

大跨度 CFST 系杆拱桥静动载试验分析研究

卜志鹏

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 包西铁路跨黄延高速公路大桥主桥为单跨 128 m 的钢管混凝土(CFST)系杆拱桥.通过对该铁路大桥进行实桥静动载试验,研究了在静动载作用下大跨度 CFST 系杆拱桥的结构特性、脱轨系数、加速度及振幅响应等关键参数,并与 ANSYS 有限元分析结果进行了对比.发现大跨度 CFST 系杆拱桥挠度和应力校验系数处于合理范围,结构各项关键参数满足规定要求.结果表明:该铁路大桥具有足够的强度和刚度,动力性能良好,满足设计的荷载等级和营运要求;有限元计算结果能够反映该桥梁结构静力及动力性能.本文研究结果对大跨度 CFST 系杆拱桥的竣工验收及鉴定评价有重要指导意义.

关键词: 铁路桥; CFST 系杆拱桥; 静动载试验; 有限元分析; 校验系数

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)03-0388-04

Study on the static and dynamic load test for long-span CFST tied arch bridge

BU Zhipeng

(China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Main bridge of Baoxi Railway across Huangyan Highway is a tied concrete-filled steel tubular (CFST) arch bridge with a single span of 128m. Static and dynamic test on this real bridge were conducted and key parameters such as structural characteristics, derailment coefficient, accelerations, amplitude response in action of static and dynamic loads were studied and compared with results of finite element method (FEM) analysis using ANSYS. All key parameter are identified to be good and the railway bridge has enough stiffness and strength, deflection and the stress calibration factor of the structure are at reasonable range, meeting requirements of codes and operating. FEM analysis results can show the static and dynamic characteristics. Results of the paper are important in guiding completion inspection and acceptance work, identification and evaluation work.

Key words: railway bridge; CFST tied arch bridge; static and dynamic test; finite element analysis; verification coefficient.

由于建造桥梁的材料性能、结构效应等影响,使得实桥结构的各关键参量与理论结算结果存在较大差异,为研究大跨度桥梁结构的运营荷载作用下结构的工作状态,荷载试验^[1]作为最直接的测试方法被广泛应用.荷载试验是通过对桥梁结构直接加载,并进行实时测试与分析,获得实际结构的特征效应值及关键参量,将其评价结果作为实桥结构性能评价和判定主要依据.

文献[2-5]对不同跨度、不同形式的系杆拱桥的成桥进行了荷载试验分析和研究,但是针对大跨度单跨钢管混凝土系杆拱桥的研究相对较少.本文以 1 座主跨跨径 128m 的 CFST 系杆拱桥为研究对象,进行了实桥静动载试验研究,旨在检验该新建桥梁结构的设计和施工质量,确定其工程可靠性.此外,通过对比静动载试验结果与有限元计算结果,为对桥梁有限元分析模型修正提供可靠的静动载试验数据.

1 工程概况

跨黄延高速大桥是包西铁路跨越黄陵至延安的重要铁路工程,主桥位于线路平均纵坡为 7.73% 的坡道上,按照正拱斜置设计.主桥上部结构为钢管混凝土系杆拱,拱轴线方程为: $Y=0.8X-0.00625X^2$, 矢跨比 $f/L=1/5$.横桥方向设置两道拱肋,拱肋中心间距 13.05 m.拱肋截面为外径 130 cm,壁厚 26 mm 的钢管混凝土哑铃型截面,拱肋截面高 3.5 m,上下弦管中心距 2.2 m.拱肋上下弦管间缀板厚 26 mm,缀板间距 70 cm,缀板间除拱脚面以外 6 m 范围及吊杆纵向 1.5 m 范围灌注混凝土外其余均不灌注混凝土.拱肋间共设 7 道一字型横撑和 2 组 K 形对角撑,各横撑和对角撑均为空钢管组成的桁式结构.横撑上、下弦管外径 850 mm,壁厚 16 mm; K 形对角撑上、下弦管外径 600 mm,壁厚 12 mm.横撑和 K 形角撑之间的腹杆分别采用外径 500 mm,壁厚 10 mm 和外径 400 mm,壁厚 8 mm 的钢管连

接.两片拱肋共设 17 对吊杆,吊杆中心间距 6.25 m,每处吊杆均由双根 73 丝 $\phi 7$ mm 的平行钢丝束组成.主梁为预应力混凝土单箱三室简支箱梁,全长 131 m.主梁顶板宽 16.35 m,底板宽 13.69 m,梁高 3.0 m.该铁路大桥拱肋内填混凝土和主梁混凝土等级均为 C55,钢管材料等级为 Q345qE,吊杆材料是抗拉强度标准值为 1 570 MPa 的光面钢丝.铁路桥面布置为双线,铁路等级为国铁 I 级,设计荷载为中-活载,设计行车速度 200 km/h,地震动峰值加速度 0.05 g.桥梁结构立面图如图 1 所示,其中 A-A~G-G 为测试截面.

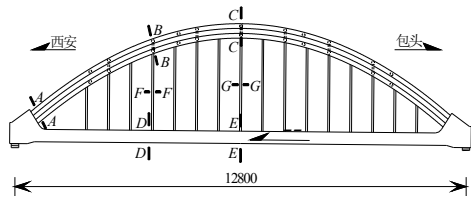


图 1 桥梁结构立面图 (单位: cm)
Fig.1 Bridge structure elevation (unit: cm)

2 有限元模型建立及静动载试验方案

2.1 有限元模型建立

为模拟大跨度 CFST 系杆拱桥在静动载作用下桥梁结构的工作状态,全面综合评价该类桥梁结构的静力及动力性能,利用大型通用有限元软件 ANSYS 建立主桥空间计算模型.由于试验荷载作用下结构各构件常处于弹性工作状态,为便于分析,将主拱拱肋、横撑和主梁均简化为空间梁单元,忽略钢管与内填混凝土的粘结滑移效应,采用 BEAM188 单元进行模拟.拱肋单元截面采用强度和截面特性等效的哑铃型混凝土截面,主梁截面为实际的单箱三室截面,混凝土弹性模量 $E_c=3.55\times 10^4$ MPa,泊松比 $\nu=0.2$,密度 $\rho=2\ 600\text{ kg/m}^3$;通过对吊杆钢束进行等效强度换算,采用 LINK10 杆单元进行模拟分析,钢束弹性模量 $E_s=2.05\times 10^5$ MPa,泊松比 $\nu=0.3$,密度 $\rho=7\ 800\text{ kg/m}^3$.为考虑节点刚域效应,将拱肋与横撑间的连接用刚性连接模拟,吊杆与拱肋和吊杆与主梁间的连接用弹性连接模拟.由于拱脚与主梁连接处刚度较大,应力分布均匀,因而可通过局部增大单元刚度方法来模拟拱座处单元的连接.下承式系杆拱桥在拱脚与主梁的连接为设计关键点,为避免在该处出现破坏薄弱点,通常会加强处理,因而在分析中可通过将拱座处拱肋单元和主梁单元的刚度提高 3~5 个数量级用以考虑局部刚性区域效果,忽略结构在该处变形和内力分布的影响.结合原桥结构支座设置,在包头侧设置固定铰支座,西安侧设置沿纵桥向的可动支座,用以模

拟系杆拱桥为简支结构的力学模型.全桥共划分为 945 个单元,3024 个节点.图 2 为 ANSYS 有限元分析模型.



图 2 主桥有限元模型
Fig.2 Finite element model of the main bridge

2.2 静载试验方案

(1) 荷载工况

根据下承式系杆拱桥的结构特点,结合有限元静力分析结果,为便于静载试验的顺利进行,取主桥西安端半桥跨结构进行静力加载.静载试验包括偏载加载和正载加载;各加载工况,先进行偏载试验,再进行正载试验.以 DF8B 机车牵引 C70 货车作为荷载实体对结构进行加载.主桥静载试验工况如表 1 所示.

(2) 测点布置及测试

测试项目及测点位置如下:主拱拱肋 L/4、L/2、3L/4 附近吊杆处以及主梁 L/4、L/2 及 3L/4 附近各布置 2 个挠度测点,上下游侧对称布置,共计 12 个测点.A-A~C-C 单侧拱肋每个截面顶部和底部处各布置 2 个应力测点,侧面顶部下 65 cm 和底部上 65 cm 处各布置 2 个应变测点,两侧拱肋应变测点对称布置,单侧拱肋共计 24 个测点;D-D 截面及 E-E 截面顶板下缘各布置 6 个应变测点,底板上缘各布置 6 个应变测点,共计 24 个测点.全桥共计 72 个应变测点.

表 1 静载试验工况
Tab.1 Conditions of the static loading test

加载工况	测试项目	荷载布置	荷载效率
I	主拱拱脚截面 (A-A)最大正弯矩	2×(1DF8B+8C70)	0.71
II	主拱拱肋 L/4 附近吊杆处截面 (B-B)最大正弯矩	2×(1DF8B+2C70)	0.60
III	主拱拱顶截面 (C-C)最大正弯矩	2×(1DF8B+2C70)	0.60
IV	主梁 L/4 附近截面 (D-D)最大正弯矩	2×(1DF8B+2C70)	0.60
V	主梁跨中截面 (E-E)最大正弯矩	2×(1DF8B+2C70)	0.58
VI	主拱拱肋 L/4 附近吊杆 (F-F)最大拉力	2×(1DF8B+8C70)	0.73
VII	主拱拱顶长吊杆 (G-G)最大拉力	2×(1DF8B+8C70)	0.74

注: 由于试验现场条件的限制,加载工况荷载效率偏低.

2.3 动载试验方案

(1) 荷载工况

动载试验主要针对静载试验选取的半桥跨结构进行,工况选取截面 B-B、C-C、E-E 进行.动载试验主要包括脉动试验、行车试验和制动试验.行车试验时按 20、40、60、80 km/h 的速度工况进行,制动试验时按 40、50、60 km/h 的速度工况进行.

(2) 测点布置及测试

测点布设位置及测试项目如下: B-B 和 C-C 各截面顶部和底部各布置 1 个动应变测点; E-E 截面顶板下缘布置 2 个动应变测点,底板上缘布置 2 个动应变测点.全桥共布设动应变测点 12 个.

3 静载试验及有限元结果分析

3.1 静载作用下结构挠度分析

根据预定静载试验荷载工况,分析各挠度测点数据.图 3 给出了工况 I 状态下各测点挠度及吊杆伸长量实测值及有限元计算值,挠度数据向下为负.

由图 3 可知,各测点实测结果略小于有限元计算结果,这主要是由于有限元方法的系统误差造成,有限元计算结果偏于安全,计算结果有效.对各静载工况作用下桥梁结构测点结果分析表明:桥跨结构挠度的实测值与有限元计算值校验系数为 0.52~0.91,吊杆伸长量校验系数 0.70~0.91,符合规范[6]限值要求,表明桥跨结构具有足够的刚度.

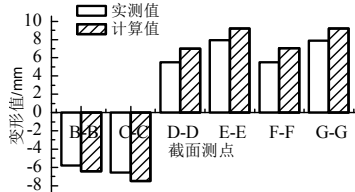


Fig.3 Measured and calculated values of deflection

3.2 静载作用下结构应力分析

根据应变测点布设,将测试得到的应变换算为应力,以结构最不利承载状况的静载工况 I, IV 为例,试验截面部分测点应力结果如表 2 所示.

分析各测点应力结果可知,测点应力较小,桥梁结构具有足够的强度.此外,桥跨结构应力实测值与计算值吻合较好,结构应力校验系数介于 0.60~0.90 之间,满足规范[6]限值要求.

表 2 应力实测值与计算值

Tab.2 Measured and calculated values of the stress				
工况及位置		实测值/MPa	计算值/MPa	校验系数
I	拱脚上弦管上缘	-7.24	-11.88	0.61
	拱脚上弦管侧面	-6.96	-9.94	0.7
	拱脚下弦管侧面	-2.01	-3.34	0.6
	拱脚下弦管下缘	-0.93	-1.4	0.66
IV	顶板下缘	-1.13	-1.48	0.76
	底板上缘	1.6	2.52	0.63

注:应力数据受压为负,受拉为正.

4 动载试验及有限元结果分析

4.1 结构自振特性结果

主桥自振特性测试及有限元计算结果如表 3 所示.从实测结果可以看出:

(1) 主拱横向基频 0.830 Hz 大于规范[1]中规定简支梁基频的限定 $[f]=90/L=0.703$ Hz,实测横向基频大于规范规定值,表明该桥梁结构横桥向刚度较大,结构稳定性较好.

(2) 频率计算值与实测值较吻合,且实测值均大于计算值,表明有限元计算结果偏于安全.实桥结构阻尼比的实测值介于 0.023~0.059,符合桥跨结构实际情况.

表 3 自振特性测试结果

Tab.3 Test results of the vibration characteristics				
序号	实测频率/Hz	计算频率/Hz	振型	阻尼比
1	0.830	0.828	主拱为主横向一阶弯曲	0.059
2	1.660	1.242	主梁/主拱竖向一阶弯曲	0.029
3	2.148	1.644	主梁/主拱横向二阶弯曲	0.023

4.2 加速度响应分析

通过对动载作用下结构测试点加速度响应结果分析知,1#墩制动激振类型引起的结构加速度响应较大,对比各测点测试结果以 E-E 截面加速度响应最大,图 4 给出了主梁 E-E 截面处的竖向和横向加速度正、负响应峰值.由图 4 可知:

(1) E-E 截面下行线附近处桥面竖向加速度响应介于 $-1.26\sim 1.11\text{m/s}^2$, 横向加速度响应介于 $-0.39\sim 0.41\text{m/s}^2$;

(2) 结构加速度响应峰值随机车制动速度的增大而减小,制动速度在 40 km/h 时桥跨结构横向加速度响应在跨行总桥面处达到最大值 0.41m/s^2 ,该响应小于规范[1]中规定的横向加速度限值 1.4m/s^2 ,表明桥跨结构横向动力性能良好.

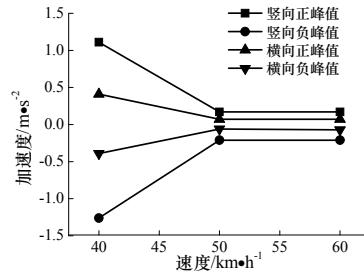


图 4 E-E 截面实测加速度

Fig.4 Measured acceleration at E-E cross section

4.3 振幅测试结果分析

通过对主桥各测点振幅测试结果分析, D-D 截面处竖向振幅和 E-E 截面处横向振幅相对较大,图

5 给出了该两测点处竖向和横向的振幅幅值。

根据规范[1], 参照预应力混凝土简支梁, 桥梁 E-E 截面横向最大振幅应满足: $A_{\max} \leq L/9\ 000 = 14.22\text{ mm}$, 其中 $L=128\text{ m}$ 为桥梁结构计算跨径。实测 E-E 截面横向最大振幅为 0.41 mm , 小于规定限值, 满足规范要求。桥梁墩顶横向振幅通常值应满足: 当车速 $\leq 60\text{ km/h}$ 时, $A_{\max} \leq H/30 + 0.2 = 0.57\text{ mm}$; 当车速 $> 60\text{ km/h}$ 时, $A_{\max} \leq H/25 + 0.4 = 0.84\text{ mm}$; 其中 $H=11\text{ m}$ 为墩高。经检算, 不同时速下的桥梁墩顶横向振幅满足检定规范要求。

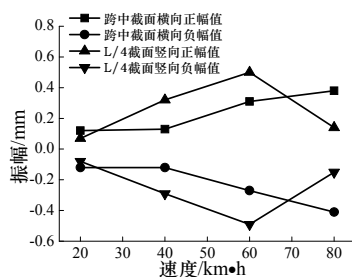


图5 E-E 截面振幅及 D-D 截面横向振幅

Fig.5 E-E vertical amplitude and D-D horizontal amplitude

4. 4 脱轨系数及应变动力系数结果分析

通过对各动载工况作用下钢轨脱轨系数进行测试, 结果表明: 不同车速和激振工况下车作用的脱轨系数为 $0.07 \sim 0.15$, 货车作用的脱轨系数范围 $0.05 \sim 0.18$ 。结合规范[7]规定的脱轨系数限值, 该桥跨结构的实测脱轨系数远小于规范规定限值 0.8 , 满足行车安全性要求。

根据动载工况作用下各应变测点实测结果分析知, 主拱拱肋 L/4 截面各测点应变动力系数为 $1.01 \sim 1.14$; C-C 截面各测点应变动力系数为 $1.01 \sim 1.09$; E-E 截面各测点应变动力系数为 $1.01 \sim 1.17$ 。此外, 结合实测数据分析得到在制动速度为 50 km/h 的动载作用时, 桥跨结构 E-E 截面的冲击系数达到最大值 1.17 , 实测应变冲击系数较大, 表明行车制动对桥跨结构的冲击作用较明显。

5 结论

本文对包西铁路跨黄延高速公路单跨 128 m 的 CFST 系杆拱桥制定和实施荷载效率为 $0.58 \sim 0.74$ 的静动载试验, 测试并研究了桥跨结构关键参数, 通过与 ANSYS 有限元分析结果对比分析, 得到以下结论:

(1) 静载工况下, 结构挠度和应力校验系数均处于合理范围, 表明该桥跨结构具有足够的刚度和强度, 满足桥梁设计要求。

(2) 动载作用下的测试结果表明, 大跨度

CFST 系杆拱桥横向刚度较好; 机车制动对桥跨结构的制动作用明显; 桥跨结构跨中最大振幅和脱轨系数均小于规范规定, 满足规范变形要求和行车安全性要求; 桥梁墩顶横向振幅最大值满足规范要求。

(3) 结构各关键参量的有限元计算值与荷载试验实测值吻合较好, 有限元分析方法能够准确反映结构静力和动力性能。

综上所述, 跨黄延高速公路单跨 180 m CFST 系杆拱桥具有足够的强度和刚度, 动力性能良好, 能够满足设计的荷载等级和运营要求; 有限元计算结果与结构实测结果较吻合, 可利用有限元分析方法反映桥跨结构的静力及动力性能。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国铁道部. 铁运函[2004]120 号. 铁路桥梁检定规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
The ministry of railways of the People's Republic of China. Trains letter [2004] No. 120. Railway bridge verification code [S]. Beijing: China Railway Press, 2004.
- [2] 高晓燕, 张浩, 张晓伟, 等. 蒲山特大桥静动载试验及质量评定[J]. 中外公路, 2010, 30(4): 360-364.
GAO Xiaoyan, ZHANG Hao, ZHANG Xiaowei, et al. PuShan bridge on static and dynamic load test and quality evaluation [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2010, 30(4): 360-364.
- [3] 孙建平. 大跨度铁路系杆拱桥静动载试验研究[J]. 铁道建筑, 2012(9): 29-32.
SUN Jianping. Long-span railway arc bridge static and dynamic load test research [J]. Railway Engineering, 2012(9): 29-32.
- [4] 陈昀明, 韦建刚, 陈宝春. 泉州百崎湖大桥静动载试验分析研究[J]. 公路工程, 2009, 34(5): 104-108.
CHEN Yunming, WEI Jiangang, CHEN Baochun. Static and dynamic tests and analysis of baiji lake bridge [J]. Highway Engineering, 2009, 34(5): 104-108.
- [5] 丘弋. 下承式系杆拱桥的荷载试验分析[J]. 中国勘察设计, 2012(8): 84-89.
QIU Yi. The load test analysis of a tied arch bridge [J]. China survey and design, 2012(8): 84-89.
- [6] 中华人民共和国交通部. YC4-4/1982 大跨径混凝土桥梁的试验方法[S]. 北京: 人民交通出版社, 1982.
The ministry of communications of the People's Republic of China. YC4-4/1982 The test method of long-span concrete bridge [S]. Beijing: People's Traffic Press, 1982.
- [7] 中华人民共和国铁道部. 铁建设函[2005]285 号. 新建时速 200 km/h 客货共线铁路设计暂行规定[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
The ministry of railways of the People's Republic of China. Railway construction letter [2005] No. 285. New 200 km/h mixed collinear railway design regulations [S]. Beijing: China Railway Press, 2005.

(编辑 吴海西)