

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqfh.250104

苏州市鹤溪大桥加固设计

顾赛辉, 宋 炜, 娄 凡

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 伴随我国公路交通事业在过去40 a的快速发展, 国内桥梁建设水平得到快速提升, 但由于前期缺少经验积累、车辆超载等客观原因, 21世纪初之前建造的不少大跨预应力混凝土连续梁桥出现了主跨跨中下挠、腹板斜裂缝等重要病害, 严重影响桥梁使用安全。该类桥梁往往位于交通要道且未达到原设计使用年限。为保证桥梁结构可靠、减少工程废弃和重复投资、降低社会影响, 应对此类桥梁进行科学的分析研究和正确的加固设计与施工, 以延长此类桥梁使用寿命。苏州市的鹤溪大桥为一座跨越京杭运河、主跨为86 m的预应力混凝土连续梁桥, 检测中发现该桥主跨跨中下挠、腹板斜裂缝等典型病害, 因此以该桥为例介绍该类桥梁的维修加固设计方案和主要计算分析。

关键词: 预应力混凝土连续梁; 加固; 体外预应力; 增大腹板截面

中图分类号: U445.7⁺2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0212-05

Reinforcement Design of Hexi Bridge in Suzhou

GU Saihui, SONG Wei, LOU Fan

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: With the rapid development of highway transportation industry in the past 40 years in China, the level of bridge construction has been rapidly improved. However, due to objective reasons such as lack of experience accumulation and vehicle overload in the early stage, many long-span prestressed concrete continuous beam bridges built before the beginning of this century have suffered from serious diseases such as deflection and web diagonal cracks in the middle of main span, which seriously affect the safety of bridge use. This type of bridge is often located on transportation arteries and has not reached its original design service life. In order to ensure the reliability of the bridge structure, reduce the engineering waste and repeated investment, and minimize the social impact, the scientific analysis and research should be conducted on this type of bridge, and the correct reinforcement design and construction should be carried out to lengthen its service life. The Hexi Bridge in Suzhou City is a prestressed concrete continuous beam bridge with a main span of 86 m, which spans the Beijing-Hangzhou Grand Canal. During inspection, the typical diseases such as mid-span deflection and web diagonal cracks are found in the main span of the bridge. Therefore, the maintenance and reinforcement design scheme, and the main calculation analysis of this bridge are introduced.

Keywords: prestressed concrete continuous beam; reinforcement; external prestressing; increase of web cross-section

1 工程概况

鹤溪大桥位于江苏省苏州市望亭至东桥一级公路, 跨越京杭大运河, 东接312国道, 建成于2004年, 全长为500 m。主桥采用三跨预应力混凝土变截面连续箱梁, 跨径组合为57 m+86 m+57 m。引桥采用双向预应力混凝土等截面连续箱梁, 跨径组合西岸3×35 m+3×35 m, 长210 m, 东岸4×35 m, 长140 m。桥面总宽32 m, 单幅桥面宽15.5 m, 双向6车道。

2022年5月, 检测中心对鹤溪大桥进行检测与

评估。该桥左右幅主桥上主要承重部件评分均达到4类, 出现明显的剪切斜裂缝, 严重影响桥梁结构安全; 引桥主要构件评分为2类, 可正常使用。为保证大桥的安全运营, 相关管理部门及时禁止货运交通。经过专家评估, 为减少工程废弃和重复投资、降低社会影响, 确定对鹤溪大桥进行维修加固后保留使用。

2 桥梁病害分析

2.1 桥梁检测结果

2022年5月检测报告揭示, 鹤溪大桥主桥上部结构(预应力混凝土连续箱梁)存在明显的结构性受力裂缝, 主要表现为腹板斜裂缝延伸至底板且最大

收稿日期: 2025-02-10

作者简介: 顾赛辉(1980—), 男, 本科, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

缝宽达到 0.39 mm,箱室内部锚固齿块开裂最大处达到 5 mm,存在明显的结构性安全隐患,主桥桥面线型存在下挠趋势;引桥(小箱梁)主要构件使用情况良好,未出现明显病害。该桥左右幅主桥的上部梁体出现明显的剪切斜裂缝,影响结构安全,部件评分为 4 类^[1]。图 1 以右幅主桥的主梁为例示意腹板斜裂缝分布情况。

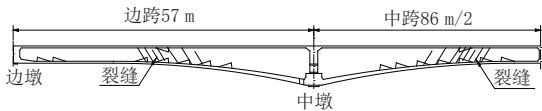


图 1 右幅主桥主梁腹板斜裂缝分布

2.2 原结构计算分析

鹤溪大桥的主要病害集中于主桥的腹板,故对主梁的纵向进行计算分析。由于该桥设计于 2002 年,采用的是 85 规范,为了更准确分析病害原因和理解规范更新影响,根据原设计文件,按照原规范和现行规范对主梁纵向分别进行计算。

(1)按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)及当时荷载汽超-20 级、挂车-120 进行承载能力验算。计算结果表明,主梁在承载能力极限状态下的抗弯抗剪承载能力满足规范要求,正常使用极限状态下各项验算结果亦满足规范要求。

(2)按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)及现行荷载公路-I 级进行承载能力验算。计算结果表明,主梁在承载能力极限状态下的抗弯承载能力满足规范要求,抗剪承载能力不满足规范要求;主梁在正常使用极限状态下正截面抗裂(正应力)满足规范要求,斜截面抗裂(主拉应力)不满足规范要求。

综上,按照现行规范验算,计算结果提示主梁的抗剪能力不足,且相应截面位置与实际裂缝位置基本吻合。

2.3 病害原因分析

检测报告揭示主桥箱梁的结构性受力裂缝主要表现为腹板斜裂缝,且计算分析也表明主桥的腹板抗剪承载能力在现行规范下缺口较大。结合原设计文件和以往类似工程经验,导致主桥承载能力不足的具体原因主要有以下几方面:(1)原设计腹板宽度取值较小;(2)整体梁高偏小;(3)箍筋间距设置过大;(4)实际竖向预应力损失比理论计算大;(5)实际交通荷载比设计荷载大。

鉴于上述分析,要改善主桥的结构使用性能,应

提高主梁的抗剪能力,并补充主梁的刚度,减缓主梁跨中后期继续下挠。

3 加固设计

经前文分析,主梁病害的主要原因是腹板抗剪能力不足,则加固设计的主要目的是提高主梁的抗剪能力,减小主梁腹板斜截面主拉应力,抑制箱梁的进一步下挠。为提高混凝土梁体抗剪能力,常用的加固方法有增大截面法、粘体钢板法、体外预应力法等^[2]。经过方案比选,本工程确定采用增加腹板截面和体外预应力两种方法进行加固,通过主动和被动相结合的方式保证加固效果。

加固设计主要技术标准:(1)设计使用年限,维修加固后 20 a;(2)荷载标准,汽—超 20,挂—120,人群荷载采用 3.5 kPa,维修加固后限载 49 t;(3)桥下通航净空,维持现状。

3.1 增大腹板截面设计

采用腹板外包混凝土的方法增大原桥腹板厚度,可有效减小主拉应力、提高腹板抗剪承载力,从而提高老桥承载力,达到加固目的。增大截面范围为中支点前后各 35 m 范围以及端部近端横梁 2 m 范围内,箱室内腹板内侧采用 C60 自密实钢筋混凝土增厚 16 cm,并增设钢筋网(见图 2)。

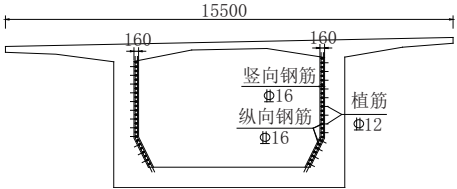


图 2 腹板加厚配筋(单位:mm)

为保证新浇混凝土与原结构混凝土结合良好并共同受力,对原混凝土面凿毛成凹凸不小于 6 mm 的粗糙面,在原混凝土内植间距 30 cm×30 cm、直径 12 mm 的传剪钢筋,使新老混凝土结合成整体。

3.2 体外预应力设计

结合计算及箱梁内部构造,在单幅主桥箱梁内共布置 6 根通长 15φ_s15.2 钢束,左右对称布置,同时在中支点附近布置 4 根 15φ_s15.2 较短钢束^[3]。体外束均采用 15-19 环氧喷涂钢绞线及配套可复张锚具(张拉 15 孔钢绞线,剩余 4 孔不穿束供备用),转向器采用配套散束式转向器,转向器、减振器、锚具的备用孔道(4 孔)应采用填充束(可用工作束裁下的小料)进行填充,以满足相关器具的正常工作和使用^[4]。通长体外束和中支点短束体外束均在 2#~7#

块之间弯起,以控制主跨 2#~7#块的主拉应力。锚下张拉控制应力为 $0.65f_{pk}=1\ 209\text{ MPa}$,两端双控张拉,张拉时应力控制为主,伸长值校核。

体外预应力利用中墩横梁、混凝土转向块等作为体外束的转向支点,转向块通过界面凿毛、植筋与既有混凝土结构连接牢固。为避免索体产生较大的振动,在自由段设置减震装置。体外预应力立面布置见图 3。转向块现场见图 4。减震器现场见图 5。

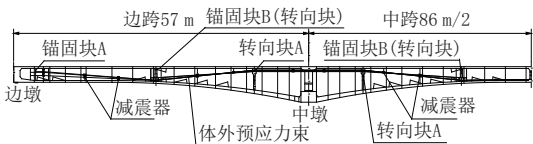


图3 体外预应力立面布置



图4 转向块现场照片



图5 减震器现场照片

3.3 其他维修设计

本次维修加固工程除了主桥增设体外预应力束、主桥腹板局部增大截面以外,还开展了以下维修工作:封闭裂缝、混凝土破损区域修补、支座更换、伸缩缝及伸缩缝橡胶条更换、增设滴水檐、泄水管更换、桥面铺装修补、混凝土防护涂装、增设纵向排水管等。

3.4 维修加固施工顺序

本桥维修加固施工顺序为:施工准备,现场调查复核,材料检验→全桥裂缝及混凝土表面缺陷处理→箱内凿毛、植筋、绑扎钢筋、支模→浇筑锚固块、转向块混凝土,以及端部和跨中部分区域的腹板增大截面混凝土→安装并张拉体外预应力→更换支座→浇筑剩余腹板增大截面混凝土→更换伸缩缝、泄水

管→全桥涂装→安装滴水檐。待体外预应力和腹板增大截面施工完成、混凝土达到强度后,再进行桥面铺装的修补施工^[5]。

4 主要计算分析

根据加固设计内容,设计进行了相关计算分析,主要包括三个方面:承载能力极限状态验算、正常使用极限状态验算和局部验算。

4.1 承载能力极限状态验算

(1)正截面抗弯强度验算

按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)第 5.2 节的要求对全部断面进行抗弯承载能力验算。图 6、图 7 为基本组合下全桥最大弯矩及其对应的抗力。

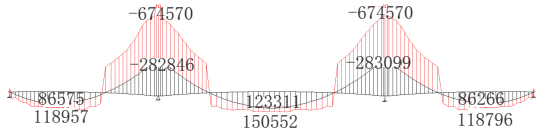


图6 最大抗力及抗力对应内力(单位:kN·m)

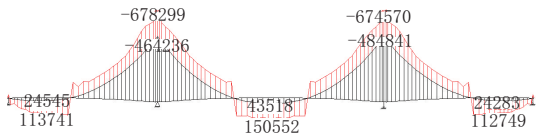


图7 最小抗力及抗力对应内力(单位:kN·m)

经验算,加固后主梁的正截面抗弯承载能力满足规范要求。

(2)斜截面抗剪强度验算

斜截面抗剪承载能力的计算原则:竖向预应力效应按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)第 5.2.9 条规定按 60% 取;抗剪截面尺寸按照《城市桥梁结构加固技术规程》(CJJ/T 239—2016)第 5.2.5 条规定计算;斜截面抗剪承载力按照《城市桥梁结构加固技术规程》(CJJ/T 239—2016)第 5.2.6~2 条规定计算,本桥腹板斜裂缝延伸至底板且最大缝宽达到 0.39 mm,与原构件斜裂缝有关的修正系数取 0.78^[6]。

根据上述原则,主梁支点截面的最大剪力及抗力见表 1。

表 1 斜截面抗剪强度验算

验算截面	$\gamma_0 \cdot Q_d / \text{kN}$	V_{cs} / kN	抗剪截面	抗剪承载力	抗剪截面
边支点	10 078	11 737	10 473	满足	满足
中支点	28 846	31 007	30 393	满足	满足

经验算,加固后主梁其他截面的腹板尺寸及斜截面抗剪强度均满足规范要求。

4.2 正常使用极限状态验算

(1)正常使用极限状态抗裂验算

按照部分预应力 A 类构件进行计算。主要计算结果见图 8 至图 10。

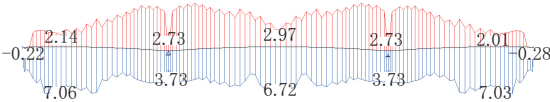


图 8 频遇组合正应力(单位:MPa)

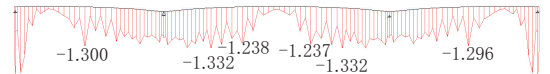


图 9 频遇组合主应力(单位:MPa)



图 10 准永久组合正应力(单位:MPa)

经验算,加固后主梁的抗裂能力基本满足规范要求(端部支点附近频遇组合最大主拉应力 $\sigma_{tp}=1.332$ MPa,略大于允许值 $0.5f_{tk}=1.325$ MPa)。

(2)持久状况混凝土应力验算

按照规范规定,持久状况预应力混凝土构件应力计算时其应力值取标准组合值。计算结果见图 11、图 12。

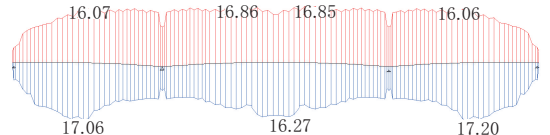


图 11 标准组合正应力(单位:MPa)



图 12 标准组合主应力(单位:MPa)

经验算, $\sigma_{cp}=17.20$ MPa,不大于 $0.60f_{ck}=19.44$ MPa,满足规范要求。顶缘 $\sigma_{ke}+\sigma_{pc}=16.86$ MPa,略大于允许值 $0.5f_{ck}=16.20$ MPa,底缘 $\sigma_{ke}+\sigma_{pc}=17.20$ MPa,略大于允许值 $0.5f_{ck}=16.20$ MPa,均不满足规范要求。但是,考虑到混凝土材料抗压性能较强,对于现状桥梁来讲,在大大改善腹板斜截面主拉应力的同时,略微牺牲抗压富余,是可以接受的。

4.3 局部验算

因增设体外预应力需要在箱梁内布置锚固块和转向块,体外预应力的张拉力较大,设计采用 ANSYS 空间有限元程序建实体单元模型对原结构的锚后牵拉应力和转向块区域进行了局部验算(见图 13 至图 17)。

经验算,锚后牵拉应力峰值为 4~4.5 MPa,主梁

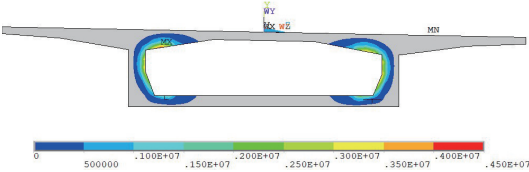


图 13 前排钢束锚后正应力横断面

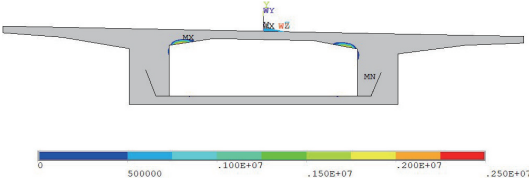


图 14 后排钢束锚后正应力横断面

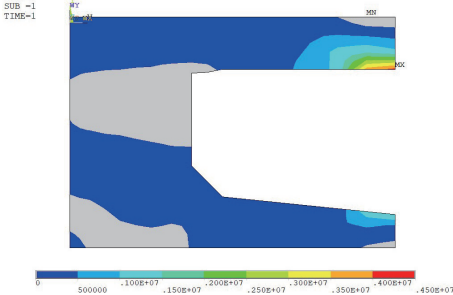


图 15 前排钢束锚后正应力纵剖面

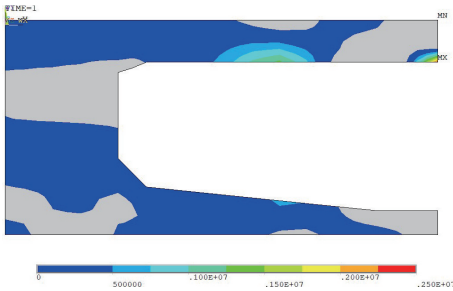


图 16 后排钢束锚后正应力纵剖面

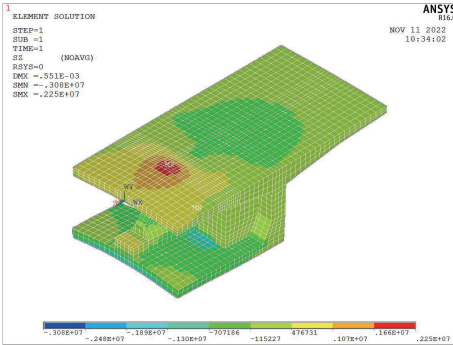


图 17 转向块区域应力

纵向整体储备压应力 3 MPa,按原结构配筋计算裂缝宽度满足规范要求;转向块区域最大拉应力出现在顶板横桥向,最大拉应力为 2.2 MPa,按原结构顶板横桥向配束计算,应力满足规范要求。

5 加固后大桥评定结果

2023 年 8 月,鹤溪大桥完成全部维修加固施工,同时在通车前进行了荷载试验检测。荷载试验采用

9辆33 t重车进行加载测试。通过试验检测数据分析,桥梁各项力学指标较好,测试指标未超过规范允许值,结构的强度、刚度满足原设计荷载汽超-20的要求。同年9月进行了定期质量检测,检测结果评定大桥为2类。

2024年8月,加固后的鹤溪大桥经运营1a进行了质量检测,检测结果评定大桥为2类。

6 结 语

鹤溪大桥经检测单位发现出现严重病害后,管理部门迅速组织研究处置方案,在1a时间内论证加固方案、编制设计文件、快速抢修施工,相应道路在较短时间内恢复原有交通,对当地企业运输和居民出行的影响降至最低。此次加固抢修工程取得了良好的结果。结合本工程的实践经历,总结以下几点:

(1)预应力混凝土箱梁的腹板作为主梁最重要的受力构件,出现病害后修复难度大,加固施工费用高、周期长。所以,对于承载货运交通的桥梁,设计中对箱梁截面尺寸的拟定、腹板钢筋钢束的布置适当留富余量;在腹板内布置竖向预应力时,往往损失较大,应充分考虑其实际发挥效率。

(2)桥梁加固设计应充分掌握桥梁病害情况,仔细分析病害原因,科学制定加固方案,可因地制宜地选择直接与间接结合、主动与被动结合的加固方案,以达到理想的加固效果。

(3)桥梁加固设计应尽可能少增加额外荷载,优化体外预应力的转向块、锚固块的设计;桥梁加固施工应尽量少损伤原有结构,保证加固过程中的结构安全性和加固后结构良好的使用性。

(4)针对桥梁使用中出现的病害,应客观分析病害原因,制定科学的维修加固设计方案和施工方案,确保桥梁这一重要公共设施安全可靠。正确合理的桥梁维修加固工程往往可以产生良好的经济效益和社会效益。

(5)过去40 a内我国大规模进行道路交通建设,接下来大量的公路和市政桥梁需要开展维修或加固工作。旧桥维修改造也是我们现代城市更新的一部分,希望本工程所积累的工程经验能为同类项目的实施起到一定借鉴作用。

参考文献:

- [1] 李思霖. 预应力混凝土桥梁检测与加固技术研究[J]. 交通世界, 2021(3): 123-124.
- [2] 钱建利. 高速公路桥梁加固关键技术分析与研究[J]. 交通世界, 2021(19): 134-135.
- [3] 孟杰, 刘钊. 体外预应力加固连续梁桥的合理配束线形讨论[J]. 现代交通技术, 2008(12): 28-31.
- [4] 江祥林, 易汉斌, 俞博. 体外预应力加固桥梁技术与工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [5] 樊海琳. 公路桥梁加固施工技术的应用研究[J]. 工程技术研究, 2018(6): 41-42.
- [6] CJJ/T 239—2016, 城市桥梁加固技术规程[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

