



土木工程结构研究新进展丛书

碳纤维布加固钢筋混凝土 构件失效分析与承载力计算

闫长旺 刘曙光◎著

中国建筑工业出版社

014042243

TU375

48

土木工程结构研究新进展丛书

碳纤维布加固钢筋混凝土构件 失效分析与承载力计算

闫长旺 刘曙光 著



TU375
48

中国建筑工业出版社



北航

C1728653

235530310

图书在版编目(CIP)数据

碳纤维布加固钢筋混凝土构件失效分析与承载力计算/
闫长旺, 刘曙光著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 4
(土木工程结构研究新进展丛书)
ISBN 978-7-112-16424-0

I. ①碳… II. ①闫…②刘… III. ①碳纤维-纤维-增强
混凝土-钢筋混凝土结构-结构构件-失效分析②碳纤维-纤维增
强混凝土-钢筋混凝土结构-结构构件-承载力-计算 IV. ①TU375
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 028249 号

本书采用试验研究与理论分析相结合的研究手段, 通过试验, 进行了碳纤维布加
固钢筋混凝土构件从受力到破坏的全过程分析, 基于试验现象和试验结果, 提出了碳
纤维布加固钢筋混凝土梁受弯、受剪、受扭, 碳纤维布加固预应力钢筋混凝土空心板,
碳纤维布加固钢筋混凝土双向板, 碳纤维布加固钢筋混凝土双向偏心受压柱的计算
方法。

本书适合从事混凝土结构加固工程领域的设计、施工、科研的专业技术人员学习
参考。

* * *

责任编辑: 王 梅 李天虹
责任设计: 张 虹
责任校对: 陈晶晶 赵 颖

土木工程结构研究新进展丛书
碳纤维布加固钢筋混凝土构件失效分析与承载力计算
闫长旺 刘曙光 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京天成排版公司制版
环球印刷(北京)有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12 字数: 300 千字
2014 年 4 月第一版 2014 年 4 月第一次印刷
定价: 39.00 元
ISBN 978-7-112-16424-0
(25256)

版权所有 翻印必究
如有印装质量问题, 可寄本社退换
(邮政编码 100037)

前 言

粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土构件是近些年来兴起的新型加固技术，具有施工周期短、耐久性好、对被加固构件尺寸影响小、质量轻、强度高等优点，广泛应用于各类钢筋混凝土结构或构件加固工程中。

在过去的十几年间，作者在内蒙古自然科学基金（200208020211）和内蒙古交通厅科技项目（NJ-2006-16）的资助下，进行了碳纤维布加固钢筋混凝土梁、板、柱构件失效分析与承载力计算。本书稿是课题研究中碳纤维布加固钢筋混凝土构件破坏过程、参数影响、承载力计算的整理与总结。

本书共分为7章，分别是绪论、碳纤维布加固钢筋混凝土受弯构件失效分析与承载力计算、碳纤维布加固钢筋混凝土受剪构件失效分析与承载力计算、碳纤维布加固钢筋混凝土受扭构件失效分析与承载力计算、碳纤维布加固预应力钢筋混凝土空心板失效分析与承载力计算、碳纤维布加固钢筋混凝土双向板失效分析与承载力计算、碳纤维布加固钢筋混凝土双向偏心受压柱失效分析与承载力计算。本书中各部分试验与分析，分别由王玉清、崔倩、飞虹、闫长旺、李俊清、师利文完成。

在课题研究过程中，内蒙古工业大学土木工程结构与力学自治区重点实验室白明海老师协助完成了全部试验。研究生鲁小宇、邓轶涵、尹立强、李海林、王征参与了书稿的整理工作。在此表示感谢。

由于作者水平有限，书中可能有许多不足甚至错误之处，恳请专家和读者批评指正，作者先致诚挚谢意。

2014年1月16日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 钢筋混凝土构件加固方法	1
1.2 碳纤维布加固钢筋混凝土构件技术	2
1.2.1 碳纤维材料	2
1.2.2 碳纤维布加固钢筋混凝土构件粘贴工艺	3
1.2.3 钢筋混凝土构件粘贴碳纤维布加固技术优点	4
1.3 碳纤维布加固钢筋混凝土构件研究现状	4
1.3.1 国外研究现状	4
1.3.2 国内研究现状	6
1.4 本书主要研究工作	7
第 2 章 碳纤维布加固钢筋混凝土受弯构件失效分析与承载力计算	8
2.1 试验概况	8
2.1.1 试验材料	8
2.1.2 试件设计	9
2.1.3 测试内容与加载装置	11
2.2 试验现象与结果分析	12
2.2.1 试验过程与失效分析	12
2.2.2 主要材料应变与试件跨中挠度分析	17
2.2.3 加固效果影响因素分析	22
2.3 抗弯加固设计计算	24
2.3.1 抗弯加固计算的一般规定	24
2.3.2 梁底面粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土梁的受弯承载力计算	27
2.3.3 梁侧面粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土梁的受弯承载力计算	33
2.3.4 碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯承载力计算方法检验	41
2.4 碳纤维布加固后钢筋混凝土梁裂缝形态	41
2.4.1 试验结果分析	41
2.4.2 裂缝宽度的计算	43
2.5 粘贴碳纤维布后混凝土梁的短期刚度计算	46
第 3 章 碳纤维布加固钢筋混凝土受剪构件失效分析与承载力计算	50
3.1 试验概况	50

3.1.1	试件设计	50
3.1.2	材料性能	50
3.1.3	加载装置和加载方案	51
3.1.4	加固方案及测点布置	51
3.2	试验结果与数据分析	55
3.2.1	破坏过程与失效分析	55
3.2.2	主要材料应变与试件跨中挠度分析	62
3.2.3	加固效果影响因素分析	66
3.3	加固后构件受剪承载力计算	67
3.3.1	承载力计算的一般规定	67
3.3.2	碳纤维布加固钢筋混凝土梁受剪承载力计算方法	69
3.3.3	受剪承载力计算值与试验值对比分析	72
第4章	碳纤维布加固钢筋混凝土受扭构件失效分析与承载力计算	73
4.1	试验概况	73
4.1.1	试验材料	73
4.1.2	试件设计	73
4.1.3	加载装置与测试内容	79
4.2	试验结果与数据分析	81
4.2.1	破坏过程与失效分析	81
4.2.2	试件的扭转变形	88
4.2.3	试件扭转刚度	89
4.2.4	试件延性	90
4.2.5	试件应变	91
4.2.6	影响碳纤维布加固效果的因素	93
4.3	加固后构件扭矩计算	94
4.3.1	碳纤维布加固钢筋混凝土受扭构件开裂扭矩计算方法	94
4.3.2	基于空间桁架模型的极限扭矩计算方法	99
4.3.3	基于《混凝土结构设计规范》的极限扭矩计算方法	109
4.3.4	极限扭矩计算值与试验值对比分析	110
4.3.5	碳纤维布加固量的适用范围	111
第5章	碳纤维布加固预应力钢筋混凝土空心板失效分析与承载力计算	112
5.1	试验概况	112
5.1.1	试件设计	112
5.1.2	碳纤维布加固方案	113
5.1.3	试验测试内容与加载	114
5.2	试验结果与数据分析	115
5.2.1	加固前后承载力对比分析	115

5.2.2	荷载-应变分析	116
5.2.3	荷载-挠度分析	117
5.3	加固后预应力钢筋混凝土空心板受弯承载力计算	117
5.3.1	截面换算	117
5.3.2	基本假定	118
5.3.3	碳纤维布粘贴量的确定	118
5.3.4	加固后预应力钢筋混凝土空心板极限受弯承载力计算方法	120
5.3.5	破坏形式的判断	120
5.3.6	受弯承载力计算值与试验值对比分析	121
5.4	碳纤维布加固预应力钢筋混凝土空心板截面刚度计算方法	121
5.4.1	试件刚度 B_0 计算	122
5.4.2	试件刚度 B_1 计算	122
5.4.3	挠度计算值与试验值对比分析	124
5.5	碳纤维布加固预应力钢筋混凝土空心板延性分析	124
5.5.1	基于能量等效法的延性分析	124
5.5.2	曲率延性计算分析	126
第 6 章	碳纤维布加固钢筋混凝土双向板失效分析与承载力计算	129
6.1	试验概况	129
6.1.1	试验材料	129
6.1.2	试件设计与测试内容	130
6.1.3	加载装置	132
6.2	试验结果与数据分析	133
6.2.1	破坏过程与失效分析	133
6.2.2	典型裂缝形态分析	137
6.2.3	主要材料应变与试件跨中挠度分析	138
6.2.4	加固后试件承载力分析	144
6.2.5	双向板加固效果影响因素分析	145
6.3	加固后钢筋混凝土双向板受弯承载力设计	146
6.3.1	一般规定	146
6.3.2	碳纤维布加固钢筋混凝土双向板受弯承载力计算方法	149
6.3.3	碳纤维布加固钢筋混凝土双向板计算值与试验值对比分析	160
第 7 章	碳纤维布加固钢筋混凝土双向偏心受压柱失效分析与承载力计算	162
7.1	试验概况	162
7.1.1	试验材料	162
7.1.2	试件设计	163
7.1.3	测试内容与加载装置	164
7.2	试验结果与数据分析	166

7.2.1 破坏过程与失效分析	166
7.2.2 加固前后承载力对比分析	169
7.2.3 荷载-应变分析	170
7.2.4 荷载-挠度分析	173
7.3 碳纤维布加固钢筋混凝土双向偏心受压柱正截面承载力计算	174
7.3.1 碳纤维布加固钢筋混凝土双向偏心受压柱的工作原理	174
7.3.2 基本假定	174
7.3.3 正截面承载力计算方法	175
7.3.4 计算值和试验值对比分析	179
参考文献	180

第 1 章 绪 论

1.1 钢筋混凝土构件加固方法

许多钢筋混凝土建筑物因为使用功能发生改变、设计标准提高、施工错误、材料质量不符合要求,以及风灾、火灾、水灾、地震灾害等因素的影响,不能满足现有的安全、适用、耐久性要求,特别是钢筋混凝土材料及构件,随着服役时间的增长,会受到气候条件、环境侵蚀、物理作用、化学作用或其他外界因素的影响,结构的性能发生劣化,钢筋混凝土构件内部受到损伤,甚至遭到破坏。因此,对既有钢筋混凝土构件进行加固补强成为工程界关注的热门话题。通常认为,钢筋和混凝土材料自身特性和施工质量是决定钢筋混凝土构件耐久性的内因,而构件所处的使用环境和采取的防护措施则是影响其耐久性的外因。据统计我国 20 世纪 70 年代之前建成的房屋约有 25 亿平方米,依据设计基准期判断这些房屋已进入老化阶段,从社会经济角度分析,全部推倒重建显然不符合我国国情,因此需要我们对这些建筑物进行结构鉴定和可靠性评估,从而进行维修加固以延长其使用寿命。据有关资料统计,既有建筑加固修复所需资金是推倒新建所需资金的 10%~30%。可见正确评价与评估工程结构的损伤程度、承载能力退化程度、耐久性降低等问题,采取有效的措施进行维修、加固,挖掘既有工程结构的承载潜力,是一项具有显著经济效益和重大社会意义的工作。

钢筋混凝土结构建筑技术发展应用时间至今约一百年,而钢筋混凝土构件加固技术应用时间约为三四十年。结构加固与新建不同,加固设计与施工有其特殊性。加固设计工作包括原结构与构件验算和加固设计计算,要求考虑新旧结构材料的粘结能力、结构承载力、结构刚度和使用寿命的均衡,以及新旧结构的工作协调性。加固施工一般是在建筑物使用过程中进行,或只能短期停业施工,要求施工速度快,现场浇筑湿作业少,同时受施工场地、相邻构件、设备等空间环境的制约,所以选择合理的加固方法、提高加固效益是非常重要的。

钢筋混凝土结构构件加固方法包括:加大截面法、体外预应力加固法、外包钢加固法、置换混凝土加固法、喷射混凝土加固法、改变结构传力途径加固法、外贴钢板加固法、绕丝加固法、外贴纤维织物加固法等。

(1) 加大截面加固法,即受力构件外包混凝土加固法,此法是在原混凝土构件外叠浇新的钢筋混凝土,增加既有构件的截面积和配筋,从而达到提高承载力的目的。该法的优点是可同时提高构件的承载力与刚度。常用于梁、板、柱和墙的加固中,有三面加厚、两面加厚或单面加厚等加固构造形式。

(2) 体外预应力加固法,该法采用预应力钢筋(钢绞线、型钢)对钢筋混凝土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,满足正常

使用状态性能。特点是通过在后加的拉杆或型钢撑杆施加拉力或撑力,给构件施加预应力,改变原结构的内力分布,使后加部分与原构件能协调工作,提高原结构构件的承载能力,减小挠曲变形,控制裂缝。此法适用于较大跨结构的加固。

(3) 外包钢加固法,是在原钢筋混凝土构件外采用乳胶水泥、环氧树脂化学灌浆并焊接等方法对梁柱外包型钢进行加固,通过约束原构件提高结构的承载力和抗变形能力。其特点是截面尺寸和外观影响较小,承载力提高幅度较大,施工简便。该方法主要适用于大型结构和大跨结构。

(4) 置换混凝土加固法,是在既有钢筋混凝土结构中,对混凝土强度等级达不到设计要求的构件,按弯矩图确定其最不利截面,然后在这些截面的受压区采用比原构件混凝土设计强度高一个等级的新混凝土置换旧混凝土。该方法施工简单、工期短、造价低等优点。

(5) 喷射混凝土加固技术,该方法是借助混凝土喷射机械,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。喷射混凝土与经过表面处理的原混凝土、砖石和钢材均有很好的粘结。

(6) 改变结构传力途径加固法,该加固方式主要有增设支点法和托梁拔柱法,目的是降低构件的内力峰值,调整构件各截面的内力分布,从而降低构件承担的荷载,相对提高构件的承载力。

(7) 外贴钢板加固法,是使用胶粘剂将钢板粘贴在构件外部,钢板与原构件共同受力,提高承载力的一种加固方法。常用的胶粘剂是以环氧树脂为基料,再掺入适量的固化剂、增韧剂、增塑剂配制而成。粘贴钢板加固法是一种先进的加固方法,在结构工程中应用发展较快。这种加固方法具有许多优点,比如胶粘剂硬化速度快、施工周期短、施工时不停产或少停产、工艺简单、施工快捷方便、胶粘剂强度高于混凝土本身强度、可以使加固体和原结构形成一个整体、受力均匀、不产生应力集中,粘贴钢板所占空间小、几乎不影响房屋使用净空间、不改变构件外形等。该法适用于一般受弯和受拉构件。

(8) 绕丝加固法,该方法是通过对被加固的钢筋混凝土构件上缠绕退火钢丝,使被加固的受压构件受到约束作用,从而提高其极限承载力和延性的一种加固方法。该法适用于混凝土结构构件斜截面承载力不足或正截面受压承载力不足的加固。

(9) 外贴纤维织物加固法,主要有玻璃纤维、芳纶纤维及碳纤维加固法,特别是碳纤维布,以其突出的优越性被广泛应用于钢筋混凝土构件的加固中,本书将作详细阐述。

1.2 碳纤维布加固钢筋混凝土构件技术

1.2.1 碳纤维材料

碳纤维材料是以聚丙烯腈(PAN)或中间沥青(MMP)纤维为原料经高温碳化而成,碳化程度决定材料的弹性模量、密度和导电性能。PAN基纤维被认为是生产碳纤维材料最重要的原料,目前加固工程中使用的碳纤维材料大部分都是以PAN基为原料,因其具有高性能纤维材料所共有的优点,且具有突出的耐高温($1000\sim 3000^{\circ}\text{C}$)和抗燃性,不受酸雨的侵蚀,补强加固效果显著。

碳纤维材料按形式分为:片材、棒材、型材和短纤维。其中,片材又分为布材和板

材,通常采用环氧树脂胶粘剂将碳纤维片材粘贴在钢筋混凝土构件的受拉区表面,是用于工程结构加固最多的一种材料。碳纤维棒材是代替传统钢筋作为受力筋的一种材料,可用于既有结构加固及新建结构中。型材外形有多种形状,其中格状碳纤维有一定量的工程应用,主要是通过聚合物砂浆将该材料粘贴在构件表面上,或采用适当的锚固措施将其固定在结构构件表面上进行加固。短纤维是通过与混凝土原料一起搅拌形成碳纤维增强混凝土材料,常用于对抗疲劳、抗断裂、抗电磁干扰等有较高要求的新建混凝土结构工程中。

碳纤维材料按力学性能可分为:高强度和普通强度、高弹性模量和中等弹性模量几种类型。其中高强度碳纤维材料的强度可达 4000MPa 以上,高弹性模量碳纤维的拉伸模量可达 380~640GPa,但其伸长率较低,仅在 0.3%~0.5%之间。中等弹性模量碳纤维的拉伸模量在 274~315GPa 之间,伸长率在 1.5%~2.0%之间。

1.2.2 碳纤维布加固钢筋混凝土构件粘贴工艺

采用碳纤维布加固钢筋混凝土结构的基本原理,是采用同一方向排列的碳纤维布,在常温下用环氧树脂胶预浸,沿受力方向或垂直于裂缝方向紧密粘贴在需要加固补强的钢筋混凝土构件表面,形成碳纤维布和钢筋混凝土的复合材料体,使碳纤维布与原有的钢筋混凝土构件共同受力,增大钢筋混凝土构件的抗弯、抗剪、抗扭或抗压能力,提高构件承载力、抗裂性和延性,控制裂缝的继续发展,达到对钢筋混凝土构件补强加固和改善受力性能的目的。

采用碳纤维布加固钢筋混凝土构件的一般步骤为:

(1) 将钢筋混凝土构件加固区域混凝土表面打磨平整,去掉 1~2mm 的表面疏松层及老化层,并将浮浆清除干净,若构件表面有裂缝,需用树脂浆灌注裂缝;若表面有损伤,需用环氧砂浆进行修补。

(2) 用丙酮清洗混凝土表面并晾干,以清除油脂及浮尘。

(3) 在需要加固面上涂刷基层涂料,渗入到混凝土表面,形成持久界面基础。

(4) 待基层涂料干燥后,均匀涂抹一层饱满的胶粘剂。

(5) 将已裁剪好的碳纤维布贴上去,粘贴时沿碳纤维布受力方向按压挤出气泡,用专用滚筒滚压碳纤维布时,可以向一个方向,也可以从中间向两个方向滚动,但不允许来回反复滚动,以免损伤碳纤维布,影响粘贴质量。要使碳纤维布与混凝土表面紧密结合。

(6) 粘贴碳纤维布后,应自然养护 1~2 小时,直到初期固化,并应在固化期内不受外界干扰和碰撞。为保证达到设计粘结强度,固化期内当平均气温约 10℃时需养护两周,平均气温 20℃时需养护一周。然后在碳纤维布表面涂刷防护材料。

整个工艺的关键在于碳纤维布与混凝土粘结的紧密性与牢固性,保证二者形成结构整体。其胶结材料是专用的配套环氧树脂。施工温度在 5~30℃范围内,相对湿度不大于 70%。试验研究和工程经验证明,只有浸渍树脂充分浸透在碳纤维布中才能保证碳纤维布的粘贴质量,否则对粘贴质量有不利的影响。另外,影响碳纤维布加固效果的主要因素还有:碳纤维布的用量,加固区段的范围,既有构件混凝土的强度和配筋率,碳纤维布端部锚固情况,加固前既有构件的受力情况等。

1.2.3 钢筋混凝土构件粘贴碳纤维布加固技术优点

相对于外包钢加固、加大截面加固、喷射混凝土加固等技术相比,粘贴碳纤维布加固修补钢筋混凝土结构或构件具有以下技术优点:

(1) 重量轻,强度高。碳纤维布重量轻、厚度小,包含树脂后的重量不到 $1.0\text{kg}/\text{m}^2$,单层粘贴厚度大约 1.0mm ,因此加固后基本不增加原构件重量及几何尺寸。碳纤维布强度约为钢材的十几倍,弹性模量是钢材的 $1\sim 2$ 倍。在加固工程中可充分利用其高强度、高弹性模量的特点,来提高结构或构件的承载力,改善其受力性能,达到高效加固目的。

(2) 施工便捷、施工质量易保证。施工过程中没有湿作业,不需要大型机具,施工占用场地少,施工功效高。现场碳纤维布下料只需刀片或剪刀裁剪。因为碳纤维布固化前是柔软的,所以即使加固表面不是非常平整,也基本可以保证充分粘贴,即使固化后发现表面局部有气泡,只要注射树脂将气泡中的空气赶走便可,所以施工质量可以较好地保证。

(3) 适用范围广。碳纤维布可用于各种结构类型(建筑物、构筑物、桥梁、涵洞、烟囱等)、各种结构形状(圆形、方形、曲面等)、各种结构部位(梁、板、柱、节点、拱等)的加固补强,不改变结构形状、不影响结构外观,是任何一种加固方法所不能相比的。对于一些大型工程结构,如大型桥梁的桥墩、桥板、隧道、大型筒体及壳体等,采用粘贴碳纤维布加固技术都能顺利解决。

(4) 耐腐蚀性能及耐久性能好。经粘贴碳纤维布加固的钢筋混凝土结构或构件,碳纤维布及胶可以抗拒建筑物经常受到的酸、碱、盐的腐蚀。不需要定期维护,能节约大量开支。

(5) 耐疲劳性能好。对于经受反复荷载、移动荷载作用的钢筋混凝土结构或构件,加固后要考虑疲劳破坏的影响。粘贴碳纤维布加固的钢筋混凝土结构经反复荷载试验验证,其承载力和延性指标没有降低。

(6) 高电阻及抗磁干扰性能强。

1.3 碳纤维布加固钢筋混凝土构件研究现状

1.3.1 国外研究现状

碳纤维布加固技术在钢筋混凝土结构或构件加固工程中的应用始于 20 世纪 80 年代初,1981 年,瑞士联邦材料实验室最早采用粘贴碳纤维复合材料加固了 Ebach 桥。此后,瑞士、法国和德国等 11 个国家合作启动了“高性能纤维复合材料加固混凝土结构设计指南”项目,该项目的研究成果大大促进了碳纤维材料加固技术的推广和应用。1991 年,美国混凝土协会成立了碳纤维材料加固技术研究和应用的组织 ACI440 委员会,并于 1996 年公布了关于碳纤维材料加固技术的研究报告,详细介绍了碳纤维材料的性能、试验方法、设计方法、工程应用等方面的研究成果和现状。随着研究的深入开展,ACI440 委员会又出版了有关碳纤维材料加固技术的试验指南。1993 年,日本也颁布了《碳纤维材料加固混凝土结构设计指南》,随着相关理论研究工作的发展和不断的实际加固工程应用,1997 年,日本又颁布了《连续纤维材料补强加固混凝土结构设计和施工规程》,用于指导

碳纤维材料加固技术的工程应用,使碳纤维材料加固技术得以在土木工程中得到推广与应用。1996 和 2000 年出版的《加拿大公路桥梁设计规范》已将碳纤维材料加固钢筋混凝土结构或构件这一新型加固技术纳入其中。1998 年,加拿大成立了 ISIS Canada 技术委员会,2002 年该委员会颁布了碳纤维材料加固钢筋混凝土结构的设计和施工规程。

在过去的 30 年间,许多国外学者进行了碳纤维材料加固钢筋混凝土结构或构件的研究工作,取得了大量科研成果。Triantafillou T C 开展了碳纤维布抗剪加固矩形截面混凝土梁试验研究,研究结果表明:所有梁的破坏均是由于剪跨中斜拉裂缝的开展而导致的脆性破坏;与未加固的钢筋混凝土梁相比,加固后的试件破坏荷载显著增大,增长幅度高达 65%~95%。Grace N F 等人对配置体外预应力碳纤维筋的混凝土梁进行了试验研究,包括静载试验、循环加载试验和破坏试验,研究结果表明,加大转向块半径和转向块表面加垫层都可以减少体外碳纤维筋在转向块处的摩擦损失;折线形体外预应力筋、体内纵向有粘结筋和体内横向无粘结筋都可以提高原构件的延性;配有体内无粘结预应力筋的构件破坏时只在最大弯矩处出现一道裂缝,而体内有粘结筋可以改善构件的裂缝分布,提高构件的延性。Deng 和 Toutanji 采用无机胶粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土梁,研究了加固后试件的疲劳性能,结果显示,起初 50 万次疲劳循环次数内试件裂缝宽度和深度,随着疲劳次数的增加而增大,此后裂缝的宽度、深度趋于稳定;与未加固的试件相比,加固后钢筋混凝土梁的疲劳性能得到较大改善,抗疲劳强度增加了约 55%。

在碳纤维布加固钢筋混凝土轴心受压构件方面,国外学者也进行了大量试验研究和理论分析。Shahawy M 等为了验证自己提出的碳纤维布约束混凝土柱强度模型的准确性,进行了 45 根碳纤维布包裹钢筋混凝土短柱的试验研究,结果表明,所提出的四参数函数模型适用于碳纤维布包裹普通钢筋混凝土柱的强度预测。Lam L 和 Teng J G 进行了碳纤维布包裹椭圆形截面轴心受压短柱的试验,研究结果表明,经碳纤维布包裹的钢筋混凝土短柱抗压强度和椭圆截面长轴与短轴的比值有直接关系,随着长轴与短轴比值的逐渐减小,极限抗压强度逐渐增加。Nannietal 采用试验方法研究了碳纤维布约束钢筋混凝土圆柱和矩形柱的偏心受压性能,结果表明,通过碳纤维布约束能够提高钢筋混凝土压弯构件的承载能力,钢筋混凝土柱侧向压应变、压应力是影响承载能力的主要因素。Tamer 也研究了碳纤维布约束混凝土柱在偏心压力下的性能,采用的钢筋混凝土柱试件高 1.2m,共 12 根,截面尺寸为 125mm×125mm,纵向受力钢筋配筋率为 1.9%,研究表明,碳纤维布对混凝土柱的约束作用随着偏心率的增大而减小;当偏心率为 0.3 时,全柱包裹碳纤维布后钢筋混凝土柱抗压强度增幅约 37%;当偏心率增大到 0.86 时,粘贴碳纤维布后钢筋混凝土柱抗压强度增幅仅有 3%。研究结果还表明,碳纤维布部分包裹比全包裹抗压强度降幅约 5%。

粘贴碳纤维材料加固钢筋混凝土板方面的研究相对较少。Erki 和 Heeffnnan 采用试验方法研究了外贴碳纤维板加固钢筋混凝土双向板的受力性能,并对加拿大规范中相关加固设计方法进行验证,结果表明,承载力试验值比规范计算值高出了许多。Ahshaawy M 和 Betielmna T 对已有损伤的预应力钢筋混凝土板采用外贴碳纤维布的方法进行试验研究,基于弯矩、变形、裂缝和破坏方式,分析了裂纹或者开孔对碳纤维布加固板受力性能的影响,研究结果发现,经碳纤维布加固的钢筋混凝土板刚度和强度明显提高,接近甚至超过了原来没有破损的试件;并且,从加载至破坏加固板保持了较好的结构完整性。Limam O

等对受拉面上粘贴碳纤维布加固的钢筋混凝土双向板进行了研究,把经过碳纤维布加固的钢筋混凝土板理想化为三层板,建立了一种极限分析模型,预测了经碳纤维布加固后钢筋混凝土板的极限承载力和破坏模式。

1.3.2 国内研究现状

相比国外碳纤维加固技术研究与应用,我国的研究与应用相对较晚,1997年开始碳纤维布补强加固钢筋混凝土构件的研究工作,许多高等院校和科研单位相继开展碳纤维加固技术的研究。2003年,中国工程建设标准化协会颁布实施了《碳纤维布加固修复混凝土结构技术规程》CECS 146:2003,这些研究工作很好地推动了碳纤维加固技术在我国钢筋混凝土结构或构件加固工程中的应用。

国内开展碳纤维加固技术研究工作较早的单位有清华大学、东南大学、天津大学、哈尔滨工业大学等。东南大学吴刚等人进行了碳纤维布加固钢筋混凝土梁抗剪的试验研究,得出影响碳纤维布加固效果的因素包括:原梁的配箍率、碳纤维布名义“配箍率”、碳纤维布层数与粘贴方式、被加固构件剪跨比、加固前梁本身的状况、胶粘剂种类等,同时提出了采用碳纤维布加固后梁的受剪承载力的计算公式。天津大学赵彤等人采用试验方法,研究了碳纤维布粘贴层数、梁剪跨比、梁配箍率以及原构件混凝土强度等因素对加固效果的影响,同时,在相关研究基础上,提出了简化设计计算公式。清华大学叶列平、谭壮等人进行了U形碳纤维布加固钢筋混凝土梁受剪性能的试验研究,分析了剥离破坏时碳纤维布的发挥效率和受剪贡献以及影响,提出了U形碳纤维布加固钢筋混凝土梁受剪剥离承载力的计算方法。哈尔滨工业大学张自容等人也进行了碳纤维布加固钢筋混凝土梁抗剪性能试验研究,试验过程中测试了试验梁的应变和变形,观测了裂缝形态和发展趋势。结果表明,采用碳纤维布对钢筋混凝土梁进行抗剪加固后,钢筋混凝土梁的受剪承载力显著增大,增幅达25%以上,可使钢筋混凝土梁的破坏形态由加固前的剪切破坏转变为加固后的弯曲破坏;经碳纤维布抗剪加固后,钢筋混凝土梁的抗弯刚度也表现出增大的趋势,但增幅不明显;碳纤维布强度利用系数的取值应考虑碳纤维布用量、碳纤维布加固方式等因素。熊光晶等采用碳纤维布和玻璃纤维布混合加固钢筋混凝土梁,研究结果表明,相对单一碳纤维布加固方法而言,混合加固方法既能提高被加固构件的延性,还能大幅降低加固费用。

同时,体外预应力碳纤维加固技术也有较多研究。湖南大学方志教授对体内有粘结和部分粘结预应力碳纤维筋混凝土梁、体外预应力碳纤维筋混凝土梁、碳纤维筋预应力锚具开展了系统的研究工作。东南大学吕志涛院士等开展了碳纤维筋混凝土梁、碳纤维筋锚具的研究与开发工作,并用于实际工程。王鹏等对配置体外预应力碳纤维筋混凝土梁进行了实桥设计、研究及有限元分析。王彤等开展了配置体外预应力碳纤维筋混凝土桥梁的试验研究工作,并开发了非线性有限元全过程分析程序。

在碳纤维布加固钢筋混凝土柱方面,国内也开展了许多研究。邓宗才等总结了国内外碳纤维布约束混凝土应力-应变关系的有关研究成果,分析、探讨了已有应力-应变曲线模型的优缺点,并采用试验方法对这些模型进行了验证,基于试验结果提出了自己的应力-应变曲线模型。于清总结、比较了已有碳纤维布约束混凝土轴心抗压构件的试验结果,利用碳纤维布约束混凝土的应力-应变本构模型对其进行了分析、计算,发现采用不同本构

模型计算所得的结果存在较大的差别。潘景龙等采用碳纤维布约束钢筋混凝土短柱试件,进行了轴心受压、偏心受压和受弯性能试验研究,试验结果表明,偏心压力作用下碳纤维布约束钢筋混凝土柱表现出较好的延性;由于碳纤维布横向约束作用,钢筋混凝土柱抗压强度和变形能力明显提高,与同条件下未加固的钢筋混凝土短柱相比,经过碳纤维布加固的偏压短柱各项受力性能都有较大提高,抗弯性能也有显著提高;碳纤维布约束钢筋混凝土短柱 $N-M$ 曲线可以通过求解钢筋混凝土偏心受压短柱承载力方程组而获得。曹双寅等采用试验方法研究了碳纤维布加固钢筋混凝土柱的偏心受压性能,结果表明,碳纤维布约束钢筋混凝土柱的加固方法可明显提高小偏心受压柱的承载力和延性,并且,随着偏心距增大加固效果表现出逐渐降低的趋势。洗巧玲等也进行了碳纤维布约束钢筋混凝土柱偏压性能的试验,研究参数包括偏心率、碳纤维布粘贴方式、混凝土强度等级以及纵筋配筋率等,试验结果表明,在构件受拉区采用纵向粘贴碳纤维布加固大偏心受压柱,可以明显提高钢筋混凝土柱的受力性能;但是,将这种加固方法用于小偏心和轴心受压柱,承载力增幅不明显;对于低配筋率的偏心受压柱,采用碳纤维布加固后可明显提高承载力;纵横向混合粘贴碳纤维布也可显著提高大偏心受压柱承载力;当混凝土强度等级过低,采用碳纤维布粘贴加固偏心受压柱的效果较差。

在粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土板方面,国内研究成果非常少。张继文、吕志涛等开展了外贴碳纤维布加固钢筋混凝土双向板的试验研究,并基于塑性铰线理论提出了碳纤维布加固钢筋混凝土双向板承载力计算方法。刘立成、杨三汉等也利用钢筋混凝土双向板的塑性铰线法设计理论,研究了碳纤维布加固钢筋混凝土双向板的设计计算方法。吴波等研究了碳纤维布加固钢筋混凝土板的耐火性能,试验结果表明,只要采取适当的防火措施,在使用荷载明显增大的情况下,碳纤维布加固钢筋混凝土板仍具有与未加固板相当甚至更长的耐火极限。

1.4 本书主要研究工作

本书是在内蒙古自然科学基金项目(200208020211)和内蒙古交通厅科技项目(NJ-2006-16)的资助下,完成了钢筋混凝土梁抗弯、抗剪、抗扭的研究工作,以及预应力钢筋混凝土空心板、钢筋混凝土双向板,钢筋混凝土双向偏心受压柱的研究工作,通过整理所取得的研究成果而完成的。主要包括:

- (1) 碳纤维布加固钢筋混凝土受弯构件失效分析与承载力计算;
- (2) 碳纤维布加固钢筋混凝土受剪构件失效分析与承载力计算;
- (3) 碳纤维布加固钢筋混凝土受扭构件失效分析与承载力计算;
- (4) 碳纤维布加固预应力钢筋混凝土空心板失效分析与承载力计算;
- (5) 碳纤维布加固钢筋混凝土双向板失效分析与承载力计算;
- (6) 碳纤维布加固钢筋混凝土双向偏心受压构件失效分析与承载力计算。

第 2 章 碳纤维布加固钢筋混凝土受弯构件失效分析与承载力计算

本章进行了碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯承载力试验研究，设计了 12 种工况，碳纤维布以不同方式粘贴，荷载以不同方式施加。本章主要分析了粘贴碳纤维布后，梁的承载力、挠度、裂缝宽度、延性以及混凝土、钢筋、碳纤维布的应变变化情况，研究了影响碳纤维布性能发挥、影响加固效果的各种因素以及梁的破坏形态，提出了碳纤维布不同粘贴方式下，梁的正截面受弯承载力计算方法。

结果表明，碳纤维布能有效提高梁的受弯承载力与刚度、减小裂缝宽度，粘贴碳纤维布后，在相同荷载作用下，梁的纵向受力钢筋以及混凝土的应变明显减小，用本书提出的计算方法得到的计算结果和试验结果比较接近，且偏于安全。另外，为使碳纤维布性能得到充分利用，必须保证施工质量。

2.1 试验概况

2.1.1 试验材料

本章试验所用到的材料包括钢筋、混凝土以及碳纤维布。混凝土材料的强度等级按 C30 试配，其试件的力学指标如表 2.1 所示，钢筋的种类和力学指标如表 2.2 所示，碳纤维布(CFRP)的类型和性能指标如表 2.3 所示。

混凝土力学指标 表 2.1

棱柱体抗压强度 f_c (MPa)	立方体抗压强度 f_{cu} (MPa)	弹性模量(GPa)
19.97	29.80	29.7

钢筋力学指标 表 2.2

种类	屈服强度 f_y (MPa)	极限强度 f_u (MPa)	弹性模量(10^5 MPa)
Φ 6	424.03	532.40	2.1
Φ 8	374.41	420.86	2.1
Φ 12	341.88	475.98	2.1

碳纤维布性能指标 表 2.3

型号	纤维密度(g/cm ³)	单层厚度(cm)	抗拉强度(MPa)	弹性模量(10^5 MPa)	极限应变(%)
ACE200	1.8	0.111	4935	2.35	2.1

2.1.2 试件设计

试件分为 2 组，第一组试件(BI)和第二组试件(BII)，各组试件的碳纤维布粘贴情况与加载方式如表 2.4 所示。

各组试件的碳纤维布粘贴情况与加载方式

表 2.4

组号	编号	配布情况	说明	截面
	BI0	不配布		见图 2.3
	BI1	梁底面粘贴一层 CFRP，宽 100mm	加载前粘贴 CFRP	见图 2.3
	BI2	梁底面粘贴两层 CFRP，每层宽 100mm	加载前粘贴 CFRP	见图 2.3
	BI3	梁两侧在受拉区粘贴一层 CFRP，每侧高 50mm	加载前粘贴 CFRP	见图 2.3
	BI4	梁两侧在受拉区粘贴一层 CFRP，每侧高 100mm	加载前粘贴 CFRP	见图 2.3
BI	BI5	梁两侧在受拉区粘贴两层 CFRP，每侧高 50mm	加载前粘贴 CFRP	见图 2.3
	BI6	梁两侧在受拉区粘贴一层 CFRP，每侧高 150mm	加载前粘贴 CFRP	见图 2.3
	BI7	不粘碳纤维	反复荷载作用	见图 2.3
	BI7.1	梁底面粘贴一层 CFRP，宽 100mm	加载前粘贴 CFRP，反复荷载作用	见图 2.3
	BI8	同 BI1	加载到出现裂缝， $W < [W]$ ，在不卸载的情况下粘贴 CFRP，之后继续加载，直到破坏	见图 2.3
	BI9	同 BI1	加载到出现裂缝， $W < [W]$ ，卸载之后粘贴 CFRP，之后继续加载，直到破坏	见图 2.3
	BI10	不配布		见图 2.3
BII	BII1	梁底面粘贴一层 CFRP，分两条粘贴，每条宽 45mm	加载到出现裂缝， $W > [W]$ ，卸载使裂缝闭合之后粘贴 CFRP，之后继续加载，直到破坏	见图 2.3
	BII2	梁底面粘贴一层 CFRP，分两条粘贴，每条宽 45mm	加载到出现裂缝， $W > [W]$ ，卸载修补裂缝之后粘贴 CFRP，之后继续加载，直到破坏	见图 2.3

第一组试件(BI)：梁的实际长度 $l=2200\text{mm}$ ，支撑点之间的距离 $l_0=2000\text{mm}$ ；在梁两端距离支撑点 500mm 处作用对称集中荷载 P ；梁截面尺寸 $b \times h=100\text{mm} \times 200\text{mm}$ ，纵筋、箍筋采用 HPB235 钢筋，梁下部纵向受力钢筋采用 $2\phi 8$ ，梁上部架立筋采用 $2\phi 6$ ，加载点到梁端部之间的箍筋采用 $\phi 6@100$ ，加载点之间的箍筋采用 $\phi 6@200$ 。凡粘贴纵向碳纤维布的梁在支座附近粘贴碳纤维 U 形箍以加强锚固，BI1、BI3、BI4、BI5、BI6 在每个支座之外各粘贴一道宽 100mm 的碳纤维 U 形箍，BI2、BI7、BI8、BI9 各梁左右各粘贴三道 U 形箍，每道宽 100mm，如图 2.1 所示。