

结构工程前沿丛书

高效预应力加固法 理论及应用

李延和 陈 贵 李树林 著
吴 元 沈颖坤



科学出版社
www.sciencep.com

结构工程前沿丛书

高效预应力加固法 理论及应用

李延和 陈 贵 李树林 著
吴 元 沈颖坤

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书对高效预应力加固法进行了系统的介绍。全书共分 11 章,主要内容包 括:高效预应力加固法基本概念和概念设计,高效预应力加固法加固机理及计算理论,钢筋混凝土梁、板、柱采用高效预应力加固法加固的设计计算方法,高效预应力加固法加固钢筋混凝土梁、板及框架梁的试验研究及有限元分析方法。最后本书详细介绍了 5 个工程实例。

本书既注重理论的系统性,又重视理论与实际应用的结合。钢筋混凝土梁、板、柱采用高效预应力加固法加固的设计计算均给出了计算步骤及过程,可直接参照使用。

本书可供从事工程结构加固设计、施工、监理与科研单位的专业技术人员参考,同时也可作为高等院校土建类专业师生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

高效预应力加固法理论及应用/李延和等著. —北京:科学出版社,2008
(结构工程前沿丛书)
ISBN 978-7-03-021809-4

I. 高… II. 李… III. 预应力技术—加固 IV. TU756

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 060883 号

责任编辑:耿建业 / 责任校对:包志虹
责任印制:刘士平 / 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

*

2008 年 5 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008 年 5 月第一次印刷 印张:18 1/2

印数:1—3 000 字数:357 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(双青))

前 言

高效预应力加固法是结构加固技术中加固效果好、适用范围广并可以实现加固与卸载合一的一种主动加固法。

最初的预应力加固方法是采用 HPB235 级钢筋或 HRB335 级钢筋的横向收紧加固法。这种方法施工简便、技术要求不高,作为一种短期的应急加固是起作用的。但是,实践证明,这种方法的钢筋锈蚀和应力松弛问题非常严重,作为长期加固其效果是不理想的。

随着高强度低松弛钢绞线和镀锌钢绞线等新材料的研发和应用,预应力加固技术有了革命性的突破。本书所介绍的高效预应力加固法就是指将高强度低松弛钢绞线或镀锌钢绞线等新型钢绞线合理布置于被加固构件体外,采用千斤顶张拉建立预应力值而起到加固作用的方法。

从 20 世纪 90 年代初起,由李延和、陈贵领导的科研小组就开始了预应力加固法的研究工作,所取得的科研成果获得 1994 年江苏省科技进步奖,被列为国家建设部 1995 年重点推广项目并在许多加固工程中得到应用。其后,李延和、李树林领导的研发团队及李延和指导的研究生们对高效预应力加固法进行了系统的试验研究和理论分析,提出了加固设计计算方法,并在近 500 个加固工程中推广应用,为国家和业主节省了大量资金,创造了极大的经济效益和社会效益。

本书为作者近 20 年来相关工作及研究成果的总结,全书共 11 章。第 1 章为概论;第 2 章介绍了高效预应力加固法设计中的一些基本概念和构造做法;第 3 章阐述了高效预应力加固法的计算理论和设计方法;第 4 章介绍了连续梁、框架梁等超静定结构采用高效预应力加固法加固的设计计算方法;第 5 章介绍了板式结构采用高效预应力加固法加固的设计计算方法;第 6 章介绍了柱的体外预应力加固技术及柱的预应力拉索加固技术;第 7 章介绍了高效预应力加固法加固梁的试验研究成果,包括混凝土简支梁、低强度混凝土简支梁的抗弯、抗剪试验研究和简支梁的疲劳试验研究;第 8 章为高效预应力加固混凝土板的试验研究;第 9 章为高效预应力加固框架梁的试验研究;第 10 章介绍了高效预应力加固结构有限元分析;第 11 章为典型工程案例分析。

本书撰写分工如下:李延和撰写第 1 章、第 3 章、第 6 章,李树林撰写第 2 章,沈颖坤、李延和撰写第 4 章,吴元、李延和撰写第 5 章,陈贵、吴元撰写第 7 章,吴元撰写第 8 章,沈颖坤撰写第 9 章,吴元、沈颖坤撰写第 10 章,李树林、李延和撰写第 11 章。最后,由李延和统稿。

本书还包含了胡成博士、苏少华高级工程师、付修兵工程师等同志与作者合作完成的科研成果；江苏建华建设有限公司任亚平、肖进如、姚立新等同志参加了第11章工程实例的设计计算及施工指导工作；吕静、李莹以及研究生王玉珏、崔田田承担了本书的大量打字及绘图工作。在此一并表示感谢。

由于作者水平所限，本书难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

李延和

2008年3月

于南京工业大学虹桥校区

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 现有结构加固技术的研究和发展现状	1
1.2 高效预应力加固法及其优越性	2
1.3 高效预应力加固法的研究进展	3
1.4 应积极推广高效预应力加固法	6
参考文献	8
第 2 章 高效预应力加固结构概念设计	10
2.1 钢绞线布置设计	10
2.1.1 简支梁及伸臂梁	10
2.1.2 连续梁	13
2.1.3 井字梁	13
2.1.4 框架梁	16
2.1.5 单跨板	20
2.1.6 连续板	22
2.2 锚固及转向装置设计	23
2.2.1 锚固端设计	23
2.2.2 转向装置设计	25
2.3 防护设计	26
2.3.1 锚固端防护设计	26
2.3.2 钢绞线及转向块防护设计	27
第 3 章 高效预应力加固法理论分析及设计计算	29
3.1 基本概念	29
3.1.1 加固原因及加固量计算	29
3.1.2 加固材料及张拉施工设备	33
3.1.3 张拉控制应力及预应力损失	36
3.1.4 受力特征及加固机理	37
3.2 高效预应力加固梁的受力计算	39
3.2.1 加固梁的受力全过程分析	39
3.2.2 加固力学计算的内容和预应力作用计算模型	40

3.2.3	预应力施工阶段受力计算	41
3.2.4	加固后继续受荷下开裂前的预应力筋内力增量	46
3.2.5	极限状态下预应力筋应力增量	48
3.3	高效预应力加固梁正截面受弯承载力计算	55
3.3.1	计算公式推导	55
3.3.2	截面设计及计算步骤	57
3.3.3	计算算例	59
3.4	高效预应力加固梁抗剪承载力计算	61
3.4.1	钢筋混凝土梁抗剪加固的因素分析	61
3.4.2	加固梁抗剪设计计算	62
3.5	高效预应力加固梁正常使用状态验算	63
3.5.1	梁加固前的挠度计算	63
3.5.2	加固梁的挠度计算	64
3.5.3	工程实例及试验	64
	参考文献	67
第4章	高效预应力加固超静定结构的设计计算	68
4.1	概述	68
4.2	高效预应力加固超静定结构内力分析	68
4.2.1	施加预应力对结构的作用计算	69
4.2.2	加固超静定结构的次弯矩分析	69
4.2.3	加固超静定结构所产生次弯矩的简化算法	71
4.2.4	高效预应力加固超静定结构的应力增量	77
4.3	高效预应力加固超静定结构的截面设计及计算	78
4.3.1	截面设计方法	78
4.3.2	计算步骤	80
4.4	算例	81
	参考文献	83
第5章	高效预应力加固板式结构设计及计算	84
5.1	概述	84
5.1.1	高效预应力加固双向板的破坏形态	84
5.1.2	高效预应力加固板的受力性能	86
5.2	高效预应力加固板截面设计实用方法	89
5.2.1	暗梁法设计计算	89
5.2.2	分布筋法设计计算	90
5.2.3	算例	91

5.3 高效预应力加固板的塑性分析及设计	91
参考文献	94
第6章 高效预应力加固柱的设计计算方法	95
6.1 概述	95
6.2 柱的高效预应力加固理论	95
6.2.1 钢筋混凝土偏心受压柱的承载能力曲线	95
6.2.2 单侧撑杆加固理论与适用范围	96
6.2.3 柱的预应力拉索加固法与适用范围	96
6.3 立柱拉索加固的检验与计算方法	97
6.3.1 混凝土柱加固的检验方法	97
6.3.2 拉索加固的设计与计算	98
6.4 某办公楼的改造与加固实例	98
参考文献	100
第7章 高效预应力加固混凝土梁试验研究	101
7.1 高效预应力加固混凝土简支梁试验研究	101
7.1.1 第一批加固梁试验研究	101
7.1.2 第二批加固梁试验研究	125
7.2 高效预应力加固低强度混凝土梁试验研究	140
7.2.1 概述	140
7.2.2 试验准备	140
7.2.3 试验方案	144
7.2.4 试验过程	146
7.2.5 试验结果及分析	147
7.2.6 试验结论	166
7.3 高效预应力加固混凝土梁疲劳试验研究	167
7.3.1 概述	167
7.3.2 疲劳上、下限荷载 $P_{\min}$ 与 $P_{\max}$ 的确定	169
7.3.3 疲劳试验加载方案	170
7.3.4 疲劳试验结果及分析	171
7.3.5 疲劳破坏特征及分析	180
7.3.6 关键部位性能分析	181
7.3.7 疲劳试验结论	182
参考文献	182
第8章 高效预应力加固混凝土板试验研究	184
8.1 概述	184

8.2	试验设计	184
8.2.1	构件设计	184
8.2.2	构件制作	186
8.3	材料性能试验	186
8.3.1	非预应力筋	186
8.3.2	混凝土	186
8.3.3	预应力筋	187
8.4	加固方案	187
8.5	试验内容和加载程序	187
8.5.1	主要测试内容和仪器	187
8.5.2	测点和仪器布置	188
8.5.3	加载方法	188
8.5.4	荷载分级	189
8.6	试验结果分析	189
8.6.1	试验步骤	189
8.6.2	试验现象描述	190
8.7	试验结果分析	193
8.7.1	承载力分析	193
8.7.2	荷载-挠度曲线分析	194
8.7.3	非预应力筋应变分析	195
8.7.4	预应力筋应力增量分析	199
8.8	本章小结	204
	参考文献	204
第9章	高效预应力加固框架梁试验研究	206
9.1	试验方案	206
9.1.1	试件设计	206
9.1.2	加载与数据采集	208
9.2	试验过程描述	210
9.3	试验结果分析	213
9.3.1	承载力与滞回曲线分析	213
9.3.2	钢筋应力变化	215
9.3.3	加固预应力筋应力变化	222
9.3.4	试验结果分析总结	225
	参考文献	227

第 10 章 高效预应力加固混凝土结构有限元分析	229
10.1 概述	229
10.2 高效预应力加固板非线性分析	230
10.2.1 有限元类型及相应的本构关系	230
10.2.2 建立模型及单元网格划分	235
10.2.3 模型加载及边界条件	237
10.2.4 非线性方程组求解	238
10.2.5 计算与试验结果对比	238
10.2.6 张拉控制力的影响	244
10.2.7 本节小结	245
10.3 高效预应力加固梁有限元分析	245
10.3.1 有限元类型及相应的本构关系	245
10.3.2 加载与边界条件	248
10.3.3 有限元方程求解	248
10.3.4 计算和试验结果比较	249
10.3.5 本节小结	251
10.4 高效预应力加固框架梁有限元分析	251
10.4.1 计算模型的确定	251
10.4.2 计算结果分析比较	252
10.4.3 竖向荷载作用下的预应力筋应力变化	255
10.4.4 竖向荷载和水平荷载共同作用下框架中的应力分布	256
10.4.5 水平荷载作用下的预应力筋应力变化	260
参考文献	261
第 11 章 典型工程案例分析	262
11.1 混凝土梁承载力不满足设计要求时的高效预应力加固计算实例	262
11.1.1 工程概况	262
11.1.2 设计计算	263
11.2 建筑增层时已有混凝土梁的高效预应力加固计算实例	265
11.2.1 工程概况	265
11.2.2 设计计算	265
11.3 使用功能改变(荷载增大)时梁的高效预应力加固计算实例	268
11.3.1 工程概况	268
11.3.2 设计计算	269
11.4 高效预应力加固法在某多层厂房楼面结构加固中的应用	271
11.4.1 工程概况	271

11.4.2	设计计算	271
11.5	某商业大厦全面改造加固	275
11.5.1	改造内容	275
11.5.2	设计计算	278
11.5.3	高效预应力加固法与其他加固法综合应用	281

第1章 概 论

1.1 现有结构加固技术的研究和发展现状

我国城镇现有建筑面积近 $1.5 \times 10^{10} \text{m}^2$, 其中约 $4.5 \times 10^9 \text{m}^2$ 的房屋因长期使用出现了安全性问题或已进入性能退化期。每年新建结构中也有部分建筑出现设计、施工等方面的工程质量事故而需加固处理。另一方面, 随着城镇建设的发展, 许多在役建筑也因使用功能的改变等原因需要改造和加固。鉴于上述原因, 对以上建筑进行鉴定加固及维修改造是非常必要的。

自 1990 年全国建筑物鉴定与加固标准技术委员会成立以来, 经过近 20 年的发展, 在结构鉴定与加固方面已形成了一个新的学科——建筑物鉴定与加固改造学科。该学科在检测技术鉴定、加固基本理论、加固方法、加固材料及加固施工技术等各个方面出现了大批的研究成果。这些成果直接面向经济建设, 适应面广量大的建筑物鉴定和加固改造的市场需要, 奠定了建筑物鉴定与加固学科的基础。

我国现有的加固技术除预应力加固法外, 主要还有增大截面加固法、外包钢加固法、粘钢加固法、粘贴碳纤维布加固法(包括嵌入式和预加应力法)、局部置换法、外包不锈钢网并粉刷聚合物砂浆加固法以及改变传力路径加固法等。

1) 增大截面加固法

增大截面加固法是传统的加固方法, 施工技术比较成熟, 可提高构件的强度和刚度, 加固效果明显。但是, 该方法存在施工过程复杂、工期长、湿作业量大等问题, 又由于刚度变化较大而对周围构件存在不利附加作用和造成结构的自振特性改变等, 近年来该方法的使用越来越少。

2) 外包钢加固法

外包钢加固法使用角钢、钢板等材料将原混凝土梁、板、柱等构件包裹起来达到加固的目的, 该方法分湿式法和干式法两种, 湿式法效果优于干式法。外包钢法与预应力撑杆法结合是一种较好的加固柱的方法。加固梁时外包钢法施工复杂, 特别是外包钢在梁根部的处理常常很难做到令人满意, 直接影响加固效果, 因此, 目前梁加固工程中较少采用。

3) 粘钢加固法

粘钢加固法是在混凝土构件外部粘贴钢板以提高其承载力的一种加固方法。由于该方法不影响结构外观和使用空间, 施工简单、快捷, 近年来该方法在梁、板加

固中得到了大量的推广应用。

4) 粘贴碳纤维布加固法

粘贴碳纤维布加固法是近十多年来发展最快的加固新技术。它的加固原理与粘钢加固法相同,但是,比粘钢加固法具有更好的形状适应性及防腐性,施工质量容易保证,很受工程界的欢迎,也是近年来研究的热点。目前其发展方向为嵌入式和施加预应力的碳纤维加固,这方面的研究工作已在进行中。

粘贴碳纤维布加固法也有黏结胶老化问题,需要 10 年检查一次。同时,虽然碳纤维布强度比较高,但其厚度很薄(0.11mm 或 0.16mm),总的加固作用较小,对于加固量较大的工程不适用。

5) 局部置换加固法

局部置换加固法是将混凝土构件强度较低的部分凿去,重新浇筑高强混凝土。该方法对受压构件加固效果较好,对于加固梁、板构件时可与其他方法配合使用(如受压区采用置换法,受拉区采用预应力加固法、粘钢或粘贴碳纤维布加固法)。

6) 外包不锈钢网并粉刷聚合物砂浆加固法

这是近年来引进国外技术发展起来的方法。该方法对墙、柱等轴向受压构件比较有效,对梁、板式构件效果要差一些。

7) 改变传力路径加固法

该方法一般会影响结构使用功能,但若条件允许,改变传力路径加固法是最有效、最经济的加固方法。

1.2 高效预应力加固法及其优越性

预应力加固法分为高效预应力加固法^[1,2]和预应力拉杆横向收紧加固法两种。高效预应力加固法是指将经过防腐处理的带有套管的钢绞线布置于被加固构件体外,通过千斤顶张拉钢绞线达到加固目的的一种加固方法;预应力拉杆横向收紧加固法采用的是 HPB235 级钢筋或 HRB335 级钢筋作为补强拉杆布置于被加固构件上,通过人工横向收紧螺栓的方法使钢筋横向收紧产生预应力而达到加固的目的。

由于预应力横向收紧加固法的预应力数值偏低,所以加固量不大。长期条件下,钢筋松弛后预应力损失较大以及钢筋锈蚀严重等原因使其加固作用减小,近年来在加固工程中的应用越来越少。鉴于此,本书主要讨论高效预应力加固法。

高效体外预应力与现有的各种方法相比,具有如下优点:

1) 加固与卸载合一,共同工作性能好

高效预应力加固结构在预应力加固的同时可以对原结构进行卸载。加固完成后,原结构与新加预应力筋共同承担荷载,属于一种主动加固法。

2) 强度、刚度同时加固

高效预应力加固法在提高被加固构件承载力的同时,可使构件产生反拱变形和减小结构裂缝宽度。

3) 适用于超筋截面构件的加固

高效预应力加固法是一种体外布索,与被加固构件截面内的配筋大小没有直接联系,体外预应力作用是荷载平衡的概念。所以对超筋构件加固同样有效,这一点是前述的许多方法所不具备的。

4) 对被加固构件的承载力提高幅度较大

试验研究表明,高效预应力加固法采用的高强度低松弛钢绞线,钢绞线的数量可根据需要量配置,其加固量比其他方法要大。根据荷载平衡原理,高效预应力加固法可满足现有使用要求下的所有补强加固的需要。

5) 高效预应力加固法适应性强

高效预应力加固法对单跨梁、连续梁、框架梁、井字梁、单双向板、偏心受压柱等均能起到加固作用,这是其他方法不易做到的。

1.3 高效预应力加固法的研究进展

1) 预应力加固梁极限承载力研究

在体外预应力梁极限承载力计算方面,国内外的研究主要集中在梁的正截面承载能力上^[1,3],对斜截面承载力的研究较少。长期以来,人们是用传统的体内无黏结预应力的计算方法来计算体外预应力混凝土结构的。

二次效应的研究是体外预应力梁极限承载力研究的重要方面。影响二次效应的因素很多,如转向块的个数和位置、预应力筋的布置、梁的高跨比和有效预应力的大小等。Harajli^[4]对二次效应的研究较早,在他的研究中,选取了体外预应力筋的布置、转向块的个数及外荷载的形式这几个因素对二次效应进行研究,并得出了这些因素对二次效应、结构承载力和体外筋应力增量的影响。此外,Virlogeux^[5]、Alkhairi^[6]、Pisanit^[7]等学者也分别对二次效应做了研究。

目前,在体外预应力梁的承载力研究方面,国内外许多研究机构均考虑二次效应对梁极限承载力的影响,提出了许多计算体外预应力承载力的方法,主要有塑性铰区长度法、弯矩-曲率法、计算机非线性有限元法以及利用试验结果对无黏结预应力公式进行修正。

Pannell 最早提出通过等效塑性铰区长度来计算无黏结预应力梁预应力筋的极限应力。其基本思想是将沿无黏结预应力筋全长的混凝土变形集中到等效塑性铰区域内。Virlogeux^[5]采用此方法分析了体外预应力混凝土简支梁和连续梁在正常使用和极限状态下的受力性能。他注意到二次效应的产生是由于锚固段之间预

预应力筋保持线性而梁的变形为非线性所致,并给出了预应力筋在这两个状态下伸长量的计算公式。

由于体外预应力的极限承载力计算涉及材料非线性和几何非线性,因此在许多研究中人们利用计算机非线性有限元进行分析。Alkhairi^[6]通过有限元方法考虑两种非线性得出了一座由预制构件组成的体外预应力桥梁的弯矩-挠度关系,并确定了几种重要的极限状态:混凝土的开裂、节段间节点的开缝、无黏结预应力筋的屈服和极限承载力状态。此外,Muller、Pisanit、Harajli^[8]等学者也利用计算机有限元方法进行了各种研究。

我国自 20 世纪 90 年代初,李延和、陈贵对高效预应力加固法进行了系统试验研究,提出了预应力加固计算和设计的方法^[2]。牛斌^[9]在对体外预应力进行试验研究的基础上,以混凝土塑性铰理论为基础,建立了体外预应力梁极限状态下的弯矩、挠度和预应力筋极限应力增量的计算方法。该方法的计算精度大体与非线性理论接近,但计算工作量却大大减少,且概念明确,所以适合于实际应用。此外,该计算方法全面考虑了梁内普通钢筋和预应力钢筋的配筋、体外钢筋的布置以及外荷载的作用形式等诸多因素对梁极限弯矩的影响。但是,该方法只适用于适筋梁,对普通钢筋较少或较多的梁需要进一步改进。同时,公式是在对称荷载、简支梁的条件下推出的,不适用于非对称荷载及连续梁。

在计算机非线性有限元分析方面,牛斌^[10]根据截面弯矩-曲率关系,也编制了体外预应力混凝土梁受弯分析的计算机程序。同济大学的孙海^[11]等针对所做的四根体外预应力简支梁试验,利用大变形条件下的杆件结构变形推导了包括两种非线性的有限元程序,并提出了反映体外预应力筋在外荷载作用下在转向块处的滑移模型,他们把预应力筋在转向块处比拟成一根受到摩擦的拉索,考虑了体外预应力筋在转向块处发生滑移后有效应力的“二次分配”问题。此外,他们还对体外预应力连续梁进行了类似的试验研究和理论分析^[12]。

同济大学的徐栋^[13]等则针对体外预应力桥梁建立了全过程分析模型,该模型着重分析了节段施工、节段间有接缝的体外预应力结构,通过分析指出,接缝处的刚性转动是影响体外预应力节段施工结构力学性能的关键因素。

除了以上研究外,清华大学也进行了一些这方面的研究^[14]。

2) 预应力加固框架梁的研究

除了体外预应力简支梁与连续梁方面的研究,刘航等^[15]对体外预应力加固的混凝土框架梁进行了试验研究。试验中对 2 榀单跨框架梁和 2 榀双跨框架梁分别采用了直线筋和折线筋进行了加固,试验发现,用体外预应力筋加固后的框架梁在正常使用状态下可减小梁的跨中挠度和裂缝宽度;在承载力极限状态下可以提高构件的极限抗弯承载力。此外,试验还发现,折线筋在提高框架梁的综合能力方面比直线筋好。

沈颖坤等^[16]则对加固框架结构在水平反复荷载作用下的结构性能进行了试验研究。主要取得了以下成果。

(1) 采用体外预应力加固框架可以抵消部分竖向荷载,使框架应力趋向平均化与整体受压,从而改善被加固结构的受力与变形性能。体外预应力筋可以很好地与被加固结构协同工作,大幅度提高竖向承载力。

(2) 采用体外预应力加固的框架在水平和竖向荷载作用下,框架应力分布平均化,混凝土受拉区面积减小,框架整体强度上升,最大水平承载力可提高20%,加固后结构在达到最大水平承载力后进入一个较长的屈服平台。可见,针对竖向荷载进行的体外预应力加固可以满足一般框架结构的“小震不坏、大震不倒”的抗震要求。

(3) 采用体外预应力加固的框架在水平荷载作用下滞回曲线兼有预应力混凝土和钢筋混凝土框架滞回曲线的特点。从滞回曲线可以看出,加固预应力的作用提高了框架在水平荷载下的耗能能力和恢复力。

(4) 体外预应力筋的应力在水平荷载作用下的变化趋势有两种:①当水平荷载较小、框架中裂缝发展得还不充分时,有水平荷载作用时预应力筋的应力下降,当水平荷载归零时预应力筋的应力回升;②当水平荷载增大到一定数值时,框架中的裂缝发展完全、个别截面接近或进入塑性铰,而有水平荷载作用时预应力筋的应力上升;当水平荷载归零时预应力筋的应力变小,此时预应力筋的应力变化幅度近似地与加固后结构的水平位移成线性关系。在水平荷载作用下,随着水平反复荷载的不断增大,体外预应力筋的应力值也在上、下波动中缓慢衰减。应力衰减的速度与水平荷载反复荷载大小、作用周期及框架结构的混凝土强度有关。

3) 预应力加固板的研究

目前,体外预应力加固钢筋混凝土梁和单向板的研究较多,加固双向板的研究还是初步的^[17,18]。这主要是由于板的受力分析比梁要复杂得多,加之体外预应力则更难得到确切的解答。实际上,即使经典的《板壳理论》^[19]也只能对一些规则形状的板在简单的边界及荷载条件下给出解析解。

不过,用体外预应力加固双向板已有工程应用。李延和等^[1]在处理某工程现浇楼板质量事故时,就曾用体外预应力加固双向板,且在加固后对楼板做了静载试验检测,发现板的跨中挠度及其裂缝都有明显减小。胡成^[18]通过单向体外预应力加固双向板的试验研究,认为单向体外预应力加固钢筋混凝土双向板是一种有效的加固方法。它能有效地提高加固板的开裂荷载及极限荷载,改善板的抗裂与变形性能。经单向体外预应力加固的双向板仍然具有较好的延性,并不因为刚度的增加而导致双向板延性性能的大幅度降低。此外,加固板的刚度及钢筋应变的变化规律表明,提高预应力钢筋的张拉控制力、选择合理的布筋形式以及增加预应力钢筋的数量等均能有效地提高双向板的加固效果。但相比之下,合理的预应力筋

布置形式对加固板的刚度和承载力的提高更为有效。在工程实践中,建议采用“中密边稀”的布筋方式加固双向板。

4) 预应力加固梁的动力性能研究

由于体外预应力梁的钢筋位于混凝土外侧,体外力筋通过转向块和锚固端向混凝土梁施加预应力并传递力的变化;体外预应力筋在转向块之间,未受到约束,可产生独立于梁的变形和振动。梁和体外预应力筋的振动将对梁的正常使用产生一定影响。郑玉庆等^[20]采用理论计算、有限元数值计算以及试验研究三种方法,对体外预应力梁的振动问题进行了研究。

疲劳问题也是动力问题的内容之一,国外对体外预应力梁的疲劳也进行了一些研究,Harajli^[8]对 16 根梁进行了疲劳试验研究,目的是确定体外预应力加固混凝土梁抗弯构件的优点并评估它对使用荷载性能和名义抗弯强度的影响。试验首先对 16 根梁试件施加 5000~10000 次相同的大振幅疲劳荷载使其产生疲劳变形,然后对这些试件施加体外预应力并单调加载至破坏。根据研究的目的,试验选择了三种结构体系,即钢筋混凝土、预应力混凝土及部分预应力混凝土,并选择了体外预应力的布置、有效预应力的的大小和体内筋的布置三个参数来确定体外预应力的影响。试验结果表明,体外预应力是一种加固和修复混凝土构件很有效的技术,通过施加适量的体外预应力筋可以使梁的名义抗弯强度提高 46%。体外预应力可以很有效地控制剧烈荷载下混凝土受弯构件的开裂,明显地减小由重复疲劳荷载产生的工作荷载挠度。

根据 Harajli^[8]的试验,Pisanit^[7]通过建立数学模型的方法对往复荷载作用后用体外预应力进行加固的混凝土梁进行了数值分析。

在国内,付修兵^[21]通过对两根用体外预应力加固的混凝土梁进行疲劳试验,发现体外预应力可以提高混凝土梁的疲劳寿命、刚度和疲劳强度,此外,经体外预应力加固的梁的破坏形态、变形曲线等方面的性能与体内预应力梁没有明显的不同。

1.4 应积极推广高效预应力加固法

1) 高效预应力加固法是值得大力推广运用的加固技术之一

近十几年来,我国的加固技术研究得到了较大的发展,除了预应力加固法之外,发展最为迅速的胶粘法加固技术(粘贴钢板、粘贴碳纤维板材、粘贴碳纤维布等)几乎占据了加固技术领域的半壁江山。这类方法施工方便,适应面广量大的结构加固工程的需要,但是胶粘法加固技术不是万能的,也有一定的局限性,主要表现在: