



预应力FRP筋混凝土结构 关键性能研究

YUYINGLI FRP JIN HUNNINGTU JIEGOU
GUANJIAN XINGNENG YANJIU

王作虎 詹界东 □ 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

预应力 FRP 筋混凝土结构 关键性能研究

王作虎 詹界东 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

预应力 FRP 筋混凝土结构关键性能研究/王作虎, 詹界东著. —北京: 知识产权出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-5130-4521-6

I. ①预… II. ①王… ②詹… III. ①纤维增强混凝土—混凝土结构—性能—研究
IV. ①TU377.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 244236 号

内容简介

本书基于具体的试验和理论分析, 介绍了预应力纤维增强聚合物 (FRP) 筋混凝土结构关键力学性能的研究成果, 旨在帮助读者了解预应力 FRP 筋混凝土结构的特点。

本书主要内容包括 FRP 筋锚具的研制、预应力 FRP 筋混凝土梁的应力损失研究, 以及预应力 FRP 筋混凝土梁的抗弯、抗剪和抗震性能研究, 提供了相关试验结果和理论分析结果。书中还论述了 FRP 筋组合式锚具的锚固机理、预应力 FRP 筋混凝土梁有限元非线性分析基本问题的讨论, 提供了相关理论分析结果和有限元参数分析结果。

本书内容具有系统性、理论性和实用性, 可供土木工程专业师生和广大科技人员参考。

责任编辑: 张雪梅

责任校对: 谷 洋

封面设计: 睿思视界

责任出版: 刘译文

预应力 FRP 筋混凝土结构关键性能研究

王作虎 詹界东 著

出版发行: 知识产权出版社 有限责任公司

网 址: <http://www.ipph.cn>

社 址: 北京市海淀区西外太平庄 55 号

邮 编: 100081

责编电话: 010-82000860 转 8171

责编邮箱: 410746564@qq.com

发行电话: 010-82000860 转 8101/8102

发行传真: 010-82000893/82005070/82000270

印 刷: 北京科信印刷有限公司

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 17.75

版 次: 2016 年 10 月第 1 版

印 次: 2016 年 10 月第 1 次印刷

字 数: 330 千字

定 价: 78.00 元

ISBN 978-7-5130-4521-6

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

前 言

随着结构的安全性和耐久性日益得到重视,高性能纤维增强聚合物(FRP)筋的研究和应用得以不断深入。将FRP筋配置于混凝土结构内部或外部,从而替代钢筋应用于恶劣的环境中而不被腐蚀,是解决混凝土结构耐久性不足的有效途径之一,具有广阔的应用前景。

在非预应力FRP筋混凝土结构中,由于FRP筋的弹性模量相对较低,结构的变形较大,从而FRP筋的高强度一般得不到有效发挥。为了充分发挥FRP筋轻质高强、耐腐蚀和抗疲劳性能好的特点,可以将FRP筋作为预应力筋用在各类结构中。在发达国家,将FRP筋用作混凝土结构的预应力筋在20世纪80年代就得到了发展,而我国在20世纪末21世纪初才刚刚起步。

由于FRP筋是线弹性材料,而且横向抗剪强度较低,人们自然对预应力FRP筋锚具、预应力FRP筋混凝土结构的抗弯、抗剪和抗震性能非常关心。本书作者在国家自然科学基金(项目编号:51308028,51378046)、北京市教育委员会科技计划一般项目基金(项目编号:KM201610016012)及北京节能减排关键技术协同创新中心的资助下,紧紧围绕预应力FRP筋混凝土结构这一主题,开展了一系列的试验研究和理论与数值分析工作。

本书共9章,主要内容包括:绪论,FRP筋组合式锚具的锚固机理,FRP筋夹片-粘结型锚具的研制,FRP筋夹片-套筒型锚具的研制,预应力FRP筋混凝土梁的应力损失研究,预应力FRP筋混凝土梁有限元非线性分析基本问题的讨论,预应力FRP筋混凝土梁抗弯性能的研究,预应力FRP筋混凝土梁抗剪性能的研究,预应力FRP筋混凝土梁抗震性能的研究。其中,第1章由王作虎和詹界东共同撰写,第2~4章由詹界东撰写,第5~9章由王作虎撰写。全书由王作虎统稿。本书可供土木工程及相关专业的研究人员、工程技术人员、规范编制人员以及学生参考使用。

本书基于的研究工作得到了前述基金以及北京节能减排关键技术协同创新中心的支持,在此表示衷心感谢。感谢北京工业大学的杜修力教授、张建伟教授、邓宗才教授、韩强教授,清华大学的刘晶波教授,北京建筑大学的廖维张副教授,以及中国建筑科学研究院的李建辉副研究员在作者研究工作期间的大力支持和积极参与。本书引用了大量参考文献,在此对这些文献的作者表示谢意。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 FRP 材料的特点	2
1.3 FRP 在结构工程中的应用	2
1.4 国内外研究现状	5
1.4.1 预应力 FRP 筋锚具	5
1.4.2 预应力 FRP 筋混凝土梁结构的延性	10
1.4.3 预应力 FRP 筋混凝土梁的抗弯性能	11
1.4.4 预应力 FRP 筋混凝土梁的抗剪性能	13
1.4.5 预应力 FRP 筋混凝土梁的长期性能	14
1.5 主要研究内容	15
第 2 章 FRP 筋组合式锚具的锚固机理	18
2.1 锚固系统的技术要求	18
2.2 锚具系统的失效模式	20
2.3 夹片-粘结型锚具的锚固机理	22
2.3.1 开发思路	22
2.3.2 锚固机理	23
2.4 夹片-套筒型锚具的锚固机理	25
2.4.1 预紧时受力分析	26
2.4.2 预紧卸载后受力分析	27
2.4.3 锚固时受力分析	28
2.5 小结	29
第 3 章 FRP 筋夹片-粘结型锚具的研制	31
3.1 锚具设计与制作	31
3.1.1 锚具设计	31
3.1.2 锚具的加工制作	32
3.2 静载试验内容及方案	33
3.2.1 试验设备及测试内容	33
3.2.2 加载程序	34
3.3 第一批静载试验结果及分析	35
3.3.1 试验试件	35
3.3.2 试验结果及分析	36
3.4 第二批静载试验结果及分析	41

3.4.1	试验试件	41
3.4.2	试验结果及分析	42
3.5	动载试验	44
3.5.1	试验内容及方案	44
3.5.2	试验结果	46
3.6	小结	48
第 4 章	FRP 筋夹片-套筒型锚具的研制	50
4.1	锚具设计与制作	50
4.1.1	锚具设计	50
4.1.2	加工制作	52
4.2	静载试验内容及方案	54
4.2.1	试验设备及测试内容	54
4.2.2	加载程序	55
4.3	静载试验结果及分析	55
4.3.1	试验试件	55
4.3.2	试验结果	57
4.3.3	试验结果分析	61
4.4	动载试验	66
4.4.1	试验内容及方案	66
4.4.2	试验结果	66
4.5	小结	68
第 5 章	预应力 FRP 筋混凝土梁的应力损失研究	70
5.1	试件设计	70
5.2	FRP 筋的张拉控制应力	71
5.3	FRP 筋的预应力损失分析	72
5.3.1	锚具变形和预应力 FRP 筋内缩引起的预应力损失	72
5.3.2	预应力 FRP 筋与孔道壁之间摩擦引起的预应力损失	73
5.3.3	混凝土收缩徐变引起的预应力损失	73
5.3.4	混凝土弹性压缩引起的应力损失	74
5.3.5	预应力筋应力松弛损失	74
5.3.6	与钢绞线应力损失的比较	75
5.4	小结	76
第 6 章	预应力 FRP 筋混凝土梁有限元非线性分析基本问题的讨论	78
6.1	钢筋混凝土有限元模型的选择	78
6.1.1	分离式模型	78

6.1.2 组合式模型	78
6.1.3 整体式模型	79
6.2 混凝土的开裂模拟	79
6.3 预应力有限元的建模方法及比较	79
6.3.1 等效荷载法	80
6.3.2 实体力筋法	80
6.4 材料单元和本构关系的选择	81
6.4.1 混凝土	81
6.4.2 普通钢筋	83
6.4.3 预应力 FRP 筋	84
6.4.4 预应力钢绞线	84
6.4.5 粘结单元	84
6.5 非线性分析中其他问题的处理	85
6.5.1 非预应力筋的处理	85
6.5.2 支座和加载点的处理	85
6.5.3 加速收敛的方式	86
6.6 有限元结果与试验结果的对比	86
6.6.1 模型尺寸和材料性能	87
6.6.2 体内有粘结预应力 FRP 筋混凝土梁的有限元分析	87
6.6.3 体内无粘结预应力 FRP 筋混凝土梁的有限元分析	91
6.7 小结	95
第 7 章 预应力 FRP 筋混凝土梁抗弯性能的研究	97
7.1 预应力 FRP 筋混凝土梁抗弯试验研究	97
7.1.1 试验梁的设计	97
7.1.2 试验研究结果	103
7.1.3 试验结果分析和比较	112
7.2 有粘结预应力 FRP 筋混凝土梁抗弯承载力的计算	116
7.2.1 抗弯承载力设计	117
7.2.2 强度折减系数	122
7.3 无粘结预应力 FRP 筋的极限应力计算	123
7.3.1 现有的计算方法和主要计算公式	124
7.3.2 基于挠度的无粘结预应力筋的极限应力	127
7.3.3 各种公式的验证比较	128
7.4 体外预应力 FRP 筋混凝土梁的承载力计算分析	130
7.4.1 研究现状	130

7.4.2	简化计算方法	133
7.4.3	已有试验数据对计算公式的验证	135
7.5	有粘结和无粘结相结合预应力 FRP 筋混凝土梁的承载力计算	136
7.5.1	基本假定和破坏形态	136
7.5.2	有粘结和无粘结相结合的预应力 FRP 筋同排布置承载力推导	139
7.5.3	有粘结和无粘结相结合的预应力 FRP 筋不同排布置承载力推导	141
7.5.4	公式的校核	144
7.6	预应力 FRP 筋混凝土梁抗弯性能有限元非线性分析	145
7.6.1	有限元建模过程与求解	145
7.6.2	有限元结果分析	149
7.6.3	参数分析	155
7.6.4	预应力 FRP 筋的合理配置	157
7.7	小结	162
第 8 章	预应力 FRP 筋混凝土梁抗剪性能的研究	164
8.1	FRP 筋混凝土梁抗剪性能的研究进展	164
8.1.1	非预应力 FRP 筋混凝土梁的抗剪性能	165
8.1.2	预应力 FRP 筋混凝土梁的抗剪性能	168
8.2	预应力 FRP 筋无腹筋混凝土梁的抗剪试验研究	169
8.2.1	试验梁的设计	169
8.2.2	试验结果	171
8.2.3	试验结果分析和比较	175
8.3	有粘结预应力 FRP 筋有腹筋混凝土梁的抗剪试验研究	176
8.3.1	试验梁的设计	176
8.3.2	试验结果	177
8.3.3	试验结果比较和分析	182
8.4	无粘结预应力 FRP 筋有腹筋混凝土梁的抗剪试验研究	186
8.4.1	试验梁的设计	186
8.4.2	试验研究结果	187
8.4.3	试验结果分析和比较	192
8.5	预应力 FRP 筋混凝土梁抗剪承载力的计算	194
8.5.1	钢筋混凝土结构抗剪承载力分析方法的发展	195
8.5.2	预应力钢绞线混凝土结构抗剪性能的研究进展	196
8.5.3	桁架+拱模型分析法	197
8.5.4	各种规范公式计算结果与试验结果的比较	202
8.5.5	简化公式的提出	203

8.6	预应力 FRP 筋混凝土梁抗剪性能的有限元模拟	205
8.6.1	有限元建模过程与求解	205
8.6.2	有限元结果分析	206
8.7	预应力 FRP 筋混凝土梁抗剪性能的有限元参数分析	213
8.7.1	混凝土强度	213
8.7.2	剪跨比	214
8.7.3	配箍率	216
8.7.4	预应力	217
8.7.5	预应力筋的粘结情况	217
8.8	小结	218
第 9 章	预应力 FRP 筋混凝土梁抗震性能的研究	220
9.1	预应力 FRP 筋混凝土梁抗震性能试验研究	220
9.1.1	试验梁的设计	220
9.1.2	试验结果与分析	224
9.1.3	试验研究结论	233
9.2	预应力 FRP 筋抗震性能的有限元分析	234
9.2.1	有限元建模过程与求解	235
9.2.2	有限元结果分析	238
9.3	有限元参数分析	242
9.3.1	预应力筋的种类	242
9.3.2	预应力筋的配筋率	243
9.3.3	非预应力筋的配筋率	244
9.3.4	预应力度	245
9.3.5	混凝土强度	246
9.3.6	预应力筋的粘结情况	246
9.3.7	初始张拉力	247
9.4	预应力 FRP 筋混凝土梁的恢复力模型	248
9.4.1	恢复力模型的研究现状	248
9.4.2	预应力 FRP 筋混凝土梁的恢复力模型计算	250
9.4.3	模型计算值与试验值的对比	260
9.5	小结	262
参考文献		265

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

土木工程在近几个世纪的发展和演变中不断注入新的内涵,其中,材料的变革起着最为重要的推动作用。

过去的 50 年,道路、桥梁、隧道、大坝以及工业与民用建筑大量建设。在这些工程建设中,常见的是混凝土结构和钢结构,其次是砌体结构和玻璃结构。新世纪混凝土结构的发展,在很大程度上有赖于新材料的发展和应用^[1]。

建筑物和桥梁等工程结构的维修、加固、改造及新建技术的开发和研究是 21 世纪结构工程面临的重大课题。据国外资料介绍^[2],美国每年因钢筋锈蚀造成的损失高达 700 亿美元。目前美国的近 60 万座钢筋混凝土桥梁中,有近 10 万座钢筋锈蚀严重,进行修补至少需要 400 亿美元。英国、德国、日本等国每年均花费巨资用于混凝土结构的耐久性修复,其中钢筋锈蚀占相当大的比例。华盛顿林肯纪念馆、杰弗逊纪念馆,柏林议会大厦等重要建筑物都曾发现钢筋锈蚀引起的损坏现象^[3]。很多资料表明,当前有些交通发达的国家,桥梁建设的重点已放到了旧桥的加固与改造方面,而新建桥梁已降至次要地位。国内旧桥加固或改造的经验也表明,在一般情况下,桥梁的加固费用为新建桥梁费用的 10%~20%,双曲拱桥的加固改造费用为新建桥梁费用的 20%~40%^[3]。

国内外已有的研究和工程应用表明,高性能纤维产品是加强和改善混凝土结构的一种新的优良材料。不论是新建、修补还是补强工程,从基础设施长寿命化的要求来看,纤维增强聚合物(fiber reinforced polymer, FRP)耐腐蚀能力强,将是替代钢材的最佳选择之一。因为研究和应用均表明,环氧涂层等方式处理钢筋锈蚀的问题仍然存在,而 FRP 是以非金属纤维(如碳纤维、芳纶纤维或玻璃纤维等)作增强材料,以树脂(如环氧树脂、乙烯基酯树脂或聚酯树脂等)作基体材料的复合材料,具有耐腐蚀能力强的显著特征,可以有效地解决钢筋锈蚀引起的钢筋混凝土结构耐久性问题,同时它还具有轻质高强、抗疲劳能力强、电磁感应低等优点,在新建结构和既有结构加固改造中均具有广阔的应用前景。

1.2 FRP 材料的特点

FRP 是采用多股连续纤维作为增强纤维,热固性树脂作为基体材料,将增强纤维和基体树脂胶合,通过固定截面形状的模具挤压、拉拔快速固化成型的复合材料。

目前常见的增强纤维包括碳纤维、芳纶纤维(aramid 纤维)和玻璃纤维,常见的热固性树脂包括环氧树脂、乙烯基酯树脂、不饱和树脂等。目前结构工程中常用的 FRP 主要为碳纤维增强塑料(CFRP)、芳纶纤维增强塑料(AFRP)和玻璃纤维增强塑料(GFRP)。

FRP 与钢筋相比具有以下特点:

1) 有很高的比强度,即通常所说的轻质高强,因此采用 FRP 材料可以减轻结构的自重。在桥梁工程中,使用 FRP 结构或 FRP 组合结构可使桥梁的极限跨度大大增加。

2) 耐腐蚀性能好。FRP 可以在酸、碱、氯盐和潮湿的环境中长期使用,这是传统钢筋材料难以比拟的。

3) 具有很好的弹性性能。应力-应变曲线接近线弹性,没有钢筋那样的屈服点和屈服台阶。

4) 具有很好的可设计性。FRP 属于人工材料,可以通过使用不同的纤维材料、纤维含量和铺陈方向设计出各种强度指标、弹性模量以及特殊性能要求的 FRP 材料。

5) 其他优势,包括透电磁波、绝缘、隔热、热膨胀系数小等,使得 FRP 在一些特殊场合,例如雷达设施、地磁观测站、医疗核磁共振设备等结构中能够发挥难以取代的作用。

6) FRP 的弹性模量较低,而且横向抗剪强度较低,抗火性能较差,大多数树脂在高温下会软化。

经济性也是所有工程师和使用者都很关心的问题。仅从材料价格上看,FRP 结构和 FRP 组合结构与钢筋混凝土结构相比没有什么竞争力,但是由于自重轻,考虑到 FRP 材料耐腐蚀所带来的低廉维护费用,而且随着材料工业的发展,FRP 原材料的价格会逐渐降低,所以采用 FRP 材料的综合经济效益是值得重视的。

1.3 FRP 在结构工程中的应用

FRP 材料在结构工程的应用主要分为 FRP 片材和 FRP 筋。

自从瑞士联邦材料实验室 (EMPA) 开创性地采用外部粘贴碳纤维板对结构进行加固的研究工作, 并在日本得到了极大的发展后, FRP 片材引起了更多的关注, 不但在日本、美国、加拿大、欧洲及我国等国家和地区获得了广泛的应用, 而且被全世界更多国家所关注。

FRP 片材分为柔性的 FRP 布和刚性的 FRP 板。采用 FRP 片材加固混凝土结构是 FRP 在土木工程中研究和应用最多的方式。通常是将 FRP 布或 FRP 板粘贴到混凝土结构表面对结构进行受弯、受剪和抗震等加固, 从而提高结构的承载力或延性, 同时改善结构的使用性能并提高结构的耐久性。FRP 片材加固的工程结构类型极其广泛, 包括房屋及桥梁的梁、板、柱构件, 墙体及烟囱、隧道等各类结构, 如图 1-1 所示。由于 CFRP 具有优越的物理、化学及力学性能, 随着 CFRP 布制造工艺的成熟及成本的不断下降, 它已成为结构加固中最常用的一种 FRP 片材。FRP 板除了可以用于既有结构加固外, 还可以直接作为结构的一部分用于新建结构, 其中以 FRP 蜂窝夹心板等层叠状板材在桥面板中的使用较为广泛。



(a) 加固桥梁



(b) 加固混凝土柱

图 1-1 FRP 布在结构工程中的应用

在 FRP 片材的应用方面, 日本与其他国家的应用重点有所不同。在日本, FRP 布在实际工程中的大量采用是在 1995 年发生的兵库县南部大地震和 1996 年的阪神大地震之后, 纤维材料加固施工的方便性使得对其应用需求在短时间内激增。因此在诸多的加固实例中, 抗震加固柱形结构是最多的, 而且加固效果和施工方法的研究最全面, 其次才是梁、板等结构的加固。最近的研究应用状况表明, 对老化结构的加固、改造的需求逐渐取代了特殊抗震加固的需要, 因此房屋及桥梁、板和隧道等应用正不断增多^[4]。而在我国及其他国家, 主要集中于结构性能下降、功能改变等原因的加固, 因此, 以房屋和桥梁的梁、板等构件的受弯、受剪加固为主。

在 FRP 片材得到了更多的研究和应用的同时, FRP 筋也有不少的应用实例。FRP 筋既可以用作增强筋, 又可以用作预应力筋; 既可以用于新建结构,

又可以用于既有结构的加固补强, 具有更广阔的应用空间。20 世纪 80 年代以来, FRP 筋逐渐应用于有特殊性能要求的结构物, 尤其是海洋工程、化学工程以及要求电磁中性的结构中。FRP 筋的研究和应用主要集中于日本、美国、加拿大和欧洲国家。随着复合材料生产工艺的发展, FRP 筋的产品类型不断丰富。目前, 在土木工程中应用的 FRP 筋主要有三种, 即 CFRP 筋、AFRP 筋和 GFRP 筋。日本和美国应用较多的是 CFRP 筋和 AFRP 筋, 欧洲应用的主要是 GFRP 筋和 AFRP 筋。

表 1-1 是使用 FRP 筋修建的典型预应力混凝土桥梁的实际工程。

表 1-1 国外典型的 FRP 筋预应力混凝土桥

桥名	地点	建成时间 (年)	结构类型	跨度/m	FRP 筋种类
Shinmya 桥	石川县	1988	先张预应力混凝土自行车桥	6.1	CFRP 绞线
石智川桥	九州县	1989	先张预应力混凝土公路桥	8.0	CFRP 绞线
Birdie 桥	茨城县	1990	先张和后张结合 预应力混凝土吊桥	46.5	CFRP 筋、绞线 和 AFRP 筋
Sumitomo 桥	Ehime 县	1991	先张和后张结合 预应力混凝土人行桥	10.5	CFRP 绞线
飞翔桥	爱知县	1992	后张预应力混凝土人行桥	75	CFRP 筋
Beddenton 桥	加尔盖利市	1993	先张和后张结合 预应力混凝土公路桥	19.2+22.8	CFRP 绞线、 CFRP 筋
Taylor 桥	Manitoba 省	1997	预应力混凝土公路桥	35	CFRP 筋、 GFRP 筋
Joffre 桥	Sherbrooke 市	1997	预应力混凝土公路桥	26~37	CFRP 格栅、 GFRP 筋
Lunenshe Gasse 桥	德国	1980	后张预应力混凝土试验桥	~6.6	GFRP 筋
Schiess bergstrasse 桥	德国	1991	后张预应力混凝土公路桥	53.1	CFRP 筋
Aberfeldy 桥	英国	1992	全 FRP 的斜拉人行桥	63	GFRP 桥面、 AFRP 斜拉索
Stock 桥	瑞士	1996	部分 CFRP 拉索斜拉桥	61	CFRP 筋

在我国, FRP 筋应用于预应力混凝土结构的实例还很少。2005 年, 以东南大学为主的课题组在江苏大学西山校区设计并建成了国内第一座高性能 CFRP 拉索斜拉桥 (总长 51.5m), 该桥是一座跨径为 30m+18.4m 的混凝土独塔双索面斜拉桥, 采用塔梁墩固结体系, 桥宽 6.8m, 索塔两边各布置 4 对拉索, 拉索采用 leadline 碳筋制成 (图 1-2)。

制约预应力 FRP 筋在我国发展的一个重要原因是 FRP 筋的生产线。以前国内还没有能够生产性能稳定的 FRP 筋的生产线,而进口的 FRP 筋价格昂贵,所以只有很少的研究机构开展这方面的研究。随着国内 FRP 筋生产线的引进,越来越多的国内企业能够生产 GFRP 筋和 CFRP 筋,很多高校和科研机构已经进行或计划进行 FRP 筋混凝土结构的研究。



图 1-2 国内首座 CFRP 拉索斜拉桥

1.4 国内外研究现状

1.4.1 预应力 FRP 筋锚具

FRP 筋应用于预应力结构必须有可靠的锚固,安全、经济、实用的锚固技术的开发是将 FRP 筋应用到实际预应力结构的关键之一。由于日本、欧美等发达国家和地区 FRP 技术的研究与应用早于我国,在对预应力 FRP 筋张拉锚固体体系的研究开发中已取得了一定成果,开发出多种形式的锚具,从锚固受力原理上可分为机械夹持式 (mechanical gripping anchors) 和粘结型 (bond-type anchors) 两大类,并由此派生出许多锚具系统^[5-30]。

机械夹持式锚具主要是靠锚具与 FRP 筋间摩擦力和咬合力产生的均匀表面剪力来实现锚固的。而 FRP 筋的横向抗剪强度较低,尤其是在应力集中处易发生由部分纤维丝断裂导致的 FRP 筋的整体断裂,因此在机械夹持式锚具的设计中,避免应力集中是保证 FRP 筋不被过早剪坏的关键。机械夹持式锚具主要可分为分离夹片式锚具、锥塞式锚具和压铸管夹片式锚具。

分离夹片式锚具 (split-wedge anchor) 由外锚环及两片或多个夹片组成,夹片带有细齿或不带细齿,如图 1-3 (a) 所示。这种锚具是由锚固高强钢筋的夹片式锚具发展而来,锚固原理主要是靠夹片施加在预应力筋上的压力产生夹持作用。其优点是设计灵活、施工方便、互换性好;缺点是夹片在夹持过程中易产生应力集中,损伤 FRP 筋。该锚具系统的破坏模式常表现为锚固区过早的剪切破坏 (理想的破坏模式是预应力筋在锚具以外的自由段断裂,这里不再列举,下同)。为减少对筋的损伤,Erki 等^[7]曾用塑料夹片代替钢制夹片应用于先张法,取得了令人满意的效果,但塑料夹片不适合用于永久性锚具中。

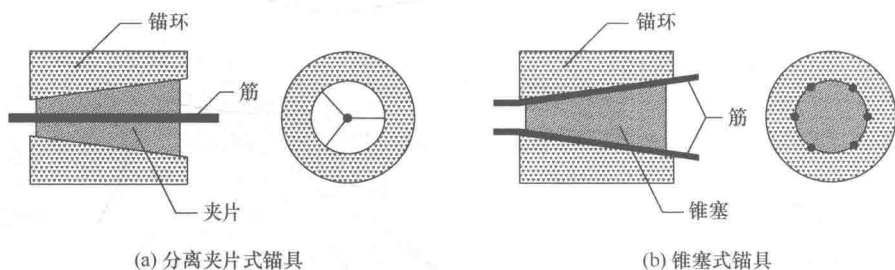


图 1-3 机械夹持式锚具

锥塞式锚具 (plug-in cone anchor) 由锚环及锥塞组成, 如图 1-3 (b) 所示。利用锥塞代替夹片, 可同时锚固多根 FRP 筋, 锚固原理主要靠锚环的内齿槽发挥夹持作用。其优点是避免了夹片对筋的损伤, 不需要粘结树脂, 从而不受环境因素的影响; 缺点是在夹持区域预应力筋存在变角现象, 湿气侵入会降低锚具的夹持作用 (需采用防护措施)。该锚具的破坏模式常表现为应力集中导致筋的过早破坏。Lees 的研究结果表明^[16], 锥塞式锚具特别适用于横向变形能力较好的 AFRP 筋, 锚固效果良好。

压铸管夹片式锚具 (die-cast wedge anchor) 由锚环、夹片及金属铸管组成, 适用于锚固单根和多根 FRP 筋, 锚固原理主要是靠压铸管的夹持作用 (类似钢绞线挤压锚具原理)。其优点是对 FRP 损伤小, 不需要树脂粘结; 缺点是增加了现场压铸工序及特殊的压铸机器。该锚具的破坏模式常表现为压铸管屈服和预应力筋拔出两种。Pincheira 等的研究表明^[14], 压铸管夹片式锚具锚固效果良好, 施工用时少, 便于现场安装, 是一种极有发展潜力的锚具系统。

FRP 筋材是将 FRP 纤维通过树脂浸渍胶合而成的, 树脂与树脂或树脂与水泥浆体之间有粘结性能, 粘结型锚具就是通过界面间的胶结力、摩擦力以及表面凹凸产生的机械咬合力来传递剪力的。目前粘结型锚具在国外最为常见。粘结型锚具可细分为套筒灌胶式锚具和杯口封装式锚具。

套筒灌胶式锚具 (resin sleeve anchor) 由内表面带有螺纹或经加工变形的管状金属、非金属套管或套筒组成, 如图 1-4 (a) 所示。锚固作用靠在套筒中注入树脂等粘结材料粘结得以实现, 并采用支承螺母锚固在构件上。其优点是技术成熟, 锚固可靠性好, 适用范围广; 缺点是锚具长度大, 尺寸要求精度高, 不适用于光圆筋, 抗冲击能力差, 蠕变变形大以及存在防潮和热耐久性问题。该锚具的破坏模式常表现为粘结破坏或粘结材料出现过大的蠕变变形。世界各 FRP 筋的生产厂家 (如 Tokyo Rope 等) 均提供了多种套筒灌胶式锚具; Wolff 等^[15]采用环氧砂浆作为粘结材料取得了成功; Zhang 和 Benmokrane 等^[21]采用水泥浆, Khin 等^[17]采用膨胀材料作粘结材料应用于地锚中均获得了成功。但套

筒灌胶式锚具的尺寸限制了其在后张法中的应用。

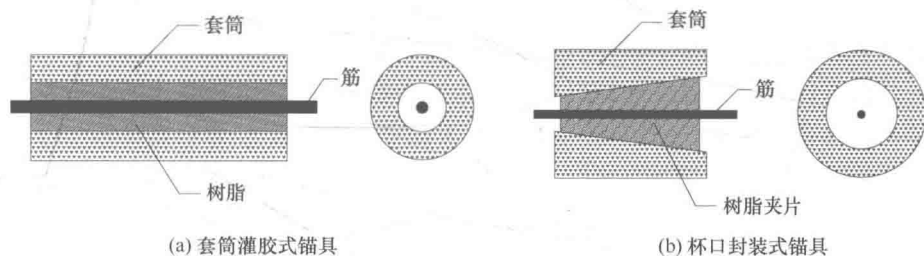


图 1-4 粘结型锚具

杯口封装式锚具 (resin-potted anchor) 由内部带锥形孔的金属锚环组成, 如图 1-4 (b) 所示。锚固作用靠在锥体内填充树脂或浆体形成粘结作用实现, 锚固力取决于锥体所施加的压应力。其优点是不损伤 FRP 筋; 缺点是锚具与筋之间的滑动大、锚固效果差, 同时和套筒灌胶式锚具一样, 存在蠕变变形大及热耐久性问题。该锚具的破坏模式常表现为锚具口处应力集中而引起的过早剪切破坏或滑动失效。为解决锚固区应力不均匀引起的应力集中, Meier 等^[24]提出了软化区观点, 使锚固用树脂填料的刚度从锚具前端往后逐渐增加, 获得了令人满意的效果。

各国学者还根据各类锚具的特点, 采用组合的办法形成了多种组合式锚具。组合式锚具充分利用了各类锚具的优点, 克服了单一锚具的缺点, 获得了很好的效果。

夹片-粘结型锚具是将分离夹片式锚具和套筒灌胶式锚具组合, 形成新的锚具系统。锚固作用靠粘结和夹片横向压力的综合作用来实现。其优点是充分利用了分离夹片式锚具和套筒灌胶式锚具各自的优点, 锚固效果很好; 缺点是施工复杂、工期长、造价高。该锚具的破坏模式常表现为滑动失效或粘结材料出现过大的蠕变变形。

夹片-套筒型锚具与夹片-粘结型锚具类似, 只是不采用树脂等粘结材料, 而利用软金属套管。锚固作用通过预压力安装锚具, 使 FRP 筋与套管之间、套管与夹片之间及夹片与锚环之间产生的作用引起的横向压力及摩擦咬合力来实现。其优点是施工方便, 不损伤 FRP 筋; 缺点是需通过专门设备预先安装锚具系统, 锚固区存在应力集中现象。该锚具的破坏模式常表现为锚固区应力集中而引起的过早剪切破坏。Al-Mayah 等^[22]提出的变角度观点很好地解决了上述问题。

除了上述锚具系统外, 国外学者还研究开发了其他锚具系统, 例如 Reda Taha 等^[10]新近开发了一种非金属锚具, 这种锚具由抗压强度高达 200MPa 以上

的特制超高性能混凝土制成锚环及夹片,代替了钢制锚环及夹片,避免了金属锚具用于非金属 FRP 筋所产生的问题,具有优越的耐腐蚀性能。试验证明,该锚具系统静载锚固性能系数达到 0.959,完全满足预应力系统的要求。

在借鉴国外研究成果的基础上,我国学者在预应力 FRP 筋锚具的研发方面做了一些工作。由于 FRP 筋的锚固体体系具有多样性,技术还不够成熟,这项新技术目前还处于研究开发的初期,还有很多研究工作要做。

试验研究方面,同济大学薛伟辰^[31]在国内首次研制了适用于纤维塑料筋的新型预应力粘结式锚具,随后,广西工学院张鹏等^[32]研制了单根碳筋的灌浆式螺丝端杆锚具,详细描述了灌浆式螺丝端杆锚具的构成和制作工序,并进行了母材和锚具静载试验。郑州大学高丹盈等^[33]分析研究了纤维增强塑料筋锚杆的组成、生产工艺、优点及应用,并对纤维增强塑料筋锚杆粘结式锚具的设计及应用进行了研究,其研究成果对粘结型锚具的研制具有重要意义。湖南大学的方志等^[34]分别选用环氧铁砂和普通混凝土作为粘结介质,分析了粘结式锚具的粘结机理,指出 FRP 筋的表面粗糙度,即 FRP 筋与粘结介质的机械咬合作用,对于粘结式锚具的性能具有决定性的影响,粘结式锚具不适用于表面光滑的 FRP 筋,其锚固需采用其他形式的锚具,粘结式锚具需要解决的问题是增强粘结介质与 FRP 筋的化学胶着力。河海大学的张作诚^[35]在总结国外各种 FRP 筋锚具的形式和失效现象,比较其优缺点的基础上,探索了粘结型锚具的制作方法,并进行拉伸试验,试验表明用钢管加固的粘结型锚具进行拉伸试验比较成功,这也为树脂型锚具提供了数据参考。其利用此锚具进行了碳纤维塑料筋剪切试验,取得了一定的试验效果。东南大学和北京特希达科技集团公司^[36-38]特别研究了两种灌注式锚具,介绍了新型灌注式锚具的特点和性能,研究表明选择具有一定膨胀率的灌注物是良好锚固性能的重要保证;并在 FRP 筋-锚具组装件静载试验基础上,针对 FRP 筋的特点,提出了 FRP 筋效率系数、锚具效率系数的计算方法,指出 FRP 筋-锚具组装件性能与预应力钢绞线-锚具组装件性能有较大区别,多根 FRP 筋的平均强度甚至有可能低于厂家提供的极限强度保证值,为 FRP 筋的应用及相应规程的编制提供参考,并将研制的锚具应用到国内首座 CFRP 斜拉桥——江苏大学西山人行天桥中。柳州欧维姆机械股份有限公司蒋业东等^[39]进行了国内为数不多的 CFRP 索群锚体系的静载试验。

张鹏等还针对南京某科研院所研制的碳纤维塑料筋,通过对传统钢绞线夹片锚具的改造,研制了单根碳筋的分离夹片式锚具。其方法是合理选择夹片的牙型及参数和对夹片合理处理,使其更适应 CFRP 材料;并进行了母材和锚具静载试验,取得了较好的试验效果。张继文等人采用粘砂夹片进行尝试,以提高夹持作用,取得了初步成果。柳州海威姆机械有限公司朱万旭等^[40]在参考国外经验的基础上,以国产直径 10mm 的碳筋为研究对象,研制出一种压铸管夹