

基于外观和试验检测的石拱桥技术状况及承载能力评定

冯 冲^{1,2}, 王文雅³, 刘昌崑¹, 赵学文¹

(1. 青岛市交通规划设计院有限公司, 山东 青岛 266001; 2. 青岛城阳交通规划设计院有限公司, 山东 青岛 266001; 3. 青岛市市政工程设计研究院有限责任公司, 山东 青岛 266001)

摘要: 为研究在役公路石砌圬工拱桥运营安全状况及结构承载能力, 对一座修建 30 多年的石拱桥进行尺寸测量、病害外观检测, 采用分层综合评定方法对石拱桥技术状况评定, 根据现场取材进行强度试验检测推定材料强度参数并建立 Midas Civil 有限元模型, 对石拱桥在汽车 - 20 级、挂车 - 100 (JTJ 021 - 89) 及公路 - I 级 (JTG D60 - 2015) 两种新旧车辆荷载标准下的承载能力进行分析。研究表明: 1) 本工程石拱桥按照分层综合评定方法进行技术状况评定结果为 2 类, 结构有轻微缺损, 对使用功能无影响; 2) 根据有限元分析结果, 主拱圈拱顶、1/4 跨、拱脚截面的承载能力均满足荷载等级为汽车 - 20 级、挂车 - 100 及公路 - I 级的要求。本文研究方法及成果可为类似工程提供一定的借鉴。

关键词: 石拱桥; 外观检查; 试验检测; 分层综合评定; 承载能力

中图分类号: U446.3

文献标识码: A

文章编号: 1673 - 8993 (2024) 10 - 0076 - 08

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.10.137

Technical condition and bearing capacity evaluation of stone arch bridges based on appearance and experimental testing

FENG Chong^{1,2}, WANG Wenya³, LIU Changwei¹, ZHAO Xuewen¹(1. Qingdao Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Qingdao 266001, Shandong, China;
2. Qingdao Chengyang Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Qingdao 266001, Shandong, China;
3. Qingdao Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266001, Shandong, China)

Abstract: In order to study the operational safety status and structural bearing capacity of a stone masonry arch bridge in service on highways, a stone arch bridge that has been built for more than 30 years was measured in size and inspected for defects and appearance. The technical condition of the stone arch bridge was evaluated using a layered comprehensive evaluation method. The strength parameters of the material were estimated by strength testing based on on-site materials, and a Midas Civil finite element model was established to analyze the bearing capacity of the stone arch bridge under two new and old vehicle load standards: Auto - 20, Trailer - 100 (JTJ 021 - 89), and Highway - I (JTG D60 - 2015). The results showed that: 1) The technical condition of the stone arch bridge in this project was evaluated as Class 2 according to the layered comprehensive evaluation method, with slight structural defects and no impact on its functional use; 2) According to the finite element analysis results, the bearing capacity of the arch crown, 1/4 span, and arch foot section of the main arch ring all meet the requirements of load levels of Car - 20, Trailer - 100, and Highway - I. The research methods and results of this article can provide some reference for similar projects.

Key words: stone arch bridge; visual inspection; experimental testing; layered comprehensive evaluation; carrying capacity

收稿日期: 2024 - 04 - 18

作者简介: 冯 冲 (1991—), 男, 工程师, 从事桥梁设计及加固方面的工作。

通信作者: 王文雅 (1992—), 女, 工程师, 从事桥梁设计及加固方面的工作。

石拱桥具备造型独特优美、材料廉价易得、能充分发挥圬工材料力学性能等特点,多修建于 20 世纪五六十年代,桥梁长期服役期间因材料老化、车辆荷载增大、环境腐蚀等因素出现不同程度外观质量缺陷,养护加固成本逐年增加,结构承载能力降低^[1-4]。

牛东强^[5]、彭伟等^[6]、罗声等^[7]、张煜等^[8]对服役多年的石拱桥进行表观检查、砌石强度检测及尺寸测量,建立石拱桥数值分析模型对桥梁实际承载能力进行评定并提出养护建议;李鹏程^[9]、蒋田勇等^[10-11]提出采用分层综合评定与 5 类桥梁单项控制指标相结合及 DER&U 法对在役石拱桥技术状况评定;张彦君^[12]、孙潮等^[13]、潘聪等^[14]、张彬彬等^[15]和魏召兰等^[16]分别采用数值分析法、经验系数法、极限分析法及等效梁柱法对石拱桥承载能力进行分析。

本文以某公路石拱桥为依托工程,在对其外观尺寸检查量测,材料钻芯试验检测后,采用分层综合评定法对桥梁技术状况评定,建立石拱桥数值分析模型进行承载能力评定,以综合评定结果为参考对该石拱桥的管理养护提供科学合理建议,以期可为同类石拱桥的健康状况评定及管理提供一定借鉴。

1 工程背景及研究路线

本工程为某公路跨河石拱桥,设计及施工档案资料缺失,桥梁基本信息:全长 46 m,全宽 16 m,桥面横向布置为 0.5 m(防撞墙)+15 m(行车道)+0.5 m(防撞墙)。上部结构型式为 5 m×6 m 的圬工拱,横向各布设两片拱;下部结构型式为砌石重力式墩台,扩大基础;桥面铺装为沥青混凝土铺装。1991 年 12 月建成通车,荷载等级:汽车-20 级,挂车-100。图 1 为该圬工拱桥的现状照片。



图 1 石拱桥现状照片

主要研究路线:对依托石拱桥工程进行总体及

主要构件测量,记录石拱桥上下部及桥面系等病害特征,采用分层综合评定方法对石拱桥技术状况评定;现场砌石取样进行石料单轴抗压强度试验检测及砂浆抗压强度试验检测,通过试验检测推定材料强度参数,建立 Midas Civil 有限元模型对石拱桥的承载能力进行分析;结合外观试验检测及有限元分析结果,对石拱桥的技术状况及承载能力综合评定后给出结论。图 2 为研究技术路线图。

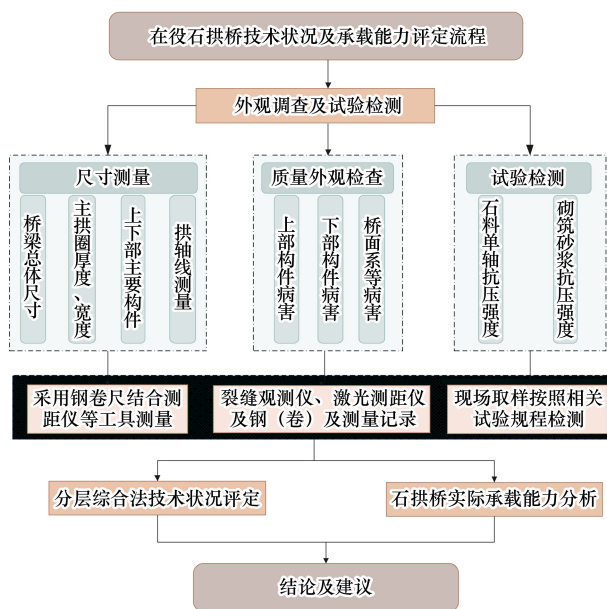


图 2 研究技术路线

2 外观调查及试验检测

2.1 总体尺寸量测

采用钢卷尺结合测距仪量测桥梁总体尺寸及主拱圈厚度、宽度,拱上覆土厚度,拱轴线矢高及墩台等部件尺寸。经测量,上部结构型式为 5 m×6 m 的石砌圬工拱,净跨径为 6 m,净矢高为 1.49 m,计算跨径为 6.37 m,计算矢高为 1.59 m,矢跨比约为 1/4,拱轴线为圆弧曲线,拱轴线长度为 7.41 m,拱圈厚度 0.58 m。桥梁几何尺寸如图 3 所示。

为便于后文描述,规定低桩号到高桩号为前进方向,墩台依次命名 0#台、1#~4#墩、5#台,0#台与 1#墩之间为 1#跨,其余桥跨依次递增;构件详细命名示例:第 1 跨第 1 个主拱圈为“1-1#主拱圈”,第 1 跨左侧面拱上侧墙为“1#跨左侧拱上侧墙”,其余命名以此参考。

2.2 拱轴线量测

利用隧道激光断面仪对(1~5)#跨主拱圈拱轴

线进行量测,每跨选两个断面,每断面检测 1 次,单断面共 119 个检测点。测量断面位置:1[#]主拱圈为距左侧 1.5 m 位置,2[#]主拱圈为距右侧 1.25 m。本文仅给出 2[#]~4[#]跨拱轴线测量结果如图 4、5 所示。由拱轴线测量图形可知,所测试部位拱轴线路形较为平顺,无明显突变点。

2.3 拱桥质量外观检查

利用裂缝观测仪、激光测距仪、钢(卷)尺等检测工具记录病害的形状、位置和尺寸,对混凝土构件的裂缝、剥落、蜂窝、空洞、露筋锈蚀等病害处用粉笔、油笔或喷漆进行标记,并对相应位置及范围、性质、程度和成因做详细文字描述,图 6 为拱桥上部、下部及桥面系附属等构件的现

场典型病害照片。

桥梁构件病害主要表现:主拱圈表层砂浆开裂、砂浆横向裂缝、主拱圈渗水侵蚀及表层砂浆剥落,拱上侧墙沿砌缝竖向开裂及砌石缺失,墩身渗水侵蚀及防撞护栏局部锈胀露筋等。

2.4 材质试验检测

主拱圈取芯存在结构失稳风险,对与主拱圈砌石材质相同的锥坡取样做石料单轴抗压强度检测;选取 5-1[#]主拱圈、3[#]墩身高桩号面进行砂浆抗压强度检测,表 1 为检测部位及试验项目。

2.4.1 石料单轴抗压强度

试验选择与主拱圈砌石相同材质的 5[#]台左侧桥台锥坡进行现场砌石取样,依据《公路工程岩

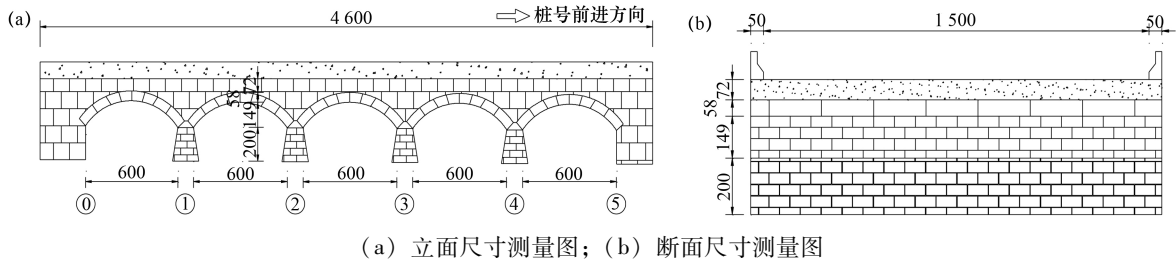


图 3 桥梁总体尺寸测量图

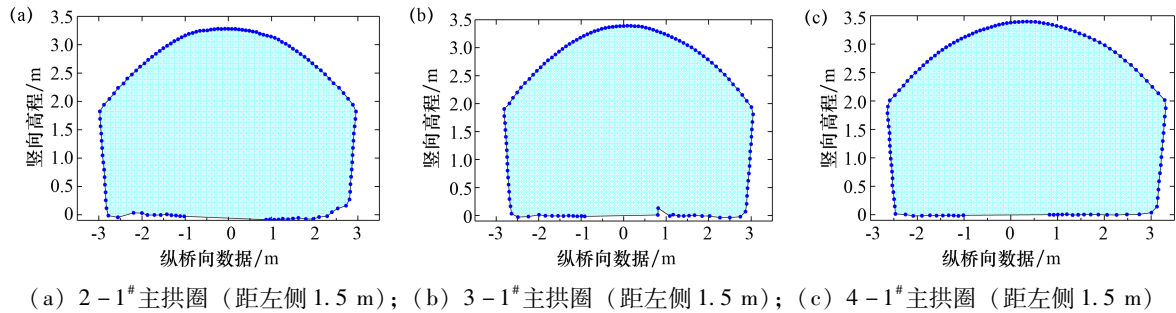


图 4 (2~4)[#]跨距左侧 1.5 m 主拱圈拱轴线

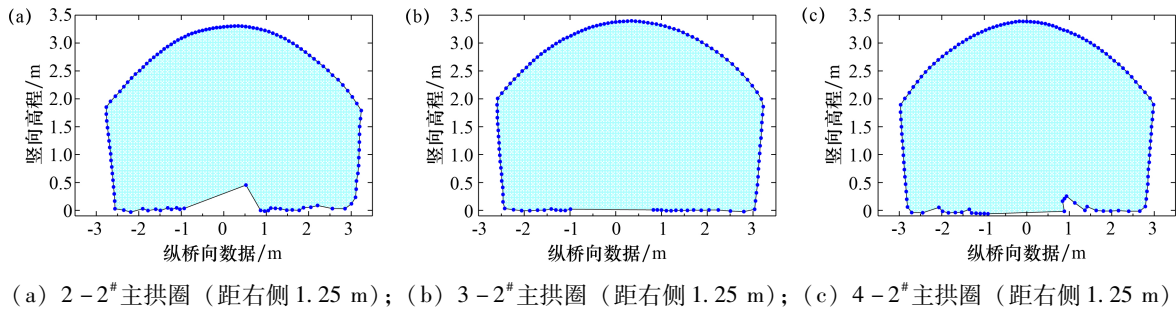
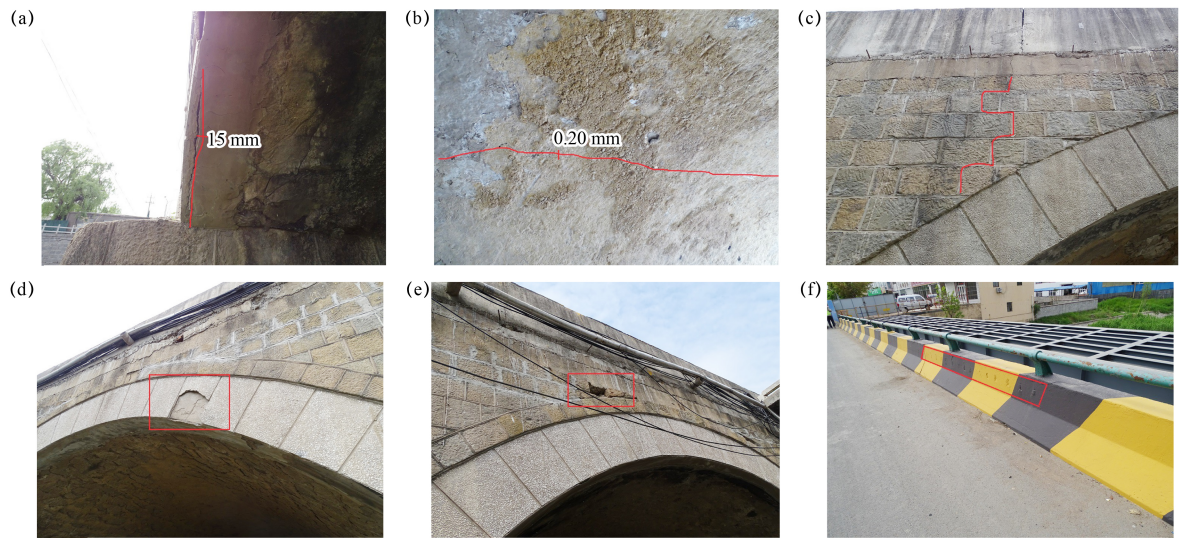


图 5 2[#]~4[#]跨距右侧 1.25 m 主拱圈拱轴线

表 1 拱桥结构材料强度检测内容

序号	检测项目	检测构件或部位
1	墩身砌石单轴抗压强度	5 [#] 台左侧锥坡
2	拱上侧墙、墩身砌筑砂浆抗压强度检测	5-1 [#] 主拱圈、3 [#] 墩顶右侧拱上侧墙、3 [#] 墩身高桩号面



(a) 2-1[#]主拱圈表层砂浆开裂；(b) 2-1[#]主拱圈表层砂浆横向裂缝；(c) 5-1[#]主拱圈左侧面表层砂浆剥落
(d) 4[#]跨右侧拱上侧墙沿砌缝竖向开裂；(e) 1[#]跨左侧拱上侧墙砌石缺失；(f) 3[#]墩顶右侧防撞墙锈胀露筋

图 6 桥梁构件病害照片

石试验规程》(JTG E41—2005)将样本制备规格为 70±2 mm 的 6 个立方体试件进行单轴抗压强度试验，石料单轴抗压强度计算如式：

$$R_i = P_i / A_i \tag{1}$$

式中： R_i 表示第 i 个试件的抗压强度，MPa； P_i 表示第 i 个试件的试验极限破坏荷载，N； A_i 表示第 i 个试件的截面积，mm²。

石料强度取试样单轴抗压强度的算术平均值，如表 2 所示。

2.4.2 砂浆抗压强度

依据《贯入法检测砌筑砂浆抗压强度技术规

程》(JGJ/T 136—2017)(下文简称“规程”)中规定选取试验构件测点位置及数量进行砌筑砂浆抗压强度检测，取筛选后 10 个测点贯入深度平均值为代表：

$$m_{dj} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} d_i \tag{2}$$

式中： m_{dj} 为 j 构件砂浆贯入深度代表值，mm； d_i 为第 i 个测点贯入深度值，mm。

砌筑砂浆抗压强度推定值为 0.91 倍的砂浆抗压强度换算值（根据 m_{dj} 值按不同的测强曲线计算得出），砌筑砂浆强度推定值结果如表 3 所示。

表 2 石料强度检测结果

试件编号	试件尺寸/mm			试件面积/mm ²	破坏荷载/kN	抗压强度/MPa	平均强度/MPa
	长旗	宽度	高度				
1	69.42	70.58	70.37	4 899.66	459.75	93.8	95.6
2	70.23	70.45	69.62	4 947.70	472.29	95.5	
3	69.51	70.12	68.94	4 874.04	466.82	95.8	
4	70.45	70.23	69.72	4 947.70	477.62	96.5	
5	70.35	70.43	69.49	4 954.75	473.45	95.6	
6	68.95	70.74	69.72	4 877.52	471.34	96.6	

表 3 拱圈砌筑砂浆抗压强度检测结果

构件部位	平均贯入深度/mm	换算强度/MPa	推定强度/MPa
5-1 [#] 主拱圈	4.00	9.3	8.5
3 [#] 墩顶右侧拱上侧墙	4.10	8.9	8.1
3 [#] 墩身高桩号面	4.00	9.3	8.5

3 石拱桥技术状况评定

3.1 技术状况评定流程

将分层综合评定与 5 类桥梁单项控制指标相结合的方法应用于该工程石拱桥技术状况评定,按照《公路桥梁技术状况评定标准》(JTGT H21—2011)(下文简称“标准”)对桥梁构件评定、桥梁部件评定、上部结构评定、下部结构评定、桥面系评定和全桥技术评定,具体评定指标和流程如图 7 所示。

3.2 桥梁总体技术状况评分

桥梁构件技术状况按下式计算:

$$R_{PMCL,i}(R_{BMCL,i} \text{ 或 } R_{DMCL,i}) = 100 - \sum_{x=1}^k U_x \quad (3)$$

式中: $R_{PMCL,i}$ 、 $R_{BMCL,i}$ 、 $R_{DMCL,i}$ 分别为上部结构、下部结构及桥面系第 i 类部件 l 构件的得分。

桥梁部件技术状况评分按下式计算:

$$R_{PCCI,i}(R_{BCCI,i} \text{ 或 } R_{DCCI,i}) = R_{PMCL,i}(R_{BMCL,i} \text{ 或 } R_{DMCL,i}) - (100 - R_{PMCL,i}(R_{BMCL,i} \text{ 或 } R_{DMCL,i})) / t \quad (4)$$

式中: $R_{PCCI,i}$ 、 $R_{BCCI,i}$ 、 $R_{DCCI,i}$ 分别为上部、下部结构、桥面系数第 i 类部件的得分,式中其余各项表示及取值要求参见标准。

桥梁上部结构、下部结构、桥面系的技术状况得分值按下式计算:

$$R_{SPCL}(R_{SBCL} \text{ 或 } R_{DBCL}) = \sum_{i=1}^m R_{PCCI,i}(R_{BCCI,i} \text{ 或 } R_{DCCI,i}) \times W_i \quad (5)$$

桥梁总体技术状况评分 D_r 由下式计算:

$$D_r = R_{DBCL} \times W_D + R_{SPCL} \times W_{SP} + R_{SBCL} \times W_{SB} \quad (6)$$

式中: R_{SPCL} 、 R_{SBCL} 、 R_{DBCL} 分别为桥梁上部、下部、桥面系技术状况评分; W_D 、 W_{SP} 、 W_{SB} 分别为桥面系、上部结构、下部结构在全桥中的权重,式中

其余各项表示及取值要求参见标准。

桥梁结构的完好状况按表 4 所示的标准评定。本工程桥梁各部件技术状况的评定结果见表 5。

该工程石拱桥按照分层综合法评定为 2 类,桥梁有轻微缺损,对桥梁使用功能无影响。目前类似规模石拱桥服役年限大都在 30 年之久,现存资料缺失严重,运营过程出现病害类型不尽相同,对桥梁安全影响程度不一,因此对石拱桥的技术状况评定需依据现场外观调查及试验分析等手段并结合规范标准进行评定,本文采用分层综合评定方法可为类似工程提供一定借鉴。

4 承载能力检算分析

4.1 检算对象及检算系数确定

依据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011),圬工结构桥梁在计算结构承载能力极限状态抗力效应时,应引入检算系数 Z_1 、截面折减系数 ξ_c 按下式进行修正计算:

$$\gamma_0 S \leq R(f_d) \xi_c a_d Z_1 \quad (7)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; S 为荷载效应函数; R 为抗力效应函数; f_d 为材料强度设计值; a_d 为结构几何尺寸; ξ_c 为截面折减系数; Z_1 为承载能力检算系数。

根据现场检测实施条件,检算过程选取 3-1# 主拱圈作为检算对象,对主拱圈偏心距、主拱圈截面强度及整体“强度-稳定”主要检算内容进行分析。按照规定计算检算系数 Z_1 、截面折减系数 ξ_c ,结果如表 6、7 所示。

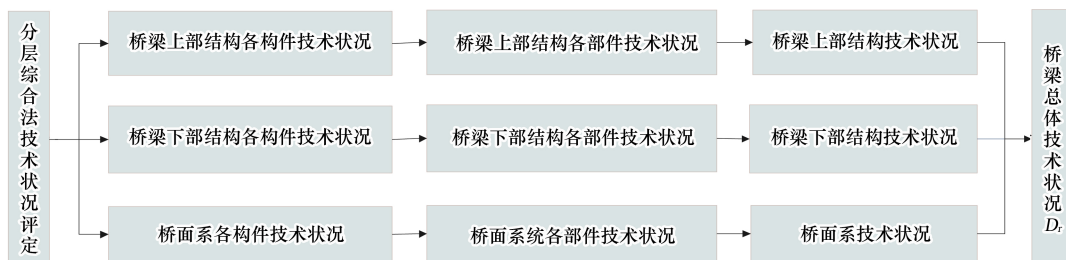


图 7 分层综合法技术状况评定流程

表 4 桥梁技术状况评定标准

技术状况评分	技术状况等级 D_i				
	1 类	2 类	3 类	4 类	5 类
D_r	[95,100]	[80,95)	[60,80)	[40,60)	[0,40)

表 5 石拱桥技术状况评定得分

部位	类别 i	部件名称	重新分配后权重	得分值	部件等级	评分
上部结构	1	主拱圈	0.78	79.68	3 类	81.66
	2	拱上结构	0.22	88.68	2 类	
	3	桥面板	0	0	—	
下部结构	4	翼墙、耳墙	0.02	100.00	1 类	100.00
	5	锥坡、护坡	0.01	100.00	1 类	
	6	桥墩	0.31	100.00	1 类	
	7	桥台	0.30	100.00	1 类	
	8	墩台基础	0.29	100.00	1 类	
	9	河床	0.07	100.00	1 类	
	10	调治构造物	0	0	—	
桥面系	11	沥青铺装	0.62	100.00	1 类	94.00
	12	伸缩缝装置	0	0	—	
	13	人行道	0	0	—	
	14	栏杆、护栏	0.15	85.00	2 类	
	15	排水系统	0.15	75.00	3 类	
	16	照明、标志	0.08	100.00	1 类	
桥梁结构技术状况评定					2 类	91.46

4.1.1 承载能力检算系数 Z_1

结构承载能力检算分析内容如表 6 所示。

4.1.2 截面折减系数 ξ_c

截面折减系数如表 7 所示。

4.2 结构数值分析模型

实测石材强度推定值均大于 30[#]石料的强度等级，计算采用 30[#]石料的设计参数，实测砂浆强度推定值均大于 7.5[#]砂浆的强度等级，计算采用 7.5[#]砂浆的设计参数。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)的相关规定，主拱圈、墩台砌体的容重采用 23 kN/m³，拱上结构填土的容重采用 18 kN/m³；主拱圈拱轴系数取值为 3.963。根据《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》(JTJ 022—85)

的相关规定，主拱圈砌体轴心抗压强度按照浆砌片石取值为 3.90 MPa；桥墩砌体轴心抗压强度按照浆砌片石取值为 2.20 MPa。采用 Midas Civil 建立有限元分析模型，建模时忽略构件轻微缺损，假定材料均匀连续、各向同性，墩台、主拱圈、侧墙及桥面板均采用梁单元模拟，考虑拱上建筑及填料等荷载，为满足计算精度梁单元划分长度区间为 1~2 m，全桥有限元模型如图 8 所示。

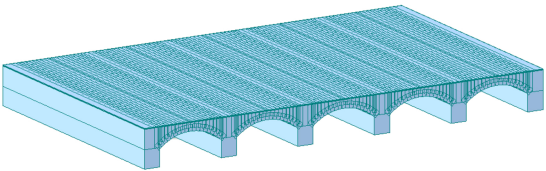


图 8 石拱桥结构空间有限元模型

表 6 结构承载能力检算分析内容

指标	评定标度 D_i	权重 a_i	$\sum D_i \times a_i$	构件受力型式	承载能力检算系数 Z_1
缺损状况	2	0.4	1.4	偏心受压	1.13
材质强度	1	0.3			
自振频率	1	0.3			

表 7 截面折减系数

指标	评定标度 R_i	权重 a_i	$\sum R_i \times a_i$	截面折减系数 ξ_c
材料风化	2	0.20	2.0	0.98
物理与化学损伤	2	0.80		

4.3 承载能力检算结果

采用汽车 - 20 级、挂车 - 100 (JTJ 021 - 89) 及公路 - I 级 (JTG D60 - 2015), 分别对主拱圈拱顶、1/4 和拱脚特征截面在恒载及活载作用下的内力验算, 通过 Midas 模型计算结果得到特征截面组合内力及修正的抗力设计值, 车辆荷载等级为汽车 - 20 级, 挂车 - 100 时承载力检算结果见表 8, 车辆荷载等级为公路 - I 级时承载力检算结果见表 9。

由上述可知, 该桥主拱圈拱顶、1/4 跨、拱脚截面承载能力检算结果均满足荷载等级汽车 - 20 级, 挂车 - 100 及公路 - I 级的要求。

本文依托工程石拱桥技术状况评定为 2 类,

病害程度较低, 局部修补后不影响使用功能, 进行承载能力分析时忽略结构轻微损伤, 采用实测材料强度建立有限元模型。对于同类石拱桥结构进行承载力分析时应结合桥梁实际技术状况评定结果, 对实测材料、截面进行折减, 建立能反应结构真实受力状态的数值分析模型, 必要时还可采取动静载试验对桥梁结构受力进行实测分析, 分析结果为桥梁安全使用及维修加固提供重要依据。

5 结 语

本文对一座服役三十余年的石拱桥进行外观调查和试验检测, 采用分层综合评定法对桥梁技术状况进行评定, 评定结果为 2 类, 通过 Midas

表 8 3-1#主拱圈承载能力检算结果 (车辆荷载为汽车 - 20 级、挂车 - 100)

特征截面	荷载组合效应	$M/(kN \cdot m)$	N/kN	偏心距/m	容许偏心距/m	修正的抗力/kN	检算结果
拱顶截面	N_{max}	-1 303.79	-26.77	0.021	0.174	17 827.9	✓
	N_{min}	135.38	-1 689.68	0.080	0.174	14 723.7	✓
	M_{max}	-1 659.78	146.98	0.089	0.174	14 139.4	✓
	M_{min}	-1 433.15	-92.41	0.064	0.174	15 758.7	✓
1/4 截面	N_{max}	15.53	-1 411.39	0.011	0.174	18 018.2	✓
	N_{min}	88.30	-1 923.71	0.046	0.174	16 831.0	✓
	M_{max}	-1 712.97	172.11	0.100	0.174	13 302.0	✓
	M_{min}	-1 718.13	-66.03	0.038	0.174	17 190.3	✓
拱脚截面	N_{max}	-39.92	-1 716.46	0.023	0.174	17 753.5	✓
	N_{min}	-80.80	-2 315.36	0.035	0.174	17 342.6	✓
	M_{max}	-1 858.80	58.44	0.031	0.174	17 479.7	✓
	M_{min}	-2 261.33	-157.13	0.069	0.174	15 437.0	✓

表 9 3-1#主拱圈承载能力检算结果 (车辆荷载为公路 - I 级)

特征截面	荷载组合效应	$M/(kN \cdot m)$	N/kN	偏心距/m	容许偏心距/m	修正的抗力/kN	检算结果
拱顶截面	N_{max}	-79.49	-2 264.03	0.035	0.174	17 333.8	✓
	N_{min}	189.96	-2 722.82	0.070	0.174	15 418.7	✓
	M_{max}	-2 692.10	201.08	0.075	0.174	15 092.0	✓
	M_{min}	-2 388.06	-136.51	0.057	0.174	16 206.8	✓
1/4 截面	N_{max}	13.80	-2 437.26	0.006	0.174	18 075.3	✓
	N_{min}	188.60	-2 996.70	0.063	0.174	15 855.6	✓
	M_{max}	255.12	-2 916.15	0.087	0.174	14 214.0	✓
	M_{min}	-82.28	-2 811.50	0.029	0.174	17 559.5	✓
拱脚截面	N_{max}	-48.52	-2 954.73	0.016	0.174	17 923.6	✓
	N_{min}	-131.37	-3 589.07	0.037	0.174	17 270.6	✓
	M_{max}	56.11	-3 479.07	0.016	0.174	17 829.6	✓
	M_{min}	-160.14	-3 549.99	0.045	0.174	16 871.3	✓

Civil 有限元软件依据试验检测推定材料强度建立石拱桥有限元分析模型,分别对石拱桥在新、旧车辆荷载标准下的承载能力进行分析,根据技术状况评定及有限元分析结果得出桥梁结构使用状况良好,满足现行规范荷载标准。目前我国类似在役石拱桥建设年代较为久远,随着时间的推移结构安全性能降低,对于同类石拱桥结构有必要进行安全技术状况及结构承载力评定,评定结果为桥梁安全使用及维修加固提供重要依据。

参考文献:

- [1] 徐勇. 拱桥的起源与石拱桥的发展 [J]. 世界桥梁, 2013, 41 (3): 85 - 92.
- [2] 彭伟, 郑建红. 片石拱桥现状检测评估及加固应用 [J]. 湖北工程学院学报, 2018, 38 (3): 101 - 105.
- [3] 王明. 公路桥涵养护病害的成因及处治措施 [J]. 工程建设, 2017, 49 (4): 66 - 67; 78.
- [4] 林建茂. 表观病害对预应力混凝土 T 梁桥承载力的影响分析 [J]. 工程建设, 2020, 52 (6): 88 - 94.
- [5] 牛东强. 石拱桥检测及承载能力修正 [J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14 (3): 232 - 236.
- [6] 彭伟, 吴成忠, 郑建红. 悬链线石拱桥检测及承载能力分析 [J]. 湖南城市学院学报 (自然科学版), 2017, 26 (6): 11 - 15.
- [7] 罗声, 康小兵. 石拱桥承载能力分析 & 试验检测评定 [J]. 公路工程, 2015, 40 (3): 210 - 212; 222.
- [8] 张煜, 熊治华, 罗靖雨等. 陕西老旧石拱桥快速评价体系构建 [J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19 (04): 168 - 174.
- [9] 李鹏程. 石拱桥健康检测评估方法研究: 以百节桥为例 [J]. 公路交通技术, 2017, 33 (1): 74 - 77.
- [10] 蒋田勇, 龙伟. 基于 DER&U 的石拱桥技术状况评定新方法 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (7): 68 - 75.
- [11] 蒋田勇, 龙伟. 基于层次分析的石拱桥技术状况评定方法 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (9): 49 - 56.
- [12] 张彦君. 某实腹式石拱桥结构承载能力分析 [J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13 (6): 221 - 225.
- [13] 孙潮, 陈宝春, 黄文金. 圬工拱桥承载力计算方法比较 [J]. 中外公路, 2014, 34 (6): 149 - 154.
- [14] 潘聪, 廖碧海. 基于外观调查的实腹式拱桥检算系数计算方法 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2013, 32 (增刊 1): 779 - 783.
- [15] 张彬彬, 谭小林, 喻红月, 等. 砌体结构承载力检验与评定 [J]. 建筑科学, 2011, 27 (增刊 1): 160 - 162.
- [16] 魏召兰, 蒲黔辉, 施洲. 基于有限元分析的实腹式石拱桥合理计算模式研究 [J]. 铁道建筑, 2010, (9): 9 - 12.

(上接第 71 页)

理论基础和实践指导,也为类似工程项目的高效管理和优化提供了宝贵参考。这些创新方法的应用,不仅推动了施工技术的进步,也为城市基础设施建设的发展贡献了重要力量。

参考文献:

- [1] 江浩, 徐佳胤. 盖挖法灵活铺盖技术研究与应用 [J]. 施工技术, 2019, 48 (19): 87 - 89; 94.
- [2] 刘军, 刘礼扬, 王余良, 等. 地铁车站装配式半盖挖法施工技术研究 [J]. 市政技术, 2021, 39 (12): 73 - 75; 93.
- [3] 孙立柱. 北京地铁 6 号线呼家楼站盖挖法设计总结 [J]. 市政技术, 2017, 35 (1): 82 - 86; 91.
- [4] 王英森. 城市复杂环境下道改隐形桥梁式新型盖挖施工技术 [J]. 施工技术, 2020, 49 (23): 41 - 45.
- [5] 王健, 马红涛, 王水海. 明挖车站跨路口局部盖挖逆作法施工技术研究 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59 (增刊 2): 125 - 130.
- [6] 郝丽娟, 王松海, 代云, 等. 全型钢钢便桥设计及施工关键技术研究 [J]. 建筑技术开发, 2023, 50 (10): 139 - 141.
- [7] 王勇涛, 郭强, 姚俊, 等. BIM 技术在盖挖法地铁停车场施工中的应用 [J]. 中国住宅设施, 2022 (6): 115 - 117.
- [8] 刘文涛, 贾立民, 杨云强. BIM 技术在山地城市轨道交通工程袖珍型场地布置中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2023 (16): 88 - 90.
- [9] 宇文虎. 物联网技术在材料管理中的应用 [J]. 智慧城市, 2022, 8 (11): 4 - 6.