

文章编号:1673-2049(2008)03-0122-05

# 大跨径人行天桥静、动载试验检测与评价分析

陈 峰, 王建华, 胡庆安, 胡大琳, 朱 浩

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**对长安大学人行天桥进行静、动载试验检测,基于结构损伤识别和承载力评定原理建立了桥梁的有限元数值分析模型,针对该人行天桥的结构特点、结构外观检查结果和使用现状设计了静、动载试验检测方案。对现场静、动载试验数据和数值模拟结果进行了对比,并对该类桥梁结构的承载力与安全性评估、健康检测及损伤诊断过程进行了具体的分析和介绍;对结构性能和使用状态进行了综合评价,并根据其结构损伤和病害特点进一步提出养护方案。结果表明,该桥虽受力状况复杂,但使用状况基本完好。

**关键词:**人行天桥;静、动载试验;检测;安全性评估;损伤诊断;综合评价

**中图分类号:**U446 **文献标志码:**A

## Examination and Evaluation Analysis of Static and Dynamic Load Test for Long-span Pedestrian Bridge

CHEN Feng, WANG Jian-hua, HU Qing-an, HU Da-lin, ZHU Hao

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** A static and dynamic load test examination for Chang'an University Pedestrian Bridge was carried out. In view of the structural characteristic of pedestrian bridge and the result of appearance examination, the finite element simulation analysis model for the pedestrian bridge was established based on structural damage detection and bearing capacity evaluation theory, and the test examination scheme of static and dynamic load was designed. Meanwhile, the bearing capacity and security evaluation, the health examination as well as the damage diagnosis process for this kind of bridge were analyzed and introduced through the condition visual inspection, and the result contrast analysis between the static and dynamic load empirical datum with the numerical simulation ones was done. After providing the synthesis evaluation for its structure performance and the running condition, the further proposed maintaining scheme was given in terms of structural damage and disease characteristics. The results show that the bridge behavior is in good condition although its stress status is complicated.

**Key words:** pedestrian bridge; static and dynamic load test; examination; security evaluation; damage diagnosis; synthesis evaluation

## 0 引言

由于城市人行天桥结构功能要求上的特殊性和

相应的景观要求,往往采用复杂、多样的结构形式,所以,很有必要对该类桥梁的实际受力、结构工作状态和使用效能进行精确分析和客观评定来保证结构

的正常使用和安全。笔者以长安大学一座跨径 100 m 的中承式钢管混凝土拱式人行天桥的静、动载试验检测分析计算为例,简要地介绍了人行天桥的桥梁荷载试验分析和评定过程。

### 1 工程概况

检测桥梁为陕西省西安市长安大学本部人行天桥。该桥于 1995 年建成,为中承式钢管混凝土拱桥,净矢跨比 1:9.6,净跨径 100 m,拱轴线在立面和平面内均为二次抛物线,拱肋采用单圆式截面在空间组成提篮拱,跨中设有 5 道横联,而在拱脚到  $L/8$  ( $L$  为桥长)附近各设有 4 道下横联。为保证人行天桥的正常使用、通行安全和结构的耐久性、安全性,该桥自 1995 年竣工验收后每隔 3 年都要进行 1 次结构定期检查,本次检测评估为该桥第 3 次检查评定。工作内容包括:①现场校核桥梁基本数据;②桥梁外观及线形检测、混凝土裂缝及钢结构锈蚀情况调查;③桥梁静、动载试验和结果分析,进而评估该桥的可靠性和安全性;④记录各构件缺陷病害并做出技术状况评分,确定桥梁技术等级;⑤根据桥梁技术等级确定养护措施,提出养护维修建议。

### 2 桥梁结构构造检查

检查发现通行 10 多年后,该桥各部构造均出现不同程度的损伤以及影响结构耐久性和使用功能的构造缺陷。主要问题为:①全桥桥面存在多道横向裂缝,间距大于 4 m,有浅坑槽、波浪存在;②桥面存在反坡,雨天积水,有轻度跳车现象,高度差在 2.0 cm 以内,部分泄水孔排水不畅导致的积水渗漏引起吊杆锚固处锈蚀;③部分吊杆底部锚固区位置有明显锈蚀现象;④全桥吊杆套筒存在两端锈蚀问题,尤以主桥两端短吊杆为甚;⑤吊杆与主拱连接处的焊接质量不佳,存在锈蚀和裂隙现象;⑥北引桥踏步台基混凝土劈裂严重。

### 3 静载试验

#### 3.1 测试内容及截面

静载试验是直接在桥梁上作用实际荷载,通过仪器设备对结构的有关部位进行检测,了解位移、应变等桥梁的力学参数<sup>[1-9]</sup>。静载试验的结果能比较准确、直接地反映出结构的受力状态。根据该桥的特点所确定的静载试验测试内容及截面为:①  $L/4$  跨桥面挠度;②靠近拱脚处吊杆应变;③全桥桥面变形;④观测桥面裂缝开展情况;⑤观测吊杆与桥面混

凝土结合处开裂情况;⑥观测引桥桥墩裂缝开展情况,如图 1 所示。

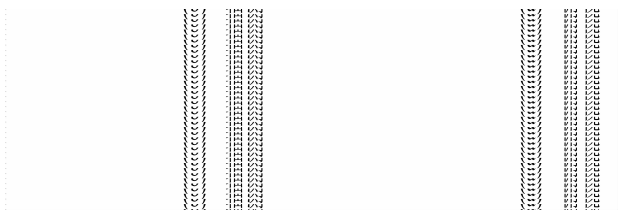


图 1 吊杆分布

Fig. 1 Distribution of Suspenders

静载试验应变测点设在各测试吊杆南北两侧以及距拱脚水平距离 1.25 m 处拱肋上下缘,共计 16 个测点;挠度测点设在  $L/4$  跨截面处梁底,共计 2 个测点。

部分吊杆应变测点位置和拱脚应变测点位置以及主梁挠度测点位置如图 2~4 所示;对于吊杆应变,由于接近拱脚的斜吊杆承受弯扭耦合作用受力情况复杂,因而采用南北方向均测试应变取均值的方法来模拟吊杆实际应变值。

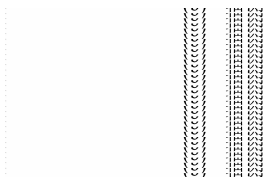


图 2 吊杆应变测点

Fig. 2 Measuring Points for Strain of Suspenders

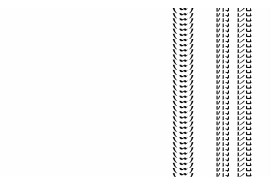


图 3 拱脚应变测点

Fig. 3 Measuring Points for Strain of Arch Foot

#### 3.2 试验工况

根据桥梁的设计荷载标准和检测内容制定了静载试验工况(加载效率经计算满足规范要求而不再赘述),加载工况为:采用金杯轻型客车进行加载,乘坐 12 人(含驾驶员),总质量 2.663 t,其中前轴质量 1.297 t,后轴质量 1.366 t,轴距

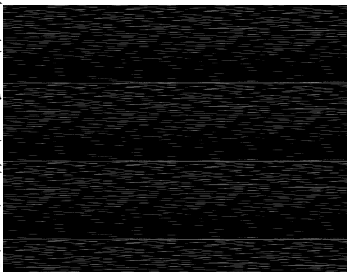


图 4 主梁挠度测点

Fig. 4 Measuring Points for Deflection of Main Beam

2.60 m,轮距 1.50 m。按照静载试验测试内容要求制定了 11 种加载工况:工况 1,纵桥向(由南到北)  $L/4$  桥面位置布中载;工况 2,纵桥向(由南到北)  $L/4$  桥面位置布偏载;工况 3,纵桥向(由南到北)  $L/2$  桥面位置布中载;工况 4,纵桥向(由南到北)  $L/2$  桥面位置布偏载;工况 5,纵桥向(由南到北)  $3L/4$  跨

桥面位置布中载;工况 6,纵桥向(由南到北)3L/4 跨桥面位置布偏载;工况 7,纵桥向在北拱脚最大负弯矩位置布中载;工况 8,纵桥向(由南到北南端)1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>吊杆中间位置布中载;工况 9,纵桥向(由南到北南端)1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>吊杆中间位置布偏载;工况 10,纵桥向(由南到北北端)20<sup>#</sup>、21<sup>#</sup>吊杆中间位置布中载;工况 11,纵桥向(由南到北北端)20<sup>#</sup>、21<sup>#</sup>吊杆中间位置布偏载。

3.3 试验结果分析

静载试验结果包括各试验工况下各测点的挠度值和应变值。采用 ANSYS 空间有限元程序建立空间有限元模型进行全桥空间整体分析,得到各工况挠度与应变的理论计算值。ANSYS 空间有限元计算模型和荷载作用下全桥变形和吊杆应变如图 5~7 所示。

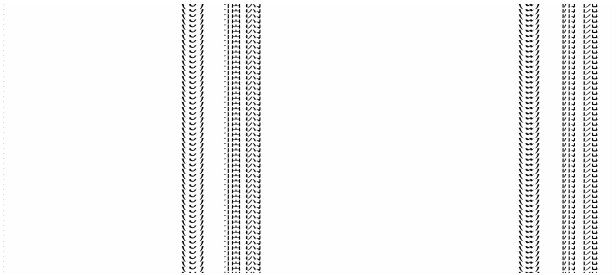


图 5 荷载作用下全桥变形

Fig. 5 Whole Bridge Deformation Under Load

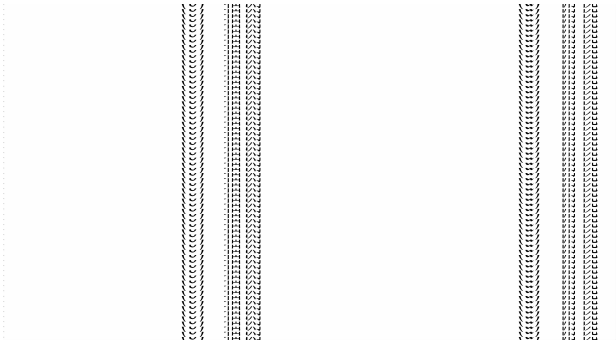


图 6 荷载作用下桥梁结构挠度(单位:m)

Fig. 6 Bridge Structure Deflection Under Load (Unit:m)

对试验桥梁在各工况下各测点的挠度值和应变值进行汇总并与相应的理论计算值进行分析比较,得出了不同试验工况下各控制截面的挠度和应变校验系数分布,如图 8~10 所示。

由图 8~10 可见,尽管存在拱脚的斜吊杆承受弯扭耦合作用受力情况复杂等问题的影响而产生一定的离散性,但其各工况的校验系数大多分布在 0.6~1.0,基本满足要求。

由表 1 各工况挠度实测值与计算值的比较和图

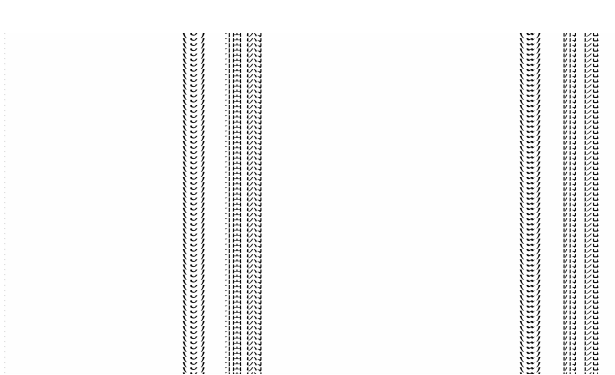


图 7 荷载作用下吊杆应变

Fig. 7 Strain of Suspenders Under Load

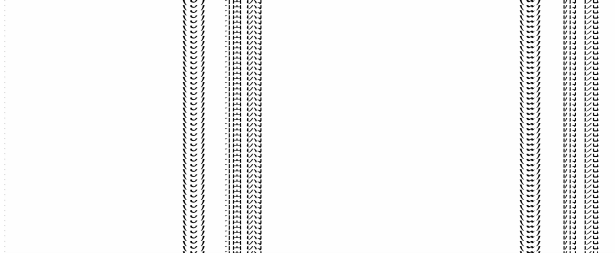


图 8 吊杆应变校验系数分布

Fig. 8 Distributions of Checking Coefficients of Strain of Suspenders

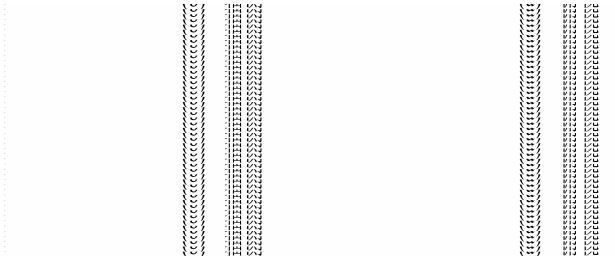


图 9 拱肋拱脚应变校验系数分布

Fig. 9 Distributions of Checking Coefficients of Strain of Arch Rib and Arch Foot

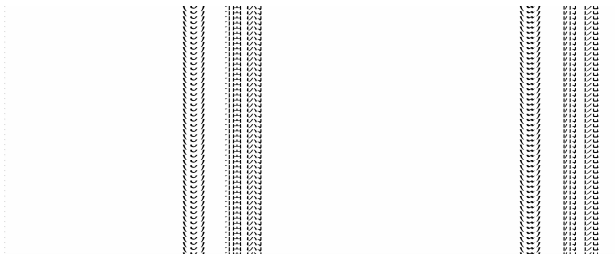


图 10 L/4 处测点挠度校验系数分布

Fig. 10 Distributions of Checking Coefficients of Deflection at L/4

10 可见:实测校验系数大多分布在 0.73~1.00,接近于《大跨径混凝土桥梁的试验方法》中关于拱桥的校验系数表中规定的 0.80~1.00;同时实测挠度

表 1 挠度测点实测值与计算值比较

Tab. 1 Comparisons Between Observed Values and Calculated Values of Deflection Measuring Points

工况	位置	测点 编号	实测值 $D_m/mm$	计算值 $D_c/mm$	挠度校验系数	
					$D_m \cdot D_c^{-1}$	平均值
1	L/4W	20	-10.080	-10.007	1.007	1.002
	L/4E	21	-9.980	-10.008	0.997	
2	L/4W	20	-10.905	-11.025	0.989	0.992
	L/4E	21	-8.954	-9.009	0.994	
3	L/4W	20	0.890	0.902	0.987	1.056
	L/4E	21	1.020	0.907	1.125	
4	L/4W	20	1.035	0.943	1.098	0.954
	L/4E	21	0.702	0.867	0.810	
5	L/4W	20	7.050	7.513	0.938	0.857
	L/4E	21	5.832	7.515	0.776	
6	L/4W	20	7.056	7.126	0.990	0.960
	L/4E	21	6.470	6.952	0.931	
7	L/4W	20	4.780	5.615	0.851	0.891
	L/4E	21	5.231	5.617	0.931	
8	L/4W	20	-10.342	-9.445	1.095	1.054
	L/4E	21	-9.562	-9.443	1.013	
9	L/4W	20	-9.130	-9.293	0.982	1.005
	L/4E	21	-8.006	-7.798	1.027	
10	L/4W	20	3.840	5.779	0.664	0.731
	L/4E	21	4.615	5.781	0.798	
11	L/4W	20	5.981	6.497	0.921	0.992
	L/4E	21	7.030	6.616	1.063	

注:L/4W表示L/4处西侧;L/4E表示L/4处东侧;挠度向上为正,向下为负。

纵桥向和横桥向分布规律与理论计算结果分布规律大致相同。

4 动载试验

桥梁动载试验是根据桥梁结构在承受车辆、人群等动力荷载作用时产生的振动,通过分析结构的动力响应来评定其承载能力和实际状况。使用测振传感器测出位移、速度、加速度等有关力学参数,应用频谱分析等方法了解结构的自振频率、阻尼比、振型等动力特性,测定桥梁在动荷载作用下的动应力、动位移等响应,从而确定结构的承载能力。相对静载试验而言,动载试验操作方便,对结构的使用环境要求不高,现场工作量也小得多。但是,由于动载试验是用间接方法来了解结构的受力特征,其结果易受外界干扰而误差较大,所以动载试验结果往往作为定性分析桥梁承载能力的一种较为有效的手段,同时也是静载试验的有效补充。

本次动载试验设置加速度测点和动应变测点各6个,均布于桥面之上。动载试验工况:①桥L/4至跨中处多人跳;②试验车匀速行驶(载12人);③试验车跨中制动(载12人),通过布置在桥上的加速度传感器,测得该桥的桥面振动时程曲线和幅频曲线,如图11、12所示。动载试验的动力特性计算结果如表2所示。

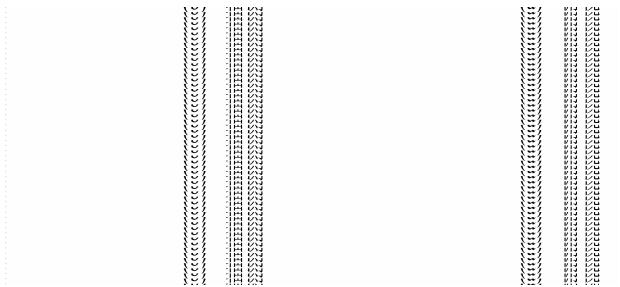


图 11 桥面振动时程曲线

Fig. 11 Time History Curve of Deck Vibration



图 12 幅频曲线

Fig. 12 Curve of Amplitude and Frequency

表 2 动力特性计算结果

Tab. 2 Calculated Results of Dynamic Properties

阶数	自振频率/Hz	振型描述	阻尼比
1	0.597	拱对称水平摆动,桥面扭转	0.037
2	0.923	拱、桥面反对称竖向弯曲	0.023
3	1.365	拱反对称水平摆动,桥面扭转	0.029
4	1.554	拱、桥面对称竖向弯曲	0.036
5	1.914	拱对称水平摆动,桥面横向弯曲、扭转	0.023

动载试验结果分析表明:测试结果自振频率 $F_{av}=1.560\text{ Hz}$ ,阻尼比 $\xi=0.023\ 4$ ,同样采用 AN-SYS 空间有限元程序建立空间有限元模型进行全桥空间模态分析,将得到的各工况下动力响应作为模态分析的计算值。

由于实测的频率为桥L/4至跨中处多人跳引起激振所采集的数据,故其频率与振型应与有限元计算的第3阶振型相对应,如图13所示。

5 结 语

(1)根据静、动载试验检测和计算分析,认为该



图 13 全桥第 3 阶振型

Fig. 13 The Third Vibration Mode of Whole Bridge

桥承载能力基本能够满足设计荷载的要求;主桥拱肋结构变形基本处于弹性工作状态;抗弯、抗剪强度满足规范要求;局部受力构件基本满足承载和正常使用要求,但需加强日常维修养护以保证其具有一定的结构可靠性;全桥整体结构具有较为可靠的结构使用安全性,满足桥梁正常使用要求。

(2)通过人行天桥结构构造检查和静、动载试验检测和计算分析结果,并按照《城市桥梁养护技术规范》(CJJ 99—2003)和《公路工程质量评定标准》(JTGF 80—2004)对该桥的总体技术状况进行评价,评价结果为:主桥(中承式钢管混凝土拱桥)总体技术状况等级为一类;引桥(钢筋混凝土无梁板桥)总体技术状况等级为二类。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 交通部第二公路勘察设计院. 公路旧桥承载能力鉴定方法[M]. 北京:人民交通出版社,1988.  
The Second Highway Consultant Design Institute of MOC. Identification Methods of Bearing Capacity Evaluation for Former Bridges [M]. Beijing: China Communications Press,1988.
- [2] 崔 飞,袁万城,史家钧. 基于静态应变及位移测量的结构损伤识别法[J]. 同济大学学报,2000,28(1):5-8.  
CUI Fei, YUAN Wan-cheng, SHI Jia-jun. Damage Detection of Structures Based on Static Response [J]. Journal of Tongji University,2000,28(1):5-8.
- [3] 宋一凡,周彦军,贺拴海. 钢筋混凝土梁的动刚度分析[J]. 西安公路交通大学学报,1998,18(4):137-141.  
SONG Yi-fan, ZHOU Yan-jun, HE Shuan-hai. Analysis of Dynamic Stiffness of RC Beams [J]. Journal of

Xi'an Highway University,1998,18(4):137-141.

- [4] 王建华,胡大琳,白鹏翔. 桥梁静动载试验应变测量新技术[J]. 重庆交通学院学报,2006,25(2):16-19.  
WANG Jian-hua, HU Da-lin, BAI Peng-xiang. The New Technology of Strain-measurement for Bridge Static-dynamic Load Testing[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University,2006,25(2):16-19.
- [5] 程远胜,杨振宇,汪 刚. 基于受控结构振型的损伤定位分步识别方法[J]. 工程力学,2006,23(6):54-59.  
CHENG Yuan-sheng, YANG Zhen-yu, WANG Gang. Two-step Structural Damage Localization Method Based on Mode Shapes of Structure Under Control[J]. Engineering Mechanics,2006,23(6):54-59.
- [6] 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.
- [7] 陈 淮,董建华. 中、下承式拱桥吊索张力测定的振动法实用公式[J]. 中国公路学报,2007,20(3):66-70.  
CHEN Huai, DONG Jian-hua. Practical Formulae of Vibration Method for Suspender Tension Measure on Half-through and Through Arch Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20 (3): 66-70.
- [8] 张建仁,王 磊. 既有钢筋混凝土桥梁构件承载力估算方法[J]. 中国公路学报,2006,19(2):49-55.  
ZHANG Jian-ren, WANG Lei. Estimated Approach to Carrying Capacity of Existing Reinforced Concrete Bridge Member [J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(2):49-55.
- [9] 张 阳,邵旭东,蔡松柏,等. 大跨桁式钢管混凝土拱桥空间非线性有限元分析[J]. 中国公路学报,2006,19(4):65-70.  
ZHANG Yang, SHAO Xu-dong, CAI Song-bai, et al. Spatial Nonlinear Finite Element Analysis for Long-span Trussed CFST Arch Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(4):65-70.