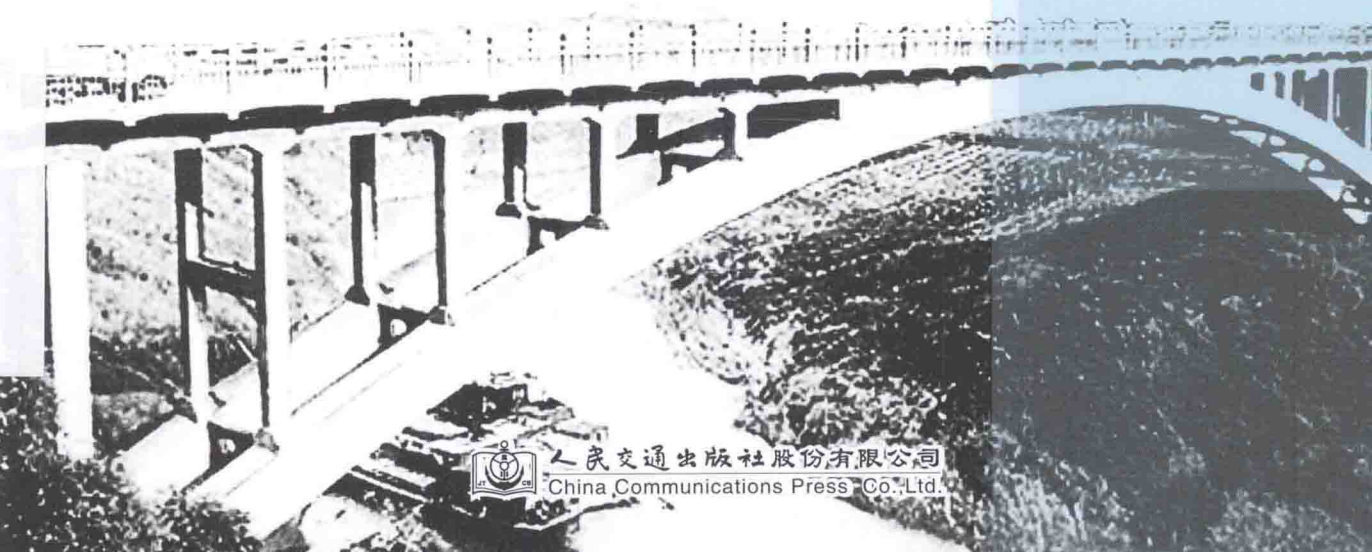


桥梁加固改造 新技术

周志祥 张江涛 郑志明 高燕梅 / 著

NEW TECHNOLOGY
OF BRIDGE REHABILITATION



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

桥梁加固改造新技术

New Technology of Bridge Rehabilitation

周志祥 张江涛 郑志明 高燕梅 著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书共分7章。第1章针对既有钢筋混凝土T梁桥通行能力和承载能力不足问题,提出在原T梁桥两边增设箱形梁以辅助原T梁受力的B-T-B拓宽加固方法;第2章针对混凝土薄壁箱形梁桥普遍存在纵向和斜向裂缝等病害,提出以新增混凝土箱形梁辅助原薄壁箱形梁的受力并改善其力学性能的B-TB-B拓宽加固技术;第3章针对横置桥道板拱上建筑结构的通病,提出采用U筋植入连接法增大立柱截面尺寸和拱上建筑逐孔更换的快速改造施工方法;第4章针对拱桥吊杆引发的问题,提出在保通条件下利用移动支架更换吊杆的方法;第5章针对双曲拱桥承载力不足问题,提出减载、增强横联和局部增强等综合改造加固方法;第6章提出在石拱圈两侧增设槽形钢筋混凝土拱肋的C-S-C复合结构加固方法;第7章提出用钢筋混凝土周边空间框架增强石砌拱上建筑结构的S-FRC复合结构加固改造方法。

本书每章第1节简要讨论了该类桥梁问题及产生原因,介绍了通常处置方法及其优缺点,阐述了改进的加固改造新方法的方案、力学原理及适宜条件下的优点;其后各节较详细介绍了该加固改造新方法在示例工程中的应用情况。

本书可供从事相关工作的工程技术人员、学者及研究生参考应用,也可作为相关专业学生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁加固改造新技术 / 周志祥等著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2014.6

ISBN 978-7-114-11471-7

I. ①桥… II. ①周… III. ①桥—加固②桥—改造
IV. ①U445.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第124599号

书 名:桥梁加固改造新技术

著 作 者:周志祥 张江涛 郑志明 高燕梅

责任编辑:周 宇 李 娜

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

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)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:13.25

字 数:317千

版 次:2014年6月 第1版

印 次:2014年6月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-11471-7

定 价:46.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)



前 言

随着科学技术和社会经济的迅猛发展,道路交通量和车辆载质量的逐渐增加几乎势不可挡。在 20 世纪 80 年代,日交通量达万辆车的道路十分罕见,汽—20 级已属当时桥梁设计的顶级荷载,进入 21 世纪,日交通量达十余万辆车的道路已属常见,车货总质量达 50t 的运营车辆也为常遇荷载,并且迄今为止尚无有效措施限制总质量超 100t 的车辆过桥;另一方面,桥梁结构随时间流逝还会产生自然老化,尤其对我国施工控制不严、养护管理相对落后的普通桥梁而言,其老化速度可能会远远快于预期值。鉴于多数桥梁自建成以来都面临交通量和车辆载质量的逐渐增加和自然老化的加速,桥梁加固与改造将成为一个长期甚至永恒的课题。

对通行能力或承载能力不足的桥梁,通常采取的处置方式是拆除重建或加固改造。这样可以从根本上解决桥梁的承载能力和通行需求问题,但必然面临昂贵的拆除重建费用、施工期间的交通维持和大量废渣处理不利环保等突出问题。而对原桥梁进行加固改造则可较好地克服这些问题,故在条件许可时作者推荐采用加固改造的方式处置问题桥梁。

相比新建桥梁,既有桥梁的加固改造需考虑的因素要更多。除经济因素外,必须考虑加固改造技术措施的可行性和合理性,尤其需要考虑加固改造后结构的长期可靠性;此外还应考虑如何减小加固改造施工对已有交通和环境的不利影响。作者针对 7 种不同类型的桥梁病害简要分析了病害产生原因,在综合考虑结构可靠、降低造价、简化施工和尽量减小对已有交通和环境的不利影响条件下,探索了新的加固改造方法,并给出了相应桥梁加固改造的工程实例。

本书共分为 7 章,每一章介绍一种作者提出的加固改造新方法。第 1 章针对既有钢筋混凝土 T 梁桥通行能力和承载能力不足问题,提出在原 T 梁(T-girders)桥两边增设抗弯和抗扭刚度均很大的箱形梁(Box Girder)以扶助原 T 梁受力的 B-T-B 拓宽加固方法,克服了对既有 T 梁桥实施长区段大范围加固处理而带来的再次损伤、中断交通和长期可靠性等诸多令人担忧的问题。第 2 章针对混凝土薄壁箱形梁桥普遍存在的顶底板纵向裂缝、腹板斜裂缝、跨中挠度过大等病害,提出在原薄壁箱形梁(Thin Box Beam)两侧增设抗弯和抗扭刚度足够大的混凝土箱形梁(Box Beam)来扶助原薄壁箱形梁的受力,并改善其力学性能的 B-TB-B 拓宽加固技术,克服了对既有薄壁箱形梁实施长区段大范围加固处理而带来的再次损伤、中断交通和长期可靠性等令人担忧的问题。第 3 章针对横置桥道板拱上建筑结构的通病,提出采用 U 筋植入连接法增大立柱截面尺寸,既可简化施工,又避免了对原立柱大范围的人为损伤;提出拱上建筑逐孔更换的快速改造施工方法,仅用常规吊机和运输车辆即能完成拱上建筑结构的改造,显著降低了对桥梁附近已有生活和工作环境的不利影响。第 4 章针对拱桥吊杆引发的问题,对既有吊杆拱桥提出将桥道系的横梁同与之搭接的相邻桥道板之间改造为刚性连接,对新建吊杆拱桥提出在桥道系设置将各横梁连接为整体的纵向联系的建议;针对桥面以下高度不是很大的情况,提出利用移动支架更换吊杆的方法,既可实现保通条件下更换吊杆,又显著简化



吊杆更换工艺。第5章针对整体现浇拱肋的双曲拱桥承载力不足问题,归纳总结出减轻拱上建筑结构自重、增强拱肋间横向联系、局部粘贴钢板等综合改造加固方法,既简化施工,又避免了直接加固所面临长区段大范围的新旧混凝土结合长期可靠性的问题。第6章针对石拱桥结构性能退化具有不可逆性,提出在石(Stone)拱圈两侧增设槽形(或L形)钢筋混凝土(Concrete)拱肋的C-S-C复合结构加固方法,在尽量减少加固结构自重和施工措施对原石砌主拱进一步损伤的条件下,能明显提高其承载能力,并显著改善石拱桥无预兆破坏的特性。第7章针对石砌拱上建筑病害及常规加固方法的主要问题,提出用钢筋混凝土周边空间框架(Reinforced Concrete Frame)增强石(Stone)砌拱上建筑结构的S-RC复合结构加固改造方法,既不明显改变主拱结构受力状态,又能克服石砌体原有病害对桥梁运营的安全隐患。

本项目研究得到国家973计划项目(2012CB723300)和重庆市重点自然科学基金(cstc2012jjB0118)的支持,还先后得到交通运输部、重庆市交通委员会、重庆市公路局、涪陵市交通委员会、彭水县交通委员会、巫溪县交通局、雅安市交通运输局、德阳市建设委员会、遂宁市建设委员会、深圳高速公路股份有限公司等单位相关专家和领导的支持和帮助,重庆交通大学的范亮、吴海军、徐勇老师和王邵锐、李永久、丁小戈、周胜怡、许华东、贺鹏等研究生参加了其中的一些研究工作,在此谨向所有参与本书工作及给予支持、指导、关心和帮助的单位领导、专家和个人致以真诚的感谢,同时感谢人民交通出版社对本书撰写和出版给予的大力支持。

本书第二作者张江涛为重庆交通大学讲师,第三作者郑志明为重庆市公路局高级工程师,第四作者高燕梅为重庆交通大学讲师。本书是作者及课题组师生针对桥梁加固改造工程的实际问题,在国内外大量已有研究成果的基础上开展的一些探索和提炼工作,谬误之处在所难免,真诚地恳请同行读者们批评指正。

周志辉

2014年1月于重庆交通大学

目 录

第 1 章 T 梁桥的 B-T-B 拓宽加固技术	1
1.1 B-T-B 拓宽加固方法	1
1.2 示例工程原桥状况	3
1.3 拓宽加固桥梁的力学性能分析	8
1.4 拓宽加固桥梁的构造与施工特点	14
1.5 拓宽加固后的效果验证	18
第 2 章 混凝土箱形梁桥的 B-TB-B 拓宽加固技术	22
2.1 B-TB-B 拓宽加固方法	22
2.2 示例工程原桥状况	24
2.3 桥梁拓宽加固方案	37
2.4 拓宽加固关键构造与施工方法	39
2.5 拓宽加固效果分析	44
第 3 章 横置桥道板拱上建筑结构的快速改造技术	48
3.1 横置桥道板拱上建筑结构快速改造方法	48
3.2 示例工程桥梁状况	51
3.3 拱上建筑结构改造方案	52
3.4 立柱增大截面的加固方法	56
3.5 立柱与盖梁的连接构造	71
3.6 拱上建筑逐孔更换的快速施工方法	78
3.7 示例工程的改造效果	82
第 4 章 拱桥吊杆引发的问题与改造技术	84
4.1 吊杆引发的问题与改造方法	84
4.2 示例工程桥梁状况	86
4.3 开人孔对封闭式混凝土拱肋工作性能的影响	91
4.4 保通条件下的吊杆更换方法	99
4.5 吊杆更换的施工监控	108
第 5 章 大跨双曲拱桥的综合加固改造技术	119
5.1 大跨双曲拱桥的综合加固改造方法	119
5.2 示例工程桥梁状况	122
5.3 双曲拱桥计入损伤后的力学性能分析	128
5.4 综合加固改造结构方案	133



5.5	综合改造双曲拱桥的构造与工艺	136
5.6	示例工程加固效果	140
第6章	石拱桥的 C-S-C 加固技术	142
6.1	石砌主拱圈的 C-S-C 加固方法	142
6.2	示例工程原桥状况	146
6.3	C-S-C 方法加固石砌拱圈	158
6.4	C-S-C 加固方法的综合效益	173
第7章	石砌腹拱结构的 S-RCF 加固技术	175
7.1	S-RCF 加固方法	175
7.2	示例工程桥梁状况	176
7.3	S-RCF 复合结构承载力计算探讨	184
7.4	示例工程加固方案	188
参考文献		204
索引		205

第 1 章 T 梁桥的 B-T-B 拓宽加固技术

1.1 B-T-B 拓宽加固方法

二十世纪六七十年代,我国修建了大量的钢筋混凝土简支 T 梁桥,由于设计荷载等级较低,桥梁承载能力和通行宽度已不能满足日益发展的车辆载质量和交通量的需求(图 1.1),对原有钢筋混凝土简支 T 梁的改造即成为具有一定普遍意义的共性问题。



图 1.1 T 梁桥的病害

根据桥位条件和建设资金情况,通常可采取以下三种处理方式。

一是在原桥位拆除重建:即一次性拆除旧桥,在原桥位建设新桥。新建桥梁结构自然能满足当前和未来一段时间的承载能力要求和交通量需求,结构安全可靠。但既有桥梁拆除重建需面临三方面的问题:①如何保证拆除重建施工期间的道路交通问题;②拆除重建的费用通常很高;③桥梁拆除产生大量废渣的处理对当今越来越重视的环保影响不可忽视。

二是保留原桥,另选桥位修建新桥。可不中断原桥交通,避免对原桥两岸人民生活的影响;新建桥梁也能满足承载力要求和通行需求,原桥在新桥建成后也可限载通行或完全弃用。但该方案需对原道路进行大规模的改造,故需满足两个前提条件:①有合适的新桥位和与两岸道路相衔接的场地条件;②有足够的建设经费。

三是对原桥梁进行拓宽加固改造。该方案基本克服了前两种方案的问题,相比之下是较经济且不利影响较小的。

桥梁拓宽加固改造有两个目的:①加固以提高桥梁的设计荷载等级;②加宽以增大桥梁的通行能力。最直接的加固方法是在既有 T 梁下缘设置下马蹄,增加纵向受拉钢筋(图 1.2),以提高其承载能力;最直接的拓宽方法是在原 T 梁桥的一侧或两侧增设按新的荷载等级设计的



T 梁,并增设横向联系(图 1.3)。但在既有 T 梁下缘实施增加下马蹄方案,为了满足新旧混凝土的结合,势必首先沿既有 T 梁全长对其下缘进行表面凿毛、钻孔植筋和焊接箍筋,这种施工行为本身对主梁下缘就会造成进一步的损伤;其次是浇筑下翼缘新混凝土的施工及混凝土硬化期间需要中断交通,若要保通则需要耗费更多的人财物力;再者长区段的下马蹄新增区混凝土与既有 T 梁结合的长期可靠性总存在令人担忧的因素。

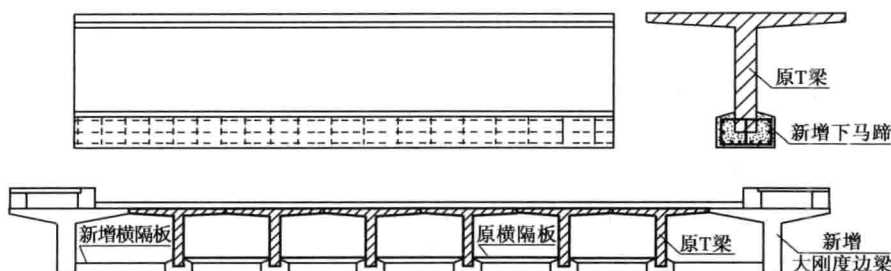


图 1.2 T 梁桥的拓宽加固示意图

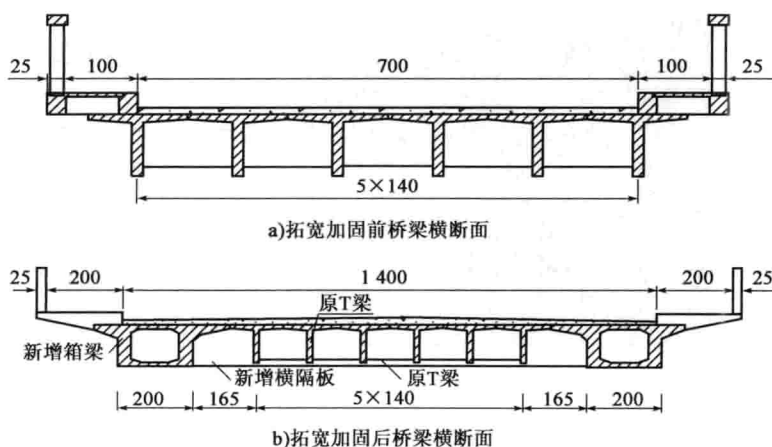


图 1.3 B-T-B 拓宽加固方法横断面示意(尺寸单位:cm)

作者主张在旧桥加固改造中宜尽量减少凿毛、植筋、焊接等措施对原结构的损伤,尤其应尽量减少长区段大范围新旧混凝土的结合处置。其实,欲提高既有桥梁通行的车辆荷载等级,除通过加固措施直接提高其承载力外,还可以通过桥梁拓宽的新增结构使原 T 梁分配的内力降低至满足设计荷载等级提高后的承载力要求^[1-3]。据此,提出在原 T 梁(T-girders)桥两边增设箱形梁(Box Girder)以减小原 T 梁内力分配的 B-T-B 拓宽加固方法。现以实例说明其具体做法:设原 T 梁桥宽 9.5m,设计荷载等级为汽—13、拖—60,要求拓宽加固后桥梁宽 18.5m,设计荷载等级为汽超—20、挂—120。采用 B-T-B 拓宽加固方法的桥梁横断面如图 1.3 所示,即在原 T 梁桥两侧各设一根抗弯抗扭刚度均很大的箱形梁,并新增横隔梁使原 T 梁与新增箱形梁连接为整体。

根据结构力学原理可知,桥梁在竖向荷载作用下,各梁的内力按其刚度大小分配,梁的刚度越大所分配得到的内力越大。于是我们总可以将新增箱形梁刚度设计得较原 T 梁刚度足



够大,使按 B-T-B 拓宽加固后 T 梁在汽超—20、挂—120 荷载作用下分配到的内力不大于原 T 梁桥在汽—13、拖—60 荷载作用下的内力,如此即可避免因设计荷载等级提高而必须增大原 T 梁承载力的要求,克服了对既有桥梁实施长区段大范围加固处理而带来的二次损伤、中断交通和长期可靠性等诸多令人担忧的问题。

1.2 示例工程原桥状况

荣经大桥是国道 108 线经四川省荣经县城唯一一座跨越经河连接两岸城区的大桥(图 1.4)。该桥全长 111.5m,由 6 跨标准跨径为 16.8m 钢筋混凝土简支梁组成,每跨有 6 根 T 梁,T 梁间距为 1.4m;桥面净宽为净 7.0 (行车道)+2×1.25 (人行道)=9.5m(图 1.5);原设计荷载为汽—13 级,拖—60 级,于 1965 年建成通车。

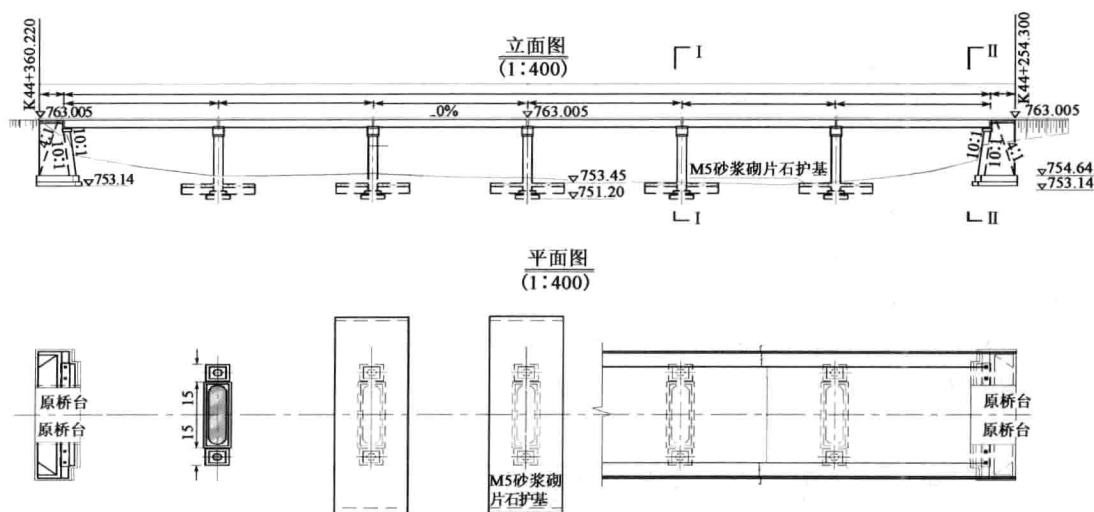


图 1.4 荣经大桥桥形布置图(高程单位:m)

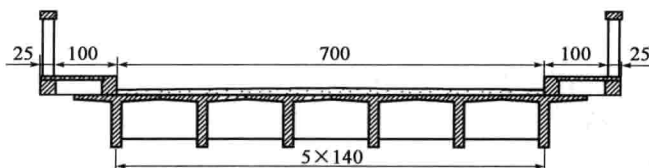


图 1.5 荣经大桥断面构造图(尺寸单位:cm)

随着社会经济的发展,该桥通行的交通量及车辆载质量已明显超过原设计标准。调查表明,经常过往的运煤车和运石车载质量达 18t。且因桥面较窄,人车混行,常造成桥上交通阻塞。1997 年 7 月,荣经县有关部门经研究,决定先对该桥进行现场检测及评定,依据评定结果对该桥进行加固改造或拆除重建。



1.2.1 原桥概况

1) 桥位河段概况

荣经大桥位于荣经县城内经河与小溪河汇合口下游约 60m 处,该河段相对较为顺直(图 1.6)。调查时为枯水季节,经河内水流量不大,小溪河已基本断流。但两河都属季节性山区河流,洪水期内水流来势凶猛,流量剧增。第 5、6 孔位为主河槽,水流湍急;第 2、3 孔位上游侧为砂卵石河滩;第 1 孔位上游约 80m 处有一人工导流渠,调查时渠内河水较经河水位高,水流较急。两岸均为卵石砌体护岸。

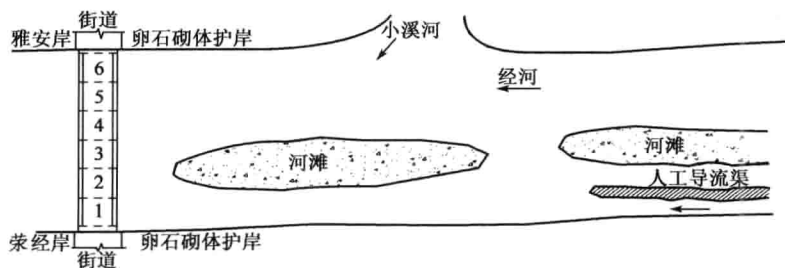


图 1.6 荣经大桥桥位河段略图

2) 桥位断面概况

由既有荣经大桥的竣工资料可知,1957~1965 年间河床高程平均下降约 1m,且横向相差不大,局部形成冲刷河槽。至 1997 年调查时,河床断面已发生较大的变化,经 30 多年的冲刷、变迁,河床高程平均下降 2~3m;第 1 孔位受人工导流渠渠水的影响,河床高程相对较低;建桥后由于桥墩对水流的影响,在每个墩位处形成局部冲刷坑,最大坑深达水面以下 2.2m 左右(图 1.7)。



图 1.7 河床变迁情况

3) 主梁状况

该桥上部结构由 6 根钢筋混凝土 T 梁构成,横向通过 7 根横隔梁连接。调查发现 T 梁下缘处裂缝数量较多,但裂缝间距和宽度均较小;梁腹部的裂缝数量相对较少,但延伸长度和开展宽度较大(图 1.8);横隔梁在相邻两根 T 梁的接缝处沿梁高方向出现裂缝;局部钢筋外露锈蚀。

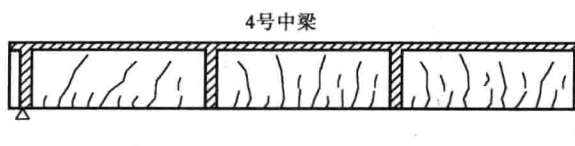


图 1.8 主梁裂缝分布



4) 桥面状况

该桥桥面铺装混凝土经多年使用后已出现坑洼、麻面,局部甚至出现空洞。桥面沿主梁翼缘接缝处出现纵向裂缝,其中,中间三条纵向裂缝已沿桥轴线全部贯通,裂缝宽度达到 3mm 左右;两边接缝处的裂缝尚未全桥贯通,沿桥纵向时续时断,裂缝宽度较中缝小(图 1.9)。

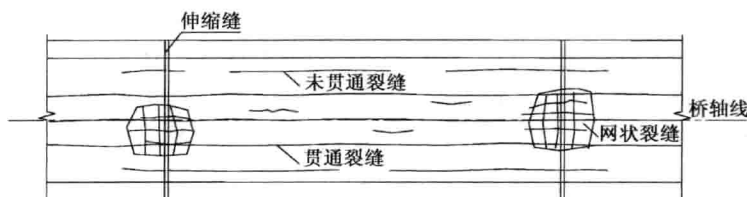


图 1.9 桥面裂缝状况示意

1.2.2 原桥承载力检测

为评定既有荣经大桥主体结构的承载能力和使用性能,1997 年 8 月对荣经大桥荣经岸边跨进行了现场测试,采用比原设计荷载等级重车略重的载货汽车(16t)按最不利受力方式进行静载试验,测定该跨各主梁的变形和最大裂缝宽度。

1) 主梁变形

实测各工况下每根梁跨中挠度值见表 1.1。主梁的最大挠度为 3.6mm。主梁在横向上成折线形,已明显不满足刚性横梁法的设计假定(图 1.10),表明桥梁的横向联系较弱,整体工作性能较差。但试验数据的残余变形很小,试验荷载卸载后各梁的变形尚能恢复加载前状态,表明桥梁经过长期承受与试验荷载相当的重车的反复作用,其塑性变形在荷载试验前已基本完成,在荷载试验作用下表现出较明显的弹性工作性能。

各工况下挠度测量结果(单位:mm)

表 1.1

梁号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号
工况						
工况 A(单重车偏载)	-3.0	-2.0	-1.0	-0.5	0	0
工况 B(两重车偏载)	-3.2	-3.6	-3.0	-2.0	-1.0	-0.2
工况 C(两重车正载)	-1.6	-1.8	-2.0	-2.2	-1.5	-1.0

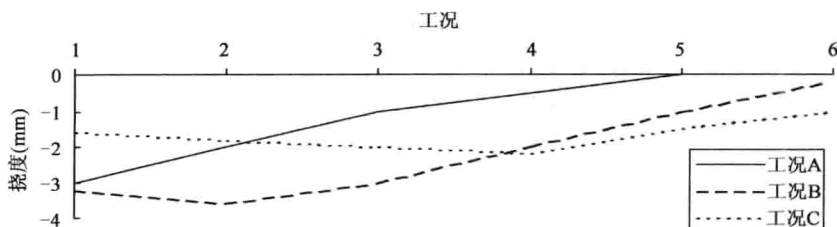


图 1.10 主梁在各工况下的变形图

2) 裂缝

主梁已存在较多裂缝,其中一部分裂缝上端延伸至梁肋与上翼缘的交界处。实测最大裂



缝宽度见表 1.2。

由表 1.2 可见,位于梁腹的裂缝间距和裂缝宽度均较大,最大宽度达到 0.35mm;而位于梁肋下缘的裂缝数量相对较多,间距和宽度较小,最大裂缝宽度为 0.15mm。鉴于普通钢筋混凝土结构在正常使用阶段都是带裂缝工作的,尽管腹板裂缝的开展宽度较宽,但对于主梁而言更应关注受力钢筋处裂缝的开展宽度。数据表明,主梁下缘的最大裂缝宽度接近但尚未超过《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)(以下简称《公预规》)规定的限值。因此,按照 B-T-B 的拓宽加固理念,在对腹板较宽裂缝进行修复后,通过在原 T 梁外侧增设抗弯和抗扭刚度均较大的箱梁,依据内力按照刚度进行分配的原理,可使新增箱梁承受大部分内力,减小原主梁内力,原主梁可继续投入使用。

最大裂缝宽度(单位:mm)

表 1.2

加载工况 \ 裂缝位置	1 号梁		3 号梁		4 号梁	
	下翼缘裂缝	梁腹裂缝	下翼缘裂缝	梁腹裂缝	下翼缘裂缝	梁腹裂缝
加载前	0.06	0.25	0.1	0.25	0.1	0.25
工况 A(单重车偏载)	0.1	0.30	0.1	0.3	0.1	0.28
工况 B(两重车偏载)	0.12	0.32	0.12	0.32	0.12	0.30
工况 C(两重车正载)	0.02	0.28	0.15	0.4	0.14	0.35

1.2.3 原桥结构性能分析

1) 提高荷载等级后的内力分析

对于桥梁宽度不宽的 T 梁桥,可采用刚性横梁法进行横向分布系数的计算,考虑到加固时汽—13、拖—60 级荷载已经废除,当时按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)(以下简称《通用规范》)执行的荷载标准为汽—20、挂—100,计算中则以汽—20、挂—100 为依据。横向分布系数计算结果见表 1.3。计算获得各主梁在活载作用下的最不利内力,并与恒载作用下产生的内力进行组合(表 1.4)。

1 号、2 号梁荷载横向分布系数

表 1.3

梁号	汽—20(m_{0q})	挂—100(m_{0g})	人群(m_{0r})	两重车偏载实测(m)
1 号	0.442	0.265	0.546	0.246
2 号	0.395	0.230	0.386	0.277

1 号、2 号主梁内力组合表

表 1.4

梁号	项 目	组合 I: 1.2× 恒载+1.4×汽车	组合 III: 1.2× 恒载+1.1×挂车	抵抗内力	抵抗内力/ 组合 I
1 号	$M_{\max}$ (kN·m)	1 408.96	1 286.52	1 237.50	0.878
	$Q_{\max}$ (kN)	351.67	332.87	349.93	0.995
2 号	$M_{\max}$ (kN·m)	1 162.06	1 179.68	1 237.50	1.065
	$Q_{\max}$ (kN)	327.45	391.11	349.93	1.069

由表 1.3、表 1.4 可见,在汽—20、挂—100 级荷载作用下,1 号梁的计算内力最大,表明原桥边梁的受力为最不利。



2)原主梁承载能力分析

原桥主梁受力钢筋采用两片焊接骨架,受拉主钢筋为 8 ϕ 32(5 号钢筋),腹筋为 2 ϕ 32 弯起钢筋(5 号钢筋)和 ϕ 8 双肢箍筋(图 1. 11),混凝土采用 C25。用极限状态法计算跨中截面的抵抗弯矩为 $M_d=1\,237.50\text{kN}\cdot\text{m}$,支座截面抵抗剪力为 $Q_d=349.93\text{kN}$ 。主梁抗弯、抗剪承载力均小于最不利组合内力,已不满足汽—20、挂—100 级荷载要求。

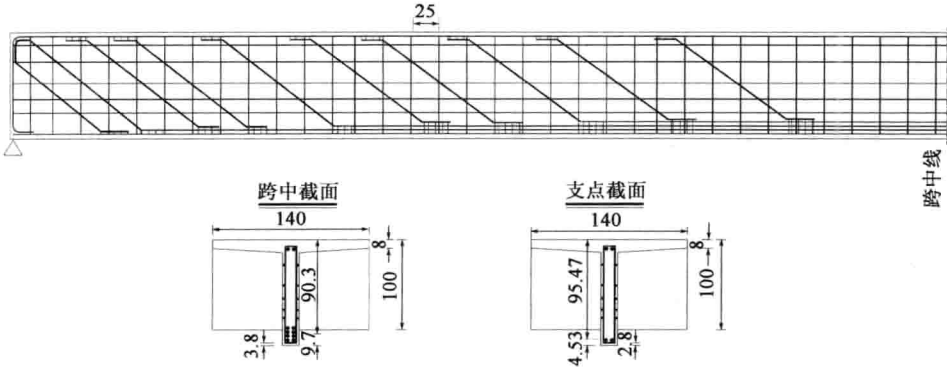


图 1. 11 主梁钢筋构造图(尺寸单位:cm)

3)主梁钢筋应力分析

钢筋混凝土结构在正常使用条件下受拉钢筋的应力应满足《公预规》的要求。原桥 1 号、2 号梁在汽—20 级荷载和试验荷载作用下主筋应力计算结果见表 1. 5。原主梁受拉主钢筋为 5 号钢,其容许应力值为 160MPa。由表 1. 5 可见,在汽—20、挂—100 级荷载作用下,1 号梁的主钢筋应力已超过《公预规》容许值。

原桥主梁主筋应力表(单位:MPa) 表 1. 5

梁号	汽—20 标准荷载		检测荷载		《公预规》容许值
	计算弯矩	计算应力	计算弯矩	计算应力	
1 号	956.65	175.63	833.28	152.98	160
2 号	800.32	146.93	702.31	128.94	

4)主梁裂缝和变形分析

汽—20、挂—100 级荷载和试验荷载作用下主梁的最大裂缝宽度计算结果见表 1. 6。由表 1. 6 可见,在汽—20 级荷载作用下,受拉钢筋重心处对应的计算最大裂缝宽度略大于《公预规》限值。

主梁的最大裂缝宽度 表 1. 6

项 目		组合 I	组合 III	检测荷载		《公预规》限值
弯矩 $M(\text{kN} \cdot \text{m})$		956.65	1 133.38	833.28		
缝宽 $\delta_{\max}(\text{mm})$	短期	0.14	0.12	0.11	0.15(实测下缘)	$\delta_{\text{I}}=0.15$
	长期	0.17	0.15	0.13		$\delta_{\text{III}}=0.25$

汽—20、挂—100 级荷载和试验荷载作用下主梁变形的计算结果见表 1. 7。由表 1. 7 可见,主梁在汽—20、挂—100 级荷载作用下的变形尚未超过《公预规》限值,且实测校验系数为:



$$\eta = \frac{\text{实测挠度}}{\text{理论挠度}} = \frac{3.6}{9.73} = 0.37$$

与普通钢筋混凝土梁挠度的结构校验系数 0.55~0.65 相比,属正常范围,表明主梁的刚度尚能满足汽—20、挂—100 级荷载的要求。

主梁挠度表

表 1.7

项 目	汽—20	挂—100	检测荷载		《公预规》限值
跨中弯矩 $M(\text{kN} \cdot \text{m})$	495.20	735.38	278.27		$f_p = \frac{L}{600} = 27.17\text{mm}$
跨中挠度 $f_p(\text{mm})$	17.32	25.72	9.73 (计算值)	3.6 (实测值)	

综上所述,荣经大桥原主梁按汽—13、拖—60 荷载标准进行设计。鉴于加固时实行的荷载等级和实际通行荷载等级需求,对该桥按照汽—20、挂—100 级荷载进行了计算分析,并以 16t 的载货汽车进行了荷载试验。计算表明,原主梁抗弯、抗剪承载能力不满足汽—20、挂—100 级荷载要求,正常使用荷载作用下的主钢筋应力超过《公预规》限值,钢筋重心处裂缝的开展宽度和挠度尚能满足规范要求。因此,需采取措施对原主梁进行加固,才能满足新的荷载等级要求。

1.3 拓宽加固桥梁的力学性能分析

1.3.1 B-T-B 拓宽加固桥梁的总体布置

根据荣经县的交通和城市建设要求,需要对荣经大桥进行拓宽加固。拓宽加固后桥梁的汽车荷载等级提高到汽—20、挂—100,人群为 $3.5\text{kN}/\text{m}^2$;桥面拓宽后的宽度为 $14\text{m}(\text{行车道}) + 2 \times 2.25\text{m}(\text{人行道}) = 18.5\text{m}$;桥面纵坡 0%,桥面横坡 1.5%。根据前面的分析,原主梁的抗弯和抗剪承载能力虽不满足汽—20、挂—100 级荷载要求,但主梁的裂缝开展宽度和刚度尚能满足汽—20、挂—100 级荷载要求。根据 B-T-B 拓宽加固桥梁的理念,在原桥 T 梁桥两侧各增设一根同跨径、梁高 1.1m、顶宽 3.55m、底宽 2m 的横张预应力混凝土箱形梁,跨间增设 6 道横隔梁,使新建部分和旧桥连接成为整体;其上设置横挑人行道,悬臂长 1.5m(图 1.12)。

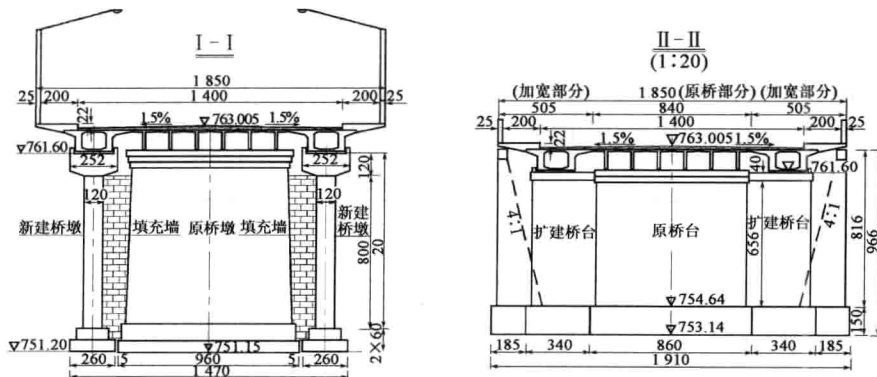


图 1.12 荣经桥拓宽加固改造总体布置图(尺寸单位:cm)



1.3.2 力学分析模型

1) 主体结构的简化

拓宽后的荣经大桥由新增的两根预应力混凝土箱形梁和4根横隔梁与原T梁和横隔梁形成空间结构体系。桥梁宽跨比已大于1,且桥梁新增预应力混凝土箱形梁与原T梁刚度相差较大,常用的空间简化计算方法已不适用。为此,采用了SSAP软件建立空间梁格模型进行分析。模型简化时,将每根原T梁简化为一根梁,模拟梁的形心、面积、抗弯、抗扭惯性矩等几何特性与原T梁保持一致;将每根新增箱形梁简化为基于腹板的两根独立梁,并将每根新增箱形梁的面积、抗弯、抗扭惯性矩等几何特征值平均分配给两根模拟梁(图1.13、图1.14)。

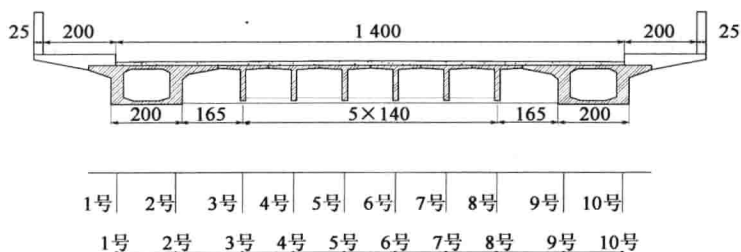


图 1.13 荣经桥拓宽加固空间模型简化方法(尺寸单位:cm)

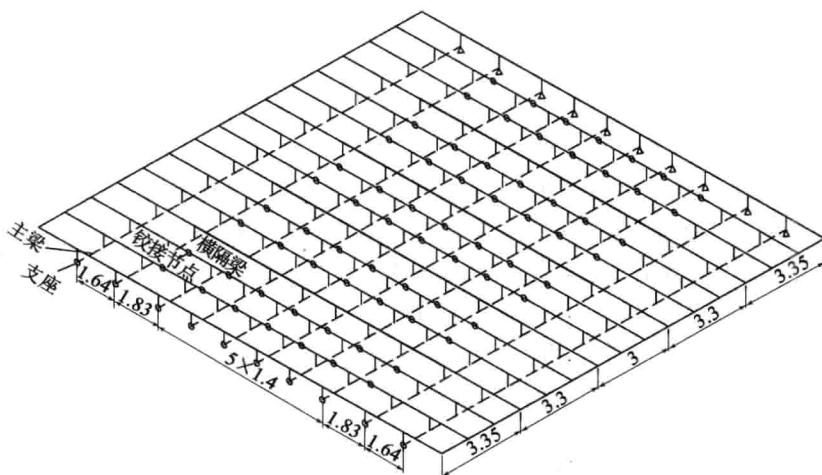


图 1.14 荣经桥拓宽加固空间模型(尺寸单位:m)

2) 主梁间连接构造的处理

空间梁格模型中主梁间的连接方式可以处理为刚接或铰接。为尽量减少对原有结构的损伤和简化施工工艺,拓宽加固设计中新增箱形梁与原有T梁间设置专门的连接钢筋。鉴于原有主梁间的横向联系较弱,在分析模型中将箱形梁与T梁翼缘之间、原T梁翼缘之间的纵向连接均简化为铰接。新增横隔梁的受力主筋沿桥梁横向通长布置,且一次性浇筑混凝土,横向



连接性能较好,因此,对新增横隔梁均采用刚性连接。

3) 汽车荷载的模拟

汽车荷载作用在桥面时,由于车轮及桥面铺装层的影响,车轮对桥梁的作用实际上是有限范围内的面荷载。为简化模拟难度,将汽车荷载均以集中力直接作用在结构单元上,由弹性力学知识可知,这种简化对荷载作用点附近的局部范围内计算结果虽有影响,但对整体结构计算结果的影响是可以忽略不计的。

1.3.3 各工况下的内力分析

1) 一期恒载

由于箱形梁施工时与原有结构完全独立,故不对原有结构内力产生影响。新增横隔梁须在横桥向贯穿原有 T 梁,其重力应由各梁共同承担。因此,原 T 梁除承担自身重力和原横隔梁所产生的恒载内力外,还应承担新增横隔梁所产生的恒载内力,其计算结果见表 1.8。

一期恒载内力表

表 1.8

梁 号	1 号(半箱梁)	2 号(半箱梁)	3 号(原 1 号 T 梁)	4 号(原 2 号 T 梁)	5 号(原 3 号 T 梁)
跨中弯矩 M ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	613.52	613.52	436.20	436.20	436.20
支点剪力 Q (kN)	150.57	150.57	76.66	76.66	76.66

2) 二期恒载

二期恒载是指桥梁主体结构完成以后增加的混凝土桥面铺装层、人行道板及栏杆的自重等。通常的计算分析是将二期恒载平均分配给每根主梁,这在主梁刚度相差不大时,其计算精度是满足设计要求的。但在 B-T-B 加固方案中,由于结构的整体作用,二期恒载产生的内力应按刚度进行分配。因箱形梁较原 T 梁抗弯、抗扭刚度大很多,箱形梁将承担较多的二期恒载内力。在此,分别用常规方法(不考虑结构的整体作用而将荷载均分到每根主梁)和 SSAP 程序(按刚度进行内力调整)进行计算分析,结果见表 1.9。由表 1.9 可见,按刚度进行内力调整后,二期恒载作用下原有 T 梁的跨中弯矩较平均分配时的计算值减小 40% 以上,支点剪力减小约 20%。因此,采用 B-T-B 拓宽加固桥梁时,对原 T 梁的减载效应十分明显。

二期恒载内力表

表 1.9

梁 号		1 号(半箱梁)	2 号(半箱梁)	3 号(原 1 号 T 梁)	4 号(原 2 号 T 梁)	5 号(原 3 号 T 梁)
跨中弯矩 $M(\text{kN} \cdot \text{m})$	按刚度调整 M_1	205.80	259.0	63.91	67.16	69.17
	平均分配 M_2	201.34	201.34	116.24	116.24	116.24
	$\frac{M_1 - M_2}{M_1}(\%)$	2.22	28.64	-45.02	-42.22	-40.49