

国际合作研究

碳纤维布补强加固混凝土结构

新技术

A New Technique of Repairing and
Strengthening Concrete Structures
with Continuous Carbon Fiber Sheet

赵彤 谢剑 著

天津大学出版社

国际合作研究

碳纤维布补强加固混凝土结构 新技术

赵彤 谢剑 著

天津大学出版社

内容提要

碳纤维布补强加固混凝土结构技术的研究和应用已成为土木工程界的一个特点。本书结合实际工程,面向广大工程技术人员讲解这种新兴加固技术的设计原理和设计方法以及有关施工技术措施。本书既适合研究人员阅读,也适合技术人员用于工程设计与施工指南。对于土木工程类的教师、研究生、本科生和网大学生来说,本书也是一本值得学习的实用参考书。

图书在版编目(CIP)数据

碳纤维布补强加固混凝土结构新技术/赵彤,谢剑著. —天津:天津大学出版社, 2001. 1

ISBN 7-5618-1381-3

I. 碳... II. ①赵... ②谢... III. ①碳纤维-布料-补强-混凝土结构-技术 ②碳纤维-布料-加固-混凝土结构-技术 IV. TU370.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 84629 号

出 版 天津大学出版社
出版人 杨风和
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内 (邮编: 300072)
电 话 发行部: 022—27403647 邮购部: 022—27402742
印 刷 河北省昌黎县印刷总厂
发 行 新华书店天津发行所
开 本 880mm×1230mm 1/32
印 张 4.25
字 数 127 千
版 次 2001 年 1 月第 1 版
印 次 2001 年 1 月第 1 次
印 数 1-2 000
定 价 16.00 元

前 言

碳纤维布补强加固混凝土结构技术作为一种新兴的、技术含量高的建筑物补强加固方法，具有很高的研究、推广价值和巨大的社会效益。

从 1997 年开始，我们与日本九州产业大学工学部建筑学科的河村博之教授开展了“碳纤维布加固补强建筑结构研究”的国际合作项目，该项目的部分研究内容于 1999 年获得了天津市青年科学基金的立项资助。本书在大量试验研究与理论分析的基础上，结合工程实际，对这一新技术进行了全面系统的论述。

本书对碳纤维布补强加固混凝土结构的受力特性和破坏机理进行了深入分析，并对碳纤维材料与粘接剂的材料性能、碳纤维布约束混凝土的受力特性、碳纤维布补强加固钢筋混凝土受弯构件的正截面承载力及斜截面承载力、碳纤维布补强加固钢筋混凝土柱正截面承载力及改善钢筋混凝土柱的抗震性能等各个方面进行了全面阐述。

本书力求做到有自己的特色，即在介绍该领域最新研究成果的同时，结合实际工程，面向广大工程技术人员详细讲解这种新兴加固技术的设计原理和设计方法以及有关施工技术措施。因此，本书既适合研究人员作为参考文献，也适合工程技术人员作为设计与施工指南。同时，对于土木工程专业教师、研究生、本科生和网大学生来说，也是一本很好的实用参考书。

赵彤、谢剑

2000 年 10 月于天津大学

PREFACE

As a new structural engineering material, continuous carbon fiber sheet (CFS) has many advantages of excellent mechanical strength and deformation property, convenience in use, low weight, non-dimensional increase, and immunity to corrosion. The CFS-strengthening technique has attracted many researchers and engineers today in the world. Based on series of experiments, our research results in this field are introduced in this book systematically. The main contents are as follows:

- 1) Mechanical properties of CFS and epoxy;
- 2) Stress-strain relationship of concrete confined by CFS;
- 3) Flexural and shear behavior of reinforced concrete beams strengthened with continuous CFS;
- 4) Flexural strength of reinforced concrete columns strengthened with CFS;
- 5) Ductility of reinforced concrete columns strengthened with CFS.

At the same time, this book also explains how to apply this advanced technique into building engineering. So this book is a valuable reference book for researchers, teachers, undergraduates, postgraduates and Internet students, and a design handbook for engineers.

The authors wish to express their appreciation to the friends, colleagues and students who have contributed to the development of this book.

ZHAO Tong, XIE Jian

Department of Civil Engineering

Tianjin University, P.R.China

October, 2000

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 概 述	(1)
第二节 混凝土结构补强加固技术现状	(2)
第二章 碳纤维材料与树脂粘接剂	(6)
第一节 混凝土加固修补用碳纤维材料	(6)
第二节 混凝土加固修补用树脂粘接剂	(7)
第三节 碳纤维材料基本参数的测定	(9)
第三章 碳纤维布约束混凝土应力—应变全曲线	(19)
第一节 碳纤维布约束混凝土受压应力—应变全曲线	(19)
第二节 碳纤维布约束高强混凝土受压应力—应变全曲线	(27)
第四章 碳纤维布补强加固钢筋混凝土受弯构件的正截面承载力	(31)
第一节 碳纤维布补强加固钢筋混凝土梁	(31)
第二节 碳纤维布补强加固钢筋混凝土板	(46)
第五章 碳纤维布补强加固钢筋混凝土受弯构件的斜截面承载力	(53)
第一节 研究概述	(53)
第二节 试验研究	(55)
第三节 设计计算方法	(66)
第六章 碳纤维布补强加固钢筋混凝土柱正截面承载力	(70)
第七章 碳纤维布增强钢筋混凝土柱的抗震能力	(85)
第一节 碳纤维布增强钢筋混凝土柱的抗震能力	(85)
第二节 碳纤维布改善高强混凝土柱的抗震性能	(95)
第三节 碳纤维布改善钢筋混凝土短柱的延性	(104)
第八章 施工要点	(112)
第九章 碳纤维布加固技术在砌体结构中的应用	(115)
结束语	(119)
主要参考文献	(120)

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Overview	1
1.2	Current Situation of Repair and Strengthening Techniques of Concrete Structures	2
Chapter 2	Carbon Fiber and Epoxy	6
2.1	Carbon Fiber	6
2.2	Epoxy	7
2.3	Mechanical Properties of CFS	9
Chapter 3	Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by CFS	19
3.1	Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by CFS	19
3.2	Stress-Strain Relationship of High-Strength Concrete Confined by CFS	27
Chapter 4	Flexural Behavior of Reinforced Concrete Members Strengthened with Continuous CFS	31
4.1	Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beam Strengthened with Continuous CFS	31
4.2	Flexural Behavior of Reinforced Concrete Slab Strengthened with Continuous CFS	46
Chapter 5	Shear Behavior of Reinforced Concrete Beam Strengthened with Continuous CFS	53
5.1	Introduction	53
5.2	Experimental Study	55
5.3	Design Method	66
Chapter 6	Flexural Strength of Reinforced Concrete Column strengthened with Continuous CFS	70
Chapter 7	Ductility of Reinforced Concrete Column Strengthened with Continuous CFS	85

7.1 Application of Continuous CFS to Improve the Ductility of Reinforced Concrete Columns	85
7.2 Application of Continuous CFS to Improve the Ductility of High-Strength Concrete Columns	95
7.3 Application of Continuous CFS to Improve the Ductility of Reinforced Concrete Short Columns	104
Chapter 8 Construction Outline	112
Chapter 9 Other Applications of CFS	115
Acknowledgement	119
References	120

第一章 绪 论

第一节 概 述

建国以来，特别是改革开放以后，随着经济建设的迅猛发展，我国建筑业也有了飞速发展。同时，随着钢筋混凝土结构在基本理论和设计方法等方面研究的不断深入，钢筋混凝土建筑物的结构设计和施工水平也有了很大提高。近年来，人们对建筑物的安全性、适用性和耐久性的要求不断增强，越来越多的新型结构体系随之发展起来，尤其是高层建筑的兴起更给予工程师们以广阔的设计空间。在建筑结构类型不断翻新的同时，各种新型建筑材料也不断涌现以适应建筑业的发展要求。

在新建房屋不断增加的同时，对现有结构的维护和补强加固也引起了工程界的广泛重视。建筑物都有一定的设计基准使用期，我国取为 50 年，而我国在建国后建造的大量房屋有的已经接近 50 年。同时，有很多因素会缩短现有建筑结构的使用寿命，其中主要包括：物理老化、化学腐蚀、社会需求的变化、设计标准的提高等等。这些出现问题的结构，实际情况并不允许将其全部推倒重建，而只能采取适当的技术措施，对其进行补强与加固处理，使这些结构仍能满足人们对建筑物安全性、适用性和耐久性的要求，继续为社会服务。

随着我国安居工程和住宅产业化发展，用户对工程质量和使用寿命的要求越来越高，当出现更改原结构设计、施工过程中出现差错，或者发生风灾、火灾等意外损坏情况时，则需要对原建筑物进行补强加固处理。

由于我国多数地区都处于地震区，在这些地区对建筑结构进行

抗震加固以及对震损结构的修复，也常常是结构工程师的主要工作内容。

总之，在现代社会中对建筑物的补强加固技术进行开发研究是非常必要的，具有重要的社会效益和巨大的经济效益。

第二节 混凝土结构补强加固技术现状

一、现有的补强加固方法

近些年来，随着人们对建筑物补强加固研究课题投入的增多，相应的研究成果也越来越多。目前，工程上常用的钢筋混凝土结构补强加固方法主要有：

(1) 加大截面加固法 加大截面加固法是通过增加原构件的受力钢筋，同时在外侧重新浇筑混凝土以增大构件的截面尺寸，来达到提高承载力的目的。其优点是可以同时增大构件的刚度、承载力和变形能力，部分情况下也可以加强连接的可靠性。

(2) 外包钢加固法 外包钢加固法是用乳胶水泥、环氧树脂化学灌浆或焊接等方法对梁柱外包型钢进行加固。该方法主要是通过约束原构件来提高其承载力和变形能力。

(3) 预应力加固 预应力加固方法是通过预应力钢筋对构件施加体外预应力，以承担梁、屋架和柱所承受的部分荷载，从而提高构件的承载力。

(4) 粘钢加固 粘钢加固是在混凝土构件表面用特制的建筑结构胶粘结钢板，是提高结构承载能力和变形能力的一种加固方法。其优点是简单、快速，施工时对生产活动和居民生活影响较小。

(5) 玻璃钢加固 玻璃钢是一种复合材料，它具有与混凝土的线膨胀系数相近、比强度高、优良的电磁绝缘性等特点，可分别在梁底面和侧面粘贴玻璃钢来增强钢筋混凝土梁的抗弯和抗剪承载力，并改善梁的变形性能。

(6) 喷射混凝土技术 喷射混凝土是借助喷射机械, 利用压缩空气或其他动力, 将一定比例配合的拌合料, 通过管道输送并以高速喷射到受喷面上凝结硬化而成的一种混凝土。喷射混凝土具有较高的力学性能和良好的耐久性, 特别是与混凝土、砖石、钢材有很高的粘结强度, 可以在结合面上传递拉应力和剪应力。

对于上述加固方法, 国内外的很多科研机构都已进行了大量的研究工作, 并且大都已应用于实际工程, 这在很多文献中都有记载。然而, 这些加固方法都有一定的缺陷, 除去带有共性的化学腐蚀问题外, 像粘钢加固法, 还会增加构件自重、结点不易处理、施工难度大等。为此, 工程界需要新兴的、科技含量较高的加固技术。

近年来, 纤维类材料在土木工程中的应用一直是国内外研究的热点。随着材料技术的发展, 现在已开发出来了多种高科技纤维材料, 上面提到的玻璃钢(玻璃纤维增强塑料)就是其中的一种。在所有的这些纤维材料中, 碳纤维材料是迄今为止应用于土木工程领域最早、技术最成熟, 也是用量最大的一种高科技材料。随着碳纤维材料被应用于建筑业, 碳纤维加固混凝土结构新技术随之出现。

二、碳纤维加固混凝土结构的技术特点

碳纤维有很多种类, 其中 PAN 基碳纤维具有优异的物理力学性能、良好的粘合性、耐热性及抗腐蚀性等特点, 非常适用于土木工程领域。用于建筑结构补强加固的碳纤维材料, 其强度一般为建筑用钢材的十几倍, 弹性模量与建筑钢材在同一水平上并略有提高, 是一种优良的结构加固用材料。碳纤维材料的这些特点, 为建筑结构的补强与加固提供了技术支持。

与原有的加固方法比较, 碳纤维加固技术具有明显的技术优势, 主要体现在:

(1) 高强高效 由于碳纤维材料优异的物理力学性能, 在对混凝土结构进行加固补强过程中可以充分利用其高强度、高模量的特点来提高结构及构件的承载力和延性, 改善其受力性能, 达到高效加固的目的。

(2) 耐腐蚀性能及耐久性 碳纤维材料的化学性质稳定, 不与酸碱盐等化学物质发生反应, 因而用碳纤维材料加固后的钢筋混凝土构件具有良好的耐腐蚀性及耐久性, 解决了其他加固方法所遇到的化学腐蚀问题。

(3) 不增加构件的自重及体积 碳纤维布质量轻且厚度薄, 经加固修补后的构件, 基本上不增加原结构的自重及尺寸, 也就不会减少建筑物的使用空间, 这在“寸土寸金”的经济社会中无疑是重要的。

(4) 适用面广 由于碳纤维布是一种柔性材料, 而且可以任意地裁剪, 所以这种加固技术可广泛地应用于各种结构类型、各种结构形状和结构中的各种部位, 且不改变结构形状及不影响结构外观。同时, 对于其他加固方法无法实施的结构和构件, 诸如大型桥梁的桥墩、桥梁和桥板, 以及隧道、大型筒体及壳体结构工程等, 碳纤维加固技术都能顺利地解决。

(5) 便于施工 将碳纤维材料用于加固混凝土结构, 在施工现场不需要大型的施工机械, 占用施工场地少, 而且没有湿作业, 因而工效很高。

三、碳纤维加固技术的发展概况

碳纤维材料用于混凝土结构补强加固的研究工作开始于 80 年代的美、日等发达国家。自 80 年代末至今, 日本、美国、新加坡以及欧洲的部分国家和地区的众多大学、科研机构、材料生产厂家等都相继进行了大量碳纤维材料用于混凝土结构补强加固的研究开发, 并在此基础上已编制形成了自己国家的行业标准与规范。日本的阪神大地震之后, 很多工程就是用碳纤维材料加固修补的。建筑物的抗震加固技术在日本、韩国、美国、欧洲、台湾等国家和地区得到了迅速的发展和广泛的应用。

碳纤维材料在土木工程领域的应用已非常广泛, 概括起来主要有以下几种途径:

(1) 在搅拌混凝土的同时加入短纤维制成碳纤维混凝土, 用于

新建结构。现已应用于某些工程中。

(2) 长丝制成束状(棒材)在现浇混凝土中代替钢筋用于新建结构,主要用于海洋结构及对电磁波有特殊要求的结构,现已有研究并开始应用于实际工程。

(3) 将碳纤维制成织物(片材),粘贴到混凝土表面用于结构的补强与加固,是重点研究的一个方面,也是实际工程中应用最多的一种。

随着人们对碳纤维加固混凝土结构技术优势认识的逐渐提高,现在国内已有越来越多的高校和科研机构开始重视这一新兴加固技术的科学研究和应用,并投入了大量的资金和人力来发展和完善这一技术。

天津大学土木工程系是我国最早对碳纤维加固混凝土结构技术进行系统研究的单位之一。近几年来,赵彤博士(Dr. Zhao Tong)带领的课题组在这一领域始终保持较大的人力物力投入,对这一新技术做了深入细致的试验研究和理论分析,并取得了一批很有价值的试验数据和研究成果。

从目前国内外的发展情况看,碳纤维材料应用于建筑业的研究开发活动正呈积极活跃的态势。中国拥有巨大的建筑市场,大量的钢筋混凝土结构急需补强与加固,碳纤维加固技术作为一种新兴的、技术含量高的加固方法,具有很大的研究推广价值和巨大的社会效益。随着研究工作的不断深入,这种加固方法在我国也将得到广泛的应用,同时也必将对我国的社会主义现代化建设事业产生积极的推动作用。

第二章 碳纤维材料与树脂粘接剂

第一节 混凝土加固修补用碳纤维材料

普通碳纤维是以聚丙烯腈（PAN）或中间相沥青（MPP）纤维为原料经高温碳化制成，碳化程度决定着诸如弹性模量、密度与导电性等性能。目前，用于混凝土结构补强加固的碳纤维材料种类较多，其分类方法也多种多样。

一、按形式分类

图 2-1 是碳纤维材料的几种主要形式。

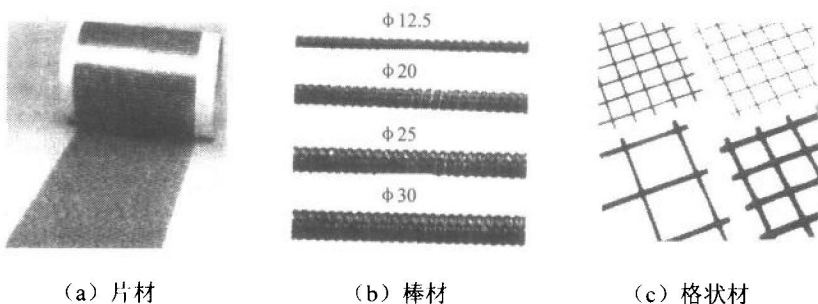


图 2-1 碳纤维材料的主要形式

(1) 片材（包括布状和板状） 一般通过环氧树脂类粘接剂粘贴于混凝土受拉区表面，是用于结构加固修复最多的一种材料形式。其中布状材料的使用量最大，但由于板状材料的强度利用效率较高，近几年来使用量增长很快。

(2) 棒材 通常作为代替传统钢筋(主筋或箍筋)的材料,既可用于已建结构的补强加固,也可用于新建结构中。对棒材进行张拉后,可对混凝土结构进行体内或体外预应力增强式加固。

(3) 型材 包括多种形状,但有应用实例的仅有格状材一种,且用量较少;主要是通过 1~2 cm 厚的聚合物灰浆将其粘结在已有结构上,或只通过适当的锚固方法将其固定在结构上进行加固。

(4) 短纤维 相对于上述三种长纤维形式,通过与混凝土共同搅拌形成碳纤维混凝土用于新建结构。

二、按力学性能分类

(1) 高模量(I型) 拉伸模量很高,可以达到 380~640 GPa,但其伸长率较低,变化范围在 0.3%~0.5%之间。

(2) 高强度(II型) 拉伸强度在 2 400~3 100 MPa 之间,那些加工工艺好的产品,其拉伸强度可超过 4 000 MPa 以上。

(3) 中等模量(III型) 拉伸模量一般在 274~315 GPa 之间,伸长率在 1.5%~2.0%之间。

三、按原丝种类分类

1. 聚丙烯腈(PAN)基碳纤维 PAN 基碳纤维片材是目前建筑市场使用最多的加固修复材料,它除具备高性能纤维片材所共有的优点外,还具有突出的耐高温(1 000℃~3 000℃)和抗燃特性,不受酸雨的侵蚀,价格性能比较好,补强效果优良。

(2) 沥青基碳纤维 用于混凝土结构物补强的沥青基碳纤维,只能用高性能长丝,特别是高模量碳纤维或石墨化纤维。在日本采用三菱化学公司生产的高模量(600 GPa 以上)沥青基碳纤维片材 1 层,就相当 T300 的 PAN 基碳纤维片材 3 层,因此有其独特的优点,特别是需要高刚性的领域。

第二节 混凝土加固修补用树脂粘接剂

混凝土结构加固修补树脂系统包括底层涂料(primer),用于渗

透进水泥表面，促进粘结并形成长期持久界面的基础；油灰（putty）用以填充整个表面空隙并形成平整表面以便使用片材；浸渍树脂（saturating resin）用以浸渍片材在混凝土表面原位形成层板。作为标准湿法铺层树脂体系的一般要求如下：

- （1）组合材料很容易混合；
- （2）室温适用期大于 30 min；
- （3）浸渍增强纤维片材用树脂具有低的工作粘度；
- （4）可室温固化；
- （5）固化到不剥落的时间在 12~24 h；
- （6）固化度 70% 的时间不多于 48 h；
- （7）完全固化的时间不多于 7 d；
- （8）同混凝土的粘结强度大于混凝土的拉伸强度和剪切强度；
- （9）在固化过程中不挥发、不放出气体。

一、室温固化树脂

作为建筑结构复合材料用的树脂主要是不饱和聚酯、乙烯酯和环氧树脂。不饱和聚酯是最简单和最便宜的树脂，异构聚酯具有良好性能，并增大了抗水渗透性能；乙烯酯树脂表现出不饱和聚酯和环氧树脂之间的性能，和异构聚酯性能相近，通常具有良好的耐环境性能，适于在对腐蚀有严格要求的环境中使用。然而，由于缺乏同其相容性好的碳纤维上浆剂，可引起剪切和压缩强度降低，因此这两种树脂不能很好地和碳纤维粘接。

环氧树脂性能优于不饱和聚酯和乙烯酯树脂，价格也相对较贵，固化时收缩率低，表现出好的抗湿气渗透性能，力学性能优，和不同纤维都有很好的粘接强度，是目前使用最多的树脂基体。所用环氧树脂的粘度一般为 30~150 cps，触变系数 3.0~8.0。

二、低温固化树脂

环氧树脂固化时其反应受温度影响很大，有时加固修补需在 10℃

以下,甚至-5℃时进行,没有外部热源,常用的环氧/胺固化体系往往是不可能的。因此,人们研究了可在3℃和-5℃固化的混凝土结构加固修补用新体系,主要是甲基甲基丙烯酸酯(MMA)和新环氧体系。

MMA 固化体系工作粘度大约是3 000 cps,在-5℃~30℃温度范围内,通过调节固化剂的含量,树脂的工作时间可控制在30~40 min,干燥时间大约2 h,现场的使用工艺几乎同标准环氧树脂相同。

环氧固化体系以聚酰胺为固化剂的室温固化环氧体系可用于13℃的低温,此时反应速度已经很慢,固化产物的性能也比较差。为此用于低温固化的环氧体系需加入合适的促进剂,可有效地促进固化,如加入不同的多元胺,可使室温固化的环氧体系在5℃~13℃有可接受的固化速度。

第三节 碳纤维材料基本参数的测定

由于在碳纤维材料加固修补混凝土结构工程中,使用最多的材料形式是碳纤维片材中的布状材料,因此本节重点介绍这种材料形式基本参数的测定方法,包括比重、拉伸强度和弹性模量。

一、碳纤维布比重的测定

参考日本有关试验方法(JIS R 7601, JIS K 7112 A),碳纤维布的比重按如下步骤进行测定:

- (1) 计量500 mm宽布材中所含碳纤维丝束的数量,从而反算出一束碳纤维丝束的宽度;
- (2) 裁剪出一小块碳纤维布,其长度为100 mm,宽为10束碳纤维丝束的宽度,图2-2;
- (3) 用精度为0.001 g的天平称出这一小块碳纤维布在空气中的质量 M_1 ,图2-3;