



土木工程结构研究新进展丛书

高强钢绞线网-聚合物砂浆 加固混凝土结构破坏机理与设计方法

黄 华 刘伯权◎著

中国建筑工业出版社

013028533

TU755

27

土木工程结构研究新进展丛书

高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土结构 破坏机理与设计方法

黄 华 刘伯权 著



中国建筑工程工业出版社



北航

C1635033

TU755

27

013058233

图书在版编目 (CIP) 数据

高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土结构破坏机理与设计方法/黄华, 刘伯权著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 2

(土木工程结构研究新进展丛书)

ISBN 978-7-112-15157-8

I. ①高… II. ①黄… ②刘… III. ①混凝土结构-破坏机理-研究②混凝土结构-设计-方法-研究 IV. ①TU746

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 034343 号

本书详细介绍了高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土结构新技术的应用。主要包括高强钢绞线网-聚合物砂浆加固材料性能特点、高强钢绞线网-聚合物砂浆与混凝土的粘结破坏机理、高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土抗弯构件正截面承载力、高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土抗剪构件斜截面承载力、高强钢绞线网-聚合物砂浆加固梁剥离机理、高强钢绞线网-聚合物砂浆加固案例及施工要点, 并附有相关工程计算实例。

* * *

责任编辑: 王 梅 武晓涛

责任设计: 张 虹

责任校对: 张 颖 陈晶晶

土木工程结构研究新进展丛书

高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土结构
破坏机理与设计方法

黄 华 刘伯权 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

北京科地亚盟排版公司制版

北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13 $\frac{3}{4}$ 字数: 337 千字

2013 年 2 月第一版 2013 年 2 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-15157-8
(23109)

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

钢筋混凝土结构是当前最为广泛的结构形式,我国 400 多亿平方米的既有建筑中,混凝土结构占据绝对多数。由于城市化进程的显著加快,工程结构在设计、施工和使用管理上存在先天不足,同时由于地震、洪涝、飓风等自然灾害的影响,既有建筑中约有 30%~50% 出现安全性降低或进入功能衰退期。当前,我国工程结构加固改造的任务量大面广,工程建设者任重道远,工程结构加固已成为我国土建行业中一个重要分支。

近年来,混凝土结构加固研究取得了巨大进展,目前常用的加固方法有:加大截面法、增补钢筋法、预应力加固法、改变传力途径法、改变受力体系法、粘贴钢板法、外包钢法、粘贴碳纤维法、喷射混凝土加固法等。不同加固方法有其自身的优势和缺点,分别适应不同的维修改造工程。

高强钢绞线网-聚合物砂浆加固技术是进入 21 世纪后开发的一种新型加固技术。该技术在混凝土构件表面铺上高强不锈钢绞线网,采用膨胀螺栓锚固后,喷射渗透性聚合物砂浆,使其与原构件形成整体而共同工作,以提高结构承载力和耐久性。与现有加固技术相比,该技术优势明显,它能够有效提高被加固构件的承载力、刚度和变形能力;加固面层薄,对结构净空和使用几乎没影响;加固材料无毒、少污染,防腐、耐高温、防火性能良好,且与原结构粘结力好;施工周期短,不需大型机具设备。该方法适用面广,可广泛用于各种结构类型(如桥梁、建筑物、构筑物、隧道、涵洞等)、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、拱、壳等)的加固修补。当前对该加固技术的研究尚处于初级阶段,为进一步推动该加固技术的工程应用,长安大学建筑工程学院成立了研究小组,借助相关课题的资助,对加固构件的粘结性能、剥离破坏、抗弯性能、抗剪性能等进行了系统研究,取得了一批有使用价值的成果,同时积累了一定的工程经验和宝贵的科研资料。

感谢河北沧州交通勘测设计院为本研究提供相关资料和资助,感谢长安大学土木工程研究所研究生邢国华、刘卫铎、付国、杨琪、郑益斌、何志兵等在本书所涉研究中做的工作。本文引用了大量参考文献,在此对本书所引用参考文献的作者表示感谢。

感谢高等学校博士学科专项科研基金“加筋高性能砂浆加固钢筋混凝土结构粘结机理研究”(20090205120008)、陕西省自然科学基金“HPFL-粘钢联合加固震损柱二次地震灾变机理研究”(2012JQ7024)、中国博士后科研专项基金“HPFL-粘钢联合加固震损柱抗震性能及破坏准则研究”(2012M511956)、中央高校基本科研业务费专项基金“加筋高性能砂浆与混凝土界面行为研究”(CHD2009JC160)、“强震作用下 HPFL 加固柱力学行为及破坏准则研究”(CHD 2012JC026)对作者所做研究工作的资助。

本书共 7 章,其中第 1、3、4、5、6 章以及附录由黄华执笔,第 2、7 章由刘伯权执笔,黄华负责统稿。希望本书的出版能给广大工程技术人员在加固设计与施工应用中提供参考和帮助。同时,限于作者水平,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正,也欢迎广大读者就书中相关内容和资料进行交流。

目 录

1 绪论	1
1.1 工程结构加固改造的原因	1
1.2 混凝土结构加固常用方法	3
1.2.1 加大截面加固法	4
1.2.2 外包钢加固法	4
1.2.3 预应力加固法	4
1.2.4 增设支点加固法	5
1.2.5 粘贴钢板加固法	5
1.2.6 粘贴纤维复合材料加固法	5
1.3 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土结构	6
1.3.1 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固技术的优点	6
1.3.2 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固技术研究现状	9
参考文献	12
2 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固材料性能	16
2.1 渗透性聚合物砂浆与界面剂简介	16
2.2 渗透性聚合物砂浆材料性能	17
2.2.1 渗透性聚合物砂浆综合性能指标	17
2.2.2 渗透性聚合物砂浆抗压强度	18
2.3 高强钢绞线网材料性能	20
参考文献	23
3 高强钢绞线网-聚合物砂浆与混凝土粘结破坏机理	24
3.1 粘结机理研究现状	24
3.1.1 粘结机理	25
3.1.2 界面粘结性能的影响因素	26
3.1.3 现有新老混凝土粘结性能的试验研究	28
3.1.4 砂浆薄层与混凝土界面粘结的特点	30
3.2 聚合物砂浆与混凝土界面抗拉性能试验研究	30
3.2.1 正拉粘结破坏特征	31
3.2.2 粗糙度对正拉粘结强度的影响	34
3.2.3 龄期对正拉粘结强度的影响	36

3.2.4	混凝土和砂浆强度对正拉粘结强度的影响	37
3.2.5	修补方位对正拉粘结强度的影响	38
3.2.6	正拉粘结强度影响因素显著性分析	39
3.2.7	正拉粘结强度计算公式	41
3.2.8	正拉粘结强度简化计算公式	43
3.3	聚合物砂浆与混凝土界面抗剪性能试验研究	43
3.3.1	粗糙度对剪切粘结强度的影响	45
3.3.2	混凝土和砂浆强度对剪切粘结强度的影响	45
3.3.3	修补方位对剪切粘结强度的影响	45
3.3.4	剪切粘结强度影响因素显著性分析	46
3.3.5	剪切粘结强度计算公式	46
3.3.6	剪切粘结强度简化计算公式	47
3.4	聚合物砂浆与混凝土界面剥离破坏试验研究	48
3.4.1	剥离破坏试验方案	48
3.4.2	剥离破坏试验结果	49
3.4.3	剥离破坏承载力计算	51
3.4.4	界面粘结本构模型	53
3.4.5	高强钢绞线应力发展模型	59
3.5	加固层材料粘结锚固性能研究	60
3.5.1	聚合物砂浆与钢绞线粘结锚固性能研究	60
3.5.2	加固层厚度、界面粘结力、钢绞线握裹力三者协调关系	63
3.6	本章小结	66
	参考文献	68
4	高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土抗弯构件正截面承载力	73
4.1	加固梁抗弯试验概况	73
4.1.1	试验梁的设计与制作	73
4.1.2	试验量测	77
4.2	加固梁抗弯性能试验分析	80
4.2.1	抗弯加固梁破坏特征	81
4.2.2	抗弯加固梁刚度分析	86
4.2.3	抗弯加固梁裂缝分析	87
4.3	加固梁抗弯性能有限元参数分析	90
4.3.1	抗弯加固梁有限元模型	90
4.3.2	抗弯加固梁试验及有限元对比分析	91
4.3.3	混凝土强度对加固性能的影响	92
4.3.4	原梁纵筋配筋率对加固性能的影响	93
4.3.5	钢绞线用量对加固性能的影响	95
4.3.6	二次受力对加固性能的影响	95

4.4 相关单位的加固梁抗弯性能试验	99
4.4.1 清华大学试验 ^[3,4]	100
4.4.2 福州大学试验 ^[5]	103
4.5 加固梁正截面强度计算	105
4.5.1 抗弯加固正截面强度理论分析	105
4.5.2 抗弯加固正截面承载力简化计算公式	108
4.5.3 抗弯加固正截面变形计算	110
4.5.4 抗弯加固最大裂缝宽度计算	114
4.5.5 抗弯加固钢绞线界限用量计算	116
4.6 本章小结	118
参考文献	119
5 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土抗剪构件斜截面承载力	120
5.1 加固梁抗剪试验概况	120
5.1.1 试验梁的设计与制作	120
5.1.2 试验量测	122
5.2 加固梁抗剪性能试验分析	123
5.2.1 抗剪加固梁破坏特征	124
5.2.2 抗剪加固梁刚度分析	129
5.2.3 抗剪加固梁裂缝分析	131
5.3 加固梁抗剪性能有限元参数分析	135
5.3.1 抗剪加固梁有限元模型	135
5.3.2 抗剪加固梁试验及有限元对比分析	137
5.3.3 混凝土强度对加固性能的影响	139
5.3.4 原梁配箍率对加固性能的影响	141
5.3.5 钢绞线用量对加固性能的影响	142
5.3.6 加固方式对加固性能的影响	143
5.3.7 剪跨比对加固性能的影响	145
5.4 相关单位的加固梁抗剪性能试验	148
5.4.1 清华大学试验 ^[2]	148
5.4.2 华东交通大学试验 ^[12]	150
5.5 加固梁斜截面强度计算	153
5.5.1 抗剪加固斜截面强度理论分析	153
5.5.2 抗剪加固斜截面强度计算	154
5.5.3 考虑剪切变形的挠度计算	159
5.5.4 抗剪加固斜裂缝宽度计算	160
5.6 本章小结	164
参考文献	165

6 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固梁剥离机理	168
6.1 剥离破坏现象	168
6.2 抗弯加固剥离破坏研究	168
6.2.1 抗弯加固破坏模式	168
6.2.2 剥离破坏区域应力状态	169
6.2.3 端部锚固剥离破坏分析	170
6.2.4 中部弯曲裂缝引起的剥离破坏分析	178
6.3 抗剪加固破坏模式	180
6.3.1 抗剪加固破坏模式	180
6.3.2 抗剪加固剥离承载力计算	182
6.4 本章总结	184
参考文献	184
7 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固案例及施工要点	187
7.1 加固设计流程	187
7.1.1 抗弯加固设计流程及计算示例	187
7.1.2 抗剪加固设计流程及计算示例	190
7.2 加固工程案例	191
7.2.1 某大桥基本情况	191
7.2.2 加固前检测	192
7.2.3 加固设计方案	196
7.2.4 加固后检测	196
7.3 加固施工要点	200
7.3.1 施工顺序及要求	200
7.3.2 加固工具	201
7.3.3 施工注意事项	201
参考文献	202
附录 正拉粘结强度测试值	204

1 绪 论

1.1 工程结构加固改造的原因

新中国成立以来,特别是改革开放以来,我国国民经济飞速发展、人民生活水平稳步提高。全国人民对建筑物的安全性、适用性和耐久性的要求不断增强,越来越多的新型结构体系随之发展起来,建筑业进入空前繁荣的时代,截至2009年,我国既有建筑面积已达到436.5亿 m^2 。国外工程结构的发展过程表明:工程建设发展到一定阶段,已有结构的维修改造将成为主要的建设方式,我国也不例外。工程结构加固改造的原因是多方面的,归结起来主要有以下几个方面。

1. 达到或超过设计基准期

与所有使用工具一样,建筑物也是有使用寿命的,我们一般将其理解为设计基准期。虽然建筑物达到设计基准期不一定就不能用,但或多或少存在病害。早在1986年,国家统计局和原建设部的调查报告显示,我国46.76亿 m^2 的民用建筑中,约占64%的建筑使用期限超过20年;13.5亿 m^2 的工业建筑中,约占65%的建筑使用期限超过30年。而1995年的统计数据表明,当时60亿 m^2 的民用建筑中,约有50%需要加固,其中六分之一急需修理加固。到2009年,城乡既有建筑面积约为436.5亿 m^2 ,专家估计约有30%~50%的建筑物出现安全性降低或进入功能衰退期^[1]。

2. 先天性缺陷

一栋建筑物的诞生必须经过勘察、设计、施工等建设过程,由于人为或自然原因,不可避免地会造成先天缺陷。

首先,在地质勘察过程中,由于勘察设备、勘察人员的技术等不确定性因素,勘察结果不能准确反映地下岩层、土体、地下水位、地基承载力等的真实情况,而造成建筑物施工中、竣工后出现地基沉降、建筑倾斜、开裂等问题。

其次,在建筑设计过程中,虽然设计人员会尽可能考虑影响建筑结构安全和使用的各种因素,但是建筑物在运营过程中都有自己的特性,它不可能完全被设计时采用的力学模型所描述。并且,由于设计人员的工程经验、设计能力等参差不齐,造成结构方案选择不当、力学模型选择不合适,荷载组合错误等,使得设计的结构与实际使用中发生的情况有一定距离。尽管当前的设计思想、计算手段、绘图技术等有了很大的进步和发展,但结构仍有可能由于设计不足而出现各种缺陷。

最后,不规范的施工将给建筑带来致命缺陷。当前人们最为关心的是施工队伍素质低下所造成的建筑物质量低劣的现状。建筑业作为劳动密集型行业,吸收了大量农村剩余劳动力,这些农村建筑队伍的迅猛扩大,导致建筑施工人员的技术和管理素质普遍下降。有

关部门的统计显示:建筑队伍中受过专业训练的专业人员在全民企业中只占职工总数的8%,在集体企业中只占职工总数的1%,二级工以下的工人占工人总数的60%以上。此外,企业过度追求效益,不按图施工、偷工减料、使用劣质材料等时有发生,使得房屋质量存在很大隐患,正在施工或刚竣工就出现严重质量事故的现象在全国屡见不鲜(这些事故中约60%出现在施工阶段或建成尚未使用阶段)。更有甚者是违反基本建设程序,诸如不做可行性研究,无证设计或越级设计、无图施工、挂靠施工、层层分包等,均给所建工程留下隐患,造成严重后果。我国出现第四次工程事故高发期的原因与以上这些因素息息相关。

3. 遭遇自然灾害

我国是一个自然灾害多发的国家。地震、洪涝、风火等灾害每年给我国造成数以亿计的损失。

首先,我国地处环太平洋地震带和欧亚地震带,全国2/3的大城市处于地震区,200多个大城市抗震设防烈度在7度以上,20个百万以上人口的特大城市抗震设防烈度大于8度。进入21世纪,我国已发生7级以上地震7次,8级以上地震2次,历次地震都在不同程度上对建筑物造成了损坏。最近一次特大地震——汶川地震共造成四川、重庆、甘肃、陕西等省的650多万间房屋倒塌,2300多万间房屋损坏^[2]。根据土木工程结构专家组在四川地震主要灾区所调查的建筑震害资料^[3],砌体结构经加固后可使用的占同类建筑的37%,砌体-框架混合结构经加固后可使用的占同类建筑的21%,框架结构经加固后可使用的占同类建筑的32%,框架-剪力墙(核心筒)结构经加固后可使用的占同类建筑的29%,轻钢结构(屋面)/钢桁架拱经加固后可使用的占同类建筑的43%。

其次,我国东临西北太平洋,年均生成台风约28个,是世界上发生台风最多的地区,每年平均有8次台风登陆,有的可深入内地1500公里。此外,风灾可在高空及地面形成特殊涡流区,引发一系列衍生灾害及事故。据统计,我国风灾平均每年损坏房屋30万间,经济损失达十多亿元。

再次,水灾是我国各类自然灾害中发生频次最多的一类,并且水灾发生的范围越来越广,水灾造成的损失越来越大。统计资料显示:我国20世纪80年代因水灾造成的损失(1980~1988年)达到5985.4亿元;20世纪90年代(1991~2000年)进一步上升到12614.6亿元,比80年代增加了1.1倍,并一直呈增长趋势。近年来,暴雨成灾又逐年增加,尤其城市内涝频繁发生,给我国社会经济及人民生命财产造成巨大损失。我国每年水灾倒房发生数十万到数百万起,比地震倒房严重得多。2012年7月北京特大暴雨造成79人死亡,房屋倒塌10660间,160.2万人受灾,经济损失116.4亿元^[4]。

最后,火灾也是我国发生频率较高的一类灾害,每年平均发生火灾6万余起,其中建筑物火灾占火灾总数的60%左右。并且,随着国民经济的发展和城市化进程的加速,人口和建筑群的进一步密集,建筑物发生火灾的概率会进一步增加。高温烧烤使不少建筑物提前夭折,使更多的建筑物受到严重损伤。美国9·11事件中倒塌的双子大厦,火灾亦是其倒塌的主要原因之一。

4. 环境劣化和损伤累积

建筑物在使用过程中,一方面由于环境因素,如温湿度变化、环境水冲刷、高温、冻融、重载、钢筋腐蚀、粉尘、疲劳应力、潮湿等等,导致建筑材料性能劣化、结构破损,

这些损伤随时间而不断累积;另一方面,由于人为使用不当,如在结构任意开孔、挖洞、乱割、超载等,造成结构损伤。此外,缺乏对建筑物正确的管理、检查、鉴定、维修、保护和加固的常识所造成的对建筑物管理和使用不当,致使不少建筑物出现不应有的早衰。如在建筑物使用过程中,未经鉴定而增加荷载,装修时增加荷载,增设设备等;未经相关单位鉴定或加固即拆除承重构件,造成周围或上部构件承载力不足等。

5. 改变使用功能

随着经济、社会和科技的发展,越来越多的建筑物会出现变更用途。如企业在技术升级改造过程中,对原有工业建筑进行更新改造,增加房屋高度、增加荷载、增加跨度、增加层数等。根据资料统计,企业对已有设施的改建比新建可节约投资约40%,缩短工期约50%,收回投资的速度比新建厂房快3~4倍。同样,在我国对民用建筑进行改造的要求也日益迫切。随着我国农村城镇化以及城市人口的不断增长,尽管兴建了大量的住宅和相应的配套措施,但无房、缺房和使用不便的房屋仍达20%以上。而且随着城市房价的上涨,越来越多的人买不起新房。为缓解这一矛盾,一条重要出路是抓好旧房的户型改造、增层,向现有房屋要面积,以有效降低工程造价,缩短工程时间。我国城市现有的房屋中,有20%~30%具备增层改造的条件。对现有房屋进行改造,不仅可节省投资,同时可减少土地征用,缓解日趋紧张的城市用地矛盾,具有重要的现实意义。

综上所述,不论是对建筑物先天不足,还是对后天管理不善、使用不当而进行的维修;不论是为抗御灾害所需进行的加固,还是为灾后所需进行的修复;不论是为适应新的使用要求而对建筑物实施的改造,还是为建筑物超期服役而进行的正常诊断、处理,都需要对建筑物实施正确的管理维护和改造加固,以保证建筑物的安全和正常运营。由此可见,我国建筑物加固改造的任务量大面广,工程建设者任重道远。当前,建筑结构加固已成为我国建筑行业中一个重要分支,同时,该行业从加固技术、加固材料和加固效果等方面对当前的科研和教学也提出了要求。在这方面,国内外专家与学者做了大量的卓有成效的工作,取得了许多工程实效,结构加固作为结构工程的一个分支学科,正方兴未艾。

1.2 混凝土结构加固常用方法

加固技术是加固理论在加固工程中的具体应用,加固技术可大致分为以下几类:按加固方法分为直接加固、间接加固和综合加固;按功能因素分为结构功能性加固和使用功能性加固;按作用因素分为一般性加固和灾后加固;按时间因素可分为临时加固、中期加固和长期加固;按结构受力因素分为静力加固、动力加固和抗震加固。现阶段我国已颁布的混凝土加固规范及规程有《混凝土结构加固设计规范》GB 50367—2006、《建筑抗震加固技术规程》JGJ 116—2009和《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》CECS 146: 2003,另外还包括《砖混结构房屋加层技术规范》CECS 78: 96、《钢结构加固技术规范》CECS 77: 96、《钢结构检测评定及加固技术规程》YB 9257—96等其他结构的加固规程和相应的地方加固规程。

近年来,混凝土结构加固研究取得了非常大的进展,常用的加固方法主要有:加大截面法、增补钢筋法、预应力加固法、改变传力途径法、改变受力体系法、粘贴钢板法、外包钢法、粘贴碳纤维法、喷射混凝土加固法等^[1,5]。每种加固方法均有其自身的优势和缺

点,分别适用于不同的加固结构和不同的加固目的。加固设计与新设计的区别在于其受到原构件的制约,除了要考虑安全和经济因素外,还应考虑实际受力情况、周围环境、施工的可行性,进而选择合适的加固方法。

1.2.1 加大截面加固法

加大截面加固法是在处理原构件表面的基础上,再增加钢筋,并浇筑新的混凝土来增加构件承载力的一种加固方法。

根据工程结构的受力特点和加固要求,该方法在加固时可选用单侧加厚、双侧加厚、三面和四面外包等。其技术特点在于:设计构造方面必须注意解决好新旧截面的整体工作、共同受力问题。加固结构在受力过程中,结合面会出现拉压弯剪等各种复杂应力,其中主要是拉力和剪力。在弹性阶段,结合面的剪切应力和法向拉应力主要是靠新旧混凝土的粘结承担;出现裂缝之后直至承载力极限状态时,主要通过贯穿结合面的新增锚固钢筋或者螺栓来传递。因此,需适当配置受力钢筋和构造钢筋。同时需保证混凝土的浇筑质量,当外包层较薄、钢筋较密时,可用细石混凝土、自密实混凝土等。

加大截面法作为一种传统的加固方法,工艺简单,适用面广,能增大构件的刚度、承载力和变形能力,可广泛用于梁、板、柱、墙等混凝土结构的加固,也可用来修补开裂截面。其缺点是现场湿作业工作量大、养护期长,如果结合面处理不当就会大大降低其承载力,另外对结构外观及房屋净空也有不同程度的影响。

1.2.2 外包钢加固法

外包钢加固法是以型钢(一般为角钢)外包于钢筋混凝土构件(梁、柱)四角(或两角、四周)以提高其受力性能的一种加固方法。

外包钢加固法分湿式和干式两种情况。湿式外包钢加固就是在型钢与原构件间填塞胶水泥或以环氧树脂化学灌浆等方法粘结,以使型钢与原构件能整体工作共同受力。干式外包钢加固就是指把型钢直接外包于原构件,与原构件间没有粘结;或虽填塞有水泥砂浆,但不能保证结合面剪力有效传递,不能整体工作,只能彼此单独受力,承载力提高不如湿式外包钢加固有效。

该方法施工简便,现场工作量较小,受力较为可靠,对原结构构件的截面尺寸更改不大,仅仅是提高构件承载力,增加刚度与延性,一般在屋架、砖窗间墙、梁、混凝土柱等结构构件、构筑物加固中应用广泛。但该方法在节点部位处理复杂,用钢量较多,加固成本高。况且型钢防腐要求高,不适宜直接在高温、腐蚀环境中使用。

1.2.3 预应力加固法

预应力加固法是采用外加预应力钢拉杆或撑杆对结构进行加固的方法,即通过施加预应力,使撑杆或者拉杆受力,对原有结构的内力分布产生变化,降低结构的应力水平,提升结构承载力。预应力加固技术的特点是通过预应力手段,强迫提升撑杆受力或者后加拉杆,减少原结构的应力水平。这样,就可避免一般加固结构中的应力应变滞后现象,发挥改变、卸载、加固结构内力的作用,提升结构承载能力。

采取预应力加固技术,根据加固对象的具体差别,可分为预应力撑杆加固和预应力拉

杆加固两大类。一方面,预应力撑杆加固技术,主要加固轴心受压力或者小偏心受压柱,根据不同的柱受力状况,又可分为单侧撑杆加固和双侧撑杆加固两种方式。另一方面,预应力拉杆加固主要应用于一般的框架结构、网架结构、梁板结构、桁架结构等,鉴于加固的要求以及被加固结构的受力情况不同,又可将预应力拉杆加固分为水平式(正截面的受弯承载力不足)、下撑式(斜截面的受剪承载力及正截面的受弯承载力不足)和混合式(正截面的受弯承载力不足及斜截面的受剪承载力稍有不足)三种方式,分别适用于不同的截面中。一般情况下,主要采用普通钢筋施加体外预应力,近些年无粘结钢绞线、预应力碳纤维棒等在体外预应力加固中也得到了较为广泛的应用。

该方法一般适用于跨度较大的结构中,或者采取一般方法难以满足加固效果的情况。此方法不适合在高湿度环境下作业,这种环境下的混凝土结构或者混凝土收缩力有所变大,直接影响加固效果。另外,加固后需要注意预应力筋的防腐、防火等问题。

1.2.4 增设支点加固法

增设支点加固技术主要通过增加支撑点的方式,降低结构的计算跨度,改变结构内力分布,以提高承载力。梁、板在跨中增设支点后,减小了跨度,从而能较大幅度地提高承载能力,并能减小和限制梁、板的挠曲变形。

支点根据支承结构、构件受力变形性能的不同,可分为弹性支点加固法和刚性支点加固法。弹性支点主要通过支撑结构中的桁架等,间接传递荷载力。由于支撑结构变形与被加固结构变形属于同一个数量等级,支撑结构应按照弹性支点来考虑,涉及复杂的内力分析技术。刚性支点通过轴心受拉或者轴心受压,将荷载直接传递到柱子或者基础构件部分,这种方法的内力计算较为简单。相对来说,采取刚性支点技术加固,可较大提高结构的承载能力,而弹性支点则对空间使用的影响程度较低。

该方法简单可靠,适用于房屋净空不受限制的大跨度结构中梁、板、桁架、网架等水平结构的加固,但是会对使用空间造成一定影响。

1.2.5 粘贴钢板加固法

粘钢加固法是在混凝土构件表面用特制的建筑结构胶粘贴钢板,使其共同工作、整体受力,以提高结构承载力的一种加固方法。它实质是一种体外配筋,提高原构件的配筋量,从而相应提高结构构件的刚度、抗拉、抗压、抗弯和抗剪等方面的能力。

该方法依靠结构胶,与原构件形成整体,共同受力。因此对结构胶的要求较高,必须具有强度高、粘结力强、耐老化、弹性模量高、线膨胀系数小的特点,并且具有一定弹性。该加固技术对施工工艺的要求较高,需要确保施工队伍的专业性,提高施工质量,且不适用于高温和腐蚀环境。相对于传统加固方法,粘钢加固法更为简单、快速,对结构的外形、净空等影响较小,其施工过程对生产和生活影响较小,因而在建筑领域和公路桥梁领域中都得到了普遍应用。

1.2.6 粘贴纤维复合材料加固法

纤维复合材料(FRP)具有耐腐蚀、高强度(2500MPa~3550MPa)、质量轻(密度 1.8g/cm^3)、厚度薄(每层厚 $0.1\text{mm}\sim 0.2\text{mm}$)和非磁性的特点,被广泛应用于航空航

天、汽车制造等高新领域。近年来,随着科技的发展和产量的提高,纤维及其复合材料在土木工程中得到了越来越多的应用。加固过程中,将碳纤维片材用专用胶粘剂(环氧树脂等)粘贴于构件收拉区表面,使其与被加固构件截面共同工作以达到对结构进行加固增强的目的。

粘贴纤维复合材料加固的显著特点是具有耐腐蚀、耐潮湿、几乎不增加结构的自重、轻质高强、能适应混凝土截面弯曲的粘贴要求,在几乎不增加构件刚度和截面积的情况下大幅度提高构件的抗震性能和变形能力。此外,纤维种类上除了早期的碳纤维(Carbon Fiber)外,又增加了玻璃纤维(Glass Fiber)、芳纶纤维(Aramid Fiber)及混杂纤维(Hybrid Fiber);形式上除了传统的布材外,又开发出了板材(板和板条)、棒材(筋和格栅)、型材及短纤维等。随着生产碳纤维的技术水平越来越高,碳纤维的价格也在逐渐下降,该方法有着很广阔的应用前景。

当然,粘贴纤维复合材料加固也有以下几个弱点:(1)纤维复合材料的强度非常高,而弹性模量却相对较低,当充分利用其强度时,纤维复合材料需要相当的变形,对于刚度也要求加固的结构来说是相当不适用的;(2)环氧树脂的耐火性与耐高温性能差;(3)延性不足,构件变形过大时会引起碳纤维的脆性断裂,从而导致结构的脆性破坏,对于需要较大变形或对抗震要求比较高的结构来说,这一点是十分不利的;(4)环氧树脂层传递的剪力有限,剪切变形不断增加,超过极限剪应变后界面将发生剥离破坏,使得纤维复合材料的强度无法得到充分利用。此外,该加固技术对施工工艺的要求较高,需要确保施工队伍的专业性,提高施工质量。

1.3 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土结构

1.3.1 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固技术的优点

高强钢绞线网-聚合物砂浆加固技术是进入21世纪后开发的一种新型加固技术,其采用高强不锈钢绞线网和渗透性聚合物砂浆作为加固材料(见图1-1)。聚合物砂浆具有以下几个特点^[6-8]:(1)与一般混凝土相比,该材料强度更高,并且浇筑以后强度发展快,7天以后可以达到最终强度的85%以上,在早期可以支撑加固用高强钢绞线网;(2)由于该材料具有渗透性,即使不使用界面乳剂,与原混凝土结构的粘结性能也很好;(3)收缩性小,因此基本不发生裂缝;(4)由于二氧化碳的透过性差,因此可以预防混凝土的碳化;(5)氯化物的渗透阻抗性好,因此可以防止内部钢筋的腐蚀;(6)力学性质与现有混凝土相近,因此长期粘结性能很好;(7)冻结溶解及耐候性即长期耐久性很好;(8)具有粗钢性能,因此在工作中不发生弹回现象;(9)耐其他化学药品的阻抗性很好,材料无毒,对人体无害。

该加固技术是在混凝土构件表面铺上高强不锈钢绞线网,然后用膨胀螺栓锚固在构件上,使其形成整体而共同工作,最后抹上渗透性聚合物砂浆作为保护层,以提高结构承载力和耐久性的一种加固方法。渗透性聚合物砂浆与高强不锈钢绞线网这两种不同性质的材料在加固中起着不同的作用,钢绞线网提高结构的承载能力,砂浆层起保护和粘结作用。与传统加固修补方法(如粘钢、喷射混凝土加固技术等)相比,高强钢绞线网-聚合物砂



图 1-1 加固材料图片

浆加固修补混凝土结构具有明显的技术优势,主要表现在如下几个方面^[8]: (1) 高强钢绞线为镀锌钢丝编织而成,抗拉强度高、不易生锈,且与砂浆的粘结力好; (2) 聚合砂浆渗透性好,能够很好地与被加固构件粘结为一体而共同工作; (3) 能有效提高被加固构件的受弯、受剪承载力与变形能力,提高构件刚度; (4) 加固面层薄(加固层一般为 15mm~25mm 厚),对净空几乎没有影响; (5) 该加固技术所采用的钢绞线 and 无机胶凝材料与钢筋混凝土同性能、同寿命,均为传统意义上的常用建筑材料,其自身的防腐、耐高温、防火性能良好; (6) 施工周期短,不需要大型机具、设备,在保证施工质量和无意外干扰的前提下,同样条件下所需时间不目前国内大量应用的粘钢加固方法所需时间的 1/2,若施工组织情况较好,10 个工作日即可完成 600m² 的工作量,是粘钢加固施工功效的 4~6 倍; (7) 施工干扰小,在较小的空间中即可实施加固结构的施工,除了混凝土表面处理时的灰尘需要控制以外,对一般建筑物的正常使用几乎无干扰; (8) 技术施工操作方便,在正常施工条件下有效粘结面积基本可以达到 100%,施工质量可以得到有效保证; (9) 加固后结构自重增加不大,结构外观尺寸和形状改变很小,与其他加固方法相比,节省了大量的机械台班费、人工费和检测费; (10) 适用面广,可广泛适用于各种结构类型(如桥梁、建筑物、构筑物、隧道、涵洞等)、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、拱、壳等)的加固修补; (11) 维修成本低,维修费用比其他加固方法至少减少 1/2 以上,维修周期大幅延长; (12) 高强不锈钢绞线网、渗透性聚合砂浆为传统建筑材料,无毒,不污染环境,符合“绿色环保”的趋势。

目前该加固技术已用于一系列工程加固中。在韩国,爱力坚公司已经将该加固技术应用到一系列的桥梁加固工程中,21 号国道庄在桥(见图 1-2)就采用该加固材料进行加固,不仅有效地提高了该桥的承载力,也节省了工期,减少了对交通的干扰时间,取得了良好的社会效益。在国内,北京市方兴宾馆楼板加固工程(见图 1-3)、郑成功纪念馆加固改造工程^[9](见图 1-4)、南京东井亭通讯枢纽大楼(见图 1-5)、中国美术馆加固改造工程^[10]、北京三元桥主体加固工程^[11]等都使用了该种加固材料及其加固术,并取得了良好的加固效果。

由此可见,该加固技术具有显著的优点,是一种具有广阔发展前景的加固方法。



图 1-2 韩国庄在桥加固



图 1-3 方兴宾馆楼板加固



图 1-4 郑成功纪念馆加固

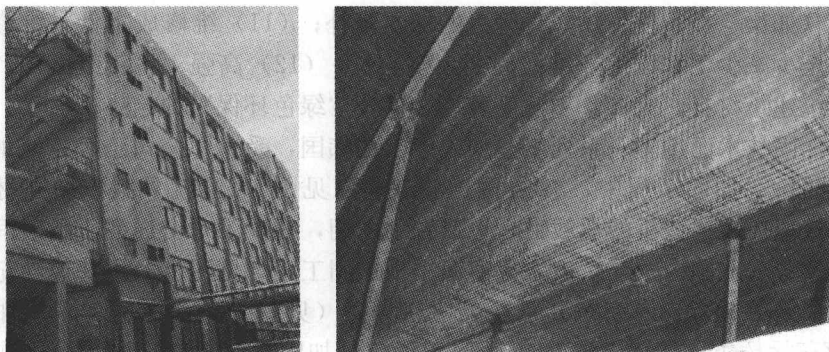


图 1-5 南京东井亭通讯枢纽大楼

1.3.2 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固技术研究现状

高强钢绞线网-聚合物砂浆加固技术的实质是一种体外配筋,用高强不锈钢绞线代替普通钢筋,提高原构件的配筋量,从而相应提高结构构件的刚度、抗弯和抗剪等承载能力;以渗透性聚合物砂浆作为粘结剂和钢绞线网保护层,利用其自身良好的性能实现粘结良好、抗腐蚀、耐高温等优良特性。该加固技术类似于加大截面加固,但截面增加有限,对结构外观及净空影响不大。与普通混凝土相比,高强钢绞线网-聚合物砂浆加固的主要特点是配筋分散性好和骨料粒径小,因此具有更好的抗裂性、抗渗性和韧性。根据构件的受力特点和加固要求不同,可选用单侧加固、双侧加固、三面和四面外包加固等。

与该加固方法类似的加固技术有钢绞线(网)-(高性能)砂浆层加固技术、钢丝网-(高性能)砂浆层加固技术,钢筋(网)-(高性能)砂浆层加固技术三类,我们可统称为砂浆薄层加固技术。这些加固方法都是在结构物构件表面固定钢绞线(网)等,涂抹(喷射)砂浆层,以达到加固的目的。砂浆薄层加固技术以其众多的优点,被人们在工程实际中大量运用,许多学者为此进行了众多的试验与理论研究。

1.3.2.1 砂浆薄层加固技术研究现状

国内外用水泥砂浆内粘钢丝网修补结构已有较长时期的实践,早在20世纪60年代就有相当发展^[12],苏联在1966年的强烈地震后对出现较大裂缝的墙体,先采用压力灌浆对墙体进行修复,而后在墙体两侧设置钢筋网,并在砖墙上钻孔设拉结钢筋以固定两片钢筋网,在钢筋网表面喷射水泥砂浆,后来这种加固方法和加固理论在国内外得到了不断的发展。

在混凝土梁式构件加固方面,国外的Logan^[13]、Johnston^[14]、Prakash^[15-17]、Walkus^[18]、Andrews^[19]、Basaunbul^[20]、Tatsa^[21]、Sharma^[22]、Paramasivam^[23,24]、Ganesan^[25]等众多研究者对钢丝网-水泥砂浆加固钢筋混凝土技术进行了大量研究。他们认为这种加固方法是可行的,加固后构件的极限承载力、抗弯刚度、抵抗裂缝的能力都有很大程度的提高,并讨论了钢丝网水泥薄层与原构件间的剪力传递,分析认为加固后构件的开裂荷载、极限承载力、跨中挠度及钢丝网水泥薄层与原构件间的剪力大小都能在已有的混凝土构件假定基础上通过计算获得。熊光晶和Singh等人^[26-37]则对循环荷载作用下的钢丝网水泥砂浆疲劳性能进行了大量试验和理论分析,得出了相关结论。国内的尚守平及其课题组^[38-46]、高晓梅^[47,48]等人则对钢丝网-高性能砂浆加固钢筋混凝土梁进行了试验研究,他们认为加固梁的极限荷载均有较大幅度的提高,加固对裂缝的发展起到了明显的抑制作用,提高了梁的整体刚度和变形能力。

在混凝土柱加固方面,Takiguchi^[49]、Kazemi和Morshed^[50,51]等人对钢丝网水泥砂浆层加固钢筋混凝土进行了试验研究,结果表明该加固方式是有效的,柱的延性得到了很大提高,极限承载力也得到了相应提高。国内的尚守平及其课题组^[52-54]还对采用钢筋网复合砂浆加固柱的性能进行了试验研究;严洲、翁海望等^[55]对钢丝(筋)网水泥砂浆加固的混凝土圆柱进行了轴压试验,并与碳纤维加固的柱进行了对比研究。

砂浆薄层加固的一个最大问题是砂浆与原混凝土构件粘结面之间的剥离破坏,这使得加固效果得不到充分发挥,对此问题的研究主要集中在抗剪连接件的设置方面。Ong等