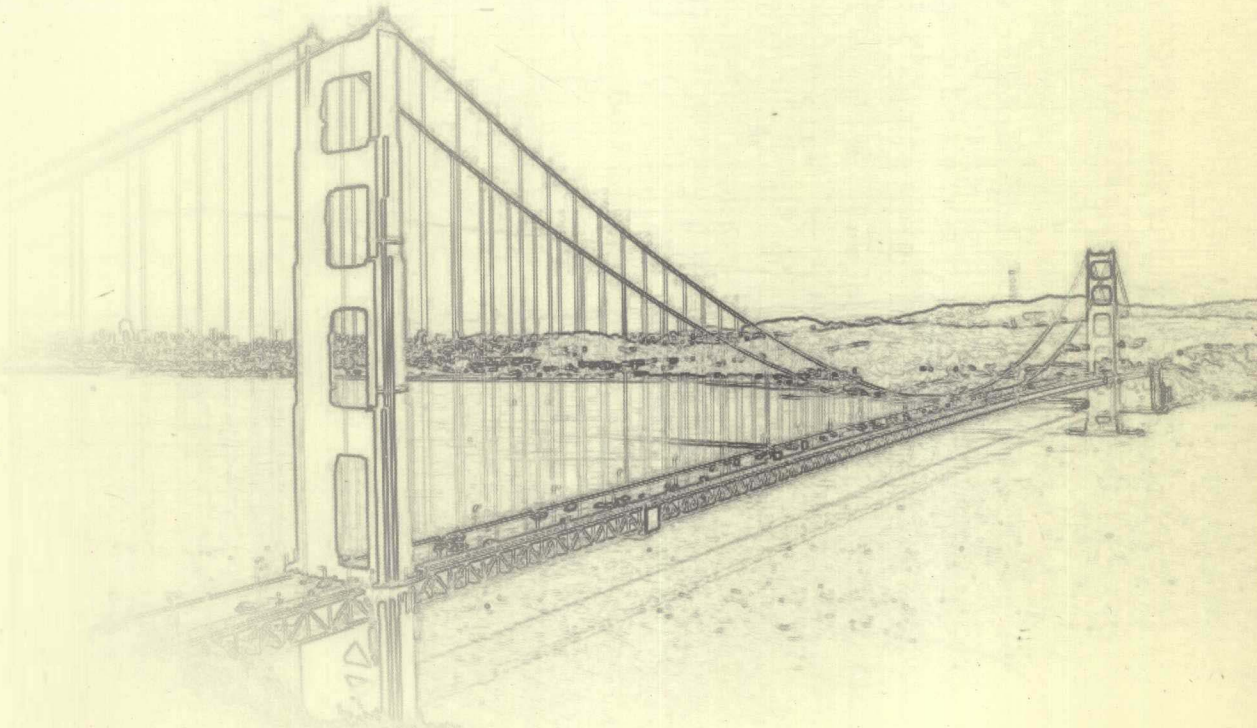


JTG/T J22—2008

# 公路桥梁加固设计规范 应用计算示例

邬晓光 白青侠 雷自学 编著



人民交通出版社  
China Communications Press

GongLu QiaoLiang JiaGu SheJi GuiFan

YingYong JiSuan ShiLi

# 公路桥梁加固设计规范 应用计算示例

邬晓光 白青侠 雷自学 编著



人民交通出版社  
China Communications Press

## 内 容 提 要

本书为《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22—2008)与相关规范、规程的对照计算手册。书中结合大量工程实践与理论研究,提供了加固设计中常用的增大截面加固法、粘贴钢板加固法、粘贴纤维复合材料加固法、体外预应力加固法等加固方法下的计算示例,可以较好地帮助读者学好、用好《公路桥梁加固设计规范》。

本书可供桥梁工程设计人员,高等学校相关专业广大师生参考学习使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

公路桥梁加固设计规范应用计算示例 / 邬晓光, 白青侠, 雷自学编著. — 北京: 人民交通出版社, 2011.5

ISBN 978-7-114-08960-2

I. ①公… II. ①邬… ②白… ③雷… III. ①公路桥—桥梁工程—加固—设计规范—设计计算 IV.

①U448.145.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 042651 号

书 名: 公路桥梁加固设计规范应用计算示例

著 者: 邬晓光 白青侠 雷自学

责任编辑: 高 培

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 17.25

字 数: 427千

版 次: 2011年6月 第1版

印 次: 2011年6月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08960-2

定 价: 40.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



# 前 言

随着我国公路交通事业的迅猛发展、运输量的大幅提高、车辆载重量的日益增加,在长期自然环境(大气腐蚀、温度、湿度变化等)和使用环境(荷载作用的增加、材料与结构的疲劳等)的作用下,许多桥梁已逐渐不能适应现代交通的要求,并直接威胁着人民生命财产的安全。因此,对桥梁结构的维修、加固和修复等方面的研究及工程应用,引起了交通部门的广泛关注。桥梁是公路交通的咽喉,其使用功能的好坏直接影响整条线路的畅通,在役公路桥梁由于受到其建设期间设计的局限、材料、施工质量等各方面的影响,有些出现了各种病害,已不能适应现在交通量的飞速增长,严重制约了公路运输事业的发展,对桥梁的加固显得尤为迫切。

随着我国国民经济的日益发展,交通运输量的迅速增长,我国危桥的数量大量增加。若将其拆除重建,不仅要耗费大量资金,而且工期也较长;若有计划、有步骤的对现有旧桥进行加固改造,不仅可以延长桥梁的使用寿命,用少量的资金投入,使桥梁能满足交通量的需求,还可以缓和桥梁投资的集中性,为国家带来巨大的经济和社会效益。由中交一院主编的《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22—2008)和《公路桥梁加固施工技术规范》(JTG/T J23—2008),已经由交通运输部发布,作为公路工程行业推荐性标准,于2008年10月1日起正式实施。这是我国在公路桥梁加固领域中首次以规范的形式对公路桥梁加固的设计和施工技术进行的规定。两项规范以出现缺陷及承载力不足的桥梁为对象,对各种桥梁加固的计算方法及构造设计、施工工艺等作出具体规定,是进行桥梁加固设计与质量检验评定的重要依据。规范反映了近年来国内外在桥梁加固工程中所采用的新技术、新材料、新工艺的发展水平以及该领域未来的发展状况,吸收了国内在桥梁加固工程方面的先进经验,是具有中国特色的、操作性较强的技术性法规,对我国桥梁加固市场形成行业权威性技术标准具有重要意义。

根据现行公路桥梁加固设计规范,桥梁上部结构加固技术主要有:增大截面加固法、粘贴钢板加固法、粘贴纤维复合材料加固法、体外预应力加固法以及改变结构体系加固法。前三种加固方法都是被动的加固方法,主要表现在后加增强材料的滞后应变的存在,而体外预应力加固法是一种主动的加固方法,在自重很小的情况下可大幅度调整并改善原结构的受力状态,提高结构的刚度和抗裂性能。此外,还有增加构件加固、拱圈增设套拱加固等方法。桥梁下部结构加固技术主要有:扩大基础加固、增补桩基加固、钢筋混凝土套箍或护套加固以及人工地基加固等方法。

为了配合现行《公路桥梁加固设计规范》的使用,长安大学公路学院编写了此书供设计者参考,本书是依据规范并通过大量的工程实践与理论研究编写的。如在贵州省都匀至新寨高速公路改扩建工程中,对68座桥梁进行了加固或改建设计;与山西省公路局合作,对钢筋混凝土旧桥评估及加固关键技术进行了系统研究;与河北省公路勘察设计院合作,对在役预应力混凝土桥梁检测、量化评估及加固设计关键技术进行了全面研究;与浙江省金华公路管理处合作,对预应力混凝土宽板桥检测与加固技术进行了专项攻关研究。通过以上一些在公路桥梁加固方面所做的研究与实践,总结出许多行之有效的加固改造技术,不仅提高了旧桥的承载

能力、刚度和耐久性,而且节约了大量的建设资金。旧桥加固的关键就是根据其不同的缺陷与病害,采取不同的加固技术,对症下药,达到事半功倍的效果。

全书由邬晓光、白青侠、雷自学编写,长安大学研究生蒋渭、刘近龙、王扶义、孙松、高翔参与了本书的部分计算、文字录入和插图绘制工作。

新规范的实施尚需在设计实践中进一步完善,本算例对于规范条文的理解、应用也需要在实践中经历考验。作为编者,本书力求做到计算示例解题正确、联系工程实际和便于学习参考,但由于编者水平有限,缺失和错误在所难免,恳请读者与同行专家提出宝贵意见。

**编著者**  
**2010年10月**

# 目 录

<b>第一章 桥梁常用加固方法及材料</b> .....	1
1.1 桥梁常见病害及缺陷 .....	1
1.1.1 我国桥梁常见病害 .....	1
1.1.2 我国桥梁主要技术缺陷 .....	2
1.2 桥梁常用加固方法 .....	3
1.2.1 增大截面加固法 .....	3
1.2.2 粘贴钢板加固法 .....	4
1.2.3 粘贴纤维增强复合材料加固法 .....	5
1.2.4 体外预应力加固法 .....	5
1.2.5 改变结构体系加固法 .....	6
1.2.6 增加构件加固法 .....	6
1.3 加固用材料 .....	6
1.3.1 水泥混凝土 .....	6
1.3.2 钢材 .....	8
1.3.3 纤维复合材料.....	14
1.3.4 胶黏剂.....	15
<b>第二章 增大截面加固法</b> .....	19
2.1 特点及适用范围.....	19
2.1.1 特点.....	19
2.1.2 适用条件.....	19
2.1.3 新老混凝土接合计算.....	20
2.2 构造要求.....	20
2.3 受弯构件加固计算.....	21
2.3.1 正截面加固承载力计算.....	21
2.3.2 斜截面加固承载力计算.....	35
2.4 受压构件加固计算.....	38
2.4.1 轴心受压构件正截面加固承载力计算.....	38
2.4.2 偏心受压构件正截面加固承载力计算.....	40
<b>第三章 粘贴钢板加固</b> .....	60
3.1 特点及适用范围.....	60
3.1.1 特点.....	60
3.1.2 适用范围.....	60
3.2 构造要求.....	61
3.3 受弯构件加固计算.....	63
3.3.1 正截面加固承载力计算.....	63

3.3.2	斜截面加固承载力计算	74
3.4	偏心受压构件加固计算	77
3.5	受拉构件正截面加固计算	87
3.5.1	轴心受拉加固构件正截面承载力计算	87
3.5.2	矩形截面大偏心受拉加固构件正截面承载力计算	89
<b>第四章</b>	<b>粘贴纤维复合材料加固法</b>	<b>93</b>
4.1	特点及适用范围	93
4.1.1	特点	93
4.1.2	适用范围	93
4.2	一般规定及构造要求	93
4.2.1	一般规定	93
4.2.2	构造要求	94
4.3	受弯构件加固计算	96
4.3.1	正截面加固承载力计算	96
4.3.2	斜截面加固承载力计算	109
4.4	受压构件加固计算	113
4.4.1	轴心受压构件加固计算	113
4.4.2	大偏心受压构件加固计算	117
4.5	受拉构件加固计算	122
4.5.1	轴心受拉构件加固计算	122
4.5.2	大偏心受拉构件加固计算	123
4.6	墩柱延性加固计算	126
<b>第五章</b>	<b>体外预应力加固</b>	<b>128</b>
5.1	体外预应力加固法的特点及适用范围	128
5.1.1	体外预应力加固的特点	128
5.1.2	体外预应力加固的使用范围	128
5.2	构造要求	128
5.2.1	体外预应力筋(束)的布置	128
5.2.2	T形梁及I形梁加固体系构造	130
5.2.3	箱形梁加固体系的转向构造	130
5.3	体外预应力加固计算	133
5.3.1	持久状况承载能力极限状态计算	133
5.3.2	持久状况正常使用极限状态计算	149
5.3.3	应力计算	162
<b>第六章</b>	<b>桥梁加固计算综合示例</b>	<b>170</b>
6.1	增大截面加固计算示例	170
6.1.1	设计计算参数	170
6.1.2	荷载效应及其效应组合	170
6.1.3	原结构复算	171
6.1.4	加固设计	175



6.2	粘贴钢板加固计算示例	180
6.2.1	设计计算参数	181
6.2.2	荷载效应及其效应组合	182
6.2.3	原结构复算	183
6.2.4	加固设计	189
6.3	粘贴纤维复合材料加固计算示例	193
6.3.1	设计计算参数	194
6.3.2	荷载效应及其效应组合	194
6.3.3	原结构复算	195
6.3.4	加固设计	199
6.4	体外预应力加固计算示例	204
6.4.1	计算参数	206
6.4.2	加固计算	206
<b>第七章</b>	<b>桥梁加固计算机模拟分析</b>	<b>218</b>
7.1	有限元建模	218
7.1.1	单元类型选取	218
7.1.2	建模方法	220
7.1.3	单元生死	223
7.1.4	非线性解	223
7.2	增大截面加固法	224
7.2.1	空心板梁加固	224
7.2.2	T形截面梁加固	227
7.3	粘贴钢板加固	230
7.3.1	空心板梁加固	230
7.3.2	T形截面梁加固	234
7.4	粘贴碳纤维加固	237
7.4.1	空心板梁加固	237
7.4.2	T形截面梁加固	241
7.5	混合加固措施的力学规律分析	244
7.5.1	空心板	244
7.5.2	T形梁	250
7.6	体外预应力加固	255
7.6.1	工程概况	255
7.6.2	病害程度	256
7.6.3	加固目的	256
7.6.4	结构建模	256
7.6.5	计算结果	259
<b>参考文献</b>		<b>267</b>



# 第一章 桥梁常用加固方法及材料

近 50 多年来,特别是改革开放以后,我国公路建设取得了巨大成就——公路技术等级不断提高,高速公路建设实现历史性突破,县乡公路里程大幅增长。但是,目前我国公路交通依然处于低水平、不平衡的状态,技术标准低、通行能力差的低等级及等外公路所占比重仍然较大,严重制约了路网的通行能力。

同样,我国桥梁建设虽取得了很大成就,但随着交通事业的迅猛发展,运输量的大幅度提高,车辆载重量的日益增加,同时长期在自然环境(大气腐蚀,温度、湿度变化等)和使用环境(荷载作用频率的增加,材料与结构的疲劳等)的作用下,许多桥梁普遍老化,衰退严重,绝大多数桥梁处于“带病”工作状态。公路桥梁原设计标准低、结构构件老化,各种材料强度降低等导致的桥梁承载能力降低、通行能力不足使许多桥梁已逐渐不能适应现代交通的要求,威胁着人民生命财产的安全。据原交通部统计,到 2007 年底,我国公路网中有各式桥梁约 57 万座,约 2 319 延米,其中,危桥数量 98 600 余座,占 17%左右。由于社会生活和经济活动日益依赖于汽车等交通工具,交通量日益增多,公路桥梁一旦坍塌,将会造成重大人员伤亡。因此,对桥梁结构的维修、加固和修复等方面的研究和工程应用,已经引起广泛关注。近年来,为提高桥梁安全性,交通运输部每年要求对桥梁进行检查,并上报四类、五类危桥,以安排资金加固改建。

通过大量的实践与理论研究,广大桥梁工程技术人员已经总结出许多行之有效的桥梁加固改造技术,如能对其加以正确应用,不但可以提高旧桥的承载能力、刚度和耐久性,相对于重建新桥还可以节约大量的建设资金。因此,旧桥加固的关键就是根据其不同的缺陷与病害,采取不同的加固技术,对症下药,达到事半功倍的效果。

## 1.1 桥梁常见病害及缺陷

### 1.1.1 我国桥梁常见病害

在役桥梁结构随着使用时间的延续,受结构使用条件变化及环境侵蚀等因素的影响,会使结构受到不同程度的损伤,造成桥梁病害,使得结构性能退化,使用功能逐步降低。由于道路等级、荷载等级的提高,交通量的增长,原有桥梁的功能将不能满足使用要求。

桥梁结构的病害形式多种多样,从引起病害的原因分析,可以将其划分为两大类:

第一类为由环境作用引起的混凝土结构损伤与破坏。由于混凝土的缺陷(例如裂隙、孔道、气泡、孔穴等),环境中的水及侵蚀性介质就可能渗入混凝土内部,与混凝土中某些成分发生化学、物理反应,产生碳化、冻融、锈蚀等作用,引起混凝土损伤,影响结构的受力性能和耐久性。

#### (1) 混凝土的碳化

混凝土的碳化是指混凝土中的氢氧化钙( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )与渗透进混凝土中的二氧化碳( $\text{CO}_2$ )

或其他酸性气体发生化学反应,中和氢氧化钙,而生成碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )。

混凝土中因水泥石含有氢氧化钙而呈碱性,在钢筋表面形成碱性薄膜而保护钢筋免遭酸性介质的侵蚀,起到了“钝化”保护作用。但混凝土的碳化,会导致埋置于混凝土中的钢筋表面的钝化膜逐渐破坏,在水分及其他有害介质侵入的情况下,钢筋就会发生腐蚀。

#### (2) 氯离子( $\text{Cl}^-$ )的侵蚀

一般硅酸盐水泥本身只含有少量的氯化物。若在混凝土拌制时加入了含氯化物的减水剂,会使混凝土含有相当多的氯化物。就大多数情况而言,氯化物对混凝土的侵蚀是氯离子从外界环境侵入已硬化的混凝土造成的。氯离子对混凝土结构的危害是多方面的,但最终表现为钢筋的腐蚀。

#### (3) 碱集料反应

碱集料反应是指混凝土中的水泥在水化过程中释放出的碱金属,与含碱性集料中的碱活性成分发生化学反应,生成碱活性物质。这种物质吸水后产生体积膨胀,造成混凝土开裂。碱集料反应引起的混凝土开裂一般在混凝土表面形成网状裂缝,并在裂缝处渗出白色凝胶物质。

碱集料反应引起的混凝土结构破坏程度,比其他耐久性破坏发展更快,后果更为严重。碱集料反应一旦发生,则很难加以控制,一般不到两年就会使结构出现明显开裂。

#### (4) 冻融循环破坏

渗入混凝土中的水在低温下结冰膨胀,从内部破坏混凝土的微观结构。经多次冻融循环后,损伤积累将使混凝土剥落酥裂,强度降低。

#### (5) 钢筋锈蚀

混凝土中钢筋腐蚀的首要条件是钝化膜破坏,混凝土的碳化及氯离子侵蚀都会造成覆盖钢筋表面的碱性钝化膜的破坏,加之有水分和氧离子的侵入,就可能引起钢筋的腐蚀。

钢筋锈蚀伴有体积膨胀,使混凝土出现沿钢筋的顺筋裂缝,造成钢筋与混凝土之间的黏结力破坏,钢筋截面面积减少,引起结构构件的承载力降低,变形和裂缝增大等一系列不良后果,并随着时间的推移,锈蚀会逐渐恶化,最终可能导致结构的完全破坏。因此,钢筋锈蚀是严重威胁混凝土结构耐久性最主要和最普遍的危害。

另一种情况是荷载作用或设计考虑不周、施工控制不严、养护管理不善等原因,引起混凝土结构产生的如裂缝、麻面、蜂窝、空洞、剥落、磨损、露筋、钢筋锈蚀等不同程度的病害。裂缝是桥梁病害的集中表现,也是桥梁中最常见的病害。裂缝的成因,归纳起来有以下方面:

(1) 由外荷载引起的裂缝。

(2) 由变形引起的裂缝,即主要由温度、干缩、不均匀沉陷或膨胀等变形产生应力而引起的裂缝。

(3) 碱集料反应、钢筋锈蚀等引起的裂缝。

### 1.1.2 我国桥梁主要技术缺陷

目前,我国在役公路桥梁多建于 20 世纪 50 年代以后,限于当时的技术水平和历史条件,桥梁设计和施工水平不高,留下质量隐患,加上超重车作用频繁,养护不及时等原因,在役桥梁技术现状不容乐观。通过分析研究,公路桥梁的主要技术缺陷可以归纳为以下几个方面:

(1) 设计荷载标准偏低,承载能力不足。20 世纪 50 年代至 90 年代末我国桥梁设计荷载标准为汽车—10 级、汽车—13 级、汽车—15 级、汽车—20 级、汽车—超 20 级,现行标准为公路—II 级、公路—I 级。根据现行《公路工程技术标准》(JTG B01—2003),桥梁设计荷载有公路

—II级、公路—I级。根据荷载等级公路—II级相当于汽车—20级这一标准判定,当时绝大多数桥梁设计承载力不符合现行标准,属于承载力不达标桥梁。有关研究分析表明,设计荷载为汽车—20级的桥梁承载力仍稍低于公路—II级标准,因此按此标准判定,建于20世纪80年代至90年代末的汽车—20级的桥梁,承载力存在不足现象。因此,我国在役桥梁中承载力不足的桥梁占相当大的比例。这些桥梁应予加固提级,使其承载力至少达到公路—II级。

(2)通行能力不足。这主要表现在桥面宽度不足;桥梁平面线形、纵断面线形标准太低;桥上通车净空或桥下通航净空不足。

(3)人为及自然因素引起结构的损坏。比如超出设计范围的洪水、泥石流、浮冰、冰冻、地震、强风、船舶撞击,河道挖沙取石,桥梁基础下伏空洞等,引起的桥梁结构局部损害。

(4)超期服役。建造于20世纪五六十年代的桥梁,设计使用寿命一般为30~50年,这些桥梁目前仍在使用。

(5)超载运营。交通流量迅速增长,货物运输车辆中普遍存在、屡禁不止的超载现象,极大地增加了路网中桥梁结构的负担,低等级公路上的桥梁压垮现象时有发生,高速公路桥梁也普遍暴露出过早损坏的不正常现象。

(6)设计、施工的先天不足。桥梁设计、使用材料和施工等存在一定的技术缺陷,随着运营时间的增加,其病害逐渐发展。

## 1.2 桥梁常用加固方法

桥梁经过技术状况评定及承载能力鉴定,确认经过加固能满足结构安全或正常使用要求,方可进行加固,加固工作的内容及范围应根据评定结论和使用要求确定。

根据国内外已有的经验,旧桥加固技术基本上有三种类型:加强薄弱构件;增加或更换桥梁构件;改变结构受力体系等。工程中最常用的加固方法有:增大截面加固法、粘贴钢板加固法、粘贴纤维增强复合材料加固法、体外预应力加固法、改变结构体系加固法及增加构件加固法等。

### 1.2.1 增大截面加固法

增大截面加固法是在构件的单侧、双侧、三侧或四周外包加固。该法对提高结构的承载力、刚度、稳定性及抗裂性都非常有效。混凝土受弯构件中受拉钢筋不足且桥下净空不受限制时,可采用梁板底加大截面对原结构进行加固。如果受拉钢筋配置充足,也可从梁板顶面加大截面(如在旧桥加固改造时凿除原混凝土铺装,并通过种植钢筋技术,新筑混凝土铺装层),增大结构的截面面积,大大提高了结构的整体受力性能,使上部各梁板的内力分配发生本质的变化,受力更加均匀,有效减小了受力较大梁板的内力。但由于此法或多或少地增大了结构自重,使基础受力增大,因而必须注意可能出现的地基承载力不足的情况。

该方法可加固梁式桥,也可加固拱式桥梁(图1-1~图1-3)。根据加固目的和要求的不同,可以是以增大截面为主的加固,可以是增配钢筋为主的加固,也可以是两种方法同时采用的加固。

以增大截面为主时,为了保证补加混凝土正常工作,亦需适当配置构造钢筋。以增配钢筋为主时,为了保证配筋的正常工作,亦需按钢筋的间距和保护层厚度等构造要求决定适当增大截面尺寸。加固中应将新旧钢筋焊接,或用锚杆联结原构件,同时将旧混凝土表面凿毛清洗干净,确保新旧混凝土结合良好。

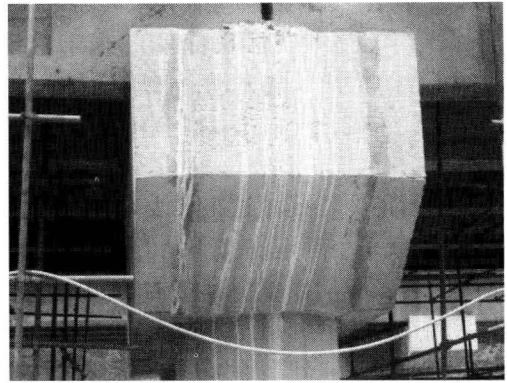


图 1-1 增大截面法加固盖梁

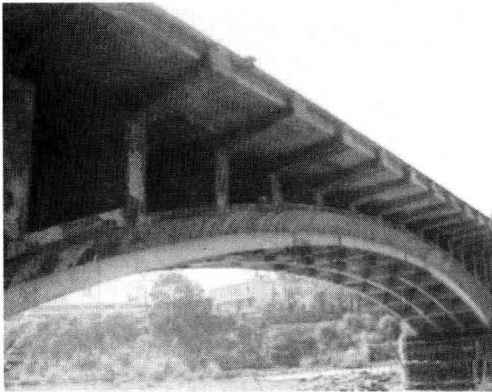


图 1-2 增大截面法加固拱桥



图 1-3 增大截面法加固墩柱

### 1.2.2 粘贴钢板加固法

粘贴钢板加固法是用环氧树脂系列黏结剂将钢板粘贴在钢筋混凝土结构物的受拉区或薄弱部位,使之与原结构物形成共同受力的整体,以提高其抗弯、抗剪能力及刚度,改善原结构的钢筋及混凝土的应力状态,限制裂缝的进一步发展,进而提高桥梁的承载能力与耐久性的加固方法(图 1-4)。由于粘贴钢板厚度有限,一般不超过 1cm,因而它对刚度的提高效果并不显著,如果能与加大截面法联合应用,加固效果将会大大提高。

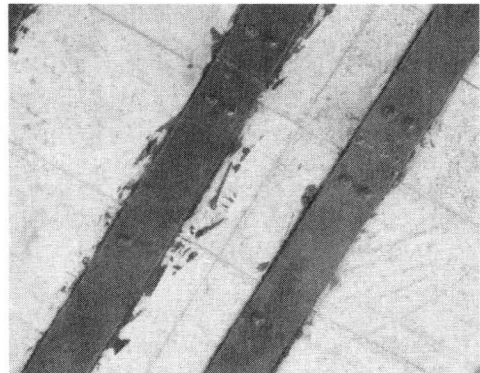


图 1-4 空心板底粘贴钢板加固

### 1.2.3 粘贴纤维增强复合材料加固法

粘贴纤维增强复合材料加固法是利用黏结剂将纤维增强复合材料(FRP)粘贴在被加固混凝土构件薄弱部位,对桥梁起到加固作用的一种加固方法(图 1-5)。此法的加固功效类似于粘贴钢板加固法。但必须注意,由于纤维增强复合材料非常薄,此法对结构刚度的提高更加有限,对拉应力的降低效果及对混凝土裂缝的抑制作用都不明显。因而该加固方法适用于混凝土梁桥、板桥的抗弯和抗剪加固,对于配筋率较低或钢筋锈蚀严重的旧桥,加固效果十分显著;另外还适用于混凝土墩柱的补强,抗震延性补强以及地震破坏后的修复等。

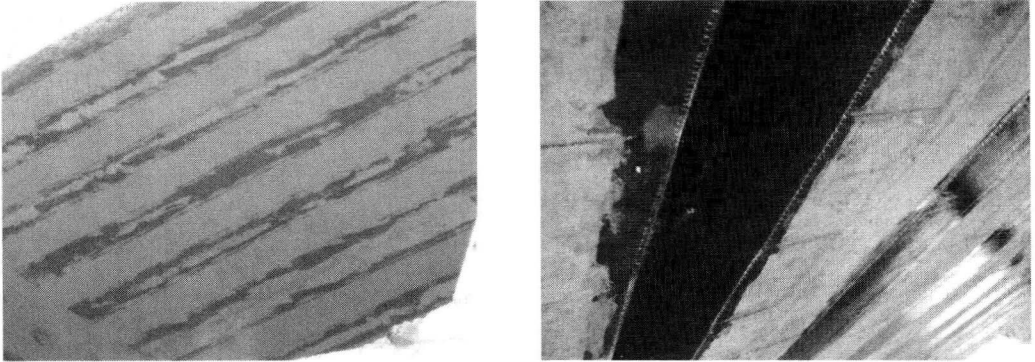


图 1-5 空心板底粘贴碳纤维布加固

### 1.2.4 体外预应力加固法

体外预应力加固是把具有防腐保护的预应力筋布置在桥梁的受拉区,通常设在梁体外部或箱梁内,以改善结构的受力状况,达到提高桥梁承载能力目的的加固方法(图 1-6)。

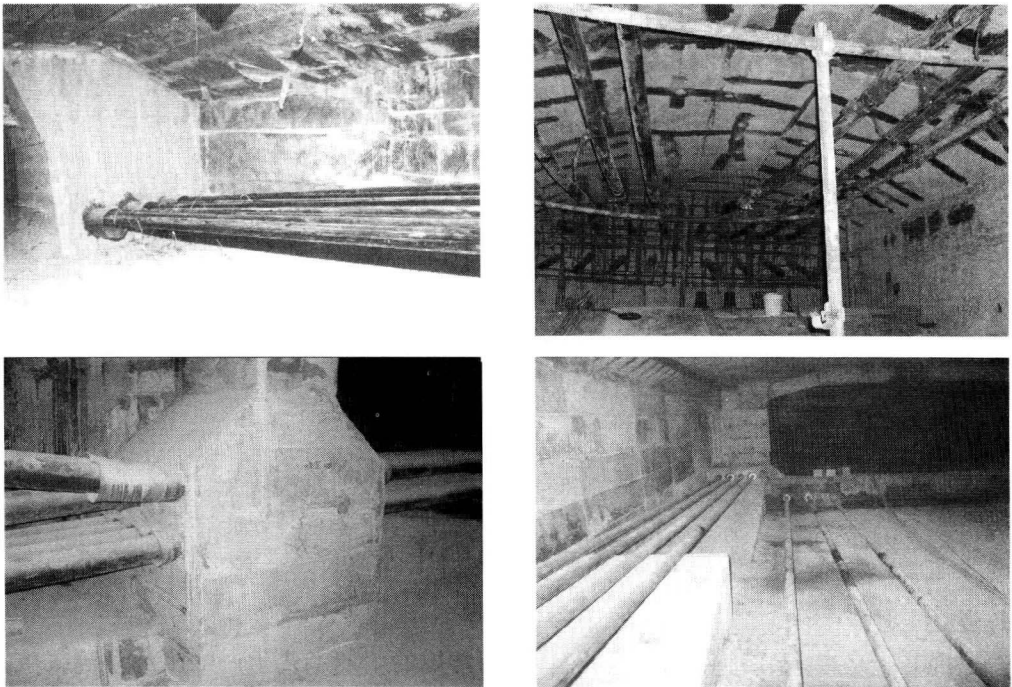


图 1-6 体外预应力加固图



之前几种加固方法都是被动的加固方法,这主要表现在它们都不能减小、更不能消除结构自重所产生的应力和变形。而体外预应力加固法是一种主动的加固方法,也就是说,在自重增加很小的情况下可大幅度调整并改善原结构的受力状态,提高结构刚度和抗裂性能。例如:当混凝土梁中预应力筋或普通钢筋严重锈蚀或因其他病害而造成结构承载力下降,梁体裂缝宽度超限、钢筋疲劳应力幅度过大或结构工作应力过高,或需要提高桥梁的荷载等级时,都可采用此法进行加固。

### 1.2.5 改变结构体系加固法

改变结构体系加固法包括简支转连续法、增加辅助墩法、八字支撑法及梁式桥转换为梁拱组合体系等方法(图 1-7)。这些方法的本质都是为所加固的桥梁加入新的支撑点,以缩短梁的计算跨径,使得桥梁的受力体系和受力状况发生改变,从而提高结构的承载能力及刚度,减小结构效应,改善桥梁的受力性能。这些方法看似都很有效,但其施工和设计计算一般都比较复杂,往往会出现一些不利的受力情况。例如,当采用八字支撑法时,支撑点处会出现负弯矩,而原结构在此点主要配置抵抗正弯矩的钢筋。因而,要抵抗由此产生的负弯矩,则还要另外采取必要的结构措施。

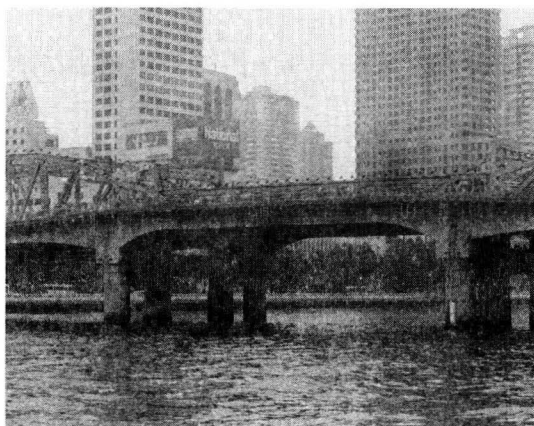


图 1-7 使用自锚式吊杆体内悬索和体内预应力加固具有 70 年历史的广州海珠大桥

### 1.2.6 增加构件加固法

增加构件加固法根据所增加的构件及新旧主梁联合受力形式可分为增设纵梁或边梁加固(不拓宽桥面)、单边或双边拓宽改造加固、增加横隔板加固等。当墩台地基状态良好并具有足够的承载力,且上部结构也基本完好,但承载能力或刚度不能满足要求,同时要求对原桥面进行拓宽时,常采用增设承载能力高、刚度大的新纵梁,使新旧梁互相连接共同受力。对于过去建造的一些桥梁,有时只设有端横隔板或中横隔板,横向联系较差,即可通过增设一定数量的横隔板,使原梁的受力分配发生明显改变,达到提高结构承载能力和刚度的目的。

## 1.3 加固用材料

### 1.3.1 水泥混凝土

#### 1. 混凝土强度

普通混凝土是指采用水泥、砂石为原料,采用常规的生产工艺生产的水泥基混凝土,是目前桥梁工程中最为常用的混凝土。混凝土的轴心抗压强度标准值  $f_{ck}$  和设计值  $f_{cd}$ 、轴心抗拉强度标准值  $f_{tk}$  和设计值  $f_{td}$  见表 1-1,混凝土受压和受拉时的弹性模量见表 1-2。

混凝土强度标准值和设计值(MPa)

表 1-1

强度种类	符号	混凝土强度等级												
		C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
强度标准值	$f_{ck}$	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2
	$f_{tk}$	1.54	1.78	2.01	2.20	2.40	2.51	2.65	2.74	2.85	2.93	3.0	3.05	3.10
强度设计值	$f_{cd}$	9.2	11.5	13.8	16.1	18.4	20.5	22.4	24.4	26.5	28.5	30.5	32.4	34.6
	$f_{td}$	1.06	1.23	1.39	1.52	1.65	1.74	1.83	1.89	1.96	2.02	2.07	2.10	2.14

混凝土的弹性模量( $\times 10^4$  MPa)

表 1-2

混凝土强度等级	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
$E_c$	2.55	2.80	3.00	3.15	3.25	3.35	3.45	3.55	3.60	3.65	3.70	3.75	3.80

注:1. 混凝土剪变模量  $G_c$  按表中数值的 0.4 倍采用。

2. 对高强混凝土,当采用引气剂及较高砂率的泵送混凝土且无实测数据时,表中 C50~C80 的  $E_c$  值应乘折减系数 0.95。

由于需要加固桥梁的修建年代均较早,按现行规范验算承载力时,原桥混凝土标号和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)规定的混凝土强度等级的变换关系见表 1-3。

混凝土标号与混凝土强度等级变换关系

表 1-3

原规范混凝土标号	20	25	30	35	40	45	50	55	60
混凝土强度等级	C18	C23	C28	C33	C38	C43	C48	C53	C58

注:变换后的强度取值按表 1-1 中的数值用直线插入法求得。

## 2. 加固用混凝土性能要求

结构加固用混凝土应具备强度高、变形小等特点。混凝土及其配制所用材料符合以下要求:

(1) 桥梁结构加固用混凝土的强度等级应比原结构构件提高一级,且不得低于 C30;当采用预应力混凝土进行加固时,其强度等级不得低于 C40。

(2) 水泥的品种、性能和质量应满足下列要求:

① 应采用强度等级不低于 32.5 级的硅酸盐水泥、快硬硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥;当有耐腐蚀、耐高温的要求时,应采用相应的特种水泥。

② 当配制加固用聚合物砂浆时,所采用的水泥强度等级不应低于 42.5 级。

(3) 集料的品种和质量应满足下列要求:

① 粗集料应选用质密、坚硬、强度高、耐久性好的碎石或卵石。对于主要承重构件,加固用集料的最大粒径要求:拌和混凝土应不超过 20mm,小石子混凝土不超过 10mm。不得使用含有活性二氧化硅石料制成的粗集料。

② 细集料应使用中、粗砂,其细度模数宜控制在 2.6~3.7 之间。

(4) 混凝土拌和用水应满足下列要求:

① 水中不应含有影响水泥正常凝结与硬化的有害杂质或油脂、糖类及游离酸类等。

② 污水、pH 值小于 5 的酸性水及含硫酸盐量按  $SO_4^{2-}$  计超过水的质量  $0.27\text{mg}/\text{cm}^3$  的水



不得使用。

③不得用海水拌制混凝土。

④供饮用的水。

(5)混凝土所掺的粉煤灰应是 I 级灰,且烧失量不应大于 3%。

(6)当桥梁加固选用聚合物混凝土、微膨胀混凝土或合成短纤维混凝土时,应在施工前进行试配,并应检验其强度、抗干缩性及耐腐蚀性。

(7)混凝土中掺用外加剂时,其质量及相关技术规定应符合《混凝土外加剂》(GB 8076—2008)与《混凝土外加剂使用技术规范》(GB 50119—2003)的要求;不得使用含有氯盐、亚硝酸盐、碳酸盐和硫氰酸盐类成分的外加剂;不应使用铝粉作为混凝土的膨胀剂。

(8)桥面补强层混凝土除应具有黏结力强、收缩小、抗裂性能高外,还应具有足够的韧性、抗冲击能力和抗渗性,并可以从施工工艺上采取适当的措施,改善混凝土的使用性能。

①使用外加剂,如防水剂,可增加混凝土密实度,提高抗渗性;掺入膨胀剂可使混凝土产生适度膨胀,增强密实性,或配制补偿收缩混凝土,减少干缩裂缝,提高抗裂防渗能力等。使用外加剂应注意合理选择品种,进行必要的试验,施工时必须按产品说明书要求采用正确的掺入法,严格控制掺入量,并适当延长搅拌时间和加强养护。

②纤维混凝土具有抗裂性、韧性、延伸率、抗冲击力和抗渗能力均较高等特点,适用于桥面补强加固。纤维一般采用合成纤维和钢纤维,合成纤维应具备耐酸碱、高强度、变形能力大、低导热、抗老化和无吸水性和腐蚀性等特性,施工时不易结团,分散均匀,操作方便。钢纤维宜采用波形钢纤维,长径比在 60~80 之间,掺量控制在 0.5%~3% 为宜。

### 1.3.2 钢材

#### 1. 钢材的主要力学性能

钢材的力学性能通常是指钢材试件在标准试验条件下均匀拉伸、冷弯和冲击等单独作用下表现出的各种力学性能。

##### 1) 钢材在单向均匀受拉时的工作性能

钢材的拉伸试验通常是用规定形状和尺寸

标准试件,在常温(20±5)℃下以规定的应力或应变速度施加荷载进行的。钢材拉伸试验的力学性能可以用试件拉伸应力—应变关系曲线来说明,图 1-8 为低碳结构钢材拉伸试验的典型应力—应变曲线。在整个试验过程中,钢材的受力大致可分为以下四个阶段。

(1)弹性阶段:钢材拉伸试验的加、卸载过程中,对应于图 1-8 中  $a$  点称为比例极限,相应应力为弹性极限应力  $f_e$ 。当应力不超过  $f_e$  时,试件应力的增或减引起应变的增或减,在卸除荷载后试件的变形能完全恢复,没有残余变形,故  $oa$  阶段为弹性阶段。

(2)弹塑性阶段:当应力超过弹性极限应力  $f_e$ ,即  $\sigma > f_e$  以后,曲线进入图 1-8 中  $ab$  段,其间钢材不再是完全弹性,此时钢材的变形包括弹性和塑性变形两部分,其中塑性变形在卸除荷载后不能恢复,因此构件将留有残余变形。弹塑性阶段的变形增长率  $d\epsilon/d\sigma$  继续随应力  $\sigma$  的增加而加快。图 1-8 中  $b$  点对应应力称为屈服强度  $f_y$ 。

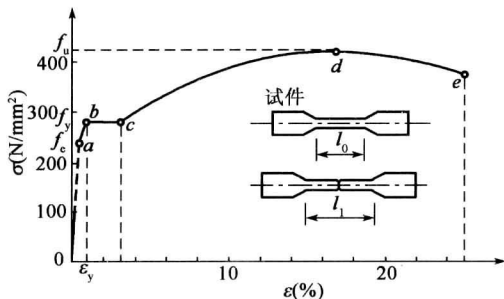


图 1-8 碳素结构钢(Q235 钢)拉伸的应力—应变曲线

(3)屈服阶段:当应力 $\sigma$ 达到屈服强度 $f_y$ 后,曲线进入图 1-8 中  $bc$  段,在此阶段,应力基本没有变化,但变形持续增长,应力—应变( $\sigma-\epsilon$ )曲线形成屈服平台。这时,应变急剧增长,而应力却在很小的范围内波动,这个阶段称为屈服阶段。对于碳含量较高的钢或高强度钢,通常没有明显的屈服平台,规定用其对应于残余应变 $\epsilon_y = 0.2\%$ 的应力 $\delta_{0.2}$ 作为该钢材的屈服强度。

(4)强化阶段:钢材经过屈服阶段较大的塑性变形以后,其内部组织因受力得到了调整,又部分恢复了承受增长荷载的能力。应力—应变( $\sigma-\epsilon$ )曲线又呈上升趋势,进入图 1-8 中的  $cd$  段,这个阶段称为钢材的强化阶段,变形增长率比弹性阶段和弹塑性阶段大得多,即其变形模量很低。试件对应于强化阶段最高点的应力就是钢材的抗拉强度 $f_u$ 。

(5)颈缩阶段:当钢材应力达到极限强度 $f_u$ 以后,在试件承载能力最弱的截面处,横截面急剧收缩,局部明显变细出现颈缩现象,曲线进入图 1-8 中  $de$  段。在这个阶段,试件的伸长量 $\Delta l$ 迅速增长,并且应力随之下降,最后在颈缩处断裂。

图 1-8 中,试件拉断后标距长度的伸长量 $\Delta l$ 与原标距长度 $l_0$ 的比值 $\delta$ (常用百分数表示)称为钢材拉伸的伸长率,即:

$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中: $l_1$ ——试件拉断后标距部分的长度。

钢材的抗拉强度 $f_u$ 是钢材抗拉断能力的极限。钢材屈服强度与极限抗拉强度之比 $f_y/f_u$ 称为屈强比,它是钢材设计强度储备的反映。 $f_y/f_u$ 越大,强度储备越小, $f_y/f_u$ 越小,强度储备越大。但钢材屈强比过小时其强度利用率低、不经济,因此在要求屈服强度的同时,还应要求钢材具有适当的抗拉强度。一般来讲,钢材的屈强比最好保持在 0.60~0.75 之间。

钢材在弹性阶段应力—应变呈线性正比例关系,其应变或变形很小,钢材具有持续承受荷载的能力。但在非弹性阶段,钢材屈服并暂时失去了继续承受更大荷载作用的能力,钢材应力达到屈服强度时结构将产生很大的塑性变形,故结构的正常使用得不到保证,因此,在设计时常常以屈服强度 $f_y$ 作为钢材应力的控制指标。

## 2) 塑性性能

钢筋除应具有足够的强度外,还应具有一定的塑性变形能力。钢筋的塑性性能通常用延伸率指标来衡量。

钢筋延伸率是指钢筋试件上标距为 $10d$ 或 $5d$ ( $d$ 为钢筋试件直径)范围内的极限伸长率,记为 $\delta_{10}$ 或 $\delta_5$ 。钢筋的延伸率越大,表明钢筋的塑性越好。

## 3) 钢材的冷弯性能

钢材的冷弯性能是衡量钢材在常温下弯曲加工产生塑性变形时对出现裂纹抵抗能力的一项指标。冷弯性能由冷弯试验来确定,试验时按规定的弯心直径在试验机上用冲头加压,使试件弯曲 $180^\circ$ 。如试件外表面不出现裂纹或分层现象,即为合格。钢材的冷弯试验不仅能直接检验钢材的弯曲变形能力,还能暴露出钢材的内部冶金和轧制缺陷,因此冷弯性能也是反映钢材在复杂应力状态下塑性变形能力和质量的一项综合指标。

## 4) 冲击韧性

钢材的冲击韧性是指钢材在冲击荷载作用下吸收机械能的一种能力,是衡量钢材抵抗可