

负荷钢桁桥节点连接加固设计方法研究

陈祖贺

[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: 负荷钢桁桥节点连接在受力情况下加固,面临着加固件及原构件受力不同步、原构件不可随意拆卸、加固后传力路径复杂等问题。钢桁桥设计往往采用“强节点,弱杆身”的原则,节点连接加固的同时,其连接杆身往往需要一起加固,两者不可分割,连接构造对传力效果及其有效性起到关键性作用。依托上海市松浦大桥大修工程,以控制既有原构件满足现行规范要求为原则,围绕负荷钢桁桥节点连接加固设计展开研究。首先,对4种节点连接加固构造方案进行了分析,指出负荷钢桁桥节点连接加固设计应尽量避免原连接件的拆除,并应与杆身加固件的连接构造统筹考虑;然后,基于构造方案4,给出3种节点连接加固计算方法及流程,并通过算例说明了3种方法的不同之处,提出节点连接加固后应为杆身加固件传力提供足够的支撑刚度,避免在杆身端部加固件内力向原构件转移;最后,通过成桥试验结果,对设计进行校正,论证了设计方法的正确性。

关键词: 负荷钢桁桥;节点连接加固;分批受力;支撑刚度;等强设计

中图分类号: U448.25

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)01-0105-06

0 引言

社会经济的发展,部分老桥通行能力逐渐不能满足需求,通过对老桥进行拓宽改造,增加通行能力,已经成为一种经济、有效的方法。对于钢桁桥来讲,结构加固主要包括杆身加固、节点连接加固两个方面。由于钢桥加固尚没有专门的规范,其加固理论及计算方法不明确,已有研究^[1-3]对具体的计算方法多论述不足;在国内几座钢桁桥的大修中^[4-7],多为在完全卸载的情况下进行的更换加固,采用了“修旧如旧”的理念,以新铆钉更换原铆钉,保证连接件的刚度匹配;铁路钢桁桥的加固^[8-9]多为负载下的振动加固,针对的是桥梁整体性加固;王元清^[10-14]对工民建钢结构节点进行了较多研究,其中栓、焊混用连接加固研究较为充分,但其使用条件与桥梁运营环境有较大差别;《钢结构加固设计标准》^[15]为工民建钢结构加固设计规范,内容详实,但该标准采用对钢材设计强度进行折减的方式考虑初始应力的影响,无法掌握加固件、原构件的最终受力情况,对节点连接的加固,其给出的加固方案与桥梁结构有较大差别,该标准应用在钢桥加固上尚应进行论证。目前对负荷钢桁桥节点连接加固设计计算研究相对较少,工程中容易因设计不规范导致安全事故,本文以松浦

大桥大修工程为依托,围绕节点连接加固设计,以控制既有原构件满足现行规范要求为原则,在连接构造及计算方法等方面展开研究。

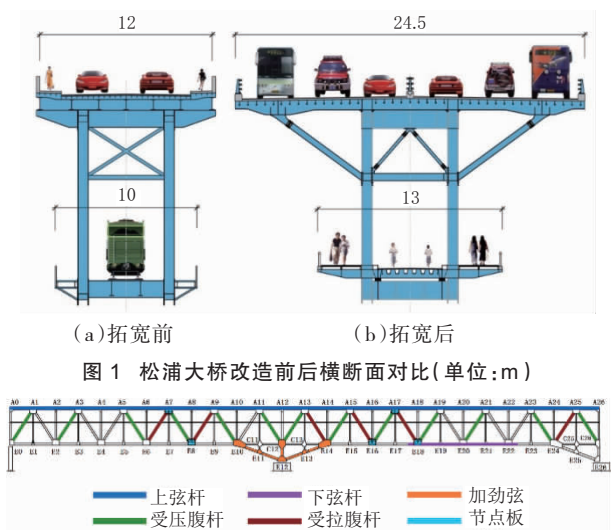
松浦大桥位于上海市松江区,建成于1976年,是黄浦江上的第一座桥梁。原松浦大桥主桥为两联96 m+112 m双层公铁两用连续铆接钢桁桥,上层双向两车道公路桥宽12 m,下层为单线铁路。随着附近铁路金山支线的建成,松浦大桥不再承担铁路营运职责。鉴于周边公路交通需求,对其进行改造、加固。总体方案为在维持两片主桁形式不变的条件下,上层由原双向2车道拓宽为双向6车道,桥面宽度由12 m拓宽为24.5 m,下层铁路桥改为人行道及非机动车道,桥面宽13 m,见图1。改造前后桥梁恒、活载有较大变化,总量增加31.5%,桥梁加固施工需在原位、负荷、不中断交通的条件下进行。根据桥梁改造方案,对原主桁构件进行验算,对不满足现行规范要求的杆件进行加固,需要加固的位置见图2,总体来讲,本桥加固工作量大、在维持交通不中断的条件下施工,难度较大^[1]。

1 节点连接加固构造方案

对于铆接或栓接节点,为保证连接件刚度一致、受力协调,增加同类型的连接件数量为首选;为保证结构安全,负荷节点连接加固时,不宜过多拆除既有连接件,新增连接件没有理想的连接位置,选择合适的连接构造是确保加固方案合理、有效的前提。针对

收稿日期: 2023-02-11

作者简介: 陈祖贺(1989—),男,硕士,工程师,从事钢桥设计研究工作。



松浦大桥节点连接加固, 本文给出四种构造方案, 见表 1。

方案 1, 拆除原铆钉 B, 换成双剪面新铆钉、保留原铆钉 A, 通过盖板增加铆钉数量; 方案 2, 保留所有原铆钉, 通过扩大盖板延长节点范围; 方案 3, 结合了方案一与方案二, 拆除原铆钉 B 并通过扩大盖板延长节点范围; 方案 4, 保留所有原铆钉, 通过扩大杆身加固件端头及盖板, 延长节点范围。前三种方案杆身上的新铆钉同时连接着杆身加固件及原构件, 不能控制加固件及原构件的内力分配, 原铆钉与杆身原构件内力存在超过规定值的可能, 适用于加固要求不高的位置。方案 4, 扩大杆身加固件端头, 通过盖板直接连接杆身加固件与节点板, 新铆钉连接杆身加固件, 原铆钉连接杆身原构件, 传力更明确。

通过有限元模型对上述 4 个方案进行计算, 仅为说明问题, 模型简化为平面模型, 包括一块节点板、杆身翼缘板、填板、盖板及铆钉。钢板均采用板单

表 1 节点连接加固构造及应力云图

编号	加固前	加固后	加固连接用盖板	应力云图
方案 1				
方案 2				
方案 3				
方案 4				

元模拟, 铆钉采用直径 26 mm 的梁单元模拟, 抗弯刚度放大 105 倍, 以保证铆钉基本不产生弯曲变形; 固定节点板水平及竖向自由边, 钢板之间仅通过铆钉进行连接, 忽略钢板之间的摩擦力; 按照加固前、后两个阶段分别在杆端施加 500 kN、2 000 kN, 合计 2 500 kN。

从表 1 钢板应力云图可见, 方案 1 到方案 4, 节点板应力扩散逐步均匀 (图中黄色区域逐渐减小), 节点板受力改善程度逐步提高; 从图 3 铆钉平均剪力计算结果来看, 方案 2 原铆钉与新铆钉剪力差距最大, 可见该构造对原铆钉加固效果最差、传力极不顺畅; 方案 1、3、4, 原铆钉剪力逐渐减小, 新铆钉剪力逐渐增大, 方案 1、3 原铆钉内力均大于方案 4, 方案 1 最大, 原因在于拆除部分原铆钉, 导致未拆除铆钉内力增加, 因此连接负荷加固时应尽量减少原铆钉的拆除量。4 个方案虽然增加了相同数量的新铆钉, 但受力分配却相差较大, 从节点板应力云图及铆钉平均剪力来看, 方案 4 对改善节点板及原铆钉受力, 均具有最优效果。

2 节点连接加固计算方案

在进行计算方案介绍前, 先对负 荷 钢 桁 桥 的 受 力 过 程 及 内 力 分 配 情 况 进 行 简 要 介 绍。钢桁桥负荷情况下进行加固, 节点及杆身受力存在两个状态: 加固前 I, 加固件未安装, 内力全部由原构件承担, 此内力称为第一批内力 S_I ; 加固后 II, 加固件安装完成, 结构增加的内力由加固件、原构件承担, 此内力

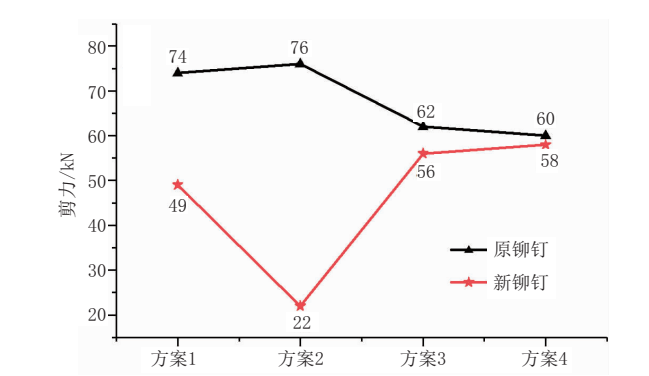


图 3 连接加固后原铆钉及新铆钉剪力

称为第二批内力 $S_{II}=S_{II0}+S_{IIn}$, 加固杆身的内力 $S=S_I+S_{II}$ 。原构件承担的内力包括全部第一批内力 S_I 和第二批内力中分配到原构件的部分内力 S_{II0} , 加固件只承担第二批内力分配的部分内力 S_{IIn} , 加固件、原构件内力分别为 $S_n=S_{IIn}$ 、 $S_o=S_I+S_{II0}$ 。

节点连接加固与对应杆身加固一般会同时发生, 加固计算应结合所选择的连接构造, 并考虑连接对杆身构件的支撑刚度, 避免杆身加固件、原构件内力在杆端发生重分布, 导致对安全不利的情况出现。松浦大桥主桁节点连接加固设计时, 基于连接加固构造方案 4, 提出了 3 种铆钉连接加固计算方法, 并进行了分析比较。

方案 1, 按照节点连接内力及铆钉承载力进行设计。该方法只考虑铆钉受力, 直接增加铆钉数量来加强节点连接, 因负荷加固, 原铆钉承担了两个批次的内力, 通过控制原铆钉的内力, 确定所需增加铆钉的数量。详细计算流程见图 4。

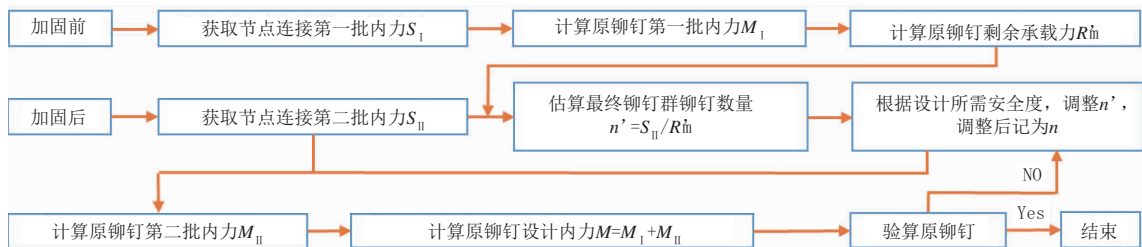


图 4 节点连接加固计算方案 1

方案 2, 按杆身的承载力进行等强设计。松浦大桥前身为公、铁两用钢桁桥, 节点连接多数与杆身等强, 节点连接与杆身加固仍可以采用等强原则设计, 详细计算如下:

$$n = n_o + n_n$$

式中: n 为节点连接加固后铆钉群的铆钉总量; n_o 为加固节点原铆钉群铆钉总量; n_n 为加固节点新增铆钉总量, $n_n = R_n / R_m$; R_n 为杆身加固件承载力; R_m 为单个新铆钉的承载力。

上述两种方法仅考虑了铆钉受力, 但均没有考虑加固后节点连接与杆身构件的传力问题, 若连接对杆身加固件支撑刚度不足, 杆身加固件、原构件内力在杆端会发生重分布, 加固件内力向原构件转移。从解决上述问题出发, 提出方案 3。

方案 3, 按照杆身加固件实际内力及原铆钉第二批内力 (与新铆钉内力相等) 进行设计。该方案按照原铆钉仅传递杆身原构件内力、新铆钉仅传递杆身加固件内力的思路进行设计, 通过杆身加固件内力

及原铆钉第二批内力来确定新铆钉的数量。为避免新铆钉的内力传递到杆身原构件上，新铆钉与原铆

钉对杆身加固件、原构件的支撑刚度比应与杆身构件之间的刚度比相等。详细计算流程见图 5。

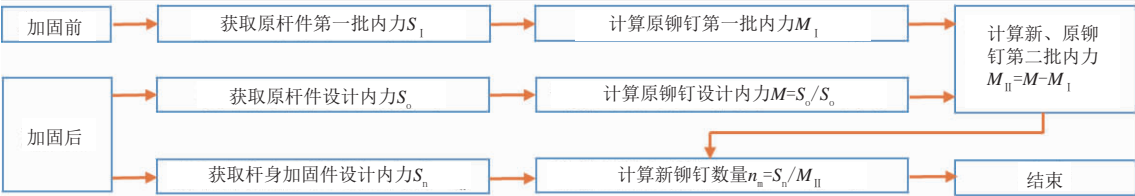


图 5 节点连接加固计算方案 3

3 算例分析

按照上述三种计算方案，选择典型加固节点 A15（A15E16 侧）进行说明。本桥原主桁钢材为 16Mnq，现场取材试验分析评定其性能满足 Q345qD 的要求，A15E16 杆身为焊接工字形断面，断面宽 720 mm，翼缘 680 mm×24 mm，腹板厚 16 mm；加固方案为在翼缘板上栓接 680 mm×20 mm 的钢板，对称加固，端头扩大为 1 160 mm×20 mm 以与节点板连接，钢材为 Q345qD；节点采用铆钉加固，铆钉直径为 25 mm，孔径 26 mm，根据《公路钢结构桥梁设计规范》按照 II 类孔计算单个铆钉的抗剪承载力为 71.7 kN，构造见图 6。各方案计算过程及结果见表 2～表 4。

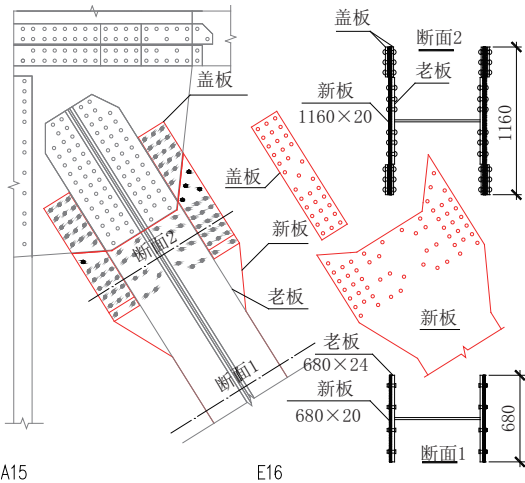


图 6 A15 节点连接加固构造示意图

表 2 节点连接加固计算方案 1

加固前		加固后		加固后验算	
原铆钉 / 个	156	最终铆钉 / 个	228	新铆钉 / 个	72
剪力 S _I / kN	2 921.3	剪力 S _{II} / kN	9 420.0	铆钉抗剪承载力 R _m / kN	71.7
铆钉内力 γ _o M _I / kN	20.6	铆钉内力 γ _o M _{II} / kN	45.4	铆钉内力 γ _o M / kN	66.0

表 3 节点连接加固计算方案 2

杆身加固件	设计强度 f _d / MPa	端头有效面积 A _{eff} / mm ²	加固件承载力 R _n / kN	铆钉抗剪承载力 R _m / kN	新铆钉 n _n / 个
A15-E16-杆身加固件	275	23 040	6 336	71.7	88

从表 2、表 3 及表 4 计算结果可见，方案 3 所需新铆钉的数量最多，其次是方案 2，最少的是方案 1。

对于方案 2 与方案 3，假设杆身加固件承载力为 F，铆钉承载力为 f，杆身加固件内力设计值为 aF，新铆钉内力设计值为 bf，a、b 代表各自承载力的发挥水平。那么，方案 2 中铆钉数量为 n₂=F/f，方案 3 中新增铆钉数量为 n₃=aF/bf=a/b·n₂，方案 3 与方案 2 新增铆钉数量的多少取决于 a/b 的值。就松浦大桥大修工程来讲值基本在 0.6 左右，b 值基本在 0.5 左右，所以方案 3 的铆钉数量略大于方案 2。方案 3，杆身加固件与原构件刚度比（面积比）约为 0.63，新铆钉与原铆钉的刚度比（数量比）约为 0.61，两者相近，

表 4 节点连接加固计算方案 3

构件编号	第一批内力 S _I / kN	内力设计值 S _o 、S _n / kN	原铆钉 n _o / 个	原铆钉内力计值 M / kN	原铆钉第一批内力 M _I / kN	原铆钉第二批内力 M _{II} / kN	新铆钉 n _n / 个
A15-E16- 杆身原构件	2921.3	8 770.79	156	56.2	18.7	37.5	95
A15-E16- 杆身加固件	—	3 570.51					

符合设计要求。

4 成桥试验校正

松浦大桥大修工程 A15 节点连接加固采用构造

方案 4、计算采用方案 3，施工完成后进行了主桥成桥试验，取 A15 节点的试验数据，对设计进行校正。A15 节点的应变片布设考虑了 4 条传力路径，分别测量记录节点及杆身加固件、原构件的数据，应变片

布设及路径示意图 7。

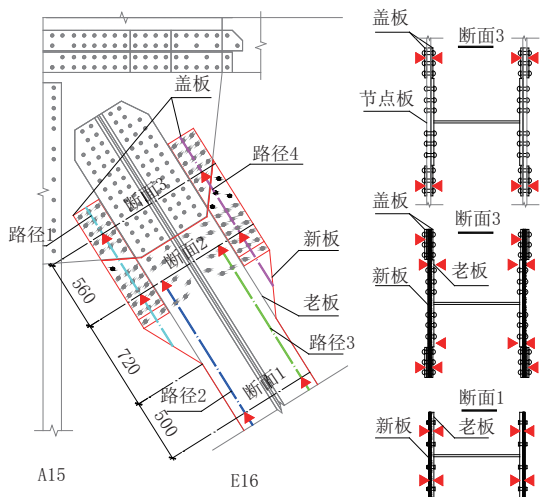


图 7 A15 节点应变片布置方案

为方便归纳总结,在数据处理时将路径 1、4 和路径 2、3 在同一断面上的数据进行合并,统一用断面位置进行表示。从断面 1 到断面 2,新板尺寸由 680 mm × 20 mm 变为 1 160 mm × 20 mm,因内力向两侧扩散,应力从 23.9 MPa 减小到 13.1 MPa,但断面 2 应力非均匀分布,按应力平均值计算断面轴力近似为 257.4 kN,详细结果见表 5。

从表 5 可以得到以下几条信息:断面 1 新板应力为 23.9 MPa,老板应力为 24.1 MPa,二者几乎相等,说明加固后杆身受力协调,可以共同受力;断面 1、断面 2 轴力合计分别为 718.4 kN、729.2 kN,两者几乎相等,说明传力路径 2、3 有效;断面 2、断面 3 基本在盖板铆钉群的中间,轴力分别为 151.9 kN 及 174.5 kN,相差 15%左右,考虑测点位置存在差异,可认为两者轴力相同,路径 1、4 传力有效;该轴力与新板断面 1 轴力比值分别为 47%、54%,理论上盖板铆钉群中间位置应传递新板轴力 50%,实测值与理论值基本相等,说明该连接构造可以完全传递杆身新板的轴力,与设计假定相符;从断面 1 到断面 2,老板轴力从 393.3 kN 减小为 319.9 kN,主要原因是新板在断面 2 处尺寸增大,加固效果增强,同时也说明新铆钉对新板的支撑刚度与设计假定相符。

总体来看,该节点加固设计,兼顾了节点连接加固与杆身加固,保证杆身加固件内力顺畅的传递到了节点区、在杆端没有向杆身原构件重分布,铆钉受力符合预期规律,较好的实现了设计意图。

表 5 成桥试验结果

位置		断面 1		断面 2		断面 3	
新板	应力 /MPa	23.9		13.1		—	
	尺寸 /mm ²	680 × 20		1 160 × 20		—	
	轴力 /kN	325.0		303.9		257.4	
老板	应力 /MPa	24.1		19.6		—	
	尺寸 /mm ²	680 × 24		680 × 24		—	
	轴力 /kN	393.3		319.9		—	
盖板	应力 /MPa	—		10.1		11.6	
	尺寸 /mm ²	—		4 × 235 × 16		4 × 235 × 16	
	轴力 /kN	—		151.9		174.5	
断面轴力合计 /kN		718.4		729.2		—	

5 结 论

本文首先对 4 种节点连接加固构造方案进行了分析,然后基于构造方案 4,对三种节点连接加固计算方法进行了比较,并对计算方案 3 进行了重点分析,最后通过成桥试验数据对方案 3 进行了校正,说明了其有效性。通过上述研究,可得出以下几点结论:

(1)负荷节点连接加固应尽量不拆除既有连接件,否则会引起未拆除连接件内力的增大,导致加固量的增加。

(2)节点连接的加固应综合考虑连接及杆身受力,并考虑与杆身的连接构造。

(3)节点连接加固计算时,新连接件应对杆身加固件提供足够的支撑刚度,避免在杆端杆身加固件因支撑刚度不足,内力向原构件转移。

(4)按照等强原则及考虑支撑刚度的方案 3 计算的新增铆钉数量相差不大,可通过新铆钉及加固件承载力的发挥水平,按照本文分析方法进行确定。但无论采用哪一种计算方法,都应保证节点连接对杆身各构件具有匹配的支撑刚度。

参考文献:

- [1] 陈亮, 陈祖贺, 邵长宇. 大跨径钢桁梁桥加固方法研究[J]. 公路, 2020, 65(8): 114-119.
- [2] 苏庆田, 王思哲, 薛智波, 等. 既有铆接钢桁梁桥拓宽改建时的主桁构件加固设计[J]. 桥梁建设, 2019, 49(4): 75-80.
- [3] 苏庆田, 王思哲, 薛智波, 等. 卸载程度对钢桁梁桥主桁构件加固效果的影响[J]. 工程力学, 2019, 36(B06): 7.
- [4] 佚名. 宁波市灵桥保护性修复方案与关键加固技术[J]. 世界桥梁, 2017, 45(190): 90-94.
- [5] 宋冬冬. 宁波市灵桥维修加固关键技术[J]. 施工技术, 2019, 48(2): 156-158.
- [6] 王倩. 具有历史文物价值的铆接钢桁架桥大修探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2015(7): 132-134.
- [7] 陈志敏, 王永鹏. 文物铆接钢桥——牛角沱嘉陵江大桥维修整治关键施工技术[J]. 施工技术, 2019, 48(S1): 1096-1100.
- [8] 程永红. 既有线铆接下承式钢桁梁加固的实践[C]// 中国铁道学会高速重载与普通铁桥梁运营管理与检测修理技术研讨会, 2008.
- [9] 施旸, 杨东, 李建红. 32 m 上承式钢桁梁桥的加固[J]. 四川建筑, 2009, 29(3): 123-124.
- [10] 曹辉, 王元清, 张延年, 等. 负载下钢框架梁柱节点盖板法加固承载性能的有限元分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(2): 6.
- [11] 王元清, 罗睿奇, 肖建春, 等. 负载下焊接加固钢结构端板连接节点承载性能试验[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2015(S1): 25-31.
- [12] 王佼佼, 石永久, 王元清, 等. 摩擦型高强度螺栓与侧焊缝并用连接承载力有限元分析[J]. 建筑科学, 2013, 29(1): 15-19.
- [13] 石永久, 王磊, 王元清, 等. 加固用钢结构栓焊并用连接承载性能研究[J]. 工程科学与技术, 2012, 44(6): 175-180.
- [14] 麻建锁, 王元清, 李敏峰, 等. 焊缝补强型栓焊并用连接承载性能试验研究[J]. 钢结构, 2018, 33(4): 13-16.
- [15] GB_51367—2019, 钢结构加固设计标准[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

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com