



21世纪技术与工程著作系列·土木工程

AFRP约束混凝土柱 性能理论

王元丰 著



科学出版社

21 世纪技术与工程著作系列·土木工程



AFRP 约束混凝土柱 性能理论

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书旨在对 AFRP 约束混凝土短柱的轴压性能进行理论分析, 主要包括短期荷载作用下 AFRP 约束高强混凝土和高强钢筋混凝土短柱的性能、长期荷载作用下(后) AFRP 约束混凝土短柱的性能、AFRP 约束混凝土短柱的尺寸效应研究及多尺度分析。

本书可供从事土木工程、力学等研究的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

AFRP 约束混凝土柱性能理论/王元丰著. —北京: 科学出版社, 2011
(21 世纪技术与工程著作系列·土木工程)
ISBN 978-7-03-030375-2

I. ①A… II. ①王… III. ①钢筋混凝土柱-轴压比-研究 IV. ①TU375.302

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 028537 号

责任编辑: 童安齐/责任校对: 刘玉靖

责任印制: 吕春珉/封面设计: 耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 3 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2011 年 3 月第一次印刷 印张: 13 1/2

印数: 1—1 500 字数: 257 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62135763-8020

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

延长结构物的服役寿命是土木工程可持续发展的重要内容之一。由于长期使用和自然灾害等造成的损伤和老化,大量房屋、桥梁等结构处于不安全和影响正常使用状态。土木工程投资大,拆除重建消耗大量的资源和能源,还会对环境造成不良影响,因此对既有结构物的维修、加固与改造已成为土木工程的重要任务,并将成为未来发展的重要方向。

与传统的加固补强技术相比,纤维增强复合材料(FRP)加固补强结构技术具有明显的技术优势,从20世纪70年代在土木工程结构中应用以来取得了显著进展。芳纶纤维增强复合材料(AFRP)作为FRP材料的一种,除了具有FRP材料的一般优点外,还具有更为良好的抗冲击、耐疲劳性能和介电性等,自问世以来,已广泛应用于国防、航空航天业等行业。近十年来,随着价格的降低,AFRP已越来越多地应用到土木工程结构的加固补强中。

目前国内外学者对碳纤维增强复合材料(CFRP)和玻璃纤维增强复合材料(GFRP)约束混凝土柱的性能已进行了大量的研究,因此,本书研究内容是针对目前研究较少的AFRP约束混凝土短柱,研究目标定位在开拓FRP约束混凝土柱的研究领域、深化对FRP增强混凝土结构的科学认识。本书的研究对象是AFRP约束混凝土短柱和AFRP约束钢筋混凝土短柱,这是AFRP在实际工程中应用最广泛的领域,具体内容主要包括以下三个方面:

(1) 短期荷载作用下AFRP约束高强混凝土柱和高强钢筋混凝土柱的性能。高强混凝土尽管强度较高,具有能够减小构件截面尺寸、减轻结构自重等优点,但与普通强度的混凝土相比,高强混凝土的脆性更突出,而外包AFRP布约束后其强度和延性将有所提高。本书研究高强混凝土柱受到外包AFRP布的约束作用后的性能,分析AFRP的层数和缠绕方式、混凝土柱的横截面形状及混凝土强度等因素的影响,建立AFRP约束高强混凝土柱及高强钢筋混凝土柱的应力-应变关系模型。

(2) 长期荷载作用下AFRP约束混凝土柱的性能。FRP约束混凝土柱在长期荷载作用下,不但混凝土会发生收缩和徐变,而且FRP本身也将发生徐变变形,甚至会发生徐变断裂。FRP约束混凝土柱的徐变将对结构性能产生影响。本书通过试验研究AFRP全包裹、间隔包裹高强混凝土及粉煤灰混凝土圆形、方形截面柱的收缩及徐变性能,建立FRP约束高强混凝土及粉煤灰混凝土柱的徐变预测模型。更为重要的是,本书开展了目前尚处空白的FRP约束混凝土柱

徐变后性能研究, 给出 AFRP 约束素混凝土及钢筋混凝土圆形、方形截面柱徐变和收缩及徐变后力学性能的测试结果, 基于微预应力固结理论和塑性损伤理论, 提出 FRP 约束混凝土柱徐变-塑性本构模型。

(3) AFRP 约束混凝土柱的尺寸效应研究及多尺度分析。现有的 FRP 约束混凝土柱相关研究中, 绝大多数都是基于小尺寸试件展开, 得到的预测模型和规范设计公式均未考虑尺寸效应的影响, 这可能造成研究中的偏差和设计实践中的不安全。混凝土破坏本质是缘于微观损伤引起的宏观破坏, 要深刻了解 FRP 约束混凝土柱的性能, 就不能停留在表象的宏观尺度上, 而应恰当地进行多尺度分析, 使宏观、微观分析结合起来, 在较深层次上解释混凝土的行为机制。本书通过试验测定轴压荷载下 AFRP 约束混凝土柱的尺寸效应, 采用多因素效应的析因分析方法, 对试验数据进行统计分析, 获得 AFRP 约束混凝土短柱尺寸效应的特点。基于材料破坏的微结构稳定理论, 构建混凝土短柱轴压破坏的失效模式, 建立未约束混凝土短柱和 FRP 约束混凝土短柱极限强度的多尺度解析模型, 提出混凝土的分形-微平面模型, 建立 FRP 约束混凝土短柱的多尺度数值模型。

本书是作者课题组多年开展 FRP 约束混凝土柱研究工作的总结。特别感谢吴寒亮博士, 是他勤奋而富有创新性的工作, 使得我们课题组 FRP 约束混凝土柱的试验与理论研究工作能够取得突破。如果不是他的不懈努力, 这本书是不可能这样顺利完成的! 特别感谢张电杰和马伊硕两位博士, 他们坚实的理论研究工作不但使我们在 FRP 约束混凝土柱徐变方面的研究走向深入, 而且让我们能够将混凝土短期性能与长期性能理论结合, 研究 FRP 约束混凝土柱徐变后性能。感谢韩冰副教授、刘明辉博士, 他们辛勤的组织 and 无私的奉献, 使我们在条件较为困难的情况下, 开展了大量复杂而富有成效的试验工作。感谢周长东副教授、倪永军副教授、余流博士、周耀博士和曹健博士, 感谢研究生周浪、王双剑、朱海斌、杜金生、雷阳、刘可为、李鹏, 他们的辛勤工作为本书的完成打下良好的基础。

本书的研究工作得到教育部新世纪优秀人才项目“复合材料约束混凝土的徐变性能研究”、国家自然科学基金项目“芳纶复合材料约束高强钢筋混凝土柱变形性能的研究”、国家“十一五”科技支撑项目“既有建筑性能的综合评定技术研究”、铁道部科技基金重点项目“新型复合材料在铁路桥梁加固中的应用”、交通部西部科技重点项目“震后桥梁评价及加固技术研究”、山东省交通厅项目“芳纶复合材料在公路桥梁加固中的应用”以及内蒙古交通厅项目“复合材料加固公路桥梁综合性能研究”的资金资助, 在此表示感谢。此外, 还要感谢深圳市海川实业股份有限公司为本书试验研究提供了芳纶复合材料。

经过 30 年的发展, FRP 在土木工程中的应用日趋广泛, FRP 加固混凝土构

件与结构的研究也逐步走向深入，但是仍然有大量的理论与实际问题需要研究。希望这本书的出版能够对相关研究工作者起到参考作用，吸引更多的人开展 FRP 加固混凝土结构研究，促进土木工程的可持续发展。

王元丰

2010 年 11 月

目 录

前言

第一章 概论	1
1.1 AFRP 约束混凝土柱的特点	1
1.1.1 芳纶纤维材料的特点	2
1.1.2 AFRP 加固混凝土柱的特点	3
1.2 AFRP 加固混凝土结构的规范规程	4
1.3 工程应用	6
1.4 本书的主要内容	7
第二章 短期荷载作用下 AFRP 约束高强素混凝土柱的性能	9
2.1 引言	9
2.2 研究现状	9
2.2.1 试验研究	10
2.2.2 理论研究	13
2.2.3 数值分析	15
2.2.4 相关规范	15
2.3 试验研究	17
2.3.1 试验设计	17
2.3.2 试验结果和分析讨论	20
2.4 预测模型	23
2.4.1 强度的预测模型	23
2.4.2 变形的预测模型	25
2.4.3 应力-应变关系曲线的预测模型	26
2.5 数值分析	30
2.5.1 材料本构关系	30
2.5.2 有限元模型	30
2.5.3 数值分析结果	31
第三章 短期荷载作用下 AFRP 约束高强钢筋混凝土柱的性能	34
3.1 引言	34
3.2 研究现状	34
3.2.1 FRP 约束普通钢筋混凝土	34

3.2.2	FRP 约束高强混凝土	35
3.3	试验研究	36
3.3.1	试验设计	36
3.3.2	试验结果和分析讨论	38
3.4	预测模型	44
3.4.1	AFRP 约束高强钢筋混凝土圆形截面柱	44
3.4.2	AFRP 约束高强钢筋混凝土方形截面柱	50
3.5	数值分析	54
3.5.1	材料本构关系	54
3.5.2	有限元模型	55
3.5.3	数值分析结果	55
第四章	长期荷载作用下 AFRP 约束混凝土柱的性能	57
4.1	引言	57
4.2	研究现状	58
4.2.1	高强混凝土的长期性能	58
4.2.2	粉煤灰混凝土的长期性能	58
4.2.3	FRP 约束混凝土柱的长期性能	59
4.3	试验研究	59
4.3.1	试验依据	59
4.3.2	试验设计	60
4.3.3	试验材料	60
4.3.4	试验方法	61
4.4	混凝土徐变、收缩模型	63
4.4.1	混凝土的徐变模型	63
4.4.2	高强混凝土的徐变模型	65
4.4.3	粉煤灰混凝土的徐变模型	67
4.4.4	轴向变应力下混凝土徐变	67
4.4.5	三轴应力下混凝土徐变	68
4.4.6	高强混凝土自生收缩模型	68
4.5	FRP 徐变模型	68
4.5.1	常应力作用下的 FRP 徐变	68
4.5.2	变应力作用下的 FRP 徐变	69
4.6	FRP 约束混凝土柱徐变模型	69
4.6.1	轴心荷载作用下 FRP 全包裹混凝土圆柱短期受力分析	69
4.6.2	轴心荷载作用下 FRP 全包裹混凝土圆柱的徐变分析	70

4.6.3 轴心荷载作用下 FRP 间隔包裹混凝土圆柱的徐变分析	72
4.6.4 轴心荷载作用下 FRP 全包裹混凝土方柱的徐变分析	73
4.7 试验及模型分析结果与讨论	74
4.7.1 AFRP 全包裹高强混凝土圆柱	74
4.7.2 AFRP 全包裹粉煤灰混凝土圆柱	76
4.7.3 AFRP 间隔包裹高强混凝土圆柱	77
4.7.4 AFRP 全包裹粉煤灰混凝土方柱	78
4.8 参数分析	79
第五章 长期荷载作用后 AFRP 约束混凝土柱的性能	90
5.1 引言	90
5.2 研究现状	91
5.3 试验研究	91
5.3.1 AFRP 约束混凝土圆柱	92
5.3.2 AFRP 约束混凝土方柱	93
5.4 徐变-塑性应力-应变关系模型	96
5.4.1 微预应力固结理论	96
5.4.2 混凝土塑性本构模型	98
5.4.3 有效塑性应变和塑性应变参数	100
5.4.4 钢筋和 AFRP 的本构模型	100
5.4.5 数值方法	101
5.5 试验结果分析及模型验证	103
5.5.1 AFRP 约束混凝土圆柱	103
5.5.2 AFRP 约束混凝土方柱	107
第六章 AFRP 约束混凝土柱的尺寸效应	110
6.1 引言	110
6.2 研究现状	110
6.2.1 混凝土尺寸效应的研究历史	111
6.2.2 混凝土尺寸效应产生的原因	111
6.2.3 混凝土尺寸效应的分析理论和方法	113
6.2.4 FRP 约束混凝土柱的尺寸效应	115
6.3 试验研究	116
6.3.1 试验方案	116
6.3.2 AFRP 约束混凝土圆形截面柱	118
6.3.3 AFRP 约束混凝土方形截面柱	120
6.4 试验结果和分析	123

6.4.1	破坏模式	123
6.4.2	应力-应变关系曲线	123
6.4.3	统计分析	132
6.5	尺寸相关的预测模型	139
6.5.1	强度预测模型	139
6.5.2	变形预测模型	146
6.5.3	应力-应变关系预测模型	148
第七章	AFRP 约束混凝土柱的多尺度分析	150
7.1	引言	150
7.2	研究现状	150
7.2.1	混凝土多尺度分析的研究现状	150
7.2.2	混凝土多尺度分析的研究方法	151
7.3	基于微结构稳定理论的多尺度解析模型	153
7.3.1	微结构稳定理论	153
7.3.2	混凝土的受压破坏机制	154
7.3.3	方形截面柱极限强度的解析模型	156
7.3.4	圆形截面柱极限强度的解析模型	165
7.4	基于分形-微平面模型的多尺度数值分析	174
7.4.1	混凝土的分形-微平面模型	174
7.4.2	数值模型的建立及结果分析	188
参考文献		193

第一章 概 论

延长建筑物的服役寿命是土木工程可持续发展的重要内容之一。在很多发达国家,既有建筑物的维修、加固与改造已成为其基础设施建设的重点。据统计,美国现有超过 60% 的建筑物需要修缮^[1]。在我国,建筑物的设计基准期通常为 50 年,由于新中国成立初期的设计标准较低,建筑材料质量不高,长期使用造成的损坏和老化等原因,我国已有大量建筑物处于“老龄”状态;同时,我国是一个地质灾害多发国家,频繁的地质灾害使得许多较新的建筑物处于“亚健康”状态。因此,维修、加固与改造已成为我国土木工程当前紧迫、重要的任务之一,并将成为行业未来发展的重要方向之一。

与传统加固技术(如粘贴钢板、增大截面及体外预应力等)相比,纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)加固混凝土结构具有质量增加少、操作简单、耐腐蚀性好及非破损性等优点,已成为被普遍认可和广泛应用的加固技术。FRP 加固修复土木结构技术于 20 世纪 70 年代初在发达国家开始研究与应用。1982 年瑞士人 Meier 首先尝试采用粘贴 FRP 对桥梁结构进行加固的研究,随后使用 FRP 进行结构加固的方法在日本、美国和欧洲等发达国家或地区得到突飞猛进的发展,许多学者、科研机构对 FRP 材料加固修补结构技术进行了大量研究^[2~11]。1991 年美国混凝土协会(ACI)成立了 ACI 440 委员会,负责开展纤维增强复合材料加固混凝土与砌体结构的研究。加拿大也成立了一个 FRP 加固修补土建结构相关的国家重点研究开发基地。1993 年 ACI 在加拿大主办了第一届国际 FRP 专题会议,此后每两年举办一次有关 FRP 混凝土方面的国际学术研讨会。1999 年 3 月日本土木学会成立了 FRP 加固委员会,并完成了应用 FRP 材料对混凝土结构进行加固修复的草案。其他国家如德国、瑞士等也进行了大量的研究、应用工作,成立了相应的研究机构。

1.1 AFRP 约束混凝土柱的特点

目前,常用的 FRP 材料包括碳纤维复合材料(Carbon FRP,简称 CFRP)、玻璃纤维复合材料(Glass FRP,简称 GFRP)、芳纶纤维复合材料(Aramid FRP,简称 AFRP)、玄武岩纤维复合材料(Basalt FRP,简称 BFRP)和混合纤维复合材料(Hybrid FRP,简称 HFRP)等,其主要参数如表 1-1 所示。可以看出,CFRP 的抗拉弹性模量最大、断裂应变(抗拉延伸率)最小、抗拉强度普遍较高;GFRP 的抗拉弹性模量最小、断裂应变最大;AFRP 和 BFRP 则介于前

二者之间；AFRP 的热膨胀系数最大，而 GFRP 和 BFRP 最小；GFRP 和 BFRP 的价格最低，而 AFRP 的价格最高；BFRP 的密度最大，其他三种较为接近。另外，已有研究表明^[7]：GFRP 的徐变断裂强度最小，CFRP 的徐变断裂强度最大；AFRP 的抗疲劳性能最好。因此，在选择 FRP 材料时，应根据上述特点，按照工程要求并结合经济情况合理选择。

表 1-1 常用 FRP 材料的主要参数

类型	抗拉强度 $f_{\text{FRP}}/\text{MPa}$	弹性模量 $E_{\text{FRP}}/\text{GPa}$	断裂应变 ϵ_{FRP} $/(\times 10^{-2}\text{m/m})$	热膨胀系数 $/(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	预算价格 ¹⁾ $/(\text{元}/\text{m}^3)$
CFRP (普通型) ²⁾	2050~3790	220~235	1.2	22~50	300~500
CFRP (高强型) ²⁾	3790~4825	220~235	1.4		
CFRP (高弹模型) ²⁾	1725~2100	345~515	0.5		
CFRP (超高强型) ²⁾	4825~6200	220~325	1.5		
CFRP (超高弹模型) ²⁾	1375~2400	515~690	0.2		
GFRP (无碱型) ²⁾	1860~2685	69~72	4.5		
GFRP (高强型) ²⁾	3445~4135	86~90	5.4	19~23	200~400
AFRP (普通型) ²⁾		69~83	2.5		
AFRP (高性能型) ²⁾	3445~4135	110~124	1.6	60~80	500~800
AFRP (AFS-60) ³⁾	2060	118	1.7	NA ⁵⁾	
BFRP ⁴⁾	3000~3500	79~93	3.2	20~22	200~400

1) 表示该列数据来源于作者对市场的价格调查，仅作为参考数据。

2) 表示数据来源于文献 [7]。

3) 表示本书所采用的 FRP 材料。

4) 表示数据来源于文献 [12]。

5) 表示数据不可得。

1.1.1 芳纶纤维材料的特点

AFRP 是已工业化的高性能增强纤维中唯一的有机纤维，在现有的高性能复合材料中，AFRP 的用量仅次于 CFRP^[13~18]。芳纶纤维具有超高强、超高模量、耐高温和密度小等特性，其强度比一般有机纤维高 3 倍以上，相对强度相当于钢丝的 6~7 倍，受拉弹性模量为玻璃纤维的 2~3 倍，密度只有钢丝的 1/5 左右。AFRP 吸收冲击波效率高、隔爆性能好，具有良好的抗冲击、耐疲劳性能以及良好的耐屈折性和加工性能，优良的介电性和化学稳定性等；AFRP 材料能够承受有机溶剂、燃料、强酸、强碱等的腐蚀^[13]。芳纶纤维还有一个重要的优异特性是长久热稳定性，可在 220℃ 高温下使用 10 年以上，其使用寿命高于现有的绝大多数工业有机纤维。在 260℃ 条件下加热 1000h，芳纶纤维的机械强度仍能够保持原来的 65%~70%，在火焰中难以自燃，即使点燃后移开火焰也会自熄。同时，毒性试验也表明，芳纶纤维不会对生产者和使用者造成明显的健康危害，AFRP 在温度高达 400℃ 时仍无 CO、CO₂ 和 HCN 等有毒气体产生，在

800℃时仅测得 1% HCN、13% CO 和 15% CO₂ 产生。由于 AFRP 具有优异的力学性能及安全的工作性能,已被用于航天飞机、火箭、飞机、导弹的结构材料、坦克的防弹装甲、防弹衣、耐磨轮胎及赛艇的结构材料等。我国现在每年使用芳纶仅占世界的 1/40,芳纶复合材料在中国的应用有广阔的空间。

与碳纤维相比,芳纶纤维的密度更小,拉伸强度下降在 20% 左右,但断裂伸长率则提高 60% 以上。芳纶纤维的抗冲击和耐疲劳性能大大优于碳纤维,在耐火性能、耐腐蚀方面也好于碳纤维。芳纶纤维的另一个显著优于碳纤维的特点是其破坏为非脆性,破坏前出现颈缩,有明显征兆^[18]。因此,AFRP 在对构件韧性和延性要求高的抗震结构、抗冲击和耐疲劳、防火、耐腐蚀方面要求高的工程结构的应用比 CFRP 有较大的优越性。近些年 AFRP 才刚刚开始土木工程中应用,限制其在土木工程中应用的最大因素是其比碳纤维价格高。但是,随着技术进步、应用的增多,AFRP 的价格已大幅度下降,并与 CFRP 接近,AFRP 的应用将会越来越广泛。

1.1.2 AFRP 加固混凝土柱的特点

AFRP 约束混凝土柱的工作原理与其他 FRP 约束混凝土柱相同,该项加固技术是通过在混凝土柱外表面缠绕粘贴 FRP 材料来提高混凝土柱性能的一种加固方式,其工作原理是:在轴向压力作用下,被约束的混凝土柱发生可观的横向膨胀变形,使得外包的 FRP 材料产生拉伸变形,从而形成了作用于混凝土柱的横向约束力(图 1-1),因而混凝土柱处于三向受压应力状态,其抗压承载力和延性都得以显著提高。由于这种可观的横向膨胀变形是在被约束混凝土柱的轴向压应力达到混凝土抗压强度后才开始产生,FRP 约束混凝土柱的应力-应变(或荷载-变形)关系曲线仅在应力超过混凝土抗压强度后才表现出明显的不同,即形成强化作用,如图 1-2 所示。

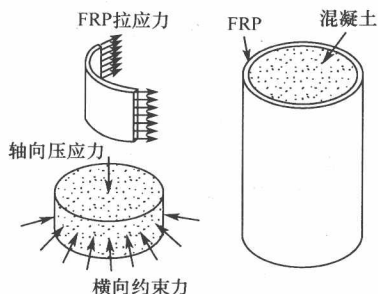


图 1-1 FRP 的约束效应

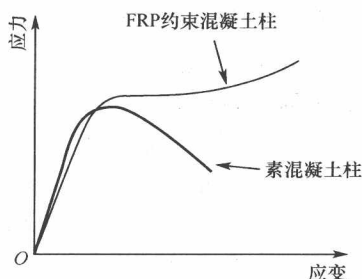


图 1-2 FRP 约束混凝土柱的应力-应变关系曲线

1.2 AFRP 加固混凝土结构的规范规程

从 20 世纪 80 年代起,一些发达国家开始制定土木工程用 AFRP 的规范和标准。由于 AFRP 与传统的金属材料相比弹性模量和延性相对较低,在土木工程规范和标准中单独处理,规范和标准的制定对保证芳纶复合材料在结构工程设计、施工的安全性和可靠性起到重要作用。下面简要介绍一下日本、美国、欧洲和中国有关 AFRP 的规范和标准。这些规范和标准不仅适用于芳纶复合材料(布)对既有结构进行加固修复,同时也适用于新建结构。

1. 日本

从 20 世纪 80 年代起,日本投入大量的人力、物力和财力加紧制定 AFRP 增强混凝土结构的设计和施工标准,这些标准包含了芳纶纤维布、筋(索)增强混凝土结构设计与施工指南。主要有以下三种。

(1)《混凝土结构采用连续纤维增强材料(筋或索)设计与施工建议》(以下简称 DCCSCFRM)。

(2)《FRP 筋(索)增强混凝土结构设计指南》(以下简称 GSDFRPCB)。

(3)《预应力 FRP 筋(索)增强混凝土结构设计方法》(以下简称 DPFR-PCBS)。

DCCSCFRM 作为建议稿,1997 年由日本土木工程师协会出版,目的在于指导 AFRP 加固混凝土结构设计与施工。该建议稿既包括 AFRP 筋(索)的质量规格、试验方法,同时又包括 AFRP 筋(索)的设计与施工说明;材料质量条款规定了工程实践所需的 AFRP 筋(索)的特征与性能,用以指导 AFRP 的发展。AFRP 筋(索)的特征既包括纤维类型,又包括其配置方式。AFRP 筋(索)的性能包括轴向纤维的体积配筋率、纤维筋的横截面面积、抗拉强度、弹性模量、延伸率、徐变断裂强度、松弛比和耐久性等。上述性能的大多数根据 DCCSCFRM 标准中建议的试验确定。DCCSCFRM 以日本土木工程协会(JSCE)颁布的《混凝土结构设计与施工规范》为基础,该标准的施工篇涉及的主要内容包括纤维材料(筋或索)组成,纤维材料的储存、管理,纤维筋的绑扎与配置方式,以及质量控制等。GSDFRPCB 和 DPFRPCBS 标准针对建筑结构,于 1993 年作为最后的研究成果得以修订,该研究得到日本建设省的资助。GSDFRPCB 采用极限状态设计方法,一些细节规定与 DCCSCFRM 不同。1995 年 Hyogoken-Nanbu 地震后,钢筋混凝土桥墩和钢筋混凝土柱越来越多地应用外粘碳纤维布技术进行抗震补强加固,采用 AFRP 布进行补强加固技术也获得了发展。目前,针对芳纶复合材料(布)补强加固公路桥墩和铁路高架桥柱的设计指

南有:

(1)《采用芳纶纤维布补强钢筋混凝土桥墩设计和施工指南》(以下简称 DCGRCAFRP, 日本公路协会)。

(2)《应用芳纶纤维布抗震补强铁路高架桥柱设计与施工指南》(以下简称 DCGRVCAFRP, 日本铁道技术研究院)。

DCGRCAFRP 和 DCGRVCAFRP 标准包括 AFRP 布对抗剪强度和延性贡献的计算公式。对于房屋建筑中的柱子和地铁中的大柱以及桥面板的设计与施工也制订了类似的标准。日本混凝土协会发展了纤维片材的标准试验方法, 该标准试验方法包括纤维片材的抗拉性能试验测定以及黏结强度试验测定。

2. 美国

美国对于 FRP 加固混凝土结构进行了长期连续的研究。从 20 世纪 80 年代开始, 美国国家科学基金和联邦公路管理委员会的资助加速了对该领域的研究与开发。1991 年美国混凝土协会创建了 440 委员会, 即纤维增强塑料加固委员会 (ACI 440 委员会), 该委员会于 1996 年出版了《纤维增强塑料补强混凝土结构发展水平报告》。此后, ACI 440 委员会推出了两部标准, 2001 年获得了技术活动委员会批准。该标准包括:

- (1)《纤维筋增强混凝土结构设计与施工指南》。
- (2)《外粘纤维增强塑料系统补强混凝土结构设计与施工指南》。

目前, ACI 440 委员会正着手制订下述方面的相关标准:

- (1) 纤维增强塑料结构形式。
- (2) 混凝土结构的纤维增强塑料耐久性。
- (3) 纤维增强塑料预应力混凝土构件设计与施工指南。

上述规范与标准中的纤维增强塑料通常包括碳纤维、芳纶纤维和玻璃纤维增强塑料。

3. 欧洲各国

欧洲各国从 20 世纪 60 年代开始进行关于纤维增强塑料应用的研究。1993 年建立的欧洲合作研究计划旨在研究纤维增强塑料增强混凝土结构, 参与者包括英国、瑞士、法国、挪威和荷兰等, 该计划于 1997 年结束。国际混凝土结构联盟的 93 工作组, 即纤维增强塑料增强混凝土结构工作组, 于 1993 年成立。93 工作组又分成如下几个小组: 材料测试小组、钢筋混凝土小组、预应力混凝土小组、外粘纤维增强塑料小组、市场营销和应用小组。该工作组由从事纤维增强塑料补强混凝土结构研究的大学、研究院和公司构成, 目前已完成了《纤维增强塑料增强钢筋混凝土结构设计指南发展公告》, 其适用范围包括 AFRP 材料。在英

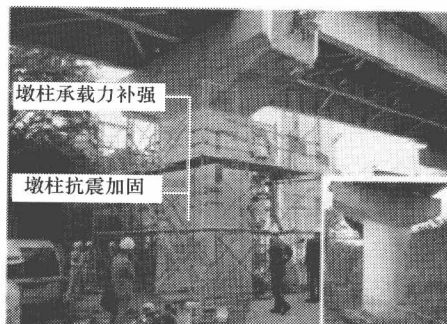
国, 结构工程师协会出版了《关于纤维增强塑料补强钢筋混凝土结构临时设计指南》, 该指南以英国相应的设计规范为基础, 采用的设计方法与日本、美国的标准类似。

4. 中国

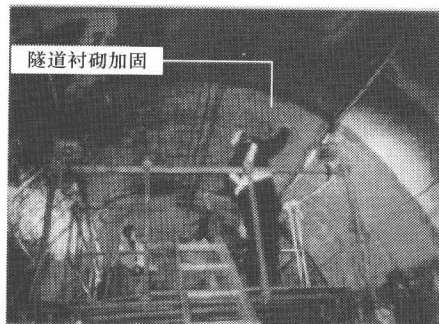
从 20 世纪 90 年代中期起, 我国开始着手进行 FRP 补强加固技术的研究。国内许多科研院所和大学纷纷开展碳纤维布补强加固混凝土结构、砌体结构的研究, 并取得了多项研究成果。在短短的几年时间里, 制订并颁布了《碳纤维片材加固混凝土结构技术规范》(CECS 146: 2003) 和《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2006)。对于 AFRP 材料补强加固混凝土技术, 交通领域已颁布《桥梁结构用芳纶纤维复合材料》标准 (JT/T 531—2004), 该标准对 AFRP 在桥梁结构的常规加固提供了设计依据。尽管如此, AFRP 加固混凝土结构中许多基本问题仍未得到有效解决。

1.3 工程应用

AFRP 加固修补技术可广泛应用于各种结构类型 (如建筑物、构筑物、桥梁、隧道、涵洞、烟囱等), 各种结构形状 (如矩形、圆形、曲面结构等), 各种结构部件 (如梁、柱、板、拱、壳、墩等) 的加固修补, 而且不改变结构形状, 不影响结构的外观。尤其重要的是, 对于一些大型的土木工程结构, 如大型桥梁的桥墩、桥梁及桥面板、隧道、大型筒体及壳体结构等, 采用原有的传统加固方法几乎无法实施, 而采用该技术都可以很顺利地解决。图 1-3 为国内外应用外贴 AFRP 布对桥梁、道路、隧道、建筑物或构筑物等多种混凝土结构构件进行补强加固的工程实例。

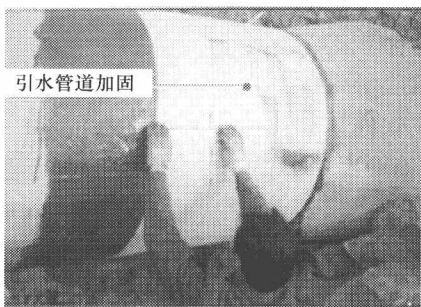
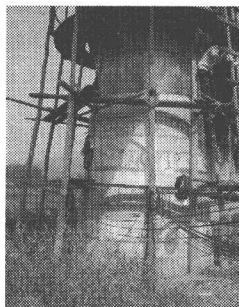


(a) 加固公路桥墩^[19]



(b) 加固隧道^[19]

图 1-3 AFRP 布加固混凝土结构的工程应用

(c) 加固混凝土管道^[19]

(d) 加固混凝土铁路桥墩

图 1-3 AFRP 布加固混凝土结构的工程应用 (续)

1.4 本书的主要内容

本书旨在对 AFRP 约束(钢筋)混凝土短柱的轴压性能进行研究,并通过大量的试验研究,结合深入的理论分析,开展了下列方面的研究工作:

1) 短期荷载作用下 AFRP 约束高强混凝土短柱的性能

通过 AFRP 布约束高强混凝土短柱轴心受压试验,分析混凝土强度、截面形状、AFRP 布的包裹方式和包裹层数等因素对 AFRP 布约束混凝土短柱的承载能力、变形、应力-应变关系、裂缝开展和破坏模式的影响,探讨 AFRP 布约束混凝土柱的工作机理。采用有限元方法对 AFRP 约束高强素混凝土进行了深入分析。建立更为合理的 AFRP 布约束高强混凝土柱的应力-应变关系模型。

2) 短期荷载作用下 AFRP 约束高强钢筋混凝土短柱的性能

通过 AFRP 布约束高强钢筋混凝土短柱轴心受压试验,分析混凝土强度、截面形状、AFRP 布的包裹方式和包裹层数等因素对 AFRP 布约束高强钢筋混凝土短柱的承载能力、变形、应力-应变关系、裂缝开展和破坏模式的影响,从而探讨 AFRP 布约束高强钢筋混凝土柱的工作机理。对 AFRP 约束高强钢筋混凝土短柱进行了数值分析。建立更为合理的 AFRP 布约束高强钢筋混凝土柱的应力-应变关系模型。

3) 长期荷载作用下 AFRP 约束混凝土短柱的性能

在试验研究的基础上,根据混凝土和 AFRP 材料的徐变模型,以及混凝土和 AFRP 材料的协调变形和受力平衡关系,建立了 AFRP 约束混凝土柱的徐变预测模型,并分析了各种参数对 AFRP 约束混凝土柱徐变的影响。

4) 长期荷载作用后 AFRP 约束混凝土短柱的性能

通过试验对长期荷载作用后的 AFRP 约束混凝土短柱的受压性能进行研究。