



湖北省学术著作出版专项资金资助项目
新材料科学与技术丛书

CFRP加固混凝土梁界面 特性研究的新方法

CFRP JIAGU HUNNINGTULIANG
JIEMIAN T EXING
YANJIU DE XINFANGFA



任振华 曾宪桃◎著



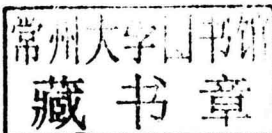
武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

新材料科学与技术丛书

CFRP 加固混凝土梁界面 特性研究的新方法

任振华 曾宪桃 著



武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 简 介

纤维增强复合材料作为优越的混凝土结构加固材料已成为许多学者热心研究的对象,其工程应用的方式包括外贴 FRP、内嵌 FRP 以及对 FRP 施加预应力后进行外贴或内嵌加固等。在分析研究 FRP 应变及被加固构件承载能力时,继续沿用过去研究普通混凝土构件的平截面假定会存在一定误差,故而提出了 FRP 类材料加固混凝土梁应变协调关系的准平截面假定。

本书主要内容分为六章:绪论、CFRP 加固宽缺口混凝土梁试验、CFRP 加固宽缺口混凝土梁弯曲试验结果分析、CFRP 加固宽缺口混凝土梁应变协调关系准平截面假定的构建、CFRP 加固宽缺口混凝土梁界面特性研究、内嵌 CFRP 筋加固宽缺口混凝土梁断裂特性研究。

本书是关于碳纤维增强材料加固宽缺口混凝土梁应变协调关系及界面特性的学术研究著作,可供相关领域人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

CFRP 加固混凝土梁界面特性研究的新方法/任振华,曾宪桃著. —武汉:武汉理工大学出版社,2018.6

ISBN 978-7-5629-5726-3

I. ①C… II. ①任… ②曾… III. ①纤维增强复合材料-钢筋混凝土梁-研究 IV. ①TU375.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 095139 号

项目负责人:张淑芳

责任编辑:余晓亮

责任校对:余士龙

封面设计:匠心文化

出版发行:武汉理工大学出版社

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉兴和彩色印务有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

印 张:13.75

字 数:179 千字

版 次:2018 年 6 月第 1 版

印 次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:60.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87785758 87384729 87165708(传真)

· 版权所有 盗版必究 ·

前 言

土木工程的发展日新月异,人们对工程结构的主观要求越来越苛刻,加之自然灾害、战争烽火、地理环境、人为过失、载荷加重、功能改变等对其使用要求也有所提升,以及设计规范的改进、安全储备提高等原因,大量房屋、桥梁等土木工程结构还没有达到报废标准就需要评估、维修与加固,以使其满足现代生活对其安全性、适用性和耐久性的要求,继续为社会服务。因此,工程结构的评估、检测、维修与加固得到了业界的广泛关注,相关技术的研究与应用具有显著的经济效益和社会效益。

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Plastic 或 Fiber Reinforced Polymer,简称 FRP)是一种强度高、质量小、耐腐蚀、耐疲劳、施工快的材料,已被大量应用于工程结构的维修与加固实践中,并取得了良好的工程效果。作为优越的混凝土结构加固材料,FRP 已成为许多学者研究结构加固的首选,其工程应用包括在被加固的混凝土构件上外贴 FRP、内嵌 FRP 以及对 FRP 施加预应力后进行外贴或内嵌等加固方式。FRP 与被加固构件混凝土之间通过强力结构胶进行黏结,在外荷载作用下 FRP 与混凝土之间的滑移不可避免。在分析研究 FRP 应变及被加固构件承载能力时,继续沿用过去研究普通混凝土构件的平截面假定会存在一定误差。为此,作者提出了 FRP 类材料加固混凝土梁应变协调关系的准平截面假定。以此为前提,本书开展了如下内容的研究:构建了宽缺口混凝

土梁的工法。针对 CFRP-混凝土界面的黏结-滑移特性研究过程中,单剪、双剪试验及梁式试验存在 CFRP 受力不明确、界面应力状态与实际受力状态不符等缺陷,提出了在被加固混凝土梁纯弯段部分切除表层混凝土构造宽缺口混凝土梁的工法。依据宽缺口混凝土梁研究 CFRP-混凝土的界面特性,CFRP 暴露在梁体的纯弯段,承受纯拉应力,受力明确,CFRP 的应变测试和界面平均剪应力求取方便,界面受剪应力与正应力的共同作用,符合被加固混凝土梁界面的实际受力情况。构建了 CFRP 加固混凝土梁应变协调的准平截面假定。外荷载作用下 CFRP 与混凝土之间的滑移不可避免,在求取 CFRP 应变及加固梁承载力时,如果继续沿用普通混凝土梁的平截面假定会带来一定误差。为此,对 CFRP 加固混凝土梁的应变协调关系进行了理论分析和试验验证,提出了准平面假定。依据该假定导出的 CFRP 加固的混凝土梁包括宽缺口混凝土梁的极限承载能力计算公式,满足规定的精度要求。基于应变协调的准平面假定,分析了混凝土梁及宽缺口混凝土梁中 CFRP 板(筋)-混凝土界面黏结-滑移特性,建立了 CFRP 筋加固宽缺口混凝土梁的黏结-滑移本构关系模型回归,得到了 CFRP 加固混凝土梁 CFRP 板(筋)-混凝土界面平均剪应力及剥离承载力的经验计算公式。分析了内嵌和外贴 CFRP 加固宽缺口混凝土梁四点弯状态下的断裂特性,依据宽缺口素混凝土梁拉剪应力状态下裂纹张开与闭合的力学特征,用数值模拟的方法得到了混凝土 I、II 型裂纹尖端的应力强度因子和扩展角的解析计算式,获得了宽缺口混凝土梁四点弯条件下的裂纹扩展方向、扩展角和垂直位移、最大主应力、剪应变率及塑性区的分布特征。

本书共分六章。第一章介绍了纤维材料加固混凝土梁界面特

性的研究现状;第二章阐述了 CFRP 加固宽缺口混凝土梁的试验;第三章分析了 CFRP 加固宽缺口混凝土梁弯曲试验的结果;第四章探讨了 CFRP 加固宽缺口混凝土梁应变协调关系准平截面假定的构建;第五章论述了 CFRP 加固宽缺口混凝土梁的界面特性研究;第六章探索了内嵌 CFRP 筋加固宽缺口混凝土梁断裂特性的研究。

本书的研究成果是在湖南省自然科学基金(2017JJ4016)、湖南省教育厅重点项目(16A050)、湖南工程学院重点学科——“结构工程”的资助下完成的,在编写过程中参考并引用了已公开发表的文献资料和相关教材与书籍的部分内容,得到了许多专家和朋友的帮助,在此表示衷心的感谢。

限于作者的学识和水平,书中难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。

作 者

2017 年 12 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 研究意义	40
1.4 本书研究的内容	43
2 CFRP 加固宽缺口混凝土梁试验	44
2.1 引言	44
2.2 试验材料的力学性能	44
2.3 模型梁的设计与制作	50
2.4 加固方案的确定	53
2.5 试验测试内容	57
2.6 试验过程	61
3 CFRP 加固宽缺口混凝土梁弯曲试验结果分析	68
3.1 引言	68
3.2 外贴 CFRP 板加固宽缺口混凝土梁试验结果分析	68
3.3 内嵌 CFRP 筋加固宽缺口混凝土梁试验结果分析	77
3.4 外贴与内嵌 CFRP 加固宽缺口混凝土梁试验结果对比	90
4 CFRP 加固宽缺口混凝土梁应变协调关系准平面假定的构建	99
4.1 引言	99
4.2 弹性理论的基本假定	103
4.3 粘贴 CFRP 加固的宽缺口混凝土梁应变协调的准平面假定	103

4.4	宽缺口混凝土梁的应变协调准平面假定理论试验结果	108
4.5	内嵌或外贴混凝土梁应变协调的准平面假定理论试验结果 ...	113
5	CFRP 加固宽缺口混凝土梁界面特性研究	121
5.1	引言	121
5.2	CFRP 加固混凝土梁有关问题的分析与评价	122
5.3	内嵌 CFRP 筋加固宽缺口混凝土梁黏结-滑移特性研究	132
5.4	外贴 CFRP 板加固宽缺口混凝土梁黏结-滑移特性研究	152
6	内嵌 CFRP 筋加固宽缺口混凝土梁断裂特性研究	168
6.1	引言	168
6.2	内嵌 CFRP 筋加固宽缺口混凝土梁断裂试验	169
6.3	内嵌 CFRP 筋加固混凝土梁的断裂数值模拟	171
	参考文献	186

1 绪 论

1.1 研究背景

由于自然灾害、战争灾害、地理环境、人为过失、负荷加重、功能改变等对工程结构的使用要求,以及设计规范的不断改进、安全储备提高^[1]等原因,大量房屋建筑、工程桥梁等土木工程结构需要维修与加固,这就导致工程结构的评估、检测、维修及加固成为各国的研究热点。调研统计显示,我国现有 400 多亿平方米的存量房屋建筑中,有 10% 以上需要立即进行结构鉴定与加固;既有公路上的桥梁有 5000 多座危桥,总延长 13 万米;主要干线铁路上有各种混凝土桥梁 90000 余孔,占全部桥梁总延长的 90%,使用年限最长的达 90 年以上。随着服务年限的增长以及铁路运量的日益增大,铁路上混凝土桥梁的病害更加严重。统计显示,铁路部门混凝土桥梁有病害桥 2675 座,混凝土梁破裂损坏 755 座(1996 孔)。在美国,桥梁结构中有 42% 的存在承载力不足或劣损现象,维修或更换已存在缺陷的桥梁需要投资 900 多亿美元。1998—2003 年期间,美国仅用于修复混凝土桥、路、水坝、输水管线等基础设施的投资就高达 13000 亿美元,为初建投资费用的 4 倍^[2];在日本,承载力不足的公路混凝土桥约有 4500 座,在实施维修加固中还专门编制了《混凝土工程裂缝调查及补强加固技术规程》;英国不满足现代规范要求的桥梁约占其桥梁总量的 1/4,若要维修和加固这些桥梁使其达到规范要求需花费 8.3 亿英镑;哈尔科夫公路学院(苏联)近年来就乌克

兰公路桥梁的现状展开的调查表明:混凝土桥中寿命只有 40~50 年或更少的达 40%以上,运营维修周期缩短的大型桥梁日益增多,处于良好状态的永久性桥梁只有 15%,而其余的桥梁要求预防、检修、计划检修(60%)和大修(25%)。总之,旧的建筑物和旧的桥梁由于建造年代久远及受技术水平的限制,其设计标准混乱、施工质量差、病害严重,对建筑行业、铁路运输和公路运输是潜在的隐患。若要拆除病害建筑并建造新的工程予以替代,不仅延误时间、制造污染、消耗财物,而且桥梁还要封闭交通,造成的资源和财产损失难以估计,为国家的国情和财力所不容。有效的办法应该是在对病害建筑进行评估判断的基础上,采取合理的维修、加固技术对策,使其承载能力得到提高或恢复,以满足使用需求。国外资料表明,旧桥加固所需费用为新建公路桥梁费用的 10%~20%,一般新桥的建设投资超出旧桥加固费用的 0.5~2 倍。在我国,公路桥梁的加固费用为新建公路桥梁费用的 10%~20%,双曲拱桥加固费用为新建桥费用的 30%。由此,对承载能力下降但又未达到报废条件,且使用功能不健全或使用要求提高的既有混凝土桥梁和结构,可通过外部加固措施来恢复或提高其承载能力,健全其使用功能,以满足正常或超常的使用要求,开展这项研究工作具有显著的经济效益和社会效益。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 纤维增强材料加固混凝土构件研究

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Plastic, FRP)用于加固混凝土结构的技术最早由瑞士联邦实验室完成。在欧洲,德国、法国、瑞士、奥地利、意大利、比利时、希腊、瑞典等许多国家近年来均

采用 FRP 对混凝土工程进行加固。在我国,FRP 应用于加固混凝土技术的研究起步较晚,参与 FRP 加固技术研究的部门和单位众多,研究涉及的内容有各种纤维材料(包括碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维和混杂纤维等)、各种树脂(包括与各种纤维配套的黏结树脂)、各种纤维制品(包括纤维布、纤维板、纤维筋、纤维棒、纤维索、纤维网格材等)的生产和品质管理,各种 FRP 加固修复结构的性能及设计方法、施工方法等。FRP 在现代土木工程中的应用技术研究已得到学界的高度重视,开始形成系统的研究开发规模。

就被加固构件的类型来看,目前开展了如下几个方面的研究^[3-5]:

(1) 研究梁、板的加固技术。包括抗弯加固、抗剪加固、抗疲劳加固。

(2) 混凝土柱及柱状物的加固。以试验研究为主并辅之以理论分析,研究的特性参量包括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、疲劳与抗震性能等。

(3) 工程结点加固技术研究。工程结构的结点往往是结构破坏的多发区。研究表明,用纤维增强材料对结构结点进行加固,可提高结点的刚度、强度及延性。

(4) 剪力墙墙体加固。在剪力墙一面或两面沿抗剪切配筋方向粘贴碳纤维片材以提高墙体抵抗横向作用力的能力。

力学性能研究是碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)在土木工程中应用研究的关键问题。其研究内容包括构件加固后的弯曲、剪切强度研究、界面特性研究、裂纹的产生和扩展研究、结构的疲劳、老化、腐蚀、高温特性的研究等。

(1) 界面强度。CFRP 增强构件的强度与界面特性密切相关^[6],已有的界面模型包括黏结-滑移本构模型和黏结强度模型。黏结强度模型只能给出界面在极限情况下的剥离承载力,而黏结-滑移本构模型则可以给出整个界面剥离过程以及界面应力-应变的

分布规律。

必须深入研究 CFRP-混凝土的界面行为和界面特性,提出准确可靠的界面黏结-滑移本构模型,建立相应的设计计算方法,积极稳妥地应用这项加固技术。在试验研究中发现,胶层的界面剪应力、剥离正应力分布与构件受力形式有关,直接测量存在困难。据有关文献显示,单剪试验和双剪试验模型是研究界面剪应力的常用方法,靠试验获得的数据进行回归或是有限元数值模拟数据进行回归,Nakaba、Dai、Monti 和 Ueda 及陆新征等人^[7-11]分别提出了许多不同的界面黏结-滑移本构模型。

(2) 断裂特性研究。学者们^[12,13]为了研究梁加固后的断裂特性、承载力以及延性,在跨中预制裂缝的混凝土梁底端贴上 FRP,并对其进行理论和试验研究。

Wu 和 Davies^[12]用 FRP 板加固了素混凝土三点弯曲梁,并提出了计算其承载力的理论模型。在认为 FRP 板与混凝土之间无相对滑移的条件下,虚拟了混凝土裂缝的扩展,并以跨中截面开裂处力的平衡和应力分布线性假设,得到了其承载力的表达式,认为其大小与中性轴的位置、断裂区的长度和裂缝尖端位移有关;由于没考虑断裂区内混凝土黏聚力的影响,所给出的混凝土黏聚力合力在断裂区内有两个极值,上极限为混凝土的抗拉强度,下极限为混凝土完全脆性。依据 Wu 和 Davies 的模型理论,Wu 和 Bailey^[13]研究了 K_R 阻力曲线和加固梁韧性随材料与几何参数的变化情况。研究表明,断裂区的长度越长越有利于梁的抗裂阻力的提高,但梁抗裂阻力受混凝土强度的影响较小;FRP 能明显改善梁的强度和韧性,并且加固梁的抗裂阻力和承载力随 FRP 板厚的增加而增大。与跨中预制裂缝的素混凝土梁类似,Wu 和 Ye^[14]研究了 FRP 筋混凝土梁的断裂问题。FRP 筋能控制跨中混凝土裂缝的扩展和张开。试验结果还表明,预制裂缝的断裂过程区越长,被加固混凝土梁的抗裂阻力和承载力的提高幅度越大。

Alaee 与 Karihaloo^[15]研究了带裂缝的钢筋混凝土梁用纤维增强混凝土板(又称 Cardiff 板)进行加固的情况,基于断裂力学理论提出了加固梁极限弯矩的计算公式。实际上,在预制有裂缝的混凝土梁底部外贴 FRP 片材,FRP 与混凝土界面容易发生剥离,这是因为裂缝口处的界面产生应力集中。Leung^[16]研究了 FRP 板加固的混凝土梁在纯弯状态下跨中 FRP 板与梁界面发生剥离的情况。考虑虚拟裂缝黏聚力的作用以及跨中裂缝的扩展并利用界面的变形协调条件,获得了 FRP 板正应力、剪应力随裂缝尖端张开位移的变化关系,并用断裂力学理论得到了跨中界面剪应力随外弯矩作用变化的表达式,进而研究加固材料特性与几何参数的变化对跨中界面剪应力的影响,并由此评判跨中界面发生剥离的可能性。

(3) 抗弯性能研究。研究涉及加固混凝土梁弯曲时静力、蠕变、疲劳性能。探讨了预拉 FRP 复合材料片的应用,加固构件的防火性能以及基于可靠度理论加固设计方法等。所取得的成果均表明,混凝土梁加固后的力学性能有明显提高,特别是 CFRP 的加固效果更为显著,加固梁的弯曲强度比未加固梁的弯曲强度提高了 60%~150%。

(4) 抗剪切性能研究。加固混凝土构件的剪切性能研究最早的成果由 Berset 和 Uji 提出^[17]。Berset 将 Glass FRP 加固混凝土梁与未加固梁进行了对比试验,提出了计算剪切承载力的简单表达式。同济大学的李杰、夏春红,天津大学的谢剑,清华大学的叶列平等分别做了 GFRP 和 CFRP 加固钢筋混凝土梁的抗剪性能试验及 CFRP 加固钢筋混凝土柱的抗剪性能试验^[18]。结果表明,复合材料的不同粘贴方式、含纤维特征值、轴压比、剪跨比等是影响加固效果的主要因素。

(5) 结点加固技术研究。美国首先在 1996 年对盐湖城 Highland Drive 大桥的三个梁-柱联结点应用 CFRP 进行了修补加固,随后有人提出了这种结点加固设计的分析方法,并与试验结果

进行了比较。最近, Gergely 和 Pantelides 等建立了应用 CFRP 加固钢筋混凝土结点提高剪切承载力的具体程序方法。Pantelides 等在一项最新成果中报道, CFRP 加固钢筋混凝土结点可以将结点的剪切强度提高 35%, 侧向最大承载力提高 16%; 弯曲位移延性系数则从未加固前的 2.8 提高到 6.3。另一项最近的研究成果指出, 应用 GFRP 加固梁-柱联结点后, 结点的刚性和强度都有显著提高, 延性系数提高 42%。

(6) 疲劳性能研究。Mumar S. V. 和 Gangarao V. S. 对 FRP 筋加固混凝土桥板进行了疲劳试验, 研究表明: 在最大荷载为 40% 极限荷载的情况下, 加载 200 万次时结构达到其疲劳寿命的 80%, 疲劳强度可达极限荷载的 50%~60%, 材料刚度衰减呈线性变化。曾宪桃教授 1995 年完成了玻璃钢板加固混凝土梁的疲劳试验研究工作; 中国人民解放军总后勤部建筑工程研究所的李源等开展了 CFRP 加固混凝土梁的疲劳试验。结果显示, CFRP 材料加固后的混凝土梁经 200 万次疲劳试验后, 强度和刚度不会降低, 不会发生剥落和脆断破坏, 共同工作性能良好, 满足抗疲劳要求。

(7) 加固后结构抗震性能研究。Saadatmanesh 等对遭地震破坏的混凝土桥墩进行了加固后的抗震试验研究。应用 FRP 加固修补的混凝土柱在位移延性系数 $u=0.4$ 时具有稳定的滞回线, 甚至 $u=0.6$ 时仍有稳定的滞回线。

(8) FRP 主筋替代钢筋的研究。用来代替钢筋的 FRP 配筋或预应力筋。复合材料筋有表面进行砂化处理的 GFRP 筋及几股纤维间用环氧树脂黏结的 CFRP 预应力筋。20 世纪 60 年代初, 美国对混凝土梁中用 FRP 配筋进行应用与研究, 使用 GFRP 解决近海和寒冷地区的钢筋混凝土结构遭受盐蚀危害问题。我国针对 FRP 筋与混凝土之间的黏结试验方法、混凝土强度、FRP 筋的埋长与直径、FRP 筋外部约束和表面变形、混凝土保护层厚度、温度变化等方面对 FRP 筋与混凝土之间黏结性能的影响进行了初步研究, 并

进行了配筋率对混凝土梁力学性能影响的试验研究。

(9) 预应力 FRP 加固混凝土构件技术研究。Saadatmanesh 和 Ehsani(1991)^[19]将一组双筋矩形截面梁在跨中顶起,将 GFRP 板粘贴到梁的受拉区域并保持其位置固定不动,当树脂胶粘剂完全固化后,再放松千斤顶,对这些梁所做的四点弯曲试验表明,粘贴预应力 GFRP 板补强的混凝土梁其开裂荷载提高 100%,破坏荷载提高 400%以上;Triantafillou 等人^[20](1992)进行了混凝土梁粘贴预应力 CFRP 板的试验工作,先对单向 CFRP 板进行张拉,然后将其粘贴于混凝土梁的受拉表面,一旦胶粘剂完全固化,从 CFRP 板两端将其切断,混凝土梁和 CFRP 板就组成了预应力构件,用这种方法补强的五片混凝土梁,其极限承载力提高了 3~4 倍,预应力的大小及配筋的多少会影响裂缝的分布和数量,所有梁的破坏均为斜裂缝导致 CFRP 板局部脱落以及随之而来的 CFRP 板发生滑移。Meier 等^[21]又于 1992 年,对粘贴 CFRP 板的 T 形梁进行了试验研究,并将 CFRP 板分为有预应力和无预应力两种情况,与对比梁相比,两种方法补强的混凝土梁最大荷载提高 32%,CFRP 板不加预应力时,补强梁的变形与对比梁相似,而 CFRP 板加上预应力时,补强梁的位移只有对比梁的 50%。曾宪桃、飞渭、尚守平等做了预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件试验研究,结果显示,预应力碳纤维加固混凝土构件可以明显提高梁的开裂荷载、屈服荷载,减小梁在使用阶段的变形和梁内主筋的应力,更加有效地抑制了裂缝的发展。

外贴纤维片材加固构件的试验研究及工程应用已有 20 多年的历史^[22-24]。但这种粘贴加固方法存在一定的不足:由于纤维复合材料的弹性模量较低,抗拉强度较高,钢筋发挥屈服强度将产生 0.15%的拉伸变形,而纤维片材要发挥抗拉强度将产生 1.7%的拉伸变形,较钢筋的屈服变形高了 11 倍多;也即纤维片材与构件内部钢筋共同作用,不考虑原有的初始应变,钢筋屈服时纤维片材所能

发挥的强度也仅为其抗拉强度的 8.8%,并且在纤维发挥全部强度所需 1.7%的应变情况下,混凝土结构会产生很大变形以及显著的裂缝。因此,外部粘贴纤维片材加固构件,纤维片材所能发挥的抗拉作用极其有限,且 FRP 粘贴在构件表面容易受到恶劣环境(高温、高湿和冻融等)的不利影响,易遭受磨损和撞击等意外荷载的作用,不防火,不易与相邻构件锚固等。另外,外贴纤维片材易于发生剥离破坏,纤维片材的高强性能得不到充分发挥,因而逐渐被加固效果好的外贴预应力纤维片材加固法及嵌入式加固法所替代。

采用预应力技术对混凝土梁进行加固,可以提高结构的承载能力,降低钢筋疲劳应力幅值及控制裂缝,能较好地满足使用荷载的要求,增加结构的使用年限和耐久性,加固效果明显。

(1) 预应力施加方法研究。对外贴在混凝土梁受拉面的纤维增强塑料板材施加预应力的方法有两种,包括正拱法和外部张拉法。正拱法为先将 FRP 片材用改性环氧树脂粘贴到混凝土梁的受拉面(拉面在下),然后用千斤顶从 FRP 片材外把梁从中部顶起,等胶粘剂固化后,按比例放松千斤顶。国外学者 Wight^[25-27]、El-Hacha^[28,29]以及国内的吴智深^[30]、飞渭^[31]、杨勇新^[32]、曾宪桃^[33]等在试验中施加预应力均采用此种方法。Quantrill R. J. 和 Hollaway L. C.^[34]改进了这种方法,先将混凝土梁的黏结面朝上放置在 FRP 板材的下面,把环氧树脂均匀涂在 FRP 板材黏结面,黏结面朝向混凝土,张拉 FRP 板材使其达到要求的预应力水平,混凝土梁用千斤顶顶高至 FRP 板的位置,待黏结剂硬化后,在梁的两端安装钢夹以保证板材端部有足够的锚固,防止预应力损失;再将 FRP 板两端卸荷至零,预应力通过硬化的黏结层传到混凝土梁上;最后切除 FRP 板的多余部分。

(2) 预应力 FRP 材料加固梁试验研究。目前国内外学者对预应力 FRP 加固技术的研究主要集中在对结构抗弯承载力的提高、抗剪承载力的提高、预应力施加控制值、端部锚固、疲劳破坏性能等

方面。

目前,英美、加拿大及日本、瑞士等发达国家的研究人员在碳纤维加固及预应力碳纤维加固技术领域进行了大量的研究工作,取得了许多有价值的研究成果;但国内的研究主要集中在预应力碳纤维布材,关于预应力碳纤维板材的研究较少^[35-41]。

Garden 与 Hollaway^[42](1997)、Garden 等(1998)进行了预应力碳纤维板加固试验梁的性能研究。试验用的碳纤维板初始应力水平分别为碳纤维抗拉强度的 25%、40% 及 50%。非预应力碳纤维加固的对比试件的破坏模式是碳纤维的剥离破坏;预应力加固试件的破坏模式大多是碳纤维板的拉断。

由于外贴 FRP 片材加固和外贴预应力 FRP 片材加固,片材的受力是以混凝土的受拉剪为根基,所以片材剥离是一个根本性的问题,且受混凝土强度限制,FRP 片材的强度难以充分发挥,高强 FRP 片材使用受到制约;外贴预应力 FRP 片材,虽对混凝土构件的使用性能有改善作用,但进入极限状态后,FRP 片材的剥离同样存在。

为此,人们提出了“表层内嵌法”(Near-Surface-Mounted, NSM),即将纤维增强塑料板条(或筋)嵌入混凝土保护层表面预先开好的槽内并以树脂胶粘剂封填槽道,以改善纤维增强塑料与混凝土的整体黏结性能,充分发挥纤维增强塑料板条的强度。嵌入式加固方法具有如下优点^[43,44]:①对混凝土表面处理的工作量降低。只需用专用工具在混凝土表面剔槽,所开混凝土槽三面参与 FRP 和树脂的粘贴,黏结性能良好且 FRP 的剥离和锚固问题不突出。②能防止火灾对 FRP 的破坏。由于 FRP 嵌在构件内部,较好地解决了防火这一问题,同时其抗冲击性、耐久性得以提高。③负弯矩区域加固方便。对桥梁面板、楼板、挑梁等构件进行负弯矩区加固时,直接在表面粘贴 FRP 片材很容易遭到人为或环境因素的破坏,桥梁的过往车辆摩擦及冲击很容易损坏桥板表