



# 石拱桥加固改造技术

SHIGONGQIAOJIAGUGAIZAOJISHU

周建庭 刘思孟 李跃军 著



人民交通出版社

China Communications Press

Shigongqiao Jiagu Gaizao Jishu  
石拱桥加固改造技术

周建庭 刘思孟 李跃军 著



人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书采用理论结合实例的形式,详细叙述了石拱桥病害产生的机理,石拱桥安全性仿真技术,石拱桥主拱圈加固技术、上部结构加固技术、综合加固整治技术和石拱桥加固技术经济性与评价分析。本书实用性强,对我国众多石拱桥的改造加固可起到良好的指导作用。

本书可供从事石拱桥维修加固的工程技术人员借鉴参考,亦可供大中专院校桥梁专业师生学习使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

石拱桥加固改造技术/周建庭等著. —北京:人民交通出版社,2008.3

ISBN 978 - 7 - 114 - 07041 - 9

I .石… II .周… III .石桥:拱桥 - 修缮加固 - 研究  
IV .U448.225.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 038636 号

书 名:石拱桥加固改造技术

著 者:周建庭 刘思孟 李跃军

责任编辑:岑 瑜

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)85285838,85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京凯通印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:19.25

字 数:400千

版 次:2008年3月 第1版

印 次:2008年3月 第1次印刷

书 号:ISBN 978 - 7 - 114 - 07041 - 9

定 价:45.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

## 前言

在世界桥梁发展史特别是石拱桥发展史中,中国一直居于十分重要的地位。从公元605年修建的世界著名的石拱桥——赵州桥,到1972年四川丰都县(现属重庆市)修建的当时世界上最大跨径的石拱桥——丰都九溪沟大桥(跨径为116m);从1990年湖南省凤凰县修建的世界第一桥鸟巢河桥(主跨120m),到山西省修建的目前世界上最大跨径石拱桥——丹河大桥(主孔净跨径146m全空腹式变截面石板拱桥)。我国古代的能工巧匠和一代代桥梁工作者,用他们的智慧和力量,在不断的探索与不懈的奋斗中,使我国一次又一次走在世界石拱桥建设的最前沿,充分展示了我国石拱桥建设水平世界领先的风采。

作为中国传统优势桥型的石拱桥,遍布我国大江南北,在我国的交通建设与发展历史上发挥着极其重要的作用。然而,随着较长时间的使用,不少石拱桥受石料风化、超重车辆和自然灾害的破坏与影响,逐步变成了旧桥、病桥甚至危桥,已不能满足交通流量日益增长的需要。如果废掉这些旧危桥而重建新桥,不仅需要成倍增加投资,甚至耗费巨资,而且需要较长建设周期,直接影响交通,甚至要中断交通。因此,科学开发实用的石拱桥加固改造技术,并充分运用石拱桥加固技术加固改造旧危桥,具有十分重要的意义和广阔的发展前景。

近年来,国内外众多的桥梁科技工作者围绕石拱桥加固技术开展了深入的研究和积极的探索。本书对国内外石拱桥加固技术研究现状,石拱桥实用病害检测、评定及安全性仿真技术认真总结的基础上,重点结合本人近年来在石拱桥加固改造技术方面的研究成果,以及本人在四川、重庆、西藏等地对数十座石拱桥旧危桥成功加固改造的经验,详细介绍石拱桥旧危桥加固改造的加固机理、适用条件、设计施工技术、示范工程案例剖析(其中有些案例为以前修建桥梁,仍沿用旧荷载等级,望读者参照新规范荷载等级,对照阅读)等内容,以供从事桥梁加固设计、研究及管理的同仁们借鉴与参考。

本书共分十一章,各章既可独立成篇,各章之间又相互关联。全书由周建庭、刘思孟统稿。各章的编写人员分别为:第一章,周建庭、刘思孟、李跃军;第二章,周建庭、刘庆阳、殴益宏;第三章,周建庭、庞国栋;第四章,周建庭、刘思孟;第五章,周建庭、王鹏;第六至九章,周建庭、沈小俊、郝祎、刘思孟;第十章,何寿奎、谭兴丰;第十一章,周建庭、刘思孟。本书得到了桥梁加固专家王世槐老师的悉心指导,得到了重庆市重大科技攻关项目(CSTC2005AA6010)和交通部西部交通建设科技项目(200431878518、200731879253)的大力支持,得到了所有参编人员的密切配合,同时,借鉴参考了国内外有关专家学者的研究成果,在此,一并致谢!

由于本人水平所致,本书疏漏之处在所难免,诚望桥梁界同仁不吝赐教。

周建庭

二〇〇八年二月于重庆交通大学



# 目录

第一章 绪论	1
第一节 石拱桥加固技术研究的重要意义和迫切性	1
第二节 国内外加固技术研究现状	5
第三节 桥梁加固的准则与程序	8
第二章 石拱桥实用病害检测、评定及安全性仿真技术	13
第一节 石拱桥常见病害及成因	13
第二节 石拱桥现场检测技术	19
第三节 石拱桥安全性评定技术	29
第四节 石拱桥主拱圈安全性仿真技术	63
第三章 钢筋混凝土复合主拱圈加固实腹式石拱桥技术	70
第一节 钢筋混凝土复合主拱圈加固实腹式石拱桥技术机理	70
第二节 钢筋混凝土复合主拱圈加固实腹式石拱桥模型试验	76
第三节 钢筋混凝土复合主拱圈加固实腹式石拱桥设计理论与方法研究	94
第四节 钢筋混凝土复合主拱圈加固实腹式石拱桥构造要求与施工工艺	96
第五节 钢筋混凝土复合主拱圈加固实腹式石拱桥技术应用实例	99
第四章 钢筋混凝土套箍封闭主拱圈加固空腹式石拱桥技术	108
第一节 钢筋混凝土套箍封闭主拱圈加固空腹式石拱桥技术机理	108
第二节 钢筋混凝土套箍封闭主拱圈加固空腹式石拱桥模型试验	123
第三节 钢筋混凝土套箍封闭主拱圈加固空腹式石拱桥设计理论与计算方法	127
第四节 钢筋混凝土套箍封闭主拱圈加固空腹式石拱桥构造要求与施工工艺	128
第五节 钢筋混凝土套箍封闭主拱圈加固空腹式石拱桥技术应用实例	130
第五章 基于拱上恒载调整的石拱桥加固技术	137
第一节 基于拱上恒载调整的石拱桥加固技术机理	137
第二节 基于拱上恒载调整的桥梁加固改造潜力分析	141
第三节 基于全桥内力分析的拱上构造改造技术	149
第四节 基于拱上恒载调整的石拱桥加固技术施工工艺	152
第五节 基于拱上恒载调整的石拱桥加固技术应用实例	154
第六章 锚喷混凝土加固技术	161
第一节 锚喷混凝土加固技术机理分析、材料特点与性能	161
第二节 锚喷混凝土加固技术设计原则	164
第三节 锚喷混凝土加固技术模型试验	164

第四节	锚喷混凝土加固技术施工工艺	171
第五节	锚喷混凝土加固技术应用实例	173
<b>第七章</b>	<b>石拱桥上部结构其他加固技术</b>	177
第一节	桥梁裂缝灌浆加固技术	177
第二节	粘贴加固技术	180
第三节	体外预应力加固技术	186
第四节	改变结构体系加固技术	187
第五节	现有石拱桥加固技术的分析评析	190
<b>第八章</b>	<b>石拱桥下部结构加固技术</b>	194
第一节	旋喷注浆加固桥梁下部结构技术	194
第二节	其他石拱桥下部结构加固技术	224
<b>第九章</b>	<b>石拱桥综合加固整治技术</b>	226
第一节	石拱桥综合加固整治技术的适用范围、目的和意义	226
第二节	石拱桥加固整治技术综合应用方法	227
第三节	石拱桥综合加固整治技术的设计原则及程序	229
第四节	石拱桥综合加固整治技术应用实例	230
<b>第十章</b>	<b>石拱桥加固技术经济性与评价分析</b>	236
第一节	石拱桥加固的经济性分析	236
第二节	石拱桥使用性能综合评价方法与加固最佳时机的确定	244
第三节	石拱桥加固方案的技术经济比选与加固排序及优化	250
第四节	石拱桥加固的经济评价	262
第五节	石拱桥加固运营的经济后评价	279
<b>第十一章</b>	<b>桥梁加固后效果评价指标体系</b>	285
第一节	桥梁加固后效果评价研究现状及意义	285
第二节	桥梁加固后效果评价指标体系——强度评价指标	287
第三节	桥梁加固后效果评价指标体系——刚度评价指标	293
	<b>参考文献</b>	297

# 第一章

## 绪论

### 第一节 石拱桥加固技术研究的重要意义和迫切性

桥梁是公路的咽喉,安全、便捷、快速的公路交通运输系统是国民经济发展的命脉。自从 20 世纪 70 年代末以来,我国的交通建设一直面临新建任务繁重、旧桥加固改造任务紧迫的局面。在现已投入使用的众多桥梁中,由于各种原因,其使用状况令人担忧。纵观当今世界,主要发达国家公路交通建设都以现有桥梁的改造和重新利用为主。我国在以后的公路桥梁建设中,旧桥加固将占据越来越重要的地位。在我国现有桥梁中,石拱桥无论在绝对数量上还是在比例上,均排在前列,因此针对石拱桥提出新的加固理论、方法具有重大的意义。

#### 一、桥梁加固技术研究的重要意义

##### 1. 桥梁安全问题已成为社会关注的重大问题

桥梁一方面是公路的咽喉,其承载力更是沟通公路全线的关键,全国的 50 余万座公路桥梁是加快我国现代化建设步伐的希望之桥、幸福之桥。另一方面,桥梁这种跨江、跨海、跨深谷的特殊结构一旦发生安全事故,后果不堪设想。

仅 2007 年 1 年间,已经发生了多起震惊世界的桥梁悲剧,留下了沉痛的教训。2007 年 5 月 9 日中午 12 时 50 分许,江西上饶铅山县鹅湖镇十跨片石拱桥——傍罗大桥在一声轰隆声中倒塌,大桥瞬间只留下 9 个残破不堪的桥墩斜立在河中;2007 年 6 月 15 日晨,一艘大型运沙船撞向 325 国道上的九江大桥桥墩,造成九江大桥百多米桥跨坍塌(图 1-1),事故造成 4 辆汽车坠江,肇事船上 2 人受轻伤,另有 8 人死亡 1 人失踪;2007 年 8 月 1 日当地时间下午 6 时左右,美国明尼苏达州明尼阿波利斯市在交通高峰期 35 号州际公路一座公路大桥发生坍塌(图 1-2),约 50 辆汽车坠入河中,造成 13 人死亡、70 多人受伤;2007 年 8 月 13 日下午 4 时 40 分,位于湖南省湘西自治州、凤凰县至贵州铜仁地区大兴机场的二级公路堤溪段的沱江大桥发生坍塌事故(图 1-3),64 人死亡、22 人受伤;2007 年 9 月 1 日,巴基斯坦南部城市卡拉奇一座刚建成不久的桥梁坍塌,造成至



图 1-1 广东南海九江大桥被船撞断



少 6 人死亡、多人受伤,还有多辆汽车被压在桥底下,扭曲变形;2007 年 9 月 10 日晚间,印度南部安德拉省首府海得拉巴市区一座新建中的高架桥突然崩塌,压毁 15~20 辆汽车,约 30 人罹难,另有 20 多人受伤;2007 年 9 月 26 日上午 8 点,越南南部一座正在建设中的大桥突然坍塌,造成至少 52 人死亡、150 人受伤等。

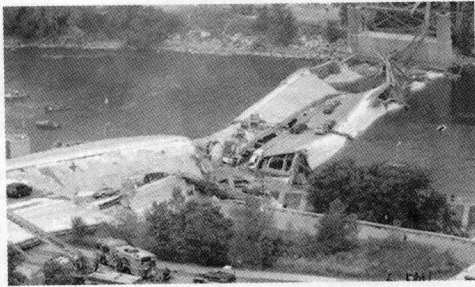


图 1-2 美国明尼苏达州明尼阿波利斯市 I-35W 密西西比河大桥



图 1-3 湖南省湘西自治州凤凰县堤溪沅江大桥“8·13”特别重大坍塌

沉痛的教训使人们认识到,桥梁的安全性不仅仅是建设期间的质量控制问题,更是全社会关注的重大问题。在交通建设中,既要实现公路桥梁的建设目标——安全、畅通、高效益和低成本,又要对建成的桥梁加强日常管理和养护,预防发生病害,使用期间及时根治缺陷,加固维修保养,保证其持续安全运营。确保桥梁结构在建设、投入使用、最终完成其使命的整个寿命期间,能够保证结构、运行荷载和人员的安全,以合理的经济成本维持自身较高的服务水平和通行能力,并满足持续增长的需要。

道路和桥梁的诸多问题和缺陷,不仅威胁公共安全,而且给国民经济造成巨大损失。根据美国国家运输调查组织 TRIP 的资料,由于道路拥挤,美国驾车人每年浪费的时间达 37 亿个小时,浪费的时间和燃料价值 630 亿美元。可见,在不中断交通的情况下通过桥梁加固,确保桥梁营运畅通,具有积极的现实意义。

## 2. 桥梁使用状况令人担忧

中国国家统计局 2002 年 2 月 6 日公布的《第二次全国公路普查主要数据公报》数据显示<sup>[1]</sup>:我国已建成的 278 809 座桥梁中有 9 597 座被定性为危桥,有 1/3 以上的桥梁存在结构性缺陷或不同程度的功能性失效隐患。广东省 2000 年普查结果表明:18 000 多座桥梁中有 4 000 多座承载力不足;河南省则在干线公路就有危桥 181 座等。

在美国,2006 年美国联邦公路局的统计报告显示,全美有大约 12% 的桥梁被鉴定存在“结构性缺陷”,其中有一些还是 20 世纪 90 年代初才建造的。已经运行了 50 年的美国国家公路系统,难以承担不断增加的交通量。根据美国公路和运输官员协会提供的数据,在 1955 年这个系统承载了 6 500 万辆小汽车和载货汽车。现在,这个系统承载车辆数目增加了近 3 倍,达到 2.46 亿辆。根据美国联邦政府的数据,美国大约 600 000 座重要桥梁的近 1/4,负担的交通量均超过了它们的设计值。美国全国长度超过 6m(20 英尺)(20×0.304 8m)的桥梁,有 24.5% 存在“结构上的缺陷”或“功能过时”问题(表 1-1)。

美国公路桥梁缺陷率(1950~1995)<sup>[3]</sup>

表 1-1

桥梁类别	总量(座)	缺陷桥梁数量(座)	缺陷率(%)
钢筋混凝土桥	91 886	6 027	6.6
预应力钢筋混凝土桥	88 304	3 212	3.3



续上表

桥梁类别	总量(座)	缺陷桥梁数量(座)	缺陷率(%)
钢桥	118 424	22 928	19.4
木桥	27 817	13 199	47.4
其他	1 309	211	16.3
合计	327 740	45 577	13.9

### 3. 旧危桥加固改造已成为世界各国的共同选择

面对数量众多、使用范围极广的旧危桥,拆除重建不仅投资巨大,而且在新建期间全社会为之付出的“综合”代价更加高昂。因此,各国都视旧桥为宝贵财富,力图通过修复予以利用。

美国为了使普通桥梁达到高速公路桥梁的标准,对大量的桥梁进行了加固改造。印度在近 20 年间,对国道上承载力较低的桥梁也普遍进行了加固,并对能够承受较高等级荷载的桥梁进行了加宽处理,以发挥更大的作用。

## 二、石拱桥在我国桥梁中的地位

拱式桥因其具有造型优美、取材方便、造价低廉、承载潜力大等优点,在我国特别是西南地区被广泛应用。据统计,拱桥在我国所有桥梁中的比例超过 60%,在西部地区更是高达 8 成。旧桥中拱桥的比例更大。因此,针对拱桥提出有效的加固技术、方法,对我国的旧桥加固工作具有特殊意义。在为数众多的拱桥中,以石拱桥为主的圬工拱桥又占了绝对多数,表 1-2 为重庆市省道、县道和乡道桥梁统计数据。

重庆市省道、县道和乡道桥梁统计数据(单位:座)

表 1-2

桥型	道路性质	一类	二类	三类	四类	五类	合计
石拱桥	县道	3	53	73	28	6	163
	乡道		22	37	17	3	79
	省道(丰都)		5	1	2		8
	总计	3	80	111	47	9	250
双曲拱桥	县道		2	1	3		6
	乡道			1	1		2
	总计		2	2	4		8
箱形板拱桥	县道		1				1
	总计		1				1
箱形肋拱桥	县道		1				1
	总计		1				1
钢筋混凝土筒支板桥	县道				1		1
	乡道			1			1
	总计			1	1		2
I形梁桥	县道			1			1
	总计			1			1

续上表

桥型	道路性质	一类	二类	三类	四类	五类	合计
T形梁桥	县道			1	1	1	3
	乡道			1			1
	总计			2	1	1	4
钢筋混凝土板拱桥	乡道			1			1
	总计			1			1
合计		3	84	118	53	10	268

因此,对拱桥特别是石拱桥的加固、增强方法进行系统深入的理论研究与技术开发,无疑有着重大的经济和社会效益,对促进我国公路建设、支持国民经济发展,尤其是广大县乡地方的发展具有重大的战略意义。

### 三、我国在世界石拱桥建设史上的辉煌成就

在漫长的世界石拱桥发展史上,中国一直占据重要的地位。我国古代无数的能工巧匠和当今众多不懈奋斗的桥梁工作者,共同把中国的石拱桥建设水平推向了一个又一个高峰,使得我国在这一领域一次又一次走在世界最前沿。

世界著名的石拱桥——赵州桥(图 1-4),修建于公元 605 年左右,到现在已经 1 500 多年了,是建成后一直使用到现在的最古老的石桥。赵州桥主拱净跨 37.02m,矢高 7.23m;主拱上左右各叠有两个腹拱,净跨分别为 2.8m 和 3.8m。西方达到这样程度的扁圆弧拱和主拱上设置腹拱的拱桥是在 700 多年后的 14 世纪。即使以今天的结构理论来看,赵州桥的设计完全合乎科学原理,施工技术更是巧妙绝伦。赵州桥的技术在单孔石拱桥方面达到了当时难以超越的高度,其高超的技术水平和不朽的艺术价值充分显示了我国劳动人民的智慧和力量。

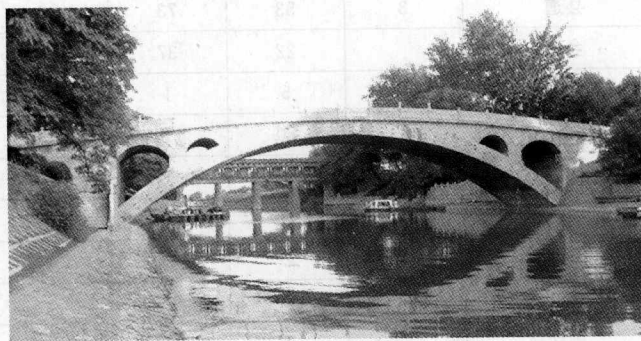


图 1-4 赵州桥全貌

1972 年,我国在四川省丰都县(现属重庆市)九溪沟,建成当时世界上最大跨径的石拱桥——丰都九溪沟桥(图 1-5)。该桥跨径为 116m,保持记录 18 年之久后,其世界第一的位置被 1990 年建成通车的湖南省凤凰县鸟巢河桥所取代(主跨 120m)。

当今世界上最大跨径的石拱桥——丹河大桥(图 1-6),位于山西省晋城市太行山西麓,该桥为主孔净跨 146m 全空腹式变截面石板拱桥。大桥主孔净跨 146m、净矢高 32.444m,桥面宽度 24.8m、桥梁高度 80.6m,其跨径组成为  $2 \times 30\text{m} + 146\text{m} + 5 \times 30\text{m}$ ,桥梁全长 413.7m,于 2000 年 7 月建成。

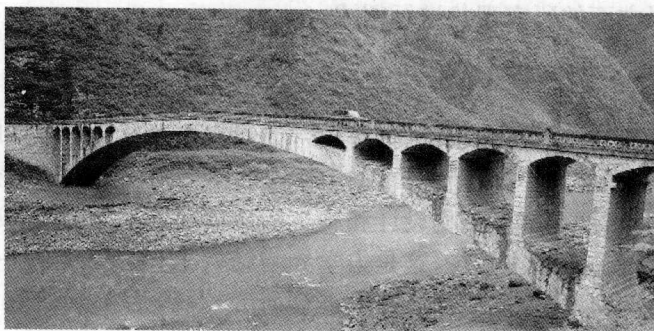


图 1-5 丰都九溪沟桥全貌



图 1-6 丹河大桥全貌

丹河大桥解决了许多关键技术问题,完成了原材料试验及砌体力学性能试验、1:10 模型试验、实桥静动载试验以及大跨度分步施工石拱桥的设计分析方法对比研究、仿真技术与施工控制技术等多项研究,填补了国内高强度等级小石子混凝土砌体物理力学性能指标的空白;首次发现了分步施工石拱桥脚高应力区,找到了理想的拱上轻质填料,掌握了大跨径分步施工石拱桥的仿真技术与施工控制方法,补充了有关规范内容,为大跨径石拱桥的设计与施工控制以及安全性评价提供了可靠的科学参数与技术保障。

丹河大桥的建设,继承和发扬了石拱桥这一中国传统的优势桥型,在桥梁跨径与建设速度等方面取得了较大突破,通过采用现代桥梁科研手段与设计、施工技术,大大丰富了中国石拱桥的科技内涵,提高了石拱桥的建设水平,为大跨度石拱桥的设计与施工树立了又一个典范。丹河大桥的建设,标志着我国石拱桥建设水平世界领先的风采。

抚今追昔,我国在石拱桥为代表的拱桥建造上谱写了一系列精彩的篇章,取得了巨大的成绩。在更具挑战性的圯工拱桥加固技术领域,中国理应占具一席之地。

## 第二节 国内外加固技术研究现状

桥梁加固改造是当代土木工程最重要的课题之一。当前,国内外在旧桥加固研究领域,对桥梁加固理论的研究深度与广度都有待加强,与旧桥加固相关的众多基本问题尚待深入研究;开发的加固技术较多,但各自对加固机理的认识亟待提高;推出的新材料不少,但是有效利用的方法以及加固的实际效果有待大量工程实践进行检验。关于目前国内外普遍采用的石拱桥加固技术在本书第七章和第八章中作简要介绍。以下就目前国内外在桥梁加固理论研究、加



固技术开发和新材料方面的研究现状进行阐述。

## 一、旧桥加固理论研究现状

目前国内外对桥梁加固方法与技术研究较多,而对理论基础的研究却相对较少。工程界的有识之士曾指出<sup>[4]</sup>:当前力学工作者与结构工作者的精力主要集中于研究结构分析、设计和施工的理论和方法(其目的是提高结构设计和施工的质量),而对于结构系统的方案论证以及服役后的评估和维修理论则研究较少,这是力学界与结构工程界研究的一个薄弱环节。可以预见,从基本理论角度对既有桥梁加固技术进行研究,是今后桥梁研究工作中的一个重要方向。

结构经加固或改造之后,其力学性能发生较大的变化。首先,加固、改造前原有结构已具有一定的应力和应变,在后期受荷载时构件新加部分的应力、应变一般低于原有结构,它对结构的力学性能有较大影响。其次,结构的新、旧部分不是一次形成的,两者共同受荷时存在着协调变形、协同工作问题,这对加固后的结构力学行为也有很大的影响。第三,不恰当的加固、改造方案可能对原结构产生负面的效应,如增大基底应力,改变结构质量或刚度分布等。这些决定了结构的加固、改造有着不同的作用机理和结构特征,并不能完全套用现有的新建结构的分析理论和设计方法。

早在国际预应力混凝土协会(FIP)第九次大会上,国际著名桥梁专家莱昂哈特教授就专门作过“防止桥梁损伤事故的报告”。国际经济发展与合作组织(OECD)各成员国对既有桥梁的检测与评估投入了大量的人力物力,并在以下有关课题中展开了密切合作<sup>[5]</sup>:

(1)使用荷载作用下既有桥梁的实际受力行为,包括研究、调查与试验等。

(2)有关实际荷载的大小、分布和频率等有关的数据。

(3)评定既有桥梁工作状态的各种实用技术。

(4)交通运输对既有桥梁的影响。

(5)实用桥梁评定系统。

(6)既有桥梁的损伤评估。

(7)既有桥梁的剩余寿命的评估。

OECD认为今后要特别加以研究的内容有如下9大方向:

(1)应继续研究实桥的荷载历程,包括:确定荷载、由荷载产生的应力和应力的进一步发展。

(2)应继续研究主要工程材料的裂缝发展性能(包括疲劳与破坏性能),应继续研究大量的小应力幅对钢、钢筋混凝土和预应力混凝土构件的初裂和裂缝发展的影响。

(3)进一步确定环境对结构的影响。

(4)继续研究确定桥梁承载力的较好方法。

(5)继续研究评定桥梁的状态与性能的理论。

(6)分析结构破坏原因,促进国际间的学术交流。

(7)研究与鉴定良好的桥梁的性能。

(8)确定下部结构的承载能力。

(9)有目的地进行荷载试验及破坏试验。

上述世界性课题,虽经工程界的科学工作者多年努力但仍未彻底研究清楚。

就混凝土加固工程实践成果和经验总结而论,日本在混凝土结构裂缝修补技术方面,较为



系统全面,编制了《混凝土裂缝调查及补强加固技术规程》;前苏联在工业厂房加固设计构造方面积累了较为丰富的经验,出版有结构加固构造图集;英国、德国在混凝土结构缺陷修补、防水及防腐处理技术方面,也取得不少成果;我国近十几年来,进行了大量工程实践,编有《混凝土结构加固技术规范》(CECS25:90),针对各种不同的桥梁形式提出了很多完善的加固与增强综合整治成套技术。

就石拱桥加固增强理论而言,国内外就此展开的理论研究很少,极少见于报告和文献。

## 二、加固技术研究现状

目前,国内外应用较广泛的上部结构加固技术有:增大截面加固法(包括增加配筋)、锚喷混凝土加固法、粘贴加固法、改变结构受力体系加固法、体外预应力加固法、增加辅助构件法、钢筋混凝土套箍封闭主拱圈加固技术等;下部结构加固技术有:扩大基础加固法、增补桩基加固法、钢筋混凝土套箍加固法等(上述方法详见本书第七章与第八章)。

上述加固方法与技术各有优点和不足,都已在世界范围内广泛应用,并取得了一定的经济、社会效益。在现有加固技术的基础上,经过土木工程界的学者、同仁多年努力,一大批新型加固技术不断涌现。

### 1. 聚合物浸渍混凝土加固技术<sup>[6]</sup>

聚合物浸渍混凝土是指以普通混凝土为基材,以有机单体为浸渍液渗入混凝土内部,并且聚合而成的一种有机—无机复合材料。聚合物浸渍混凝土与混凝土基材的性能试验对比结果表明:聚合物浸渍混凝土对混凝土基材的性能改善是显著的,强度可提高数倍,抗渗性及耐化学腐蚀性也有大幅度提高。由于有机单体渗入混凝土内部,并且聚合后基本填满了混凝土原有的空隙,极大地改善了混凝土的微观力学结构。因此,浸渍混凝土能够显著地提高原混凝土基材的力学性能。

聚合物浸渍混凝土加固技术是一项纯粹的化学加固技术,具有如下特点:

- (1)施工过程完全不损伤原混凝土构件,不削弱原构件承载力,安全可靠。
- (2)加固材料渗入混凝土内部,不存在应力滞后问题。
- (3)不影响原构件外形尺寸。

由于其主要用于提高混凝土强度及耐久性,因此适用于配筋无误,但混凝土质量达不到要求的混凝土构件。聚合物浸渍混凝土自1965年问世以来,世界各主要工业国均对此进行了大量研究。1986年,冶金工业部建筑研究总院首次将“负压常温聚合物浸渍工艺”成功应用于昆山市陆杨邮电支局营业大楼二层主楼加固。

### 2. 高性能复合砂浆钢筋网(HPF)加固技术<sup>[7]</sup>

复合砂浆钢筋网加固法是在混凝土构件表面绑扎钢筋网,用复合砂浆作为保护和锚固材料,使其与原构件共同工作,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,从而提高结构构件的刚度、抗拉、抗压、抗弯和抗剪等方面性能的方法。它类似于加大截面加固法,但增加的截面不大,因而结构外观及净空影响不大。该方法工艺简单,适用于梁、板、柱、墙等混凝土结构的加固。根据构件的受力特点和加固要求不同,可选用单侧加厚、双侧加厚、三面和四面外包等。

### 3. 绕丝加固法<sup>[6]</sup>

根据混凝土三向受压可以提高其单轴抗压强度的原理,对于受压柱用 $\phi 4$ 退火钢丝横向缠

绕构件,以提高其强度。根据梁的受剪区斜向箍筋受力优于竖向箍筋的道理,可根据需要在梁外进行斜向绕筋或竖向绕筋,以提高其抗剪强度。一般地说,采用 $\phi 4$ 冷拔钢丝退火后进行绕丝,中距为 $5\sim 40\text{mm}$ 。试验证明,这一方法不仅对圆柱、方柱有效,对长方形柱亦有效。为了提高效果可在长方形4个面的中点纵向设置 $\phi 25$ 圆钢,并将四角凿去少许。同济大学加固研究所的试验表明,用绕线加固的梁如果不用钢楔楔紧混凝土,则难以与绕丝共同工作,直到加载后期钢丝方才发挥作用,但仍表现出良好的延性。在受压时,钢丝主要超约束作用。

### 三、加固用新型材料研究现状

国内外桥梁加固中采用的材料多为传统常用工程材料,如混凝土、普通钢筋和预应力筋;但随着大量新技术的诞生,很多新型材料在桥梁加固工程中得到广泛应用。

#### 1. 加固用高性能混凝土(HPC)<sup>[8]</sup>

早在1986年,挪威学者首先开始高性能混凝土的研究,继而西方发达国家投入大量财力、人力致力于高性能混凝土的研究和开发。我国在20世纪90年代初也引进了高性能混凝土这个概念,掀起了研究的热潮。国内外的学者和工程技术人员经过10多年的努力,在高性能混凝土研究上取得了一定的进展,其中,自密实混凝土和绿色高性能混凝土是现在研究的重点方向。由于加固工程所需要的是高强、轻质、耐久及绿色等特性混凝土的趋势,高性能混凝土的研究及其成果将会在旧桥加固领域得到进一步深入和广泛的应用。

#### 2. 纤维及其制品(FRP)增强材料<sup>[9]</sup>

FRP在土木工程中的应用大致始于20世纪60年代,最初主要是将其制成筋材,以实现在腐蚀环境下代替普通钢筋或预应力钢筋。FRP在土木工程中的大规模应用始于20世纪80年代,尤其是在经历了洛杉矶(1994)和阪神(1995)等几次大地震后,不少国家都对既有建筑结构和桥梁结构的修复和抗震加固提出新的要求,而FRP能很好地满足这方面的需要。随着FRP约束混凝土在实际工程中应用的日趋广泛,有关其力学性能的研究也不断深入,其中的热点问题除应力—应变关系研究外,还包括构件的承载力、徐变性能、抗震性能、抗火性能以及火灾后的构件修复加固研究等。

近年来,在中、美、日等国利用FRP对桥梁柱进行修复加固已经得到了较为普遍的应用。其方法主要有3种:直接粘贴预制好的板壳、现场绕丝后用树脂浸渍及粘贴FRP布。如美国在Sacramento西部Yolo高架桥中3000多根柱都采用了GFRP的预制护套加固,加固时安装了无损监测仪以监测这种外面粘了护套的组合柱体系工作性能,结果证明这种组合柱的工作性能良好。

在众多的纤维加固材料中,碳纤维布以其优越的材料性能、简单快速的施工特点在桥梁加固中被广泛采用。采用粘贴碳纤维布加固结构技术,在国内外的试验研究和工程应用已相当广泛,但相对于传统的加固方法研究和应用历史较短,在许多方面还存在空白,需深入研究。

## 第三节 桥梁加固的准则与程序

### 一、加固增强结构的二次受力特性

加固结构属于二次受力结构。加固前原结构已有荷载作用(即第一次受力),内部存在一

定的应力和形变;而加固一般是在未卸载或未完全卸载的条件下进行,新加的加固(增强)部分(以下简称加固层)在自身强度形成之后,才开始参与承担后来的新增荷载,如活载。因此,加固层的应力和应变均滞后于原结构;在极限状态下,原结构应力早于加固层达到材料的极限强度,也更快地破坏。

由于加固增强结构的二次受力特性,原结构在加固前应力水平很高、变形很大的情况下,很有可能在加固施工完成后所有荷载作用下,加固层应力和应变始终处于一个较低的水平,材料强度不能充分发挥,加固后既不经济,效果也不好;如加固层自重较大,消耗了桥梁原本已剩不多的承载潜力,则加固后的原结构可能处于一种比加固前更不利的状态,从而威胁加固后桥梁使用的安全。因此在设计过程中,加固层材料选择、尺寸拟定等基本问题都需系统分析、通盘考虑,以使桥梁加固增强符合技术先进、安全可靠、耐久适用、经济合理的设计原则。

## 二、加固后桥梁承载能力的计算方法

当前,对于加固后桥梁结构的承载能力的计算方法取用问题,工程界存在分歧。结构设计理论发展至今已经历了若干个阶段,形成并提出了多种设计、计算方法,主要有:以力学为基础的容许应力法和以概率理论为基础的极限状态设计方法。伴随着设计理论和方法的发展,我国的桥梁设计规范也一直在逐步发展和完善之中,从以容许应力法为准的《公路桥涵设计规范(试行)》(1975年版),至采用极限状态设计的《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—85)和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)等,到以概率理论为基础的《公路桥涵设计通用规范》(JTJ D60—2004)和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ D62—2004)等。

容许应力法是以弹性理论为基础,考虑结构具有一定的安全储备和富余量而提出的一套包含一定经验性的定值设计方法。容许应力法与后来发展起来的极限状态法相比,具有清晰、明确的物理和力学模型,概念清楚,能够充分反映因结构施工或受力体系的不断变化而产生的应力分布的改变;通过逐步的应力叠加过程,得到结构上任一点的应力值及其方向。但是,该设计方法所采用容许应力值是材料的极限强度除以一个指定的安全系数而得的数据,即一个经验和人为确定的数值,没有牢固的理论支撑和基础;材料容许应力的取值,不能将不同施工人员、施工技术等方面的差异反映出来,显得过于“一刀切”;安全系数的引入虽被赋予结构安全储备的意义,但实际运用中却又难以达到这一目的。

极限状态法是一种以概率理论为基础的结构设计方法,它将材料性能和参数、结构构件的受力模式等因素运用数理统计方法进行处理,使得它们与实际状态下各种构件状况的随机差异相对应,采用这种方法设计而得的结构具有较高的保证率。极限状态法的优点在于:它考虑了材料特性、施工质量等的随机性,对结构的计算图式进行了一定的简化;用它设计的结构具有较高的保证率,同时又较经济,在安全和经济之间找到了较好的平衡;极限状态设计法弥补了容许应力法的不足。该法的缺点为:对于诸如加固构件等存在应力(应变)分布逐步叠加、截面特性逐渐变化的结构,不能计算结构二次受力条件下的承载力。

当前,加固结构承载力计算有的采用容许应力法,有的则采用极限状态法。对于加固结构构件,两法各有优缺点。容许应力法考虑施工过程、二次受力特性十分方便,不足在于安全系数、材料容许应力限值等不科学、基础不牢固。极限状态法计算过程简单,设计的构件既安全又经济,考虑了结构、材料和人的随机性影响,不足在于不能考虑加固后结构的二次受力特性。



### 三、旧危桥梁加固设计准则

以下从应力和极限承载力的角度阐述桥梁加固的三项准则。

#### 1. 恒载应力准则

桥梁加固前,在自身恒载作用下拱圈边缘的恒载应力应该满足强度要求;否则,桥梁属于危桥,只能废弃,无法通过加固措施使之重新利用,即:

$$\sigma_{\text{恒}} < \sigma_{\text{L}} \quad (1-1)$$

式中: $\sigma_{\text{恒}}$ ——加固前后,桥梁在恒载作用下主拱圈边缘应力;

$\sigma_{\text{L}}$ ——主拱圈边缘应力限值。

恒载应力准则是桥梁加固的首要基本准则,只有在满足该准则的前提下,方可进行后续加固工作。

#### 2. 组合应力准则

在各种最不利荷载组合作用下,原主拱圈边缘应力必须满足强度要求。桥梁加固的精髓在于使复合拱圈能够协调变形,共同承担活载作用。一般而言,新增的加固层往往采用强度和弹性模量较高的材料;而原主拱圈由于已营运多年,材料强度有不同程度的削减,桥梁的整体性降低。因此,桥梁加固中控制应力通常出现在复合拱圈中的原拱圈上下边缘。具体地说,桥梁加固后,在最不利荷载作用下,原主拱圈边缘应力必须满足强度要求,即:

$$\sigma_{\text{组}} < \sigma_{\text{L}} \quad (1-2)$$

式中: $\sigma_{\text{组}}$ ——组合荷载作用下,原主拱圈边缘应力;

$\sigma_{\text{L}}$ ——原主拱圈应力限值。

组合应力准则是桥梁加固中尺寸拟定的控制准则,只有在满足该准则的前提下,方可进行后续工作。

#### 3. 性能准则

在最不利荷载组合作用下,加固后桥梁强度、刚度和稳定性均要满足现行规范要求。桥梁加固在满足前两准则的前提下,性能准则体现了桥梁各项技术参数和使用性能的提高幅度;桥梁加固效果是否显著,以该准则为依据。

桥梁加固是一项严密的系统工程,整个桥梁加固准则执行程序如图 1-7 所示。

### 四、桥梁加固工作程序

桥梁加固是一项严密的系统工程,主要内容有:现场调查与资料收集、桥梁结构检查、加固前承载能力评定、加固增强设计、加固施工和竣工验收;对于某些工程还包括加固后的荷载试验等加固后效果评价。

#### 1. 现场调查与资料收集

调查和掌握桥梁的基本资料与实际状况,是判断桥梁状态、进行后续各项工作的重要前提。资料收集,包括目前桥梁概况、养护与维修记录、设计文件、施工记录及竣工资料;现场调查主要内容有交通量和通行荷载及其发展趋势、环境因素等。

#### 2. 桥梁结构检查

桥梁结构检查,首先应对桥梁的主要构造尺寸进行必要的复核(如果原桥的设计图或竣工



图等资料缺失,则应对全桥各部分尺寸进行测量);其次,应对桥梁的材质状况进行测定,确定材料的实际强度等力学性能及相关参数;最后,应对全桥病害进行全面、细致的调查并深入分析。原桥基本数据与病害数据的收集完备与否直接影响整个加固工程成败与加固效果。

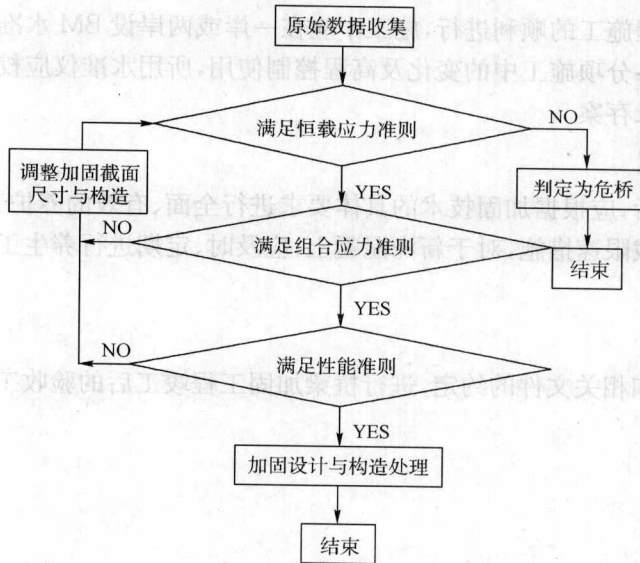


图 1-7 桥梁加固准则执行程序框图

### 3. 加固前承载能力评定

在收集到的所有资料的基础上,对桥梁使用状况及承载能力进行综合评价,鉴定桥梁是否具有良好的工作性能和承载能力,是对桥梁作出维修、加固改造计算的重要依据。

桥梁的评定工作方法很多,大致归纳为:

- (1)外观检查对照规范进行评定。
- (2)以理论计算分析计算为主进行评定。
- (3)荷载试验评定。
- (4)专家系统的评定。
- (5)桥梁的可靠性分析评定。

在上述桥梁评定方法中,对于荷载试验方法在危桥承载能力评定的运用,笔者认为应慎重考虑,理由有二:

(1)对于危桥,由于桥梁本身的状况比较差、病害较多且重;另一方面,众所周知,桥梁荷载试验是结构整个寿命中荷载强度最大的时刻之一(甚至是唯一的经历),在试验荷载作用下原有的病害必然会发展、桥梁的状况必然恶化,这对桥梁的安全性本身就是一种挑战,且其对后续加固的影响也巨大。

(2)加固前的试验荷载等级难以确定,因对于“病害缠身”的危桥如以原设计荷载进行加载结构能否承受?如低于原设计荷载等级进行加载其意义有多大?

### 4. 加固增强设计

在桥梁病害及分析与承载能力评定的基础上,有针对性地进行加固增强设计,遵循技术先进、安全可靠、适用耐久和经济合理的原则。