的抗拉强度均有不同程度的下降。Tomosawa 和 Nakatsuji<sup>[11]</sup>对浸泡在海水环境中的 13 种不同类型的 FRP 筋进行耐久性试验,结果发现,暴露在热带地区的阳光下 2 年后 FRP 筋各项性能并没有发生退化现象。

##### 4.4 高温和火灾情况下

同济大学的周长东等<sup>[12]</sup>重点对火灾高温下的 GFRP 筋的力学性能进行了研究,研究结果表明,当环境温度高于 270℃ 时,GFRP 筋的抗拉强度会急剧下降;在温度低于 190℃ 时,GFRP 筋的抗拉强度可以恢复到室温时的强度,在温度高于 190℃ 时,GFRP 筋的抗拉强度则不能恢复到室温时的强度,这主要是与 GFRP 筋的基体材料性能有关。

#### 5 结束语

FRP 筋具有轻质、高强,耐腐蚀性好的特点,符合土木工程用高性能材料的发展趋势。为了 FRP 筋能够更好地应用工程实际,仍需要对以下几点问题做进一步的研究:(1)为使 FRP 筋能够更好地应用于工程实际,应对其作为预应力筋时锚固体系做进一步研究。(2)应对 FRP 筋耐久性做进一步的研究,尤其是研究预测 FRP 筋耐久年限的理论模型。(3)重视 FRP 筋生产工艺研究,使其产品价格适用于工程结构,并加快改性树脂和改性纤维的研究。

##### 参考文献:

- [1] 张誉,蒋利学,张伟平,等.混凝土结构耐久性概论[M].上海:上海科技出版社,2003.
- [2] 薛伟辰,康清梁.纤维塑料筋 FRP 在混凝土结构中的应用[J].工业建筑,1999,29(2):19-21.
- [3] 张新越,欧进萍.FRPP 筋酸碱盐介质腐蚀与冻融耐久性试验研究[J].武汉理工大学学报,2007,29(1):33

- 46.

- [4] 冯鹏,叶列平. FRP 材料及结构在桥梁工程中的新应用[A]. 第十五届全国桥梁学术会议论文集[C]. 上海:同济大学出版社,2002:555-560.
- [5] 朱虹,钱洋. 工程结构用 FRP 筋的力学性能[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(3):26-31.
- [6] 钱锐,茅卫兵. 国外对混凝土结构中新型材料 FRP 筋的研究应用[J]. 江苏建筑,2001(1):28-33.
- [7] 吕志涛. 高性能材料 FRP 应用与结构工程创新[J]. 建筑工程与工程学报,2005,22(1):1-5.
- [8] TAKETO UOMOTO, HIROSHI MUTSUYOSHI, FUTOSHI KATSUKI, et al. Use of Fiber reinforced polymer composites as reinforcing material for concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002: 193-209.
- [9] RENéE CUSSON, YUN PING XI. The behavior of fiber reinforced polymer reinforcement in low temperature environmental climates[R]. Report No CDOT - DTD - R, University of Colorado Boulder, USA
- [10] KATO Y, YAMAGUCHI T, NISHIMURA T, et al. Computational Model for Deterioration of Aramid Fiber by Ultraviolet Rays[A]. Non - Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures; Proceedings of the Third International Symposium [C]. 1997(1): 163-170.
- [11] TOMOSAWA F, NKASTSUJI T. Evaluation of ACM Reinforcement Durability By Exposure Test[A]. Non - Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures; Proceedings of the Third International Symposium [C]., 1997(1): 139-146.
- [12] 周长东,吕西林,金叶. 火灾高温下玻璃纤维筋的力学性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 23-28.

(责任编辑 刘存英)

(上接第15页)设计时应使用高强混凝土和较高强度的内层钢管及较低强度的外层钢管。

### 3 结论

1)中空夹层钢管混凝土形式可以有效提高构件的耐火极限,在火荷载下混凝土和内层钢管的温度增长率低于外层钢管。影响中空夹层钢管混凝土柱耐火时间的因素有 CFDST 构件的长细比、内外层钢管的强度和混凝土的强度等级以及空心率。

2)在进行中空夹层钢管混凝土组合截面柱的防火设计时应使用高强混凝土和较高强度的内层钢管及较低强度的外层钢管。

### 参考文献:

- [1] 李国强,韩林海. 钢结构及钢-混凝土组合结构防火设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [2] 韩金生. 钢管混凝土柱防火性能的试验研究[D]. 南京:东南大学,2006.
- [3] S. LAMONT, MCGILLIE, A. S. Usmani composite steel - framed structures in fire with protected and unprotected edge column [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006(10): 1-13.
- [4] 余敏,查晓雄. 空心钢管混凝土的防火性能研究[J]. 工业建筑, 2011,41(6): 36-42
- [5] 孙丙楠,曾祺. 中空夹层钢管混凝土轴心受压的性能研究[D]. 浙江大学,2009.
- [6] KODUR V K R, LATOUR J C. Experimental studies on the fire resistance of hollow steel columns filled with high-strength concrete[R]. Fire research program institute for research in construction, Canada; National Research Council,2005.
- [7] EC4:94, Eurocode4: Design of composite steel concrete structures:94
- [8] 杨涛. 钢-混凝土组合梁疲劳性能研究进展[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2010,27(1):16-19
- [9] 查晓雄,钟善桐,徐国林. 空心钢管混凝土结构技术规范理解与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [10] 李华,黎立云. 钢管混凝土的非线性有限元分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2010,27(1): 25-27

(责任编辑 刘存英)