

Theoretical Analysis of Reinforcement of FRP New Materials under Large Span Structure

YaoYing Yang

School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

Abstract: In recent years, many bridges have been built and put into operation. Many problems have appeared in the operation. Therefore, the strengthening of bridges is particularly important. This article mainly introduces the composition and performance of FRP materials, and the application of FRP materials in reinforcement technology. The role of the new FRP reinforcement technology in reinforced concrete beams and columns has also been analyzed, particularly in terms of resistance to bending, shear resistance, and durability. It also explains some of the existing technical, construction and management issues. And how should we deal with and solve these problems in order to achieve a better grasp of this new type of reinforcement technology.

Keywords: FRP reinforcement technology; Durability; Bending resistance; Shear resistance

大跨度结构体系下 FRP 新材料的加固理论分析

杨曜瑛

重庆交通大学土木工程学院, 重庆, 中国, 400074

摘要: 近年来许多建设完成的桥梁在投入运行中出现了很多的问题, 所以桥梁的加固显得尤为的重要。本文主要介绍 FRP 材料的组成和性能, FRP 材料在加固技术中的应用。新的 FRP 加固技术在钢筋混凝土梁和柱中的作用也进行了分析, 特别是在抗弯曲性, 抗剪切性, 耐用性等方面。还说明了现在存在的一些技术、施工与管理方面的问题。并且针对这些问题我们应该怎么去处理和解决, 以便达到更好的掌握这项新型加固技术的目的。

关键词: FRP 加固技术; 耐用性; 抗弯曲性; 抗剪切性

1 引言

十年前, FRP 材料玻璃钢增强技术还处于起步阶段, 缺乏相关的技术研究以及世界各地的基础设施。对增强, 修复和改造的巨大需求促进了玻璃钢新材料的研究^[1]。玻璃钢材料的优点如耐腐蚀性, 重量轻, 易于施工, 正在推动玻璃钢增强技术的发展。现在我国在 FRP 加固技术方面已经有了很多突破性意义的研究, 尤其是已经存在许多的 FRP 加固工程应用实例超过了设计理论的发展, 这对土木工程领域的高科技应用来说是独具特色的。现在, 与 FRP 加固技术有关的

大部分研究成果都是钢筋混凝土结构。并建立更加合理和完善的加固设计方法, 以确保该技术越来越安全和经济。

2 FRP 材料介绍

FRP 是一种高性能材料, 通过将纤维材料和树脂基体材料以一定的比率混合, 然后进行特殊的模具挤出和拉伸而形成。常用的纤维类型包括碳纤维, 玻璃纤维和芳纶纤维。根据纤维的类型, FRP 材料通常分为碳纤维增强塑料 (CFRP) 和玻璃纤维增强塑料 (GFRP)、芳纶纤维加筋塑料 (AFRP) 3 种^[1]

Table 1. Comparison of mechanical properties of CFRP, GFRP and AFRP

表 1. CFRP、GFRP、AFRP 的力学性能比较

单向纤维复合材料	纤维含量 (重量百分比%)	密度 (Kg/m^3)	纵向拉伸模量 (GPa)	抗拉强度 (MPa)
碳纤维/环氧树脂 CFRP	65~75	1600~1900	120~250	1200~2250

玻璃纤维/聚酯树脂 GFRP	50~80	1600~2000	20~55	400~1800
芳纶纤维/环氧树脂 AFRP	60~70	1050~1250	40~125	1000~1800

从表中的数据可以看出 FRP 强度和弹性模量变化非常大, 需要注意的是一种特定的产品尤其是纤维含量和表中有差别时性能的指标可能超出表中的范围。

2.1 FRP 材料性质

玻璃钢材料在理解和掌握玻璃钢材料的优缺点方面与传统结构材料有很大不同。

特点: (1) 有很高的比强度。(2) 良好的耐腐蚀性可以在酸, 碱, 氯化物和潮湿环境中长期使用。

(3) 具有很好的可设计性。(4) 较好的弹性性能应力 - 应变曲线靠近线弹性, 在大的变形发生后可恢复原状, 而且塑性变形较小, 有利于结构意外超载后的变形恢复(5) FRP 产品能较好的用于在工厂生产, 交付现场并在现场安装的工业生产过程。(6) FRP 是脆性材料。

3 FRP 加固技术分析

首先, FRP 加固技术是 20 世纪以来在土木工程中使用的一种新型加固和加固技术。常采用复合材料有碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维这些材料的强度基本上都是普通钢材的 10 倍左右因此具有高强度, 还具有重量轻, 耐腐蚀和耐用等特点。而且, 当用于加固时, 其层厚仅为约 2mm, 因此构件横截面尺寸几乎不增加。该增强技术采用碳纤维, 玻璃纤维和芳纶纤维中的一种沿同一方向排列, 并在常温下用环氧树脂粘结在混凝土结构的表面。由于它与混凝土结构表面的紧密粘合, 使得两者作为一个新的整体联合力量, 所以这种加固方法是一种非常简单和优秀的加固方法。

3.1 FRP 用于加固钢筋混凝土梁

目前, 国内外对 FRP 加固钢筋混凝土梁进行了较多的实验和理论研究, 在国内也对此进行了研究: ①当 FRP 材料用于弯曲钢筋时, FRP 材料粘贴梁的正常截面的屈服荷载和极限荷载增加而且极限荷载的增加更加明显。主要表现在: 一方面, FRP 材料可充分发挥其高强度特性, 继续承受负荷。另一方面, 它也可以通过限制裂缝的发展起到加强作用。②梁的变形明显减小, 这表明在混凝土中出现斜裂缝后, FRP 材料

可作为桁架模型腹式支撑来提高钢筋混凝土梁的抗剪强度, 从而提高抗剪承载力。另一方面, 通过限制斜裂缝的发展, 可以使用抗剪钢筋在初始弯矩作用下, FRP 材料的应变与钢筋的应变之间存在一定的滞后, 则 FRP 材料具有增加但不显著的屈服载荷。当初始弯矩小时, 极限承载力影响不大。但是, 当其达到一定值时, 随着初始弯矩增加, 极限承载力显著下降。实际上, 加强件中在初始弯矩。应首先计算混凝土和钢筋在构件横截面上的应力, 然后根据扁平截面假设合理确定 FRP 材料的极限强度。然后, 参照规范中梁的极限承载力设计方法, 可以在动载条件下更准确地估算 FRP 材料加固梁的极限承载力。③由于 FRP 材料对裂纹的限制作用, 滞后曲线的外线仍然近似为直线, 表示光束的强度。刚度几乎没有下降也表明 FRP 加固梁具有良好的抗疲劳性。其中梁的加固我们主要考虑这几个方面:

3.1.1 FRP 加固 RC 梁的弯曲行为

采用环氧树脂将 FRP 复合板粘贴到构件的拉伸部位, 纤维方向与主应力方向平行, 可增强 RC 梁的抗弯强度。如果纤维方向垂直于裂纹方向, 则与其他纤维方向相比, 部件的强度和刚度将大大增加。复合玻璃纤维 GFRP 可以提高 40% 的强度, 而碳纤维增强复合材料 CFRP 可以提高 200%。除纤维类型外, 还有其他因素也会影响钢筋混凝土梁的弯曲性能: FRP 的弹性模量, 重心相对于中性轴的位置, 片材的宽度和长度, 拉伸和抗剪加强的量, 玻璃钢复合层, 承载水平, 玻璃钢结构, 混凝土强度和覆层, 损坏和装载条件等。

3.1.2 FRP 加固 RC 梁的剪切行为

使用环氧树脂将 FRP 复合材料粘合到 RC 构件上。当使用各种 FRP 复合层压板来加固裂纹和无裂纹 RC 梁用于各种测试和分析时, 可以观察到, 在用 FRP 复合层压板加固后, 原始梁的剪切强度可以增加 [7] 60% 至 120%, 纤维方向可以垂直于剪切裂缝。对钢筋混凝土梁总剪力的贡献取决于以下参数: 复合材料织物的表面状态, 抗剪强化率, 主方向钢筋和抗剪钢筋的总量, 剪切深度与深度的比值, FRP 复合材料

的强度, FRP 复合材料的层数, 包装方案以及复合材料板材厚度与横梁截面高度的比率。包裹是钢筋混凝土梁最有效的补强材料, 可以将剪切强度提高 119%。

3.1.3 FRP 加固 RC 梁的耐久性

温度的季节性和季节性变化引起冻融循环, 以及混凝土和 FRP 复合材料之间不同的热膨胀率^[8]。这将导致复合板的过早分离并最终导致合并系统的失效。横截面的横向特性, 如横向拉伸, 抗压强度和面内剪切强度受环境因素的强烈影响, 但纤维对环境因素不太敏感。只有考虑不同类型的纤维, 我们才能了解环境因素对 FRP 材料在湿, 干, 冷冻和融化周期不同方面的影响。但是, 当强化系统受高温影响时, 可观察到强度损失为 80% 至 90%。

3.1.4 FRP 的粘结长度

由于从混凝土表面剥离的 FRP 复合片材会导致混凝土结构的破坏, 所以外部 FRP 增强复合材料对混凝土基材的粘附性是增强效果的关键因素。FRP 复合材料与混凝土表面的粘合还取决于几个因素: 混凝土表面条件如喷水或喷砂, 混凝土抗压强度和有效粘结长度, 纤维刚度和应力分布状态。为了避免玻璃钢复合板从混凝土表面过早失效, 许多实验研究在试样的端部采用了锚栓或 U 形纤维结构。这种技术增加了延展性, 但由于地脚螺栓的存在, 混凝土的初始状态被破坏。这种情况可以通过使用提供结构的延展性和抗剪强度的 U 形结构来避免。

计算粘结长度的经验公式^[11]:

$$L = e^{6.13 - 0.58 \ln E_p t_p} \quad (1)$$

式中: E_p —外贴板的弹性模量, MPa

t_p —外贴板的厚度, mm

3.2 FRP 用于加固钢筋混凝土柱

FRP 玻璃钢钢筋混凝土柱大部分用纤维布缠绕在圆柱体上, 使混凝土处于三向应力状态^[6]。由于玻璃钢材料抗拉强度极高, 混凝土粘结性能较好, 玻璃钢布能有效地约束混凝土, 大大提高了混凝土的承载能力和延性。国内对 FRP 加固柱的研究主要集中在两个方面: 即 FRP 约束短柱的轴向承载力试验和 FRP 约束柱的抗震性能试验包括伪静力试验, 拟动力试验和振动台试验等, 其中 CFRP 材料最多。GFRP 研究资料相对较少。AFRP 仍处于混凝土柱修补和加固的开发和

试用阶段。FRP 纤维沿柱子环向缠绕。环氧树脂用于粘结 FRP 和旧混凝土。总的来说, 用 FRP 修补和加固柱结构的关键问题是确保 FRP 和混凝土的有效粘结。由于玻璃钢限制, 对混凝土性能的变化进行合理估算也是必要的。同时, 随着玻璃钢板层数的增加, 大偏压和小偏压柱的承载能力都有了很大的提高。柱承受弯曲变形的能力也增加。这对于大偏压柱尤其如此, 其中 FRP 板的添加有助于钢筋参与混凝土的张力区中的张力。在压力区, 它可以有效地抑制混凝土在压缩区的侧向变形。增加混凝土的强度, 使柱的抗压极限承载力增加。充分发挥钢筋的塑性变形性能, 提高钢管的延性。此外, 在相同的负载水平下, 色谱柱用玻璃钢材料加固。减少横向偏转, 这将减少偏置柱的二次矩。主要从以下几个方面考虑:

3.2.1 FRP 加固 RC 柱的轴向行为

从强度和延展性的角度研究了不同 FRP 复合材料表层混凝土柱的轴向行为。由碳纤维, 芳纶和玻璃纤维制成的针织 FRP 复合织物已成功应用于日本和美国地震造成的损坏桥墩修复。影响约束柱系统的各种参数包括混凝土强度, 纵横比, 纵向钢筋箍筋, 钢筋腐蚀, 混凝土损伤, 纤维类型, 缠绕角度, 缠绕厚度, 长细比, 混凝土(可塑性)的变形程度, 涂层研究人员分析了横向刚度焓, 混凝土膨胀率, 几何形状和加载缺陷。

3.2.2 FRP 加固 RC 柱的抗震行为

大的横向周期性地震力会损坏混凝土和肋骨的强度, 导致柱子过早失效。已经发生地震的柱式构件的修理是最近和广泛的任务, 也是最具挑战性和复杂性的项目之一。由于玻璃钢包裹材料的约束, 翻新后的钢筋混凝土柱的抗震性能得到了很大的提高。已经观察到, 这种技术可以增加 RC 柱结构的延展性和强度。此外, 在较大的反向循环负载下修复的气缸显示出比初始气缸更低的劣化。所需的外部加固程度取决于轴向载荷和损伤程度。

3.2.3 FRP 加固 RC 柱的延展性

诸如冻结和融化等环境条件可能会影响受限材料 FRP 复合材料, 受限混凝土以及两者之间的胶合胶带。各种环境条件通常会导致材料的强度和刚度降低, 不同形式的损伤严重。据观察: 湿干环境对 CFRP 复合材料包裹试件的强度和延性影响不大; 另一方面, GFRP 复合材料包裹试件的强度将降低 10%。

然而, CFRP 和 GFRP 复合材料包裹的试样也易受冻融循环影响。其他人则进行了使用不同类型纤维的实验来加强受腐蚀损坏的钢筋混凝土圆筒并得出结论: 它的承载能力可提高近 20%, 但由于扶强材的腐蚀损伤, 钢筋系统降低了柱的延性。

4 FRP 材料加固技术存在的问题

FRP 加固技术在混凝土结构加固改造中具有很大的发展空间和应用前景。

在单种高性能 FRP 复合材料的研究和应用的基础上, 重点强调了不同类型高性能 FRP 复合材料的改性和复合问题。其目的是为了克服材料本身的弱点, 充分发挥其性能, 使其更适用于现代化增强工程的特点, 满足实际需要。

为了更好地利用高强高性能 FRP 的特点, 预应力法更加注重结构加固。进一步开展预应力 FRP 施工研究。使加固设计更灵活, 以满足更高的加固和加固要求。

本地化玻璃钢材料以降低工程成本迫在眉睫。另外, 高性能玻璃钢复合材料如玻璃钢棒材, 电缆, 棒材等关键材料和设备技术问题的开发也必须得到解决。

标准和程序的不完善将限制我国 FRP 加固技术的发展。进行材料生产, 使用, 检验, 加固设计, 工程建设和验收。

References (参考文献)

- [1] 成香莉,肖祯雁,周森.FRP 加固混凝土梁研究与应用的几个问题[J]. 山西建筑, 2005, 31(18): 48—49.
- [2] 邓宗才. FRP 加固已腐蚀混凝土梁的抗疲劳耐久性研究[J]. 国防交通工程与技术, 2008, (1): 22—25.
- [3] 汪晓明, 曹凤华.纤维增强复合材料 (FRP)加固混凝土梁施工技巧[J], 建筑施工, 2004,26 (1): 60-65
- [4] 肖建庄, 于海生.复合材料加固混凝土结构耐久性研究[J].玻璃钢/复合材料, 2003,3 (2):16-25
- [5] 刘沐宇, 李开兵.CFRP 布加固损伤混凝土梁的疲劳性试验[J].武汉理工大学学报, 2004,26 (4): 52-55
- [6] 王文炜, 李果.纤维增强塑料 (FRP)在混凝土结构中的研究与应用[J].混凝土 2010(10):37-42
- [7] 吴刚.FRP 加固钢筋混凝土结构的实验研究与理论分析[D].东南大学,2002
- [8] 任慧韬, 胡安妮.冻融循环对 FRP 材料玻璃纤维加固混凝土梁受力性能影响[J], 土木工程学报, 2014, 37 (4), 104-110
- [9] 张坦贤.FRP 加固结构工程中若干问题的研究[D].同济大学,2004,40-52
- [10] Spadea,GBencardino,F.and Swamy,R.N.(2000)“Optimizing the performance characteristics of beams strengthened with BondedCFRP lami-nates”MaterialsandStructures,Vol.33,pp. 120-126.
- [11] Smith,S.T. And Teng,J.G.(2003) “Shear-bending interaction in debond-ing failures of FRP-plated RC beams”,Advances in Structural Engineering,Vol.6,No.3,pp.183-200
- [12] Rahimi,H.and Hutchinson A.(2011) “Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates”,Journal of Composites for Construction,ASCE,Vol.5,No.1,pp.44-57.
- [13] Lam,L.and Teng,J.G.(2010) “Strength of RC cantilever slabs bonded with GFRP strips”,Journal of Composites for Construction,ASCE,Vol.5,No.4,pp.221-227
- [14] Neale,K.W.(2012) “FRPs for structural rehabilitation:a survey of recent progress”,Progress in Structural Engineering and Materials,Vol.2,pp.133-138
- [15] Khaled A Soudki,Ahmad A Rteil, Rania Al-Hammoud. Fatigue strength of fiber reinforced polymer repaired beamssubjected to mild corrosion [J]. Can.J.Civil. Eng, 2007, 34: 414—421.