

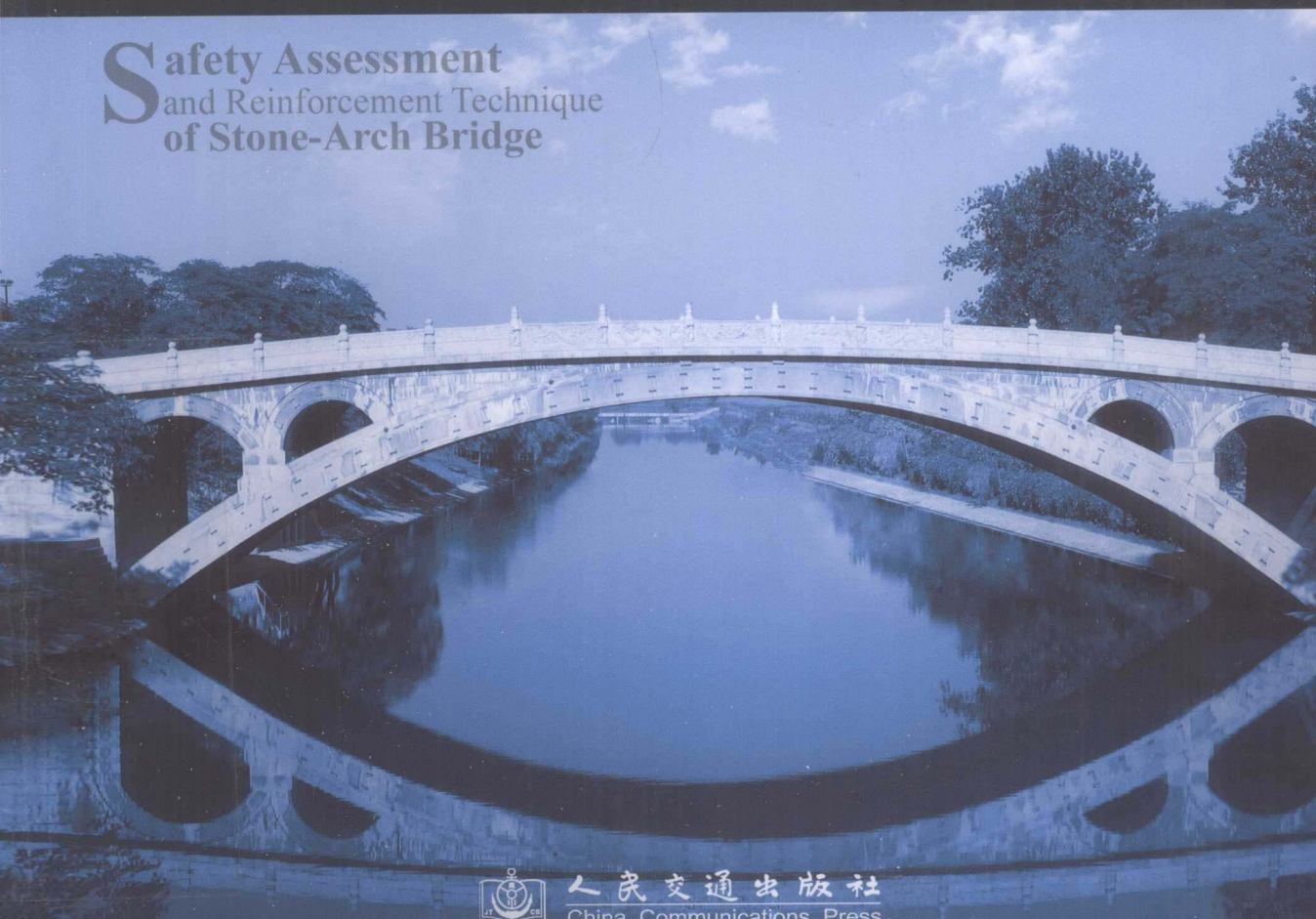


桥梁检测与加固技术丛书

石拱桥安全评估与 加固改造技术

胡柏学 周建庭 徐海燕 等 著

Safety Assessment
and Reinforcement Technique
of Stone-Arch Bridge



人民交通出版社
China Communications Press

桥梁检测与维修加固技术丛书

石拱桥安全评估与加固改造技术

Safety Assessment and Reinforcement Technique of Stone-Arch Bridge

胡柏学 周建庭 徐海燕 等 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书在认真总结国内外石拱桥安全评估与加固技术研究的基础上,以交通部西部交通建设科技项目“服役石拱桥安全评估与加固改造技术研究”为背景,对湖南、重庆、四川等地 600 余座石拱桥病害进行了系统的分析研究,并给出问题严重桥梁的加固改造实例。本书主要包括:石拱桥结构材料试验,石拱桥计算理论,石拱桥健康状态综合评估,石拱桥加固改造技术,石拱桥加固改造效果评价指标,石拱桥加固维修决策等。

本书可供从事桥梁加固的专业技术人员使用,也可供从事桥梁设计、施工及科研的技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

石拱桥安全评估与加固改造技术 / 胡柏学等著. --

北京:人民交通出版社, 2012.6

ISBN 978-7-114-09643-3

I. ①石… II. ①胡… III. ①石拱桥—安全评价—研究②石拱桥—修缮加固—研究 IV. ①U448.225.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 018615 号

桥梁检测与维修加固技术丛书

书 名:石拱桥安全评估与加固改造技术

著 作 者:胡柏学 周建庭 徐海燕 等

责任编辑:王文华(wwh@ccpress.com.cn)

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.ccpress.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:14.25

字 数:330千

版 次:2012年6月 第1版

印 次:2012年6月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09643-3

定 价:35.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



石拱桥是我国历史悠久的桥梁结构形式,举世闻名的赵州桥已有一千多年的历史。它在我国经济发展过程中已发挥了重要的作用。在交通运输飞速发展的今天,它仍然起着重要的作用。然而,公路交通量增加和车辆轴重提高及日趋复杂的运营环境对正在服役的石拱桥提出了更高的要求,其安全问题受到了前所未有的关注。作为一种独特的桥梁结构,石拱桥的力学、耐久性能与钢筋混凝土和钢结构桥梁有较大差异。因此针对石拱桥的耐久性与安全性评估,以及维修加固方法开展系统的研究,建立完善的石拱桥评估方法及加固技术,是一项具有重要理论价值和现实意义的工作。

本书的作者长期从事桥梁安全性评估方面的科学研究与实践工作,尤其是针对石拱桥的安全性维护开展了系统而有成效的研究探索和应用。这本著作是其多年研究成果的总结,林林总总三十多万字,涵盖了石拱桥安全维护的各个方面:第一章对石拱桥的典型病害及安全性问题进行了总结和提炼;第二章以鸟巢河大桥为背景介绍了石拱桥结构材料性能的研究成果;第三章基于平铰拱、连拱理论和拱上建筑联合作用提出了更为完善实用的石拱桥计算理论,为石拱桥的安全评估和维修加固设计提供了系统的力学理论基础;第四章介绍了作者在石拱桥健康状态评估方法及应用方向的成果;第五章总结了现有的石拱桥维修加固技术并详细介绍了各项加固方法的技术原理、适用范围与工艺细节;第六、七章分别提出了石拱桥加固后的性能评价指标,以及石拱桥维修加固决策方法,对于石拱桥维修加固设计具有很好的指导意义。

基于平铰拱理论分析调整全桥内力的加固改造技术,跳出了传统通过加固构件来提高结构性能的方法,提供了一种从整体结构入手系统分析结构性能的新思路,具有创新性。平铰拱理论科学地反映了石拱桥不能承受拉应力的特点。其计算出的拱圈弯矩介于无铰拱和两铰拱之间,通过强度验算,许多石拱桥在提高运营荷载等级之后不需加固,这无疑为国家节约了大量的资金。平铰拱理论应用范围较广,像双曲拱桥、砖石圬工拱桥均可用平铰拱理论进行内力分析。

总体来说,这本著作具有较高的学术水平和应用价值,特别值得一提的是,作者非常注重理论与实践相结合,书中有许多应用研究成果的工程实例,也成为本书的一个重要特色和亮点。这本著作的出版将弥补过去我国公路交通行业在石拱桥安全维护技术专著方面的缺陷,相信可为广大桥梁工作者提供很好的参考和借鉴。

張建仁

2012年4月18日



我国交通基础设施建设如火如荼之际,合理利用和改造现有道路桥梁可加速解决交通发展的瓶颈。我国的石拱桥建设在世界一直处于领先地位。从公元 605 年修建的世界著名的石拱桥——赵州桥(跨径 37.37m),到 1958 年湖南修建的黄虎港桥(跨径 60m)、1972 年四川丰都县(现属重庆市)修建的丰都九溪沟大桥(跨径 116m),从 1990 年湖南省凤凰县修建的鸟巢河桥(主跨 120m),再到山西省在高速公路上修建的丹河新桥(跨径 146m),建设技术水平和桥跨均为当时世界领先水平,这充分展示了我国先辈能工巧匠和一代代桥梁工作者的智慧,他们不断探索与不懈奋斗,使我国石拱桥建设走在了世界的最前沿。

作为中国传统优势桥型的石拱桥,遍布我国大江南北,在我国交通建设与经济发展的历史上发挥着极其重要的作用。然而,随着时间的推移,这些石拱桥受石料风化、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,不仅需要成倍地增加投资,而且需要较长的建设周期,直接影响交通,甚至中断交通。因此,采用科学的方法对现役石拱桥安全评价和合理加固利用,具有十分重要的意义和广阔的应用前景。

近年来,不少的桥梁科技工作者围绕石拱桥承载力分析与安全评估、加固改造技术开展了深入的研究和积极的探索。作者在认真总结国内外石拱桥安全评估与加固技术研究的基础上,以交通部西部交通建设科技项目“服役石拱桥安全评估与加固改造技术研究”(项目编号 200431878518、200731879253)为背景,对湖南、重庆、四川等地 600 余座石拱桥病害进行了系统的分析研究,并用研究取得的成果对问题严重的桥梁进行了加固改造,取得了一些经验,均记述在本书中,以供同行学者们借鉴与参考。

本书共分 7 章,各章既可独立成篇,又相互关联。全书由胡柏学、罗阳青统稿。各章的编写人员分别为:第 1 章,胡柏学、罗阳青、谢海秋;第 2 章,徐海燕、胡柏学;第 3 章,胡柏学、周辉;第 4 章,胡柏学、李蓉、曾威、彭晖;第 5 章,周建庭、胡柏学、王磊;第 6、7 章,周建庭、胡柏学、刘思孟。本书得到了桥梁专家上官兴老师、长沙理工大学张建仁教授的悉心指导,在此,一并表示感谢!

由于本人水平有限,本书疏漏之处,诚望读者批评指正。

胡柏学

2011 年 2 月于长沙



第1章 绪论	1
1.1 中国石拱桥发展概述	1
1.2 石拱桥安全性问题	6
1.3 石拱桥典型病害与成因	10
本章参考文献	18
第2章 石拱桥结构材料试验	20
2.1 工程背景概况	20
2.2 试验岩样制作	20
2.3 岩石力学试验	22
2.4 砌缝力学特性试验	34
2.5 本章小结	40
本章参考文献	42
第3章 石拱桥计算理论	43
3.1 悬索线无铰拱理论	43
3.2 平铰拱理论	56
3.3 石拱桥拱上建筑联合作用	64
3.4 本章小结	71
本章参考文献	72
第4章 石拱桥健康状态综合评估	74
4.1 桥梁健康评估的重要性及现状	74
4.2 桥梁健康状态综合评估的层次分析法	77
4.3 基于层次分析法的桥梁健康状态模糊综合评估	86
4.4 工程实例——乌巢河大桥健康状态评估	95
4.5 本章小结	100
本章参考文献	100
第5章 石拱桥加固改造技术	104
5.1 钢筋混凝土套箍封闭主拱圈加固石拱桥技术	105
5.2 石拱桥增设复合钢筋混凝土拱板(肋)加固技术	119
5.3 基于平铰拱理论调整全桥内力的加固改造技术	127
5.4 锚喷混凝土加固技术	137
5.5 灌浆加固技术	141

5.6 粘贴加固技术	142
5.7 体外预应力加固技术	145
5.8 石拱桥综合加固整治技术	147
5.9 施工质量检验与控制技术	149
5.10 本章小结	155
本章参考文献	155
第6章 石拱桥加固改造效果评价指标	157
6.1 强度评价指标	157
6.2 刚度评价指标	166
6.3 本章小结	170
本章参考文献	170
第7章 石拱桥加固维修决策	171
7.1 石拱桥加固的经济性分析	171
7.2 石拱桥使用性能综合评价方法与加固最佳时机的确定	179
7.3 石拱桥加固方案的技术经济比选与加固排序及优化	184
7.4 石拱桥加固的经济评价	197
7.5 石拱桥加固运营后经济评价	212
7.6 本章小结	218
本章参考文献	219

第 1 章 绪 论

1.1 中国石拱桥发展概述

石拱桥是我国传统的桥梁基本形式之一。石拱桥这一体系,又是多种多样的。几千年来,石拱桥遍布祖国山河大地,它们是我国古代灿烂文化的一个组成部分,在世界上曾为我国赢得荣誉。迄今保存完好的大量石拱桥,作为历代桥梁工匠精湛技术的历史见证,显示了我国劳动人民的智慧和力量。一座石拱桥,能经得起千百年天灾战祸的考验,仍保持其固有的功能不变,堪称奇迹。

早在东汉时期就已经出现了单跨石拱桥,隋代创造出世界上第一座敞肩式单孔弧形石拱桥,即中国最著名的赵州桥,俗称安济桥,如图 1-1 所示;其他著名的古代石拱桥还有唐代修建的苏州宝带桥,金代修建的北京卢沟桥,如图 1-2 所示。除了历史悠久,石拱桥因其造型优美、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得以广泛使用。

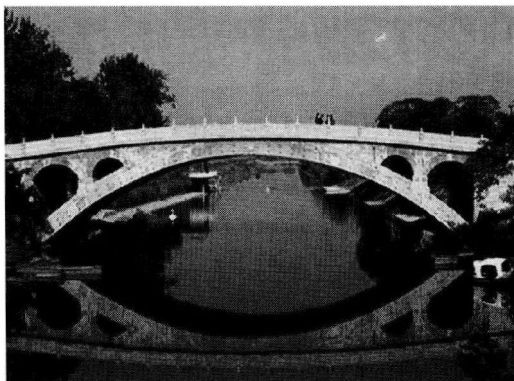


图 1-1 河北赵县赵州桥

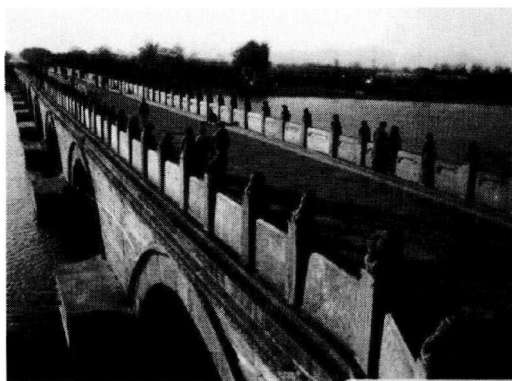


图 1-2 北京卢沟桥

1880 年近代铁路、公路桥梁工程技术传入我国以后,石拱桥仍然保持其旺盛的生命力,结合现代的工程理论和新的建筑材料,取得了长足发展。赵州桥已历时 1 400 多年,卢沟桥雄踞在北京永定河上,也经历了近 700 年。它们都历史悠久,迄今仍保持着初创风貌,还能通行重车,在中外桥梁中实属罕见。赵州桥敞肩式的造型,早于西方 7 个世纪。它们之所以能够经久不坏,说明设计与施工是符合科学原理的。如赵州桥的浅基础、短桥台,经过多次地震、洪水仍屹立无恙,这绝不是偶然。

现存的多孔厚墩厚拱石拱桥,大部分建于明清时代,清代官式石桥结构保守,桥阻水面积较大。中华人民共和国成立后,石拱桥建设历经三个时期:20 世纪 50 年代利用老桥、谨慎建



设新桥;20 世纪 60 ~ 80 年代,革新技术、积累经验和完善理论建设石拱桥鼎盛时期,这一时期不断有大跨径石拱桥纪录刷新;20 世纪 90 年代后,受其他桥型冲击以及材料技术不断革新,石拱桥建设放缓。2007 年湖南凤凰沱江大桥坍塌后,石拱桥建设几乎陷入停顿。有人认为,现代桥梁已经进入钢筋和预应力钢筋混凝土时代,还将进入新的材料时代,石拱桥已经完成其历史使命。但正如世界上一切事物都有局限性一样,各有其发展天地,石料取之不尽和用之不竭,同时石拱桥使用年限也使其他桥梁难以望其项背。

石拱桥是古代文明的丰富遗产之一。中国古代石拱桥不论大小,工艺精益求精,如同一幅画,不许有一处败笔。赵州桥的栏板,卢沟桥的石狮,都以艺术珍品而闻名于世。这也是中国古代石拱桥在艺术方面一个可贵的成就,对于现代石拱桥装饰存在着深刻的影响。

运用现代科学技术手段对石拱桥进行革新挖潜,可使圯工体积减少 30% ~ 40%。因此在中华人民共和国成立后,石拱桥建造技术得到了迅速发展,1959 年在原交通部的大力支持下,湖南省建成了 60m 桥跨的黄虎港大桥,突破了千年的历史跨径纪录。此后在十多年时间里,我国相继建成了近 10 座百米跨径石拱桥,如:1961 年云南长虹桥(112m,图 1-3)、1972 年四川丰都九溪沟大桥(116m)。1991 年,湖南省凤凰鸟巢河大桥在拱桥新理论的指导下,将全空式石肋拱桥跨径推进到 120m。2000 年山西晋城建成 146m 丹河特大桥(图 1-4),为全空式变截面石板拱,已被列入吉尼斯世界纪录。历史证明中国石拱桥建造技术持续保持国际领先水平,未来石拱桥必然将在国家国民经济发展和交通基础设施建设中继续发挥重要作用。



图 1-3 云南长虹桥

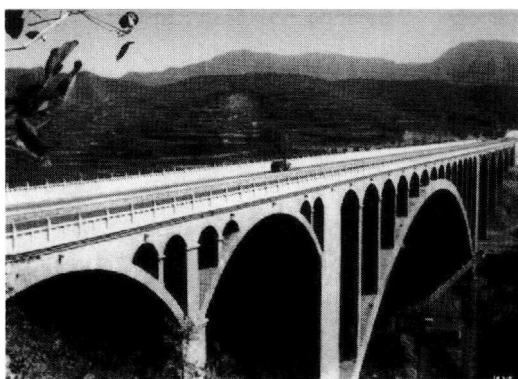


图 1-4 山西丹河特大桥

湖南省是传统石拱桥的故乡,自 1913 年湖南省首建公路起,石拱桥即被广泛用于公路建设,包括抗日战争期间的湘黔和湘川公路上也建有许多石拱桥;中华人民共和国成立后国民经济恢复期钢材、水泥产量少,湖南省又修建了大量石拱桥,包括 1960 ~ 1964 年湖南省学习了江西所创的“片石拱”新工艺,将上千座木桥改造为永久性石拱桥;1978 年湖南省又推出了以“平铰拱”和“连拱”等理论计算发展的新型板肋石拱桥,并在湖南湘西地区得到了迅速地推广。20 世纪 80 年代以来,湖南修建了 300 余座新型石拱桥。湖南的石拱桥建设发展历程是中国石拱桥发展的缩影,湖南石拱桥四种不同形式的产生历程可以清楚地了解中国石拱桥建造技术的发展过程。

1.1.1 石板拱桥

1) 历史回顾

石板拱桥是最早的石拱桥结构形式,其中最具有代表性的首推约1400年前所建造的河北赵州桥($L=37.37\text{m}$),它是世界上最早的空腹拱桥。古代的石拱桥遍及中国各地,数以万计。历尽沧桑而不毁,至今还担负着繁重的现代交通运输任务,如1192年修建的北京卢沟桥。

在20世纪50年代建国之初,经济发展与钢材、水泥等材料供应的矛盾十分突出。由于石拱桥具有就地取材、设备简单、能充分发挥人力作用等显著优点,因而湖南在当时公路建设中大量修建了料石板拱桥。据不完全统计,1952~1961年10年间共修建146座总长约4900m的料石板拱桥。

2) 跨径突破

1959年在湖南省石门县建成了桥高50m,净跨60m的黄虎港大桥,揭开了中国近代石拱桥建设的序幕。它极大地解放了人们的思想,其后几十年间中国陆续建成了百米大跨径石拱桥十余座,创造了一系列石拱桥跨径新纪录。

由于传统的料石拱桥所耗人工特别多,推广受到限制。另外,它在中小跨径的弯坡斜桥中使用十分不便,因此传统的料石板拱桥发展停滞下来。

3) 材料革命

1959年在江西省德安建成了 $3\times 34\text{m}$ 片石拱桥,冲破了古今中外几千年来修建石拱桥必须用料石的定律。采用小石子混凝土砌块(片)石是在石料规格中进行了一次革命。由于片石拱节省劳力、工艺简便、造价低廉,迅速在中国推广。仅湖南省1964~1965年间就修建了1288座合计14598m的片石拱桥。这使解放初期大量修建的石台(墩)木面桥年久失修、超载、限速的状况得到解决。就全国而言,石拱桥进入到以块(片)石为主的后期发展阶段。

但是片石拱桥仍然采用矩形截面,其抗弯性能差、对拱架的要求高,随着跨径的增大,修建愈来愈困难。

计算方法上仍按前苏联的弹性理论,不考虑拱上构造联合作用和“连拱”效应,所设计的结构十分保守。拱圈厚、立墙粗、腹拱尺寸大所导致结构笨重、外观差、造价高,因此,传统石板拱桥发展进入低潮,处于停滞状态,石拱桥新的变革呼之欲出。

1.1.2 石肋双曲拱

1) 截面形式革命

20世纪60年代后期,中国的钢材水泥产量有所增加,江苏省出现了一种新桥型——双曲拱桥。在工艺上它具有“化整为零”的功能,能实现缆索吊装无支架施工。

在结构上,双曲拱桥的特点在于可先利用拱肋作为支架来承担拱波、拱板自重,然后又能共同组成主拱圈。拱圈截面由拱肋、拱波、拱板组合而成T形截面,其抗弯刚度比矩形大,因此承载力比矩形为好。双曲拱桥蓬勃的发展,掀起一场主截面形式的革命。在双曲桥的启示下,开阔了石拱桥的技术思路,出现了模仿双曲拱的石肋双曲拱。20世纪70年代后期,在湖南邵阳地区出现了多座石肋双曲拱桥,其最大跨径达到30m。



2) 新计算方法出现

1976 年原交通部科研院汇编出版《公路双曲拱桥上部构造设计与计算》，书中详尽介绍了十多年来在双曲拱桥设计计算中所产生的“平铰”、“连拱”和“拱上构造联合作用”等新理论。当时湖南省交通设计院据此提出一整套简化计算方法，指导新化交通局设计了“窄立墙、宽墙帽、坦腹拱”等轻型化的拱上构造，建造了 52m 跨径的鹅溪大桥。其后通过百吨重车试压，验证了石肋双曲拱上构造轻型化措施的合理有效。

1979 年湖南省交通规划勘察设计院指导凤凰交通局将凤凰大桥改建为石肋双曲拱桥。通过推广鹅溪大桥拱上构造轻型化措施，取得了在造价不变的情况下，将桥宽由 9m 增大到 12m 的良好效果。

1981 年湖南省交通规划勘察设计院帮助桑植县交通局，将 $4 \times 45\text{m}$ 桑植澧水大桥改建为混凝土预制拱肋双曲拱桥，上部结构按 29 孔 4m 三平铰理论设计。

通过湖南省 30 余座石肋双曲拱桥“上部构造轻型化”的改进设计，新型拱桥与传统板拱桥相比自重减轻 30%，同时使下部结构和拱架荷载也相应减少，取得了显著的经济效果。事实证明：没有理论、概念的突破，石拱桥就不能适应新时代发展的需要。

3) 小结

石肋双曲拱虽能大量节省钢材，但建筑高度大、工序较多、整体性较差，在中小跨径中优势不明显。当轻型石拱桥进一步优化成为石砌肋拱后，它就逐渐失去了竞争能力。但石肋双曲拱的历史作用是在石拱桥中首次引进了考虑拱上构造联合作用的新计算方法，在中国几千年石拱桥发展史中，这是一次质的飞跃。

1.1.3 全空式石肋拱桥

1) 拱上连续腹拱

1984 年湖南省凤凰县交通局根据凤凰县石料强度高达 14MPa 以及作为拱架的木材细、直径不大于 12cm 的特点，提出直接用分离式石肋做主拱圈。拱上构造采用长沙望城马家河首创的石砌拱连续腹拱形式，形成新型全空式石肋拱。这种桥型适合凤凰县工程实际。

2) 天下第一大石桥

1990 年在省交通厅支持下，湘西凤凰县修建了当时世界上最大跨径 (120m) 石拱桥——鸟巢河大桥，誉为“天下第一大石桥”。其跨径之大、设计之新、工艺水平之高和造价之低都代表了湖南轻型石拱桥的最高水平。该桥结构及施工有如下特点：

(1) 石肋主拱圈系两条 $2.5 \times 1.6\text{m}$ 小石子混凝土砌块石，面积 $A = 8\text{m}^2$ ，平均厚度 $\bar{D} = 1\text{m}$ ，总重约为板拱的 63%。拱上构造采用“三平铰连拱理论”， $13 \times 14\text{m}$ 连续腹拱和窄立墙，很大程度上实现了上部构造轻型化。

(2) 砌筑施工采用满布式木拱架，顶部用多层弓形木形成木拱改善受力。拱架高 39m，宽 8m，共用木材 504m^3 ，螺栓 1.6 万套，扒钉 2t，3 000 工日。主拱圈重 2 834t，施工按 0.60m 高分层分环砌筑。每层合龙后停 5d，待砂浆及混凝土强度达到后再砌。两条 120m 长石肋施工历时 40d。

(3) 拆除拱架裸拱施工拱上构造，其经验是在拱圈下安装了 20 多个百分表挠度计，严密观测监控，按“分批、对称、均匀、分段”的原则，精心组织，取得成功。

3) 小结

石肋拱桥是一种古老结构形式,全空式石肋拱由于采用连续腹拱实现了结构造轻型化后,它才具有新的竞争力。石肋拱仍为传统矩形截面,其惯性矩小、抗弯性能差,造成肋拱由于拱趾下缘压应力过大。石肋拱由于以粗料石为主,对石料强度要求甚高。在砌筑中分层分环工艺复杂,耗费人力过多。另外石肋高度过大,在中小跨径也不美观。

1.1.4 石砌肋拱

1) 理论和试验

石砌肋拱保留了传统的全宽底板,因此对石料要求规格较低,施工易掌握。其特点是在板上再加砌肋来提高截面的刚度,以肋板结构克服板拱的弊病。结构计算图示中弃用无铰拱采用两平铰结构,以削减拱趾处负弯矩峰值。拱轴线采用悬索线,以确保裸拱圈脱架时自重弯矩为零。拱上构造采用窄墙、宽帽、变截面坦腹拱和无填料的连续腹拱来实现结构轻型化。在活载计算中计入了腹拱的联合作用。综上所述石砌肋拱是在新理论指导下对传统板拱进行改进的产物。

10 余座石砌肋拱的试验结果证明,拱上构造联合作用是客观存在的。实测腹拱联合作用对 $L/4$ 截面挠度折减系数为 $0.3 \sim 0.6$,弯矩折减系数为 $0.5 \sim 0.7$ 。采用拱桥研究小组所提出的“联合作用简化算法”与实际有 80% 的吻合度。应当指出,在拱设计中有意采用了变截面护拱和混凝土桥面等措施来提高腹拱刚度,使活载联合作用效应增大。石砌肋拱桥比传统石拱桥的圬工体积减少不是降低了安全系数,而是靠科学地利用平铰、拱轴系数的降低和拱上联合作用,使全拱受力均匀,即主拱圈的拱趾靠平铰来减少负弯矩,拱顶靠采用悬索线拱轴造成的拱顶预留的负弯矩, $L/4$ 截面靠腹拱的抗推刚度来减少活载弯矩。拱上立墙由于腹拱抗推刚度甚大,立柱抗推刚度甚小,按刚度分配原则立柱不承受水平力,是压杆状态,所以很窄的尺寸($0.3 \sim 0.4\text{m}$)均可通过。

荷载试验实测的相对挠度值远比双曲拱桥计算值小,都在 $1/10\ 000$ 以内,见表 1-1,石砌肋拱处于弹性状态说明所引进的新理论是符合实际的,并且还留有一定的潜力。

6 座拱桥试验挠度表 表 1-1

桥 名		梓溪	湘潭	朱滩	黄岩冲	普济	柿溪
项 目							
拱顶 加载	设计荷载	汽车—15 级,挂车—80		汽车—10 级		汽车—15 级,挂车—80	
	试验荷载(10kN)	80	80	15	30	100	110
	实测挠度(mm)	1.24	1.80	0.66	1.66	2.60	4.09
$L/4$ 加载	相对挠度	1/16 130	1/12 220	1/39 400	1/24 100	1/18 100	1/14 670
	试验荷载(10kN)	110	—	15	70	100	100
	实测挠度(mm)	1.01	—	0.56	3.32	2.24	5.80
	相对挠度	1/19 800	—	1/46 510	1/12 050	1/19 260	1/10 340

值得特别注意的是,因为上部构造立墙窄、腹拱坦,因而在拱上施工时必需做到“对称、均衡加载”,要在贯通的支架上进行,否则会因为施工时出现的单向推力而发生事故。



2) 以人为本

石砌肋拱的发展和技术进步是人们在工程实践中不断学习创新的结果。

(1) 湖南省交通厅科技处、湖南省交通科研院以及设计院始终如一地支持拱桥研究小组工作,目的是推动科技进步。科研的道路是艰苦曲折的,只有不懈努力坚持到底的人才能取得成功。

(2) 怀化市公路设计院工程师们在深厚理论基础指导下完成了石砌板肋拱(净—7)设计图和二平铰计算表格,多年来为全国各地单位无偿提供了众多的石砌拱技术资料。经过他们的多年努力在怀化地区先后完成了百余座石砌板肋拱桥,其中具有特色的如:

①第一座 60m 大跨径拱——辰溪柿溪桥,该桥介绍给贵州黔南自治州取得成功;

②怀化井溪口大桥造型新颖的坦腹拱;

③向日葵形腹拱的辰溪流亭溪大桥。

(3) 湘西自治州交通设计院在湘西卓有成效地完成了多座(1/8 ~ 1/10)坦板肋拱设计。编制了净宽 4.5m 的石砌板肋拱设计图,对农村公路桥梁建设起了促进作用。

(4) 张家界市和永定区交通局,数十多年来持续在张家界市推广修建了百余座石砌拱桥,促进了科技进步。例如:

①鹭鹭弯大桥(6 × 48m),完成了 $\phi 3 \sim \phi 5$ 无承台大直径挖孔桩,创当时国内之最,3m 人行道采用大悬跨挑梁减少了桥宽 6m。

②观音大桥(4 × 52m)首创无承台大直径沉挖空心桩。这对解决山区石拱桥基础工程有重要的意义。华东交大以此编制的(净-9, $f/l = 1/8$)多孔拱设计图,就采用了观音大桥该项成果。

③格格洞大桥(72m),在桥高 45m 的情况下,开创了拱架用集束钢管立柱,拖拉贝雷纵梁到位后再竖木支架的混合结构,为以后轻型石拱桥的支架找到一条较好的出路。

3) 全空式石砌拱技术

湖南省石拱桥的技术发展历程,是我国石拱桥技术发展的缩影。随着现代工业的发展,桥梁科技的进步,新结构、新工艺、新材料的应用为高速公路、干线公路跨越大江、大河、海峡特大桥梁提供了条件。但是中国这样的发展中国家,幅员辽阔、山岭众多,石拱桥造价低廉,在山区公路建设中还是具有强大的竞争力。传统石拱桥运用现代化技术改造后成为石砌拱桥,其造型的新颖美观、结构的经久耐用,能就地取材,不受运输、电力、设备等限制等都是钢、混凝土结构所没有的。可以说,轻型石砌拱桥的出现又使石拱桥的发展走出了低谷。

根据我国“西部大开发”的形势需要,湖南石拱桥项目组在总结 1980 年所设计的第一座全空式石砌拱桥——长沙市望城马家河和结合湘西自治州交通设计院设计的洗溪大桥(3 × 43m)以及湖南公路设计公司设计的观音大桥(4 × 52m)等实践,组织教授、讲师和研究生在开发专用程序基础上着手编制了“净-9, $f/l = 1/8$ 的全空式石砌拱设计图”供参考。

1.2 石拱桥安全性问题

1.2.1 桥梁安全与既有石拱桥现状

桥梁工程作为线路的咽喉要道,是国家重要的基础建设之一,是关系社会和经济协调发展

的生命线工程。据统计中国现有的 62 万余座桥梁中,大约有 1/3 存在不同程度的结构性缺陷或功能失效隐患,这些安全隐患一旦爆发,将造成难以估量的生命及财产损失,其后果不堪设想。事实上,国内外桥梁史上由于桥梁垮塌造成的惨重事故比比皆是,令人触目惊心,如 1999 年重庆綦江彩虹桥垮塌,造成 40 人死亡,直接经济损失 600 余万元;2001 年宜宾南门长江大桥的断裂掐断了宜宾的交通喉舌,严重限制了该市经济发展;辽宁抚顺南杂木大桥垮塌、广东九江大桥被船撞击坍塌、湖南凤凰沱江大桥垮塌等事故,皆造成了严重后果;韩国的圣水大桥、葡萄牙的里斯本大桥以及我国台湾省的高屏大桥等垮塌事故,也都是震惊世界的重大事故。因此,桥梁工程的安全控制成了全世界面临的一个重大经济技术问题,保证桥梁结构安全设计、施工、运营,实现桥梁建设的功能目标与社会效益,确保桥梁建设在公路建设乃至国民经济建设中的贡献,保障人民的生命财产安全,已成为当前交通建设的重要需求和关键工作。

我国近代石拱桥大部分建成于 20 世纪 50 ~ 80 年代,受历史条件限制,设计荷载等级都不高,且桥面净宽较窄。桥梁在长期运营过程中受到自然灾害、环境变化、人为作用、交通量增加及交通荷载等级逐渐提高等众多不利因素的影响,导致这些桥梁出现材料劣化、结构变形、承载能力降低和耐久性不足等现象,很多桥梁的技术状况已不能满足行车安全的需要。湖南省交通科学研究院联合湖南大学、重庆交通大学、华东交通大学、湖南省公路管理局、湘西土家族苗族自治州公路管理局于 2004 ~ 2009 年对我国西南地区石拱桥进行调研,在国道、省道统计桥梁 639 座,其中石拱桥 526 座,其他桥梁 113 座。639 座桥梁中技术状况被评定为三类的有 200 余座,四类的有约 100 座。调研结果显示,我国桥梁安全运营状况不容乐观,急需进行安全性评估与加固改造。

1.2.2 国内部分石拱桥坍塌事故

2004 年 5 月 5 日,湖南浏阳市大瑶镇南川石拱桥,一辆车从桥上驶过后桥梁中间突然坍塌,如图 1-5 所示。桥梁坍塌长度约 40m,宽 5m。该桥建于 1966 年,连通浏阳与江西萍乡。2006 年 4 月 29 日,湖南娄底市白马溢洪石拱桥坍塌(图 1-6),一辆摩托车坠落,造成 1 死 2 伤。该桥桥长 62m,宽 5m,建于 1987 年。

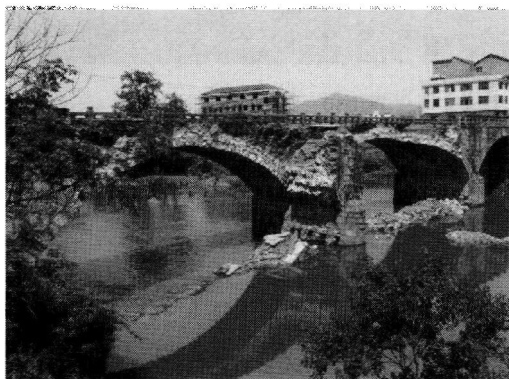


图 1-5 湖南浏阳南川石拱桥
(2004 年 5 月 5 日坍塌)



图 1-6 湖南娄底白马溢洪石拱桥
(2006 年 4 月 29 日坍塌)

2006 年 5 月 16 日,甘肃省岷县北门洮河大桥坍塌(图 1-7),桥面上正在行走的行人和两辆农用三轮车掉进河中,致 4 人受伤。该桥于 1972 年开始兴建,桥面宽 8m,桥长 206.5m,



1974年7月建成通车。2006年11月25日,陕西省安康市冷水河大桥坍塌(图1-8),当时没有车辆行驶,大桥位于316国道,全长122m,桥高约30m,宽7m,于1985年6月建成通车。



图1-7 甘肃省岷县洮河大桥
(2006年5月16日坍塌)

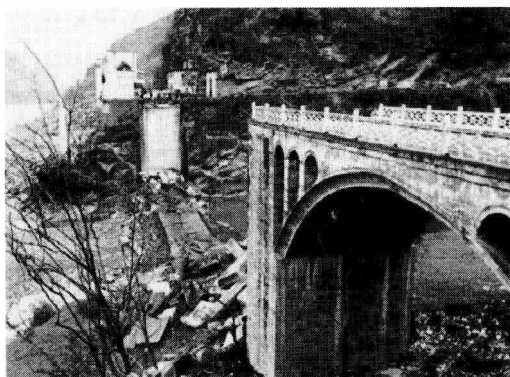


图1-8 陕西省安康市冷水河大桥
(2006年11月25日坍塌)

2007年5月9日,江西上饶傍罗石拱桥坍塌(图1-9),该桥1988年建成,桥长355.2m,采用片石拱桥结构。2007年8月13日,湖南凤凰沱江大桥在拆除施工脚手架时全部垮塌(图1-10),坍塌造成64人死亡、22人受伤,沱江大桥全长约268m,为4孔石拱桥,宽13m,高42m。



图1-9 江西上饶傍罗石拱桥
(2007年5月9日坍塌)



图1-10 湖南凤凰沱江大桥
(2007年8月13日坍塌)

国内近10年部分石拱桥坍塌统计见表1-2。

国内近10年来部分石拱桥坍塌统计表

表1-2

序号	石拱桥坍塌时间	石拱桥名称	危害
1	1998年2月20日	福建南安焦家湾大桥	6人死亡,13人受伤
2	2002年1月4日	浙江景宁景泰公路石拱桥	7人死亡,17人受伤
3	2002年6月16日	福建屏南万安桥	900年历史古桥损毁
4	2002年7月18日	湖北省仙桃市岛口桥	9人死亡,12人受伤
5	2002年12月14日	福建泉州市英都石拱桥	6人死亡,13人受伤
6	2004年1月31日	广西东兰县武篆镇石拱桥	9人受伤

续上表

序 号	石拱桥坍塌时间	石拱桥名称	危 害
7	2004 年 5 月 5 日	湖南浏阳南川石拱桥	交通中断
8	2005 年 1 月 15 日	湖南郴州市黄泥坑石拱桥	7 人死亡,3 人受伤
9	2005 年 6 月 11 日	广东信宜市村尾石拱桥	交通中断
10	2005 年 12 月 12 日	广东揭西县美德大桥	2 辆摩托车坠河
11	2005 年 12 月 14 日	福建三明市五仙姑石拱桥	6 人死亡
12	2006 年 4 月 29 日	湖南娄底白马溢洪石拱桥	1 人死亡,2 人受伤
13	2006 年 5 月 16 日	甘肃岷县洮河大桥	4 人受伤
14	2006 年 7 月 1 日	山东枣庄市欧峪大桥	交通中断
15	2006 年 9 月 21 日	四川自贡桥头村石拱桥	5 人受伤
16	2006 年 11 月 25 日	陕西白河县冷水河大桥	1 人受伤
17	2007 年 2 月 3 日	湖北汉川虾集一石拱桥	1 车掉落
18	2007 年 3 月 23 日	湖北通城郑家屋石拱桥	2 人死亡,9 人受伤
19	2007 年 5 月 9 日	江西上饶傍罗石拱桥	交通中断
20	2007 年 8 月 13 日	湖南凤凰沱江石拱桥	64 人死亡,22 人受伤
21	2007 年 12 月 16 日	福建连城县陈桥石拱桥	4 人死亡
22	2008 年 3 月 3 日	江苏南京玉带镇红庙石拱桥	1 辆货车坠河
23	2008 年 8 月 18 日	湖北宜都市柑子园石拱桥	交通中断
24	2009 年 2 月 11 日	浙江温州方隆桥	3 人死亡,多人受伤
25	2009 年 3 月 7 日	重庆铜梁县泰康石拱桥	2 人受伤
26	2009 年 3 月 12 日	江苏乐平新溪湾石桥	交通阻断

1.2.3 石拱桥安全评价与维修加固

作为中华民族文化特征之一的石拱桥,从古至今建成的石拱桥,遍及全国各地,数以万计。这些桥梁中,有些已处于危桥状态,如何对这些病桥进行检测、评估和加固是学术界关心的问题。自 20 世纪 80 年代起,在一些发达国家,桥梁工程的重点逐步转移到桥梁的鉴定评估、养护维修和加固改造方面,并已取得长足发展。

在“六·五”期间,对公路旧桥的检测、评估和加固方法进行了广泛的研究和工程实践,并取得了良好的社会效益。“七·五”期间,交通部适时地将“旧桥检测、评估、加固技术的应用”列为 1989~1990 年科技进步“通达计划”项目,交通部科技情报所具体组织推广。此举极大推动了公路旧桥加固、改造技术研究。因此,在公路梁桥和拱桥等旧桥承载力的检测、评估、加固改造技术和施工工艺等方面,取得了许多宝贵经验。

随着我国桥梁建设事业的发展,旧桥的维修养护问题也日益突出,这不仅是我国的问题,也是世界性的难题。交通部确定的“十·五”公路管养目标之一就是:逐步改造国省干线公路





上的老旧桥梁,基本消灭国省干线公路上的危桥。

自 20 世纪 70 年代以来,我国开始着手对旧桥加固和改造技术进行研究,对公路旧桥的检测、评价、维修加固和改造方法进行了广泛的研究和工程实践,获得了许多宝贵的经验,取得了良好的社会效益和经济效益。中国公路学会自 2000 年起已举办了六届“全国公路桥梁维修与加固技术研讨会”,对旧桥的检测、评价、维修加固方法和加固材料进行了广泛的探讨。据统计,维修加固和改造方法已多达 70 多种,随之也出现了许多维修加固的新材料。关于维修加固的改造方法、施工工艺和材料使用等的介绍已有一些书籍和论文。

由于桥梁存在桥型桥位差异、地质条件差异以及其原始资料不齐等情况,导致其病害的情况又各不相同,并且对维修加固和改造方法的适应性、经济性等方面还缺乏系统的研究,维修加固和改造方法也缺乏标准化、规范化的设计施工指南。因此有必要对我国的拱桥进行广泛调查,对其典型病害及其发生原因进行详细的总结和分析,以确定正确的维修加固和改造方案。

桥梁结构的安全性问题已日益受到有关主管部门和广大工程技术人员的重视。我国目前还没有专门的安全性设计规范,它的进一步研究,既有服务于服役桥梁结构的现实意义,又有指导待建桥梁结构进行安全设计的理论意义,同时,也对丰富和发展桥梁结构理论具有一定的理论价值。目前,如何考虑石拱桥结构的特点对设计理论进行研究,也是桥梁专家关注的问题。

桥梁的承载能力是桥梁维修、加固和改造的基础,能反映维修加固和改造的效果,故准确评定桥梁的承载能力是十分重要的。但目前的桥梁承载能力鉴定工作有很大的模糊性,大量不可预知的影响因素使得承载能力难以量化,使得桥梁承载能力鉴定方法存在主观判断性和应用的局限性。

我国在现有结构可靠性鉴定及评定方面的研究起步较晚,但发展较快,目前在模糊综合评判、结构动态可靠度、旧有结构可靠性评价等方面也作了很多研究。国内已制订了五部可靠性鉴定规程,主要用于工业与民用建筑领域,已开展了基于结构可靠度理论评估桥梁的结构安全性研究,目前常用的结构可靠性评估方法主要有:变权评定方法、基于神经网络理论的评估方法。然而其中结构安全评定指标的确定仍然有待进一步的研究,使其更加科学、合理,从而使人们对结构的安全现状判断具有可操作性。

1.3 石拱桥典型病害与成因

1.3.1 石拱桥检测内容

1) 资料收集

资料收集主要包括:设计资料、施工资料、水文地质资料、桥梁服役过程中的相关检查资料和养管资料、加固维修资料及桥梁现有交通量等。应尽可能多地收集桥梁的各种技术资料,并将水文地质资料的收集作为重点。

2) 现场检测项目

石拱桥的现场检测主要对全桥存在的病害进行检查和记录,检测的主要内容如下。