



Test, Simulation and
Design of Bolted
Side-plated Reinforced
Concrete Beams

李凌志 著

锚固钢板加固钢筋混凝土梁 试验、仿真及设计



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

同济大学学术专著(自然科学类)出版基金项目

锚固钢板加固钢筋混凝土梁 试验、仿真及设计

李凌志 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

锚固钢板加固钢筋混凝土梁试验、仿真及设计/李凌志著. —上海:同济大学出版社, 2017. 5

ISBN 978-7-5608-6944-5

I. ①锚… II. ①李… III. ①钢筋混凝土梁-锚固-计算机仿真 IV. ①TU375.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 094337 号

同济大学学术专著(自然科学类)出版基金项目

锚固钢板加固钢筋混凝土梁试验、仿真及设计

李凌志 著

责任编辑 胡晗欣 责任校对 谢卫奋 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店
印 刷 常熟市大宏印刷有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 11.25
字 数 281 000
版 次 2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6944-5

定 价 48.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前言

随着全球经济发展速度的放缓,大多数发达国家的新建项目逐渐减少,而对旧建筑的维护投入逐渐增加。我国历经过去 30 年房地产业的飞速发展,目前对旧有建筑的加固改造将逐渐成为城市建设的主要手段,这也对加固和改造技术的发展提出了迫切要求。由于我国很多区域处于地震多发地带,建筑物的抗震性能越来越受到关注。不仅新建建筑要进行抗震设计,对旧建筑进行加固改造时,如何提高其抗震性能也成为工程师们不得不面对的挑战。

由于钢材产能过剩及建筑设计对楼层净高的极致追求,在钢筋混凝土梁的设计中,不断提高配筋率成为我国当前结构设计的普遍状况。因此,对此类受弯构件进行加固增强时,如何增强其受弯承载能力而不显著降低其延性,成为加固技术面临的一个有力挑战。梁侧锚固钢板法(Bolted-side-plate,简称 BSP 法),是国内外学者新近提出的一种新型锚钢(Steel-bolting)加固技术,其特点是采用植筋式后锚固技术将钢板固定在钢筋混凝土梁的两侧,从而同时增加受拉和受压配筋,以达到在保持延性的前提下提高受弯承载力的目的。此外,通过钢板自身受剪能力及与钢筋混凝土梁的协同作用,可显著提高梁的受剪承载力和剪切变形能力。

尽管 BSP 法对于加固钢筋混凝土梁具有独特优势,然而目前国内外的相关研究尚处于起步阶段,实际工程中的应用也较少。仅有的少量工程实例也多凭从业人员的直观经验进行设计和施工,尚无系统且完善的设计公式和施工手册用于指导工程实践。本书作者在过去的 7 年里对 BSP 法加固混凝土梁进行了系统的研究,通过试验及数值仿真详尽考察了其受弯及受剪加固机理,建立了原理清晰、物理意义明确的理论模型,提出了计算简便的加固设计方法。相关研究成果已成功发表 10 篇 SCI 论文及 6 篇 EI 论文。本书即为该专著的中译本。此外,本书所介绍的 BSP 法目前已在工程项目中得到成功应用,其良好的加固效果和简便的施工工艺,得到了业主和施工单位的认同。鉴于当前我国钢筋混凝土结构建筑的广泛存在以及 BSP 法对于加固钢筋混凝土梁的独特优势,本书所展示的成果不仅对该领域的进一步研究具有科研价值,还具有良好的工程应用前景,能创造良好的社会效益。

本书共分为 13 章,系统地介绍了锚固钢板加固钢筋混凝土梁的试验、数值仿真及设计方法。第 1 章先简单对比了目前流行的混凝土梁加固工艺,并简要介绍了 BSP 法的基本概念和存在的主要问题。第 2、第 3 章介绍了普通 BSP 梁的受弯试验和数值仿真成果。第 4、第 5 章介绍了 BSP 梁中梁侧锚固钢板与混凝土梁之间的纵向和横向相对滑移及其理论分析方法。第 6、第 7 章介绍了由相对滑移导致的钢板与混凝土梁之间的部分协同作用,以及考虑其影响的 BSP 梁受弯承载力计算及设计方法。第 8、第 9 章对锚栓固定钢板的局部屈曲问题影响 BSP 梁受力性能的现象进行了详细的试验研究和数值仿真。第 10、第 11 章采用加劲肋对钢板局部屈曲加以限制,通过试验和理论分析考察了带加劲肋 BSP 梁的受弯性能,并提供了简

化的设计方法。第 12、第 13 章对 BSP 梁的受剪性能进行了试验研究和理论分析,同时也给出了简化的受剪承载力计算公式和设计方法。

本书中的部分研究得到了香港大学 RKL Su 教授和同济大学陆洲导教授的经费支持及指导,并得到国家自然科学基金(项目号:51408436,51378397)、香港研资局(项目号:HKU7166/08E, HKU7151/10E)以及喜利得(香港)有限公司[Hilti (Hong Kong) Limited]的资金和技术支持。部分章节在硕士生徐晓亮、蔡自伟及张晓亮等人的协助下完成。



2017 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 钢筋混凝土梁加固方法简介	1
1.1.1 传统加固方法	1
1.1.2 粘钢加固法	2
1.1.3 粘贴纤维片材或板材法	2
1.1.4 锚固钢板法	3
1.2 梁侧锚固钢板法简介	3
1.2.1 相对滑移与部分协同作用	5
1.2.2 锚固钢板的局部屈曲	5
1.2.3 梁侧锚固钢板法的其他问题	5
1.3 总结	5
第 2 章 梁侧锚固钢板加固梁的受弯试验	7
2.1 试验简介	7
2.1.1 试验方案	7
2.1.2 加固过程	9
2.1.3 材料属性	9
2.1.4 加载方案及测点布置	13
2.2 试验结果分析	15
2.2.1 破坏模式	16
2.2.2 承载力、刚度和延性	19
2.2.3 纵横向滑移	20
2.2.4 应变比及曲率比	23
2.2.5 钢板的承载力贡献	24
2.3 总结	24
第 3 章 梁侧锚固钢板加固梁的数值模拟	26
3.1 数值模型简介	26
3.1.1 混凝土模拟	26
3.1.2 钢筋和钢板模拟	28
3.1.3 锚栓连接模拟	28
3.1.4 网格划分及加载过程模拟	29
3.2 数值模型验证	29
3.3 纵向锚栓剪力及纵向滑移分析	31

3.3.1	纵向锚栓剪力及纵向滑移	31
3.3.2	外荷载对纵向滑移的影响	32
3.4	横向锚栓剪力及横向滑移分析	32
3.4.1	横向锚栓剪力及横向滑移	32
3.4.2	外荷载及几何尺寸对横向滑移的影响	33
3.5	总结	41
第4章	梁侧锚固钢板加固梁的纵向滑移理论模型	42
4.1	BSP 梁的基本概念	42
4.1.1	相对滑移与部分协同作用	42
4.1.2	应变比和曲率比	43
4.1.3	轴向刚度和弯曲刚度	44
4.1.4	钢板-混凝土梁刚度比和锚栓-混凝土梁刚度比	45
4.1.5	纵向和横向剪力的传递	46
4.1.6	低配筋和中等配筋混凝土梁	47
4.1.7	窄型钢板和宽型钢板	47
4.2	BSP 梁的纵向滑移理论模型	48
4.2.1	纵向滑移简述	48
4.2.2	纵向滑移分布的控制方程	48
4.3	不同外荷载下的纵向滑移分布	52
4.3.1	四点弯曲	52
4.3.2	三点弯曲	53
4.3.3	均布荷载	55
4.3.4	三角形分布荷载	56
4.3.5	一端支座弯矩	57
4.3.6	纯弯梁	58
4.4	验证	60
4.4.1	理论与试验结果对比	60
4.4.2	弱非线性下纵向滑移的叠加	62
4.5	总结	63
第5章	梁侧锚固钢板加固梁的横向滑移理论模型	64
5.1	分段线性简化模型	64
5.1.1	横向剪力传递分布的简化	64
5.1.2	剪力传递的类文克尔模型	66
5.1.3	基于力的平衡和变形协调的求解过程	68
5.1.4	试验验证	72
5.2	加固设计的近似解	74
5.2.1	四点弯曲	74
5.2.2	三点弯曲	75

5.2.3	均布荷载	76
5.3	总结	77
第 6 章	梁侧锚固钢板加固梁的部分协同作用	78
6.1	部分协同作用的概念	78
6.2	基于部分协同作用的加固梁承载力分析	79
6.2.1	材料本构模型	79
6.2.2	BSP 截面的弯矩曲率分析	80
6.2.3	加固梁的承载力计算	82
6.3	部分协同作用优化	83
6.3.1	理论与试验结果对比	83
6.3.2	部分协同作用对加固梁承载力的影响	84
6.3.3	应变比与曲率比推荐值	86
6.4	总结	87
第 7 章	梁侧锚固钢板加固梁的考虑部分协同作用的设计	88
7.1	理论基础与计算假定	88
7.1.1	材料本构关系	88
7.1.2	受弯承载力计算	89
7.1.3	计算公式验证	91
7.2	建议设计步骤	91
7.2.1	钢板尺寸确定	91
7.2.2	锚栓数量估算	93
7.2.3	应变比与曲率比检验	93
7.2.4	加固建议与设计基本准则	94
7.3	设计算例	96
7.3.1	拟加固结构现状	96
7.3.2	钢板布置	100
7.3.3	锚栓布置	101
7.3.4	部分协同作用的验算	102
7.3.5	关于加固效果、效率的讨论	104
7.4	总结	105
第 8 章	锚固钢板的局部屈曲试验	106
8.1	试验简介	106
8.1.1	试验方案	106
8.1.2	试件制作工艺	108
8.1.3	材料属性	108
8.1.4	加载方案及试验观测	109
8.2	试验结果分析	109

8.2.1	破坏模式	109
8.2.2	承载力及变形性能	111
8.2.3	屈曲起拱分析	112
8.2.4	钢板应变分析	113
8.3	总结	115
第9章	锚固钢板的局部屈曲数值仿真	116
9.1	数值模型简介	116
9.1.1	材料本构模型	116
9.1.2	单元选择及模型建立	116
9.1.3	锚栓连接及初始缺陷模拟	118
9.1.4	加载过程模拟	119
9.2	模拟与试验结果对比	119
9.2.1	破坏模式	119
9.2.2	荷载-位移曲线	120
9.3	参数分析	122
9.3.1	增大板厚与锚栓加密的效果分析	122
9.3.2	加劲肋的效果分析	123
9.3.3	初始缺陷敏感性	124
9.4	公式拟合	125
9.4.1	锚固钢板承载力组成	125
9.4.2	参数拟合	126
9.4.3	拟合公式验证	129
9.5	加劲肋选择	130
9.6	总结	131
第10章	带加劲肋梁侧锚固钢板加固梁的受弯试验	132
10.1	试验简介	132
10.1.1	试验方案	132
10.1.2	加固施工工艺	134
10.1.3	材性试验	134
10.1.4	加载方案及测点布置	134
10.2	试验结果分析	135
10.2.1	破坏模式	135
10.2.2	强度、刚度及延性	136
10.2.3	钢板受压区的侧向屈曲	137
10.2.4	相对滑移	138
10.2.5	应变发展	139
10.3	总结	139

第 11 章 带加劲肋梁侧锚固钢板加固梁的受弯承载力计算 140

11.1 理论基础与计算假定 140

11.2 锚栓间距确定 140

11.3 加劲肋选择 142

11.4 受压区混凝土强化系数 143

11.5 受弯承载力计算 143

11.6 理论与试验结果对比 144

11.7 总结 146

第 12 章 梁侧锚固钢板加固梁的受剪试验 147

12.1 试验概况 147

12.1.1 试件设计 147

12.1.2 加固步骤 148

12.1.3 材料力学性能 149

12.1.4 加载装置与测点布置 149

12.2 试验结果与分析 150

12.2.1 破坏模式 150

12.2.2 承载力、刚度和延性 152

12.2.3 箍筋应变 155

12.2.4 受拉纵筋应变 155

12.2.5 钢板纵向拉压应变 156

12.2.6 钢板主应变 157

12.2.7 纵横向滑移 157

12.3 总结 159

第 13 章 梁侧锚固钢板加固梁的受剪承载力计算 160

13.1 理论基础与计算假定 160

13.2 受剪承载力计算 160

13.3 建议设计步骤 163

13.4 理论与试验结果对比 165

13.5 算例 165

13.6 总结 167

参考文献 168

与本书有关的主要论著 170

1.1 钢筋混凝土梁加固方法简介

世界各地都存在大量需要加固改造的老旧建筑。在发达国家,大部分钢筋混凝土结构房屋都已远远超出其设计使用年限,且其中多层框架结构占了相当大的比例。混凝土碳化和钢筋锈蚀等造成材料老化是危及此类结构使用安全的主要原因。另外,在发展中国家如中国,由于设计和施工质量参差不齐,许多新建建筑的安全现状同样堪忧。

在这些需要修复改造的结构内,钢筋混凝土梁是其中最主要的一类构件。由于如图 1-1 所示的材料老化、构件受力开裂及施工质量问题等原因,往往需要对既有建筑中的钢筋混凝土梁采取加固和补强措施。目前,已有许多用于钢筋混凝土梁的加固方法,如:①在跨中增加支点以减小梁跨;②新浇混凝土以加大梁的截面面积;③通过在梁底或梁侧粘贴钢板或纤维增强复合材料(ERP)以实现对其截面的补强。前两种加固方法由于影响梁底使用空间且施工周期长,目前已较少应用;第三种方法由于基本不占用绝空间且施工方便,目前在全世界范围内都得到了广泛应用。

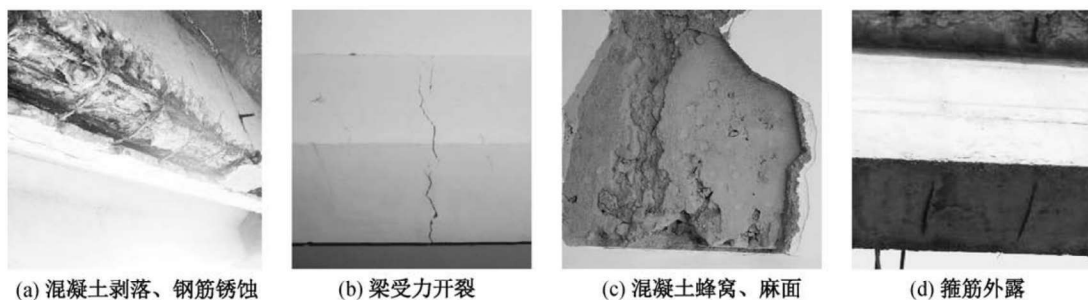


图 1-1 钢筋混凝土梁需要加固补强的情况

1.1.1 传统加固方法

既然外荷载在钢筋混凝土梁中产生的弯矩与梁跨的平方成正比,减小梁跨就成为最直接和有效的加固手段。由于在跨中新浇钢筋混凝土或增设钢结构支座往往会破坏梁底使用空间,因此如图 1-2 所示的体外后张预应力就作为一种变通方案而得到广泛应用。不过这种方法不仅施工复杂,而且并不是所有情况下都能使用。

如图 1-3 所示的增大截面法是曾经被大量运用的另外一种直接加固方法。然而其加固施

工不仅工序繁杂,新浇混凝土还须湿作业且养护周期长,将导致加固构件附近区域长时间无法投入使用。此外,梁高的增加也会导致梁底净空减小,影响建筑功能的正常发挥。

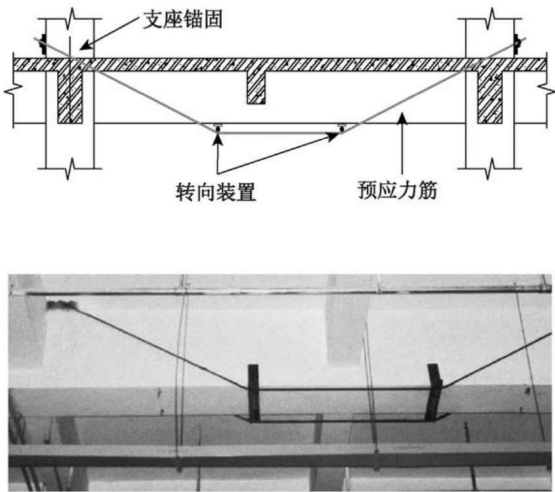


图 1-2 体外后张预应力

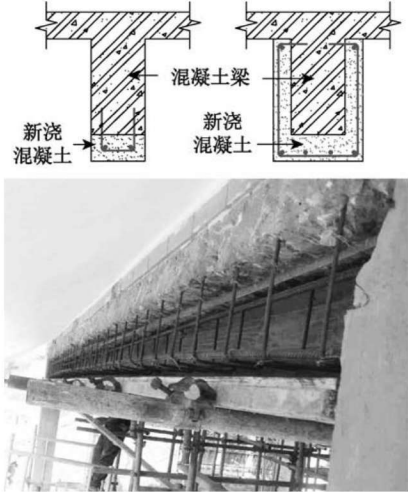


图 1-3 后浇混凝土增大截面

1.1.2 粘钢加固法

自从 20 世纪 60 年代首次运用以来,采用结构胶将钢板固定在钢筋混凝土构件表面的粘钢法得到了广泛认可,如图 1-4 所示。这种加固方法施工方便,加固效果良好,只需略微增大构件尺寸就能有效提高钢筋混凝土梁的承载力和刚度,减小裂缝宽度。然而,由于没有混凝土包裹,钢板及结构胶的抗火问题、钢板的腐蚀及其与混凝土之间的界面剥离问题是制约该加固方法扩大应用的主要难题。

粘钢法最主要的应用就是将钢板粘贴在梁底以提高其受弯承载力。外粘钢板的作用机理类似于受拉纵筋,加固梁的受弯承载力可采用钢筋混凝土梁受弯理论来进行分析。但是当既有梁的受拉配筋率较高时,采用该方法可能导致加固梁发生脆性的超筋破坏。

除了粘贴在梁底以外,也可以将钢缀条粘贴在梁侧以提高其抗剪性能。但需要在缀条端部附加锚栓以加强锚固措施,否则会因剪切界面过小而产生剥离破坏。当然,为了在提高受剪性能的同时也改善梁的受弯承载力和刚度,也可以在梁侧粘贴通长的钢板。不过,对采用粘钢加固的钢筋混凝土梁来说,脆性的界面剥离破坏始终是一个挥之不去的难题。

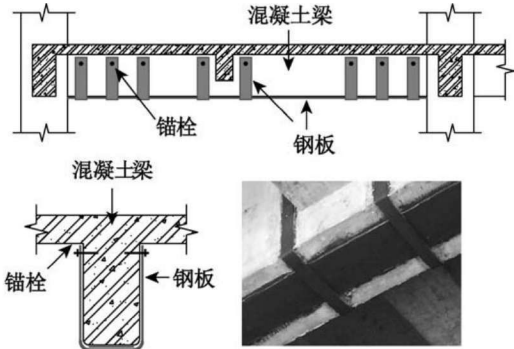


图 1-4 粘钢法

1.1.3 粘贴纤维片材或板材法

自 20 世纪 90 年代以来,高性能纤维增强复合材料(FRP)由于其独特优势在钢筋混凝土结构的加固领域得到了广泛应用。与钢材相比,FRP 具有超高的比强度、优越的抗腐蚀能力、

与被加固表面良好的贴合度、几乎不增加构件截面、快捷的施工过程及较低的人工成本等优点。

通过将碳纤维 (FCRP) 或玻璃纤维 (GFRP) 片材或板材粘贴到钢筋混凝土梁底, 如图 1-5 所示, 梁的受弯承载力可以得到极大提高。另外, 通过延迟裂缝形成及减小裂缝宽度, 梁的开裂得到有效改善。通常的做法是将非预应力或预应力碳纤维板材或片材粘贴到梁底, 在端部引入锚固端板来防止锚固失效。采取有效的端锚措施以后, 梁将会发生受弯或受剪破坏。否则, 将会发生如下两种界面剥离破坏模式: ①由板端界面应力集中引发的端部剥离破坏; ②由距板端较远处的弯曲裂缝和弯剪裂缝引发的剥离破坏。

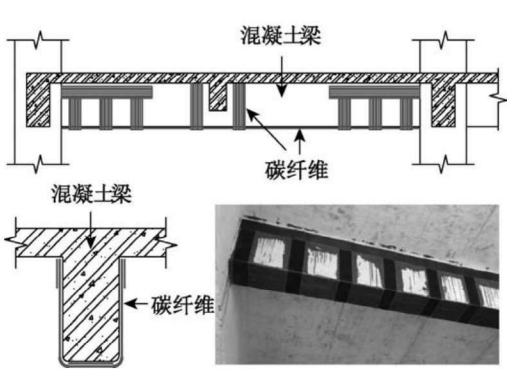


图 1-5 粘贴 FRP 法

不同形式的 FRP 也可以用来提高混凝土梁的抗剪承载力, 其中围绕梁截面的 U 形纤维不仅可以显著减小变形、增加承载力, 而且可以有效抑制梁底纤维的剥离破坏。

1.1.4 锚固钢板法

粘钢法加固钢筋混凝土梁的粘接界面应力分布连续, 且构件外表面光滑, 但是界面上存在较大的剥离应力, 且界面强度决定于表层混凝土材料的抗拉强度。而采用如图 1-6 所示锚固钢板法 (Steel-bolting), 则可以解决钢板界面剥离破坏的难题。

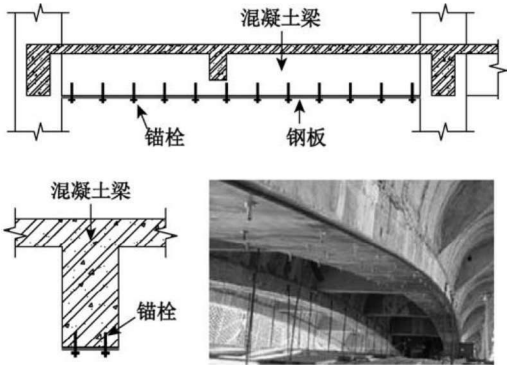


图 1-6 粘钢法

钢板或型钢既可以锚固在梁底, 又可以锚固在梁侧。通过把钢板锚固在适筋梁的底面, 可以使其受弯承载力和弯曲刚度得到有效提高, 其提高幅度同样可以采用经典钢筋混凝土梁理论进行计算。但是必须采取有效措施防止在锚栓孔制作过程中打断梁底纵筋, 而且由于配筋率的提高, 加固梁的延性通常会降低, 甚至发生脆性的超筋破坏。

当钢筋混凝土梁的受剪承载力足够时, 在梁底锚固钢板会有效提高梁的受弯承载力和刚度, 否则可能会发生受剪破坏。因此, 有些学者^[1-3]提出可以将钢板或型钢锚固在梁的两个侧面。这种锚钢法通常被称为梁侧锚固钢板法 (Bolted-Side-Plating, 简称 BSP 法), 采用这种方法加固的梁通常被称为梁侧锚固钢板加固混凝土梁 (Bolted-Side-Plated beams, 简称 BSP 梁), 也就是本书将要重点讨论的主题。

1.2 梁侧锚固钢板法简介

图 1-7 展示了 BSP 法加固钢筋混凝土梁在实际工程中的应用, 图 1-8 所示为一根未采取支座锚固措施的典型 BSP 梁的示意图。由图 1-7 和图 1-8 可知, 钢板覆盖了梁侧很大一部分面积, 从受拉区延伸到受压区。因此, 钢筋混凝土梁的受拉和受压配筋同时得到提高, 从而配

筋率得以保持在较低水平,可达到在梁受弯承载力显著提高的同时不明显降低梁的变形能力和延性的目的。而且,因为锚栓植筋钻孔施工在梁侧进行,而箍筋间距相对较大,所以与梁底锚固钢板法相比,采用该加固法打断既有钢筋的概率是很小的。

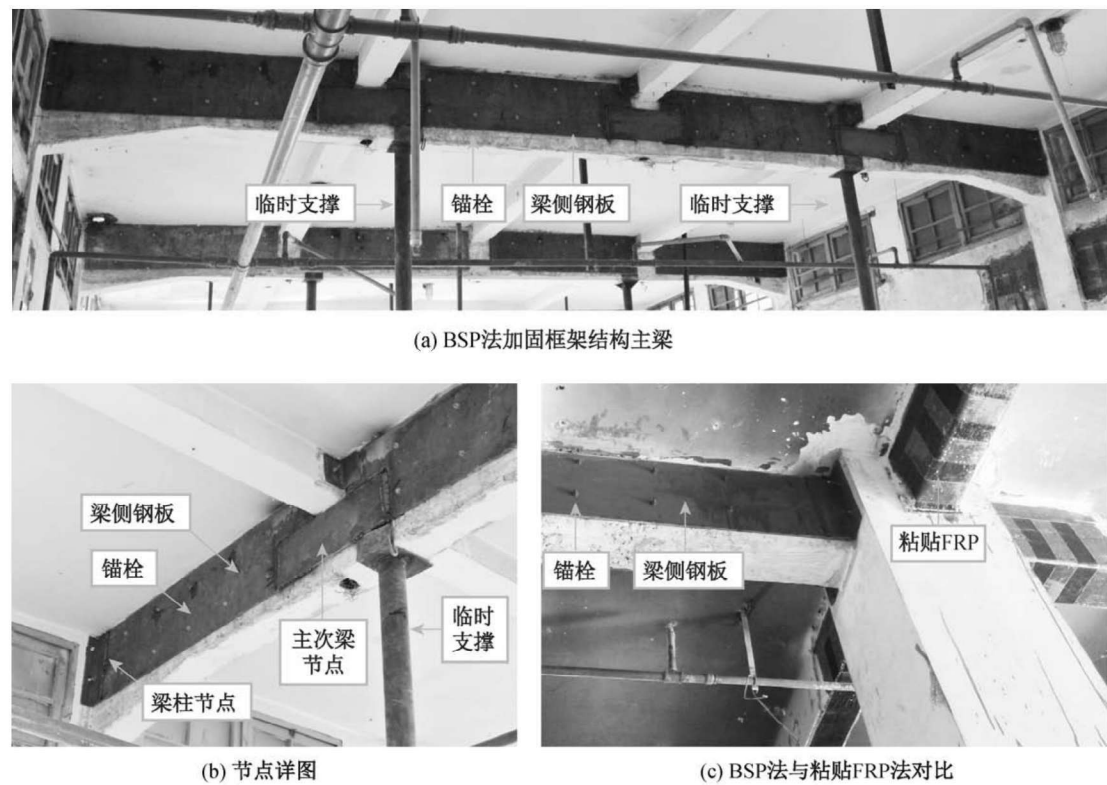


图 1-7 工程实际中的 BSP 加固法

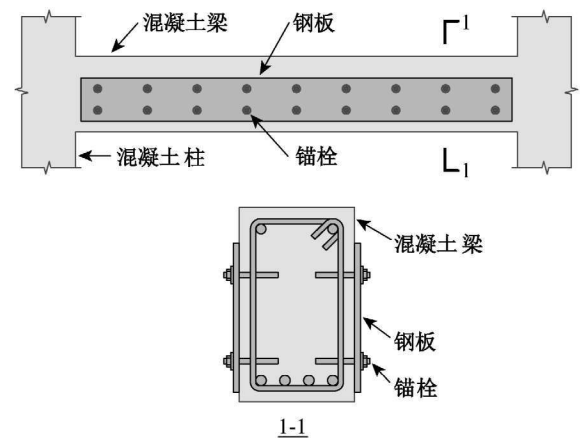


图 1-8 典型 BSP 梁

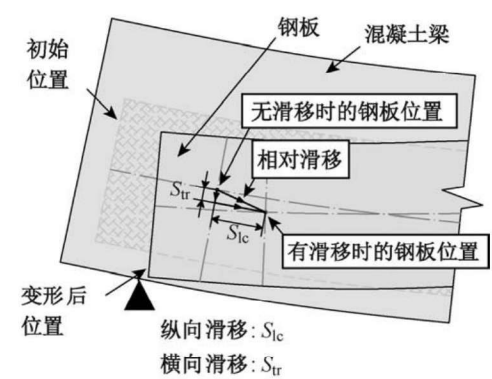


图 1-9 纵横向滑移

由于采用植筋式后锚固连接,钢板的反力通过锚栓直接传到钢筋混凝土梁内部,从而避免了界面上的剥离破坏。同时,由于梁底不需要进行加固操作,因此可设置临时支撑以部分恢复梁在既有荷载下的变形,从而部分消除剪力滞后效应。总而言之,与其他加固方法相比,对于

钢筋混凝土梁,特别是其中受拉配筋率较大的中等配筋梁,BSP法具有独特的优势。

1.2.1 相对滑移与部分协同作用

尽管 BSP 法相对于其他加固方法具有很多优势,但是它同样有很多不足的地方。在梁底锚固钢板加固混凝土梁中,钢板与混凝土梁之间的部分协同作用由纵向相对滑移引起;而 BSP 梁的部分协同作用更加复杂,它由钢板与混凝土梁之间纵向与横向滑移的综合效益引起,如图 1-9 所示。这种部分协同作用是制约 BSP 梁整体受力性能的重要因素。

虽然存在于 BSP 梁中钢板-混凝土界面上的纵横向相对滑移的数值往往很小(一般小于 10 mm),但是即便是非常小的相对滑移,也会对梁的总体受力性能产生很大的影响。

1.2.2 锚固钢板的局部屈曲

除了纵横向滑移引起的部分协同作用,由于梁侧钢板仅由间隔布置的锚栓提供的点约束所限定。所以 BSP 梁的受力性能还会由于钢板受压区的局部屈曲效应而降低。而且对于采用宽型钢板的 BSP 梁来说,由于钢板的截面大部分处于受压区,这种不利效应尤其显著。

梁侧钢板向内的变形由于被混凝土限制住,所以只能向外屈曲变形,也就是说与钢结构中通常意义的钢板局部屈曲不同,BSP 梁中钢板的屈曲是单向的,通常可以当成一个接触问题来考虑,简化为有分散边界点约束的单向屈曲问题。

1.2.3 梁侧锚固钢板法的其他问题

钢筋混凝土梁的受弯破坏模式由受拉纵筋的配筋率控制,可以根据界限配筋率(ρ_{stb})来进行划分。所谓界限配筋率,就是当梁最下层受拉纵筋屈服与梁受压边缘混凝土压溃同时发生时的配筋率。当钢筋混凝土梁为低配筋梁,也就是配筋率远小于界限配筋率时($\rho_{st} \ll \rho_{stb}$),其破坏模式为延性,强度和刚度可通过外加受拉纵筋得到显著提高,延性只会略微降低。相反,对于超筋梁($\rho_{st} > \rho_{stb}$)来说,其受弯承载力由混凝土受压强度而不是受拉纵筋控制,外加受拉纵筋只会使梁发生延性极低的脆性破坏。当然,由于在实际设计中超筋梁是禁止采用的,所以没有必要为其提供加固方案。但是,既有结构中还是存在相当一部分的中等配筋梁,其受拉配筋率虽然小于界限配筋率,但是非常接近。BSP 法因为可同时增加受拉和受压配筋,从而保持梁配筋率在较低水平,所以特别适用于这种中等配筋梁。

尽管梁侧钢板可以显著提高钢筋混凝土梁的受弯承载力和变形能力,但是由于钢板暴露在外,其耐腐蚀和耐火性能较差,耐久性和适用范围会受到限制。通过采用在钢结构中广泛使用的镀锌工艺可以提高钢板耐腐蚀能力,从而可提高 BSP 梁的耐久性。此外还可通过防火涂层来提高钢板的耐火性能,从而使 BSP 梁在高温中也可以发挥承载能力。

在粘钢与粘贴 FRP 加固混凝土梁中,加固后构件表面平整,连接界面上剪应力也较均匀和连续。然而在 BSP 梁中,界面剪力是由间隔布置的锚栓传递的,因此在钢板和既有钢筋混凝土梁中可能存在较严重的应力集中。此外,钢板外表面突出的锚栓也会影响建筑美观。

1.3 总 结

为了更好地理解梁侧锚固钢板加固钢筋混凝土梁(BSP 梁)的受力性能,建立起可靠的理论模型和简化设计方法,以便为将来进一步的科研和加固实践提供基础,本书将对一系列试

验、数值仿真、理论分析、程序编制及设计方法建立所取得的成果进行详尽介绍。全书共分 13 章,系统地介绍了 BSP 法及 BSP 梁如下几个方面的内容:

第 1 章简单对比了钢筋混凝土梁的不同加固技术,并简要介绍了 BSP 梁的基本概念和存在的主要问题,同时也列出了本书其余章节的主要内容。

第 2 章首先介绍了普通 BSP 梁的受弯性能试验,包括试件尺寸、材料性能、加工方法和施工过程、加载方案及测点布置;然后讨论了试验分析结果,包括试件的整体受力性能如破坏模式、荷载-挠度曲线、强度、刚度和延性的提高等,以及细观试验现象如纵横向相对滑移、应变比和曲率比、梁侧钢板分担的弯矩和轴力等。

第 3 章介绍了 BSP 梁的非线性有限元数值仿真。在详细介绍数值模型之后,进行了系统的参数分析,着重考察了 BSP 梁的纵横向相对滑移及锚栓剪力传递。

第 4 章基于 BSP 梁的截面分析,推导了纵向滑移和剪力传递沿梁跨分布的理论公式。给出了不同荷载条件下计算最大纵向滑移、钢板拉力及应变比的设计公式。

第 5 章基于力的叠加原理以及横向剪力传递与文克尔地基模型的相似性,提出了用于分析 BSP 梁中横向剪力传递分布的分段线性模型,给出了不同荷载条件下计算最大横向滑移及曲率比的设计公式。

第 6 章编制了用于评估 BSP 梁受力性能的数值程序,采用应变比和曲率比来表征由纵横向滑移导致的部分协同作用程度,通过最优化分析得到了可用于 BSP 加固设计的应变比和曲率比推荐值。

第 7 章给出了 BSP 梁的推荐设计步骤,将应变比和曲率比推荐值直接引入普通混凝土梁的设计公式用于确定钢板尺寸,并在初步确定锚栓布置方案后,利用应变比和曲率比计算公式来检验部分协同作用程度。

第 8 章首先介绍了锚固钢板的局部屈曲受压试验方案,然后进行了试验结果分析,包括破坏模式、强度及变形能力、侧向屈曲起拱及钢板应变等。

第 9 章利用 ABAQUS 有限元软件进行参数分析,考察了不同限制措施对锚固钢板局部屈曲行为的影响,建立拟合公式以计算钢板屈曲承载力,并给出了推荐的加劲肋尺寸以方便加固设计。

第 10 章介绍了带加劲肋 BSP 梁的受弯试验,试验过程与第 2 章类似,详尽考察了不同屈曲限制措施对 BSP 梁受力性能的影响规律。

第 11 章建立了带加劲肋 BSP 梁受弯承载力的理论模型,首先介绍了模型的理论基础和基本假定,然后给出了确定锚栓间距及加劲肋尺寸的方法以及估算加固梁受弯承载力的公式,最后利用试验结果对理论模型进行验证。

第 12 章介绍了 BSP 梁受剪性能试验方案和试验结果分析,包括破坏模式、强度、刚度和延性、箍筋、纵筋以及梁侧钢板的应变随外荷载的发展规律。

第 13 章建立了 BSP 梁受剪承载力的理论模型,并给出了推荐设计流程以方便加固工程实践,理论模型得到了试验结果的验证,并利用设计案例演示了推荐设计流程的实用性。

梁侧锚固钢板加固梁的受弯试验

为了更好地理解 BSP 梁的力学行为,尤其是钢-混凝土连接界面上的部分协同作用,本章将对截面属性及加固方案不同的 7 根试件进行四点弯曲试验。考察加固梁的荷载-挠度曲线、破坏模式、受弯承载力、刚度、延性、纵横向相对滑移以及钢板的受弯承载力及附加力偶对加固梁受力性能的贡献。

2.1 试验简介

2.1.1 试验方案

本次试验共浇筑了 7 根仅受拉纵筋配筋率不同的足尺钢筋混凝土梁,梁长均为 4 000 mm,截面均为 225 mm×350 mm,截面配筋如图 2-1 所示。纵筋和箍筋分别采用热轧带肋钢筋和光圆钢筋(分别用 T 和 R 表示),受压纵筋为 2T10,箍筋为 R10@100 以保证受剪破坏不会在梁达到受弯承载力之前发生。受拉纵筋仅试件 P75B300 为 3T16,其余均为 6T16,配筋率分别为 0.85%和 1.77%。

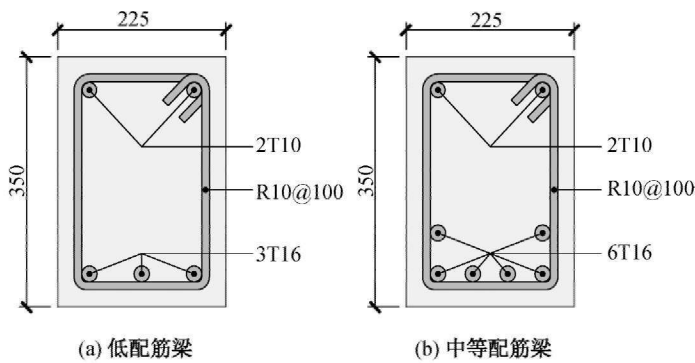


图 2-1 试件截面尺寸及配筋 (单位:mm)

保留一根未加固梁作为对比试件并命名为 CONTROL,其余试件均采用锚栓将钢板固定在梁两侧以进行加固,并依据钢板宽度和锚栓水平间距来对试件进行命名,如表 2-1 所示。表中列出了控制加固梁受力性能的主要参数如钢板、锚栓连接及屈曲约束措施等。所有加固试件钢板和锚栓布置如图 2-2 和图 2-3 所示,钢板厚度均为 6 mm,长度均为 3 950 mm;钢板宽度分三种(75 mm,100 mm,250 mm),锚栓水平间距分为两种(300 mm,450 mm),以达到不同的加固效果。