

文章编号:1673-2049(2008)04-0111-05

侧倾偏位钢管混凝土拱桥的加固 施工稳定性分析

牛 宏^{1,2}, 杨炳成¹, 阳 平²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:为研究有侧倾偏位的钢管混凝土拱桥加固施工过程的稳定性,应用有限元程序建立了空间计算模型,对加固过程中的各种工况进行了屈曲分析,并分析了桥梁的失稳特征。结果表明:增加临时限位钢纵梁、在拱肋上加焊K字撑等措施很大程度地提高了施工过程中的稳定性,保证了桥梁加固的顺利进行及加固后桥梁结构的正常、安全运营;该加固方案是有效可行的,可为同类型桥梁的加固设计与施工提供借鉴。

关键词:侧倾偏位;钢管混凝土拱桥;加固施工;稳定性;有限元;失稳

中图分类号:TU392.3 **文献标志码:**A

Stability Analysis of CFST Arch Bridge with Lateral Displacement for Strengthening Construction

NIU Hong^{1,2}, YANG Bing-cheng¹, YANG Ping²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. CCCC First Highway Consultants Ltd, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: To research the stability of concrete-filled steel tubular (CFST) arch bridges with lateral displacement, and provide theory support to strengthening construction, the space calculated model was built to analyze the buckling and instability behavior of the bridge under various cases using finite element program. The results show that the strengthening measures, such as setting temporary fixing steel stringer and welding K-support bar on arch rib can greatly improve the stability of the bridges in all construction stages, and ensure the normal service after strengthening. The strengthening measures are effective and feasible, which can provide references for reinforcement design and construction of the same kind of bridges.

Key words: lateral displacement; concrete-filled steel tubular arch bridge; strengthening construction; stability; finite element; instability

0 引言

钢管拱桥主要承重构件为钢管混凝土。钢管混凝土则是将混凝土材料与钢管结合在一起共同承担荷载的一种组合结构,由于钢管的套箍作用,使管内

填充的混凝土处于三向受压状态,与一般的普通混凝土构件相比承压强度与组合弹性模量大大提高,且在施工中因主拱圈成为自架设体系又减轻了拱圈自重,便于实现无支架施工。因此钢管拱桥解决了拱桥在大跨径方面高强度材料应用和施工两大难

收稿日期:2008-09-06

作者简介:牛 宏(1965-),男,陕西旬邑人,中交第一公路勘察设计研究院有限公司教授级高级工程师,长安大学工学博士研究生,
E-mail:niuhong8118@163.com。

题,是发展前景广阔的一种桥梁结构。随着拱桥跨径的增大,刚度越来越小,作为以受压为主的结构,稳定成为制约其发展的关键因素之一,各国学者对此进行了广泛的研究^[1-9],但主要集中在对钢管混凝土拱桥理想施工及运营状态下的稳定性分析,对带有缺陷的钢管拱桥的稳定性分析则很少见到。

笔者以某钢管拱桥的加固工程为对象,研究其在拱肋已产生侧倾位移的情况下桥梁加固施工过程中的稳定性以及对加固施工安全的影响,提出了各种工况下提高其稳定性应采取的具体措施,并就各种措施对全桥横向稳定的影响进行了分析,得到了一些有益的结论可为同类工程提供参考。

1 工程概况

某钢管拱桥位于陕西省安康市境内,是跨越汉江的一座重要桥梁(图 1)。主桥为 2 孔净跨 120 m 的中承式钢管混凝土拱桥,净矢跨比为 1/5,拱轴线为悬链线,拱轴系数 $m=1.543$ 。每个拱肋由 2 根 $\Phi 830$ mm、壁厚 12 mm 的 Q235 钢管组成,为哑铃型钢管混凝土截面(图 2)。管内灌注 C40 混凝土,桥面以下哑铃型截面腹板间灌注 C40 混凝土,桥面以上则采用空腹式哑铃型钢管混凝土截面。拱脚各设 K 字撑 2 道,桥面以上设一字撑 5 道。桥面宽度:9 m+2×0.15 m(路缘石)+2×0.41 m(护索带)+1×1.5 m(人行道)。原设计荷载:汽-20,挂-100。

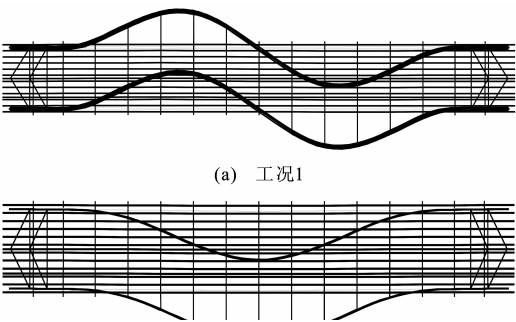


图 1 加固前的某钢管拱桥

Fig. 1 A CFST Arch Bridge Before Strengthening

由于施工过程中质量等方面的原因,该桥在成桥之后 2 孔拱肋均产生较大的同向侧向偏位,偏位对比见表 1,其中拱顶最大偏位达 13 cm,约为跨径的 1/1 000,已超过质量检验评定标准的允许值;同时主桥桥面存在严重下挠,最大挠度达 27 cm;采用的吊杆防腐系统已经失效,锚头及平行高强钢丝束严重锈蚀;吊杆横梁存在多处竖向裂缝,最大缝宽达 0.3 mm,横梁端部吊杆锚头区的箍筋施工时严

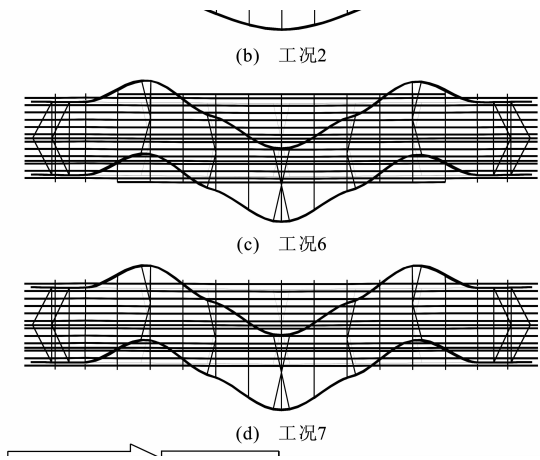


图 2 拱肋截面(单位:mm)

Fig. 2 Cross-sections of Arch Rib (Unit:mm)

表 1 拱肋水平偏位

Tab. 1 Horizontal Displacements of Arch Ribs

x/m	0.0	8.0	16.0	24.0	32.0	40.0	48.0	56.0	60.7
$\Delta y_u/\text{cm}$	13.3	11.5	9.8	8.0	6.3	4.5	2.8	1.0	0.0
$\Delta y_d/\text{cm}$	12.0	10.4	8.8	7.3	5.7	4.1	2.5	0.9	0.0

注:所列数值为半跨拱肋偏位,另半跨拱肋偏位与其对称取值;
坐标原点为理想拱肋的拱顶形心; x 为拱肋纵坐标; Δy_u 、 Δy_d 分别为上游和下游拱肋对于拱肋水平横向偏位(皆偏向下游)。

重受损,抗剪能力不足;钢管内混凝土灌注不密实,局部有较大范围脱空,故该桥处于危险状态,通行能力受到很大限制。为了保证桥梁的运营安全,养护管理部门随即对该桥进行了加固维修。

加固维修主要进行以下工作:更换吊杆、调整桥面标高;对吊杆横梁进行加固处理;对拱肋内混凝土脱空区域进行压浆等。由于 2 孔拱肋均存在较大的同向侧倾,更换吊杆、调整桥面标高时必须解除原桥面连续,这是因为此时拱肋极易面外失稳。为了保证加固施工过程中桥梁结构、操作人员及机具的安全,应对各工况下的拱桥稳定性进行计算,必要时应采取有效措施以提高施工及运营过程中的稳定性。

2 稳定性分析方法

拱桥的稳定问题从空间的失稳形态上分为面内失稳和面外失稳。从失稳的受力性质可分为 2 类:第 1 类为平衡分支问题;第 2 类为极值点问题。拱桥是以受压为主的压弯结构,严格地说,拱的失稳皆为第 2 类失稳。但是拱的第 1 类稳定问题的力学情况单纯明确,它的临界荷载近似地代表第 2 类稳定问题的上限,所以无论在理论分析中还是在工程应用上都占有重要的地位。目前对钢管混凝土拱桥的

稳定性分析的主要方法有弹性屈曲法、2 阶弹性及弹塑性极限承载力法。本文的计算分析采用弹性屈曲法。在线弹性情况下,纯压拱在临界荷载作用下的平衡方程为

$$(\mathbf{K_D} + \lambda \mathbf{K_G}) \delta = 0 \tag{1}$$

式中: $\mathbf{K_D}$ 为弹性刚度矩阵; $\mathbf{K_G}$ 为几何刚度矩阵,只与构件的轴向力有关; δ 为单元节点位移增量; λ 为荷载稳定系数,其定义也可用式(2)表示

$$\lambda = \frac{P_{cr}}{P_d + P_c} \tag{2}$$

式中: P_{cr} 为失稳临界荷载; P_d 为恒荷载; P_c 为活荷载。

方程式(1)为特征值问题,其最小特征值在工程上才有意义。应用各种迭代方法,如逆矢量迭代法、子空间迭代法等都可以很方便地求解。

3 有限元模型及计算结果

该桥为 2 孔净跨 120 m 的钢管混凝土中承式拱桥,有限元分析时取其中 1 跨做分析,桥面结构采用梁格体系。对于钢管混凝土结构,目前比较常用的计算方法有:换算截面法、双单元法和钢管混凝土统一本构关系法。

换算截面法是将钢管混凝土整个截面换算成钢或混凝土来进行计算,主要适合于弹性阶段的结构分析。本文的分析采用换算截面法进行模拟。

在进行变形及弹性屈曲系数计算时考虑对钢管混凝土刚度的折减^[10-11],即

$$\left. \begin{aligned} EA &= E_s A_s + 0.4 E_c A_c \\ EI &= E_s I_s + 0.4 E_c I_c \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中: E 为钢管混凝土的弹性模量; A 为钢管混凝土截面的面积; EA 为钢管混凝土的抗压刚度; I 为钢管混凝土的惯性矩; EI 为钢管混凝土的抗弯刚度; E_s 、 E_c 分别为钢材和混凝土的弹性模量; I_s 、 I_c 分别为钢管截面和混凝土截面的惯性矩; A_s 、 A_c 分别为钢管截面和混凝土截面的面积。

采用桥梁大型通用程序 MIDAS 建模,考虑拱肋侧倾对横向稳定的影响,对原拱肋按实际测量坐标进行建模,全桥共 1 357 个节点,1 270 个单元,计算模型见图 3。

根据加固设计方案^[12],对原桥加固施工时可能遇到的 7 种工况进行了稳定性分析,各工况划分及计算结果见表 2、3,部分工况的失稳模式如图 4 所示。为了便于对比分析,表 2 中给出了各工况的约束条件和荷载:工况 1 为理想状态下(拱肋无侧

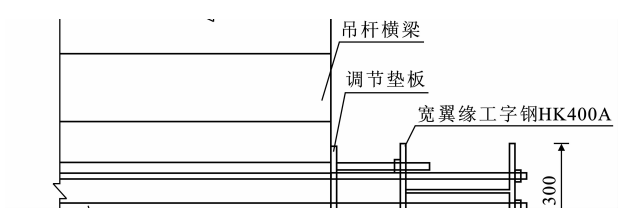


图 3 桥梁有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model of Bridge

移)的工况;工况2为拱肋发生侧倾时,未加固运营时

表 2 计算工况

Tab. 2 Calculation Cases

工况	约束条件	荷载
1	拱肋无侧移、桥面连续、一字撑 5 道	自重、风荷载、汽车荷载、人群荷载
2	拱肋有侧移、桥面连续、一字撑 5 道	自重、风荷载、汽车荷载、人群荷载
3	拱肋有侧移、桥面连续、一字撑 5 道	自重、风荷载、人群荷载
4	拱肋有侧移、解除桥面连续、一字撑 5 道	自重、风荷载、人群荷载
5	拱肋有侧移、解除桥面连续、临时限位钢纵梁	自重、风荷载、人群荷载
6	拱肋有侧移、解除桥面连续、临时限位钢纵梁、加 K 字撑	自重、风荷载、人群荷载
7	拱肋有侧移、加 K 字撑	自重、风荷载、汽车荷载、人群荷载

表 3 各工况稳定系数及失稳模式

Tab. 3 Stable Coefficients and Instability Modes Under Various Cases

工况	1 阶稳定系数	1 阶失稳模式
1	6.71	面外 S 形失稳
2	3.18	面外半波失稳
3	3.56	面外半波失稳
4	3.41	面外 S 形失稳
5	3.57	面外半波失稳
6	9.52	面外 S 形失稳
7	8.13	面外 S 形失稳

的工况;工况 3、4 为更换吊杆、解除桥面连续前后的工况;工况 5、6 则为采取了增加临时限位钢纵梁(图 5),将一字撑改为 K 字撑等措施后的工况;工况 7 为桥梁加固完工后投入运营时的工况。

4 结果分析

(1)在未产生侧向位移的理想状态下,运营阶段桥梁的 1 阶弹性屈曲稳定系数为 6.71(工况 1),产生侧向位移后稳定系数降为 3.18(工况 2),已经不

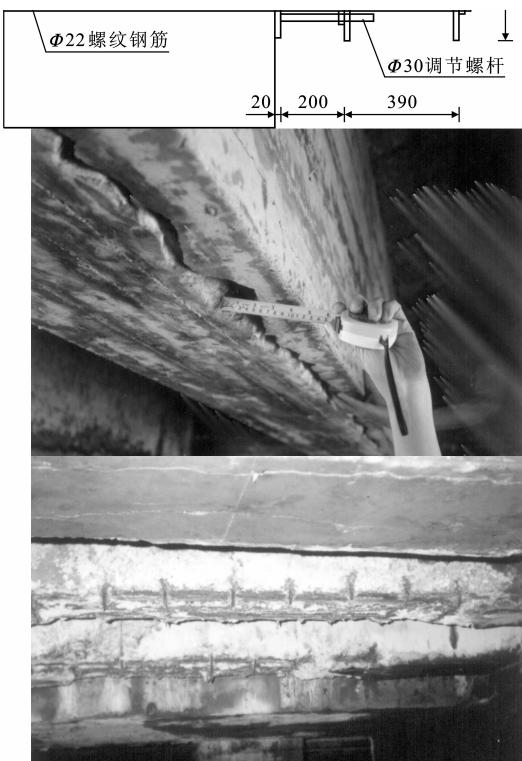


图 4 各工况的失稳模式
Fig. 4 Instability Modes Under Various Cases

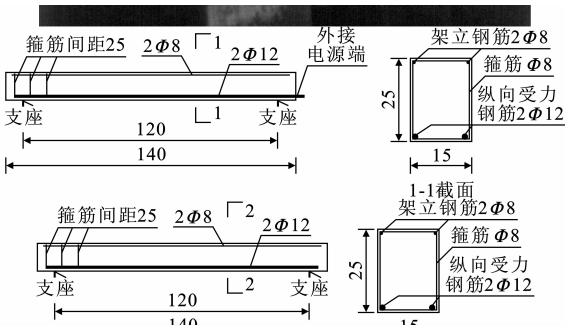


图 5 临时限位钢纵梁横截面(单位:mm)
Fig. 5 Cross-section of Temporary Fixing
Steel Stringer (Unit:mm)

能满足根据中国已建钢管混凝土拱桥的设计经验确定的稳定系数大于等于 4.0 的要求。

(2)在吊杆更换、调整桥面标高过程中,必须解除桥面连续。由于该桥拱肋存在同方向侧偏、吊杆倾斜,当桥面连续解除后,桥面系有可能发生侧飘。在自重、风荷载及人群荷载作用下,1 阶弹性屈曲稳定系数由 3.56 降低到 3.41(工况 3、4),使得加固施工风险明显增大。

(3)为了保证施工过程中桥梁结构的稳定安全,施工时在吊杆横梁上增加了临时钢纵梁来限制桥面的横向位移,限位钢纵梁的刚度以保证施工过程中桥面侧向飘移不超过 1 cm 为原则,其 1 阶弹性屈曲

稳定系数由 0.001 提高到 3.56。稳定性提高主要得益于临时钢纵梁限制了桥面的横向位移,使吊杆的非保向力效应得以发挥,抑制了拱肋侧倾。

(4)将原来的 5 道一字撑改造为 4 道 K 字撑、1 道米字撑后,拱肋稳定系数由 3.56 提高到 9.52。由此可见,加焊为 K 字撑或米字撑(拱顶)以提高加固施工和成桥运营时的稳定性效果非常显著,可满足加固施工及加固后运营阶段的稳定性要求。

(5)各工况失稳模态表明,拱肋失稳皆为面外失稳。随着拱肋面内、外刚度比值由小到大的变化,失稳模态波形由低阶向高阶模态变化,对称形式由正对称到反对称交替出现。

5 结 语

(1)有侧倾位移的钢管拱桥更换吊杆时,桥面连续必须解除,增加临时限位钢纵梁可有效限制桥面侧倾,对提高侧倾拱肋的横向稳定有一定贡献;将拱肋一字撑改为 K 字撑和米字撑后桥梁的稳定系数明显增大。

(2)本文中实桥加固工程的成功实施说明,钢管拱桥的加固施工应对其可能出现各工况下的稳定性进行深入细致的分析,同时采取必要的措施保证加固施工中桥梁结构的安全稳定非常重要。

参考文献:
References:

[1] 贺拴海,宋一凡,周彦军. CFTS 拱桥承载能力分析[J]. 西安公路交通大学学报,1998,18(增2):132-136.
HE Shuan-hai, SONG Yi-fan, ZHOU Yan-jun. Analysis of the Bearing Capacity of CFST Arch Bridges[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998, 18(S2): 132-136.

[2] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
ZHONG Shan-tong. Concrete-filled Steel Tube Structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[3] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
CAI Shao-huai. Modern Concrete-filled Steel Tube Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.

[4] 陈宝春,韦建刚,王加迫. 钢管混凝土拱桥的挠度限值研究[J]. 中国公路学报,2007,20(6):56-60.
CHEN Bao-chun, WEI Jian-gang, WANG Jia-po. Research on Deflection Limit Value for CFST Arch Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport,

- 2007,20(6):56-60.
- [5] 陈宝春,肖泽荣,韦建刚. 钢管混凝土哑铃形拱肋灌注混凝土时的截面应力分析[J]. 中国公路学报,2005,18(1):73-76.
- CHEN Bao-chun, XIAO Ze-rong, WEI Jian-gang. Analysis on Stresses of Dumbbell-shaped Cross-section of CFST Arch Rib During Concrete Pouring Construction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005,18(1):73-76.
- [6] 刘扬,邬晓光,徐芳元. 钢管造型拱竖向转体施工结构仿真分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(2):49-52.
- LIU Yang, WU Xiao-guang, XU Fang-yuan. Simulation of Vertical Shift Constuction of Steel Tub Arch Bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007,27(2):49-52.
- [7] 赵灿晖. 上承式钢桁拱桥面内极限承载力分析[J]. 交通运输工程学报,2007,7(6):80-85.
- ZHAO Can-hui. In-plane Ultimate Bearing Capacity Analysis of Deck-type Steel Braced Arch Bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007,7(6):80-85.
- [8] 卢斌,文锋,李世清. 大跨径钢管混凝土拱桥施工方法的风洞试验研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2006,23(3):41-43.
- LU Bin, WEN Feng, LI Shi-qing. Study of Wind-resistant of Integral Lifting Construction for Big Solid in Long-span Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2006,23(3):41-43.
- [9] 顾安邦. 桥梁工程:下册[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
- GU An-bang. Bridge Engineering: Volume 2[M]. Beijing: China Communications Press, 1999.
- [10] 韦建刚,王加迫,陈宝春. 钢管混凝土哑铃形拱肋设计刚度取值问题研究[J]. 福州大学学报:自然科学版,2007,35(4):582-587.
- WEI Jian-gang, WANG Jia-po, CHEN Bao-chun. Analysis of Rigidity in Design for CFST Dumbbell-rib Arch Bridges[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2007,35(4):582-587.
- [11] 盛叶,陈宝春,韦建刚. 新型钢管混凝土哑铃形偏压短柱试验研究[J]. 福州大学学报:自然科学版,2007,35(2):276-280.
- SHENG Ye, CHEN Bao-chun, WEI Jian-gang. Experimental Research on Concrete Filled Steel Tubular Stubs with New Type Dumbbell Section Under Eccentric Loads [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2007,35(2):276-280.
- [12] 牛宏,慕玉坤,张连锋. 钢管混凝土拱桥加固设计与施工[J]. 公路,2008(9):261-264.
- NIU Hong, MU Yu-kun, ZHANG Lian-feng. Strengthening Design and Construction of CFST Arch Bridge[J]. Highway, 2008(9):261-264.

《土木工程学报》2009 年征订通知

《土木工程学报》是中华人民共和国住房和城乡建设部主管,中国土木工程学会主办的土木工程类综合性学术期刊,以土木工程界中高级工程技术人员为主要读者对象;内容主要报道结构工程、土力学及基础工程、隧道及地下工程、公路桥梁工程、交通工程、建设管理、防灾减灾及计算机应用等在科研、设计、施工等方面的重要成果及发展状况,重视刊登结合工程实践的论著,并报道行业综述、科技信息和动态,促进各国土木工程界的学术交流。

《土木工程学报》创刊于1954年3月,现为美国《工程索引》(Ei)核心期刊、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),被中国科学引文数据库、中国期刊网、中国学术期刊(光盘版)全文数据库、万方网数据库等收录。

《土木工程学报》为月刊,大16开本,每期定价20元,全年共240元;国内外公开发行,国内邮发代号2-582,国外发行代号M288。《土木工程学报》2009年征订工作已经开展,欢迎各界有关单位及个人订阅。

地址:北京市三里河路9号建设部内 电话:(010)58934211 网址:www.cces.net.cn

邮编:100835 传真:(010)58933912 E-mail:tumuxuebao@263.net