

文章编号:1671-6833(2015)02-0033-05

曲弦下承式钢管混凝土桁梁桥改造方案分析

李 杰, 陈 淮, 王 艳, 陈代海

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对某上跨铁路曲弦下承式钢管混凝土桁梁桥运营中出现桥面变形大的问题, 利用桥梁专用软件建立数值分析模型, 并结合桥梁静载试验数据, 探讨桥面结构变形大的原因; 本着少影响下方铁路运行、施工安全可行、节约投资, 且能切实改善大桥运营状态的原则, 提出简支变连续、加强横撑并增加吊索张拉横梁等措施, 对桥面以上部位进行改造, 同时对改造步骤给出建议; 最后对改造效果进行理论分析. 理论分析表明: 改造后结构安全, 且活载作用下横梁及桥面变形大幅度减小, 改造效果显著.

关键词: 曲弦下承式钢管混凝土桁梁桥; 横梁; 竖向变形; 改造方案

中图分类号: U441 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.02.008

0 引言

某环城快速路上跨电气化干线铁路, 主桥采用 122 + 62 + 62 + 122 m 四跨简支的曲弦下承式钢管混凝土桁梁桥, 见图 1 所示. 大桥上弦采用钢管混凝土, 下弦(系杆)采用开口钢箱, 内穿钢绞线(122 m 还内加拉筋), 最后压注砂浆, 腹杆采用 $\phi 600 \times 8$ 钢管, 桥面每 5 m 设置 1 根横梁, 横梁亦为开口变截面钢箱, 横梁上为 0.280 ~ 0.315 m 的桥面层, 上部结构采用支架施工.



图 1 在役曲弦下承式钢管混凝土桁梁桥

Fig.1 The working curved chord concrete filled steel tubular truss bridge

大桥 1995 年竣工, 随着经济与交通快速发展, 车辆急剧增加带来了桥梁结构不同程度的老化和损伤, 2008 年、2009 年、2010 年分别对大桥进行了外观检测及静、动载试验. 检测结果反映大

桥的工作性能较差, 结构刚度不足, 特别是在试验荷载作用下, 中横梁挠度及应变均较大. 日常运营中也发现桥面出现坑洼, 沥青混凝土铺装层易损坏. 考虑到本桥是连接市内外交通的要道, 钢结构材料的损伤积累和疲劳破坏问题突出^[1-6], 因此有必要针对大桥的现状采取措施进行改造. 笔者依托大桥改造项目, 采用数值方法对既有大桥结构进行理论分析, 然后基于理论分析和桥梁静、动载试验结果, 考虑桥址处特殊情况提出一套可行的改造方案, 最后对该方案的效果进行详细分析, 以说明方案的可行性.

1 既有大桥结构的理论分析

1.1 有限元模型

大桥结构形式为曲弦下承式钢管混凝土桁梁, 外部体系可看作 4 座简支的结构. 考虑结构受力特点以及构件间的连接方式, 上弦钢管混凝土采用共节点单元; 腹杆采用空间梁单元模拟; 下弦开口钢梁截面采用 MIDAS 的截面导入功能, 内填 20 号砂浆与下弦杆共节点; 下弦杆中的预应力钢绞线为体外束, 122 m 跨每侧下弦杆中有 26 根 $\phi 30$ 的拉筋, 模型中将其等效为一根粗钢筋; 横梁采用变截面梁单元模拟; 横撑采用梁单元模拟, 人行道、护栏等二期恒载按照设计图纸换算为线集

收稿日期:2014-12-01; 修订日期:2015-02-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408557)

第一作者简介:李杰(1974-), 男, 陕西宝鸡人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事桥梁结构理论及力学行为研究,

E-mail:lijie2007@zzu.edu.cn.

度施加于人行道,桥面铺装采用虚拟梁单元考虑重量,不考虑桥面参与结构受力;大桥西侧设置固定铰支座,东侧为滑动支座。

1.2 原结构理论分析

按照桥梁设计图纸,对 122 m 跨、62 m 跨曲弦下承式钢管混凝土梁桥分别进行结构检算,考

虑的荷载主要有恒载、下弦杆预应力、桥面铺装、车辆活载、人群活载等,考虑基本组合,即 1.2 恒载 + 1.4(车辆活载 + 0.8 × 人群活载),其中车辆活载为 4 车道布载。桥面板不参与结构受力,仅计入其产生的二期恒载作用。限于篇幅,表 1 给出了 122 m 跨的理论分析结果。

表 1 122 m 跨一次成桥结构分析结果汇总
Tab. 1 Structural analysis results summary of 122 m bridge

荷载位置		恒载		1.2 恒载 + 1.4 (汽车活载 + 0.8 × 人群活载)	
		最大	最小	最大	最小
竖向位移		- 131.0		- 286.2	
上弦钢管	弯矩/(N · mm)	1.6E + 09	- 2.1E + 09	2.7E + 09	- 2.9E + 09
	轴力/N	- 7.1E + 06	- 7.7E + 06	- 8.5E + 06	- 1.1E + 07
	最大组合应力/MPa	- 73.3	- 129.6	- 87.9	- 179.1
下弦钢构件	弯矩/N · mm	6.12E + 08	- 7.3E + 08	1.1E + 09	- 1.1E + 09
	轴力/N	2.3E + 06	4.6E + 06	2.7E + 06	7.9E + 06
	最大组合应力/MPa	85.5	34.1	146.8	40.9
上弦内填混凝土最大组合应力/MPa		- 11.4	- 22.6	- 13.7	- 31.4
横梁最大组合应力/MPa		0.6	- 0.3	158.8	- 143.7
腹杆最大组合应力/MPa		80.3	- 25.3	125.3	- 51.6
横撑最大组合应力/MPa		19.2	- 19.6	36.9	- 41.5

从表 1 可以看出,122 m 跨曲弦下承式钢管混凝土桁梁桥在检算工况荷载作用下,满足规范要求。其中恒载最大竖向位移 - 131.0 mm,该变形可在施工时设置预拱度抵消,恒载 + 活载最大竖向位移 - 286.2 mm,活载变形小于规范规定的 L/600,满足刚度要求;恒载 + 活载组合下:上弦钢管的最小组合压应力 - 73.28 MPa,最大组合压应力 - 179.05 MPa,全截面受压,且应力均未超过钢材容许强度;下弦钢构件受拉,最大组合应力 146.78 MPa;横梁中最大组合应力 158.82 MPa,压应力为 - 143.68 MPa;腹杆中最大组合应力为 125.29 MPa,横撑应力水平较低;上弦钢管内填混凝土最大组合压应力 - 31.42 MPa,最小组合压应力 - 13.65 MPa,由于钢管混凝土中钢管对混凝土的环箍效应,使得内填混凝土处于复杂的三向受力状态,能够大幅度提高混凝土的设计强度,因此可以确保内填混凝土满足承载要求。

1.3 桥梁静载试验与分析

通过对大桥的一次成桥结构安全检算可以看出,原设计满足设计规范要求,但数值分析仅能依据设计图纸建立理想状态下的结构,所得结果是对整体结构宏观的评价,且经过这么多年的运营,特别是对于钢结构常见的焊缝连接、屈曲和疲劳问题,常规分析无法进行精细模拟,而钢结构的焊缝、锈蚀是影响结构整体工作性能和耐久性的重

要因素^[7-13]。考虑到大桥下方通行电气化铁路的特殊情况,现场荷载试验仅对 62 m 跨进行了静、动载试验检测。鉴于大桥的结构现状和试验安全,检测单位选用的试验车辆为 6 辆 30 t 卡车。笔者依据该报告中荷载车辆的布置方式,将各种工况下的试验荷载作为静力荷载作用于桥梁结构,通过有限元模型进行理论分析,与试验数据进行对比。现场静载试验工况共进行了 5 个加载工况^[14],工况一:试验跨拱顶正弯矩影响线布载(正载);工况二:试验跨拱顶正弯矩影响线布载(偏载);工况三:试验跨拱脚负弯矩影响线布载(正载);工况四:试验跨拱脚负弯矩影响线布载(偏载);工况五:试验跨 L/12 正弯矩影响线布载(正载)。限于篇幅仅给出工况三横梁的变形数据,图 2 为工况三加载布置。

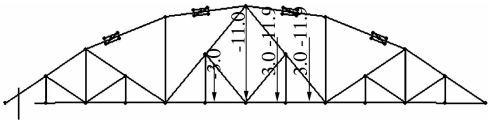


图 2 工况三加载布置
Fig. 2 Loading layout of load case 3

图 3 为工况三 1/4 跨横梁、跨中横梁变形图。从图 3 可以看出,在加载车辆的作用下,横梁发生了竖向挠曲,且在加载附近变形最大,进而造成桥

面产生较大变形,从数值分析和荷载试验都表明该趋势.可以判断出,每 5 m 设置一根的横梁刚度相对柔弱,对平均厚度 30 cm 的桥面支撑较弱,本桥的荷载传递路径首先通过桥面传递给横梁,再向上弦杆、下弦杆和腹杆传递,虽然整个桁架系统刚度较大,但并不能改变较弱的桥面局部变形大的问题.此外,从动载试验数据来看,结构自振频率的实测值较理论值小,这也表明结构出现损伤,刚度变小.

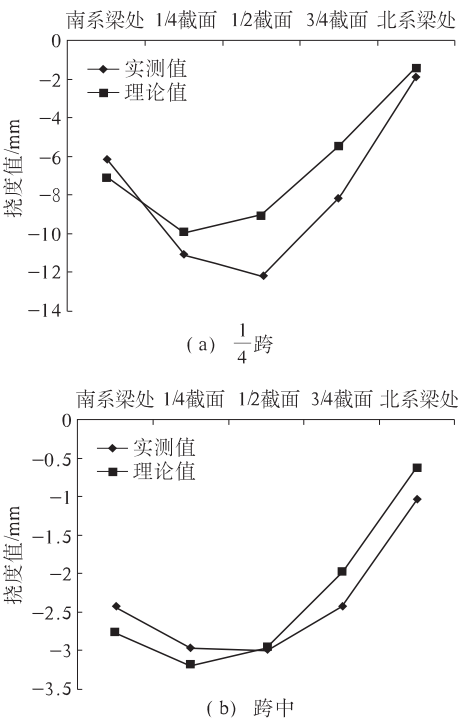


图 3 1/4 跨和跨中横梁变形

Fig.3 Deformation of the 1/4 and mid-span cross beam

2 改造方案及效果分析

2.1 改造方案及实施步骤

依据以上分析并结合大桥目前所表现出的状况,本着尽量少影响下方铁路运行、施工安全可行、节约投资,且能切实改善大桥运营状态的原则,重点对桥面以上部位进行改造,以期达到减小桥面变形、提高桥梁纵向整体刚度和横梁局部刚度的目的,基于此目的提出桥梁改造方案.

(1)考虑到大桥主要承重构件满足承载能力要求,上弦、下弦杆件和腹杆杆件基本完好,桥梁存在主要问题是桥面变形大,横梁刚度较弱,因此首先考虑改变结构的体系,将原 4 跨简支曲弦桁架桥转变为 4 跨连续曲弦桁架桥体系,即通过在各跨墩顶接缝处增加刚性连接杆件,将原简支曲弦桁架桥连接成连续体系,在原有支座位置仍然设置支座,仅需根据连续体系的特点,将 4 跨连续

梁的支座变换为 1 个固定支座,其余为活动铰支座,改造施工工程量较小.

(2)为了改善桥面板变形较大的问题,特别是横梁变形较大的问题,在桥梁改造方案步骤 1 的基础上,加固两片桁架之间横撑,提高横撑竖向刚度,通过在横撑张拉若干吊索,吊索下端锚固于桥面下横梁上.吊索的张拉可以显著改善桥面变形较大的问题,为了保护增设的吊索可在中央分隔带增设横向宽度 0.5 m 左右的硬隔离带.改造施工工程量较小,仅需掀开桥面锚固吊索,同时上端锚固于横撑合适部位.

(3)如果非机动车道和人行道要改为机动车道,在桥梁改造方案步骤 2 的基础上,先在横梁外伸端部增加纵梁,再将曲弦横撑横向向外伸长,在外伸横撑与横梁端部的纵梁之间外挂吊索,通过张拉外挂吊索,提高原非机动车道和人行道的承载能力,会显著改善桥梁运营状况.

具体实施时,可考虑按照以下步骤进行.

(1)施工前准备工作,封闭大桥交通,修补桥梁上弦、横撑及腹杆等构件的缺陷,将原 4 跨简支曲弦桁架桥转变为 4 跨连续曲弦桁架桥体系,即通过在各跨墩顶接缝处增加刚性连接杆件,将原简支曲弦桁架桥连接成连续体系,在原有支座位置仍然设置支座,仅需根据连续体系的特点,将 4 跨连续梁的支座变换为 1 个固定支座,其余为活动铰支座.加固两片桁架之间横撑,提高其抗弯刚度.

(2)协调铁路运行时间,去除上、下行分隔带横向 1 m 宽的桥面铺装,露出下部横梁,焊接或采用抱箍设置横撑上的吊索锚固构造,并将成品吊索临时安装在锚固部位,考虑施工方便与安全,吊索可采用下端锚固,上端张拉,即吊索下端永久锚固于桥面下的横梁上,然后在横撑上进行吊索张拉.如果非机动车道和人行道改为机动车道,可先在横梁外伸端部增加纵梁,再将曲弦横撑横向向外伸长,在外伸横撑与横梁端部的纵梁之间外挂吊索,通过张拉外挂吊索,提高原非机动车道和人行道变为机动车道后的承载能力和刚度.

(3)桥面铺装施工.重新做桥面铺装,为了保护增设的吊索,在中央分隔带增设横向宽度 0.5 m 左右的硬隔离带.

④清理桥面,拆除横撑支架,开放交通.

2.2 数值分析及效果评价

改造方案主要对横撑、增加吊杆主动张拉的改造效果进行探讨,以下对比分析了 7 个工况(详见表 2).

按照改善桥面变形的原则,在 S3 ~ S7 所对应的改造措施下,结构由简支转换为连续体系后,62 m 和 122 m 跨的整体竖向变形减小,最为关心的横梁竖向挠度改善非常显著,具体对比如表 3 所示.为了进一步降低桥面竖向变形,可从横撑上张拉吊索,而将空心钢管桁架横撑转换为钢管混凝土

土横撑,对 62 m 跨的改善更显著,如果腹杆中灌注混凝土增大结构刚度,对 122 m 跨改善显著.同时,理论分析表明,提高纵向预应力的张拉值,可以改善纵梁构件中应力水平,通过反拱减小恒载下的结构整体竖向变形,但对活载下的结构整体竖向变形影响较小,对横梁的变形影响也较小.

表 2 工况说明
Tab.2 Description of load cases

结构状态		工况序号	说明
原简支结构	62 m	S1	分别按照简支梁约束计算
	122 m	S2	
简支 转 4 跨连续	体系转换	S3	按照 4 跨连续梁约束计算
	增加吊索	S4	直径 $\phi 50$ 的工厂预制钢丝束,初拉力假设有效张拉力 20 t
	横撑改造	S5	直径 $\phi 50$ 的工厂预制钢丝束,初拉力假设有效张拉力 20 t,在原横撑位置将空钢管桁架横撑改造为直径 $\phi 800$,壁厚 20 mm 的钢管,横撑钢管内填 C40 混凝土
	横撑改造	S6	直径 $\phi 50$ 的工厂预制钢丝束,初拉力假设有效张拉力 20 t,在原横撑位置将空钢管桁架横撑改造为直径 $\phi 800$,壁厚 20 mm 的钢管,横撑钢管内填 C40 混凝土;腹杆内填 C40 混凝土
	纵向加强	S7	直径 $\phi 50$ 的工厂预制钢丝束,初拉力假设有效张拉力 20 t,在原横撑位置将空钢管桁架横撑改造为直径 $\phi 800$,壁厚 20 mm 的钢管,横撑钢管内填 C40 混凝土;腹杆内填 C40 混凝土.增加纵向预应力拉力改变结构整体挠度

表 3 改造效果对比
Tab.3 Contrast of transformation effect

工况	竖向变形(恒载+活载)							
	结构整体最大变形				横梁相对下弦杆最大变形			
	62 m 跨	122 m 跨	改善百分数/%		62 m 跨	122 m 跨	改善百分数/%	
			62 m 跨	122 m 跨			62 m 跨	122 m 跨
S1	-115.8	—	—	—	-78.7	—	—	—
S2	—	-223.8	—	—	—	-133.1	—	—
S3	-114.3	-210.0	1.3	6.2	-65.0	-78.7	17.4	40.9
S4	-53.2	-174.3	54.1	22.1	-41.4	-61.6	47.4	53.7
S5	-40.9	-176.3	64.7	21.2	-26.0	-59.5	67.0	55.3
S6	-45.8	-182.1	60.4	18.6	-29.0	-34.1	63.2	74.4
S7	-39.5	-157.0	65.9	29.8	-29.0	-35.2	63.2	73.6

3 结论

(1)按照设计图纸对大桥的一次成桥进行安全检算,在所检算的荷载下,原结构设计安全,但数值分析仅能依据设计图纸建立理想状态下的结构,所得结果是对整体结构宏观的评价,且经过这么多年的运营,特别是对于钢结构常见的焊缝连接、屈曲和疲劳问题,常规分析无法进行精细模拟,而钢结构的焊缝、锈蚀是影响结构整体工作性能和耐久性的重要因素,有必要通过其它方法如桥梁静动载试验进行评判.

(2)在加载车辆的作用下,横梁发生了竖向

挠曲,在加载附近变形最大,造成桥面产生较大变形,每 5 m 设置一根的横梁刚度相对柔,对平均厚度 30 cm 的桥面支撑较弱,就本桥的荷载传递路径可以看出,虽然整个桁架系统刚度较大,结构整体变形及受力没有问题,但并不能改变较弱的桥面局部变形大的问题.

(3)按照改善桥面变形的原则,结构由简支转换为连续体系后,结构整体竖向变形减小 1.3% ~ 6.2%,横梁竖向挠度改善非常显著,减小 17.4% ~ 40.9%;通过横撑上张拉吊索进一步降低桥面竖向变形,而将空心钢管桁架横撑转换为钢管混凝土横撑,对 62 m 跨的改善更显著,如果

腹杆中灌注混凝土增大结构刚度,对 122 m 跨改善显著。提高纵向预应力的张拉值对活载下的结构整体竖向变形影响较小,对横梁的变形影响也较小。

(4)笔者提出的改造方案是将简支变连续使得结构体系发生变化,虽然理论分析表明在活载作用下桥梁结构中间桥墩支点出现负弯矩,且下弦杆和端横梁的受力满足钢材容许要求,但该方案在实施时应对桥墩位置处的连接杆件细节作进一步细化,避免出现新的病害。

(5)本着尽量少影响下方铁路运行、施工安全可行、节约投资,且能切实改善大桥运营状态的原则,通过简支变连续的体系转换,增强横撑,增加吊索减小横梁变形等措施,重点对桥面以上部位进行改造的方案可行,效果显著。

参考文献:

- [1] 王用中. 我国桥梁钢结构的应用现状与展望[J]. 施工技术,2010,39(8):13-16.
- [2] 马建,孙守增,杨琦,等. 中国桥梁工程学术研究综述[J]. 中国公路学报,2014,27(5):1-96.
- [3] 任伟平,李小珍,李俊,等. 现代公路钢桥典型细节疲劳问题分析[J]. 公路,2007(4):82-87.
- [4] 钱冬生. 谈谈钢桥的疲劳和断裂[J]. 桥梁建设,2009(3):12-21.
- [5] 周晖,施刚,王元清,等. 钢桥疲劳评估研究进展[J]. 钢结构,2013,28(4):1-6.
- [6] 张二田. 重载运输下大跨度钢桁梁桥病害分析及试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2014,27(2):6-11.
- [7] 欧耀文,周朝阳. 某大跨度钢管混凝土拱桥静动载检测、病害及其加固分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2013,34(5):31-37.
- [8] 闫磊,任伟. FRP 加固桥梁受弯构件的可靠性分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2011,32(2):80-83.
- [9] 吝红玉,刘永健,任翔. 矩形钢管混凝土桁架静力性能非线性有限元分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2011,32(5):15-19.
- [10] 王蔚,吴中鑫. 大跨径拱桥主梁加固维修施工平台设计[J]. 世界桥梁,2013,41(5):86-90.
- [11] 刘永健,刘君平,杨根杰,等. 主管内填充混凝土矩形钢管桁架受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2009,30(6):107-102.
- [12] 王俊华,陈宝春,黄文金. 现代钢管桁架桥[J]. 世界桥梁,2006,26(4):138-142.
- [13] 叶卓棋,杨健,刘永健,等. 部分填充混凝土钢管结构桥梁研究[J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(2):96-101.
- [14] 河南省公路工程试验检测中心有限公司. 郑州市北环跨铁路枢纽站立交桥试验报告[R]. 郑州:河南省公路工程试验检测中心有限公司,2010.

Analysis of Transformation Plan of the Curved Chord Concrete Filled Steel Tubular Truss Bridge

LI Jie, CHEN Huai, WANG Yan, CHEN Dai-hai

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In view of the problem of the bridge deck's large deformation of a curved chord concrete filled steel tubular truss bridge, which is overpass over an electrified main line, bridge analytic software is firstly used to built finite model to analyze the old structure. In combination with static test results, the reason of the bridge deck's large deformation is discussed. Then in line with some principles of little effect below the railway operation, construction safe and feasible, saving investment, and effectively improving the bridge operation state, the transformation plan is put forward. These plans are structure system transformation, strengthening transverse support and tension sling. The transformation steps are given too. Finally, the effect of transformation is analyzed and evaluated. Through analysis, it shows that structure after transformation is safety and the deformation of the bridge deck and the cross beam is greatly reduced. The effect of transformation is significant.

Key words: curved chord concrete filled steel tubular truss bridge; cross beam; vertical deformation; transformation plan