

基于增大截面法的负荷钢桁桥主桁构件 加固设计研究

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:该文旨在通过松浦大桥大修工程,探讨采用增大截面法加固负荷钢桁桥的设计方案,明确加固后原构件及加固构件的内力计算方法及应力控制原则,并分析原构件初始应力对加固效果的影响。采用理论与试验相结合的方法,提出了考虑加固件与原构件分批受力过程的内力分配计算方法,并采用“原构件边缘屈服准则”作为应力控制原则。通过与《钢结构加固设计标准》(GB 51367—2019)的计算方法及成桥试验数据的对比分析,验证了加固设计方案的合理性和有效性。研究表明:所提出的内力分配计算方法能够准确计算构件内力,且“原构件边缘屈服准则”能有效保证加固后钢桥满足弹性受力要求。该研究还发现构件初始应力水平对加固效果有显著影响,因此建议在加固前尽量卸载,并控制初始应力水平在0.6以内。

关键词:钢桁桥;负荷;加固设计;内力分配;增大截面法

中图分类号:U445.72

文献标志码:A

Reinforcement Design of Main Truss Members of Loaded Steel Truss Bridge Based on Section Enlargement Method

CHEN Zuhe

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

Abstract: This study investigated the design scheme for reinforcing the loaded steel truss bridge using the section enlargement method through the Songpu Bridge rehabilitation project. It clarified the internal force calculation method and stress control principle for both original members and reinforced components and analyzed the influence of initial stresses in original members on the reinforcement effect. A combined theoretical and experimental approach was adopted, and an internal force distribution calculation method that considered the staged load-bearing process of reinforced components and original members was proposed, with the edge yield criterion of original members established as the stress control principle. Comparative analyses against the calculation methods specified in the *Standard for Design of Strengthening Steel Structures* (GB 51367—2019) and bridge completion test data validated the rationality and effectiveness of the proposed reinforcement design scheme. The results demonstrate that the developed internal force distribution calculation method accurately calculates the internal force of members, while the edge yield criterion of original members ensures the reinforced steel bridge satisfies elastic stress requirements. Additionally, the study reveals that initial stress levels in original members significantly affect the reinforcement effect. It is recommended to implement partial unloading before reinforcement and control initial stress levels below 0.6.

Keywords: steel truss bridge; load; reinforcement design; internal force distribution; section enlargement method

收稿日期:2023-10-11(修改稿)

基金项目:上海市政总院第五期启明星计划项目(编号:K2021K117A)

作者简介:陈祖贺,男,硕士,工程师.E-mail:chenzuhe@smedi.com

0 引言

截至目前,中国已修建大量的钢结构桥梁。随着服役时间的增长,这类桥梁难免出现不同程度损伤或通行能力不足的问题,通常采取加固措施后继续使用。在城市更新的进程中,钢桥加固需求也将日益增多。对于钢桥加固,特别是大跨度钢桥加固前,往往难以实现完全卸载,导致加固施工需在桥梁负荷状态下进行。若采用增大截面法^[1-3]对负荷结构进行加固,那么加固构件将存在两个受力阶段:①加固前仅原构件承担未卸除荷载及施工荷载;②加固后原构件与加固件共同承担加固后增加的恒载及活载等。这两阶段受力的特点,导致负荷桥梁加固不同于新建桥梁,因此设计时不能直接套用新建桥梁设计规范^[4]。目前,中国尚没有系统、完善的钢桥加固规范,部分规范^[5]虽涉及钢桥加固的内容,但多侧重方案论述,在计算理论、方法等方面不够完善,对设计人员的指导性不强;工民建行业国家标准^[1]虽有较为详细的计算方法,但因结构所承受的荷载、设计使用年限、使用环境、钢材设计强度及塑性发展要求等方面与桥梁设计存在显著差异,相关方法也无法直接应用于桥梁加固设计中。

既有文献对钢桥加固技术开展了多方面研究。文献[6-14]采用增大截面、增加支撑等方法对铁路钢桁桥进行加固,以提高其动力特性及承载力,研究多侧重于设计方案、施工工艺介绍,计算大多采用有限元软件,缺乏明确的理论指导;市政桥梁的多个大修工程^[15-22],在桥梁完全卸载状态下,根据承载力需求,按照现行新桥设计规范进行计算。这类桥梁往往跨度较小、卸载容易,与负荷状态下钢桥的加固设计存在较大差别,可借鉴性不强;文献[23-26]详细介绍了大跨径钢桁桥原位、负荷加固设计方案,提出了完整的旧桥综合改造提升方案,具有一定的参考意义,但研究没有明确所采用的计算理论及方法,不足以指导加固设计;文献[27-28]通过工民建钢结构荷载下焊接加固和受压构件加固试验研究,建立了栓焊结合的计算方法,其研究成果为加固规范的编制提供了支撑,但鉴于工民建结构与桥梁结构之间存在差异,这些方法不能直接套用于桥梁加固;文献[29]从结构安全度和材料利用率两个方面出发,对大跨径负荷钢桁桥加固的卸载方案进行了比选,研究认为,卸载程度越高,结构加固后安全度及材料利用率越高。综上所述,上述研究多侧重方案的论述,

缺乏较为明确的负荷钢桥加固理论指导;计算多采用有限元软件,没有明确的负荷加固构件承载力计算方法。

鉴于钢桥加固需求的日益增长,以及既有加固规范及研究成果应用于负荷钢桥加固存在的局限性,本文将依托松浦大桥大修工程,对负荷钢桥加固理论及计算方法进行研究,以期为同类工程实践及技术规范编制提供借鉴。

1 工程背景及加固方案

原松浦大桥位于上海市松江区,建成于1976年,为两联(96+112)m双层公铁两用铆接钢桁连续梁桥,上层双向两车道公路桥宽12m,下层为单线铁路,见图1。随着金山支线的建成,松浦大桥不再承担铁路运营,鉴于周边公路交通需求,对其进行拓宽改造。在维持两片主桁形式不变的前提下,上层桥面由双向两车道拓宽为双向六车道,下层改建为行人及非机动车道,见图2。改造后桥梁所承担恒载及活载总量较原桥增加31.5%,主桁部分构件需要加固以提高承载力。按照主桁构件的受力特性,可分为翼缘栓接钢板加固拉杆、翼缘栓接角钢或填充混凝土加固压杆、铆接钢板加固节点等方案,见图3。

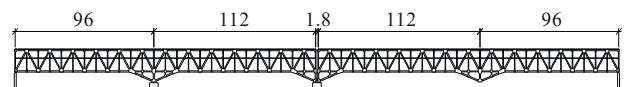


图1 主桥立面布置图(单位:m)

Figure 1 Elevation layout of main bridge (unit: m)

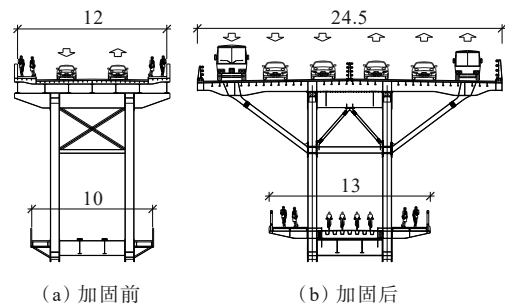


图2 松浦大桥改造前后横断面对比(单位:m)

Figure 2 Comparison of cross sections of Songpu Bridge before and after reconstruction (unit: m)

2 加固计算

本桥加固设计整体思路为:首先,通过计算获取需要加固杆件的原构件及加固件的内力;然后,按照现行桥梁设计规范,对原构件及加固件分别进行验

算,使其满足规范要求。按照上述思路,进行加固设计的前提是获取加固杆件各部分的内力,该内力可通过有限元软件进行计算,但作为桥梁设计人员在使用有限元软件时,尚应具备判断计算结果正确与否的能力,因此,下文首先对加固杆件的原构件及加固件内力分配机理进行说明。

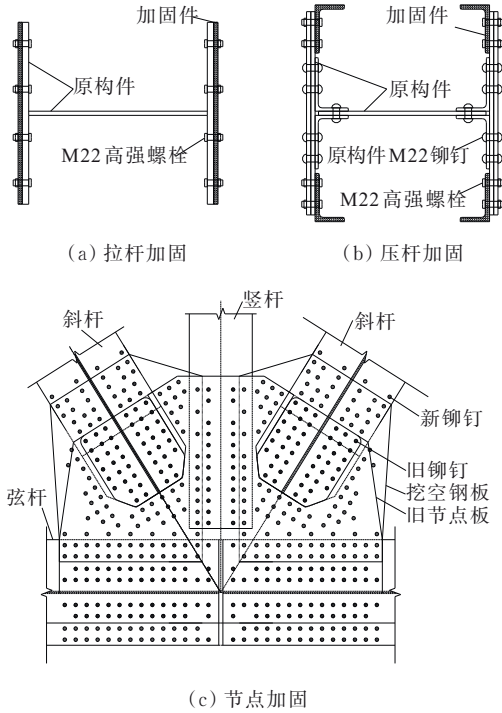


图3 钢桁桥构件加固方案

Figure 3 Reinforcement scheme of steel truss bridge members

2.1 加固杆件的原构件及加固件内力计算

本桥主要受力构件均为双轴对称的H形截面,加固方案为对称加固,计算内力分配时可不考虑加固后截面形心及中性轴位置的变化。加固前,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_1 ;加固后,加固件安装完成,结构增加的内力由加固件、原构件承担,此内力称为第二批内力 S_{II} ,加固杆件总内力 S 为:

$$S = S_1 + S_{II} \quad (1)$$

$$\text{或 } S = S_o + S_n \quad (2)$$

式中: S_o 为原构件内力; S_n 为加固件内力。第二批内力 S_{II} 可以表达为:

$$S_{II} = S_{IIo} + S_{IIn} \quad (3)$$

式中: S_{IIo} 为原构件承担的第二批内力; S_{IIn} 为加固件承担的第二批内力。

原构件承担的总内力包括 S_1 和 S_{IIo} ,加固件内力只承担 S_{IIn} ,所以:

$$S_o = S_1 + S_{IIo} \quad (4)$$

$$S_n = S_{IIn} \quad (5)$$

杆件加固后,原构件及加固件的内力按照刚度进行分配,可根据下述公式计算:

$$N_n = \frac{N_{II} A_n}{A_o + A_n}, N_{IIo} = \frac{N_{II} A_o}{A_o + A_n} \quad (6)$$

$$M_n = \frac{M_{II} I_n}{I_o + I_n}, M_{IIo} = \frac{M_{II} I_o}{I_o + I_n} \quad (7)$$

式中: N_n 、 M_n 为加固件承担的轴力、弯矩; N_{IIo} 、 M_{IIo} 为原构件承担的第二批轴力、弯矩; N_{II} 、 M_{II} 为杆件加固后加固件、原构件共同承担的第二批轴力、弯矩; A_o 为原构件毛截面面积; A_n 为加固件毛截面面积; I_o 为原构件毛截面惯性矩; I_n 为加固件毛截面惯性矩。

根据式(4)可得原构件轴力、弯矩:

$$N_o = N_1 + N_{IIo} \quad (8)$$

$$M_o = M_1 + M_{IIo} \quad (9)$$

式中: N_o 、 M_o 为原构件轴力、弯矩; N_1 、 M_1 为杆件加固前由原构件承担的第一批轴力、弯矩。

本桥加固杆件主要集中在斜腹杆(多数为铆接组合截面),受压构件采用翼缘四角栓接角钢加固,受拉构件采用栓接与翼缘等宽钢板加固,受压杆件E14A15与受拉杆A15E16受力较大且原截面为铆接组合截面,在斜腹杆加固中具有代表性,可取上述两根杆件作为代表进行计算说明,荷载组合取1.0恒载+1.0活载组合。杆件加固后的截面如图4所示,全桥杆件编号如图5所示。

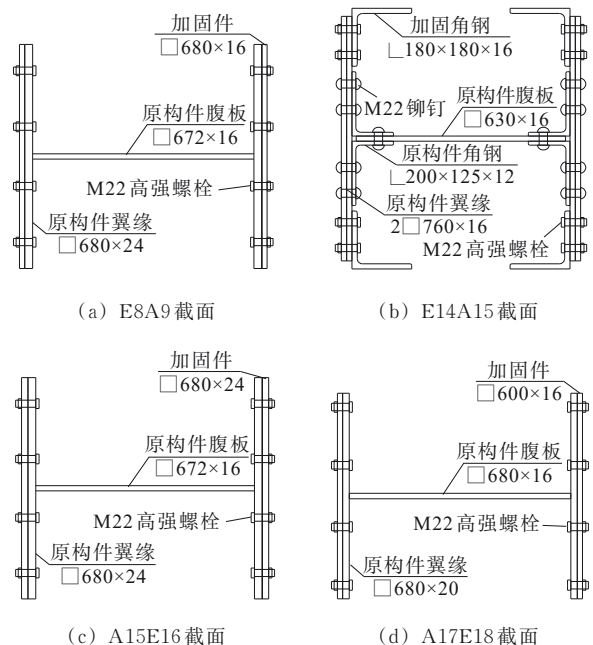


图4 加固杆件截面(单位:mm)

Figure 4 Cross section of reinforced member(unit: mm)

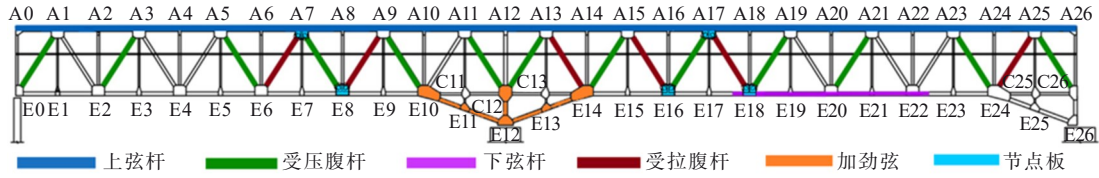


图5 加固位置示意图

Figure 5 Reinforcement position

为验证上述加固件、原构件内力分配计算公式的正确性,利用Midas有限元模型计算结果进行对比说明。模型中构件尺寸均按照设计取值,其中,下文计算所涉及杆件尺寸见图4。模型中,采用板单元模拟桥面系,梁单元模拟桁架杆件,一般支撑模拟支座。按照实际施工过程模拟施工步骤为:①老桥一次落架计算;②下层原桥面系拆除并施工新桥面系;③临时安装加固件,螺栓不紧固;④拆除原上层桥面系;⑤紧固加固件螺栓,完成所有加固内容;⑥安装上层新桥面系;⑦进行二期施工。下层活载按照影响线进行加载,通过调整自重系数保证恒载重量与实际相同,有限元模型见图6。

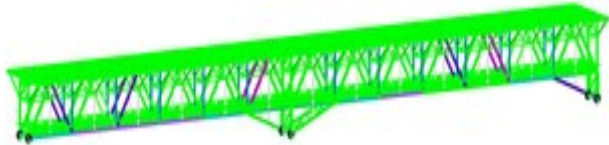


图6 有限元模型

Figure 6 Finite element model

通过Midas有限元计算,分别给出了杆件E14A15、A15E16第一批内力 S_I 、第二批内力 S_{II} 、加固件设计内力 S_n 以及原构件设计内力 S_o ,结果见表1;根据式(2)~(5)及杆件截面特性,对 S_{II} 进行分配,得到加固件、原构件设计内力计算值 S_{IIo}^I 、 S_{IIin}^I ,见表2。由 $S_{IIo} = S_{II} - S_{Io}$ 、 $S_{IIin} = S_n$,进一步得到加固件、原构件第二批内力,结果见表3。通过表3,对上述两种方法计算的加固杆件加固件、原构件第二批内力进行对比,验证计算公式是否正确。

表1 Midas杆件E14A15、A15E16内力
Table 1 Internal force of E14A15 and A15E16 members in Midas

杆件内力	E14A15			A15E16		
	N/ kN	M_y / (kN·m)	M_z / (kN·m)	N/ kN	M_y / (kN·m)	M_z / (kN·m)
S_I	-2 733.9	-111.6	-18.0	2 372.2	-65.2	-5.7
S_{II}	-8 327.3	-95.2	70.6	6 389.7	38.1	-41.6
S_n	-1 877.4	-49.9	13.2	2 431.9	17.2	-18.9
S_o	-9 183.9	-156.9	39.4	6 330.0	-44.2	-28.4

表2 公式计算第二批内力的分配

Table 2 Distribution of second batch of internal forces for calculation

杆件	截面特性			S_{IIo}^I, S_{IIin}^I		
	A/ mm ²	I_x / mm ⁴	I_y / mm ⁴	N/ kN	M_x / (kN·m)	M_y / (kN·m)
E14A15-原	74 160	2.5E9	7.5E9	-6 421.1	-44.5	57.2
E14A15-加	22 016	2.8E9	1.8E9	-1 906.2	-50.7	13.4
A15E16-原	43 392	1.3E9	4.4E9	3 927.7	20.8	-22.4
A15E16-加	27 200	1.0E9	3.7E9	2 462.0	17.3	-19.2

注:表中惯性矩下标“x”代表杆件截面弱轴,“y”代表杆件截面强轴,下同。

表3 第二批内力Midas计算值与公式计算值的对比

Table 3 Comparison between Midas and formula values of second batch of internal forces

杆件	$S_{IIo}(S_{IIin})$			$\frac{S_{IIo} - S_{IIo}^I}{S_{IIo}} \left(\frac{S_{IIin} - S_{IIin}^I}{S_{IIin}} \right)$		
	N/kN	M_x / (kN·m)	M_y / (kN·m)	N/%	M_x / %	M_y / %
E14A15-原	-6 450.0	-45.3	57.40	0.4	1.7	0.4
E14A15-加	-1 877.4	-49.9	13.20	-1.5	-1.5	-1.6
A15E16-原	3 957.8	21.0	-22.70	0.8	1.0	1.2
A15E16-加	2 431.9	17.2	-18.90	-1.2	-0.7	-1.4

从表3公式计算值与有限元计算值的对比可见,各分项内力的差值均在2%以内,考虑有限元模型计算存在一定的误差,可以认为这两种方法的计算结果是相同的,上述公式是正确的,该公式可以作为有限元软件计算加固件和原构件内力的理论支撑。

2.2 加固设计验算

上文内力计算公式可较为明确地计算加固件和原构件内力,获得内力后,可进一步计算加固件和原构件应力。若要满足《公路钢结构桥梁设计规范》(JTGD64—2015)弹性设计要求(即边缘屈服准则),应将加固件及原构件应力均控制在设计强度以内、保证加固后的结构始终处于弹性受力状态。钢结构在桥梁荷载状态下进行加固,由于原构件具有初始应力,在极限设计状态下原构件应力往往大于加固件应力,因此,可以以原构件应力不超过设计强度为原则(即原构件边缘屈服准则),验算加固后构件应

力。结合《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)应力验算公式及原构件边缘屈服准则,可提出钢桁桥构件加固后应力验算公式:

$$\gamma_0 \left[\frac{N_I}{A_{o,eff}} + \frac{M_I + N_I e_o}{W_{o,eff}} + \frac{N_{II}}{A_{eff}} + \frac{M_{II} + N_{II} e}{W_{eff}} \right] \leq f_{o,d} \quad (10)$$

$$\text{或 } \gamma_0 \left[\frac{N_o}{A_{o,eff}} + \frac{M_o + N_o e_{o,z}}{W_{oy,eff}} \right] \leq f_{o,d} \quad (11)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; $f_{o,d}$ 为原构件设计强度; N_I 、 M_I 为杆件加固前由原构件承担的第一批轴力、弯矩; N_{II} 、 M_{II} 为杆件加固后加固件、原构件共同承担的第二批轴力、弯矩; $A_{o,eff}$ 、 A_{eff} 为原构件、加固后构件有效截面面积; $W_{o,eff}$ 、 W_{eff} 为原构件、加固后构件有效截面模量; e_o 、 e 为原构件、加固后构件有效截面形心在 z 、 y 轴方向距离毛截面形心的偏心距; N_o 、 M_o 为原构件总轴力、弯矩, $W_{oy,eff}$ 为原构件 y 轴有效截面模量。

公式(10)、(11)内力计算过程相同,公式(10)可体现出负荷加固构件两阶段受力的特点,但需要进行两次应力计算,而公式(11)在获得原构件内力后,只需进行一次应力计算,为减少计算量,本桥采用公式(11),并选择杆件E8A9、A15E16、A17E18作为算例进行说明。杆件截面尺寸如图4所示。表4给出了加固杆件加固件、原构件的有效截面特性及设计内力,根据公式(11)计算的构件应力见图7。

表4 主桁受拉杆截面及构件内力

Table 4 Section of main truss member under tension and internal force of members

构件编号	有效截面特性			构件内力		
	$A_{eff}/$ mm ²	$I_{x,eff}/$ mm ⁴	$I_{y,eff}/$ mm ⁴	$N_d/$ kN	$M_x/$ (kN·m)	$M_y/$ (kN·m)
E8A9-原	38 400	1.0E9	3.8E9	7 252.9	58.2	63.5
E8A9-加	18 432	6.6E8	2.3E9	2 444.5	10.6	30.3
A15E16-原	38 400	1.0E9	3.8E9	8 113.4	62.7	46.9
A15E16-加	23 040	8.3E8	2.8E9	3 254.6	13.0	33.7
A17E18-原	30 720	5.0E8	2.9E9	5 493.0	20.7	23.5
A17E18-加	15 872	4.0E8	2.0E9	2 023.1	28.7	8.7

注:表中截面属性为考虑开孔后的有效截面信息。

从计算结果看,本文加固方案可以保证原构件应力水平满足规范要求,且原构件的应力水平均高于加固件的,加固件承载力仍有较大富余,结构安全。

3 设计验证

为说明本文方法的可行性,下文将采用不同的计算方法以及成桥试验数据对加固方案进行验证。

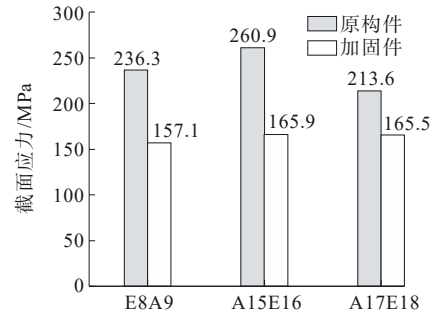


图7 杆件加固后加固件、原构件验算应力

Figure 7 Stress of reinforced and original members

3.1 与《钢结构加固设计标准》(GB 51367—2019)的对比

根据《钢结构加固设计标准》(GB 51367—2019)中增大截面法,对杆件整体设计强度进行折减,以考虑加固件、原构件受力不同步的问题,这也称之为“加固后的截面边缘屈服准则”^[30]。按照《钢结构加固设计标准》(GB 51367—2019)表6.1.6对加固构件的分类,可认为钢桁桥主桁构件属于“Ⅰ特繁重动力荷载作用下的结构”,对应栓接加固轴心受力为主的主桁构件,可从表6.3.1中获得强度修正系数为0.85,即加固后构件的修正强度设计值为 $0.85 \times 275 \text{ MPa} = 233.8 \text{ MPa}$;本文控制原构件设计强度为 275 MPa 。因本文方法与《钢结构加固设计标准》(GB 51367—2019)设计强度不同,为方便对比两种方法计算结果,可用应力验算公式右侧设计强度除以公式左侧构件应力作为承载力相对富余度,即安全系数 f_a/f 。通过安全系数的对比,说明加固后构件承载力的富余情况,进而可在一定程度上反映本文计算方法的合理性。计算所采用的构件截面属性及构件内力取自表4,计算结果如表5所示。

表5 与《钢结构加固设计标准》(GB 51367—2019)计算结果的对比

Table 5 Comparison between calculation results based on Standard for Design of Strengthening Steel Structure (GB 51367—2019)

构件编号	设计强度 f_d/MPa	构件应力 f/MPa	安全系数 f_a/f
E8A9-原	275.0	236.3	1.16
E8A9-原+加	233.8	204.6	1.14
A15E16-原	275.0	260.9	1.05
A15E16-原+加	233.8	218.6	1.07
A17E18-原	275.0	213.6	1.29
A17E18-原+加	233.8	183.0	1.28

注:表中“xx-原”代表本文方法;“xx-原+加”代表《钢结构加固设计标准》中的方法。

从表5可以看出:两种方法计算的安全系数几乎相同,差值基本在2%左右,从理论上证明,本文加固设计方法是合理、正确的。

3.2 与成桥试验结果的对比

松浦大桥改造完成后,采用35 t密布重车进行成桥试验,对加固杆件进行了应力测试,通过对比成桥试验应力与设计计算应力,来校正设计。由于测试杆件较多,此处挑选受力较大的拉杆E8A9、E24A25以及压杆A9E10、E14A15进行说明,杆件截面尺寸及测点布置见图8,实桥测点布置见图9。采用公式进行计算时,首先在2.1节所建立的有限元模型中进行重车加载,以计算加固杆件内力,然后按照式(6)、(7)计算原构件及加固件内力,结果如表6所示,最后按照式(11)可计算相应测点处的应力值。

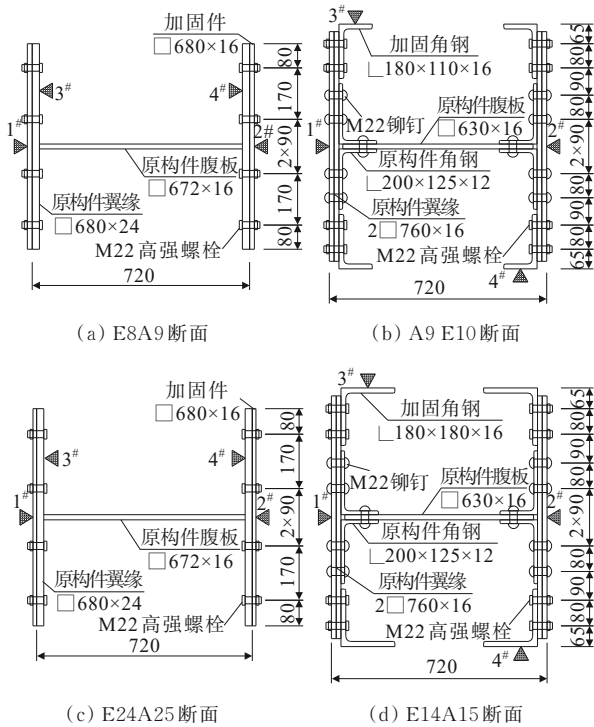


图8 构件截面及测点布置(单位:mm)

Figure 8 Section and measuring point arrangement of member (unit: mm)

实测应力及公式计算应力见表7、差值见图10。从表7及图10可以看出:除E14A15加固件、原构件实测值与计算值相差较大外(考虑测试数据失真),其他加固件及原构件应力水平基本一致,杆身受力协调;实测应力值均小于计算值,但差值相对较小,这与成桥试验时车辆的实际加载位置有关,可以认为实测值与计算值是相同的,由成桥试验证明,本文加固设计方法是合理、可靠的。



(a) 受拉杆应变片位置(1#、2#贴在加固件,3#、4#贴在原构件)



(b) 受压杆应变片位置(1#、2#贴在原构件,3#、4#贴在加固件)

图9 应变片位置

Figure 9 Position of strain gauge

表6 构件内力计算值

Table 6 Internal force calculation value of members

构件编号	N_d/kN	$M_y/(kN \cdot m)$	$M_z/(kN \cdot m)$
E8A9-总内力	2 089.8	-20.9	-0.1
E8A9-原构件内力	1 412.0	-13.0	-0.1
E8A9-加固件内力	677.8	-7.7	0.0
A9E10-总内力	-2 951.1	47.8	-52.4
A9E10-原构件内力	-2 386.7	37.9	-28.3
A9E10-加固件内力	-564.4	9.9	-24.2
E14A15-总内力	-3 286.4	22.3	-0.2
E14A15-原构件内力	-2 534.0	17.3	-0.1
E14A15-加固件内力	-752.4	5.0	-0.1
E24A25-总内力	1 654.5	6.4	4.5
E24A25-原构件内力	1 216.6	4.4	3.0
E24A25-加固件内力	438.0	2.0	1.5

表7 构件应力实测值与计算值

Table 7 Measured and calculated stress of members

杆件编号	测点应力/MPa						
	1#	2#	1#、2#均值	3#	4#	3#、4#均值	
E8A9	实测	36.9	34.2	35.6	36.3	34.9	35.6
	计算	38.1	35.5	36.8	37.3	36.8	37.1
A9E10	实测	-33.2	-28.7	-31.0	-34.2	-27.5	-30.9
	计算	-34.1	-30.8	-32.5	-35.0	-30.5	-32.8
E14A15	实测	-28.3	-29.7	-29.0	-30.0	-34.0	-32.0
	计算	-35.1	-34.7	-34.9	-35.3	-35.6	-35.5
E24A25	实测	29.9	31.0	30.5	30.5	30.1	30.3
	计算	31.1	31.5	31.3	31.0	30.4	30.7

注:表中应力“-”表示压应力,应力值为各杆件受力最不利加载工况,非同一工况。

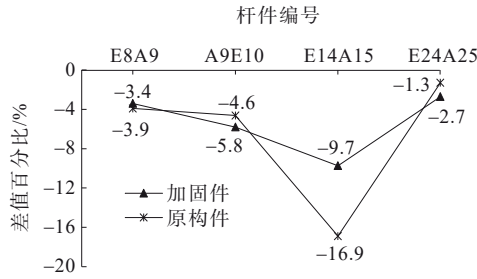


图 10 杆件应力实测平均值与计算平均值差值

Figure 10 Difference between measured and calculated average stress of members

4 初始应力对加固效果的影响

对于负荷钢桁桥的加固,加固施工前结构的负荷水平,也就是被加固构件的初始应力水平,是影响加固效果的重要因素。假设负荷钢桁桥某构件的初始应力水平为 $k = \sigma_{i0}/f_d$, σ_{i0} 为原构件初始应力, f_d 为原构件钢材设计强度;加固完成后,该构件承担的总轴力为 N ,原截面面积为 A_o ,需要的加固件面积为 A_n (加固量)。根据上述第 2 节的计算理论并假定加固后,在设计荷载下原构件应力为强度设计值 f_d ,可得:

$$f_d = \sigma_{i0} + \sigma_{i10} = \sigma_{i0} + \sigma_{in}, \sigma_{i10} = \sigma_{in}, \text{进一步:}$$

$$f_d = \sigma_{i0} + \sigma_{in} = kf_d + (N - A_o f_d)/A_n$$

$$A_n(1 - k) = \frac{N}{f_d} - A_o \quad (12)$$

式中: σ_{i10} 、 σ_{in} 分别为原构件、加固件第二批应力。

从式(12)可知,加固量 A_n 与 $1 - k$ 为反比例函数关系。取上述 E8A9、A15E16、A17E18 三根杆件进行分析,为方便讨论,暂不考虑弯矩作用,将原构件轴向应力放大至设计强度,其总轴力按相同比例放大,具体数据见表 8,取原杆件的初始应力水平 $k = [0, 0.9]$,材料设计强度取 $f_d = 275$ MPa,计算 k 与 A_n 的关系,见图 11。

表 8 杆件总轴力及原截面面积

Table 8 Total axial force and original section area of members

杆件编号	N/kN	A_o/mm^2
E8A9	16 724.1	43 392.0
A15E16	17 581.6	43 392.0
A17E18	13 871.5	34 880.0

从图 11 可以看出:当 $k = 0$ 时,也就是完全卸载的状态,加固量最小,随着原杆件初始应力的增加,加固量逐渐增加,在初始应力水平大于 0.6 以后,加固量急剧增加,该值与《钢结构加固设计标准》(GB

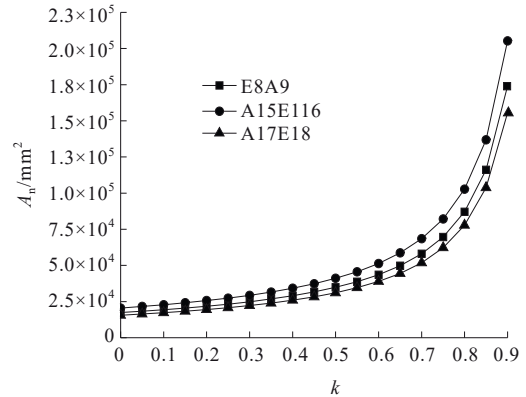


图 11 加固量 A_n 与初始应力水平 k 的关系曲线

Figure 11 Relationship between reinforcement intensity A_n and initial stress level k

1367—2019) 初始应力比上限 0.65 接近,负荷钢桁桥的加固可采用 0.6 作为初始应力比上限。

在第 2 节的研究中已经说明,负荷状态下进行钢桁桥加固,加固件承载力不能充分发挥,若将原构件与加固件所发挥承载力之和与按其设计强度和面积计算的承载能力之和的比值定义为加固效率 δ ,那么可以写成以下形式:

$$\delta = 1 - k \frac{A_n}{A_o + A_n} \text{ 或 } \delta = \frac{N}{f_d(A_o + A_n)} \quad (13)$$

在此仅讨论 δ 与 k 的关系,为方便讨论,在上述 A_n 与 k 关系曲线的基础上,进行加固效率与初始应力水平关系的计算,结果如图 12 所示。

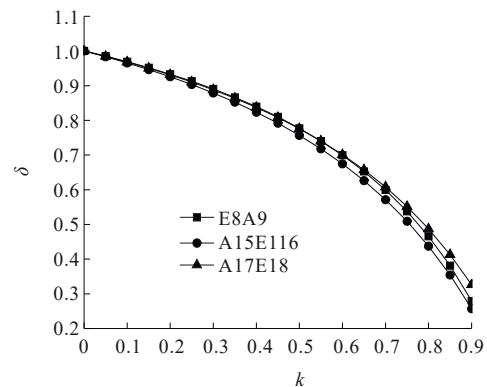


图 12 加固效率 δ 与初始应力水平 k 的关系曲线

Figure 12 Relationship between reinforcement efficiency δ and initial stress level k

从图 12 可以看出:当 $k = 0$ 时,也就是完全卸载的状态,加固效率为 1,即:材料强度可完全发挥,随着原杆件初始应力的增加,加固效率逐渐降低,在初始应力水平大于 0.6 以后,加固效率急剧降低,与图 11 具有相同的结论。

综合图11、12的计算可知:负荷状态下加固,初始应力水平越高加固量越高、加固效率越低;当初始应力水平超过0.6以后,加固量会急剧增长、加固效率急剧减小,加固越来越困难。因此,在负荷状态下加固钢桁桥时,应在加固前尽量卸载,以减小原结构的初始应力水平。

5 结论

本文依托松浦大桥大修工程,介绍了负荷状态下钢桁桥加固设计方法,进行了理论与试验分析,得出以下结论:

(1) 桥梁负荷加固,具有加固件、原构件受力不同步的特点,结合受力过程,根据加固件、原构件刚度进行内力分配,参照现有桥梁设计规范对加固件、原构件分别进行验算可保证结构安全。

(2) 以加固后构件原截面最大设计应力不超过其设计强度为原则,即“原构件截面边缘屈服准则”,可保证结构在最不利受力状态下处于弹性状态,满足现行桥梁规范要求。

(3) 通过本文方法与《钢结构加固设计标准》(GB 51367—2019)计算方法及成桥试验数据的对比,说明了本文计算方法的合理性及准确性,同时验证了本文加固方案的有效性。本文计算方法,可以更加直观地掌握加固后构件各部分的真实受力情况,可以为类似项目提供参考。

(4) 通过分析构件初始应力水平与加固量、加固效率的关系,建议负荷钢桁桥加固应尽量卸除原桥梁所承担的荷载,控制初始应力水平在0.6以内,以期用较小的加固量获得较好的加固效果。

参考文献:

References:

- [1] 四川省建筑科学研究院有限公司,清华大学. 钢结构加固设计标准:GB 51367—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.
Sichuan Institute of Building Research, Tsinghua University. Standard for design of strengthening steel structure:GB 51367—2019[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2020.
- [2] 冯玉珠. 前苏联的几种钢结构加固法[J]. 钢结构,1993,8(2):51-60.
FENG Yuzhu. Several effective strengthening methods in former ussr[J]. Steel Construction,1993,8(2):51-60.
- [3] 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):109-114.
CHEN Liang, CHEN Zuhe, SHAO Changyu. Study of reinforcement method for long-span steel truss bridge[J]. Highway,2020,65(8):109-114.
- [4] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
CCCC Highway Consultants Co.,Ltd.. Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015[S]. Beijing:China Communications Press Co.,Ltd.,2015.
- [5] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 公路桥梁加固设计规范:JTG/T J22—2008[S]. 北京:人民交通出版社,2008.
CCCC First Highway Consultants Co.,Ltd.. Specifications for strengthening design of highway bridges:JTG/T J22—2008[S]. Beijing:China Communications Press,2008.
- [6] 程永红. 既有线铆接下承式钢桁桥梁加固的实践[C]// 郑州:中国铁道学会高速重载与普通铁路桥梁运营管理与检测修理技术研讨会,2008.
CHENG Yonghong. Reinforcement practice of existing riveted through steel truss bridge [C]// Zhengzhou: China Railway Society High Speed Heavy Haul and Ordinary Railway Bridge Operation Management and Inspection and Repair Technology Seminar,2008.
- [7] 程永红. 既有线铆接下承式钢桁桥梁加固的实践[C]//北京:高速重载与普通铁路桥隧运营管理与检测修理技术论文集(下册). 中国铁道学会,2010.
CHENG Yonghong. Reinforcement practice of existing line riveted through steel truss bridge [C]//Beijing: Superhighway Heavy Haul and Ordinary Railway Bridge and Tunnel Operation Management and Inspection and Repair Technology Collection(Volume II).China Railway Society,2010.
- [8] 胡京涛. 某钢桥加固技术研究[J]. 铁道建筑,2010,50(12):21-23.
HU Jingtao. Study on strengthening technology of certain steel bridge[J]. Railway Engineering,2010,50(12):21-23.
- [9] 施旻,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.
SHI Yang, YANG Dong, LI Jianhong. Strengthening of 32 m deck steel truss bridge[J]. Sichuan Architecture,2009,29(3):123-124.
- [10] 宣海富. 重载化线路80 m下承式钢桁梁桥横向加固技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
XUAN Haifu. Research on the strengthening technology of 80 m-span deck steel truss bridge's lateral stiffness on the heavy haul line[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2014.
- [11] 徐新,申昊. 铁路钢桁梁加固方案对比研究[J]. 北方交通,2015(11):17-20.
XU Xin, SHEN Hao. Study on scheme comparison for reinforcement of steel truss of railway[J]. Northern Communications,2015(11):17-20.
- [12] 田云. 既有线60 m下承式钢桁梁横向加固技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
TIAN Yun. Research on strengthening lateral stiffness for

- 60 m-span through steel truss bridge on existing railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [13] 顾建新, 夏炜, 徐利军, 等. 既有线钢桁梁桥横向刚度加固技术[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(5): 12-16.
GU Jianxin, XIA Wei, XU Lijun, et al. Research on reinforcement technique to enhance lateral stiffness of steel truss bridge on existing railway[J]. China Railway Science, 2005, 26(5): 12-16.
- [14] XIA H, DE ROECK G, ZHANG H R, et al. Dynamic analysis of train - bridge system and its application in steel girder reinforcement[J]. Computers & Structures, 2001, 79(20/21): 1851-1860.
- [15] 方新跃. 文物铆接钢桥: 海珠桥维修加固关键施工技术[J]. 桥梁建设, 2016, 46(5): 6.
FANG Xinyue. Key construction techniques for repairing and strengthening of Haizhu Bridge: A historical riveted steel bridge, in Guangzhou[J]. Bridge Construction, 2016, 46(5): 110-115.
- [16] 张春雷. 浙江路桥鱼腹式铆接钢桁梁大修设计[J]. 城市道桥与防洪, 2017(1): 86-89, 12.
ZHANG Chunlei. Overhaul design of fish-belly riveted steel truss girder in Zhejiang Road[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2017(1): 86-89, 12.
- [17] 宋冬冬. 宁波市灵桥维修加固关键技术[J]. 施工技术, 2019, 48(2): 151-153.
SONG Dongdong. Key technology for repairing and reinforcing of Ling Bridge in Ningbo[J]. Construction Technology, 2019, 48(2): 151-153.
- [18] 吴运宏, 吴鹏. 铆接钢桁梁桥维修改造专项技术[J]. 中国公路, 2020(13): 110-111.
WU Yunhong, WU Peng. Special technology for maintenance and reconstruction of riveted steel truss bridge[J]. China Highway, 2020(13): 110-111.
- [19] 肖啸. 连续钢桁梁桥节点板更换效果评价[J]. 铁道建筑, 2019, 59(3): 10-13.
XIAO Xiao. Evaluation on replacement effect of gusset plate in continuous steel truss bridge[J]. Railway Engineering, 2019, 59(3): 10-13.
- [20] 董锟. 钢结构加固新技术及其应用研究[J]. 中国战略新兴产业, 2020(6): 104.
DONG Kun. Research on new technology of steel structure reinforcement and its application[J]. China Strategic Emerging Industry, 2020(6): 104.
- [21] WANG E L. Construction monitoring on steel truss bridge's maintenance and reinforcement[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 676(1): 012040.
- [22] 谭石. 连续钢桁架桥加固分析[J]. 交通世界, 2016(36): 48-49.
TAN Shi. Strengthening analysis of continuous steel truss bridge[J]. TranspoWorld, 2016(36): 48-49.
- [23] 杨书生, 崔凤坤, 王建圣, 等. 基于可靠度反演理论的大悬臂钢桁梁横移施工抗倾覆稳定设计[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 87-91.
YANG Shusheng, CUI Fengkun, WANG Jiansheng, et al. Research on design method of anti-overturning stability of large cantilever steel truss beam traverse construction based on reliability inversion theory[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 87-91.
- [24] 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.
SU Qingtian, WANG Sizhe, XUE Zhibo, et al. Reinforcement design of main truss members of existing riveted steel truss bridge in a widening and reconstruction project[J]. Bridge Construction, 2019, 49(4): 75-80.
- [25] 颜海, 陈亮, 邵长宇, 等. 公铁两用钢桁架桥原位拓宽改建设计关键技术[J]. 桥梁建设, 2019, 49(3): 91-96.
YAN Hai, CHEN Liang, SHAO Changyu, et al. Key techniques for design of in situ widening and reconstruction of rail-cum-road steel truss bridge[J]. Bridge Construction, 2019, 49(3): 91-96.
- [26] 陈亮, 邵长宇, 颜海, 等. 大跨钢桁梁桥拓宽改建工程抗震设计研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(1): 92-98.
CHEN Liang, SHAO Changyu, YAN Hai, et al. Study of seismic protection design for long-span steel truss girder bridge after widening and renovation[J]. Bridge Construction, 2020, 50(1): 92-98.
- [27] 王元清, 宗亮, 施刚, 等. 钢结构加固新技术及其应用研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(2): 1-6, 22.
WANG Yuanqing, ZONG Liang, SHI Gang, et al. Application research on new strengthening technologies for steel structures[J]. Industrial Construction, 2017, 47(2): 1-6, 22.
- [28] 王元清, 祝瑞祥, 戴国欣, 等. 初始负载下焊接加固工字形截面钢柱受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 78-86.
WANG Yuanqing, ZHU Ruixiang, DAI Guoxin, et al. Experimental study on load-carrying behavior of I section steel columns strengthened by welding with initial load[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 78-86.
- [29] 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(增刊 1): 92-97, 105.
SU Qingtian, WANG Sizhe, XUE Zhibo, et al. Influence of unloading degrees on the strengthening effect of the main truss members of steel truss girder bridges[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(sup 1): 92-97, 105.
- [30] 冶金工业部建筑研究总院. 钢结构检测评定及加固技术规程: YB 9257—1996[S]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
Central Research Institute of Building and Construction, MMI. Technical specification for inspection assessment and strengthening of steel structures: YB 9257—1996[S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.