

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2021.0103

甘磊,陈官运,马泽锴,等. 红旗渠曙光渡槽结构安全评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(5): 990-998, 1006. GAN L, CHEN G Y, MA Z K, et al. Structural safety assessment of Shuguang aqueduct pier of Red Flag Canal[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5): 990-998, 1006. (in Chinese)

红旗渠曙光渡槽结构安全评价

甘磊¹, 陈官运¹, 马泽锴¹, 曾威华²

(1. 河海大学水利水电学院, 南京 210098; 2. 中国安能集团厦门分公司, 福建 厦门 361000)

摘要:红旗渠曙光渡槽多年运行后出现不同程度破损, 存在一定安全隐患。基于 ABAQUS 软件, 建立渡槽三维有限元计算模型, 采用均质化理论对三维渡槽结构模型进行静力计算, 分析渡槽结构的应力和位移, 复核渡槽基础沉降, 同时考虑差异荷载及温度荷载对渡槽结构的影响, 综合评价该渡槽的结构安全。研究表明: 各槽墩压应力最大值主要分布在墩台和槽墩的接触部位, 拉应力最大值均出现在槽墩墩台底部, 最大压应力和拉应力分别为 2.90 MPa 和 2.29 MPa, 槽墩局部范围出现应力集中; 槽墩最大沉降值为 1.57 mm, 各相邻墩台沉降差最大值为 1.07 mm, 差异荷载造成的应力集中与温度荷载叠加效应会对槽墩中部产生一定影响。综合认定该渡槽结构安全为 B 级。

关键词:曙光渡槽; 裂缝; 应力; 沉降; 安全评价

中图分类号: TV311 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



为解决水资源分布不均匀的问题, 我国兴建了许多跨流域调水工程。随着工程建设的发展, 涌现出了大批的大型渡槽, 既解决了沿线周边城市的生活用水和工业用水, 又兼顾了农业用水的需要。运行多年后的渡槽结构易出现老化破损, 存在一定安全隐患, 其结构安全问题值得关注^[1-4]。

针对渡槽结构安全问题, 国内学者开展了相关研究, 如: 徐建国等^[5]依据符拉索夫理论和豪斯纳尔理论提出考虑槽内水体与槽身动力相互作用以及槽身剪力滞后影响的渡槽薄壁结构横向动力分析模型; 张伯艳等^[6]总结了渡槽结构研究进展, 考虑了槽内水体与槽壁及桩、土和结构的动力相互作用, 全面评估了渡槽结构的静动力特性; 李宗坤等^[7]建立了钢管混凝土拱组合梁渡槽结构有限元模型, 分析了渡槽结构的应力和变形特征; 赵瑜等^[8]基于三维有限元方法, 研究了大型预应力混凝土箱型渡槽的受力性能; 翟东辉^[9]基于 ANSYS 软件, 研究了渡槽结

构破坏前后工况下渡槽结构的应力和变形规律; 张艳平等^[10]以洛河渡槽为研究对象, 研究水压及温差耦合作用下渡槽结构的稳定性, 探讨运行期渡槽结构温度应力分布规律; 季日臣等^[11]研究了大型多纵梁矩形渡槽结构静力特性, 提出了一种简单实用的空间分析法用于配筋。以上研究对象多为混凝土渡槽, 作为等效连续介质材料进行结构计算。而浆砌石渡槽由浆砌块石和勾缝材料交错堆砌而成, 与常规混凝土渡槽结构有所不同。为研究浆砌石结构的应力应变特性, 俞昊捷等^[12]提出了一种等效体积单元法, 采用均质化理论对浆砌石结构的等效模拟, 计算分析了红旗渠空心坝应力应变特性。

红旗渠曙光渡槽是砌石结构渡槽, 已运行 50 余年, 现场安全检查发现渡槽出现了不同程度的老化。结合曙光渡槽现场检测情况, 采用均质化理论建立渡槽三维有限元计算模型, 计算不同工况下渡槽整体结构的应力、变形及基础沉降, 复核评价该渡槽结

收稿日期: 2020-09-01 修回日期: 2021-01-11 网络出版时间: 2021-02-20

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210220.1021.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609073); 江苏省自然科学基金项目(BK20201312); 中央高校基本科研业务费项目(2018B11514); 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放基金(DFZX2020003)

作者简介: 甘磊(1987—), 男, 江西抚州人, 副教授, 博士, 主要从事水工结构稳定分析等方面的教学与研究。E-mail: ganlei2015@hhu.edu.cn

构安全,研究成果可为类似渡槽工程的结构应力变形分析和安全评价提供参考。

1 计算理论

1.1 均质化理论方法

均质化理论方法是一种无须根据实际材料的组成来创建与真实结构完全一致的模型的方法,其有别于离散式模型方法,这种方法便于简化模型,使网格剖分更方便快捷,减少数值计算的工作量,并可以保证计算分析的准确性。

等效体积单元(representative volume element, RVE)由 Gambarotta 等^[13]于 1997 年提出,它是一种基于微观结构和微观力学的均质化理论方法,其目的就是通过研究砂浆和砌块材料的性质,用一个砌体等效体积单元反映砌体的多数力学特性,得到一个合适的连续单元模型,从而避开将砌块和砂浆分别考虑的难点^[6]。

等效体积单元需满足的条件:(1)包含所有组成相;(2)结构呈周期性连续分布;(3)满足以上 2 个条件的最小单元。对于砌体结构来说,选用等效体积单元作为分析单元,能够将砌体和砂浆考虑在内的同时,使用整体连续模型进行有限元分析,这就避免了离散式模型分析的繁琐,又包含了砌体和砂浆所有材料信息和几何拓扑信息。

1.2 结构静力计算理论

有限元静力分析方程^[14]为

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{Y} = \mathbf{R} \quad (1)$$

式中: \mathbf{K} 为结构的整体刚度矩阵; \mathbf{Y} 为在静态荷载向量作用下节点发生的静位移向量,是需求解的未知

$$I(T) = \iiint_{\Omega} \frac{1}{2} \left\{ \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{1}{a} \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial T}{\partial t} \right) T \right\} dx dy dz + \iint_{\Gamma_2} \left[\frac{1}{2} \beta T^2 - \beta T T_a \right] d\Gamma \quad (8)$$

当温度 T 在 $t=0$ 时取给定的初始条件 T_0 ,并使式(8)所表示的泛函 $I(T)$ 取极小值,那么,根据欧拉方程,温度场 T 必然在区域 Ω 内满足热传导方程,并在边界 Γ_2 上满足第 3 类边界条件。 T 即是所求的不稳定温度场。

2 渡槽计算模型

2.1 工程概况

红旗渠三千渠三支渠曙光渡槽位于林州市东岗镇东岗村东部 4 km 的丁冶岭,是三千渠第三支渠的重要建筑物,该渡槽全长 550.0 m,最高 16.0 m,底宽 5.4 m,顶宽 3.5 m,共 29 孔,中部 3 孔,跨径 10.0 m,其余孔跨 8.5 m,石拱结构。过水断面底宽

量; \mathbf{R} 为结构节点的静态荷载矩阵。

根据条件求解位移向量,可求出渡槽各单元的应力及应变分量,计算公式为

$$\mathbf{K}^e = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{B} d\Omega \quad (2)$$

式中: \mathbf{K}^e 为单元刚度矩阵; \mathbf{B} 为三维应力单元的应变几何矩阵; \mathbf{D} 为三维应力单元的弹性矩阵。

将已知量代入式(1),求得静态荷载效应下节点的静态位移向量 \mathbf{Y} ,渡槽各单元的应力和应变为

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{Y} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{Y} \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为渡槽应力分量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为渡槽应变分量。

1.3 温度荷载计算理论

计算主要考虑 3 类温度荷载:年温度变化产生的荷载、日温度变化产生的荷载、温度骤然变化产生的荷载,其中温度骤然变化产生的荷载主要考虑温度骤降的作用^[15-16]。

在浆砌石内部的温度场 $T(x, y, z, t)$ 满足热传导方程^[17]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (T \in \Omega) \quad (5)$$

式中: T 为砌石温度; a 为导热系数; θ 为绝热温升; t 为时间, x, y, z 为直角坐标分量; Ω 为温度场计算域。

在初始瞬时, T 等于给定的温度

$$\text{当 } t=0 \text{ 时, } T = T_0(x, y, z) \quad (6)$$

在边界 Γ_2 上,满足第三类边界条件

$$\text{当 } t > 0, \text{ 在 } \Gamma_2 \text{ 上, } \frac{\partial T}{\partial n} + \beta(T - T_a) = 0 \quad (7)$$

式中: β 为表面放热系数; λ 为导热系数; T_a 为气温。

根据变分原理,微分方程式(5)可转化为泛函的极值问题。取泛函

1.1 m,高 1.0 m,设计流量 1.0 m³/s。主要建筑物包括上游引渠、渡槽(有槽身、拱上结构、主拱圈、槽墩台)、下游引渠。

曙光渡槽为砌石结构,运行时间较长,砌石间的勾缝材料老化风化明显。现场工程质量检测评价为 B 级^[18],现场检查发现上游引渠、渡槽、下游引渠渠身或槽身上部结构,尤其是顶部区域砂浆脱缝严重。

2.2 计算模型及参数

基于 ABAQUS 软件,结合二次开发,开展渡槽结构的三维有限元法静力计算。三维有限元模型截取范围如下: X 方向沿水流方向渡槽两侧各延伸 40 m; Y 方向垂直水流方向渡槽各延长 30 m; Z 方向取承台以上所有渡槽结体及槽墩底部以下 40 m 处的地

基土体。三维有限元模型见图 1。

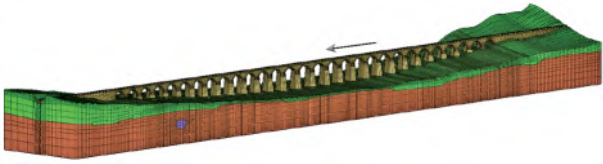


图 1 曙光渡槽有限元网格

Fig. 1 Finite element grids of Shuguang aqueduct

根据现场勘察测量结果,结合规范^[19]及类似工程经验,主要计算参数见表 1。粉质壤土的标准贯入击数为 7 次,承载力特征值取为 140 kPa;全风化闪

长斑岩的标准贯入击数为 22 次,建议承载力特征值取为 220 kPa^[20]。渡槽浆砌石材料参数基于均值化技术处理^[12],浆砌石线膨胀系数取 $0.7 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,导热系数取 $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{ } ^\circ\text{C})$,比热容取 $500 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{ } ^\circ\text{C})$,泊松比取 0.167,抗压强度取 5.0 MPa,抗拉强度取砂浆抗拉强度 0.10 MPa^[21]。渡槽相邻墩台间最小跨径长度最大值为 10 m,小于 25 m,相邻墩台间最小跨径长度取 25 m,采用规定^[19]公式计算,墩台基础地基的允许沉降量与相邻墩台基础的沉降差允许值分别为 100 mm 与 50 mm。

表 1 砌石体与地基材料计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of masonry body and foundation material

材料名称	参数			
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	线膨胀系数/($^\circ\text{C}^{-1}$)
浆砌石	2 400	3.5	0.167	0.7×10^{-5}
白云质灰岩	2 600	10.0	0.200	0.7×10^{-5}
粉质壤土	1 960	0.2	0.300	0.7×10^{-5}
填筑土	1 960	0.2	0.300	0.7×10^{-5}

渡槽位于桩号 K6+868.8 至 K7+428,但是渡槽孔数较多,各槽墩及跨孔所在位置不明,难以用桩号描述。为便于对计算结果进行描述,对典型截面及槽墩位置进行如下约定:对于槽墩而言,从桩号 K6+868.8 到桩号 K7+428,第 i 个槽墩编号为 P_i ,

如第 1 个槽墩编号为 P_1 ;对于渡槽各孔而言,从桩号 K6+868.8 到桩号 K7+428,第 j 个孔定义为 A_j ,如第 1 个孔编号为 A_1 。该编号方式与现场安全检查标号相同,见图 2。

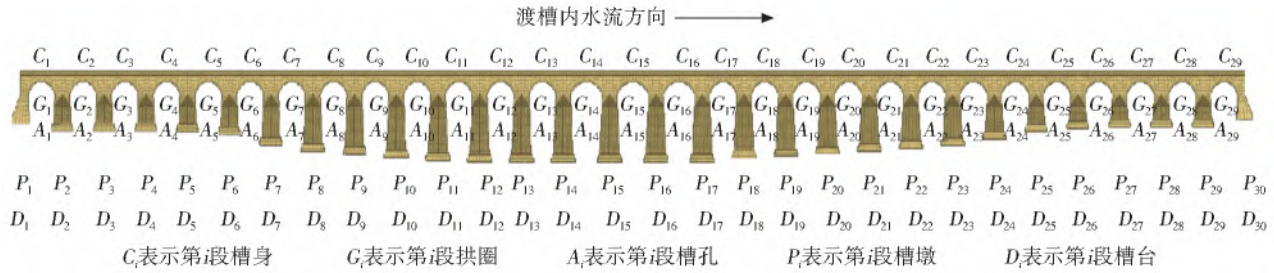


图 2 典型截面及槽墩位置

Fig. 2 Typical section and the position of aqueduct pier

2.3 温度荷载

根据温度资料统计数据,绘制林州市 2012 年 1 月至 2018 年 4 月日最高气温与最低气温曲线图以及

林州市 2012 年 1 月至 2018 年 4 月日平均温度曲线,见图 3。其最高温度为 $40 \text{ } ^\circ\text{C}$,最低温度为 $-13 \text{ } ^\circ\text{C}$,日平均最高温度为 $32.5 \text{ } ^\circ\text{C}$,日平均最低温度为 $-7.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

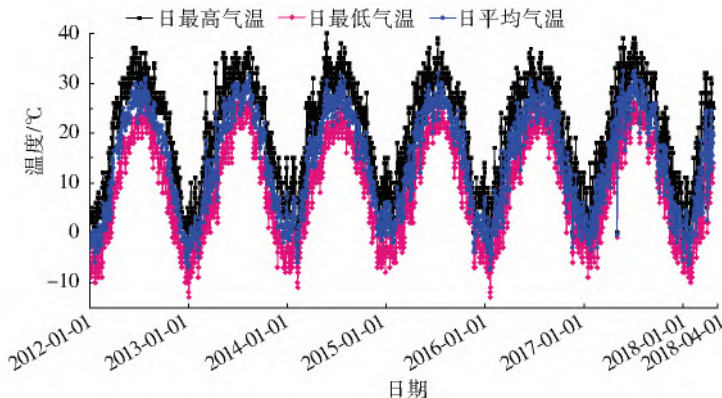


图 3 林州市 2012 年 1 月至 2018 年 4 月特征温度

Fig. 3 Characteristic temperature of Linzhou city from January 2012 to April 2018

曙光渡槽于1969年6月25日建成,6月的月平均温度为22.5℃,由于渡槽运行多年,砌石结构松散,温度应力可以在既有裂缝或者松散勾缝处引起较大的变形,进而使得温度应力有所降低,而本文采用抗拉强度与抗压强度对结构进行评估,因此,需要对温差进行合理调整。本文所使用的温度荷载考

虑2种情况,分别为体系1天内升温15℃和体系1天内降温15℃。

2.4 计算工况

结合渡槽实际运行情况,对开展渡槽结构开展静力计算,主要考虑了渡槽自重、水重、静水压力、风压力及温度荷载。具体荷载组合工况见表2。

表2 荷载效应量组合工况
Tab.2 Combination conditions of load effect quantity

荷载组合	计算情况	荷载工况	荷载					
			自重	水重	静水压力	风压力	温升	温降
基本组合	设计	工况1	✓	✓	✓	✓	✓	
	水深	工况2	✓	✓	✓	✓		✓
	空槽	工况3	✓			✓	✓	
		工况4	✓			✓		✓
偶然组合	满槽	工况5	✓	✓	✓	✓	✓	
	水深	工况6	✓	✓	✓	✓		✓

3 计算成果分析

3.1 应力分析

(1)结构应力。根据有限元计算成果,典型槽墩结构主应力分布见图4。工况1渡槽各槽墩的最大压应力出现在 P_{17} 墩台与槽墩的接触部位,为-2.90 MPa(规定压应力为负,拉应力为正),最大拉应力出现在 P_{19} 墩台基础的背风侧,为2.17 MPa,在设计水深情况下,温升时槽墩整体应力分布较均匀,槽墩中部和两侧均承受压应力且满足砌石胶凝材料的抗压强度,最大拉应力虽超过砌石胶凝材料抗拉强度,但只分布在槽墩墩台底部小范围内,对渡槽整体结构影响较小。工况2渡槽最大压应力出现在 P_{20} 墩台与槽墩的接触部位,为-2.79 MPa,最大拉应力出现在 P_{19} 槽墩墩台底部,为2.29 MPa,在设计水深情况下,由应力分布可以看出,温降时槽墩受拉应力影响较大,槽墩墩台底部和槽墩中部拉应力过大,超过了砌石胶凝材料抗拉强度。工况3渡槽最大压应力出现在 P_{17} 墩台与槽墩的接触部位,为-2.89 MPa,最大拉应力出现在 P_{19} 槽墩墩台底部,为2.16 MPa,在空槽情况下,温升时槽墩墩台底部拉应力过大,但只分布在局部小范围内,其他部位均承受压应力,且满足砌石胶凝材料抗压强度。工况4最大压应力出现在 P_{19} 墩台与槽墩的接触部位,为-2.78 MPa,最大拉应力出现在 P_{16} 的槽墩墩台底部,为2.28 MPa,在空槽情况下,温降时槽墩受拉应力影响较大,槽墩墩台底部和槽墩中部拉应力超过了砌石胶凝材料抗

拉强度。工况5渡槽最大压应力出现在 P_{17} 墩台与槽墩的接触部位,为-2.90 MPa,最大拉应力出现在 P_{19} 的槽墩墩台底部,为2.17 MPa,在满槽水深情况下,温升时槽墩墩台底部局部小范围内拉应力过大,其他部位均承受压应力,且满足砌石胶凝材料抗压强度。工况6渡槽最大压应力出现在 P_{19} 墩台与槽墩的接触部位,为-2.76 MPa,最大拉应力出现在 P_{16} 的槽墩墩台底部,为2.26 MPa,在满槽水深情况下,温降时槽墩受拉应力影响较大,槽墩墩台底部和槽墩中部拉应力超过了砌石胶凝材料抗拉强度。各工况最大压应力均满足砌石的抗压强度,温降时槽墩受拉影响较大,槽墩中部和墩台底部拉应力较大,超过了砌石胶凝材料抗拉强度,对槽墩结构影响较大。

(2)差异荷载。渡槽槽墩采用上面小、下面大的尺寸渐变槽墩,该形式有利于槽墩内部应力合理分布。但是,在长期运行过程中,槽墩勾缝砂浆严重脱落,槽墩应力会出现不连续现象。该现象可能会导致槽身重力经槽墩顶部沿着与渡槽顶部竖向投影相同尺寸的槽墩传递给地基,即下部渐变扩大部分的槽墩并未承受渡槽槽身的重力。

利用有限元法计算渡槽在竖向荷载作用下产生的应力,在设计荷载下槽墩中部截面剪应力见图5。槽身与槽墩接触边缘存在剪应力集中现象,在设计荷载作用下槽墩最大剪应力值454 kPa,发生在槽墩与底部墩台结合处。槽墩顶部也均有一定的应力集中现象,计算结果与初步分析由差异荷载引起剪应力集中相吻合。

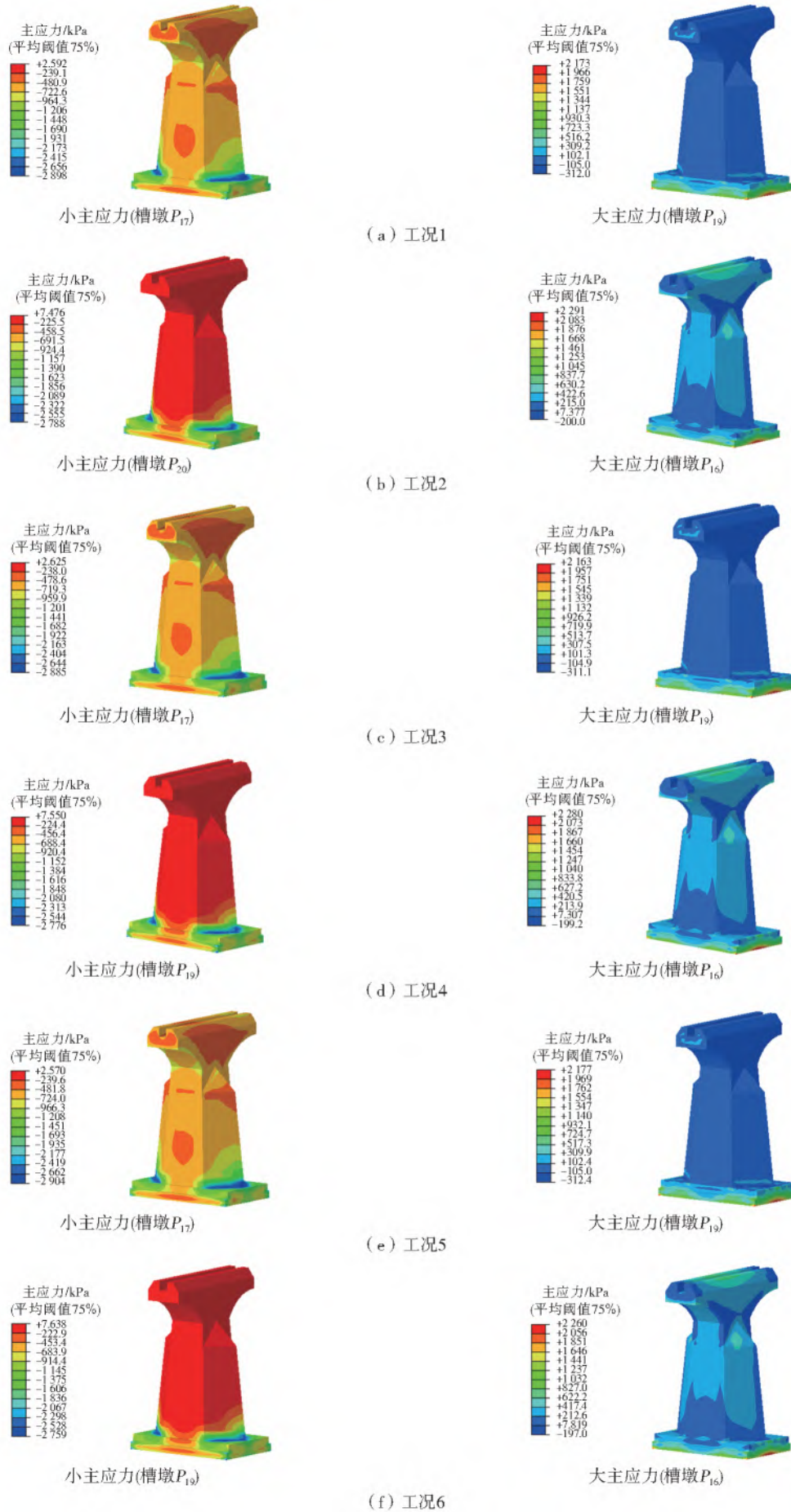


图 4 典型槽墩结构主应力分布

Fig. 4 Principal stress distribution of typical pier structure

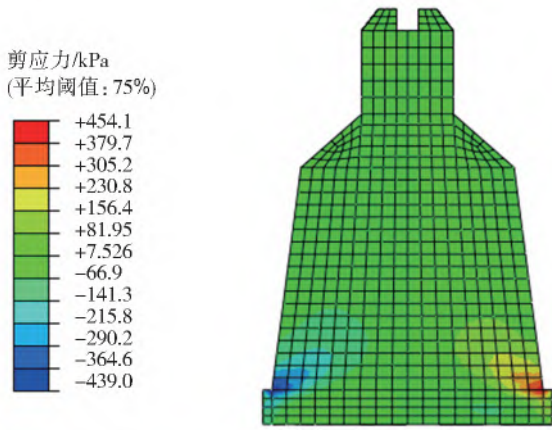


图5 工况2最高槽墩剪应力分布

Fig. 5 Shear stress distribution of the highest aqueduct pier under condition 2

(3)温度荷载。在温度荷载作用下,槽墩浆砌石表面会因热胀冷缩而产生变形,当外界气温降低时,槽墩内部温度场还未来得及随之变化,此时浆砌石表面可能会因急剧收缩产生竖向及水平向拉应力,水平向拉应力将会使得槽墩出现竖向裂缝。

根据渡槽所在地的365 d温度变化曲线,拟合出气温年变化周期函数,即公式(9)。利用三维有限元法计算渡槽因年温度变化形成的温度场,再根据温度场计算得到渡槽的应力场,选取槽墩中部一典型点绘制应力随温度变化过程线,见图6。

$$T_1 = 18.54 + 9.32 \cos[(2\pi(t_1 - 197.5)/365.0)] \quad (9)$$

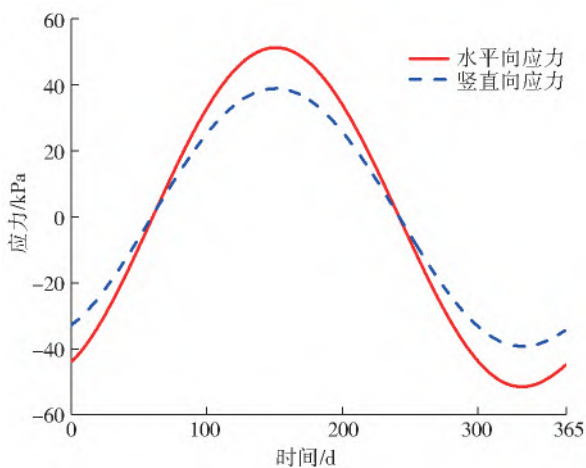


图6 年温度变化引起的槽墩应力

Fig. 6 Stress of aqueduct pier caused by annual temperature change

计算结果表明年温度变化引起的水平向应力最大值为50.8 kPa,竖向应力最大值为39.4 kPa。

依据渡槽所在地24 h温度变化曲线,拟合出气温日变化周期函数,即公式(10)。利用三维有限元法计算渡槽因日温度变化形成的温度场,再根据温度场计算得到渡槽的应力场,选取槽墩中部一典型

点绘制应力随温度变化过程线,见图7。

$$T_1 = 14.00 + 3.43 \cos[(2\pi(t_1 - 11)/24)] \quad (10)$$

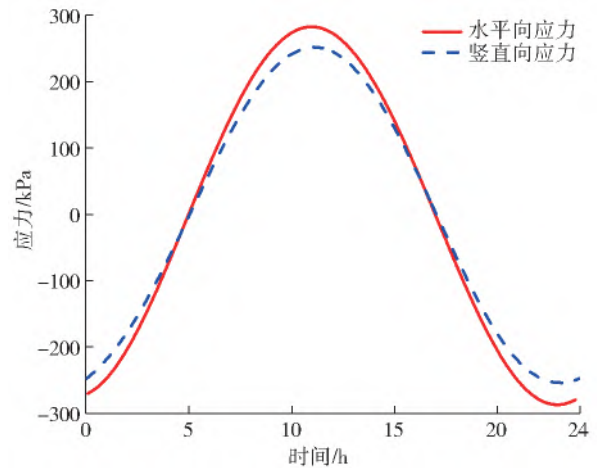


图7 日温度变化引起的槽墩应力

Fig. 7 Stress of aqueduct pier caused by diurnal temperature variation

计算结果表明日温度变化引起的水平向应力最大值为274.8 kPa,竖向应力最大值为245.6 kPa。

模拟寒潮来袭,温度在10 h内降低15℃,据此拟合出气温变化函数,即公式(11)。选取槽墩中部一典型点绘制应力随温度变化过程线,见图8。

$$T_1 = 3.82 - 1.5t_1 \quad (11)$$

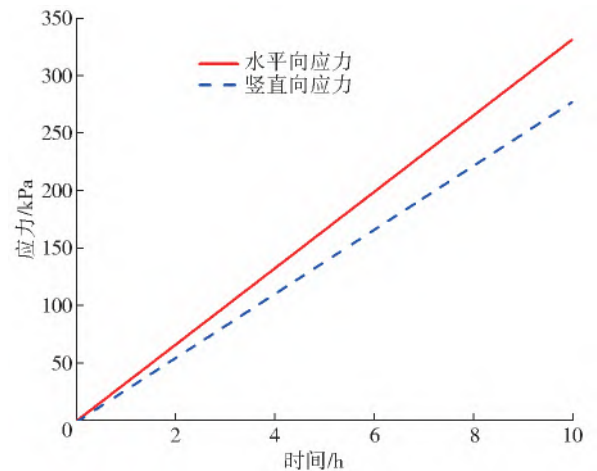


图8 温度骤降引起的槽墩应力

Fig. 8 Stress of aqueduct pier caused by sudden temperature drop

计算结果表明温度骤降引起的水平向应力最大值为332.1 kPa,竖向应力最大值为278.1 kPa。

根据最不利原则,叠加3种温度变化作用产生的应力。温度变化产生的横向应力值为657.7 kPa,竖向应力值为563.1 kPa,皆大于槽墩的抗拉强度。结合现场检查情况及最不利工况的剪应力分布,差异荷载造成的应力集中与温度荷载的叠加效应易导致槽墩中部产生水平向的拉应力,但温度裂缝一般发生在槽墩表面,不会对槽墩结构深部产生影响,建

议对表层裂缝进行及时修补。

3.2 变形分析

(1)水平位移。工况 1 渡槽横槽向位移主要出现在渡槽中部槽身处,最大值为 0.78 mm,出现在 P_9 的槽墩上部槽身处;顺槽向位移主要分布于渡槽两端,顺槽向位移最大值位于 P_7 槽墩临风侧,其值为 0.39 mm。工况 2 渡槽结构位移分布见图 9,渡槽横槽向位移主要出现在渡槽中部的槽身处,最大值为 4.87 mm,出现在 P_9 的槽墩上部槽身处,顺槽向位移最大值为 0.42 mm,出现在 P_6 槽墩背风侧。工况 3 横槽向位移最大值出现在 P_9 槽墩上部槽身

处,其值为 4.87 mm,顺槽向位移最大值为 0.39 mm,出现在 P_7 槽墩背风侧。工况 4 渡槽横槽向位移出现在 P_9 槽墩上部槽身处,其值为 4.87 mm,顺槽向位移最大值为 0.39 mm,出现在 P_7 槽墩背风侧。工况 5 渡槽横槽向位移最大值出现在 P_9 槽墩上部槽身处,其值为 4.88 mm,顺槽向位移最大值为 0.40 mm,出现在 P_7 槽墩临风侧。工况 6 渡槽横槽向位移最大值出现在 P_9 槽墩上部槽身处,其值为 4.87 mm,顺槽向位移主要发生的位置是渡槽结构两端,最大值为 0.38 mm,出现在 P_{25} 槽墩临风侧。

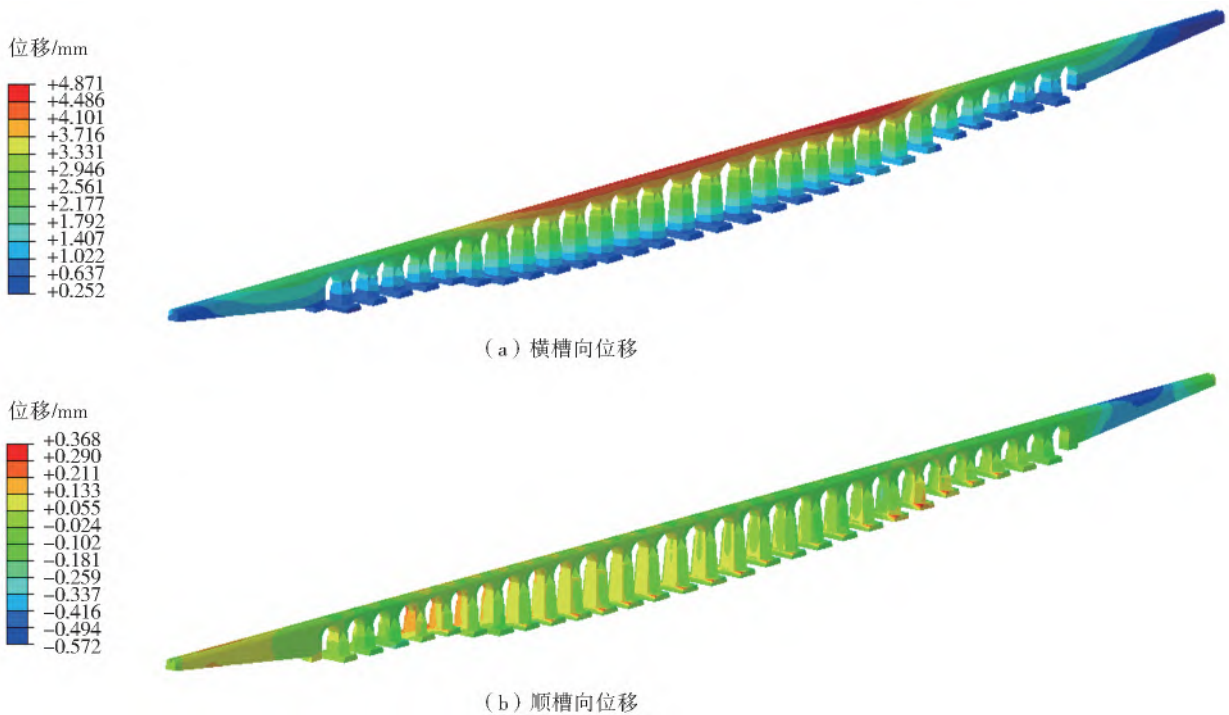


图 9 工况 2 渡槽结构位移分布

Fig. 9 Displacement distribution of aqueduct under condition 2

(2)沉降及沉降差。采用有限元法计算渡槽运行期各墩台地基沉降量与相邻墩台基础的沉降差,在静荷载作用下,墩台最大沉降以及各相邻墩台基础的沉降差最大值均发生在工况 6,即在偶然荷载

组合下的满槽水位+温降荷载组合,图 10 为工况 6 渡槽结构沉降分布图。由图 10 可知:墩台最大沉降值为 1.57 mm,各相邻墩台基础的沉降差最大值为 1.07 mm。

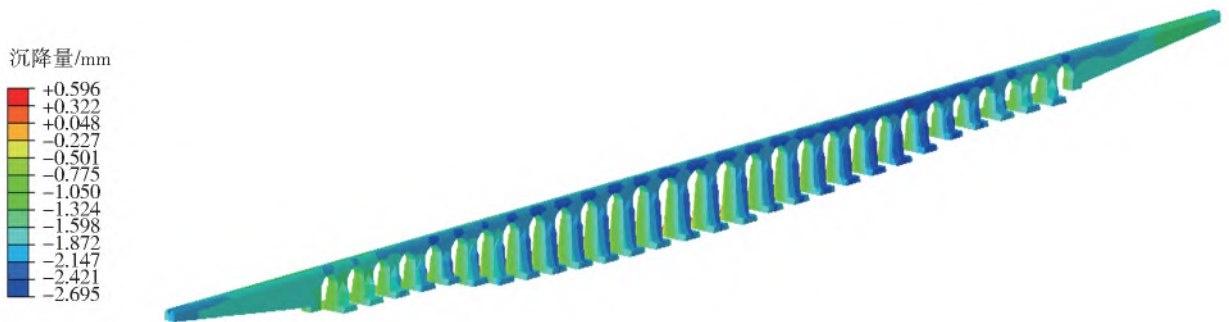


图 10 工况 6 渡槽结构沉降量分布

Fig. 10 Settlement distribution of aqueduct structure under condition 6

4 结 论

(1)曙光渡槽是浆砌石结构渡槽,不同荷载组合工况下,渡槽各槽墩压应力最大值主要分布在墩台和槽墩的接触部位,各槽墩拉应力最大值均出现在槽墩墩台底部。最大压应力为 2.9 MPa,最大拉应力值为 2.29 MPa,槽墩拉应力超过了砌石胶凝材料的抗拉强度,但只出现于局部小范围区域。但温降时槽墩受拉力影响较大,槽墩中部和墩台底部拉应力较大超过了砌石胶凝材料抗拉强度,对槽墩结构影响较大。

(2)在静荷载作用下,该渡槽横槽向位移主要位于渡槽中部的槽身处,顺槽向位移主要分布在渡槽结构两端,沉降所在位置主要是墩台的背风侧;各工况墩台基础沉降的最大值和相邻墩台基础的沉降差的最大值均发生在工况 6,最大沉降值为 1.57 mm,沉降差最大值为 1.07 mm。渡槽沉降及各相邻槽墩沉降差均分别小于其允许值 100 mm 和 50 mm,能满足要求。

(3)渡槽槽墩承受的差异荷载及温度荷载会使得槽墩中部受到水平向的拉应力,易引起纵向裂缝,且气温骤降会诱发渡槽槽墩产生表面温度裂缝,但其不会对槽墩结构深部产生影响,建议对槽墩中部加强变形监测,同时对表层裂缝进行修补。

(4)综合现场检测及渡槽应力变形计算成果,认定该渡槽结构安全为 B 级。

参考文献(References):

- [1] 顾培英,王岚岚,邓昌,等.我国渡槽结构典型破坏特征研究综述[J].水利水电科技进展,2017,37(5):1-8.(GU P Y,WANG L L,DENG C,et al. A review of typical failure characteristics of aqueduct structures in China[J]. Progress in Water Conservancy and Hydropower Science and Technology,2017,37(5):1-8.(in Chinese)) DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2017.05.001.
- [2] 周厚贵,马吉明,马金刚.国内外渡槽的发展与南水北调中线漕河渡槽[J].南水北调与水利科技,2007,5(3):14-17,20.(ZHOU H G,MA J M,MA J G. Development of aqueducts at home and abroad and caohe aqueduct in the middle route of south-to-north water diversion project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2007,5(3):14-17,20.(in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2007.03.006.
- [3] 刘东常,吴长征,岳中明,等.大型预应力混凝土梁式渡槽结构分析及设计研究[J].华北水利水电学院学报,1999,20(4):16-20.(LIU D C,WU C Z,YUE Z M,et al. Structural analysis and design of large prestressed concrete beam aqueduct[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydropower,1999,20(4):16-20.(in Chinese)) DOI:10.19760/j.ncwu.zk.1999.04.005.
- [4] 宋志鹏,张爱军,杨文超,等.宁夏红柳沟渡槽结构安全性评价[J].中国农村水利水电,2015(10):151-156.(SONG Z P,ZHANG A J,YANG W C,et al. Structural safety evaluation of hongliugou aqueduct in Ningxia[J]. China Rural Water Conservancy & Hydropower,2015(10):151-156.(in Chinese))
- [5] 徐建国,陈淮,王博,等.大型渡槽结构考虑流固耦合的动力建模研究[J].南京理工大学学报(自然科学版),2005,29(6):639-644.(XU J G,CHEN H,WANG B,et al. Dynamic modeling study of large aqueduct structure with fluid-structure coupling[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science),2005,29(6):639-644.(in Chinese)) DOI:10.14177/j.cnki.32-1397n.2005.06.003.
- [6] 张伯艳,刘云贺,陈厚群.U形渡槽结构静动力分析[J].水利学报,2004(1):74-77.(ZHANG B Y,LIU Y H,CHEN H Q. Analysis on static and dynamic characteristics of large-scale U-shaped aqueduct[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004(1):74-77.(in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2004.01.014
- [7] 李宗坤,何世玲,胡良明,等.钢管混凝土拱组合梁渡槽结构静力分析[J].郑州工业大学学报,2001,22(3):34-37.(LI Z K,HE S L,HU L M,et al. Static analysis of CFST arch composite beam aqueduct structure[J]. Journal of Zhengzhou University of Technology,2001,22(3):34-37.(in Chinese))
- [8] 赵瑜,赵平,李树瑶.大型预应力混凝土箱形渡槽结构三维有限元分析[J].长江科学院院报,1999,16(2):18-21.(ZHAO Y,ZHAO P,LI S Y. Three dimensional finite element analysis of large prestressed concrete box aqueduct structure[J]. Journal of Changjiang Academy of Sciences,1999,16(2):18-21.(in Chinese))
- [9] 翟东辉,常周梅.多因素作用下大型渡槽结构应力和变形规律研究[J].水利科技与经济,2017,23(1):1-9.(ZHAI D H,CHANG Z M. Study on the structural stress and deformation law of large-scale aqueduct under the action of multiple factors[J]. Water Conservancy Technology and Economics,2017,23(1):1-9.(in Chinese))
- [10] 张艳萍,邢红芳,杨德锋,等.渡槽运行期间受温度应力影响的稳定性分析[J].人民黄河,2019,41(9):144-148.(ZHANG Y P,XING H F,YANG D F,et al. Stability analysis of temperature stress effects during aqueduct operation[J]. Yellow River,2019,41(9):144-148.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2019.09.030.

- [11] 季日臣,陈尧隆.大型多纵梁矩形渡槽结构静力计算方法研究[J].水力发电学报,2005,24(5):80-84. (JI R C, CHEN Y L. Study on static structural calculation methods of large rectangle aqueduct structure with longitudinal beams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(5): 80-84. (in Chinese))
- [12] 俞昊捷,沈振中,徐力群,等.基于等效体积单元方法的空心坝工作特性有限元分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(4):16-20. (YU H J, SHEN Z Z, XU L Q, et al. Working behaviors of hollow dam based on RVE method by FEM[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Science), 2019, 41(4): 16-20. (in Chinese)) DOI: 10. 13393/j. cnki. issn. 1672-948X. 2019. 04. 004.
- [13] GAMBAROTTA L, LAGOMARSINO S. Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls, Part I: the mortar joint model and its applications[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26:423-439. DOI:10. 1002/(sici)1096-9845(199704)26:4<423::aid-eqe650>3. 0. co;2-#.
- [14] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1979. (ZHU B F. The finite element method theory and applications[M]. 2nd ed. Beijing:China Water & Power Press, 1979. (in Chinese))
- [15] 陈忠,张子明,倪志强.大型渡槽温度应力仿真研究[J].红水河,2008,27(1):32-38. (CHEN Z, ZHANG Z M, NI Z Q. Temperature stress simulation study on large aqueduct[J]. Hongshui River, 2008, 27(1): 32-38. (in Chinese))
- [16] 马虎迎,石明星,严娟.冬季运行期矩形渡槽温度应力分布规律研究[J].水利水电技术,2019,50(1):103-108. (MA H Y, SHI M X, YAN J. Study on the distribution law of temperature stress in rectangular aqueduct during winter operation[J]. Water Resources and Hydro-power Technology, 2019, 50(1): 103-108. (in Chinese)) DOI:10. 13928/j. cnki. wrahe. 2019. 01. 014.
- [17] 邵红艳.结构温度场和温度应力场分析[D].西安:西北工业大学,2001. (SHAO H Y. Analysis of structural temperature field and thermal stress field[D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2001. (in Chinese))
- [18] 马福恒.红旗渠一、二、三千渠水工建筑物检测与安全评价报告[R].南京:南京水利科学研究所,2019. (MA F H. Safety assessment report of the first, second and third main canals of Red Flag Canal[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2019. (in Chinese))
- [19] 水利部水利水电规划设计总院,陕西省水利水电勘测设计研究院.灌溉与排水工程设计标准:GB 50288—2018[S].北京:中国计划出版社,2018. (Ministry of Water Resources water Conservancy and Hydropower Planning and Design Institute, Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design. Design standard for irrigation and drainage engineering; GB 50288—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018. (in Chinese))
- [20] 南玉贤.红旗渠安全评估项目工程地质勘察报告[R].安阳:河南省豫北水利勘测设计院有限公司,2018. (NAN Y X. Engineering geological investigation report of safety assessment for Red Flag Canal[R]. Anyang: Henan Yubei Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd, 2018. (in Chinese))
- [21] 中华人民共和国水利部.砌石坝设计规范:SL 25—2006[S].北京:中国水利水电出版社,2006. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Design specification for stone masonry dam; SL 25—2006[S]. (in Chinese))

Structural safety assessment of Shuguang aqueduct pier of Red Flag Canal

GAN Lei¹, CHEN Guanyun¹, MA Zekai¹, ZENG Weihua²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Xiamen Branch, China Anneng Group, Xiamen 361000, China)

Abstract: To solve the problem of uneven distribution of water resources, numerous inter-basin water transfer projects have been built in China, including a great number of large aqueducts. After decades of operation, the aqueduct structure is prone to aging and damage, which has certain potential safety hazards. Shuguang aqueduct is one of the important buildings of the third main channel of the Red Flag Canal. The aqueduct has a total length of 550.0 m, a maximum height of 16.0 m, a bottom width of 5.4 m, and a top width of 3.5 m. The aqueduct is a masonry aqueduct, and its main buildings include upstream approach canal, aqueduct body, arch structure, main arch ring, pier and abutment, and downstream approach canal. After more than 50 years' operation, the on-site inspection found that the jointing materials between masonry were aged and weathered, and the upper structure of the upstream approach canal, aqueduct, and downstream approach canal or trough body, especially the mortar in the top area, was seriously out of joint, which deserved attention.

(下转第 1006 页)

sults were compared with the predicted results of SVM and BP neural network model.

When predicting the local scour pit depth of bridge pier under ice sheet conditions, the input factors of the model are: flow Froude number Fr , the ratio of water depth to pier diameter h/D , the ratio of median particle size of bed sand to pier diameter d_{50}/D , the ratio of ice cover roughness to channel bed roughness n_i/n_b . Output factor: scour pit depth DS , and the predicted results are compared with the test results. The correlation coefficient (r), root mean square error (δ_{RMSE}), mean absolute percentage error (δ_{MAPE}), and determination coefficient (R^2) was used as the evaluation indexes of the prediction results. When predicting the local scour pit depth of the bridge pier under the condition of open flow, the r of BP neural network model and SVM model are 0.89 and 0.88, and δ_{MAPE} is 38.8% and 31%, respectively. The r and δ_{MAPE} of local scour pit depth of piers are 0.83 and 0.53 cm, respectively, and 61.2% and 189%, respectively, according to Chinese code formula and American code formula. When predicting the scour pit depth under ice sheet conditions, the predicted r values are 0.78 and 0.73, and δ_{MAPE} values are 43% and 46%, respectively.

By integrating the test data of pier local scour under the current ice sheet and open flow conditions, the depth of the pier local scour pit was predicted by BP neural network model, SVM model, Chinese code, and American code. It is found that the study of pier local scour under open flow is enlightening, and the relationship between pier local scour depth and water depth, velocity, and pier diameter under open flow and ice cover is significant, there is a nonlinear relationship between the influence factors. When the BP neural network model and SVM model were used to predict the local scour depth of bridge piers under open flow, the accuracy is generally higher than the calculation results of Chinese code and American code. BP neural network model and SVM model showed good performance in predicting the local scour pit depth of bridge piers under open flow and ice cap, and the prediction results have high accuracy, which can provide a certain reference for the safety design of bridges.

Key words: ice cover; local scour; pier; prediction; BP neural network; support vector machine

.....

(上接第 998 页)

Based on ABAQUS software and homogenization theory, a three-dimensional finite element calculation model of the aqueduct was established to calculate the stress, deformation, and foundation settlement distribution of the whole structure of the aqueduct under different working conditions. Furthermore, the influence of differential load and temperature load on the aqueduct structure was presented. Finally, the structural safety of the aqueduct was comprehensively evaluated.

Under different load conditions, the maximum compressive stress of each pier of the Shuguang aqueduct was mainly distributed at the contact position between abutment and pier. The maximum tensile stress of each pier appeared at the bottom of the abutment of the pier. The maximum compressive stress and tensile stress were 2.90 MPa and 2.29 MPa, respectively. The tensile stress of the pier exceeded the tensile strength of the masonry cementitious material but only occurred in a small local area. However, when the temperature dropped, the pier was greatly affected by tensile force, and the tensile stress in the middle of the pier and the bottom of the pier exceeded the tensile strength of masonry cementitious material, which had a great influence on the structure of the pier. Under the action of static load, the transverse displacement of the aqueduct was mainly located in the middle of the aqueduct, the longitudinal displacement was mainly distributed at both ends of the aqueduct structure. The settlement of the aqueduct was mainly located on the leeward side of the pier and abutment. The maximum settlement of pier foundation and settlement difference of adjacent pier foundation under each working condition appeared in Condition 6, with the maximum settlement value of 1.57 mm and the maximum settlement difference of 1.07 mm. The settlement difference of the aqueduct and adjacent pier was less than the allowable value of 100 mm and 50 mm, respectively, which can meet the requirements. The differential load and temperature load on the aqueduct pier would cause horizontal tensile stress in the middle of the pier, which caused longitudinal cracks. The sudden drop in air temperature induce surface temperature cracks in the aqueduct pier, but it did not affect the deep part of the pier structure. Two suggestions were proposed, including strengthening deformation monitoring in the middle of the pier and repairing the surface cracks.

Through comprehensive analysis, it indicated that the structural safety of the aqueduct was recognized as Class B. The research methods and achievements can provide a reference for structural stress and deformation analysis and safety evaluation of similar aqueduct projects.

Key words: Shuguang aqueduct; crack; stress; settlement; safety assessment