

文章编号: 0451-0712(2005)09-0011-05

中图分类号: U448.221

文献标识码: B

# 双曲拱桥性能的综合评定及加固方法

施 洲, 赵人达

(西南交通大学 成都市 610031)

**摘 要:** 分析双曲拱桥性能的综合评定方法, 以大清流双曲拱桥为工程背景, 详细介绍其检测、实桥荷载试验, 以及计算分析综合评定的全过程。评定结果表明该桥拱圈上纵向裂缝明显, 耐久性差, 桥跨结构横向受力不均, 但承载能力能满足原荷载等级要求, 若要长期使用或提高荷载等级必须进行加固。并对该桥的加固提出建议。

**关键词:** 双曲拱桥; 检测; 荷载试验; 评定; 加固

双曲拱桥是我国于 20 世纪 60 年代初在江苏省无锡市首创的一种新桥型, 该桥型具有用料省, 造价低, 结构轻巧美观, 特别是其施工简便, 不需要大吨位的吊装设备, 因此在当时的施工条件下得以广泛推广。双曲拱桥的承载结构主拱圈由拱肋、拱波、拱板以及横梁等构件组成。双曲拱桥的结构特征使得该类型的桥存在因拱圈各构件之间连接薄弱, 而直接导致的桥跨结构整体性差的缺点。双曲拱桥普遍存在承载能力低, 开裂严重等问题。随着经济的日益发展, 道路上的行车密度以及车辆的轴重不断加大, 这些双曲拱桥已经不能满足当前的交通运输要求。既有的双曲拱桥, 应对其现状以及承载能力做详细的评定, 为双曲拱桥的加固改造提供技术资料, 做到物尽其用, 避免拆除重建的巨额

花费。

## 1 双曲拱桥的性能评定方法

为评定双曲拱桥的性能, 科学合理的方法是首先全面检测桥跨结构的现状, 并实施实桥的荷载试验; 同时对桥跨结构进行承载能力验算, 综合分析双曲拱桥的当前性能。

### 1.1 双曲拱桥的检测

检测的内容有: 主拱圈现有拱轴线形的检测, 以及其他构件几何线形的检测; 结构材料强度检测, 即主拱拱肋、拱波及填平层、拱板以及墩台混凝土或石料的强度检测; 裂缝检测, 检测主拱拱圈混凝土裂缝分布, 典型裂缝深度、宽度等, 严重开裂或渗水区域的钢筋锈蚀情况调查; 其他检测如墩台风化状况、桥

收稿日期: 2005-03-29

## 参考文献:

- [1] 黄玉盈. 结构振动分析基础[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1988.
- [2] 张海龙. 桥梁的结构分析·程序设计·施工监控[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2003.
- [3] 张立翔, 杨柯. 流体结构互动理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] 唐友刚. 高等结构动力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.
- [5] 张文首. 波浪荷载作用下海洋平台的阻尼减振分析[A]. 固体力学会议论文集[C]. 2002.
- [6] 张宁勇. 深水桥梁地震反应特性分析[D]. 同济大学硕士论文, 2002.
- [7] M G 哈勒姆, N J 黑弗, 等. 海洋建筑物动力学[M]. 1981.
- [8] J F 威尔逊. 海洋结构动力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- [9] Mahmoodi P. Structural Dampers. ASCE J. of Structural Division, 1969, 95(8).
- [10] 莫海红, 杨小平. 基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [11] 邱大洪. 波浪理论及其在工程中的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [12] 吴鸿庆, 任侠. 结构有限元分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.

面铺装破损情况、伸缩缝工作情况、桥上排水系统的工作状况等。

## 1.2 双曲拱桥的荷载试验

荷载试验主要针对桥跨结构的控制断面,测试其在不不利荷载下的受力及变形情况,拱桥的控制断面一般为拱脚、拱顶及  $L/4$ 、 $3L/4$  截面,大跨径桥还需考虑  $L/8$  截面。

试验荷载根据设计荷载等级加载下拱圈各控制断面的最不利弯矩进行试验荷载等效设计。各个试验弯矩荷载效率系数  $\eta$ ,一般要在 0.80~1.05 的范围内。试验荷载一般采用重载车辆来充当,并在加载过程中应采用分级加载。

荷载试验的测试内容主要有应力测试和挠度测试,即测试主拱圈各试验截面的应力,以及测试加载跨  $L/4$ 、拱顶和  $3L/4$  的挠度。应力测试采用粘贴应变片或埋设应变计等方法测量,挠度的测量可根据不同的测试精度采用百分表、机电百分表、千分表、以及全站仪等测试。

## 1.3 双曲拱桥的承载能力验算

根据双曲拱桥的现状,采用实测的材料特性以及现有拱轴线的几何线形,对桥跨结构的承载能力进行验算。计算可以采用专用有限元程序或通用有限元程序,详细计算桥跨结构各部分在恒载以及活载作用下的受力情况,并按照相应的规范进行组合,并验算桥跨结构的抗力以及稳定承载能力是否满足要求,以及安全储备情况等。

## 2 大清流双曲拱桥的检测试验及计算评定

大清流河桥位于成渝公路,主桥为  $3 \times 30$  m 双曲拱桥,设计荷载等级为汽车-13级、拖车-60。主拱由 M-200~M-300 不同等级钢筋混凝土拱肋、M-200 混凝土拱波和填平层、M-150 混凝土拱板组成。该桥建成于 1969 年,为了判定桥梁目前的实际状况,对该桥进行了详细的检测及静载试验,并采用专用有限元程序计算分析该桥桥跨结构的承载能

力。结合检测、试验及计算分析,综合分析该桥的当前性能。

## 2.1 检测结果

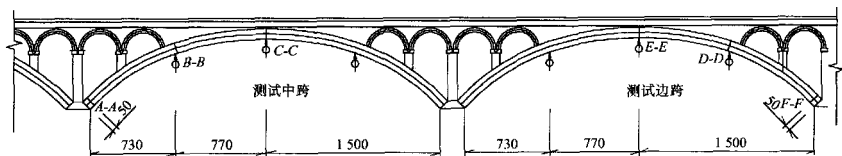
实测拱轴线与理论设计拱轴线相符较好,拱圈测点标高的实测值与理论值的差值在  $-4.13 \sim 7.73$  cm 之间,拱圈各测点的水平坐标的偏差也很小,拱轴线的测试结果表明,桥跨结构的几何线形良好,无明显变位。

在桥跨结构材料的强度检测中,石料强度采用钻芯取样测试,混凝土材料采用回弹法测试。桥跨结构的石料具有较好的抗压强度,极限强度达 35.65 MPa,因此石料强度满足规范要求。回弹法推算各跨拱肋、拱波以及桥台墩帽的混凝土强度也均能满足现行规范的设计强度要求。桥跨结构混凝土碳化现象明显,碳化深度基本在 7~10 mm 之间。混凝土检测显示拱肋未发现可见裂缝;拱圈上存在局部破损;拱肋在跨中接头处有明显空洞露筋情况;拱波上有明显裂缝,特别是中跨,中间拱波沿桥轴向从拱脚一直延伸至拱顶,裂缝基本贯通,表明结构横向连接不良。

其他方面的检测与调查:桥面上填料过厚,桥面平均高出两侧人行道约 5 cm,与设计图相比桥面上填料高出 18 cm,大大增加了恒载重量;其次拱上填料侧面部分地方有植物生长,应定期清除;桥下河畔即为一砂石中转站,常有重车通过桥面。

## 2.2 荷载试验结果及分析

根据计算结果,大清流双曲拱桥主要针对主桥中跨及边跨拱脚、 $L/4$ 、拱顶做等效加载试验。试验加载位置与加载工况的确定,主要根据设计控制荷载在拱圈控制截面上产生的最不利弯矩效应值,按 0.85~1.06 的效率系数等效换算而得。A、B 截面加载合并为一工况,其余各截面各为一个工况。静载测试布置见图 1,图中圆圈加箭头表示挠度测点。加载过程中采用分级加载,以保证结构的安全。



单位: cm

图1 桥跨测试截面布置

### 2.2.1 拱圈挠度测试结果

在试验荷载作用下,各工况下测试截面处的挠度回零情况良好,说明桥跨结构处于弹性工作状态。试验荷载下拱圈挠度实测值及其与计算值的比较见表1,表中的校验系数即为实测值与计算值的比值,也是结构承载力评定的重要指标之一。

表1 试验荷载下拱圈挠度实测值与计算值的比较

加载工况	测试位置	实测值/mm	计算值/mm	校验系数
A、B	中跨 L/4	-0.80	-1.592	0.50
	中跨 L/2	-0.70	-0.896	0.78
	中跨 3L/4	-0.20	0.486	—
C	中跨 L/4	-0.46	-0.592	0.78
	中跨 L/2	-1.10	-1.876	0.59
	中跨 3L/4	-0.65	-0.386	—
D	边跨 L/4	-0.43	-0.278	—
	边跨 L/2	-1.05	-1.454	0.72
	边跨 3L/4	-0.14	-0.219	0.64
E	边跨 L/4	0.02	0.516	—
	边跨 L/2	-0.325	-0.457	0.71
	边跨 3L/4	-0.37	-1.159	0.32
F	边跨 L/4	0.02	0.475	—
	边跨 L/2	-0.13	-0.149	0.87
	边跨 3L/4	-0.42	-0.917	0.46

挠度测试结果表明,除部分量值很小的测点外,实测挠度均小于理论计算值,挠度结构校验系数介于0.32~0.87之间,小于0.70~1.00的合理范围,校验系数稍显离散。非加载位置处的校验系数相对于加载位置附近的较大,主要是拱圈上的填料对加载车辆的轮压起了沿纵向传布的影响。

### 2.2.2 拱圈截面应力测试结果

拱圈截面实测平均应力的校验系数在0.301~0.586之间,相对较小,同时显得较为离散。拱肋下缘最大应力的校验系数在0.478~0.743之间,同样稍显离散。其原因之一是拱上填料以及加厚的桥面铺装使试验荷载沿桥轴线分布传递,从而使测试截面处的应力减小。试验荷载下测试拱圈各加载截面的实测应力最大值及其与计算值的比较见表2。C截面拱肋底部实测应力见图2。

实测应力结果表明:在加载工况下,各片拱肋的受力状况有一定的差异,说明桥跨结构在横向受力并不均匀,这主要是因为桥跨结构在横向连接薄弱,导致横向分布并不均匀,不利于结构的受力,这与双曲拱桥的结构特征是一致的。

全桥的静载试验表明:试验荷载下桥跨结构尚处于弹性受力状态;拱圈实测挠度均小于计算值,校

表2 实测拱肋下缘最大应力与计算值比较 MPa

测试截面	A	B	C	D	E	F
实测值	-1.02	0.90	1.25	0.95	0.59	-0.89
计算值	-1.75	1.21	1.75	1.48	1.24	-1.70
校验系数	0.58	0.74	0.71	0.64	0.48	0.53

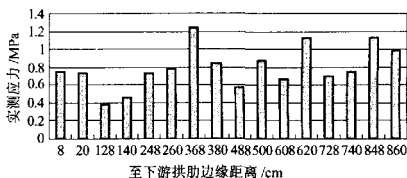


图2 中跨跨中截面拱肋底部应力横向分布

验系数略偏小,并稍显离散;各片拱肋应力在横向分布并不均匀,拱肋下缘最大应力的校验系数同样相对较小,稍显离散。说明桥跨结构具有一定的承载能力,但在横向受力分布不均匀。

### 2.2.3 桥跨结构自振特性测试结果

桥跨结构的自振特性试验表明:边跨主拱结构竖向一阶频率 $F_1=3.28$  Hz,竖向二阶 $F_2=5.76$  Hz,竖向实测阻尼比分别为: $D_1=0.019$ , $D_2=0.008$ 。中跨主拱结构竖向一阶频率 $F_1=3.77$  Hz,竖向二阶 $F_2=5.66$  Hz, $D_1=0.017$ , $D_2=0.007$ 。从实测频率看,桥跨主拱结构具有较好的竖向刚度。测试跨的实测阻尼比均较小。

### 2.3 计算分析结果

大清流双曲拱桥的验算采用专用平面程序计算,建立3跨30 m跨的整体计算模型,即考虑连拱的效应,计算模型包括腹拱,即考虑腹拱的影响。为检验桥梁在目前的承载能力,判断是否可以通过加固等措施来提高桥跨结构的承载能力,对大清流河双曲拱桥的极限承载能力按《公路桥石及混凝土桥涵设计规范》(JTJ 022-85)进行了检算。分别验算了结构的强度抗力、稳定抗力以及偏心距 $e_0$ 是否满足原来设计荷载等级(汽车-13级、拖车-60)以及拟采用的荷载(汽车-20级、挂车-100)等级要求。验算结果见表3、表4。该桥拱圈宽度为868 cm,净跨径为30 m,宽跨比为1/3.456,远大于1/20,因此不必做横向稳定性验算。

原荷载等级的验算结果表明:在各种最不利工况组合下,拱圈强度均能满足现行规范要求。拱圈的面内稳定强度也均能满足现行规范要求。但安全系

表 3 原设计荷载等级下拱圈承载力验算结果

截面位置	轴力 $N_j$ /kN	弯矩/(kN·m)	偏心距 $e_0$ /m	截面抗力/kN	强度系数	稳定抗力/kN	稳定系数	
第 1 跨	0	11 400.0	-1 270.0	0.112	20 413.8	1.79	18 981.6	1.67
	L/4	8 860.0	1 220.0	0.138	18 707.6	2.11	17 257.4	1.95
	L/2	5 120.0	1 410.0	0.275	10 739.6	2.10	9 272.2	1.81
	3L/4	9 040.0	1 070.0	0.118	20 005.4	2.21	18 568.6	2.05
	L	11 200.0	1 150.0	0.102	20 999.8	1.87	19 574.4	1.75
第 2 跨	0	8 940.0	-2 220.0	0.248	12 061.4	1.35	10 584.2	1.18
	L/4	8 940.0	1 290.0	0.144	18 313.8	2.05	16 859.8	1.89
	L/2	5 080.0	1 490.0	0.293	9 978.4	1.96	8 520.6	1.68
	3L/4	9 040.0	1 120.0	0.124	19 640.8	2.17	18 200	2.01
	L	6 780.0	-2 080.0	0.306	9 439.8	1.39	7 990.8	1.18
第 3 跨	0	8 860.0	-1 950.0	0.22	13 149.6	1.48	11 650.8	1.31
	L/4	8 860.0	1 220.0	0.138	18 237.4	2.06	16 766.2	1.89
	L/2	5 100.0	1 330.0	0.261	11 045	2.17	9 554.8	1.87
	3L/4	8 920.0	1 060.0	0.119	19 480	2.18	18 021.6	2.02
	L	6 700.0	-1 880.0	0.281	10 144.8	1.51	8 664.4	1.29

表 4 拟采用设计荷载等级下拱圈承载力验算结果

截面位置	轴力 $N_j$ /kN	弯矩/(kN·m)	偏心距 $e_0$ /m	截面抗力/kN	强度系数	稳定抗力	稳定系数	
第1跨	0	9 100.0	-2 660.0	0.293	9 953.8	1.09	8 496.4	0.93
	L/4	8 940.0	1 820.0	0.204	14 488.8	1.62	13 010.2	1.46
	L/2	5 360.0	1 980.0	0.37	7 190.6	1.34	5 807	1.08
	3L/4	9 140.0	1 650.0	0.18	15 943.8	1.74	14 471.6	1.58
	L	6 920.0	-2 360.0	0.34	8 155.8	1.18	6 737.8	0.97
第2跨	0	9 100.0	-2 660.0	0.292	10 016	1.10	8 557.6	0.94
	L/4	9 000.0	1 780.0	0.197	14 888	1.65	13 411	1.49
	L/2	5 300.0	2 120.0	0.398	6 404	1.21	5 058.4	0.95
	3L/4	9 100.0	1 610.0	0.177	16 150.6	1.77	14 679.6	1.61
	L	6 920.0	-2 520.0	0.363	7 419.8	1.07	6 027	0.87
第3跨	0	9 020.0	-2 420.0	0.269	10 688	1.18	9 201	1.02
	L/4	8 940.0	1 800.0	0.202	14 216.4	1.59	12 718.8	1.42
	L/2	5 360.0	1 890.0	0.353	7 446.6	1.39	6 031.6	1.13
	3L/4	9 020.0	1 660.0	0.184	15 283.8	1.69	13 790.2	1.53
	L	6 860.0	-2 420.0	0.353	7 445.4	1.09	6 030.4	0.88

数相对较小。偏心距均小于容许偏心距,因而符合规范要求。

拟使用荷载等级(汽车—20级、挂车—100)的验算结果表明:在最不利组合下,中跨拱顶,以及所有拱脚截面处的稳定抗力要小于轴力  $N_j$ ,因此不能满足现行规范汽车—20级的荷载等级要求。但偏心距均小于容许偏心距。

万方数据

## 2.4 大清流双曲拱桥综合评定结论

大清流双曲拱桥现场检测与荷载试验,以及验算分析后有如下结论。

双曲拱拱圈有裂缝出现,特别是拱波上存在整跨范围内的沿桥轴向裂缝,表明拱圈横向连接较为薄弱;拱圈上存在局部破损,拱肋在跨中连接处有空洞露筋现象;桥梁的耐久性明显欠缺。荷载试验表

明,桥跨结构能满足原设计荷载等级汽车—13级、拖车—60的承载能力要求,结构校验系数相对较小,但稍显离散,说明桥跨结构具有一定的承载潜力,但由于横向连接薄弱导致横向受力不均,不利于结构受力。结构验算表明,桥跨结构主拱圈能够满足现行规范《公路桥涵及混凝土桥涵设计规范》(JTJ 022—85)汽车—13级、拖车—60的荷载要求,但不能满足汽车—20级、挂车—100荷载要求。

综合分析认为,该桥的结构材料受力性能和整体结构的纵向受力性能良好,但拱圈横向连接较为薄弱,耐久性差。整体结构能满足汽车—13级、拖车—60的承载能力要求,但不能满足汽车—20级、挂车—100的承载能力要求。若欲长期使用或提高通行荷载等级,必须对该桥进行加固处治。

### 3 双曲拱桥的加固

#### 3.1 双曲拱桥的加固方法

双曲拱桥普遍存在开裂等问题,因此在加固时均须对既有构件的裂缝实施闭合处理,之后再采用相应的措施来加固。常用的加固方法有以下几种:加大截面法,即采用外包混凝土、粘贴钢板等方法增加拱肋截面面积以提高构件的承载能力。减载法,拆除原拱上填料等,换填轻质填料或改为空腹式结构减轻自重,以提高活载承载能力。增加承力构件法,即在原拱圈两侧增设板式或箱形拱肋,并和原拱圈协同受力。改双曲拱为板拱法,即在拱波之下、拱肋之

间浇筑钢筋混凝土,改双曲拱为板拱,能够有效提高结构的承载能力,并改善结构的整体性,该方法是在卸除桥面及拱上填料处理原拱圈的裂缝之后,在原拱圈上植抗剪钢筋,并以原拱圈为支架立模浇筑钢筋混凝土。

#### 3.2 大清流双曲拱桥的加固建议

大清流双曲拱桥有长期使用并需提高荷载等级的使用要求,因而可对其实施加固。加固措施为:先处理拱圈裂缝,然后改双曲拱为板拱,即在拱肋之间、拱波之下浇筑钢筋混凝土,形成板拱,这样既增大拱圈截面,又改善横向连接状况;并在拱脚向跨中一段区域的拱背顶面加筑一层钢筋混凝土,以帮助拱圈受力。在加固拱圈的同时,应去除桥面过厚的填料与桥面铺装层,实现恒载减载。此外,桥面也可采用悬挑板来拓宽桥面,实现桥梁的加宽改造。

#### 参考文献:

- [1] 西南交通大学结构工程试验中心. 大清流 $3\times 30$  m双曲拱桥检测评定报告[R]. 2004.
- [2] JT022—85,公路桥涵及混凝土桥涵设计规范[S].
- [3] 葛素梅,陈淮,董建华. 双曲拱桥承载能力评估[J]. 河南科学,2004,(2).
- [4] 许汉铮,黄平明,韩万水. 双曲拱桥病害分析与加固方法研究[J]. 公路,2004,(8).
- [5] 杨文渊,徐典. 桥梁维修与加固[M]. 北京:人民交通出版社,1989.

## A Study on Performance Evaluation And Strengthening Method of Two-Way Curved Arch Bridges

SHI Zhou, ZHAO Ren-da

(Southwest Jiaotong University, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** Analyzing the evaluation method of two-way curved arch bridges, and on the basis of Da Qingliu Two-Way Arch Bridge the whole procedures of the inspection on site, loading test on real bridge, and calculation analyses are introduced. The evaluation results of the arch bridge indicate that serious axial cracks are evident, the durability is poor, and transverse stresses are nonuniform distribution under test load, but the bearing capacity of the bridge can fit the designing live-load level. For long-term service purpose or raising live-load level, the bridge must be strengthened. Last, the strengthening method of the bridge is suggested.

**Key words:** two-way curved arch bridge; detection; loading test; evaluation; strengthening