

双曲拱桥加固设计与施工应用研究

罗刚

(湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 针对某服役公路双曲拱桥存在的主拱圈裂缝、桥面变形及破碎、腹拱和立墙渗水及裂缝等病害,提出了将原横系梁加大尺寸、拱顶 3 根横系梁变更设计为横隔板、采用模筑砼法对拱肋进行补强的加固方案,介绍了加固施工方法,并对加固前后的桥梁承载能力进行了验算。

关键词: 桥梁;双曲拱桥;加固方案;主拱圈验算

中图分类号:U445.7

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2018)02-0152-06

1 工程概况

某在役公路桥梁为双曲拱桥,矢跨比 1/6,横向为六拱肋五拱波,桥跨组成为 5×45 m,桥面净宽 7 m,两侧护栏各宽 0.25 m。原设计荷载为汽-13、拖-60 级。下部结构为重力式实体墩,桥台采用加后座式 U 形结构。

主要质量问题如下:1) 主拱圈存在不规则裂缝,有的缝宽达 0.4 mm,其中纵向裂缝偏多;拱肋、拱波相互结合部位砼表面剥落,存在渗水及大面积细小裂缝,个别裂缝十分明显;各孔拱顶左右 10 m 范围内有横向裂缝,第 1、5 孔较集中;横系梁部位也存在为数较少的裂缝。2) 桥面变形严重,面层材料破碎面积大。桥面变形严重的部位集中在 3、4、5 孔上,纵向出现波浪现象,峰顶和波底存在较小错位情况;墩顶伸缩缝附近裂缝发育,破碎露筋;面层材料破碎较严重。3) 腹拱及立墙存在渗水病害。因腹拱及立墙是浆砌片石结构,防水性能差,渗水现象十分明显,甚至在长年侵溶下形成了“石笋”。

病害成因主要有:1) 设计时未曾考虑交通发展如此迅速,荷载设计值偏低;2) 超载车辆多次通过,车辆荷载远远超出桥梁设计荷载,导致主拱拱顶部产生横向裂缝,使桥梁的受力体系不再正常工作;3) 桥面变形严重,显示受压系统破坏,桥梁横向刚度存在严重问题,导致拱肋之间不能如正常状态下共同承受外部荷载的作用,造成桥梁整体性变差。

2 桥梁加固方案设计

2.1 加固设计依据及标准

加固方案设计依据为该桥 1969 年竣工图纸。加固设计应达到的荷载标准值为设计荷载(汽一超

20)和验算荷载(挂-120)。跨径与原设计一致,桥跨组成为 5×45 m。桥梁宽度也与原设计一致,横断面为 0.5 m 安全带+7 m 机动车道+0.5 m 安全带=8.0 m。

2.2 加固方案

2.2.1 主拱圈加固设计

(1) 原横系梁结构几何尺寸偏小,为全面提升全拱宽共同承担荷载的能力,加强桥梁横向整体性能,将横系梁尺寸由原来的 $1.16 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} \times 0.18 \text{ m}$ 增大至 $1.16 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} \times 0.50 \text{ m}$;拱顶 3 根横系梁变更设计为横隔板,尺寸为 $1.16 \text{ m} \times 0.30 \text{ m} \times 0.84 \text{ m}$ 。

(2) 针对主拱圈部位裂缝和受力大的问题,采取模筑砼方案,即对拱肋及其附近铺设补强钢筋,利用移动式整体模架浇筑 C40 钢筋砼衬砌到拱圈界面,厚度控制在 150 mm,以提高其刚度和承载力。需说明的是,在施作钢筋网时,其锚固钢筋的长度需超过 80 mm,且焊接长度宜超过 120 mm,模筑砼由拱脚开始到拱顶。完成加固后,其外观的标准是表面突起差值控制在 10 mm 以内(见图 1、图 2)。

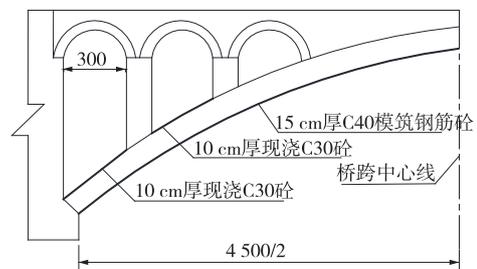


图 1 主拱圈 1/2 纵断面加固设计(单位:cm)

2.2.2 桥面系改建

要抑制主拱圈的进一步破坏,需将其上部结构

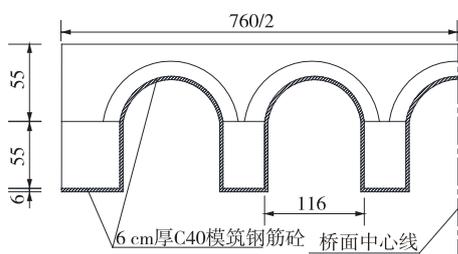


图2 主拱圈拱上建筑加固设计(单位:cm)

的重量降低,减少其受力,并加大该部位的整体刚度。为此,拆除桥面与拱波之间的所有砂砾,灌入C25 砼;桥面铺设 70 mm 厚 C30 砼保护层,并用 CAL 防水。因陶粒砼比重为 18.5 kN/m³,桥面处理选用 C30 陶粒砼,大幅降低上部结构自重。为改善主拱整体受力能力,在拱波间也浇筑陶粒砼。

2.2.3 其他辅助措施

对于立墙腹拱处宽度 0.5 mm 以上的裂缝,采用压水泥砂浆的方式进行修补。对墩台等部位的轻微裂缝,采用环氧树脂砂浆抹面进行修补。

3 桥梁加固前后结构验算

3.1 受力分析依据

(1) 加固后桥梁各部位几何尺寸与原设计基本一致,受力分析时按实测值进行。

(2) 分析计算活载内力时,拱上结构的共同作用因素不能忽略。

(3) 拱脚负弯矩计入横向分布作用,拱脚正弯矩不计入横向分布作用。

(4) 拱肋 L/4 截面的活载正弯矩计入横向分布作用,拱肋 L/4 截面的活载负弯矩不计入横向分布作用。

(5) 拱顶截面的活载正弯矩计入横向分布作用。

(6) 主拱圈结构截面拉应力超限时,按材料塑性状态进行分析,收缩徐变按 15 °C、降温按 25 °C 进行分析。

3.2 加固前主拱圈结构受力验算

3.2.1 主拱圈结构恒载计算

拱顶横断面见图 3,恒载计算结果见表 1,主拱圈结构的几何特性见表 2。

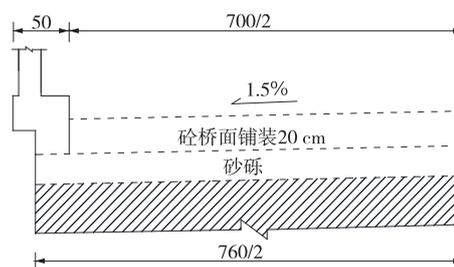


图3 拱顶横断面图(单位:cm)

表 1 桥面恒载计算结果

kN/m

项目	计算公式	计算结果	备注
栏杆重量	按 0.70 取值	0.70	半幅重
安全带重量	$(0.40 \times 0.30 + 0.20 \times 0.30) \times 24$	4.30	半幅重
桥面重量	$(0.20 + 0.25) / 2 \times 3.50 \times 24$	19.00	半幅重
砂砾重量	$(3.80 - 0.75) \times 0.22 \times 17$	11.40	半幅重
侧墙重量	$0.75 \times 0.22 \times 25$	3.80	半幅重
拱宽方向承重	$Q = (0.70 + 4.30 + 19.0 + 11.40 + 3.80) \times 2$	78.40	全拱宽承重
每单元承担恒重	$q = Q / 5$	15.68	一单元恒重,单元宽 1.46 m

表 2 主拱圈结构的几何特性

截面	截面面积/cm ²	截面惯性矩/cm ⁴
拱肋	1 480.0	384 877
拱波	1 446.0	227 300
拱板	4 156.0	62 983
截面换算值	7 665.9	7 164 173

主拱圈材料参数:拱肋旧 C25 砼的弹性模量为 29 000 MPa,拱波和拱板旧 C15 砼的弹性模量为 24 000 MPa,两弹性模量之比 $n = 29 / 24 = 1.21$ 。

主拱圈结构立墙脚总重:第一立墙脚重 $P_1 =$

225.90 kN,第二立墙脚重 $P_2 = 159.10$ kN,第三立墙脚重 $P_3 = 52.90$ kN;实腹段拱上构造 6 块,每块重分别为 $P_4 = 74.00$ kN、 $P_5 = 63.90$ kN、 $P_6 = 40.20$ kN、 $P_7 = 22.40$ kN、 $P_8 = 10.20$ kN、 $P_9 = 3.00$ kN;因横系梁密,按 0.33 kN/m 计算并考虑桥面均布荷载,得 $q = 15.68 + 0.33 = 16.01$ kN/m。

恒载内力分析采用刚度法,计算结果见表 3。

3.2.2 主拱圈结构活载内力计算

该桥设计车道数为 2 条,计算单元为 5 个,计算活载时横向增大系数 $k_{挂}$ 、 $k_{汽}$ 分别取 1.40 与 1.20,

表3 恒载内力分析计算结果

位置	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
拱脚	2 399	200
L/4 截面	2 000	69
拱顶	1 896	32

计算得横向分布系数 $\eta_{汽} = (2/5) \times 1.20 = 0.480$ 、 $\eta_{挂}$

$= (1/5) \times 1.40 = 0.280$ 。

拱桥结构计算时需对拱脚正弯矩及 L/4 截面负弯矩分别进行验算,验算时横向分布系数采用 $\eta_{汽} = 2/5 = 0.40$ 、 $\eta_{挂} = 1/5 = 0.20$ 。

2.2.3 主拱圈结构降温及收缩徐变内力计算

收缩徐变按 15℃、降温按 25℃ 进行分析,验算结果见表 4。

表4 降温及收缩徐变内力验算结果

编号	荷载类型	拱顶内力		L/4 截面内力		拱脚内力	
		轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
1	恒载	1 917	44	2 008	79	2416	203
2	汽-20 最大	207	307	130	310	168	352
3				187	-177	141	-354
4				275	479	207	498
5	挂-100 最大	384	456	154	-251	275	-646
6	汽-超 20 最大	336	325	224	340	199	479
7				224	-237	279	-469
8				234	573	247	595
9	挂-120 最大	458	545	330	-303	328	-776
10	降温及收缩徐变	-38	101	-36	44	-28	-211
汽-20、 挂-100 组合	1+2	2 113	340	2 129	380	2 578	549
	1+3			2 186	-107	2 551	-157
	(1+4)/1.25	1 834	393	1 757	441	2 095	556
	(1+5)/1.25			1 823	-143	2 149	-358
汽-超 20、挂 -120 组合	1+6	2 242	358	2 153	428	2 609	676
	1+7			2 223	-167	2 689	-272
	(1+6+10)/1.25	1 763	367	1 693	377	2 064	371
	(1+7+10)/1.25			1 749	-99	2 128	-388
	(1+8)/1.25			1 787	516	2 127	635
(1+9)/1.25	1 893	465	1 865	-183	21 92	-462	

立面墙体与腹拱用 50 号砂浆砌块石构成,其弹性模量按此取值。根据《公路双曲拱桥上部结构与计算》确定弯矩折减系数 β 的取值,拱顶、L/4 截面、拱脚分别取 0.897、0.769、0.722。依照工程设

计的计算原则,各活荷载需与相对应的系数 β 相乘得到内力结果。依照上述方法计算计入拱上构造作用的横向一个单元,结果见表 5。依照荷载组合对拱圈应力进行计算,结果见表 6。

表5 主拱圈内力计算结果

编号	荷载类型	拱顶内力		L/4 截面内力		拱脚内力	
		轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
1	恒载	1 917	44	2 008	79	2 416	203
2	汽-20 最大	207	277	130	240	168	256
3				187	-134	141	-254
4				275	370	207	359
5	挂-100 最大	384	410	154	-191	275	-465
6	汽-超 20 最大	336	293	224	277	199	348
7				224	-180	279	-337

续表 5

编号	荷载类型	拱顶内力		L/4 截面内力		拱脚内力	
		轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
8	挂-120 最大	458	500	234	443	247	428
9				330	-231	328	-559
10	降温及收缩徐变	-38	101	-36	44	-28	-211
汽-20、 挂-100 组合	1+2	2 113	310	2 129	320	2 578	453
	1+3			2 186	-64	2 551	-57
	(1+4)/1.25	1 834	329	1 757	283	2 095	192
	(1+5)/1.25			1 823	-17	2 149	-216
汽-超	1+6	2 242	326	2 153	347	2 609	545
	1+7			2 223	-110	2 689	-140
20、挂 -120	(1+6+10)/1.25	1 763	341	1 693	312	2 064	266
	(1+7+10)/1.25			1 749	-53	2 128	-282
组合	(1+8)/1.25	1 893	421	1 787	412	2 127	504
	(1+9)/1.25			1 865	-127	2 192	-288

表 6 拱圈截面应力计算结果

MPa

荷载类型		拱顶应力		L/4 截面应力		拱脚应力	
		$\sigma_{上}$	$\sigma_{下}$	$\sigma_{上}$	$\sigma_{下}$	$\sigma_{上}$	$\sigma_{下}$
恒载+汽-20	正弯矩			4.37	-0.26	5.68	-1.19
	负弯矩	4.36	-0.23	2.50	3.62	3.00	3.97
恒载+汽-20+降温	正弯矩			3.64	-0.56	3.63	0.65
	负弯矩	3.87	-1.01	2.15	2.55	1.49	4.90
恒载+挂-100	正弯矩			4.12	-1.18	5.02	-1.75
	负弯矩	4.24	-1.07	1.87	3.47	1.68	5.04
恒载+汽-超 20	正弯矩			4.59	-6.81	6.19	-2.08
	负弯矩	4.60	-0.23	2.31	4.14	2.75	4.99
恒载+汽-超 20+降温	正弯矩			3.82	-0.83	4.05	-0.06
	负弯矩	4.07	-1.00	2.00	2.95	1.29	5.71
恒载+挂-120	正弯矩			4.46	-1.73	5.36	-2.28
	负弯矩	4.65	-1.65	1.76	3.85	1.34	5.86

以表 6 所示应力为基础,对砼以塑性状态为准进行计算,已知其面形心至外边缘距 $y = 0.3801$ m,内配有钢筋 $2\phi 18$,则其含筋率 $\rho = 5.09/7801 = 0.064\%$ 。按照规范要求,在该状态下拱圈截面偏心距可增加 $0.1y$,故主要组合时 $[e] = 0.7y = 0.27$ m,附加组合时 $[e_0] = 0.8y = 0.29$ m。不同荷载模式下截面应力计算结果见表 7。

该桥可通行汽-20 和挂-100 车辆。从表 7 可看出:按照截面塑性状态计算,其在拱脚部位可承受超限应力,但这仅是理论数值,若按照无损状态进行

计算,与实际并不符合。

3.3 加固后主拱圈结构受力验算

3.3.1 主拱圈结构各截面应力计算

主拱下缘部位采用 C40 模筑砼加固,厚度为 150 mm。在拱脚两侧,腹拱、立墙之间现浇 C30 砼,厚度为 100 mm。对于所增加的恒载,需按照加固后的尺寸进行计算,并将其计算在结构内力中。对于活荷载内力及其他因素产生的附加内力,按照加固前的计算即可,计算时将拱上结构所产生的共同作用效果考虑在内。加固后应力计算结果见表 8。

表7 不同荷载模式下载面应力(塑性状态)

编号	荷载计算模式	计算截面位置	拉应力/MPa	偏心距 e/m	截面应力/($kN \cdot m^{-2}$)	允许应力/($kN \cdot m^{-2}$)
1		拱脚	1.99	0.190	5 134	5 500
2	汽-20、挂-100	拱脚	1.75	0.190	4 793	5 500
3		L/4 截面	1.07	0.190	3 645	5 500
4		拱顶	1.07	0.186	3 769	5 500
5		拱顶	1.65	0.190	4 513	5 500
6	汽超 20、挂-120	L/4 截面	1.73	0.190	4 445	5 500
7		拱脚	2.28	0.190	5 891	5 500

表8 加固后主拱圈截面应力计算结果

MPa

荷载类型		拱顶应力		L/4 截面应力		拱脚应力	
		$\sigma_{上}$	$\sigma_{下}$	$\sigma_{上}$	$\sigma_{下}$	$\sigma_{上}$	$\sigma_{下}$
恒载+汽-20	正弯矩	3.89	-0.14	3.49	0.490	3.130	2.86
	负弯矩			1.20	3.090	0.948	6.31
恒载+汽-20+降温	正弯矩	0.44	-0.65	2.91	0.075	1.790	3.45
	负弯矩			1.72	2.240	0.029	6.20
恒载+挂-100	正弯矩	3.72	-0.67	3.29	-0.240	2.890	1.77
	负弯矩			1.50	2.870	0.220	6.31
恒载+汽-超 20	正弯矩	4.09	-0.12	3.66	0.260	3.540	2.27
	负弯矩			1.85	3.440	0.800	7.01
恒载+汽-超 20+降温	正弯矩	3.58	-0.64	3.05	-0.030	2.110	1.41
	负弯矩			1.60	2.510	-1.340	6.76
恒载+挂-120	正弯矩	4.04	-1.05	3.56	-0.610	3.160	1.41
	负弯矩			1.41	3.130	-0.040	6.87

3.3.2 主拱圈截面拉应力超限分析

当砼进入塑性状态,且拉应力超出范围时,计算得其在拱顶、L/4 截面的压应力都小于容许应力小,拱脚截面应力计算结果见表 9。由于拱圈上缘无拉应力,下缘的压应力为 $5.80 \text{ MPa} > [\sigma] = 5.5 \text{ MPa}$,考虑到拱肋部分钢筋的影响,拱脚截面能通过汽-超 20、挂-120 活载。

4 模筑砼加固施工方法

该桥采用移动式整体模架、配以砼泵车浇筑模筑砼,施工流程为施工准备→拱架与模板施工→砼拌制与运输→模筑砼浇筑→砼养护与拆模。施工要点如下:

(1) 施工准备。用钢刷、铁凿和铁锤清理需加固的面;用铁锤和铁凿凿毛补强结构表面,凿毛深度为 0.5 cm ,密度为 $10.13 \text{ 点}/(10 \text{ cm}^2)$ 。

(2) 拱架与模板施工。1) 模筑衬砌所用拱架、

表9 拱脚截面应力计算结果

MPa

荷载类型		$\sigma_{上}$	$\sigma_{下}$
恒载+汽-20	正弯矩	2.65	2.44
	负弯矩	0.98	5.27
恒载+汽-20+降温	正弯矩	1.56	2.90
	负弯矩	1.65	5.16
恒载+挂-100	正弯矩	2.43	1.53
	负弯矩	0.34	5.26
恒载+汽-超 20	正弯矩	2.98	1.95
	负弯矩	0.83	5.85
恒载+汽-超 20+降温	正弯矩	1.82	2.51
	负弯矩	0.10	5.62
恒载+挂-120	正弯矩	2.56	1.23
	负弯矩	0.13	5.71

模板宜采用金属类模板,要求式样简单、装拆方便、

接缝严密、有足够的刚度和稳定性。其中拱架采用钢拱架,用钢轨加工制成,钢拱架的间距根据地质条件等确定。2) 架设前按主拱中线、标高和允许误差预留沉落量,并对拱圈断面尺寸进行复核。3) 架设拱架、模板应位置准确,连接牢固。拱架使用前先在样台上试拼装;在拱架外缘沿径向用支撑与拱壁顶紧,以防浇筑过程中拱架变形。模板接头处的板缝应光滑整齐,挡头处的模板根据砼断面情况定制,并确保挡头板与拱壁之间没有缝隙、紧密贴合。

(3) 砼拌制与运输。1) 模筑砼的生产配合比应通过试验验证,确保配合比满足设计强度要求。2) 采用机械拌和砼,严格按照重量配合比供料,特别是加水量,以控制水灰比和坍落度等。主拱圈等不便施工之处砼坍落度控制在 2~5 cm,边墙处砼坍落度为 1~4 cm。砼拌和后尽快浇筑。3) 砼运送时间一般不得超过 45 min,防止产生离析和初凝现象,同时确保运输中坍落度损失不超过 30%。

(4) 模筑砼浇筑。1) 拱圈浇筑从两侧拱脚向拱顶对称进行,间歇及封顶的层面呈辐射状。2) 主拱浇筑时,为确保主拱与原桥梁有效结合,砼应充满所有粘合面的角落,并振捣密实。3) 主拱封顶施工随拱圈浇筑及时进行,封顶位置留 7~10 cm,在完成边墙浇灌 24 h 后进行浇灌。

(5) 砼养护与拆模。1) 砼浇筑成型 10~12 h 后开始洒水养护,确保砼有良好的凝结硬化条件。养护时间根据施工地段的气温、空气相对湿度和水泥品种确定,一般为 7~14 d。2) 拱架和模板的拆除条件为砼强度达到 5.0 MPa 或拆模时砼表面及棱角不致损坏,并能承受自重。

5 结语

该文针对某在役双曲拱桥存在的主要病害,采

用模筑砼加固方法,基于目前的规范要求,将原来桥梁可承受的荷载进行提升,由原来的汽-13、拖-60 提升到现在的汽-超 20、挂-120;并对桥梁拉应力超限问题进行处理,原结构能承受的拉应力为 2.34 MPa,加固后拱脚部位最大拉应力为 6.16 MPa,超过容许应力 1.27 MPa。通过实际检测与理论计算,加固后拱脚部分拉应力消除,其他截面压应力比容许值小,且通行汽-超 20 和挂-120 时无异常现象。此外,在外观上对裂缝进行修补处理,基本消除了裂缝,且加固后桥梁运行期间无新裂缝出现。

参考文献:

[1] 贺志勇,陈辉杰,张树春.某 T 形刚构桥体外预应力加固效果评价[J].中外公路,2015,35(4).
 [2] 赵晓春.体外预应力结构计算的接触分析方法[J].公路工程,2014,39(2).
 [3] 邢兵,强士中,唐堂.关于桥梁承载能力评定若干问题的思考[J].中外公路,2015,35(6).
 [4] 黄尚.桥梁桩基加固设计方案探讨[J].公路与汽运,2017(4).
 [5] 欧阳潮.预应力连续箱梁桥病害分析及加固方法研究[J].公路与汽运,2016(4).
 [6] 杨国立,李瑞鹤.某旧拱桥病害分析及加固设计与施工[J].混凝土与水泥制品,2013(9).
 [7] 陈锦辉.某巧工拱桥加固设计与施工方案探析[J].福建交通科技,2012(1).
 [8] 吴跃梓.钢筋混凝土外包主拱圈加固石拱桥技术探讨[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(8).
 [9] 高勇,魏景和,阳浩,等.增大截面法在既有双曲拱桥加固中的应用[J].公路与汽运,2017(2).
 [10] 袁友忠.钢筋砼双曲拱桥病害分析及粘贴钢板加固[J].公路与汽运,2016(6).

收稿日期:2017-08-30

(上接第 151 页)

Engineers,2010.
 [4] 张敏,张雷顺.南水北调某公路斜桥抗震设计研究[J].四川建筑科学研究,2011,37(5).
 [5] 刘陆宇,焦驰宇,袁旭斌,等.某斜交 V 型墩刚构桥抗震性能研究[J].山西建筑,2013,39(34).
 [6] 夏桂云,俞茂宏,李传习,等.斜桥动力特性[J].交通运输工程学报,2009,9(4).
 [7] Meng J Y,Lui E M.Seismic analysis and assessment of a skew highway bridge [J]. Engineering Structures,

2000,22(11).
 [8] Abdel-Mohti A,Pekcan G.Seismic response of skewed RC box-girder bridges[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2008,7(4).
 [9] Peyman Kaviani,Farzin Zareian,Ertugrul Taciroglu.Seismic behavior of reinforced concrete bridges with skew-angled seat-type abutments [J]. Engineering Structures, 2012,45(15).

收稿日期:2017-08-21