

杨勇新 李庆伟 著

预应力碳纤维布 加固混凝土结构技术

Technology of Strengthening Concrete
Structures with Prestressed Carbon Fiber
Reinforced Polymer Sheets



化学工业出版社

预应力碳纤维布 加固混凝土结构技术

**Technology of Strengthening Concrete
Structures with Prestressed Carbon Fiber
Reinforced Polymer Sheets**

杨勇新



化学工业出版社

· 北京 ·

前言

► FOREWORD

碳纤维布 (Carbon Fiber Reinforced Sheets) 加固混凝土结构技术是近年来国际上土木工程与高性能材料工程相结合而发展起来的一种日益成熟的新技术, 在此基础上开发完善的预应力碳纤维布加固混凝土结构技术则是一种加固效率更高、碳纤维布的强度利用率更高同时可提高构件刚度和抗裂性能 (预应力的施加将减少构件挠度或形成反拱) 的新型加固技术。

作者在承担国家“九五”重点科技攻关课题“碳纤维材料加固混凝土结构材料开发研究与应用”、“十五”863 计划项目“高性能低成本复合材料在现代土木工程中应用的关键技术与材料研究开发”以及“十一五”863 计划项目“受损建筑物加固与修复材料关键技术研究与应用”的研究工作过程中, 先后在中冶集团建筑研究总院、清华大学等单位持续开展了对预应力碳纤维布加固混凝土结构技术的研究, 完成了多批次结构试验并进行了较为详细的理论分析, 本书即是这些工作的成果归纳和总结, 目的是将预应力碳纤维布加固混凝土结构技术系统地介绍给广大同行, 为共同推进碳纤维等新型高性能材料及其结构加固技术在建筑领域的发展做出努力。

本书主要介绍预应力碳纤维布加固混凝土结构技术所涉及的专有设备、预应力损失、受弯承载能力、锚固方式等关键技术内容, 以及在此基础上建立的预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件设计方法, 介绍了预应力碳纤维布加固混凝土结构的施工工艺特征与要求, 最后简要介绍了相关工程应用情况。

本书相关的研究工作得到了清华大学叶列平教授，中冶集团岳清瑞教授的大力支持和帮助，同时得到了张清海、张伟、庄江波、沙吾列提等研究生和实验室工作人员的帮助，另外，黄玉亭、顾习峰、张学等研究生绘制了部分图例，在此一并致以衷心的感谢。

本书可以供从事 FRP 材料及其加固修复建筑结构应用技术的工程技术人员、学生等参考。

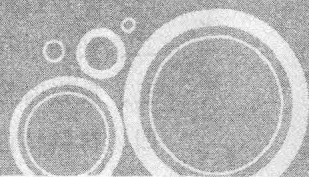
限于作者的经验和水平，不妥与疏漏在所难免，请各位读者批评指正。

作者

2010 年 7 月

目 录

► CONTENTS



第一章 绪论	1
第一节 技术背景	2
第二节 研究现状	7
一、关于预应力施加方法	7
二、关于承载能力	11
三、关于张拉控制应力	12
四、关于端部锚固	14
五、关于预应力损失	15
六、关于疲劳性能	16
第三节 应用前景	17
第二章 碳纤维布张拉设备	19
第一节 专有张拉设备	20
第二节 其他张拉装置	22
第三章 预应力损失	25
第一节 预应力损失的分类	26
一、张拉过程中的损失	26
二、黏结过程中的损失	27
三、放张时的损失	28
四、材料蠕变松弛造成的长期损失	28
第二节 预应力损失的实验	29

一、张拉过程预应力损失测量	29
二、粘贴过程预应力损失测量	35
三、放张时预应力损失测量	37
四、材料特性造成的长期损失测量	59
第三节 放张时预应力损失分析	62
一、放张时预应力损失模型	62
二、放张时预应力损失的理论分析	63
三、预应力传递面积	66
第四节 预应力损失计算	70
第五节 减少预应力损失的措施	72
一、张拉设备	72
二、施工工艺	72
三、材料要求	72
第四章 受弯承载力	73
第一节 实验研究	74
一、实验设计	74
二、实验过程与现象	88
三、结果分析	96
第二节 抗弯加固正截面承载力计算	117
一、预应力碳纤维布加固混凝土梁的力学分析	118
二、正截面承载力计算方法	123
三、计算结果与实验结果的对比分析	137
第三节 数值模拟	140
一、预应力碳纤维布加固混凝土梁的有限元模拟	140
二、预应力碳纤维布加固混凝土梁的神经网络预测	164
第五章 锚固方法	175
第一节 锚固方式	176

一、端部 U 形箍锚固	176
二、中部 U 形箍锚固	179
三、U 形箍布置原则	182
四、U 形箍对梁破坏模式的影响	187
第二节 预应力碳纤维布与混凝土黏结锚固特征	191
一、界面黏结性能的变化	191
二、黏结剪应力分布	191
第六章 设计方法	197
第一节 设计公式	198
一、基本假定	198
二、使用阶段的应力计算	198
三、极限承载力的计算	200
四、加固混凝土 T 形梁设计公式	201
第二节 构造要求	203
一、U 形箍锚固的布置原则	203
二、其他构造措施	204
第三节 设计实例	204
一、试选 1	205
二、试选 2	206
第七章 施工方法	209
第一节 材料的选择	210
一、测试方法	210
二、性能分析	210
三、粘贴材料选择	211
第二节 施工工艺流程	212
一、表面处理	213
二、张拉碳纤维布	213

三、粘贴碳纤维布.....	213
四、放张碳纤维布.....	214
第三节 质量控制要点.....	214
第四节 验收要点.....	216
附录 工程实例	217
一、国内工程应用.....	218
二、国外工程应用.....	219
参考文献	221

第一章

绪论

第一节 技术背景

由于达到或超过使用年限、使用功能改变、自然灾害作用、设计失误、施工质量有问题、使用管理不当等因素的影响,我国存在大量的既有建(构)筑物需要进行加固和修复。在传统加固方法的基础上,研究开发新的、更加有效的加固技术成为国内外加固修复领域研究学者的工作重点。近年来纤维增强塑料(Fiber Reinforced Polymer or Plastic, 以下简称为 FRP)以其轻质高强、耐腐蚀、施工方便的独特优点引起了国内外研究学者的注意,并很快成为土木工程加固修复领域的研究与应用热点^[1~2]。

FRP 复合材料加固混凝土技术最早产生于瑞士联邦实验室,1982 年瑞典学者 Meier^[3]应用 FRP 板代替钢板,采用树脂黏结加固了 Ebach 桥,这被看做是加固工艺上一项很有前途的改进,开创了 FRP 复合材料应用于土木工程界的先河。随后 FRP 复合材料在日本、美国、欧洲等开始了大量的实验研究和工程应用。日本自 20 世纪 80 年代末开始着手研究碳纤维片材加固混凝土结构技术,于 1999 年 3 月成立了 FRP 加固委员会,并颁布了《应用 FRP 加固修复混凝土结构标准草案》,行业标准和施工指南也相继推出^[4]。1995 年日本阪神大地震后,碳纤维加固技术在日本得到迅猛发展,广泛应用于土木建筑工程中的混凝土结构加固,取得良好的经济效益及社会效益^[5]。美国于 1991 年成立了 ACI440 委员会,对纤维增强复合材料(FRP)加固混凝土结构技术进行研究,并于 2000 年颁布了《外部粘贴 FRP 加固混凝土结构的设计与施工技术标准》^[6]。1993 年 ACI 在加拿大主办了第一届国际 FRP 专题学术会议,此后每两年举办一次 FRP 混凝土国际学术研讨会,极大地推进了 FRP 加固结构技术在土木工程加固修复领域的发展。

1997 年,国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心(中冶

集团建筑研究总院)在我国率先开始对碳纤维布加固混凝土结构技术进行研究开发。随后国内其他科研院所及高校相继对其试验技术、各种加固形式的受力性能以及相应计算方法进行了大量的研究,取得了丰富的科研成果^[2]。

2000年6月,在北京成立了中国土木工程学会纤维增强塑料(FRP)及工程应用专业委员会,负责组织和指导国内FRP材料加固工程结构技术的研究并开展了相关规范标准的编制工作。2003年5月1日颁布实施的《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS146:2003)是我国第一部关于碳纤维布加固混凝土结构技术的标准,随后,《结构加固用碳纤维片材》和《结构加固修复用粘贴树脂》等建筑工业行业标准以及《结构加固用芳纶布》等国家标准陆续颁布实施,国家标准《高性能纤维复合材料应用技术规范》也在报批过程中,这些标准规范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、制品、工程设计、施工、质量检验与管理等各个方面,形成了我国自己的基础设施建设工程应用FRP材料标准规范体系^[7]。

目前碳纤维布加固混凝土结构技术的主要研究成果可以归纳为以下几个方面:

(1) 加固材料与制品、相关设备等开发 包括各种纤维及其混杂纤维布、纤维板、纤维增强复合材料格栅(网格)、纤维增强复合材料筋(索)、纤维增强复合材料型材及构件等纤维材料制品;预应力张拉设备、各个环节下使用的配套黏结树脂、特殊施工工具等。

(2) 混凝土梁、板、柱等构件以及混凝土结构的加固技术研究与应用 涉及加固构件的抗弯、抗剪、极限承载能力、黏结方式、黏结构造、锚固技术、结点加固、截面刚度等,加固后混凝土柱的抗弯性能、抗剪性能、承载能力、应力-应变关系、弯矩-曲率关系、徐变特性、疲劳性能与抗震性能等,结构整体加固技术等;碳

纤维布加固混凝土结构设计方法与技术体系研究等。

(3) 结构加固材料与制品性能检测标准体系 目前已有十余项 FRP 加固结构的相关标准规范颁布实施,形成了涵盖纤维材料、配套树脂材料、纤维增强复合材料制品、加固设计、加固施工、施工质量检验与质量控制等内容的标准系统,指导碳纤维布加固结构的应用。

(4) 界面黏结问题的研究 提出了各种理论分析模型,如基于断裂力学的分析模型、基于实验数据的经验公式、界面强度模型以及设计公式等。

碳纤维布加固混凝土技术在工程应用方面同样取得了巨大的成就。我国于 1998 年由国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心(中冶集团建筑研究总院)首次将碳纤维加固技术应用于工程,短短几年内该技术在土木工程中得到了迅速的推广和广泛的应用。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,1999 年碳纤维加固混凝土工程量比 1998 年同比增加 700 %,而 2003 年仅碳纤维片材使用量已达到 $60 \times 10^4 \text{ m}^2$,2008 年更是达到了 $200 \times 10^4 \text{ m}^2$ 以上,许多重大工程如人民大会堂、军事博物馆、民族文化宫的加固改造,都应用了碳纤维布加固技术,其良好的加固效果得到了广泛的认可和好评^[2]。

碳纤维布加固结构技术以其特有的快捷、高效、方便等特点在抗灾减灾方面发挥了巨大作用。2008 年以来,在四川汶川特大地震等重大自然灾害的灾后恢复与重建过程中,在恢复交通、加固危房、重建厂房和公共设施、恢复供应等方面都发挥了巨大的作用。

然而,在碳纤维布加固技术取得大量的研究成果和工程应用的同时,研究人员也发现了普通碳纤维布加固技术存在着技术缺陷:碳纤维布在受拉钢筋屈服时才发挥不到 20% 的强度,只有钢筋屈服以后,它的高强特性才能发挥出来。但是此时构件的挠度变形可

能已经很大,裂缝扩展可能已经比较严重,这样构件已经不能满足正常使用的要求。非预应力碳纤维布加固技术对构件的刚度提高不大,无法有效地抑制构件的挠度变形和裂缝的扩展。黏结材料的剪切强度一定,随着外荷载的增加,界面传递的剪应力不断增大,剪切变形不断增长,碳纤维布与混凝土将发生剥离,也使碳纤维布的强度不能得到充分利用,影响加固效果^[8~10]。这些缺陷在很大程度上限制了碳纤维布在土木建筑加固修复领域的进一步应用和发展。

为了充分发挥碳纤维布高强度的优势,借鉴预应力混凝土结构技术的基本原理,国内外研究学者提出了对碳纤维布先施加预应力,再粘贴到构件的表面形成加固效果的新技术,即预应力碳纤维布加固技术。目前已有的研究证明^[11~17],预应力碳纤维布加固技术是一项非常有效的加固技术。它有着普通碳纤维布加固技术无法比拟的众多优势:可以充分利用碳纤维布轻质高强的特点,能提高构件的开裂荷载、屈服荷载;可以缓解碳纤维布的应力滞后问题,限制钢筋应力的增长;可以有效延迟构件的开裂,限制裂缝的形成、发展,减少裂缝的宽度和挠度变形,显著改善结构的工作性能。表 1-1 为预应力碳纤维布加固技术与其他常用加固技术在对原构件的影响、施工质量控制、工期、后期维护等各方面的比较。

表 1-1 各种加固技术对比一览表

加固方法	粘钢加固	增大截面法加固	普通碳纤维布加固	预应力碳纤维布加固
对原构件的影响	略增加原结构自重和尺寸,可能损伤原结构钢筋	明显增加原结构自重和尺寸,可能损伤原结构钢筋	基本不增加结构自重和结构尺寸,不会损伤原结构	基本不增加结构自重和结构尺寸,不会损伤原结构
减小构件变形或封闭裂缝	不能减少原构件变形,不能封闭裂缝	不能减少原构件变形,不能封闭裂缝	不能减少原构件变形,不能封闭裂缝	能减少原构件变形,能减少或封闭裂缝

续表

加固方法	粘钢加固	增大截面法加固	普通碳纤维布加固	预应力碳纤维布加固
施工条件	需要机械辅助; 不适合曲面拐角加固	需要机械辅助; 对场地要求高;现场有湿作业,对环境影 响大	施工便利;可方便处理曲面、拐角;无湿作业,对环境影 响小	施工便利; 无湿作业,对环境影 响小
施工工期	较短	长	短	短
需要劳动力	较多	多	少	少
施工质量控制	不易发现加固缺陷,发现问题不方便补救	不易发现加固缺陷,发现问题不方便补救	易于发现加固缺陷,发现问题方便补救	易于发现加固缺陷,发现问题方便补救
后期维护	需要定期防腐处理	存在钢筋腐蚀问题	基本不需要	基本不需要

由表 1-1 对比可知, 预应力碳纤维布加固技术同其他几种加固技术相比, 其优势还是极为明显的。

国内学者对预应力碳纤维布加固技术的研究非常重视, 作者的研究团队结合“十五”国家 863 计划项目“高性能低成本复合材料在现代土木工程中应用关键技术与材料研究开发”(编号 2001AA336010)、“十五”攻关计划(国际合作)项目“高性能纤维增强复合材料工程应用关键技术研究”(编号 2005DFBA0002)以及“十一五”国家 863 计划项目“受损建筑物加固与修复材料关键技术研究与应用”(编号 2009AA032303)的研究, 针对这一技术进行了持续、系统的研究, 分别对预应力碳纤维布加固混凝土结构技术的设备开发、预应力碳纤维布加固混凝土的力学性能、预应力损失、锚固方式、设计理论、构造要求等开展了较全面的试验与理论分析, 提出了预应力碳纤维布加固混凝土梁的设计理论和行之有效的锚固构造措施, 以此为基础, 促进了预应力碳纤维布加固结构技术在我国土木工程界的研究应用和发展。

第二节 研究现状

目前国内外学者对预应力碳纤维布加固技术的研究已有较多的成果,如国外的 T. C. Triantafillou、N. Deskovic、R. G. Wight、R. J. Quantrill、L. C. Hollaway、U. Meier、Z. Wu 等对预应力碳纤维片材加固技术做了大量的理论与试验研究^[18~30]。国内的高校及科研院所也相继开展了预应力碳纤维布加固混凝土结构技术的不同方面的研究,主要集中在加固后承载力提高效果、预应力损失、锚固效果等,取得了较多的成果,这些成果促进了预应力碳纤维布加固技术的发展^[31~41]。目前国内外对预应力碳纤维布加固技术在各方面的研究基本上包括了以下几方面的内容。

一、关于预应力施加方法

研究和推广预应力碳纤维布加固技术,首要的问题就是研究如何方便有效地对碳纤维布施加预应力。从目前的研究成果来看,实验研究中施加预应力的方法主要有以下几种。

1. 反拱法

研究人员最初的研究中,通常是利用反拱法对碳纤维布施加预应力,即先将碳纤维布用黏结材料粘贴到钢筋混凝土梁的受拉面,然后用千斤顶从碳纤维布外把梁从中部顶起,等黏结材料固化后,移走千斤顶,这样就对钢筋混凝土梁施加了一定的预应力,如图 1-1 所示。

Saadatmanesh^[42]等人提出了相应的改进方法:先将实验梁的受拉面和受压面翻转过来,再施加均布荷载,使其恰好出现允许最大裂缝,然后将碳纤维布粘贴到梁的受拉面,等黏结材料固化后缓慢卸荷,即施加了预应力,如图 1-2 所示。这种方法千斤顶上的拱力抵消了实验梁重力对碳纤维布预应力的影响,技术简单,施加的

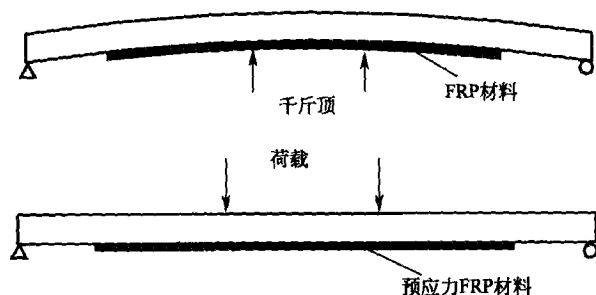


图 1-1 反拱法获得预应力

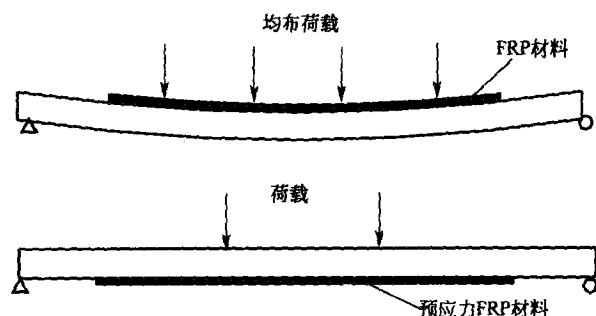


图 1-2 改进后的反拱法

最高预应力在梁的跨中，端部预应力较小，不需要锚固。但这种方法获得预应力程度较低，且混凝土梁顶部由于反拱造成的较高拉应力也是个需要重视的问题。

反拱法的另一种表现形式为重物加载法，即先将梁反转，使粘贴碳纤维布的受拉面朝上，将碳纤维布的一端固定在梁的端部，另一端与重物相连，依靠重物的重量对碳纤维布施加预应力。

这一类对碳纤维布施加预应力的方法一般形成的预应力较小，且很难做到定量的施加预应力，从工艺方面看，适合于实验室开展试验研究采用，但实际工程中无法应用。

2. 外部张拉法

Quantrill 和 Holloway^[25]先将混凝土梁的黏结面朝上放置在碳纤维板材的下面,把环氧树脂均匀涂在碳纤维板材的黏结面,黏结面向混凝土,然后张拉碳纤维板材至要求的预应力水平,混凝土梁用千斤顶顶高至碳纤维板的位置。碳纤维板上施加恒载,使得碳纤维板与混凝土梁粘接牢靠。待黏结材料固化后,在两端安装钢夹保证板材端部对预应力释放有足够的锚固。然后碳纤维板上卸荷至零,预应力通过硬化的黏结层传到混凝土梁,然后切除碳纤维板的多余部分,获得预应力,参见图 1-3。该方法由于要翻转构件,故不适合于工程应用。

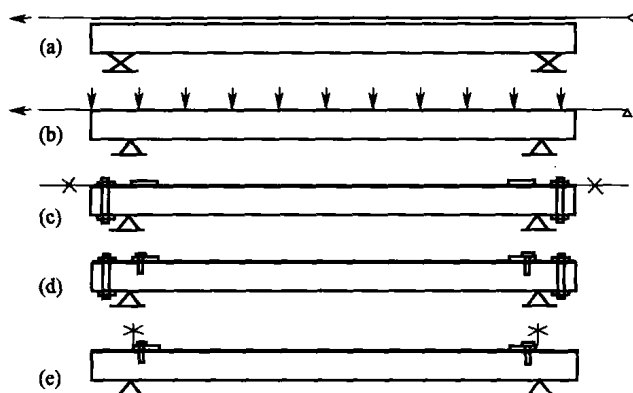


图 1-3 外部张拉法示意

(a) 张拉; (b) 加载、粘贴; (c) 固化、锚固; (d) 卸载; (e) 放张

尚守平^[9]、叶列平^[10]、杨勇新^[15]、飞涓^[33]等改进了这种方法,即不要翻转构件,直接先用特制的预张拉设备张拉碳纤维布,再用黏结材料将其粘贴到混凝土梁的受拉面,锚固并至黏结材料固化后,在两端放张碳纤维布,即施加了预应力,如图 1-4 所示。

这类方法的特征是采用特制的张拉设备进行碳纤维布的张拉,