

# 基于文保要求的南京长江大桥双曲拱桥 加固方案比选及设计

秦向杰<sup>1</sup>, 何初生<sup>1</sup>, 陈春<sup>2</sup>, 张亚梅<sup>2</sup>, 刘华<sup>3</sup>, 郭建<sup>4</sup>

(1. 东南大学 建筑设计研究院有限公司, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 材料科学与工程学院;  
3. 中铁大桥勘测设计集团有限公司; 4. 南京市公共工程建设中心)

**摘要:**南京长江大桥是长江上第一座由中国自行设计和建造的双层式公铁两用特大桥梁,它是不可移动文物。其公路桥与两侧桥台相接的引桥采用了中国自主创新的双曲拱桥。经过近50年的运营,双曲拱桥的耐久性病害非常严重,迫切需要维修加固。加固改造必须遵循文物保护要求的“修旧如故”的总原则,设计通过多方案比选,最终确定在不改变其结构体系、基本不改变其外观的前提下,适当恢复并提高其承载力,着重提升其耐久性。通过双曲拱桥主拱肋外包薄层混凝土、更换拱上轻质泡沫混凝土填料等技术措施,达到了结构加固及文物修缮的相关要求及预期。

**关键词:**南京长江大桥;双曲拱桥;结构加固;文物保护

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

南京长江大桥是长江上第一座由中国自行设计和建造的双层式铁路、公路两用桥梁,在中国桥梁史和世

界桥梁史上具有重要意义,有“争气桥”之称。它不仅是新中国技术成就与现代化的象征,更承载了中国几代人的特殊情感与记忆。2014年7月大桥入选不可移动文物,2016年9月大桥桥头堡入选首批中国20世纪建筑遗产名录。引桥采用富有中国特色的双曲拱桥形式,这种桥型是1964年无锡县交通局桥梁工程队

\*\*\*\*\*

(2) 风屏障可以有效抑制扁平箱梁的涡激振动,相同透风率情况下,圆形孔风屏障对扁平箱梁涡振性能的提高更为积极。

(3) 不同开孔形式的风屏障的防风效果有差异验证了业界关于此类流线形梁体对气动外形十分敏感的结论。

(4) 不同开孔形式导致风屏障防风效果产生差异的机理有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 郑史雄,袁达平,张向旭,等.大跨桥梁桥塔遮风效应对列车气动参数的影响研究[J].桥梁建设,2016(3).
- [2] 张国宁.从大贝尔特海峡大桥、厄勒海峡大桥到费马恩海峡大桥的跨越[J].中外公路,2016(1).
- [3] 潘韬.大跨度悬索桥主缆成桥线形分析[D].武汉理工大

学硕士学位论文,2006.

- [4] 雷俊卿,郑明珠,徐恭义.悬索桥设计[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [5] 严国敏.现代悬索桥[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [6] 葛耀君.大跨度悬索桥抗风[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [7] 李波,杨庆山,冯少华.防风栅对高速列车挡风作用的数值模拟[J].工程力学,2015(12).
- [8] 何玮,郭向荣,朱志辉,等.风屏障高度对城轨专用斜拉桥车桥系统气动特性的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2017(8).
- [9] 黄斌,刘晖,龚尚国.跨海大桥桥面风环境的风洞试验[J].中国科技论文,2011(11).
- [10] JTG/T D60-01-2004 公路桥梁抗风设计规范[S].
- [11] 陈政清.桥梁风工程[M].北京:人民交通出版社,2005.

收稿日期:2019-10-17(修改稿)

基金项目:南京市科技计划项目(编号:201727002)

作者简介:秦向杰,男,硕士,高级工程师.E-mail:48301510@qq.com

发明创造的,由于其材料用量省,在那个资金短缺的年代该桥型曾风靡中国,但随着国家经济建设的发展,交通量的增加,该桥型已不能完全满足交通荷载的增长需求。

南京长江大桥公路引桥双曲拱桥位于主线桥两端,分别与T梁引桥、引道连接,共计22孔,其中北岸4孔,长137 m;南岸18孔,长623.18 m。南岸和北岸双曲拱桥的桥宽均为20.1 m,车行道宽15 m,两侧各有2.55 m宽(含栏杆)的人行道。各孔均为等截面悬链线无铰拱,矢跨比 $1/4 \sim 1/5$ 。南、北岸引桥跨径为

27.68~34.9 m。另有分岔落地回龙桥共12孔,也是双曲拱桥。回龙桥全桥宽13.1 m,车行道宽8 m,两侧各有2.55 m宽(含栏杆)的人行道。回龙桥总长328.2 m。回龙桥跨径分32.7 m和22 m两种,各孔均为等截面悬链线无铰拱,10肋9波。

下部结构除回龙桥22 m跨径采用扩大基础外,其余均为群桩基础。拱上填料为石灰煤渣土(15:70:15),填料重度 $\gamma=16.5 \text{ kN/m}^3$ ,填料顶面为4 cm沥青混凝土+1.5 cm沥青砂。南北引桥双曲拱桥典型横断面见图1。

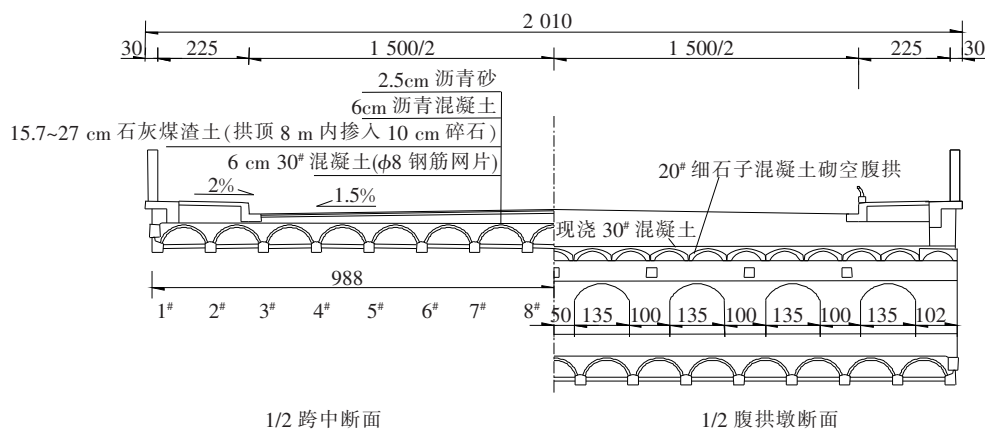


图1 南北引桥双曲拱桥典型横断面图(单位:cm)

## 1.2 老桥病害

检测发现,双曲拱桥以耐久性病害为主,并有加速发展的趋势。主拱圈拱肋下表面混凝土出现沿主筋的开裂、剥落、露筋,外露钢筋锈蚀严重。混凝土碳化深度较大,部分钢筋的腐蚀电位较高。拱波波顶局部纵桥向裂缝,桥面破损严重,泄水管腐蚀破损,腹拱波横桥向裂缝等。

根据检测评定结果,双曲拱桥上部结构状况较差,南岸双曲拱桥、北岸双曲拱桥、回龙桥整体技术状况分别评定为5类、4类、4类。表明拱桥主要构件有大的缺损或严重缺损,严重影响桥梁使用功能或不能正常使用。

4孔双曲拱桥的荷载试验表明:拱肋结构各横向联结较差。卸载后,结构的相对残余应变率离散性较大,约50%的主要测点相对残余应变率大于20%,表明结构的弹性恢复能力较差。双曲拱桥各片拱肋横向分布测试表明:实测荷载横向分布曲线与理论计算曲线部分测点存在较大突变,表明双曲拱桥的横向刚度有所降低。通过对南北岸引桥动力测试,实测基频均小于理论基频值,评定标度为5,说明拱桥整体性降低。

对老桥结构进行承载力检算结果表明:拱桥现状承载能力不能满足原设计汽车—18级荷载的要求,仅

能满足汽车—10级荷载的通行要求。

## 2 加固方案比选

经过多年研究论证,从桥梁现状病害出发,充分考虑桥梁历史地位及文物保护要求,确定南京长江大桥公路桥维修改造总原则为“修旧如故”,尽可能多地保留南京长江大桥的历史文化价值。针对双曲拱桥,具体改造理念包括:① 维持双曲拱桥的结构体系与外观基本不变;② 上部结构重量基本不变;③ 重点提升结构的耐久性;④ 选用合理的材料、工艺,确保加固目标。

在双曲拱桥方案比选阶段,也曾经考虑保留下部结构,上部结构全部拆除,更换为肋拱桥。此方案利用原下部结构,上部构造拆除重建,可以彻底保证重建后结构的安全、耐久。但肋拱桥对结构体系做了重大调整,外形改变也很大,与文物保护总原则完全背离,因此最终被否决。

双曲拱桥主拱圈加固方式较多,通过前期调研及工程实践,其中最为有效的是拱肋增设底板,设为箱形断面的方案,但该方案对拱肋外形带来根本性的改变,

也不符合文物桥梁维修改造总原则要求。综合权衡,在保证文保要求及主体结构承载力提升双重制约下,设计提出对下部基础基本保留利用,上部主拱圈外包薄层混凝土增大截面,并对桥面系进行改造,共提出两个方案。

2.1 方案 1

方案 1:保留下部结构,上部结构主拱圈增大截面法加固,换填拱上填料,改造立面见图 2。

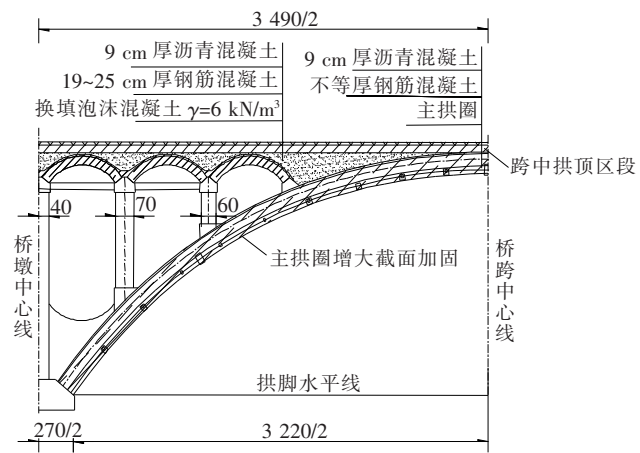


图 2 方案 1:双曲拱半立面构造图 (单位:cm)

该方案主要考虑结构病害大多为耐久性病害,主体受力结构拱肋未见明显破坏性的病害,桥梁结构较为完整。且由于桥面上采取了限制货车通行的措施(该措施以后仍将保持),大大减轻了可能的超载货车对结构的破坏。

由于原有拱上填料受水侵蚀变形破坏严重,此次加固拟更换全部填料为轻质泡沫混凝土填料。该材料自重轻、强度高、整体性好、施工方便。在泡沫混凝土填料顶面施工钢筋混凝土板及沥青混凝土。

2.2 方案 2

方案 2:保留下部结构,上部结构主拱圈增大截面法加固,去除拱上填料,增设桥面板,改为梁板式拱上建筑,改造立面见图 3。

该方案主拱圈加固方法同方案 1,考虑到拱上填料一旦换填改造完成,后期检查及养护难度较大。结合上部结构减载的要求,方案 2 采用挖除拱上填料,加高原腹拱墩、增设盖梁后,再设置混凝土桥面板,形成梁板式拱上建筑。桥面板采用结构简支、桥面连续。

2.3 方案比较

双曲拱桥加固方案 1、2 比较见表 1。

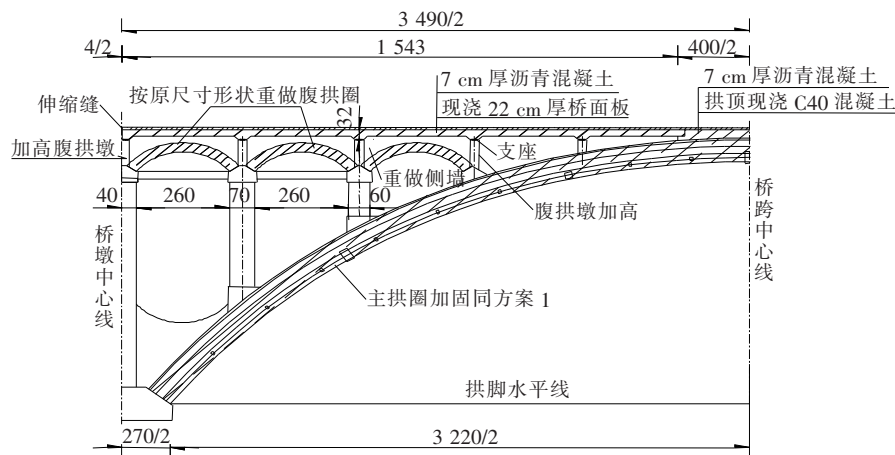


图 3 方案 2:双曲拱半立面构造图 (单位:cm)

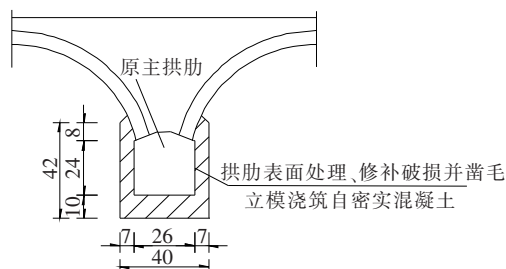
表 1 双曲拱桥加固方案比较

方案	方案适用前提	施工难易程度	工程造价比较	加固后是否忠实于原结构受力体系	方案综合评价	是否推荐
方案 1:拱肋增大截面,换填拱上填料	原结构承载力差得较多,上部结构总重量基本保持不变	加固构件多,要求高,工期长	中	结构受力体系与原结构一致	主要受力构件得到保护与加强,结构承载力大幅提高,结构体系没有改变	推荐
方案 2:拱肋增大截面,拱上建筑改梁板式结构	原结构承载力差得多,上部结构总重量需要进一步减载	加固构件多,要求高,桥面板预制,工期较长	高	增加桥面板受力,主拱圈受力跨中实腹段改变较大	主要受力构件得到保护与加强,结构承载力大幅提高,结构体系有一定改变	

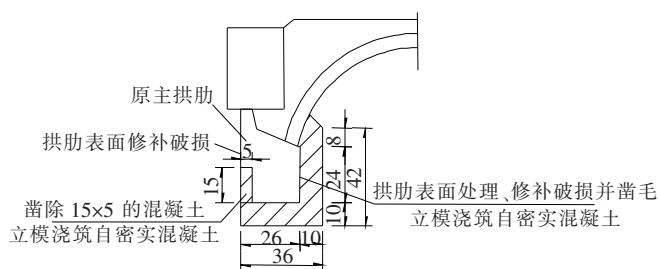
由表1可见:方案1主体结构和外观均忠实于原结构;方案2外观与原结构基本一致,但拱上建筑的共同受力方式同原结构相差甚远。经过综合比选,并会同有关部门多轮共同协商讨论,按照大桥双曲拱桥文物“修旧如故”的总原则,忠实于双曲拱桥原结构受力体系,最终采用方案1作为南京长江大桥双曲拱桥维修加固的实施方案。

### 3 实施方案综述

维修加固主要包含3大部分内容:主拱圈加固及横系梁加强、填料及桥面更换、附属构造维修。



(a) 跨中截面中拱肋



(b) 跨中截面边拱肋

图4 拱肋增大截面示意图(单位:cm)

此次改造将原有拱上石灰煤渣土填料全部更换为A06等级泡沫混凝土。泡沫混凝土上现浇19~25 cm厚钢筋混凝土板。为保证桥面行车舒适性,同时降低钢筋混凝土板端部锚力对老桥的不利影响,在板端每两跨设一道伸缩缝,以提高桥面的耐久性与防水性能。钢筋混凝土板顶面设置9 cm沥青混凝土。

防排水设施的更新与加强也是此次维修改造的重点,采用多重防排水设施,加强了桥面防排水,增加了拱背防水,加密了泄水管,优化了填料渗水的排放方式。其他拱上建筑基本维持不变,主要进行裂缝、缺陷修补和耐久性涂装。

### 4 为满足文保要求采取的关键措施

该工程由于文物保护的特殊需求,其加固限制条件较多,最突出的矛盾是既要维持原有结构体系与外观,又要大幅度提升结构的承载能力、使用功能与耐久性。针对这些矛盾和需求,在分析和借鉴相似工程的基础上,以基本不影响结构整体外观为前提,该桥加固设计的关键措施达到了大力提升双曲拱桥承载能力的

根据主拱圈病害特征,对所有拱肋外包钢筋混凝土,拱脚附近的拱背加厚混凝土,增加结构刚度,提高桥梁承载能力及原结构的耐久性。主拱圈增大截面采用C35模筑自密实混凝土,拱肋底面加厚10 cm,中拱肋侧面各加宽7 cm,边拱肋内侧加宽10 cm,外侧面尺寸不变,见图4。根据结构受力需要,在纵向腹拱墩之间的拱圈顶面凿除1 cm厚的混凝土层,并重新浇筑一层8 cm厚混凝土,并在混凝土内设置一定数量的纵横向受力钢筋,拱背混凝土采用常规C40混凝土浇筑。在主跨跨中附近原4道小拉杆增大为横系梁,对横向联系进行了加强。

目的。

#### 4.1 薄层自密实混凝土增大拱肋截面及横系梁增强措施

##### (1) 拱肋增大截面措施

主拱圈是双曲拱桥的主要受力构件,主拱圈由拱肋、拱波、拱板、横向联系4部分组成。当初设计时充分考虑了主拱圈各组成构件的共同受力,因此截面尺寸取值较小,加上风雨侵蚀,拱肋混凝土锈胀开裂,导致截面刚度下降,主拱圈的承载能力已不能满足现有荷载的要求,需进行加固。

主拱圈加固采用拱肋外包混凝土增大截面,可以大幅提升结构承载能力,同时也可以覆盖拱肋的耐久性病害,因此该方案是主拱圈加固的优选方案。但若外包截面采用常规混凝土浇筑,根据CJJ/T 239—2016《城市桥梁结构加固技术规范》,梁和受压构件的新浇筑混凝土层厚度不宜小于150 mm,这将会带来外观改变的极大风险,对文保要求提出了新的挑战。

为了减少外观的变化,设计在满足新加截面钢筋最小保护层厚度的前提下,尽量减小加固截面尺寸。经反复论证,最终确定拱肋加固材料采用自密实混凝土。



土,在原主拱圈尺寸基础上底面加厚 10 cm,中拱肋侧面各加厚 7 cm,边拱肋外侧不加,内侧加厚 10 cm。加固工艺采用自拱脚往拱顶分节段压注的方法。

#### (2) 横系梁增强措施

此桥拱板采用了填平式拱板,拱板在波顶位置尺寸最薄,因此部分拱板在施工及使用过程中产生了纵桥向裂缝,加上拱肋横向联系均为截面尺寸较小的小拉杆连接(截面尺寸 8 cm×11 cm),导致横向各片拱肋协同受力状况较差,这在改造前荷载试验结果中也有反映。后期由于抗震需要在每跨跨中及四分点做了大横梁加强(截面尺寸 25 cm×38 cm),即使这样,拱顶由于活载传力路径最短,拱肋间的横向分布在跨中附近还是偏弱。综合考虑,对每跨跨中附近原 6 根小拉杆进行截面增大,增大后的尺寸为 20 cm×29 cm。通过横系梁增强,可使横向各片拱肋受力更加均匀,主拱圈总体承载能力进一步提高,而截面外观改变也降至最小。

#### 4.2 轻质泡沫混凝土填料及钢筋混凝土板复合桥面的应用

原双曲拱桥拱上填料为石灰煤渣土,该材料是 20 世纪 60 年代的产物,近 50 年的运营表明:该填料由于长期水损坏严重,导致其自身强度降低及桥面沥青铺装的维修不彻底。设计在 EPS 板材、聚氨酯发泡材料、泡沫混凝土、EPS 颗粒混合土、轻质陶粒混凝土、固化粉煤灰、石灰粉煤灰、砂砾填料等众多填料中,经过反复比较论证,最终采用比重轻、施工可行、性能稳定的泡沫混凝土。

泡沫混凝土顶面的桥面铺装结构层是此次设计成败的关键。设计创新性地在泡沫混凝土顶面设置一层不等厚的钢筋混凝土板作为复合桥面基层,然后在钢筋混凝土板顶面铺筑沥青混凝土,既满足了结构整体受力的需要,又满足了行车舒适性。

泡沫混凝土的应用是在保证结构强度及耐久性的前提下,充分实现了桥梁总体荷载不增加的要求。泡沫混凝土顶面设置连续配筋混凝土复合桥面,一方面

可以大大增强结构的长期使用耐久性;另一方面整体式钢筋混凝土板可以分散后期桥面活载,提高双曲拱桥结构的整体受力性能。两者相结合,总体上既保留了双曲拱桥结构原有受力体系,也满足了桥梁文物保护的相关要求。

## 5 结语

南京长江大桥双曲拱桥维修加固兼具文物保护及提升结构承载能力的双重需求。在设计方案论证比选阶段,最终维持了原结构受力体系及原桥外观;施工图设计阶段,通过采用薄层混凝土增大拱肋截面、增强拱肋横系梁、换填拱上轻质泡沫混凝土填料及在填料顶面增设整体钢筋混凝土板等措施,大幅度提升了桥梁结构承载能力及结构耐久性能。

南京长江大桥于 2018 年 12 月 28 日改造完毕并恢复通车,经过一段时间的运行,双曲拱桥受力状况良好,改造后外观与原设计基本一致,达到了设计预期,也必将成为文物桥梁加固设计的典范。

#### 参考文献:

- [1] 南京市勘测设计院. 南京长江大桥公路引线工程竣工图[Z], 1968.
- [2] 交通部科学研究院. 公路双曲拱桥——上部构造设计计算[M]. 2 版. 北京:人民交通出版社, 1983.
- [3] 湛润水, 周锦中. 双曲拱桥加固改造成套技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2009.
- [4] 黄春亮, 骆俊杰, 李蓉. 填芯加固法在双曲拱桥加固中的应用[J]. 中外公路, 2018(1).
- [5] 姚玲森. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社, 2010.
- [6] CJJ/T 239—2016 城市桥梁结构加固技术规程[S].
- [7] 丁鹏, 周建庭, 杨俊, 等. UHPC 套箍加固拱桥承载力研究[J]. 中外公路, 2019(4).
- [8] 赵学, 贾艳敏, 郭凯强, 等. PC 梁受压区加固后新增混凝土高度分析[J]. 中外公路, 2018(3).