

谢肖礼,杨创捷,周远航.连续刚构桥钢桁架加固原理及其应用[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2024,39(2):44-51.
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.02.006

XIE X L, YANG C J, ZHOU Y H. Reinforcement Principle and Application of Steel Truss for Continuous Rigid Frame Bridge[J].
Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(2): 44-51. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.02.006

连续刚构桥钢桁架加固原理及其应用

谢肖礼*, 杨创捷, 周远航

(广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要:针对预应力连续刚构桥的病害和传统加固方法存在的不足,提出一种在原结构上增设钢上弦杆和腹杆,并以原预应力混凝土结构作为下弦杆,形成桁式结构共同抵抗部分荷载的加固方法.通过增设钢结构,将部分原本由混凝土结构独自承担的荷载,转由桁式结构承担,从而达到以较少代价提高结构的抗弯能力、抗剪能力和承载力的目的.以香江圩郁江特大桥加固为例,详细阐述所提方法及其力学原理,并进行详细的加固设计.结果表明:所提方法在增加较少用钢量的前提下,能有效提高结构的刚度、强度和动力特性等,且施工方便,因此,适用于既有连续刚构桥的提载和加固改造.

关键词:连续刚构;组合结构;桥梁加固;桁架结构

中图分类号:U448.14 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2024)02-0044-08

Reinforcement Principle and Application of Steel Truss for Continuous Rigid Frame Bridge

XIE Xiaoli, YANG Chuangjie, ZHOU Yuanhang

(College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Due to the shortcomings of traditional reinforcement methods and the damages of prestressed continuous rigid frame bridge, a new reinforcement method is proposed that steel upper chord and web are added to the original structure, and the original prestressed concrete structure is used as the lower chord to form a squat structure to resist partial load. The method is to add a steel structure, and part of the load originally undertaken by the concrete structure is transferred to the concrete structure, so as to achieve the purpose of improving the structural bending and shearing capacity and structural stiffness with less cost. This paper takes the reinforcement of Xiangjiangyu Yujiang Bridge as an example, elaborates the method and its mechanics, and carries out detailed reinforcement design. In addition, it can be seen from the comparative analysis of the finite element method that the method can effectively improve the mechanical properties such as rigidity, strength and dynamic characteristics of the structure under the premise of increasing the amount of steel used, and the construction is convenient, so it is suitable for both the loading and reinforcement of continuous rigid frame bridges.

Keywords: continuous rigid frame; combined structure; bridge reinforcement; truss structure

收稿日期:2021-05-14

修改日期:2024-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51809046);广西重点研发计划资助项目(桂科 AB18126047);广西防灾减灾与工程安全重点实验室系统性研究项目资助(2016ZDX0001)

*通信作者, E-mail: 2381796967@qq.com

预应力混凝土刚构桥至今已有 50 多年的历史,高强材料的迅速发展,使其成为近年来使用最广泛的大跨度钢筋混凝土梁桥^[1-2]。结构上,连续刚构桥墩顶处的墩梁固结能够增加顺桥向的抗弯刚度和横桥向的抗扭刚度,从而能大幅提升桥梁的跨越能力^[3-4]。形式上,连续刚构桥简洁明确,遒劲有力,是技术与艺术的完美结合,从而成就了其在世界桥梁中不可替代的地位^[5-6]。

随着时间的推移,已建成的预应力混凝土连续刚构桥的缺陷和病害日益突出,主要表现为预应力松弛导致的预应力损失、腹板开裂和跨中下挠^[7-8]。例如,美国的鹦鹉渡口桥成桥 12 a,累计下挠达 63.5 cm;英国的 Kingston 桥成桥 28 a,累计下挠达 30 cm;著名的 Koror-Babelthuap 桥在成桥不到 20 a 的时间,由于桥梁下挠,发生倒塌。我国的河南三门峡黄河公路大桥成桥 7 a,累计下挠达 22 cm;广东南海金沙大桥成桥 7 a,累计下挠达 23 cm;黄石长江大桥在成桥 7 a 后,箱体的不同位置分布有 200 多条裂缝。

由上述可知:已建成的预应力连续刚构桥出现大量病害,且该类桥的数量庞大,拆除重建工程的直接费用和社会成本高昂,故需对其进行有效加固^[9-10],以延长其使用寿命。工程上对预应力连续刚构桥加固的比较常用的传统方法有增大截面加固法、体外预应力加固法和外贴碳纤维布加固法等^[11-13]。其中,增大截面加固法虽然能在一定程度上提高结构的刚度与承载力,但大大增加了结构自重,且新老截面不能协同工作;体外预应力加固法虽然能提高结构的承载力,但可能因预应力松弛导致预应力损失,且不能提高结构刚度;外贴碳纤维布加固法不能显著提高结构的整体刚度,界面黏结剂(即环氧树脂类)存在老化耐久等问题^[14-15]。

针对传统加固方法存在的不足,本文提出一种优化内力加固方法,即在混凝土箱型结构上增设钢构件以形成桁式结构,从而共同抵抗部分荷载的加固方法。该方法可以实现梁高最大化和截面复合抗弯,从而达到提高结构刚度和承载力的目的。本文介绍其结构形式和力学原理,并以香江圩郁江特大桥加固为例,通过有限元软件对其强度、刚度、稳定性及动力特性进行研究。

1 桥梁检测结果及加固措施

1.1 工程概况

香江圩郁江特大桥位于广昆高速兴业至六景段主线上,中心里程桩号为 K429+106。该桥为一座四跨预应力钢筋混凝土刚构桥,分为左右两幅,桥梁全长为 410 m,跨径组合 80.0 m+2×125.0 m+80.0 m。

原桥上部结构采用预应力钢筋混凝土,每幅主梁为单箱单室箱梁,采用变截面(2.5~6.8 m),梁高按抛物线渐变。桥面总宽为 26.5 m,采用水泥混凝土铺装层,两桥的桥台处设有梳形钢板伸缩装置,桥梁平面图与立面图如图 1 和图 2 所示。

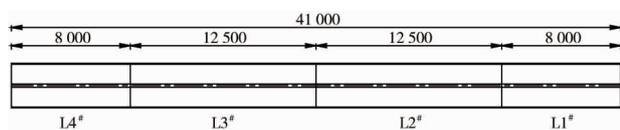


图 1 大桥平面(单位:cm)



图 2 大桥立面(单位:cm)

香江圩郁江特大桥位于广昆高速兴业至六景段主线,由于重车在桥上行驶的频率和数量日益增加,使得大桥主梁腹板的受拉区出现开裂现象,并且逐渐向顶板扩展,致使桥梁的刚度及承载力下降。裂缝产生的主要原因:其一,外部荷载的增大对混凝土结构产生较大的冲击;其二,设计的缺陷导致桥梁性能难以达标。经过检测,桥梁的主要病害:

1) 两幅桥 L3[#]~L4[#]跨主梁腹板表面分布有多条斜向裂缝,最大缝宽为 0.5 mm,已超过 JTG/T J21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》规定的钢筋混凝土梁腹板斜向裂缝允许的最大宽度限值 0.3 mm。

2) 两幅桥主梁箱室的顶板表面均分布有多条纵向、斜向及网状裂缝,最大缝宽为 0.4 mm,主梁箱室横隔板表面分布有多条横向、竖向及网状裂缝,最大缝宽为 0.2 mm,根据 JTG/T J21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》中的规定,前者超限 0.1 mm,后者符合要求。

3) 两幅桥的墩台表面存在多处钢筋锈胀和混凝土破损,总面积约为 0.43 m^2 。此外, L1# 左侧桥台挡块外侧面存在局部混凝土不密实,钢筋外露锈蚀,面积约为 0.01 m^2 。

4) L4# 跨桥面铺装距 L4# 左侧桥台 $2\sim 4 \text{ m}$, 距左侧护栏 $5.6\sim 6.6 \text{ m}$ 范围有 1 条斜向裂缝, L1# 跨桥面铺装距 L1# 右侧桥台 $5\sim 9 \text{ m}$, 距右侧护栏 4.8 m 及 L3# 跨桥面铺装距 L2# 左侧桥墩 $40.0\sim 44.3 \text{ m}$ 处均分布 1 条纵向裂缝。

1.2 加固方法及力学机理

1.2.1 加固方法

原桥结构布置如图 3 所示. 采用在原结构上增设钢构件从而形成桁式结构的加固方法, 加固完成后的结构布置如图 4 所示. 增设的钢构件在不显著增加自重的前提下能够大幅度提高桥梁性能, 起到提高刚度与承载力的加固效果. 其主要机理是通过形成桁式结构增加桥梁截面的梁高, 从而增大力臂, 将材料性能充分发挥. 此外, 在形成桁式结构之后, 原本由混凝土独自抗弯变为由钢桁片与混凝土形成双力偶抗弯, 从而起到提高结构刚度与承载力的效果。

除此之外, 对裂缝进行填补处理, 防止裂缝的进一步发展. 对于宽度为 $0.2\sim 0.5 \text{ mm}$ 的混凝土裂缝, 采用注浆法进行修补; 对于宽度小于 0.2 mm 的微细裂缝, 采用表面处理法进行修补。

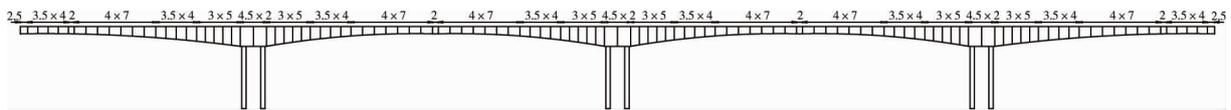


图 3 原桥结构布置(单位:m)

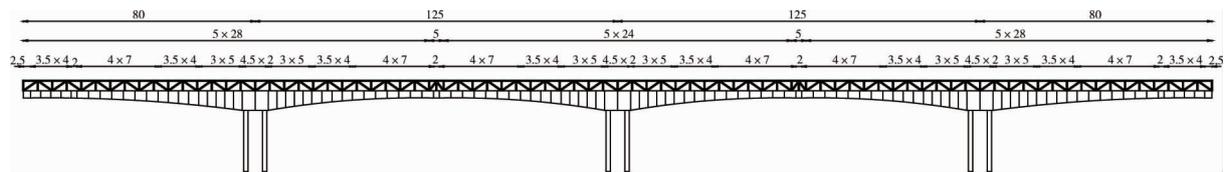


图 4 桥梁加固后结构布置(单位:m)

1.2.2 力学原理分析

为了尽量减少所增加荷载对原结构的负担, 本文提出采用桁式结构进行加固, 以便有效提高结构的抗弯及抗剪能力. 根据以上构想, 增设钢结构作为上弦杆, 原结构中的混凝土作为下弦杆, 腹杆采用钢结构, 从而形成钢与混凝土组合的桁架结构. 通过合理设计, 使中性轴仍然落在下弦杆(混凝土箱型截面)上, 可以达到节省用钢量并充分发挥原有结构抗弯能力的目的. 另外, 从受力来看, 该结构的上弦杆轴力与原结构(混凝土箱型截面)轴力形成一对力偶来抵抗弯矩, 从而实现复合抗弯, 大大提高原结构的抗弯能力. 以下对负弯矩区截面进行详细的力学分析(对正弯矩区的分析与此类似, 略去)。

桁架截面的静力等效示意图如图 5 所示. 当中性轴落在混凝土箱型截面上时, 截面上的应力分布必然会出现拉应力和压应力, 如图 5a 所示对其下弦杆进行静力等效为混凝土箱梁所受轴力 N_c . 与原结构所承担的弯矩 \bar{M} . 对加固后结构的全截面再进行静力等效, 分别求出该截面上主矢、主矩的表达式为

$$N = N_s - N_c = 0; \quad (1)$$

$$M = N_s y_1 + N_c y_2 + \bar{M}; \quad (2)$$

$$y_1 + y_2 = H. \quad (3)$$

式中: N 为结构所受轴力之和; N_s 为钢结构所受的轴力; N_c 为混凝土箱梁所受轴力; M 为结构所受弯矩之和; y_1 为钢上弦杆形心轴距组合结构截面中性轴的距离; y_2 为混凝土下弦杆截面形心轴距组合结构截面中性轴的距离; \bar{M} 为原结构所承担的弯矩; H 为桁高。

将式(1)和式(3)代入式(2)可得

$$M = N_s H + \bar{M}. \tag{4}$$

由式(4)可知:抗弯能力由两部分组成,即新增桁架与原箱型混凝土形成的复合抗弯。

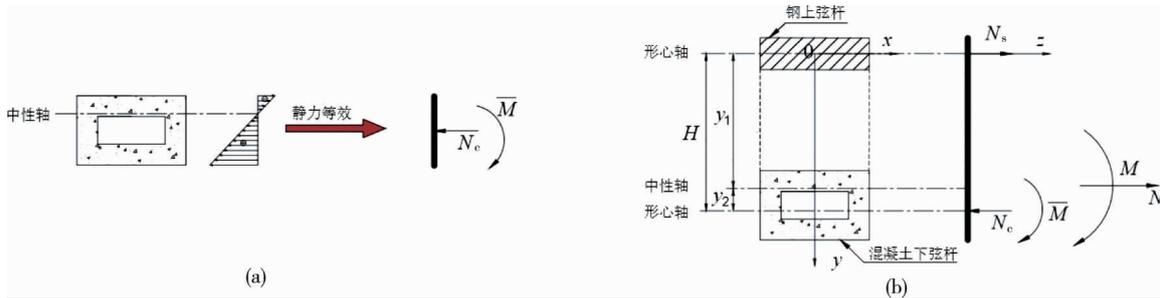


图 5 桁架截面静力等效

1.2.3 加固设计

针对上述加固方法与力学原理的分析,可进行如下加固设计:

1) 设计参数

如图 3 所示,桥梁主跨 125 m,全桥长 410 m,梁高 2.5~6.8 m,边跨比为 0.625.加固后的主梁横断面如图 6 所示,桥面宽 12.75 m,桥面增设钢上弦杆和腹杆,从而形成高 3.5 m 的桁片,每隔 10 m 对悬臂翼缘板设置斜撑,钢与混凝土之间通过设置剪力钉实现有效传力.同时,对于桥梁箱梁顶板、腹板和底板的裂缝,采用黏贴宽 300 mm,厚 6 mm 的钢板进行加固.对原桥面板混凝土铺装层进行清除并重新铺设厚度为 60 mm 的混凝土^[16].原桥及其加固材料用量如表 1 所示.

2) 设计荷载

(1) 一期恒载.

(2) 二期恒载:包括桥面铺装与护栏,荷载为 30.6 kN/m.

(3) 移动荷载:采用汽车-超 20 级,挂车-120,每幅为 3 车道布置.

(4) 温度荷载:桥梁整体温升 25 ℃,温降 20 ℃,梯度温度按 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》^[17]进行取值.

(5) 收缩徐变作用:预应力混凝土的收缩徐变按照 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[18]附录 4 的规定由程序自动计算.

3) 荷载组合

组合一:恒载;

组合二:1.2×恒载+1.4×活载;

组合三:1.2×恒载+1.4×活载+1.05×升温;

组合四:1.2×恒载+1.4×活载+1.05×降温.

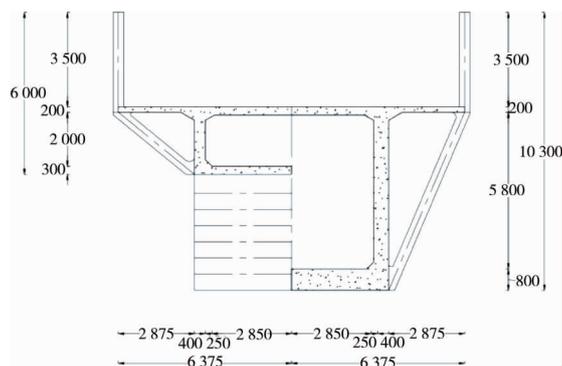


图 6 加固后的主梁横断面(单位:mm)

表1 桥梁加固后构件参数

构件	截面形式	材料	截面惯性矩/m ⁴	扭转惯性矩/m ⁴	截面积/m ²	用量/t
混凝土	箱型截面	C50	7.80~128.98	93.11~154.68	9.14~18.19	12 522.7
预应力筋	圆截面	预应力钢绞线	/	/	0.0056	578.6
上弦杆	箱型截面	Q345	0.005	0.004	0.004	233.7
腹杆	箱型截面	Q345	0.004	0.003	0.003	218.8
斜撑	箱型截面	Q345	0.004	0.003	0.003	87.1

注:加固用钢 539.3 t,原桥混凝土用量 12 522.7 t,原桥预应力筋用量 578.6 t.

2 有限元分析

采用上述加固方法和设计对原桥进行加固,根据加固次序的不同,可以有2种加固方案,分别为方案一:铺设完桥面铺装预留孔洞,再增设钢上弦杆和腹杆以形成桁式结构;方案二:先增设钢上弦杆和腹杆形成桁式结构,再进行桥面铺装的铺设.本节采用 MIDAS/Civil 对原桥和2个加固方案进行建模计算,原桥及加固后的有限元模型分别如图7和图8所示,并对比分析结构刚度、强度和动力特性等力学性能.此外,在建立 MIDAS 模型时,只考虑加固后形成桁式结构的作用,忽略对桥体裂缝黏贴钢板的作用.

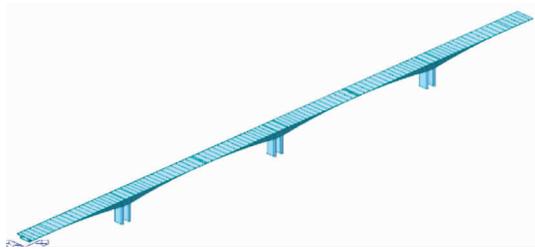


图7 原桥模型

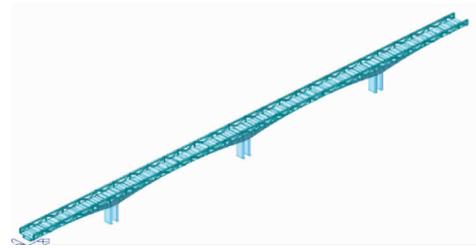


图8 加固后的模型

2.1 结构强度

计算原桥和2个加固方案在各荷载组合及移动荷载作用下结构的应力,结果如表2和表3所示.

在最不利荷载工况(组合四)的作用下,加固前,原桥混凝土最大压应力为-14.5 MPa;加固后,方案一的混凝土最大压应力为-12.3 MPa,方案二为-11.7 MPa,可见前者承载力较原桥提高 15.2%,后者则提高 19.3%.此外,方案一加固后,上弦杆的最大压应力为-62.4 MPa,腹杆的最大压应力为-52.4 MPa;方案二加固后,上弦杆的最大压应力为-112.4 MPa,腹杆的最大压应力为-116.9 MPa.方案一加固的上弦杆与腹杆最大压应力分别比方案二少 44.5%和 55.2%.而在移动荷载作用下,原桥最大压应力为 1.34 MPa,方案一、方案二的最大压应力均为 1.03 MPa,较原桥提高 23.1%.

由以上分析可知:2种加固方案对原桥的承载力都有较为明显的提高,但方案二对混凝土承载力的提高较多,又由于钢构件的应力较小,不是控制参数,因此,方案二更优.

表2 各组合作用下钢构件的最大压应力

单位:MPa

构件	组合一		组合二		组合三		组合四	
	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二
上弦杆	-19.1	-72.5	-56.5	-97.6	-51.7	-106.8	-62.4	-112.4
腹杆	-15.3	-89.8	-45.5	-115.8	-47.2	-116.9	-52.4	-116.9

表3 各组合作用下混凝土的最大压应力

单位:MPa

加固方法	组合一	组合二	组合三	组合四
原桥	-10.3	-12.6	-12.1	-14.5
方案一	-9.2	-11.4	-10.9	-12.3
方案二	-8.8	-10.6	-10.2	-11.7

2.2 结构刚度

在移动荷载作用下主梁挠度的计算结果如表4所示.由表4可知:原桥的最大下挠值为-25.7 mm,上挠值为5.1 mm,上挠度和下挠度(绝对值)之和为30.8 mm.2种加固方案的最大下挠值均为-20.2 mm,上挠值为4.2 mm,上挠度和下挠度(绝对值)之和为24.4 mm,相比原桥减少20.8%.主梁的位移包络图如图9所示.由表4和图9可知:上述加固方法可以明显提高结构的整体竖向刚度.

表4 移动荷载作用下主梁挠度

加固方法	主梁最大下挠/mm	主梁最大上挠/mm	主梁最大上挠度、下挠度(绝对值)之和/mm
原桥	-25.7	5.1	30.8
方案一、方案二	-20.2	4.2	24.4
变化率/%	-21.4	-17.6	-20.8

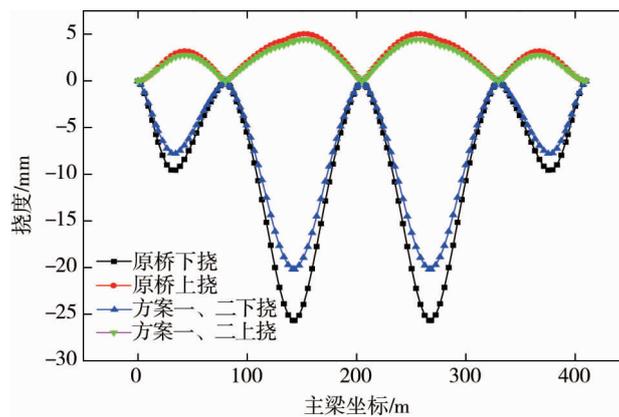


图9 主梁的位移包络图

2.3 结构动力特性

结构的动力特性分析结果如表5所示.由表5可知:原桥首次发生一阶面内反对称振动的频率为1.29 Hz,发生一阶面外反对称振动的频率为1.45 Hz;而2个加固方案首次发生一阶面内反对称振动的频率为1.47 Hz,发生一阶面外反对称振动的频率1.67 Hz.由此可见,加固后桥梁的面内、面外振动频率均有所提高.

表5 面内、面外振动频率

阶次	原桥		方案一、方案二		变化率/%
	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型	
1	1.29	一阶面内反对称振动	1.47	一阶面内反对称振动	13.9
2	1.45	一阶面外反对称振动	1.67	一阶面外反对称振动	15.2
3	1.50	二阶面内反对称振动	1.61	二阶面内反对称振动	7.3
4	1.52	二阶面外正对称振动	1.75	二阶面外正对称振动	15.1

2.4 不同桁架高度对结构性能的影响

由前文所述力学原理可知:桁架高度是影响结构抗弯及抗剪能力的主要因素.因此,需要研究不同桁架高度对结构性能的影响,以下对桁架高度为2.0,3.5,6.0 m时结构的强度、刚度与动力特性进行分析.

2.4.1 结构强度

在组合三、组合四的作用下,不同桁架高度桥梁最大压应力的计算结果如表6所示.不同桁架高度桥梁构件应力如图10所示.由表6可知:桁架高度为2 m的桥梁上,上弦杆最大压应力为100.8 MPa,腹杆最大压应力为151.2 MPa,混凝土最大压应力为119.1 MPa;桁架高度为6 m的桥梁上,上弦杆最大压应力为119.1 MPa,腹杆最大压应力为80.9 MPa,混凝土最大压应力为11.9 MPa.由图10、表6和2.1节的分析结果可知:随着桁架高度的增加,上弦杆应力大幅增加,腹杆应力大幅降低,而混凝土承载力随着桁架高度的增加,提高幅度不明显.但增加桁架高度的同时会大大增加用钢量,从经济性的方面考虑,桁架高度不宜过高.

表 6 各组合下构件在不同桁架高度的最大压应力

单位:MPa

构件	桁架高度 2 m		桁架高度 6 m	
	组合三	组合四	组合三	组合四
上弦杆	70.8	100.8	80.0	119.1
腹杆	117.6	151.2	62.4	80.9
混凝土	11.4	11.9	11.4	11.9

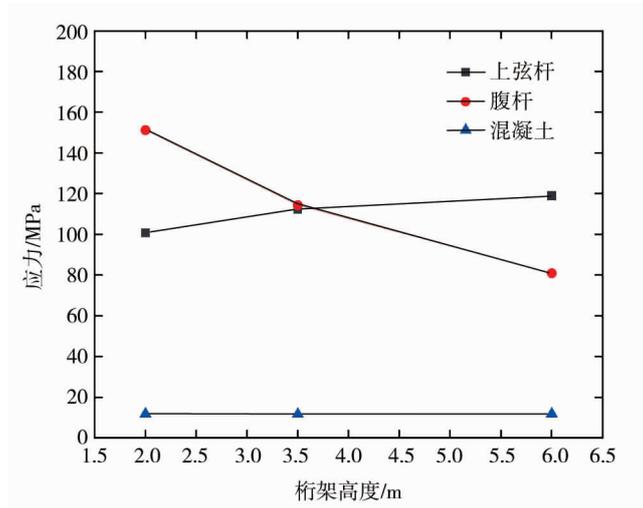


图 10 不同桁架高度桥梁构件应力

2.4.2 结构刚度

在移动荷载的作用下,不同桁架高度主梁挠度的计算结果如表 7 所示.由表 7 可知:桁架高度为 2 m 时,主梁的最大下挠值为 22.1 mm,最大上挠值为 4.7 mm,上挠度和下挠度(绝对值)之和为 26.8 mm;桁架高度为 6 m 时,主梁的最大下挠值为 17.1 mm,最大上挠值为 4.0 mm,上挠度和下挠度(绝对值)之和为 21.1 mm.可知,随着桁架高度的增加,桥梁的刚度随之增加,但用钢量也随之增大,因此,应选择适当的桁架高度进行加固.

表 7 不同桁架高度主梁挠度的计算结果

桁架高度/m	主梁最大下挠/mm	主梁最大上挠/mm	主梁最大上挠度、下挠度之和/mm
2.0	22.1	4.7	26.8
3.5	20.2	4.5	24.7
6.0	17.1	4.0	21.1

2.4.3 结构动力特性

不同桁架高度桥梁的动力特性如表 8 所示.由表 8 可知:桁架高度为 2 m 的桥梁首次发生一阶面内反对称振动的频率为 1.42 Hz,发生一阶面外反对称振动的频率为 1.59 Hz;桁架高度为 6 m 的桥梁首次发生一阶面内反对称振动的频率为 1.54 Hz,发生一阶面外反对称振动的频率为 1.56 Hz.可知,随着桥梁桁架高度的增加,桥梁面外的动力特性随之减少,但面内的动力特性增加,因此,桁架高度不宜过高或过低.

表 8 不同桁架高度桥梁的自振频率

阶次	桁架高度 2.0 m		桁架高度 3.5 m		桁架高度 6.0 m	
	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型
1	1.42	一阶面内反对称振动	1.47	一阶面内反对称振动	1.54	一阶面内反对称振动
2	1.59	一阶面外反对称振动	1.57	一阶面外反对称振动	1.56	一阶面外反对称振动
3	1.60	二阶面内反对称振动	1.61	二阶面内反对称振动	1.63	二阶面内反对称振动
4	1.68	二阶面外正对称振动	1.75	二阶面外正对称振动	1.80	二阶面外正对称振动

综上,随着桁架高度的增加,桥梁强度、刚度及动力特性都有一定程度的提高,但用钢量也大大增加。因此,综合考虑加固方案的有效性和经济性,本文使用加固后形成 3.5 m 桁架高度的方案进行加固。

3 结论

1) 提高结构的抗弯能力.结构加固后,活载承载力提高 23.1%(方案二)。

2) 减少结构的剪切及弯曲变形,大幅度提高结构刚度.采用本文方法加固后,结构的下挠较原桥减少 21.4%,上挠减少 17.6%,最大上挠度和下挠度(绝对值)之和减少 20.8%(在移动荷载作用下)。

3) 提高结构的自振频率.加固后结构首次出现面内振动时频率提高 13.9%,首次出现面外振动时频率提高 15.2%。

4) 施工方便并具有良好的经济性.在大幅提高桥梁刚度和混凝土结构活载承载力的前提下,结构加固用钢量仅为 0.103 t/m,因为有原梁桥作为施工平台,施工方便快捷,因此,表现出良好的经济性和操作性。

5) 本文加固方法克服了传统连续刚构桥加固方法的某些弊端,即不显著增加重量的前提下显著提高被加固结构的承载力与刚度,以较小的代价取得良好的加固效果,适用于既有连续刚构桥的提载及加固改造。

参考文献:

- [1] 黄先国.浅谈我国公路预应力混凝土梁桥的技术与发展[J].铁道标准设计,2002,46(5):16-18.
- [2] 程炜,周超民.大跨度 PC 连续刚构桥病害成因分析及加固研究[J].公路,2020,65(4):184-186.
- [3] WANG H L, XIE C L, LIU D, et al. Continuous reinforced concrete rigid-frame bridges in China[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2019, 24(2):05019002.
- [4] 雷俊卿,王楠.预应力混凝土连续刚构桥施工监测与仿真分析[J].铁道学报,2006,28(2):74-78.
- [5] HU N, DAI G L, YAN B, et al. Recent development of design and construction of medium and long span high-speed railway bridges in China[J]. Engineering Structures, 2014, 74: 233-241.
- [6] 杨平,陈野鹰.连续刚构桥加固关键技术研究及应用[J].公路,2008,53(7):336-339.
- [7] 黄海东,林春姣,向中富.大跨径连续刚构桥新型加固体系研究[J].公路,2008,53(11):94-100.
- [8] XU F Y, ZHANG M J, WANG L, et al. Recent highway bridge collapses in China: review and discussion[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(5):04016030.
- [9] TOKUNO M, SAITO F, TAKESHIMA S, et al. Reinforcement structure of truss bridge or arch bridge: US20040040100[P]. 2004-03-07.
- [10] 杨斌,陈世宏.增大截面加固受弯构件的斜截面抗剪承载力计算方法[J].公路交通科技,2016,33(8):99-105.
- [11] 骆新菊.高速公路桥梁常见病害维修加固施工工艺研究[J].交通世界,2018(33):138-139.
- [12] 曹自俊,赵军,张效军.大跨 PC 连续刚构桥病害分析与加固技术研究[J].公路,2021,66(8):206-211.
- [13] 吕宏奎.某重载铁路连续刚构桥底板崩裂加固设计[J].桥梁建设,2019,49(1):71-76.
- [14] 朱春东,范永根,陈飞,等.公路钢桥梁桥面加固技术应用实例及分析[J].中外公路,2018,38(5):120-123.
- [15] 熊强,赵慧君,王双其.综合处治施工技术在钢筋混凝土桥梁加固中的应用[J].公路,2019,64(8):112-116.
- [16] 张蕾.高速铁路连续刚构拱组合结构设计及创新技术:以西延高铁王家河特大桥主桥为例[J].铁道标准设计,2023, 67(6):86-92.
- [17] 中华人民共和国交通运输部.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
- [18] 交通运输部.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社,2018.