

洹河石拱古桥运营期结构安全仿真分析

杨振威¹, 任克彬¹, 谭亚可²

(1. 河南省文物建筑保护研究院, 河南 郑州 450002;

2. 河南星联置地集团有限公司, 河南 郑州 450008)

摘要: 古代石拱桥建成年代久远, 当下部分石拱桥仍是交通要道。古代石拱桥大多根据经验设计, 缺少相应规范校核, 且受当前交通流量增大、频繁承载甚至超载等交通环境恶化及石拱桥结构与材料性能退化的影响, 古代石拱桥往往存在较大的安全隐患。以洹河古代石拱桥为研究对象, 基于大型通用有限元软件 ANSYS 平台, 建立了洹河古代石拱桥的三维有限元模型。根据现行规范标准计算了古桥在重力与单车道车载与双车道车载等最不利荷载作用下, 1/4 跨、1/2 跨和 3/4 跨等控制截面处的挠度和应力。计算结果表明, 在当前规范体系下, 洹河古代石拱桥运营期应力和挠度满足现行规范要求, 拱桥结构安全。所得结果可为石拱桥的保护与研究提供参考。

关键词: 洹河石拱古桥; 有限元; 车载; 挠度; 应力

中图分类号: U448.32

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)04—0087—07

Safety Simulation of the Operation Period of Huihe Ancient Stone Arch Bridge

YANG Zhenwei¹, REN Kebin¹, TAN Yake²

(1. He'nan Provincial Institute of Cultural Relics and Architecture Protection, Zhengzhou, He'nan 450002, China;

2. He'nan Sinolink Real Estate Group Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450008, China)

Abstract: The ancient stone arch bridge has a long history, some still bear the important task of the heavy burden of traffic. Considering that most of these bridges are designed according to experience, and lack the corresponding standard verification, their security tend to have larger safety issue, with the deterioration of the traffic environment such as the current traffic increase, frequent loading even overload and the degradation of the performance of the structure and material. Based on the a large-scale general finite element software ANSYS, a three-dimensional finite element model of the Huihe ancient stone arch bridge is established. According to the current code, the deflection and stress of the control sections, such as 1/4 span, 1/2 span, 3/4 span and 3/4 span, are calculated under the gravity with single vehicle loads and double vehicle loads. The calculation results show that the stress and deflection of the ancient stone arch bridge of the Huihe can satisfy the current specification under the current standard, and the structure of the stone arch bridge is therefore safe. The results can be used as a reference for the protection and research of the stone arch bridge.

Keywords: Huihe ancient stone arch bridge; finite element; vehicle loads; deflection; stress

石拱古桥建成年代久远, 受战火洗礼、环境侵蚀等因素的影响, 石拱古桥部分遭到破坏, 但由于部分

石拱桥身处交通要道, 因此仍然承担着交通运输的重任。相对于现代桥梁来说, 石拱古桥建造时缺少

收稿日期: 2020-04-08

修稿日期: 2020-05-06

基金项目: 河南省科技攻关项目(202102310584); 国家自然科学基金项目(51709274); 2019年度文化艺术和旅游研究项目信息化发展专项(xxfzxx201910)

作者简介: 杨振威(1963—), 男, 河南郑州人, 副研究员, 主要从事文物建筑保护研究工作。E-mail: 1374185053@qq.com

通讯作者: 任克彬(1986—), 男, 河南郑州人, 博士, 馆员, 主要从事岩土质文物保护研究工作。E-mail: renkebin1986@163.com

相应规范校核,且受当前交通流量增大、频繁承载甚至超载等交通环境恶化的影响,加上石拱桥结构与材料性能的退化,仍在通行利用的石拱古桥安全性往往存在较大的安全隐患。古代桥梁不仅对研究我国古建筑技术的发展具有极其重要的意义,而且对于认知古代社会的历史、文化、艺术以及政治、外交、经济等具有无法替代的价值。如何确保古桥尽可能完整的保存下去,保持其良好的运营状态,延长其使用寿命至关重要^[1-2]。

对于古桥遗存的保护来说,由于其不可再生性,为保障古桥安全,需要对它进行科学的监测、评估与修缮。由于结构体系的物理参数、边界条件与结构的病害状况有关,为了更精准的了解结构的状况,需要进行仿真分析^[3-6],以达到预测和控制结构内力和变形的发展及变化,从而保证结构在安全范围内工作。

对古桥内力和变形的计算是其综合性能评定的重要一环,国内学者采用有限元分析的方法对此开展了广泛的研究工作。李正英等^[7]将拱桥简化为平面杆系模型,进行动态仿真分析,并考虑了行波效应对减震效果的影响。何伟等^[8]按设计施工顺序进行了面向施工全过程仿真分析,研究了施工过程中的结构应力及其增量等变化规律。李小珍等^[9]提出了一种采用几何非线性有限元法,对大跨度悬索桥施工状态进行计算机仿真分析。郑凯锋等^[10]认为全桥空间结构模型、模型边界真实性和模型加载真实性等特征在全桥结构仿真分析中的综合应用,将提高分析结果的准确性和实用性。周岑等^[11]全桥结构仿真分析技术在大跨度石拱桥的分析计算中,能得到较传统计算理论更加详尽和精确的结果,有着良好的应用前景。石明兰等^[12]指出石拱桥加固前后的有限元分析计算结果与实测动力特性结果相符,其有限元模型适用于动静力特性计算。胡崇武等^[13]找到了分步施工石拱桥施工仿真控制及分析方法,发现了拱脚高应力区。

魏召兰等^[14]对实腹式石拱桥合理计算模式研究,从拱轴线变化和拱圈边缘应力的角度进行评价得到有益的结论。聂建国等^[15]对 700 年石拱桥的分析结果表明,石拱桥具有明显的空间协同工作能力,根据理论分析和试验所确定的材料力学参数可用于预测类似结构的工作性能。

为此,文章根据漯河市郾城区裴城镇裴城村小洄河上的洄河石拱桥的结构特点^[16],结合相关规范^[17]要求,基于有限元分析软件 ANSYS 建立洄河

石拱桥整体模型,计算了多种工况下拱桥挠度和应力的变化规律,所得结论可为古石拱桥的研究提供参考。

1 验算标准

拱桥结构分析是基于结构有限元基准模型开展的。修正有限元基准模型参数使其计算结果与实际结构尽可能相符是保证其最终结果准确性的先决条件。目前主要根据拱桥实测结果采用优化方法对结构质量和刚度矩阵进行修正或者对设计参数进行修正。本文以拱桥振动频率、跨中挠度为响应量,反演建立拱桥高精度有限元模型。

根据等效刚度法,拱桥的弹性模量作如下折算:

$$EA = E_a A_a + E_f A_f \quad (1)$$

式中: A_a 、 E_a 为横截面拱圈中块石面积、弹性模量; A_f 、 E_f 为横截面拱圈中胶结材料面积、弹性模量。

拱圈质量为:

$$M = M_a + M_f \quad (2)$$

式中: M_a 为拱圈中块石质量; M_f 为胶结材料质量。

短期效应组合作用下,在一个桥跨范围内的正负挠度的绝对值之和的最大值不应大于计算跨径的 $L/1000$ ^[16-17]。洄河石拱桥正常使用极限状态竖向挠度满足

$$f = \left| f_{\frac{1}{4}} \right| + \left| f_{\frac{1}{2}} \right| + \left| f_{\frac{3}{4}} \right| \leq L/1000 = 2.92 \text{ mm} \quad (3)$$

式中: f 为竖向最大允许挠度; $f_{\frac{1}{4}}$ 、 $f_{\frac{1}{2}}$ 、 $f_{\frac{3}{4}}$ 分别为控制截面 1/4、1/2、3/4 跨处竖向挠度; L 为石拱桥计算跨径。

当石料的抗压强度设计值和砌体的抗压强度设计值不同时,验算和设计过程中应以砌体抗压强度设计值为准^[14]。为偏于安全,按照旧规范《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》^[18] (JTJ 022—85) 洄河石拱桥部分料石、砂浆最低设计标号强度要求如表 1 所示。

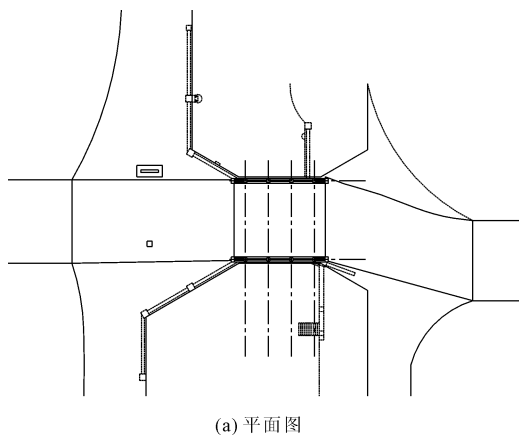
表 1 砌体强度

类型	砌体类别	MU30 M5 强度/MPa
抗压强度	片石砌体	2.50
	块石砌体	4.30
弯曲抗拉强度	片石砌体	0.45
	块石砌体	0.66

2 工程概况

洄河石拱桥位于河南省漯河市郾城区裴城镇裴城村,根据其所用石料及建筑技法可以判定该桥为

北宋年间建造。该桥由红色砂页岩砌筑而成,桥东西长 8.30 m、南北宽 6.47 m,桥拱净跨 2.92 m、矢高 1.98 m。桥拱由 18 道拱石并列砌筑而成,券面石边除两道凸弦纹外其余均为素面拱券与券基石,中间由生铁和黏合剂填充,拱券两侧桥基以石礅做基础加固。桥上原有青石栏杆,栏板上刻有各种动物图案。



有关洹河石拱桥设计和建造的文字记载极其匮乏。经现场踏勘和测量完成该桥的图纸绘制,如图 1 所示,详细记录了古桥的技术资料和运营现状。随着交通流量和桥梁负荷的日趋增大,以及自然因素和人为因素的综合影响,受力结构(拱圈)已经产生了一定程度的损伤,病害特征明显增大,安全隐患突出。

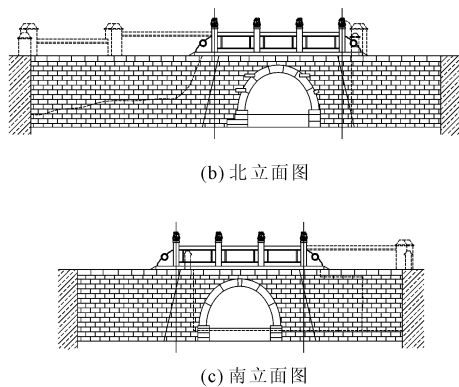


图 1 洹河石拱桥示意图

3 石拱桥数值模型

洹河石拱桥有限元模型通过 ANSYS 建立,如图 2 所示。拱桥结构采用 Solid 65 单元模拟,共 37 700 个单元,43 472 个节点。将拱桥模型单元材料属性依实际情况分为 2 组,第一组为拱圈单元,第二组为拱上结构单元。采用直角坐标系,上游拱脚中点设置为坐标原点,顺桥向为 X 轴,竖直向上为 Y 轴,横桥向为 Z 轴。模型底部约束 X 、 Y 、 Z 轴向线位移,桥梁两端横断面采用法向链杆约束。为便于计算结果说明,在拱圈的有限元模型中,沿控制截面(纵向)节点设置两条路径,其中顺桥向左拱脚为拱圈控制截面零点位置,净长 2.92 m。拱圈控制截面节点路径如图 3 所示。

为了增加数值分析的准确性和适用性,根据现场测试石拱桥固有频率等动力特性结果采用响应面方法修改拱桥初始模型得到拱桥基准模型。动力测试传感器选用国家地震局工程力学研究所的 891 型测振仪,将其固定在拱圈拱脚、1/4、1/3 及跨中位置处,数据采集处理 DH5907 桥梁模态振动测试系统。经修正后有限元模型中石材标号 MU30。根据式(1)与式(2)计算得到模型材料弹性模量与密度。拱上结构密度 $2\ 000\ \text{kg/m}^3$,弹性模量 0.285 GPa,泊松比为 0.3;主拱圈密度 $2\ 400\ \text{kg/m}^3$,弹性模量 5.65

GPa,泊松比为 0.25。基准模型计算拱桥振动频率如表 2 所示,可以看出其计算值与实测值最大误差不超过 2.25%,因此基准模型反应了拱桥结构特性。

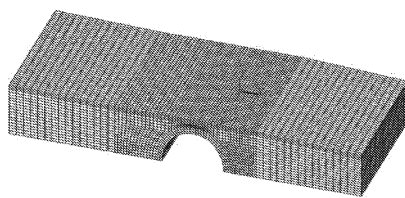


图 2 有限元模型图

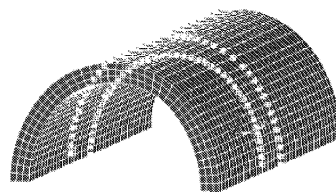


图 3 节点路径

表 2 拱桥固有频率有限元值与实测值比较

阶次	频率/Hz		相对误差/%
	有限元值	实测值	
1	1.4071	1.437	-2.08
2	4.0500	3.961	2.25

石桥在运营期内,共计算以下 6 种工况:

- (1) 工况 1:单车道加载,汽车后轮在拱桥 1/4 跨。
- (2) 工况 2:单车道加载,汽车后轮在拱桥 1/2 跨。
- (3) 工况 3:单车道加载,汽车后轮在拱桥 3/4 跨。
- (4) 工况 4:双车道加载,汽车后轮在拱桥 3/4 跨。
- (5) 工况 5:双车道加载,汽车后轮在拱桥 1/2 跨。
- (6) 工况 6:双车道加载,汽车后轮在拱桥 1/4 跨。

4 运营期安全性分析

各工况下沿路径各节点挠度如图 4 所示,各工况下沿路径各节点 X 方向应力、 Y 方向应力、 Z 方向应力如图 5—图 10 所示,各工况下路径上各节点第一主应力、第三主应力计算结果如图 11—图 14 所示。

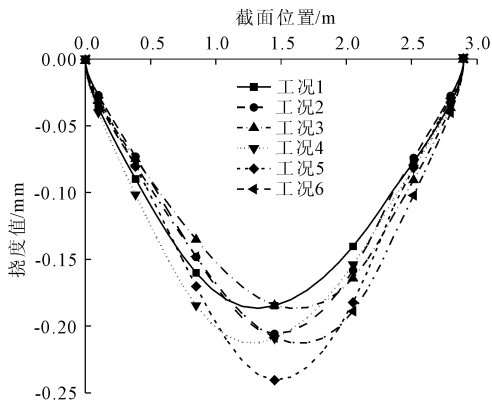


图 4 顺桥向控制截面挠度

从图中不难发现工况 5 为运营期受各种荷载影响最不利工况,因此以工况 5 为例,重点分析洹河石拱桥拱圈在运营期的常见荷载作用下拱圈挠度与应力分布情况:

(1) 挠度特征。由图 4 可以看出,拱圈挠度的最大值分布在跨中,从两侧拱脚向跨中逐渐增大并呈对称分布。按照规范规定的作用短期效应组合,在一个桥跨范围内正负挠度的绝对值之和的最大值为 0.550 mm,小于规范允许值 2.92 mm。六种工况下最大挠度均位于跨中附近,随着拱圈受荷载的增大而增加。各工况下控制截面最大挠度为工况 2 作用下的 0.206 mm,计算可得一个桥跨范围内的正负挠度绝对值之和的最大值为 0.477 mm,控制截面最大挠度为工况 5 作用下的 0.241 mm,此时一个桥跨范围内正负挠度绝对值之和最大值为 0.550 mm,均小于规范允许值,且有限元分析中挠度分布规律符合无铰筒支拱桥的受力特点。

(2) 应力特征。由图 5 和图 6 可以看出,工况 5 时,拱圈的 X 向应力值压应力最大值为 0.243

MPa,拉应力最大值为 0.339 MPa。拱圈 X 向的应力最值分布在跨中,压应力值从两侧拱脚向跨中先增大再减小并呈对称分布,拉应力值从两侧拱脚向跨中先减小再增大,同样呈对称分布。

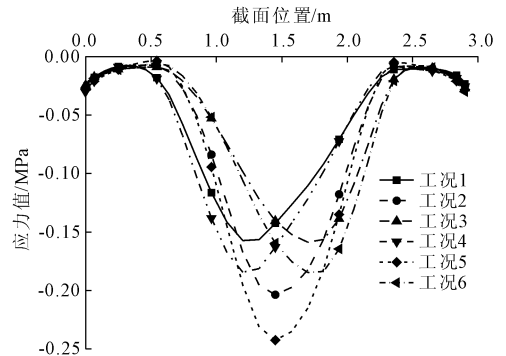


图 5 各控制截面 X 方向压应力极值图

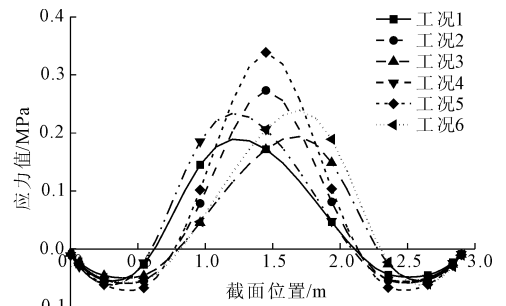


图 6 控制截面 X 方向拉应力极值

由图 7 和图 8 可以看出,工况 5 时,拱圈 Y 向控制截面拉、压应力值变化图均呈对称分布,且两图应力变化规律相似。拱圈的 Y 向最大压应力为 0.402 MPa,位于拱脚处。拱圈的 Y 向最大拉应力为 0.009 6 MPa,大约位于净跨 1/3 处。

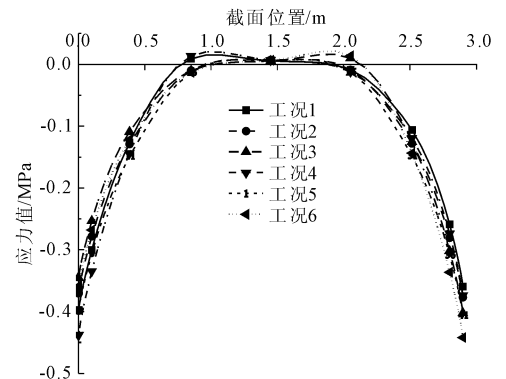


图 7 顺桥向控制截面 Y 方向受压应力

由图 9 和图 10 可以看出,工况 5 时,拱圈 Z 向压应力控制截面最大值为 0.081 2 MPa,位于跨中位置,应力值从两侧拱脚位置至跨中,先由拉应力逐渐减小为零,然后压应力逐渐增值最大,呈对称分布。

拱圈 Z 向拉应力控制截面最大值为 0.127 MPa,位于跨中位置,应力值从两侧拱脚位置至跨中,先由压应力逐渐减小为零,然后拉应力逐渐增值最大,同样呈对称分布。

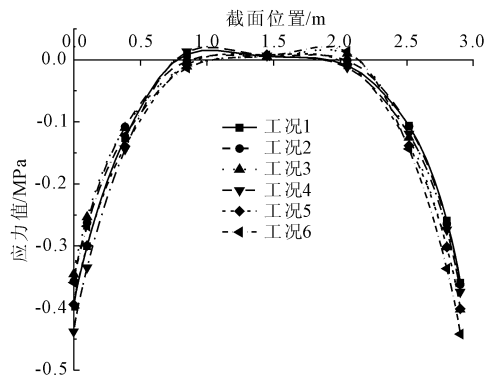


图 8 顺桥向控制截面 Y 方向受拉应力

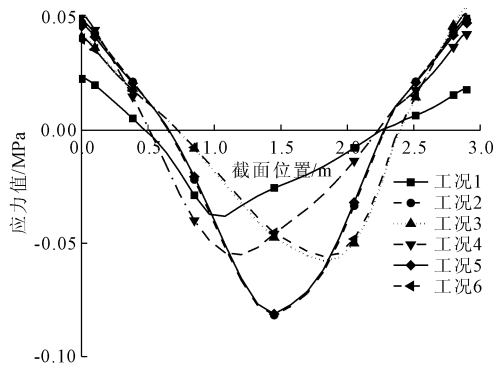


图 9 顺桥向控制截面 Z 方向受压应力

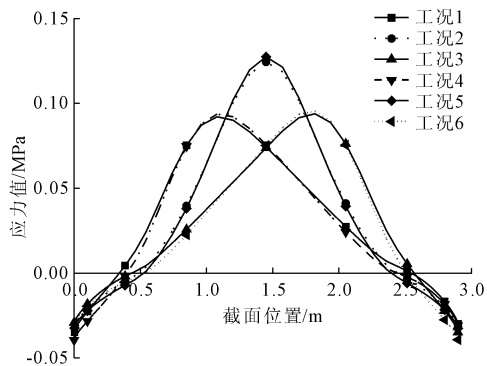


图 10 顺桥向控制截面 Z 方向受拉应力

由图 11 和图 12 可以看出,工况 5 时,拱圈第一主应力受压控制截面最大压应力位于跨中位置,应力值从两侧拱脚位置至跨中,呈对称分布。拱圈第一主应力收拉控制截面最大拉应力位于跨中位置,应力值从两侧拱脚位置至跨中,逐渐增大,呈对称分布。

由图 13 和图 14 可以看出,工况 5 时,拱圈第三主应力控制截面拉、压应力值变化规律相似,均呈对

称分布,且跨中 0.5 m 范围内应力值图像平缓,近似于静力平衡状态,表明结构在此应力状态下安全、稳定。拱圈第三主应力最大压应力为 0.407 MPa,位于拱脚处,最大拉应力为 0.009 8 MPa,大约位于跨中附近。第三主应力控制截面,除跨中 0.5 m 范围内应力接近平衡状态外,余下部分全部受压,且两侧拱脚处压应力达到最大。

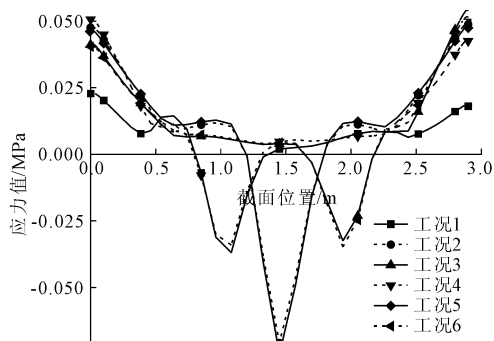


图 11 顺桥向第一主应力控制截面压应力

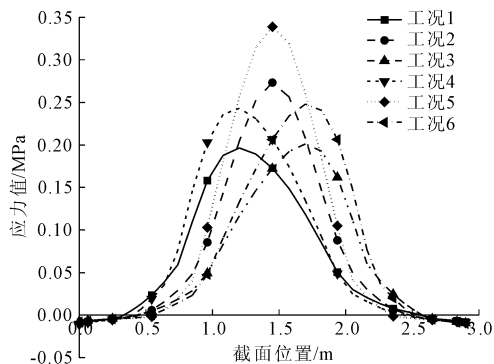


图 12 顺桥向第一主应力控制截面拉应力

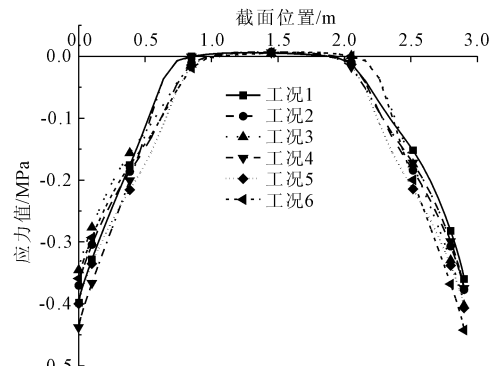


图 13 顺桥向第三主应力控制截面压应力

综上,工况 5 时,顺桥向拱圈控制截面压应力最大值为第三主应力 0.402 MPa,顺桥向拱圈控制截面拉应力最大值为 X 向应力和第一主应力 0.339 MPa,小于表 1 规范中块石砌体拉、压强度值 0.66 MPa、4.30 MPa,表明在最不利工况 5 时,拱圈的挠

度、应力均满足《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》^[18] (JTJ 022—85) 相关规定, 结构安全。

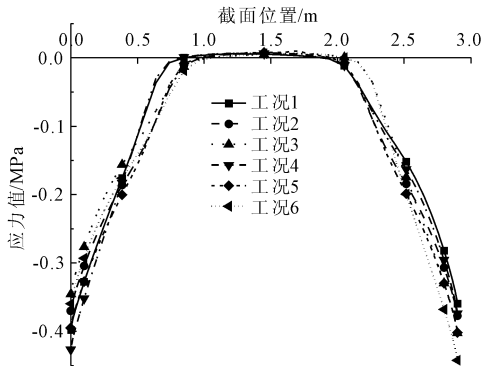


图 14 顺桥向第三主应力控制截面受拉应力

从图 5、图 6 及图 9—图 12 可以看出运营期拱圈 X、Z 向应力和第一主应力控制截面均在工况 5 作用下, 不同工况下随着拱圈受荷载的增大而增加; 从图 8 和图 9 可以看出, 拱圈 Y 向控制截面应力在工况 4 作用下, 拱圈 Y 向控制截面应力在工况 6 作用下, 运营期拱圈的 Y 向最大压应力为 0.442 MPa, 位于拱脚处。运营期拱圈的 Y 向最大拉应力为 0.020 2 MPa, 大约位于净跨 1/3 处。此方向各工况控制截面拉、压应力值变化图从跨中至两拱脚压应力逐渐增大且呈对称分布, 比较 Y 向拉、压控制截面应力图发现二者应力变化规律相似。

从图 13 和图 14 可以看出, 运营期拱圈控制截面第三主应力最大值为在工况 6 作用下 0.443 MPa, 位于拱脚处。六种工况下跨中 0.5 m 范围内应力值图像平缓。此方向各工况控制截面拉、压应力值变化图从跨中至两拱脚压应力逐渐增大且呈对称分布, 比较第三主应力拉、压控制截面应力图发现二者应力变化规律相似。

综上, 拱圈控制截面挠度、应力整体呈对称分布, 各工况作用下分布规律满足无铰拱的受力特点。拱桥拱圈的挠度、应力满足《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》^[18] (JTJ 022—85) 规范相关规定, 因此可以认为洹河石拱桥运营期结构安全。

(3) 工况 5 计算结果。限于篇幅, 下面给出工况 5 时拱圈挠度、X 方向应力、Y 方向应力、Z 方向应力、第一主应力、第三主应力的 ANSYS 计算结果云图, 如图 15—图 20 所示。分析其简要特征如下:

由图 15 可以看出拱圈全跨范围内下挠, 且跨中附近下挠较大, 从跨中向两拱脚挠度变小, 单处最大挠度为 0.24 mm。

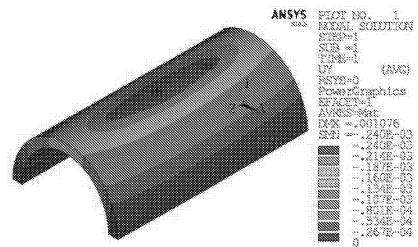


图 15 挠度计算云图

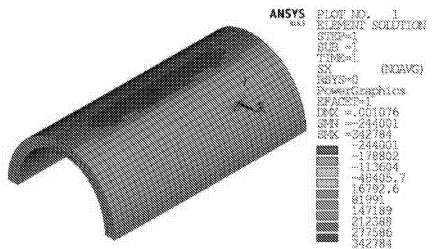


图 16 X 向应力计算云图

由图 16 可以看出拱圈 X 方向的最大压应力为 0.244 MPa, 位于拱圈上表面跨中附近; 最大拉应力为 0.343 MPa, 位于拱圈下表面跨中附近。由图 17 可以看出拱圈 Y 方向的最大压应力为 0.406 MPa, 位于拱圈上表面跨中附近; 最大拉应力为 0.016 MPa, 位于拱圈下表面跨中附近。由图 18 可以看出拱圈 Z 方向的最大压应力为 0.082 MPa, 位于拱圈上表面跨中附近; 最大拉应力为 0.129 MPa, 位于拱圈下表面跨中附近。

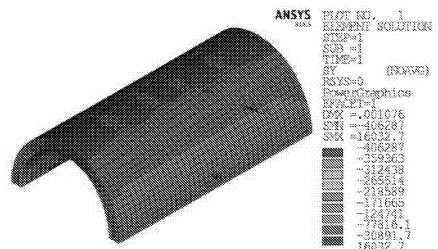


图 17 Y 向应力计算云图

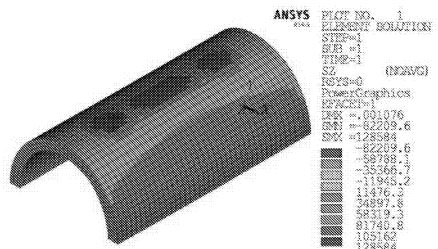


图 18 Z 向应力计算云图

由图 19 可以看出拱圈第一主应力的最大压应力为 0.066 MPa, 位于拱圈上表面跨中附近, 最大拉应力为 0.343 MPa, 位于拱圈下表面跨中附近。对

于其拱圈上表面跨中附近出现的应力集中,考虑到数值分析时,荷载是以集中力的方式加载,而实际结构中由于拱上结构的扩散作用,拱圈不易出现应力集中,因此图中应力集中区可予以忽略。由图20可以看出拱圈第三主应力的最大压应力为0.407 MPa,位于拱圈下表面拱脚附近,最大拉应力为0.013 MPa,位于拱圈下表面跨中附近。

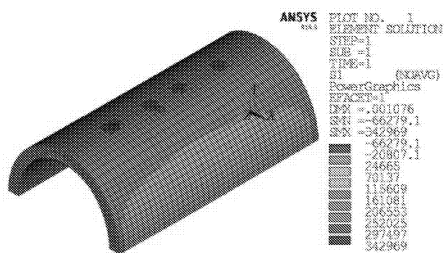


图19 第一主应力计算云图

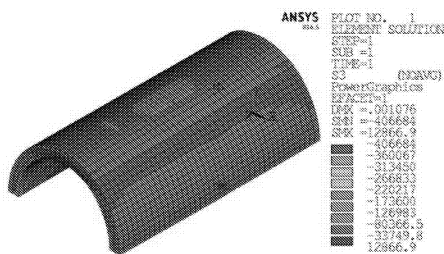


图20 第三主应力计算云图

综上所述,可以看出拱圈的挠度及应力均小于规范允许值,故结构安全。

5 结论

(1) 洹河石拱桥在运营期受重力、车载等作用时,拱圈的挠度与应力分布规律符合石拱桥的受力特点,应力、挠度呈现明显的对称性。

(2) 挠度、应力随着拱圈承受荷载的增加而增大,各工况下,有限元计算结果均满足规范要求,因此古桥现行运营状况下结构安全。

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] 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.
- [3] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2013.
- [4] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998.
- [5] 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.
- [6] 卓家寿. 弹性力学中的有限元法[M]. 北京:高等教育出版社,1987.
- [7] 李正英,李正良,熊辉,等. 大跨径拱桥被动减震控制的仿真分析[J]. 地震工程与工程振动,2005(6):172-177.
- [8] 何伟,何容,李晓克,等. 洛阳天堂塔钢结构施工三维仿真分析[J]. 施工技术,2015,44(8):76-79.
- [9] 李小珍,胡大琳,陈祥宝. 大跨度悬索桥施工状态的计算机仿真分析[J]. 中国公路学报,1998(4):67-72.
- [10] 郑凯锋,陈宁,张晓翘. 桥梁结构仿真分析技术研究[J]. 桥梁建设,1998(2):12-17.
- [11] 周岑,郑凯锋,范立础. 大跨度石拱桥的全桥结构仿真分析研究[J]. 土木工程学报,2004(3):89-92.
- [12] 石明兰,左小刚,夏樟华. 基于动力的石拱桥有限元模型修正[J]. 福州大学学报(自然科学版),2009,37(4):573-581.
- [13] 胡崇武,范立础. 大跨度分步施工石拱桥仿真分析[J]. 中国公路学报,2002(4):56-59.
- [14] 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.
- [15] 聂建国,樊健生. 700年石拱桥的静力加载试验与结构分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2003(6):840-843.
- [16] 吉荡. 某刚架拱桥加固方法及加固效果分析[J]. 城市道桥与防洪,2016(12):63-66,82,10.
- [17] 公路圬工桥涵设计规范:JTG D61—2005[S]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [18] 公路砖石及混凝土桥涵设计规范:JTJ 022—85[S]. 北京:人民交通出版社,1985.