

城市高架钢梁桥拼宽改造受力分析

罗文艺¹, 黄福云², 李雅杰¹, 崔玉龙², 王金安¹

(1. 中建五局土木工程有限公司, 湖南 长沙 410000; 2. 福州大学 土木工程学院)

摘要: 为了解钢梁桥拼宽对原桥的受力性能影响,以福州五四路钢箱梁公路高架桥为背景,采用 Midas/Civil 建立原桥拼宽后的整桥有限元模型,分析主梁拼宽后的受力情况,并与原桥的受力状况进行对比。研究结果表明:恒载作用下,拼宽后的桥梁比原桥受力更大,弯矩值增大;汽车荷载作用下,拼宽后的桥梁计算结果比原桥的弯矩值会有所减小;拼宽后的主梁和原桥在整体升降温作用下的应力值、纵向伸缩量相差较小,温度梯度作用下的受力有所变化,最大增加了 10% 以上;在不均匀沉降作用下,拼宽后的钢梁产生较大的应力,受力较拼宽前不利。荷载验算表明,该桥满足受力要求。因此,钢梁桥拼宽是一种适合于城市交通量大而施工条件有限的、有发展前景的改造方式。

关键词: 公路桥梁; 钢箱梁; 钢梁拼宽; 加固改造; 有限元; 受力分析

1 前言

市政桥梁作为城市道路交通的枢纽,在整个城市经济的发展以及城市化推进过程中,起着十分重要的作用。随着中国经济建设的快速发展,交通量的需求不断增大,许多桥梁出现设计荷载较低、桥龄较长,桥面宽度不足以及通行能力逐渐趋于饱和等问题。为了解决这些问题并提高交通量,往往选择将桥梁加固、加宽甚至拆除重建等措施。

桥梁的拆除重建一般很浪费资源并且违背低碳原则,因此,当桥梁剩余承载力仍然较大时,在原有桥梁基础上进行加固是一种较好的选择。目前,桥梁加固的研究得到了较多的关注。张树仁等采用粘贴钢板或

其他纤维复合材料的方法对钢筋混凝土构件受拉或受剪薄弱区段进行补强加固,以提高薄弱区的承载能力,并重新计算其抗剪承载力;项贻强等对横向联系失效的空心板梁桥采用施加横向预应力钢绞线进行加固,并对其横向分布进行了新的计算。不过,相对来说,为提高桥梁的通行量而进行桥梁加宽的研究相对不多,原因主要是其通常以新建桥梁的方式在原桥旁相邻位置进行拓宽,形成上、下幅桥梁,从而不改变原桥的结构和受力。拓宽以后的新桥可以增加新的车道数目,保留旧桥的上下部结构继续使用,从而提高原有的交通流量。然而,对于城市桥梁来说,由于空间有限,在旧桥相邻位置新建桥梁较为困难,特别是对于城市高架桥或立交桥来说,通常为曲线桥梁,新建桥梁更为困难。因此,在城市空间有限条件下,选择在旧桥的两侧

- *****
- [11] Miao C Q, Shi C H. Temperature Gradient and its Effect on Flat Steel Box Girder of Long-Span Suspension Bridge [J]. Sci China Tech Sci, 2013, 56:1 929-1 939.
- [12] 宋君超,周艳. 正交异性钢桥面铺装有限元分析方法的比较[J]. 中外公路,2019(1).
- [13] 王瑁成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [14] 孙金,冯小青,唐焱,等. 高温沥青摊铺时钢-混叠合梁桥温度场有限元分析[J]. 中外公路,2018(3).
- [15] 程炳岩,孙卫国,孙仕强,等. 重庆地区太阳总辐射的气候学计算方法研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011(9).
- [16] 严作人. 层状路面温度场分析[D]. 同济大学博士学位论文,1982.
- [17] 刘菊. 固体界面接触热阻及导热系数测量的实验研究[D]. 华中科技大学硕士学位论文,2011.
- [18] Li H, Harvey J. Numerical Simulation and Sensitivity Analysis of Asphalt Pavement Temperature and Near-Surface Air Temperature Using Integrated Local Modeling[C]. The 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D. C., 2010.

收稿日期:2020-10-16(修改稿)

作者简介:罗文艺,男,大学本科,高级工程师. E-mail:491591218@qq.com

拼接加宽是一种难以避免的改造方式。这种加宽措施不可避免会影响到原桥的受力性能,因此有必要进行深入的分析。

目前,关于桥梁拼接加宽改造的研究不多,仅有少量关于混凝土梁桥加宽的文献。与常规梁桥设计分析不同,桥梁拼接加宽分析时,需要考虑新旧梁桥由于成桥时间差异所带来的一系列作用差异,如新建桥梁存在新的地基沉降变形、主梁片数增加导致横向分布系数变化等,这些差异会给拓宽后的桥带来不同的作用效应。吴文清等就某预应力混凝土连续箱梁桥的拼宽,探讨了桥梁横向拼接加宽后给既有箱梁桥面板可能带来的结构病害。该桥的加宽采用新桥和旧桥仅箱梁顶板和桥面板翼缘铰接连接、其他部位不连接的方式;Wu Wenqing 等介绍了某混凝土空心板桥的拼宽,探讨并建立了地基沉降对拼宽后桥梁力学性能影响的数学模型。该桥的加宽采用在新桥和旧桥的空心板顶板之间现浇拼接板连接、下部结构不连接的方式;黄立浦等通过建立旧桥拓宽加固的模型,研究加固横梁的设置位置、数量、刚度;加宽主梁、旧桥的刚度以及主梁连接方式不同时,各主梁横向分布系数的变化规律。并提出一种既有桥梁拓宽加固的方法——纵横梁拓宽加固法。关于钢梁桥的拼接加宽还未见文献报导。

与混凝土桥梁的新旧桥采用现浇拼接进行铰接连

接方式不同,钢梁桥的新桥与旧桥通常采用焊接方式进行刚接,其除使箱梁顶板或翼缘连接外,还可使上部结构主梁相连接,新旧桥的连接更紧密。因此,新旧桥之间的相互影响相比混凝土桥梁来说更大,同时加宽后的旧桥内力也会发生改变。

为了研究施工场地空间有限条件下城市钢梁桥拼宽后的受力性能,该文以福州市五四路高架桥为工程背景,通过 Midas/Civil 有限元软件分别建立旧桥和加宽后的新桥有限元模型,进行竖向荷载(车辆荷载)、温度荷载以及不均匀沉降荷载作用下新旧桥的力学性能研究,对比新桥和原桥的受力变化,为此类型桥梁的加宽设计计算和有关规范的制定提供参考与借鉴。

2 工程背景

福州市五四路思儿亭高架桥,建于 2008 年。该桥是一座跨度为 $3 \times 30 \text{ m} + (30 + 40 + 30) \text{ m} + 3 \times 30 \text{ m}$ 的钢箱梁桥,全桥为三联,桥面宽度 16.5 m,梁高 1.7 m,双向四车道。箱梁顶板厚 14 mm,底板和腹板厚 12 mm,腹板间距为 9.5 m。桥墩由西向东分别为 1[#]墩~10[#]墩,采用双柱式墩(墩身直径 1.4 m),双柱之间设有一横系梁(横系梁截面尺寸为 $0.8 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$),原桥立面图和断面图见图 1、2。

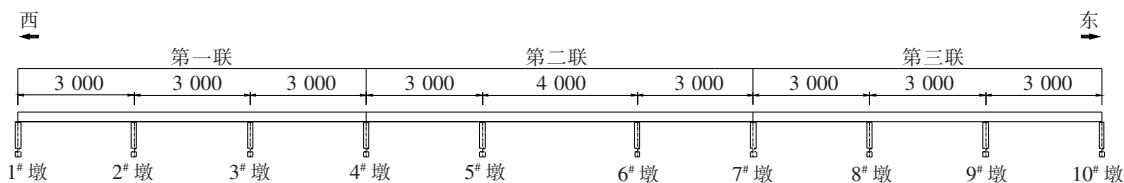


图 1 桥型立面布置图(单位:cm)

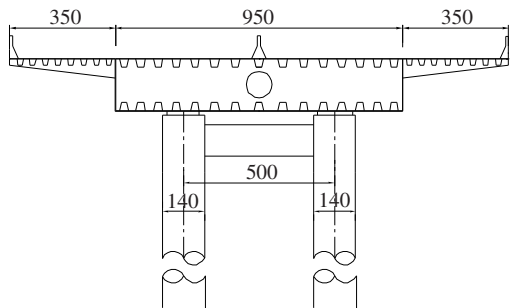


图 2 原桥横断面布置图(单位:cm)

由于城市发展较快,车流量迅速增长,原桥已不能满足现在的交通量,需将原桥拓宽并改造为立交桥。新桥对比原直线桥主要增设了 4 条匝道,分别为 A、

B、C 和 D 匝道。A、B、C、D 匝道设计长度分别为 527.4、123.4、134.7、218.3 m,除 A 匝道设计宽度为 16 m 外,其他匝道的设计宽度均为 8.0 m。桥梁改造后的布局如图 3 所示。限于篇幅,该文主要针对原桥按 A、B 和 C 共 3 个匝道拼宽后的受力性能进行研究,对于匝道桥自身的受力不进行分析。

A、B 和 C 匝道的跨径布置均为 $(32 + 45 + 38 + 34) \text{ m}$ 。拼宽桥面采用正交异性板结构,桥面全宽为 8~16 m,梁高为 1.5~1.7 m,结构形式为双箱双室。钢箱梁悬臂长度为 2.0 m,标准断面顶板板厚 16 mm,底板板厚 16 mm,腹板板厚 14 mm。钢箱梁顶底板、腹板在中支两侧 4~6 m 范围进行加厚,顶板和底板均加厚至 35 mm,腹板加厚至 20 mm。加宽后的上

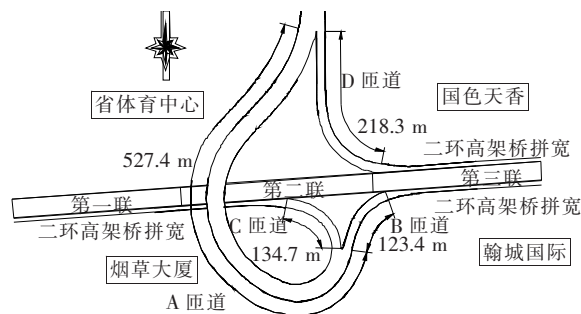


图3 高架桥布局图

部结构横截面如图4所示。拼宽桥的横隔板布置与原桥横隔板布置一致。另外,为使新、旧桥连接可靠,在新旧桥连接处的腹板之间焊接一道连接横隔板,新旧桥顶板采用钢板和螺栓连接。

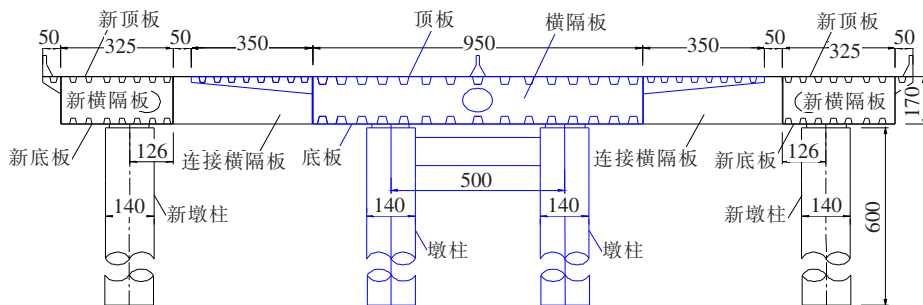


图4 新桥横截面布置图(单位:cm)

在弹性支座上。新旧桥采用虚拟横梁来模拟刚接拼宽,不考虑箱梁畸变效应和桩基础。原桥有限元模型共460个节点和598个单元,加宽后的新桥共1582个节点、2335个单元。原桥和新桥模型分别如图5、6所示。

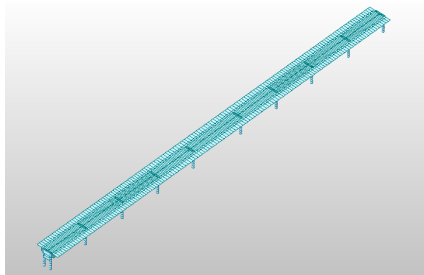


图5 原桥有限元模型

3.2 材料和作用

主梁采用Q345qc钢,弹性模量 $E=2.1 \times 10^5$ MPa,剪切模量 $G=0.81 \times 10^5$ MPa,容许弯曲应力 $\sigma_w=210$ MPa。墩柱采用C40混凝土,弹性模量 $E_c=32.5$ GPa,轴心抗压设计强度 $f_{cd}=18.4$ MPa,轴心抗压标准强度 $f_{ck}=26.4$ MPa,抗拉设计强度 $f_{td}=1.65$ MPa,抗拉标准强度 $f_{tk}=2.40$ MPa。

荷载作用包括永久作用和可变作用,不考虑施工

匝道桥墩采用钢管混凝土柱式墩,其中,A匝道较宽,采用双柱式墩,墩柱中心间距为7 m;B、C匝道则采用独柱式墩。墩柱外钢管截面尺寸为直径 $\Phi=1.3$ m,壁厚 $t=20$ mm,内灌C30微膨胀混凝土。

3 有限元计算

3.1 有限元建模

有限元模型采用Midas/Civil 2015进行建模。模型中钢箱梁、横隔板、桥墩等皆采用梁单元模拟,支座采用弹性连接模拟,每一联的端点用铰连接模拟伸缩缝,桩底固结。因考虑施工及新设匝道对旧桥的影响,对于A匝道,模型只取部分建模分析,匝道端点支撑

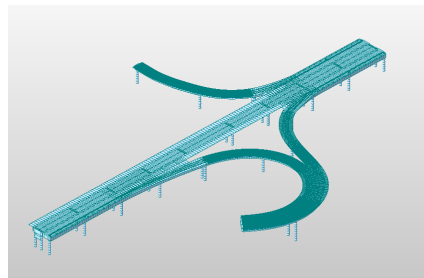


图6 新桥有限元模型

过程的影响。永久作用包括结构自重和二期恒载,其中钢箱梁主梁自重按 78.5 kN/m^3 考虑,二期铺装按 78.1 kN/m 均布荷载作用在主梁上;可变作用中的汽车荷载为城市-A级,考虑汽车冲击力、离心力和制动力;温度变化考虑升温 25°C 、降温 20°C ;沉降考虑旧桥沉降10 mm,新拼桥沉降20 mm,产生10 mm沉降差。表1为7种荷载作用以及4种荷载组合工况。

4 有限元计算结果分析

4.1 永久荷载作用

图7为主梁在恒载作用下(工况1)的弯矩图,其

表 1 荷载作用工况

荷载名称		工况
永久荷载	恒载(主梁自重+二期恒载)	1
	汽车荷载	2
	整体升温	3
可变荷载	温度变化	4
	整体降温	4
	梯度升温	5
	梯度降温	6
不均匀沉降		7
I	1.2 倍恒载+1.4 倍移动荷载	8
	1.0 倍恒载+1.0 倍移动荷载+1.0 倍沉降	9
荷载组合	1.1 倍恒载+1.3 倍移动荷载+1.3 倍温度梯度上升+1.3 倍温升+1.3 倍沉降	10
	1.1 倍恒载+1.3 倍移动荷载+1.3 倍温度梯度下降+1.3 倍温降+1.3 倍沉降	11

中括号外的数值为拼宽后的弯矩值、括号内为旧桥弯矩值。限于篇幅,剪力等分布未给出。从图 7 可以看出:无论是正弯矩或者负弯矩,拼宽后的直桥对比原桥的绝对值都有增大。原因是新桥一部分重量也由原桥承受,所以弯矩会有所增加,其中图 7(a)第一联和图 7(c)第三联的弯矩值变化较大。

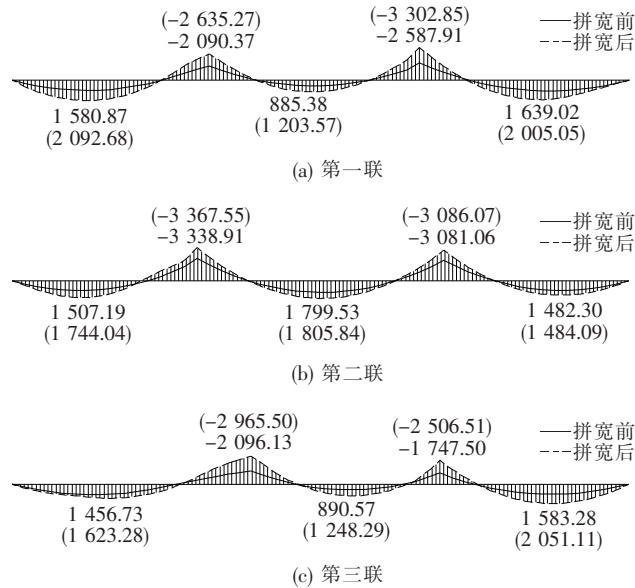


图 7 主梁在恒载作用下的弯矩包络图(单位:kN·m)

比较可知:该桥拓宽对第二联的正、负弯矩增加量最小,尤其是 5[#]墩、6[#]墩处的主梁负弯矩和第二、第

三跨跨中处的正弯矩,这是因为旧桥仅在第一联、第三联和第二联的第一跨处加宽,因而对第二联影响最小;对第三联的影响最大,对第一联的影响其次。总之,在恒载作用下,拼宽后的桥梁比原桥受力更大。

4.2 可变荷载作用

4.2.1 汽车荷载作用

原桥采用四车道对称布置。图 8 为主梁在汽车荷载作用下(工况 2)的弯矩包络图,其中括号外的数值为旧桥弯矩值、括号内的数值为拼宽后的弯矩值。限于篇幅,剪力等分布未给出。

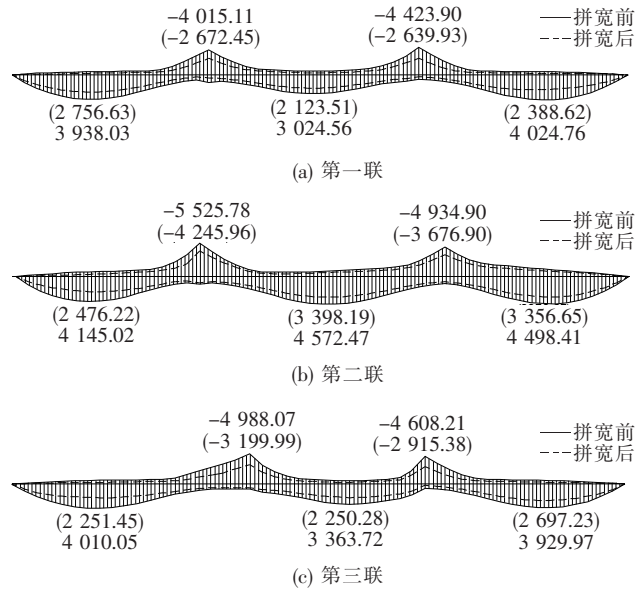


图 8 主梁在汽车荷载作用下的弯矩包络图(单位:kN·m)

从图 8 可以看出:无论是正弯矩或者负弯矩,拼宽后的直桥对比原桥的绝对值都有减小。这是因为拼宽后的桥梁主梁数量增加,横向分布系数减小,荷载分布在更多的主梁上。其中图 8(a)第一联和图 8(c)第三联的弯矩值变化较大。

比较可知:该桥拓宽对第二联弯矩减小量最小,尤其是墩柱 5[#]、6[#]处的主梁负弯矩和第二、三跨跨中处的正弯矩。这是因为旧桥仅在第一联、第三联和第二联第一跨处加宽,因而对第二联影响最小;对第三联的影响最大,对第一联的影响其次。

在汽车荷载作用下,拼宽后的桥梁计算结果比原桥更小,这是不利的和偏不安全的。因此,拼宽后桥梁的车道折减系数计算方法还需进一步研究。

4.2.2 温度荷载作用

由于该桥为钢结构,温度荷载作用下的内力较大。因此,针对原桥和拼宽后的主梁进行整体升降温和温度梯度变化荷载作用,进一步探究拼宽前后温度荷载

所产生的内力变化,不过未考虑焊接残余应力的影响。

(1) 整体升降温作用

计算表明:在整体温度变化作用下,原桥的温度应力与拼宽后的相差不大。其中,原桥在温度升降情况下产生的压、拉应力分别为 -90.2 、 72.1 MPa,拼宽后产生的压、拉应力分别为 -87.2 、 69.8 MPa,最大下降量为 3.3% ;原桥在温度升降情况下产生的纵向伸长、减缩量分别为 26.5 、 21.2 mm,拼宽后产生的纵向伸长、减缩量分别为 25.4 、 20.3 mm,最大下降量为 4.4% 。因此,整体温度变化作用下,拼宽后的主梁受力情况对比原桥变化不大。

(2) 温度梯度作用

温度梯度模式按照 JTJ D60—2004《公路桥涵设计通用规范》中有关规定进行取用,如图 9 所示。计算梯度升温时,桥面板表面的最高温度 T_1 按照规范要求取 14°C ,桥面板表面以下 100 mm 处 T_2 取 5.5°C 。对于带混凝土桥面板的钢结构, $A=300$ mm。计算反温差(梯度降温)时,按规范要求取正温差乘以 -0.5 。图 10 为靠近匝道一侧箱梁应力点示意图,该文主要取图 10 中 1、2 点的应力值沿全桥方向的变化进行分析。

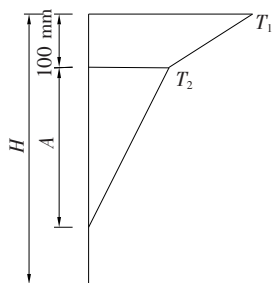


图 9 竖向温度梯度曲线

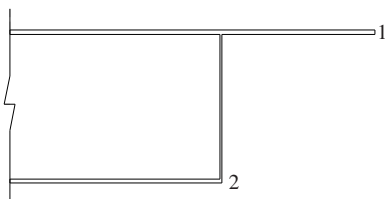


图 10 箱梁应力点示意图

在梯度升温作用下,顶板主要产生拉应力,底板主要产生压应力。负温度梯度相比正温度梯度要小,限于篇幅,该文不展开陈述。梯度升温作用下,拼宽后桥梁的最大应力约为 32.0 MPa。对比原桥,拼宽后桥梁沿跨径方向的温度梯度应力会产生较大变化,最大应力差值出现在第二联,数值为 3.7 MPa,增加幅度超过 10% 。

4.2.3 不均匀沉降作用

由于旧桥在改造施工以前,成桥运营通车数年,桩基已经具有一定的沉降量。原桥和匝道拼宽固结在一起后,原桥的沉降空间很小,但是新拼匝道桥的沉降空间很大,这就使得新旧桥的沉降量不同,产生一定的沉降差。桥梁拼宽的最大技术难题在于新旧桥基础沉降差异的控制问题,新旧桥基础不均匀沉降差过大,会引起新、旧桥连接处产生开裂等病害,严重时会影响桥梁的正常使用。由于原桥与匝道固结,这种沉降差最终会导致主梁产生应力。该文针对不均匀沉降作用下的纵桥向和横桥向受力情况进行深入的分析。

图 11 为该桥主梁两个腹板的纵桥向沉降应力图。

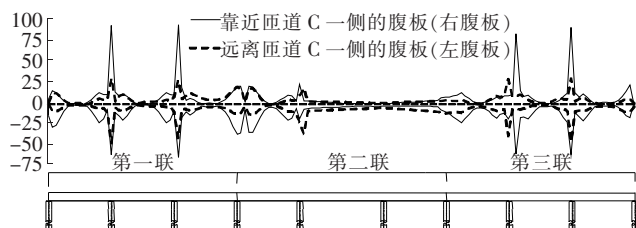


图 11 不均匀沉降作用下各腹板的纵桥向应力图(单位:MPa)

由图 11 可以看出:第一联和第三联墩柱处的应力增加较大,最大接近 100 MPa。且靠近匝道一侧的腹板应力值较大。第二联拼接部分较少,所以不均匀沉降产生的应力值较小。

图 12 为该桥在不均匀沉降作用下 $2^\#$ 、 $9^\#$ 墩柱处主梁的横桥向应力图。

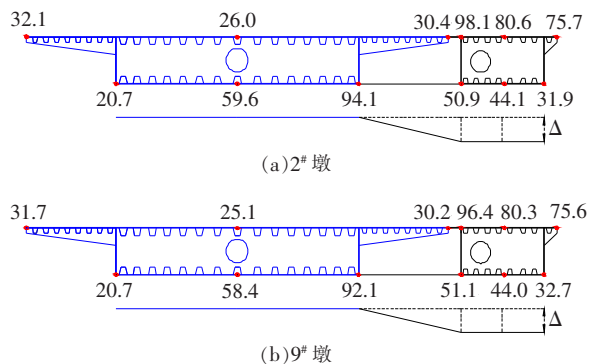


图 12 不均匀沉降作用下墩柱处主梁横桥向应力图(单位:MPa)

由图 12 可以看出:① 不均匀沉降作用下新桥主梁各个位置都产生一定的应力。其中,主梁各个位置处的应力值有所不同,大致呈现的规律为:与连接隔板位置的横向距离越大,产生的应力值越小。连接隔板附近位置的应力值较大,特别是对于原桥底板处与新拼桥顶板处,应力值最大接近 100 MPa;② 不均匀沉

降作用下新拼桥主梁产生的应力值较原桥主梁的应力大。

由上述分析可知:在不均匀沉降作用下,拼宽后的钢梁产生较大的应力,受力较拼宽前更不利。

4.3 荷载组合作用

对上部结构进行验算,荷载组合 I ~ IV 下的主梁最大挠度和应力值见表 2。

表 2 荷载组合下的最大挠度和应力值

荷载组合	挠度值/mm		应力值/MPa	
	原桥	新桥	原桥	新桥
I	30.32	24.49	-85.9	-74.9
II	12.57	19.53	-64.9	-91.1
III	23.81	29.93	-129.5	-186.0
IV	20.17	31.88	-142.0	-191.3

由表 2 可知:截面最大应力为 191.3 MPa,小于容许拉应力 210 MPa。主梁最大挠度为 31.9 mm,小于规范规定的容许值 50 mm(计算跨径 30 m 的 1/600),拼宽后的桥梁满足承载能力极限状态下的主梁抗弯承载力要求和挠度要求,并具有一定的安全储备。因此,钢梁桥拼宽是一种适合使用的、有发展前景的改造方式。

5 结论

通过建立 Midas/Civil 有限元模型,对某公路钢箱梁高架桥开展了拼宽改造设计分析,并与原桥的受力性能进行了对比,得到以下结论:

(1) 恒载作用下,拼宽后的桥梁比原桥受力更大,其中墩柱处的主梁弯矩最大增大了 43.4%、跨中处的主梁弯矩最大增加了 35.9%。

(2) 拼宽后的桥梁主梁数量增加,横向分布系数减小,荷载分布在更多的主梁上,汽车荷载作用下,拼宽后桥梁受力比原桥小。

(3) 拼宽后的桥梁和原桥在温度整体升降作用下的应力和变形量相差较小,应力变化量为 3.3%,桥梁纵向伸缩变化量为 4.4%;温度梯度作用下拼宽后的桥梁应力和原桥相比有所变化,最大应力增加了 10%。

(4) 在不均匀沉降作用下,拼宽后的钢梁产生较大的应力。对于纵桥向,在有拼宽的第一联和第三联

墩柱处的应力增加较大。而第二联拼接部分较少,不均匀沉降产生的应力值较小。对于横桥向,与连接隔板位置的横向距离越大,产生的应力值越小。连接隔板附近位置的应力值较大,特别是对于原桥底板处与新拼桥顶板处,应力值最大接近 100 MPa。

(5) 荷载验算表明:该桥满足受力要求。钢梁桥拼宽是一种适合于城市交通量大而施工条件有限的、有发展前景的改造方式。

参考文献:

- [1] 聂建国,王宇航,樊健生,等. 钢-混凝土组合梁加宽混凝土旧桥技术中组合横梁界面受力性能研究[J]. 土木工程学报,2012(3).
- [2] 赵煜,张珂. 既有桥梁拓宽后承载潜力研究[J]. 长安大学学报(自然科学版),2003(1).
- [3] Bing Tu,Zhi Fang,You Dong,et al. Time-Variant Reliability Analysis of Widened Deteriorating Prestressed Concrete Bridges Considering Shrinkage and Creep[J]. Engineering Structures,2017,153:1-16.
- [4] 范晓江. 山区高速公路桥梁拓宽方式研究[J]. 公路交通科技,2014(10).
- [5] 张树仁,宋建永,张颂娟. 桥梁加固钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算方法及试验研究[J]. 中国公路学报,2003(3).
- [6] 项贻强,邢骋,邵林海,等. 横向加固空心板梁桥荷载横向分布计算方法与试验研究[J]. 中国公路学报,2013(2).
- [7] 吴文清,唐章翔,张慧,等. 混凝土连续箱梁桥拼接拓宽后箱梁顶板病害分析[J]. 中国公路学报,2018(5).
- [8] 张哲,李斐然,邱文亮,等. 钢悬臂梁拓宽钢筋混凝土箱梁桥的接触面应力分析[J]. 公路交通科技,2010(2).
- [9] ALLEN,JH,ANDERSON,GH,et al. Guide for Widening Highway Bridges[J]. Engineering Structures,1992(4):451-466.
- [10] Wu Wenqing,Shan Hongwei,Yang Song,et al. Key Assumption to Evaluate the Mechanical Performance of Widened Voids-Slab Bridge Due to Foundation Settlement[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2018,22(4):1 225-1 234.
- [11] 黄立浦,曹素功,常柱刚. 旧桥拓宽加固中荷载横向分布系数的变化规律[J]. 中外公路,2017(4).
- [12] JTG D60-2004 公路桥涵设计通用规范[S].
- [13] 王伟. 装配式箱梁桥拓宽中的基础沉降控制标准研究[J]. 中外公路,2018(5).