

# 双曲拱桥加固后荷载试验分析与承载力评定

雷显勇,胡大琳,陈峰

(长安大学公路学院,陕西西安 710064)

摘要:该文以一座 3 孔 30 m 的双曲拱桥(土山桥)为实例,根据该桥型的结构特性和加固特点,确定合理的荷载试验方案并进行测试。利用大型通用有限元结构分析程序 ANSYS 对该桥进行静力和动力计算,并与试验结果进行对比分析,从而对该双曲拱桥的加固效果和承载力进行综合评定。

关键词:双曲拱桥;加固;荷载试验;静动力分析;承载力评定

中图分类号:U448.221 文献标识码:A 文章编号:1009-7716(2006)04-0086-04

## 0 前言

双曲拱桥自 1964 年首创以来,由于其施工化整为零,预制拱肋和拱波,再组合拼装起来与现浇混凝土拱背层形成拱圈,使该种桥梁在结构上比较轻盈,适宜于软土地基上建造。由于该种桥梁施工上装配化、省工省料、施工工艺易被掌握,使该桥型得到迅速推广,至今已有 40 余年历史。但也正因为双曲拱桥的构造和施工特点,施工中存在稳定性不足,断面抗弯性能较弱,整体性差等缺点,影响了桥梁承载能力的发挥及正常使用寿命。随着我国交通运输的不断发展,车辆特别是重车迅速增多,在六、七十年代大量修建的低荷载标准的双曲拱桥在长期超负荷运营的过程中逐渐暴露出结构、设计上的缺陷,出现了不同程度和不同类型的病害,这些问题导致承载能力不足的同时,有的甚至达到危害行车安全、影响正常交通运行的程度。土山桥加固前的荷载试验检测结果显示,其正常使用极限状态下承载力偏低,且桥梁整体刚度偏弱,强度储备不足。根据规划,土山桥上游将建造一座新桥,其还需维持 3~5 a 的正常使用要求,因此委托有关单位对其实施了加固处理。为了评价加固效果,对加固后桥梁的性能有准确把握,该文对桥梁加固后的荷载试验结果进行分析,通过与计算结果的对比,来评价桥梁的加固效果。

## 1 工程概况

徐州市邳州邳睢路土山桥原为 3 孔净跨 30 m 双曲拱桥,净矢高为 6 m,矢跨比为 1/5,设计拱轴线系数  $m$  为 1.758。上部结构主拱圈为等截面悬链线无铰拱,每孔主拱圈由 5 根拱肋、4 块拱波(拱板)及横向联系组成。中拱肋呈倒 T 形截面,

边拱肋呈 L 形截面。加固前试验检测结果显示,在最大控制荷载时梁底拱肋未产生可见裂缝,桥梁实测拱轴线与设计拱轴线基本吻合,其正常使用极限状态下承载力偏低,且桥梁整体刚度偏弱,强度储备不足。结合该试验检测<sup>[6]</sup>结果,公路管理部门对该桥进行了全面维修加固,具体措施为:(1)对主拱圈存在的开裂现象,按要求进行裂缝及封闭处理;(2)对横隔板沿桥宽方向通长粘贴钢板,并对原横隔板焊接接头进行除锈、封闭处理,加强桥梁整体横向联系;(3)沿主拱肋底缘纵向粘贴钢板,提高主拱圈截面的承载能力;(4)拆除原拱上空腹式微弯板和立柱上横梁,改变拱上建筑的结构体系,将桥面板改成连续板式结构,同时对桥面进行一次性施工处理。为了验证该桥的加固效果,保证桥梁的正常运营和结构安全并确定桥梁的实际工作状态,对该桥又进行了荷载试验和承载力评定。加固后该桥的纵向结构及主拱圈结构如图 1、图 2 所示。

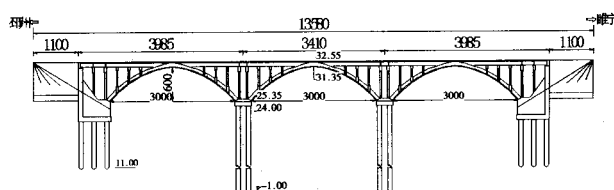


图 1 纵向结构示意图(单位:mm)

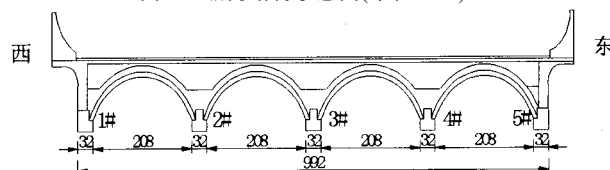


图 2 主拱圈横向结构示意图(单位:cm)

## 2 静载试验

根据静载试验的要求、土山桥纵向抗推力桥墩的位置及现场勘查的状况,选取该桥邳州方向的第 1 孔作为测试跨,该孔是三孔连拱的边跨,试验荷载作用连拱效应最显著(远离抗推力桥墩的

收稿日期:2006-03-21

作者简介:雷显勇(1981-),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事桥梁工程结构计算研究工作。

水平位移约束)。

### 2.1 静载试验测试内容及截面

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、应变等桥梁力学参数。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。根据本桥的特点确定了静载试验测试内容及截面,如图 3 及表 1 所示:

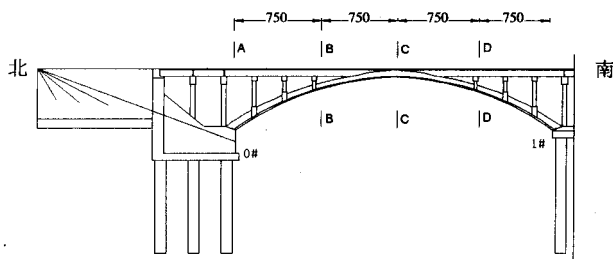


图 3 纵向测试截面示意图

表 1 静载试验检测截面位置和测试内容

截面编号	截面位置	控制内力	测试目的
A	0# 台北拱脚	最大正弯矩	应变、挠度
B	1/4	最大正弯矩	应变、挠度
C	1/2	最大正弯矩	应变、挠度
D	3L/4	最大负弯矩	应变、挠度

为了分析边跨主拱圈在试验荷载下的变形状况,静载试验应变测点设在 A、B、C、D 截面处的 1#、2#、3#、4#、5# 拱肋底缘各设 1 个应变测点,A、B 截面 2# 和 3#、肋上方拱背处(拱板)各设 1 个应变测点;在 B、C、D 截面每拱肋各设 1 个挠度测点;1# 和 2# 肋中间、4# 和 5# 肋中间 0# 台和 1# 墩拱脚对应基础处各设 1 个水平位移测点。

### 2.2 静载试验工况

根据该桥的原设计荷载等级和当前结构状况,以及加载车辆的情况,参照交通部现行标准[2]和规范[1]关于汽车荷载的规定,选用了 4 辆载重为 35 t 的载重汽车进行静载试验测试。所用载重汽车的参数见表 2。

表 2 试验所用载重汽车参数表

汽车型号	横向轮距前、后	纵向轴距前、后	轴距前、后	轴重前、后
35 t	1.8 m	3.25 m	1.35 m	60 kN 2×145 kN

载重汽车采用横向中载和偏载 2 种布载方式,中载主要用于测试在最不利荷载工况下的拱肋挠度,偏载主要用于测试各拱肋的荷载横向分布状况。

工况 1:纵桥向按截面 C(1/2)正弯矩最不利位置纵向单辆车布载,横桥向为两辆车中载;

工况 2:纵桥向按截面 C(1/2)正弯矩最不利位置纵向单辆车布载,横桥向为两辆车偏载;

工况 3:纵桥向按截面 A(拱脚)负弯矩最不

利位置纵向两辆车布载,横桥向为两列车中载;

工况 4:纵桥向按截面 A(拱脚)负弯矩最不利位置纵向两辆车布载,横桥向为两列车偏载;

工况 5:纵桥向按截面 B(1/4)正弯矩最不利位置纵向两辆车布载,横桥向为两列车中载;

工况 6:纵桥向按截面 B(1/4)正弯矩最不利位置纵向两辆车布载,横桥向为两列车偏载。

### 2.3 横向分布系数及试验荷载效率系数

荷载横向分布系数采用 ANSYS 有限元通用程序建立空间有限元模型分析计算,为了完全仿真模拟,采用了多种单元类型:盖梁、立柱、拱肋、矮墩、承台及桩基采用 beam44 梁单元,顶板、横隔板、拱波及拱板采用 shell63 板单元,拱顶填料采用 mass21 集中质量单元,土对桩的作用采用 combin14 弹簧单元,其中不同部件连接的处理是在对应自由度方向上进行节点耦合。计算模型如图 4,各加载工况下荷载横向分布系数见图 5 及表 3,试验效率见表 4,静载试验效率均满足试验要求。



图 4 土山桥 ANSYS 有限元计算模型图

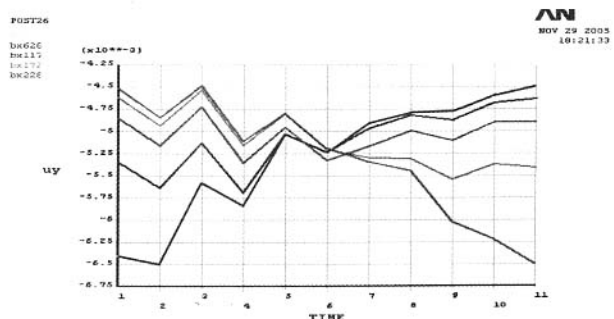


图 5 试验孔拱顶横向分布计算

表 3 试验荷载作用下各拱肋的荷载横向分布系数

加载工况		1#	2#	3#	4#	5#
L/4 (拱脚)	试验车	偏载	0.2124	0.2036	0.1974	0.1931
		中载	0.2021	0.1991	0.1986	0.1988
	标准车	偏载	0.2130	0.2040	0.1974	0.1927
		中载	0.2020	0.1992	0.1988	0.1989
L/2	试验车	偏载	0.2100	0.2037	0.1985	0.1943
		中载	0.2006	0.1994	0.1995	0.1996
	标准车	偏载	0.2105	0.2041	0.1985	0.1939
		中载	0.2005	0.1995	0.1996	0.1997

表 4 试验荷载效率系数

加载工况	试验荷载弯矩(kN·m)	标准设计荷载弯矩(kN·m)	静载试验效率
L/2 中载	939	881.6	1.065
L/2 偏载	939	881.6	1.065
拱脚中载	-1010	-853	1.184
拱脚偏载	-1010	-853	1.184
L/4 中载	667	596	1.119
L/4 偏载	667	596	1.119

2.4 结构分析与静载试验结果计算分析

2.4.1 结构分析

进一步采用有限元分析程序建立全桥平面整体计算模型,如图 6,桥梁下部桩基础考虑桩土共同作用,将土对桩的作用等效为土弹簧,土弹簧刚度分别采用“M 法”确定。主拱圈模型为单肋三跨连拱,考虑连拱效应和拱上建筑联合作用。全桥共 285 个单元,338 个节点。在全桥模型上进行各工况的加载计算分析,得到应变和挠度的理论计算结果,最后对其进行正常使用极限状态和承载能力极限状态的验算。

桩土共同作用的处理,桩周土的约束作用用土弹簧来描述,其等代土弹簧杆单元的刚度由土介质的 m 值计算(所使用的土层的 m 值以实测地质数据为依据),其定义为:

$$\sigma_x = m \cdot Z \cdot x_z \quad (1)$$

式中:  $\sigma_x$  为土体对桩的横向抗力;  $Z$  为土层的深度;  $x_z$  为  $Z$  处的横向位移(即该处的横向变位值)

由此,可求得等代土弹簧的刚度  $K_t$ :

$$K_t = \frac{P_t}{x_t} = \frac{A \sigma_x}{x_z} = \frac{(a \cdot b_p) \cdot m \cdot Z \cdot x_z}{x_z} = a \cdot b_p \cdot m \cdot Z \quad (2)$$

式中  $a$  为土层的厚度;  $b_p$  为该土层在垂直于计算模式所在平面方向上的宽度,常取为桩计算宽度,按照规范有关规定取值。

等代土弹簧杆长度为 1,弹性模量为  $E$  (任选),则面积为:

$$F = \frac{m \cdot Z \cdot a \cdot b_p}{E} \quad (3)$$



图 6 土山桥平面有限元结构模型

2.4.2 静载试验结果计算分析

结构校验系数  $\eta$  是评定结构工作状况,确定桥梁结构承载能力的一个重要指标。

$$\eta = \frac{\text{试验荷载作用下测量的弹性变位值}}{\text{试验荷载作用下的理论计算变位值}}$$

采用控制截面校验系数作为拱桥结构状况的评价指标,在各工况对应试验荷载作用下,各拱肋控制截面处挠度、应变测试及校验系数计算成果列于表 5 中(表中挠度单位为 mm)。

表 5 各工况下控制截面校验系数统计表

加载工况	挠度校验系数			应变校验系数		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
工况 1	0.576	0.409	0.493	0.822	0.240	0.531
工况 2	0.585	0.384	0.485	0.629	0.313	0.471
工况 3	0.82	0.478	0.649	0.866	0.518	0.692
工况 4	0.794	0.515	0.655	0.928	0.487	0.708
工况 5	0.911	0.595	0.753	0.820	0.443	0.632
工况 6	0.908	0.564	0.736	1.021	0.593	0.807

3 结构动力分析与动载试验结果

桥梁动载试验是根据桥梁结构承受车辆、人群等动力荷载作用下产生振动,通过分析结构的动力响应来评定承载能力和实际状况的一种检测评价方法。使用动态应变仪、动态位移计测出动应变和动挠度等实时响应,使用速度、加速度传感器测出速度、加速度等有关动力参数,再应用频谱分析得出结构的自振频率、阻尼、振型等模态参数,从而确定结构的承载能力。因此,动载试验的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。

空间结构的动力分析采用通用有限元程序 ANSYS 进行分析,其一阶振型正对称竖向弯曲(图 7)和二阶振型反对称竖向弯曲(图 8),符合连拱体系激振特征。

动载试验结果:对比不同速度下跑车的桥面加速度时程曲线、动挠度时程曲线和动应变时程曲线,将各跑车工况中测得的最大动挠度与相应的静挠度相比后,可得到桥梁的冲击系数,其结果见图 9;对所得时域曲线作谱分析,可得到试验桥的自振频率实测值,其结果见图 10。

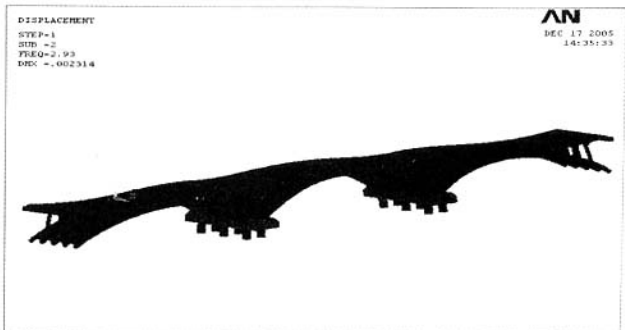


图 7 一阶振型图( $f_1=2.93\text{Hz}$ )



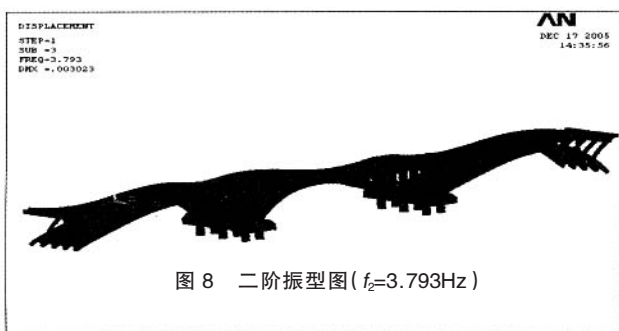
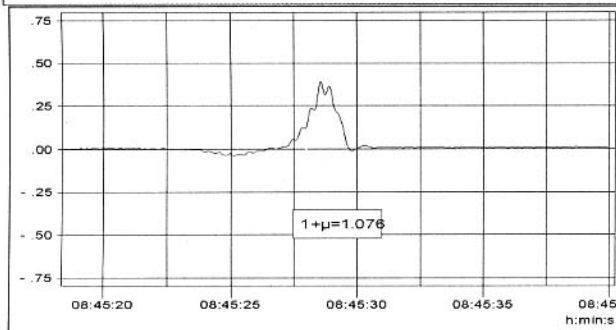
图8 二阶振型图( $f_2=3.793\text{Hz}$ )

图9 跑车时跨中挠度曲线

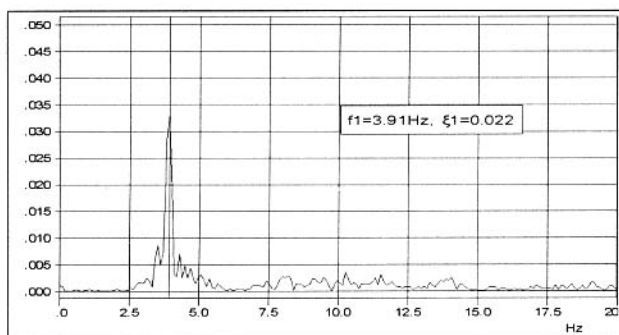


图10 幅频特性曲线

## 4 结论

(1)由桥梁静载试验结果可知,该桥各试验工

况荷载作用下控制截面的挠度及应变校验系数平均值均较标准[2]给出的范围要小,这说明该桥梁结构加固后,在设计活载作用下,结构基本处于弹性工作状态。相对于加固前该桥刚度和结构强度有了显著的提高,满足加固设计要求。

(2)由动载试验结果可知,该桥实测基频为 $3.91\text{Hz}$ , > 理论计算基频 $2.93\text{Hz}$ ,说明加固补强的效果明显;加固后实测冲击系数 $\mu=0.076$ , < 理论计算值 $\mu=0.16$ 。说明该桥动刚度满足设计要求,且结构的抗冲击性能良好。

(3)由承载能力极限状态强度及正常使用极限状态验算可知,该桥上部结构在设计标准荷载汽车-20级、挂车-100作用下,承载力符合规范要求,挠度小于容许挠度,应力及裂缝宽度未超过限值,说明该桥在设计荷载作用下,强度和刚度满足设计要求。

(4)经过试验检测和分析验算综合评定可知,徐州市邳州邳睢路土山桥经过加固后,桥跨结构的承载力能够满足设计荷载和目前道路运营的要求。

## 参考文献

- [1]公路桥涵设计通用规范 JTJ021-89[S].
- [2]交通部标准公路旧桥承载能力鉴定方法(试行)[S].北京:人民交通出版社,1989
- [3]邓苗毅等.现有双曲拱桥静力荷载试验及分析[J].河南科学, 2004
- [4]董建华等.34.2m双曲拱桥力学性能分析[J].隧道建设, 2004
- [5]范立础等.上海南浦大桥纵向地震反应分析[J].土木工程学报, 1992
- [6]徐州市邳州邳睢路土山桥荷载试验检测与维修报告[R].东南大学交通学院, 2003
- [7]公路双曲拱桥上部构造设计计算(第二版)[M].北京:人民交通出版社, 1983

## 天津新开河水厂排水工程见成效

天津市供水行业最大的环保工程——新开河水厂排水(泥)工程投入运行近两个月来,已达到日回收原水 $8000\text{m}^3$ 的生产能力。不仅使宝贵的水资源得到充分利用,而且提高了新开河的通航及行洪能力,产生了巨大的社会效益。

在自来水生产过程中,原水经沉淀、投药等处理后,一部分成为了自来水,余下泥沙含量较高的部分则被排入河道或排水管道。这不仅浪费水源,还容易淤塞河道或管道。新开河水厂排水(泥)工程采用国际上最先进的工艺技术,利用高密度沉淀池、污泥均衡池、离心脱水系统等对泥水进行分离、浓缩,从泥水中分离出来的污泥经脱水可形成无流动性、无渗出液、可散装运输的固型物,今后将利用其生产建筑用陶粒。目前该工程日回收原水 $6000\sim 8000\text{m}^3$ ,分离出泥饼80多t。而该工程的设计能力为每日净水 $100\text{万m}^3$ ,最大干泥量每日92.18t,日回收水量最高可达日产水量的3%。