

工程建设加固技术丛书

FRP加固混凝土 结构技术及应用

王文炜 编著

赵国藩 主审

中国建筑工业出版社

工程建设加固技术丛书

FRP 加固混凝土结构技术及应用

王文炜 编著
赵国藩 主审



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

FRP 加固混凝土结构技术及应用/王文炜编著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2007

(工程建设加固技术丛书)

ISBN 978-7-112-09554-4

I. F… II. 王… III. 纤维增强复合材料—应用—混凝土结构—加固 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 130241 号

本书依据《混凝土结构加固设计规范》(GB50367—2006)、《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》(CECS146:2003)编写。在总结国内外学者研究纤维复合材料 (FRP) 加固混凝土结构成果基础上,介绍了 FRP、混凝土和钢筋三种不同性能的材料构成的组合结构,并提出了相应的计算理论和设计方法。全书共分十章,分别介绍 FRP 加固技术及力学性能、加固钢筋混凝土梁正、斜截面承载力设计计算方法、FRP 圆柱、方柱的强度计算及 FRP 筋增强混凝土结构、组合结构、新结构形式及设计计算。书中论述详细,内容丰富。

本书供混凝土结构设计、施工、研究人员使用,也可作为土建道桥专业师生参考用书。

责任编辑:郭栋

责任设计:张政纲

责任校对:汤小平

工程建设加固技术丛书 FRP 加固混凝土结构技术及应用

王文炜 编著

赵国藩 主审

*

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

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:15½ 字数:373千字

2007年11月第一版 2007年11月第一次印刷

印数:1—3,000册 定价:28.00元

ISBN 978-7-112-09554-4

(16218)

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)

序

近十余年, FRP 加固混凝土结构技术在我国得到迅速发展。FRP 加固混凝土结构技术有别于传统的混凝土结构加固技术, 它具有强度高、质量轻、耐久性好、易于施工等优点, 这种非传统的加固技术为建筑结构和桥梁结构的加固维修提供了广阔空间。

FRP 加固混凝土结构及 FRP 在土木工程中的应用在美国、日本、英国、澳大利亚、加拿大等发达国家经历了四十多年的发展, 现已日趋成熟。研究者对这种新的加固技术开展了多方位、深层次的研究, 建造了多座具有典型意义的 FRP 组合结构或 FRP 新结构桥梁, 在设计和施工方面积累了丰富的经验。

我国 FRP 加固混凝土结构技术在发展之初, 设计施工几乎都是国外的。虽然近十几年来, 随着国内 FRP 厂商的涌现, 设计施工队伍不断壮大, 高校科研院所参与研究逐渐增多, 但是对 FRP 材料特性的认识、结构体系与受力特征的理解、构造处理, 特别是计算理论和设计方法的系统总结提炼仍十分迫切, 有待进一步提高。

迄今为止, 能较为全面系统地分析研究这些问题的书籍还为数不多, 更缺少偏重于实际问题、对计算理论的叙述更为简明易懂的著作。如果能系统深入地写作一本关于 FRP 加固混凝土结构技术及应用的专著, 使广大设计和施工人员能够了解 FRP 加固混凝土的施工技术、加固方法、计算理论与设计方法, 推动这项新兴的加固技术在我国的发展, 毫无疑问, 是具有开拓创新意义的。

王文炜博士多年来从事 FRP 加固混凝土结构与 FRP-钢-混凝土组合结构的计算理论与设计方法的研究, 做了大量的科研项目和工程项目。在总结研究成果的基础上吸收国内外优秀研究成果, 注重理论与实际相结合, 查阅大量文献, 付出巨大努力与辛劳, 历时三年, 完成了这本关于 FRP 加固混凝土结构技术及其应用的专著。

本书首先阐述了 FRP 加固技术及 FRP 的力学性能, 包括外贴 FRP 加固技术、FRP 嵌入式加固技术、机械锚固 FRP 条带加固技术、FRP 种类、FRP 的力学性能等, 使读者不仅对外贴 FRP 加固技术有较为全面的理解, 而且对 FRP 在土木工程中其他方面的应用有了初步了解。然后, 着重介绍了 FRP 加固钢筋混凝土梁正截面承载力、斜截面承载力的设计计算方法与构造要求, FRP 包裹混凝土圆柱、方柱的强度计算及本构关系, 加固钢筋混凝土轴心受压、偏心受压构件承载力计算以及加固钢筋混凝土柱抗震性能, FRP 与钢筋混凝土梁之间的界面粘结性能, 加固梁的延性和变形性能。最后, 为了扩展读者的知识面, 着重介绍了 FRP 筋增强混凝土结构、FRP 组合结构、FRP 新结构的结构形式、设计计算方法和桥梁加固应用实例。为了工程应用和设计, 在第 3、4、5 章中列出计算方法的同时, 给出了计算示例。

这本著作着重于 FRP 加固混凝土技术的系统性、完整性和实用性, 清晰地阐明了 FRP 加固混凝土结构的原理、方法和步骤, 既有详细的理论方法介绍, 又有丰富的计算示例和工程实例, 是一部典型的理论联系实际的书籍, 具有较高的学术水平和重要的工程应用参

考价值。它的出版问世，相信对我国的 FRP 加固混凝土结构技术发展和推广应用起到显著作用。

中国工程院院士
博士生导师
大连理工大学教授

赵国藩

前 言

外贴纤维复合材料 (Fiber Reinforced Polymer, FRP) 加固法, 简称 FRP 加固法, 是近年来新兴起的混凝土工程加固技术。纤维复合材料是把高性能纤维织物, 如玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维铺贴在环氧树脂等基材上, 经胶合凝固后形成的一种复合材料。FRP 具有强度高、质量轻、耐久性好、易于施工等优点。因此, 比起传统的加固方法, 如增大截面法、粘贴钢板法、喷射混凝土法、体外预应力加固技术等, 在施工方法、构造处理、缩短施工周期等方面具有明显的优势, 从而使这项加固技术无论是研究工作还是工程中的实际应用都有了长足的进展, 受到国内外学者广泛的重视, 成为目前业界同仁研究的热点。

FRP 加固技术具有广阔的应用前景。有关资料统计表明, 美国、日本、西欧等发达国家已在桥梁改造和加固工程投资与新建桥梁投资上基本持平, 各为 50% 左右。美国 1981 年统计资料显示, 全国有 40% 以上的桥梁有不同程度的损坏, 需要进行维修加固。日本、英国、德国、印度等国对本国桥梁进行统计分析, 发现有大部分桥梁承载力过低, 行车道过窄, 桥下净空不够或有不同程度的损伤, 这些都需要进行维修加固以满足桥梁结构的正常使用。

随着我国国民经济的迅猛发展, 城市规模的扩大, 为交通、建筑等行业带来了飞速的发展。目前, 我国交通业正处于新建与维修改造并重时期, 一方面新的桥梁结构在不断建设, 另一方面过去建造的低标准桥梁经过数十年的使用后已不能满足社会的需求, 需要进行维修、加固和现代化改造, 这在很大程度上促进了对在用桥梁结构进行正确鉴定、有效加固技术方面的课题研究。

在 FRP 加固技术迅速推广的同时, 广大的生产企业、工程应用单位、科研院所的人员不仅需要掌握 FRP 加固施工技术和加固方法, 而且想更多地了解 FRP 加固混凝土构件的计算理论与设计方法, 以便更好地将这项新兴的加固技术应用在混凝土结构中。然而, 迄今为止, 能较为全面系统地分析研究这些问题的书籍还为数不多, 更缺少简易、实用的计算方法。

本书是在分析总结国内外学者研究成果的基础上, 深入研究了 FRP、混凝土与钢筋三种具有不同性能的材料构成的组合结构, 并提出了相应的计算理论与设计方法。作者通过本书的写作, 希望能够比较准确地解决实际应用中的问题, 为读者提供一个方便、易行的适用方法。

全书共分为 10 章。主要写作思路是首先介绍国内外研究状况, 继而阐述计算理论、设计方法, 最后给出计算示例, 以方便读者应用。书的开头两章介绍了 FRP 加固技术及 FRP 的力学性能。第 3 章、第 4 章详细地给出了 FRP 加固钢筋混凝土梁正截面承载力、斜截面承载力的设计计算方法与构造要求。第 5 章叙述钢筋混凝土柱的加固, 主要内容包括 FRP 包裹混凝土圆柱、方柱的强度计算、本构关系, 加固钢筋混凝土柱轴心受压构件、偏心受压构件承载力计算以及加固钢筋混凝土柱抗震性能。为了方便读者应用, 在第 3、4、

5章中列出计算方法的同时,给出了“计算示例”。第6章和第7章分别介绍了FRP与钢筋混凝土梁之间的界面粘结性能以及加固梁的延性和变形性能,给出了相应的计算方法。第8、9、10章着重介绍了FRP筋增强混凝土结构、FRP组合结构、FRP新结构的结构形式、设计计算方法和桥梁加固应用实例。

本书总结了作者近几年关于FRP加固混凝土结构的最新研究成果。在此基础上,也汇集并简要介绍了国内外诸多学者研究与应用FRP的成果。本书编写完毕后,我的授业恩师中国工程院院士、大连理工大学教授赵国藩先生对全书进行了审阅并为本书作了序言。此外,本书在编写过程中,得到了东南大学桥梁工程研究所的老教授们的悉心指导,在此特向他们谨致谢意!他们的严谨治学精神和认真负责的工作态度始终是作者工作学习的榜样。

本书可作为桥梁工程、结构工程专业研究生课程的专用教材,也可作为有关本科生的教学参考书。对于从事桥梁结构、混凝土结构加固技术的有关技术人员也有一定的借鉴和参考价值。

限于作者水平,书中难免存在一些缺陷甚至错误,敬请专家和读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 混凝土结构补强加固技术简介	1
1.2 FRP 外贴补强加固技术	3
1.3 其他 FRP 加固技术简介	7
参考文献	9
第 2 章 FRP 的力学性能	11
2.1 纤维	11
2.2 树脂	13
2.3 纤维复合材料	13
参考文献	23
第 3 章 FRP 加固钢筋混凝土梁正截面承载力计算	24
3.1 FRP 加固钢筋混凝土梁研究现状	26
3.2 FRP 加固钢筋混凝土梁规范（规程）简介	29
3.3 FRP 加固钢筋混凝土梁加固形式	37
3.4 FRP 加固钢筋混凝土梁承载力分析	38
3.5 FRP 加固钢筋混凝土梁正截面承载力计算方法	44
3.6 计算示例	56
参考文献	63
第 4 章 FRP 加固钢筋混凝土梁抗剪承载力计算	66
4.1 钢筋混凝土梁抗剪加固形式和构造	67
4.2 FRP 加固钢筋混凝土梁抗剪承载力设计方法	69
4.3 FRP 加固钢筋混凝土梁抗剪承载力计算	73
4.4 计算示例	81
参考文献	84
第 5 章 FRP 加固钢筋混凝土柱	86
5.1 FRP 加固钢筋混凝土柱研究现状	89
5.2 FRP 加固钢筋混凝土柱加固形式与构造	93
5.3 FRP 加固钢筋混凝土柱规范（规程）简介	94

5.4 FRP 加固混凝土柱的轴心受压力学性能	99
5.5 FRP 加固钢筋混凝土柱的偏心受力性能	124
5.6 FRP 加固钢筋混凝土柱抗震性能	135
参考文献	138
第 6 章 FRP 加固的钢筋混凝土梁界面粘结性能	143
6.1 剥离破坏机理	143
6.2 剥离问题研究状况	145
6.3 FRP 端部应力分析	146
6.4 计算示例	152
参考文献	154
第 7 章 FRP 加固的钢筋混凝土梁延性及变形	155
7.1 截面延性分析	156
7.2 影响延性的因素	162
7.3 加固梁的变形计算	163
参考文献	164
第 8 章 FRP 筋增强混凝土结构	166
8.1 FRP 筋增强混凝土结构研究状况	167
8.2 FRP 筋的设计强度	169
8.3 FRP 筋增强混凝土梁正截面承载力计算	170
8.4 FRP 筋增强混凝土梁斜截面抗剪承载力计算	174
8.5 FRP 筋增强混凝土梁的正常使用性能	175
8.6 延伸及搭接长度	177
8.7 计算示例	179
参考文献	184
第 9 章 FRP 组合结构及 FRP 新结构	186
9.1 FRP 组合结构	186
9.2 FRP 新结构	201
9.3 FRP 组合结构及新结构的连接	210
9.4 FRP 组合结构及新结构的应用	216
参考文献	228
第 10 章 FRP 在桥梁工程中的加固应用	231
10.1 混凝土受弯构件的弯剪加固	231
10.2 FRP 加固钢筋混凝土墩柱应用实例	237
参考文献	238

第1章 绪 论

建筑结构在长期的自然环境和作用环境的双重作用下,其功能将逐渐减弱,这是一个不可逆转的客观规律。如果能够科学地评估这种损伤的程度和规律,及时采取有效处理措施,可以延缓建筑结构的损伤进程,达到延长建筑结构使用寿命的目的。因此,建筑结构的加固技术已逐渐成为工程界关注的热点问题。

随着我国国民经济的迅猛发展,交通业有了飞速发展。目前,我国交通业正处于新建与维修改造并重时期。在此期间,一方面新的桥梁结构在不断建设。另一方面过去建造的低标准桥梁经过数十年的使用已不能满足社会的需求,需要进行维修、加固和改造,从而使交通业过渡到新建与维修改造并重的发展时期,这在很大程度上推动了对在用桥梁结构进行正确鉴定、有效加固技术方面的课题研究。

地震具有巨大的破坏力,是迄今人类尚难以抗御的自然灾害,地震能在瞬间使大量的建筑物破坏或倒塌,并引发各种次生灾害,造成人员伤亡,给人们带来灾难和恐慌,特别是大地震发生在人口密集、生命线工程日益复杂的现代化大都市,当未作抗震设防或设防薄弱时,其灾难性后果不堪设想。中国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带之间,地震活动频度高、强度大、震源浅、分布广,是一个震灾严重的国家。如果事先未能做好防震抗震工作,或掉以轻心,一旦地震发生,其后果难以设想。在不断总结我国建筑、桥梁结构抗震防震工作基础上,提高新建结构的抗震能力,研究震损结构的修复和加固技术,以便及时有效地恢复震损结构的正常使用功能,满足结构的安全性、可靠性和耐久性要求,是十分必要的。

出现问题的建筑结构和桥梁结构,实际情况并不允许将其全部推倒重建,而只要采取适当的技术措施,对其进行补强与加固处理,使其仍能满足安全性、适用性和耐久性的要求,继续为社会服务。总之,在现代社会中对建筑结构和桥梁结构的补强加固技术进行开发和研究是非常必要的,具有重要的社会效益和巨大的经济效益。

1.1 混凝土结构补强加固技术简介

工程上常用的混凝土结构补强加固方法主要有^[1-4]:

(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加构件的截面尺寸,来达到提高承载力的目的。如在原有的钢筋混凝土主梁的周边,浇筑一层钢筋混凝土围套,通过采取一些有效的技术措施保证新旧钢筋混凝土形成整体,这样就可以提高梁的承载能力和刚度。

加大截面加固法是一种传统的加固法,也是一种非常有效的加固方法。该方法可以用来提高构件的抗弯、抗压、抗剪、抗拉等能力,同时也可以用来修复已经损伤的混凝

土截面,增加其耐久性,可以广泛地用于各种构件的加固。这种加固方法对原有构件的截面尺寸有一定程度的增加,使原有的使用空间变小。另外,由于一般采用传统的施工方法,尤其是对钢筋混凝土结构的加固,施工周期长,对周围环境有较严重的影响。

(2) 外包钢加固法。外包钢加固法是用乳胶水泥、环氧树脂灌浆或焊接等方法对混凝土构件外包型钢进行加固。该方法主要是通过约束原构件来提高其承载能力和变形能力,如在桥梁墩柱上围覆钢套箍进行加固。

外包钢加固法可以大幅度地提高构件的抗压和抗弯性能,由于采用型钢材料,施工期相对较短,占用空间也不大,比较广泛地应用于不允许增大截面尺寸,而又需要较大幅度提高承载力的轴心受压构件和小偏心受压构件。外包钢加固也可以用于受弯构件或大偏心受压构件的加固,但宜采用湿外包钢加固。

(3) 预应力加固法。预应力加固方法是通过预应力钢筋对构件施加预应力,以承担梁、板承受的部分荷载,从而提高构件的承载力。

预应力拉杆加固广泛适用于梁桥或板桥中的受弯构件和受拉构件加固,在提高承载力的同时,对提高截面的刚度、减少原有构件的裂缝宽度和挠度、提高加固后构件截面的抗裂能力是非常有效的。预应力撑杆加固可以应用于轴心或小偏心受压构件的加固。预应力加固法占用空间小、施工周期短,但其施工技术要求较高、预应力拉杆或压杆与被加固构件的连接(锚固)处理较复杂、难度较大,另外,还存在施工时的侧向稳定问题等。

(4) 粘钢加固法。粘钢加固是在梁板桥的主梁表面上用特制的建筑结构胶粘结钢板,从而提高结构承载力和变形能力的一种加固方法。该法始于 20 世纪 60 年代,具有施工方便、周期短、占用空间不大、对环境影响较小,以及加固后不影响结构的外观等优点,因此,是一种适用范围较为广泛的加固方法。1981 年,随着国产 JGN 型建筑结构胶的问世,对我国粘钢加固技术的发展起到了极大的推动作用,十余年来,粘钢技术发展迅速,广泛应用于很多地区的工程结构加固改造中。

(5) 喷射混凝土技术。喷射混凝土技术是借助喷射机械,利用压缩空气或其他动力,将配合好的混凝土拌合料,通过管道输送并以高速喷射到受喷面上,凝结硬化成混凝土的一种加固技术。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、钢材具有很高的粘结强度,可以在结合面上传递拉应力和剪应力。

(6) 增设构件加固法。增设构件加固法是在原有的构件之间增加新的构件,如在原有主梁之间增设新纵梁,新梁与旧梁相连接共同受力,减少原主梁的受荷面积,减少荷载效应,达到结构加固的目的。该方法实施时不破坏原有结构,施工易于操作,但是必须注意做好新增主梁与旧梁之间的横向连接,使新增主梁与旧梁之间牢固连接,保证主梁之间的横向连接刚度,有利于荷载的横向分布。

(7) 增设支点加固法。增设支点加固法是在梁、板等构件下增设支点,改变桥梁结构受力体系,达到提高桥梁承载力的目的。如在简支梁下增设支架或桥墩;把简支梁之间通过纵向连接,由简支梁变连续梁;在梁下增设钢桁架等加劲梁或叠合梁,减小梁的内应力,达到提高桥梁承载力目的。

对于上述加固方法,国内外的很多科研机构都进行了大量的研究工作,并且大都已经用于实际工程中,这在很多文献中都有记载。然而,这些加固方法都存在一定的缺陷,除

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、节点不易处理、施工难度大等。为此,FRP外贴补强加固这种新兴的、技术含量高的加固技术逐渐成为研究热点。

1.2 FRP外贴补强加固技术

1.2.1 FRP外贴补强加固技术的特点

从20世纪90年代起,纤维复合材料在土木工程中的应用一直是国内外研究的热点。纤维复合材料(Fiber Reinforced Plastics或Fiber Reinforced Polymer,FRP)是把高性能纤维,如玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等经过编织与环氧树脂等基材胶合凝固或经过高温固化而形成的一种新型复合材料。纤维是由单丝构成的,单丝的方向是单一的,也可以是多方向的,它决定复合材料的结构特性。树脂则是作为粘结介质,传递分布纤维间的应力,保证其形成整体,均匀受力。

FRP具有质量轻、便于施工、比钢筋混凝土结构更耐用、耐腐蚀、高强度质量密度比(是钢筋的10~15倍)、耐疲劳(是钢筋的3倍)、电磁中性、低导热系数等优点。FRP从材料构成上主要有碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer,CFRP)、玻璃纤维复合材料(Glass Fiber Reinforced Polymer,GFRP)、芳纶纤维材料(Aramid Fiber Reinforced Polymer,AFRP)。

与传统的混凝土结构加固修补方法及粘钢板、喷射混凝土等加固技术相比,FRP外贴加固修补混凝土结构具有明显的技术优势,主要表现在^[5-13]:

(1) 高强高效。由于FRP优异的物理力学性能,在加固修补混凝土结构中可以利用其高强度、高弹性模量的特点来提高结构构件的承载力和延性,改善其受力性能,达到高强高效的目的。

(2) 施工便捷,工效高,不需要大型施工机具,施工占用场地少。成品的FRP加固材料是一种织物,其幅宽为20、30、50、100cm,长度为50~100m,卷成卷,现场使用时可以根据需要用剪刀或刀片将其任意剪裁,不像钢板那样需要专门的切割工具。根据有关资料统计,同为粘贴加固法,粘贴FRP是粘贴钢板施工工效的4~8倍。

(3) 具有极佳的耐腐蚀性能及耐久性能。试验表明,粘贴CFRP加固修补混凝土结构有良好的耐腐蚀及耐久性,可以抗拒桥梁结构经常遇到的各种酸、碱、盐的腐蚀。使用该方法对结构进行处理后,不仅不需要如粘钢板法所需要的定期防锈维护,而且其本身更可以起到对内部混凝土结构的保护作用。

(4) 适用面广。粘贴FRP加固修补混凝土结构,可以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)、各种结构部位(如梁、板、柱、节点、拱、壳、墩等,如图1.2.1)的加固修补,而且不改变结构形状及不影响结构的外观,这是目前任何一种结构加固方法所不可比拟的。尤其对一些大型土木工程等,采用旧有的加固手段几乎无法实施,而采用该项加固技术都能很顺利地解决。

(5) 施工质量易保证。由于FRP织物是柔性的,即使被加固的结构表面不是非常平

整也基本可以达到 100% 的有效粘贴率。如果粘贴后局部有气泡，也很容易处理，只要将树脂注入气泡处将空气赶走就可以了。粘贴钢板则很难达到 100% 的有效粘贴面，相应的验收标准只要求达到 70% 就可以了。

(6) 基本不增加原结构自重及原构件尺寸。如 CFRP 粘贴后每平方米重量不到 1.0kg (包括树脂重量)，粘贴一层厚度不到 1mm。

(7) 耐疲劳性能好。桥梁结构经常承受往复荷载、移动荷载的作用，对这类结构加固后要考虑结构的抗疲劳性能。试验研究表明，CFRP 加固混凝土梁经过一定次数的疲劳循环荷载，其强度及延性指标并没有显著降低，而普通混凝土试件经过同样的疲劳循环荷载后，其强度和延性指标都会有不同程度的降低。

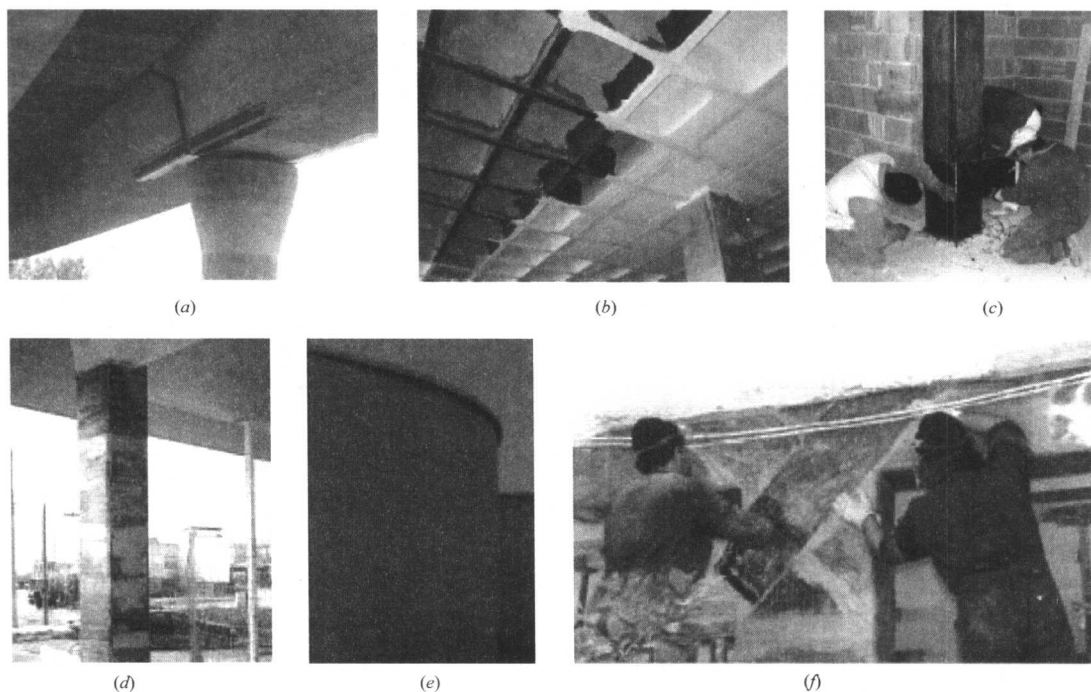


图 1.2.1 FRP 加固各种混凝土构件

(a) 加固梁；(b) 加固板；(c) 加固柱；(d) 墩柱的抗剪加固；(e) 混凝土储罐加固；(f) 梁柱节点加固

1.2.2 FRP 外贴补强加固技术的施工方法

FRP 外贴补强加固技术的施工方法可以分为 4 种：干铺体系、湿铺体系、预浸渍体系及预处理体系^[14~18]。

干铺体系 (Dry Lay-Up Systems) 是将单向或多向纤维布在施工现场直接粘贴到涂好胶体的混凝土构件表面的一种施工方法。湿铺体系 (Wet Lay-Up Systems) 是将单向或多向纤维布在施工现场浸渍胶体后粘贴到被加固构件表面的一种施工方法。干铺体系与湿铺体系的区别在于粘贴纤维布之前是否浸渍树脂，如果粘贴纤维布之前没有浸渍树脂，就是

干铺体系；如果粘贴纤维布之前已经浸渍过树脂，就是湿铺体系。

干铺体系、湿铺体系施工比较灵活，可以适应各种结构体系。干铺体系、湿铺体系的施工质量影响加固后构件的性能，因此施工时要确保纤维布平整、树脂浸渍饱满及环境通风。图 1.2.2 为干铺体系、图 1.2.3 为湿铺体系的施工顺序。

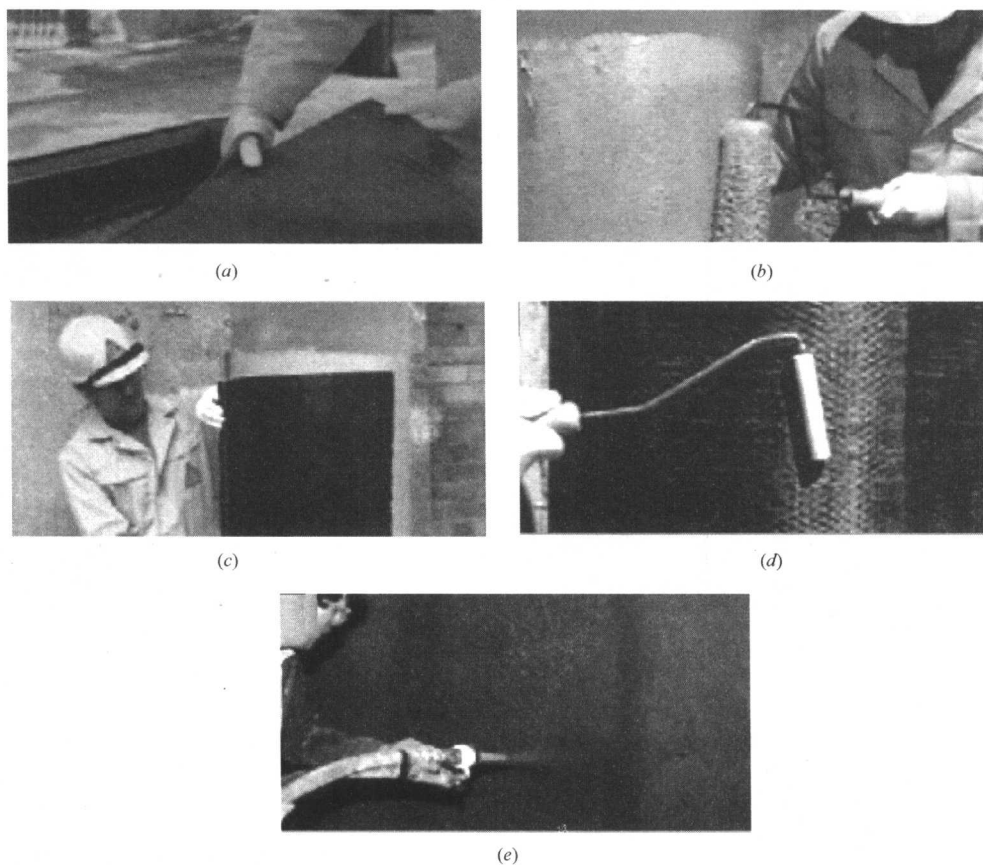


图 1.2.2 干铺体系

(a) 裁剪纤维布；(b) 涂抹胶体；(c) 粘贴纤维布；(d) 表面补胶体；(e) 表面防护

预浸渍体系 (Prepreg Systems) 是单向或多向纤维布在工厂预先浸渍树脂后，粘贴到被加固构件表面的一种施工方法。由于纤维布事先浸渍树脂，因此预浸渍体系比湿铺体系的质量更容易得到保证。预浸渍体系在施工现场也可采用一定的加热措施保证树脂的粘结效果。

预处理体系 (Precured Systems) 是粘贴纤维板或纤维壳常用的一种施工方法 (图 1.2.4)。纤维板或纤维壳是在工厂里将纤维与树脂按照一定的比例事先处理过的 FRP 产品。纤维板或纤维壳相对于纤维布来说是一种刚性材料，因此在粘贴纤维板或纤维壳之前，被加固构件的表面需要处理的更加平整。粘贴后，要使用滚子将多余的胶体及气泡排出。相对于前几种体系，预处理体系不适用于不规则构件的加固。

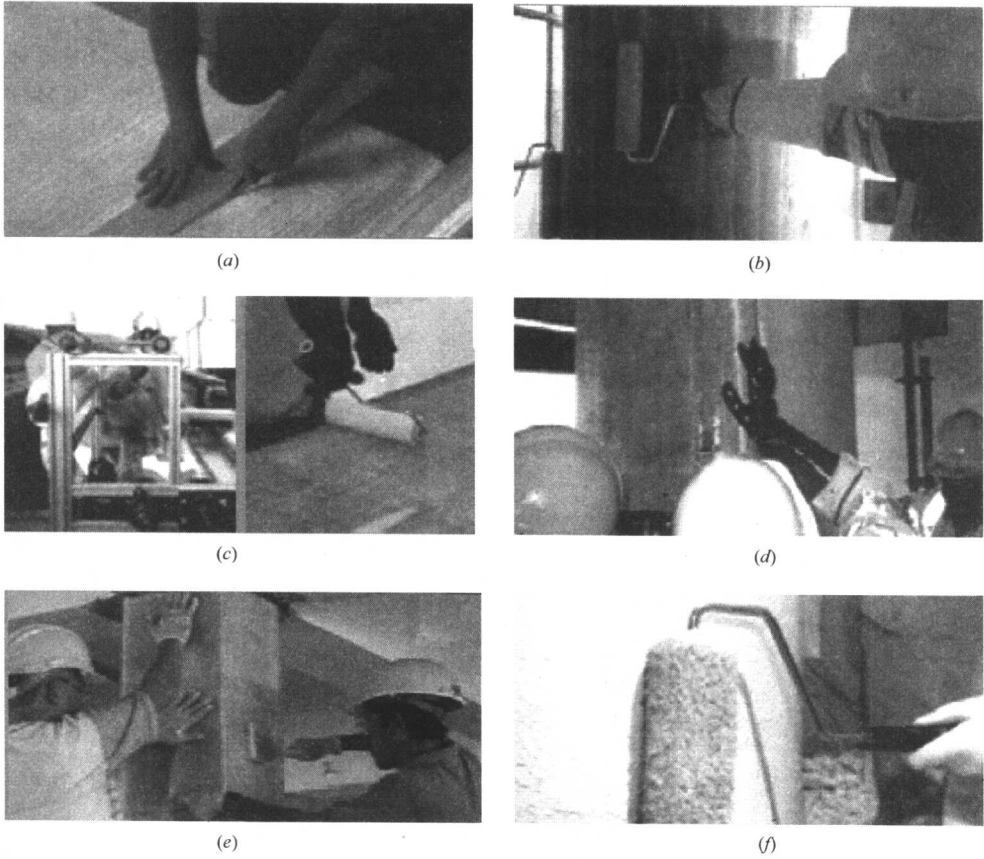


图 1.2.3 湿铺体系

(a) 裁剪纤维布; (b) 修补基层; (c) 浸渍树脂; (d) 粘贴纤维布; (e) 刮压纤维布; (f) 表面补胶

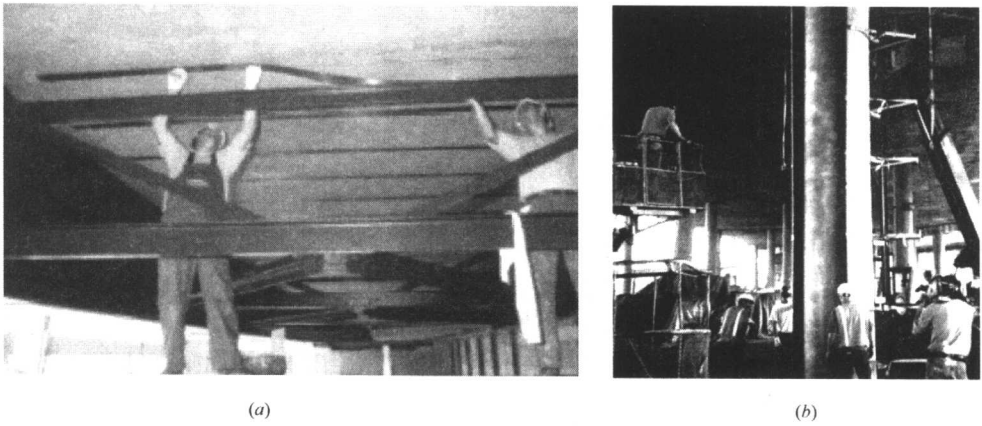


图 1.2.4 预处理体系

(a) 粘贴 FRP 板; (b) 粘贴 FRP 壳

除了上述的几种施工方法外,美国 XXsys Technologies 公司还针对桥梁墩柱发明了粗纤维缠绕施工方法,如图 1.2.5 所示。

加固所用的主要机械设备是 XXsys Technologies 公司设计制造的 Robo-Wrapper 缠绕机。缠绕机不仅能上下移动,同时也可以绕着墩柱旋转,将事先浸渍过树脂的连续粗纤维按照一个方向缠绕在墩柱的表面,形成厚度均匀纤维壳,缠绕机的运转完全是由程序控制,以保证纤维缠绕的精确性。

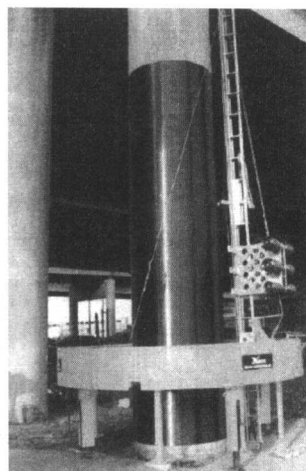


图 1.2.5 XXsys-Robo-Wrapper 体系

1.3 其他 FRP 加固技术简介

1.3.1 NSMR 加固技术

近表面嵌入式加固技术 (Near-Surface-Mounted Reinforcement, NSMR) 是近年来开发的一种新的 FRP 加固技术^[19]。NSMR 是将 FRP 筋、FRP 板条使用环氧树脂嵌入混凝土保护层中加固混凝土构件,如图 1.3.1 所示。NSMR 法的施工工艺是将混凝土保护层切出沿梁纵向的凹槽,然后将环氧树脂注入槽中,再将 FRP 筋或 FRP 板条嵌入槽中,最后灌入树脂填平凹槽,如图 1.3.2、图 1.3.3 所示。

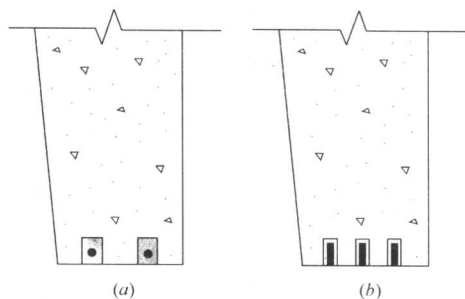


图 1.3.1 NSMR 加固技术
(a) FRP 筋; (b) FRP 板条

NSMR 加固技术相对于外贴 FRP 加固技术的优点有:

- (1) 与混凝土的粘结得到了加强,使 FRP 筋或 FRP 板条的传力更为有效;
- (2) 可以适应于混凝土构件表面不规则的情况。外贴 FRP 要求混凝土构件表面规则,打磨露出粗骨料,以保证 FRP 与混凝土构件的粘结;
- (3) FRP 筋或 FRP 板条能得到有效的保护,改善了耐久性能。

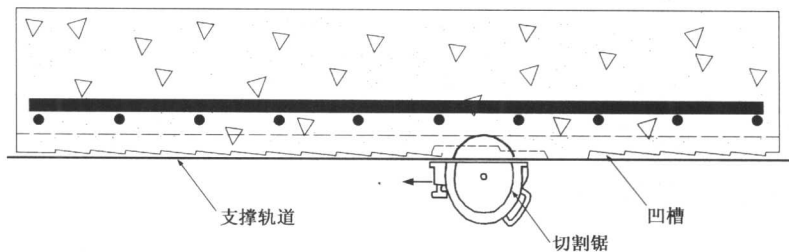


图 1.3.2 切割凹槽

将增强筋嵌入到混凝土保护层中加固并不是一个很新的想法。早在 1940 年，瑞典北部一座桥的桥面板负弯矩区就嵌入钢筋后灌注水泥浆进行加固。在正式加固前，进行了 4 块混凝土板的加固试验，试验结果表明嵌入式加固法是一种可行的加固技术。

1996 年，Luleå 理工大学首次进行了 FRP 矩形截面筋嵌入式加固试验，随后 De Lorenzis (2000 年)、Hassan 和 Rizkalla (2001 年) 进行了 CFRP 筋嵌入式加固的试验，Täljsten、Nordin (2003 年) 进行了更为广泛的试验。在普通 FRP 筋嵌入式加固试验的基础上，Håkan Nordin 和 Björn Täljsten 于 2006 年进行了预应力 CFRP 筋嵌入式加固的试验研究 (图 1.3.4)。

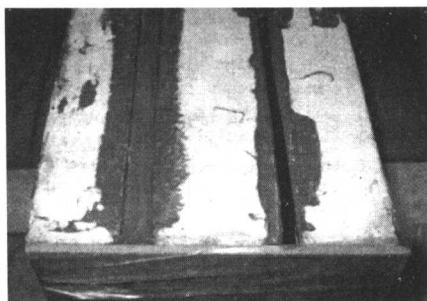


图 1.3.3 填入树脂及 FRP 筋

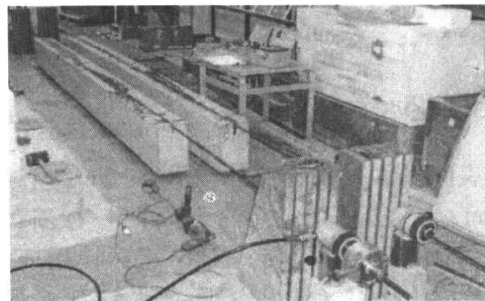


图 1.3.4 预应力 CFRP 筋嵌入式加固

1.3.2 MF-FRP 法

近年来，美国 Wisconsin 大学提出了一种机械紧固 FRP 条带的加固方法——MF-FRP (Mechanically-Fastened FRP) 法^[20,21]。MF-FRP 法与外贴 FRP 加固技术的区别在于 MF-FRP 法是通过机械锚固的方式使 FRP 条带与混凝土梁共同工作。

MF-FRP 法相对于外贴 FRP 加固技术的优点有：

- (1) MF-FRP 法不需要处理混凝土表面，使得加固程序更为简单；
- (2) MF-FRP 法不影响被加固构件的使用。外贴 FRP 加固技术中粘贴 FRP 后至少需要 24h 使环氧树脂粘贴干燥，加固完毕后一个星期才能投入使用；



图 1.3.5 SafStrip™ FRP 板条

- (3) 外贴 FRP 条带时，为了避免条带端部发生剥离破坏，常在端部粘贴“U”形 FRP 箍或钢锚栓进行锚固，而 MF-FRP 法不需要在端部有特殊的锚固。

MF-FRP 法中使用的加固材料是 FRP 板条，通常宽度为 102 mm，厚度为 3.2mm，有 CFRP 和混杂 CFRP-GFRP 两种板条，图 1.3.5 为美国 Strongwell 公司生产的 SafStrip™ FRP 板条。加固中所用的锚固材料是大头钉、锚栓或膨胀螺栓 (图 1.3.6)，打入锚固材料的机械是气枪 (图 1.3.7)。使用 FRP 板条之前，在混凝土基层上每隔一段距离，预先钻好与锚固材料直径相同的浅孔，同时在 FRP 板