

红旗渠南古洞渡槽应力变形及稳定性分析

甘磊,马洪影,马泽锴,江婷

(河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:针对红旗渠南谷洞浆砌石渡槽结构老化问题,基于 Hypermesh 软件生成三维有限元网格,建立渡槽的三维有限元模型,采用 ABAQUS 软件进行渡槽结构应力及变形计算,并采用材料力学法对渡槽结构稳定性进行复核。结果表明:墩台基础最大沉降量为 3.05 mm,相邻墩台基础的最大沉降差为 0.43 mm;渡槽的最大压应力为 4.56 MPa,最大拉应力为 1.93 MPa,出现在槽身侧壁局部区域;槽墩抗滑稳定和抗倾覆稳定安全系数最小值分别为 10.1 和 2.4,均大于规范允许值,综合分析表明该渡槽是安全的。

关键词:南古洞渡槽;有限元法;应力变形;稳定性;ABAQUS 软件

中图分类号:TV314 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)05-0070-06

Stress deformation and stability analysis of Nangudong Aqueduct in Hongqi Canal//GAN Lei, MA Hongying, MA Zekai, JIANG Ting (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at the aging problem of the Nangudong masonry aqueduct in the Hongqi Canal, a three-dimensional finite element mesh was generated based on the Hypermesh software, and a three-dimensional finite element model for the aqueduct was established. The ABAQUS software was used to calculate the structural stress and deformation of the aqueduct. The structure stability of the aqueduct was checked by the material mechanics method. The results show that the maximum settlement of the pier foundation is 3.05 mm. The maximum settlement difference of adjacent pier foundation is 0.43 mm. The maximum compressive stress of the aqueduct is 4.56 MPa and the maximum tensile stress is 1.93 MPa, which appear in the local area at the side wall of the aqueduct. The minimum safety coefficients of anti-sliding stability and anti-capsizing stability of the groove pier are 10.1 and 2.4, respectively, both larger than the allowable values. Comprehensive analysis shows that the aqueduct is safe.

Key words: Nangudong Aqueduct; finite element method; stress deformation; stability; ABAQUS software

渡槽是一个由桥梁、隧道或沟渠组成的输水建筑物^[1],通常需跨越铁路、公路、河流、山谷等,发挥调水、排洪、排沙、导流和通航等功能^[2-5]。但是大部分渡槽修建于 20 世纪 60 年代,不少工程已超过或接近设计使用年限^[6]。渡槽在长期运行过程中,受自然环境中诸多因素影响^[7],渡槽结构会有不同程度的损伤,甚至存在一定隐患,因此,有必要对此类渡槽开展应力变形及稳定性分析。

在渡槽安全性研究方面,李宗坤等^[8]建立了钢管混凝土拱组合梁渡槽结构的有限元模型,研究了渡槽结构的应力和变形特征。赵瑜等^[9]基于三维有限元方法,研究了大型预应力混凝土箱形渡槽的受力性能。吴轶等^[10]采用任意拉格朗日-欧拉 (ALE)方法分析了大型矩形渡槽、U 形渡槽-水耦合体系的动力特性。翟东辉等^[11]采用 ANSYS 软件计算了渡槽结构破坏前后的应力和变形规律。张伯艳等^[12]结合南水北调中线穿黄 U 形渡槽,研究了渡槽结构的静、动力反应。胡少伟等^[13]采用常微分方程求解器和有限元方法,开展了大型渡槽的动力特性和隔震分析。马虎迎等^[14]根据热传导理论,建立了北方地区某简支封闭矩形渡槽有限元模型,研究了渡槽在冬季运行期温度应力分布规律。杨乐等^[15]考虑到混凝土弹性模量随湿度的变化和湿胀效应,研究了渡槽槽壁湿度不同扩散深度对渡槽变形及内力性能的影响。

本文针对南古洞渡槽建立三维有限元模型,计

算不同工况下渡槽的位移和应力分布;采用材料力学法复核渡槽的稳定性,评估渡槽结构整体安全性。

1 计算公式

1.1 有限元计算

渡槽砌石体结构采用线弹性本构模型。在利用超载法计算安全系数时,地基土体采用理想弹塑性本构模型,屈服破坏准则选用 D-P 准则。

利用有限元法进行计算,将结构离散化,选择位移插值函数,静力有限元支配方程为

$$\mathbf{K}\delta = \mathbf{F} \tag{1}$$

式中: δ 为结构位移列向量; $\mathbf{K}$ 为总刚度矩阵; $\mathbf{F}$ 为结构荷载列向量。总刚度矩阵 $\mathbf{K}$ 由各单元刚度矩阵 $\mathbf{K}^e$ 合成:

$$\mathbf{K} = \sum \mathbf{K}^e \tag{2}$$

$$\mathbf{K}^e = \iiint \mathbf{B}^T \mathbf{D}^e \mathbf{B} dx dy dz \tag{3}$$

式中: $\mathbf{B}$ 为应变矩阵; $\mathbf{D}^e$ 为与单元材料相关的弹性矩阵。

根据 GB 50288—2018《灌溉与排水工程设计标准》^[16],非岩石地基上外部为超静定结构的渡槽基础,相邻墩台基础的基底应力或地基土质不同时,应对地基沉降量进行复核。运行期地基沉降量应不大于渡槽墩台基础的允许沉降量,相邻墩台的地基沉降差应不大于渡槽墩台基础的允许沉降差。运行期墩台基础的允许沉降量和允许沉降差计算公式如下:

$$h_1 = 20\sqrt{l} \tag{4}$$

$$\Delta h_1 = 10\sqrt{l} \tag{5}$$

式中: h_1 为运行期墩台基础的允许沉降量,mm; l 为相邻墩台间最小跨径长度,m,其值小于 25 m 时,仍以 25 m 计; Δh_1 为运行期墩台基础的允许沉降差,mm。

1.2 抗震计算

采用拟静力法进行渡槽的抗震计算,同时考虑顺槽向、横槽向和竖向的地震作用^[17]。计算地震作用效应时,沿建筑物高度作用于质点 i 的水平向地震惯性力代表值 E_i 按下式计算:

$$E_i = a_h \xi G_i \alpha_i / g \tag{6}$$

式中: a_h 为水平向地震加速度代表值,当计入竖向地震惯性力时,用竖向地震加速度代表值 a_v 代替 a_h ,取 $a_v = 2/3 a_h$; ξ 为地震作用的效应折减系数,取为 0.25; G_i 为集中在质点 i 的重力作用标准值; α_i 为质点 i 的地震惯性力的动态分布系数^[17]; g 为重力加速度,取 9.81 m/s²。

1.3 稳定计算

依据 GB 50288—2018《灌溉与排水工程设计标

准》^[16],抗滑动稳定安全系数按下式计算:

$$K_c = \frac{f_e \sum N}{\sum P} \tag{7}$$

式中: K_c 为抗滑动稳定安全系数; f_e 为基底面与地基土之间的摩擦系数; $\sum N$ 为作用于基底面所有铅直力的总和,kN; $\sum P$ 为作用于基底面所有水平力的总和,kN。

本文的抗倾覆稳定安全系数采用倾覆破坏准则 A 及准则 B 计算。

准则 A:按墩底与地基不出现拉应力控制,则

$$P = \frac{F_z}{B} - \frac{6M}{B^2} K_0 \geq 0 \tag{8}$$

由式(8)可得

$$K_0 \leq \frac{F_z B}{6M} \tag{9}$$

式中: P 为迎风侧基底压应力,kPa; K_0 为抗倾覆稳定安全系数; M 为风荷载和地震荷载等水平力引起的力矩,kN·m; F_z 为基底以上全部竖向力之和,kN; B 为基底宽度,m。

准则 B:按墩底压应力不超过地基承载力控制,则

$$P = \frac{F_z}{B} + \frac{6M}{B^2} K_0 \leq P_M \tag{10}$$

由式(10)可得

$$K_0 \leq \frac{\left(P_M - \frac{F_z}{B}\right) B^2}{6M} \tag{11}$$

式中: P_M 为地基允许压应力,kPa,对于承受水平荷载的结构,最大允许压应力不超过平均承载力的 1.2 倍。

2 渡槽结构分析模型

2.1 工程概况

红旗渠南谷洞渡槽位于南谷洞水库下游 700 m 处,横跨露水河,是总干渠的重要咽喉工程之一。南谷洞渡槽级别为 3 级,渡槽长 130 m,宽 11.42 m,高 11.4 m,另加基础 2~3 m,单跨 9 m,石砌拱形结构,拱圈厚 0.5 m,共 10 孔,故又称“十孔渡槽”。渡槽挡水墙高 4.3 m,底宽 6.2 m,槽底纵坡 1/3 600,设计过水流量 23 m³/s,桥下排泄露水河 272 km²流域面积的洪水。经现场安全检测表明,渡槽砌石基本完整,结构基本稳定,但渡槽下部石拱砌筑砂浆老化严重,局部缺失,个别孔位存在轻微渗水或滴水现象,且各拱圈均存在不同程度的变形,这会对渡槽结构的安全性和耐久性造成一定的影响。

2.2 计算模型

采用 Hypermesh 软件生成三维有限元网格,渡槽槽身、槽墩及地基计算采用六面体单元,局部采用楔形体单元过渡,生成三维实体单元。模型坐标系遵守右手法则, x 为顺渡槽方向, y 为渡槽横向, z 为铅直向上。计算范围如下: x 方向取渡槽结构向两侧各延伸 40 m, y 方向取渡槽结构向两侧各延长 40 m, z 方向选取承台以上所有渡槽结构体及槽墩底部以下 60 m 范围的地基岩体。整体有限元网格如图 1 所示,其中节点总数 431 294,单元总数368 642,应力规定以拉为正、压为负。沿 y 轴向,即顺水流方向,对渡槽槽身及槽墩典型截面进行编号:P1 ~ P11 为渡槽各槽墩的编号,C1 ~ C10 为各槽墩正上方槽身的编号,G1 ~ G11 为各槽墩上部渠道内壁的编号,D1 ~ D11为各槽墩底部墩台的编号,如图 2 所示。

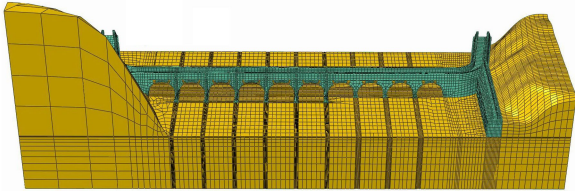


图1 南古洞渡槽有限元网格

2.3 计算参数

该渡槽模型的砌石体与地基计算参数由地质勘测单位提供^[18],具体参数取值见表 1。

表 1 砌石体与地基材料参数

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹模/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	线膨胀 系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
浆砌石	2400	3 500	0.21			8×10^{-6}
勾 缝	2400	50	0.21			8×10^{-6}
岩石地基	2500	10 000	0.20	25	35	6×10^{-6}
杂色卵石	1960	10	0.31	20.6	38	1×10^{-3}
中 砂	1960	10	0.30	20.6	28	1×10^{-3}

依据 GB 50288—2018《灌溉与排水工程设计标准》^[16],浅基础应与墩台一起进行抗滑动稳定和抗倾覆稳定验算。该渡槽的级别为 3 级^[18],摩擦系数取为 0.3,其抗滑动稳定安全系数 K_s 和抗倾覆稳定的安全系数 K_0 应分别不小于规范允许值 1.3 和 1.5。

2.4 计算工况

该渡槽位于林州市东岗镇,地震烈度为Ⅶ度,按Ⅱ类场地取值,水平向地震加速度代表值为 0.15g,竖向地震加速度代表值取水平向地震加速度代表值

的 2/3,反应谱特征周期为 0.40 s^[19]。根据 GB 51247—2018《水工建筑物抗震设计规范》^[17],采用拟静力法进行抗震复核。该渡槽结构计算荷载工况如表 2 所示。

表 2 荷载组合工况

荷载组合	水深	荷载工况	自重	水重	静水压力	风压力	土压力	温度荷载		地震荷载
								温升	降温	
基本组合	设计水深	工况 1	√	√	√	√	√	√		
	水深	工况 2	√	√	√	√	√		√	
	空槽	工况 3	√			√	√	√		
		工况 4	√			√	√		√	
偶然组合	满槽水深	工况 5	√	√	√	√	√	√		
	水深	工况 6	√	√	√	√	√		√	
	设计水深	工况 7	√	√	√	√	√	√		√
	水深	工况 8	√	√	√	√	√		√	√

3 计算结果与分析

3.1 基础沉降

南谷洞渡槽相邻墩台间最小跨径长度最大值为 20 m,小于 25 m,根据式(4)和式(5)计算所得各墩台基础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。

采用有限单元法计算渡槽运行期各工况下各墩台基础沉降量与相邻墩台基础的沉降差,结果见表 3 和表 4。

表 3 墩台基础沉降量

位置	沉降量/mm							
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
D1	1.30	1.27	0.47	0.45	1.65	1.63	1.90	1.90
D2	1.49	1.60	0.81	0.87	1.80	1.89	2.22	2.22
D3	1.56	1.55	0.88	0.88	1.84	1.84	2.32	2.32
D4	1.66	1.63	0.99	0.95	1.96	1.92	2.51	2.50
D5	1.72	1.76	1.05	1.08	2.01	2.04	2.68	2.69
D6	1.80	1.87	1.15	1.21	2.09	2.15	2.87	2.87
D7	1.89	1.97	1.27	1.35	2.15	2.25	3.05	3.05
D8	1.79	1.82	1.25	1.29	2.02	2.06	2.62	2.62
D9	1.86	1.79	1.34	1.27	2.07	2.01	2.75	2.76
D10	1.77	1.77	1.28	1.27	1.99	1.99	2.87	2.87
D11	1.70	1.71	1.21	1.23	1.91	1.92	2.97	2.97

由表 3 可知,静荷载作用下,墩台基础的最大沉降量为 2.25 mm,发生在偶然组合下的满槽水深+降温荷载工况(工况 6);地震荷载作用下,墩台基础的最大沉降量为 3.05 mm,发生在偶然组合的地震工况(工况 7 和 8)。各工况墩台基础的沉降量均小于

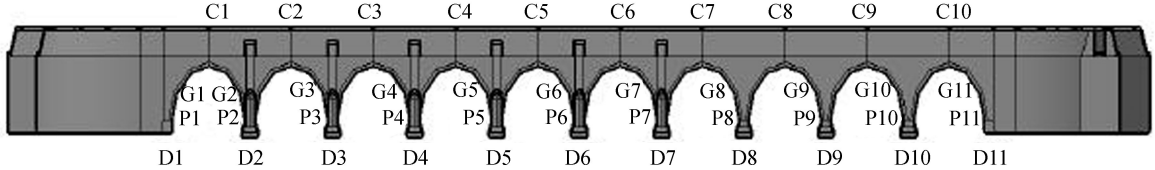


图 2 槽墩及拱圈编号

表4 相邻墩台基础沉降差

位置	沉降差/mm							
	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	工况6	工况7	工况8
D1-D2	-0.19	-0.33	-0.34	-0.42	-0.15	-0.26	-0.32	-0.32
D2-D3	-0.07	0.05	-0.07	-0.01	-0.04	0.05	-0.10	-0.10
D3-D4	-0.10	-0.08	-0.11	-0.07	-0.12	-0.08	-0.19	-0.18
D4-D5	-0.06	-0.13	-0.06	-0.13	-0.05	-0.12	-0.17	-0.19
D5-D6	-0.08	-0.11	-0.10	-0.13	-0.08	-0.11	-0.19	-0.18
D6-D7	-0.09	-0.10	-0.12	-0.14	-0.06	-0.1	-0.18	-0.18
D7-D8	0.10	0.15	0.02	0.06	0.13	0.19	0.42	0.43
D8-D9	-0.07	0.03	-0.09	0.02	-0.05	0.05	-0.13	-0.14
D9-D10	0.09	0.02	0.06	0.00	0.08	0.02	-0.12	-0.11
D10-D11	0.07	0.06	0.07	0.04	0.08	0.07	-0.10	-0.10

规范允许沉降量 100 mm,符合规范要求。从表4可知,静荷载作用下,各相邻墩台基础的沉降差最大为0.42 mm,发生在基本组合的空槽+温降荷载工况(工况4);地震荷载作用下,沉降差最大为0.43 mm,发生在偶然组合的地震荷载+温降荷载工况(工况8)。综上,各相邻墩台基础的沉降差均小于规范允许沉降差50 mm,满足规范要求。

3.2 应力

依据SL25—2006《砌石坝设计规范》^[20]和现场检测情况,拟定南谷洞渡槽胶凝材料标号抗压强度为5.0 MPa,抗拉强度为0.10 MPa。采用有限单元法计算得到各工况应力极值分布如表5所示。工况6和工况8的渡槽结构第一主应力分布如图3所示。工况1和工况7的渡槽结构第三主应力分布如图4所示。

表5 各工况应力极值分布

工况	最大拉应力/ MPa	最大拉应力发生部位	最大压应力/ MPa	最大压应力发生部位
1	0.69	上游侧裂缝区砌石体上方的C1槽身内侧壁底部	-3.01	下游侧D10底部
2	1.30	上游侧裂缝区砌石体上方的C1槽身内侧壁底部	-2.31	下游侧D11下部
3	0.50	上游侧裂缝区砌石体上方的C1槽身内侧壁底部	-2.55	下游侧D11底部
4	1.03	上游侧G2槽墩上方的渠道内侧壁顶部	-1.88	下游侧D11底部
5	1.88	上游侧裂缝区砌石体上方的C1槽身内侧壁底部	-2.88	下游侧D10底部
6	1.93	上游侧裂缝区砌石体上方的C1槽身内侧壁底部	-2.20	下游侧D9底部
7	0.78	上游侧裂缝区砌石体上方的C1槽身内侧壁底部	-4.56	下游侧D9底部
8	1.58	上游侧裂缝区砌石体上方的C1槽身内侧壁底部	-3.93	下游侧D9底部

由表5可知,在静荷载作用下,渡槽结构的最大压应力为3.01 MPa,发生在基本组合下的设计水深+温升荷载工况(工况1);最大拉应力为1.93 MPa,发生在偶然组合下的满槽水深+温降荷载工况

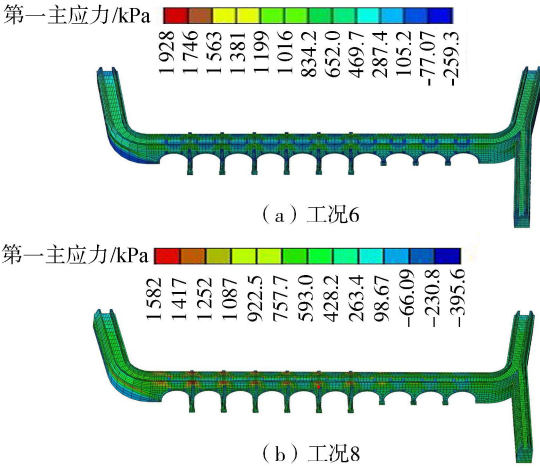


图3 典型工况下渡槽结构第一主应力分布

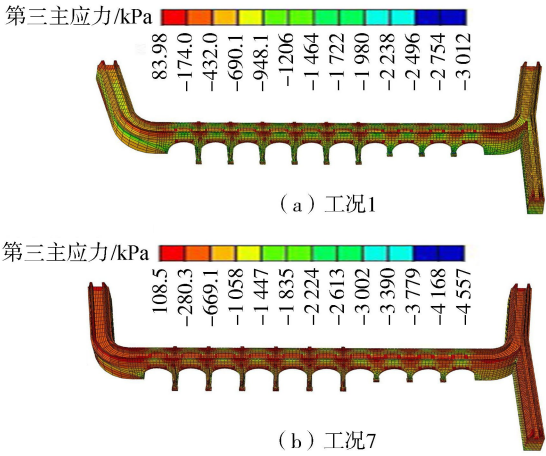


图4 典型工况下渡槽结构第三主应力分布

(工况6)。在地震荷载作用下,渡槽的最大压应力为4.56 MPa,发生在偶然组合下的地震荷载+温升荷载工况(工况7);最大拉应力为1.58 MPa,发生在偶然组合下的地震荷载+温降荷载工况(工况8)。各工况渡槽的最大压应力均小于允许值,而最大拉应力均大于允许值。但通过分析可知主要是由温度应力引起,其拉应力仅出现在上游侧裂缝区砌石体上方的C1~C6槽身内侧壁底部局部区域,拉应力区范围很小,且深度较浅(图3),不会威胁渡槽整体结构安全。

3.3 稳定性

在抗滑稳定和抗倾覆稳定安全系数计算中,考虑了有限元等效荷载和计算荷载两种方式^[21],偏于安全考虑选取两种方法计算结果的较小值,其抗滑稳定计算结果如表6所示,抗倾覆稳定计算结果如表7所示。

由表6可知,该渡槽各槽墩的抗滑稳定安全系数较小值均大于规范允许值1.3,满足规范要求,其中最小值为10.1,位于槽墩P1处。由表7可知,该渡槽各槽墩抗倾覆稳定安全系数最小值均大于规范允许值1.5,满足规范要求,其中最小值为2.4,位于

表 6 渡槽各槽墩抗滑稳定安全系数

编号	K_e		
	有限元等效荷载	计算荷载	较小值
P1	10.3	10.1	10.1
P2	38.5	32.8	32.8
P3	284.0	23.9	23.9
P4	57.7	52.4	52.4
P5	54.3	47.6	47.6
P6	59.4	58.6	58.6
P7	58.7	43.7	43.7
P8	53.6	43.8	43.8
P9	54.5	37.8	37.8
P10	33.8	27.1	27.1
P11	41.2	29.5	29.5

表 7 渡槽各槽墩抗倾覆稳定安全系数

K_0					
编号	准则 A		准则 B		最小值
	有限元等效荷载	计算荷载	有限元等效荷载	计算荷载	
P1	10.3	8.8	7.5	7.3	7.3
P2	5.7	6.2	2.5	5.3	2.5
P3	5.9	5.3	2.6	4.5	2.6
P4	5.7	5.5	2.5	4.7	2.5
P5	5.6	5.4	2.4	4.6	2.4
P6	5.6	4.8	2.4	4.1	2.4
P7	5.6	6.3	2.4	5.3	2.4
P8	99.7	8.7	3.6	7.1	3.6
P9	88.1	4.8	3.4	4.1	3.4
P10	79.7	6.3	4.0	5.3	4.0
P11	48.6	8.7	7.6	7.1	7.1

槽墩 P5、P6、P7 处。综上所述,该渡槽结构的稳定性满足规范要求。

4 结 论

- a. 静荷载作用下,墩台基础的最大沉降量为 2.25 mm,相邻墩台基础最大沉降差为 0.42 mm;地震荷载作用下,墩台基础的最大沉降量为 3.05 mm,相邻墩台基础最大沉降差为 0.43 mm。各墩台基础沉降量与相邻墩台基础的沉降差均小于其规范允许值 100 mm 与 50 mm,沉降满足要求。
- b. 静荷载作用下,渡槽结构的最大压应力为 3.01 MPa,最大拉应力为 1.93 MPa;地震工况下,渡槽的最大压应力为 4.56 MPa,最大拉应力为 1.58 MPa。各荷载组合下,渡槽的最大压应力小于规范允许值;最大拉应力大于规范允许值,但仅出现在槽身侧壁局部区域,不影响渡槽整体结构的稳定。
- c. 各槽墩的抗滑稳定安全系数最小值为 10.1,大于规范允许值 1.3;各槽墩抗倾覆稳定安全系数最小值为 2.4,大于规范允许值 1.5,表明该渡槽的抗滑稳定和抗倾覆稳定均满足规范要求。
- d. 综合分析表明,该渡槽能够安全运行,整体

稳定满足要求。

参考文献:

[1] 李秀华,康秋燕,崔鲁星.单箱多纵梁渡槽位移和应力的动力响应分析[J].水利规划与设计,2018(6):113-115. (LI Xiuhua, KANG Qiuyan, CUI Luxing. Dynamic response analysis of displacement and stress of single box multi-girder aqueduct [J]. Water Conservancy Planning and Design, 2018(6):113-115. (in Chinese))

[2] 王尉英,李洪强,陈星.岩石岭水库总干渠大塘口渡槽安全鉴定及评价[J].小水电,2018(5):37-40. (WANG Weiying, LI Hongqiang, CHEN Xing. Safety appraisal and evaluation of Datangkou Aqueduct, the main channel of rockling reservoir [J]. Small Hydro Power, 2018(5):37-40. (in Chinese))

[3] 黄平,姚威,彭辉.施加预应力锚索的渡槽结构应力变形特性研究[J].人民黄河,2010,32(7):103-104. (HUANG Ping, YAO Wei, PENG Hui. Research on stress deformation characteristics of aqueduct structure with prestressed anchor cable [J]. Yellow River, 2010, 32(7):103-104. (in Chinese))

[4] 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 Dongchang, WU Changzheng, YUE Zhongming, et al. Research on analysis and design of the large-scale prestressed concrete beam flume structure[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 1999, 20(4):16-20. (in Chinese))

[5] 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. (ZHOU Hougui, MA Jiming, MA Jingang. Development of domestic and overseas aqueducts and Caohe Aqueduct on Mid-Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2007, 5(3):14-17. (in Chinese))

[6] 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 Zhipeng, ZHANG Aijun, YANG Wenchao, et al. The structural security analysis of the Hongliugou Aqueduct in Ningxia [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(10):151-156. (in Chinese))

[7] 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 Peiying, WANG Lanlan, DENG Chang, et al. Review of typical failure characteristics of aqueduct structures in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(5):1-8. (in Chinese))

[8] 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 Zongkun, HE Shiling, Hu Liangming, et al.

- Structural static analysis of steel tube concrete arched combined beam aqueduct [J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 2001, 22 (3): 34-37. (in Chinese))
- [9] 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 Yu, ZHAO Ping, LI Shuyao. Three-dimensional finite element analysis of large prestressed concrete box flume structure [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(2): 18-21. (in Chinese))
- [10] 吴轶,莫海鸿,杨春.大型渡槽-水耦合体系动力特性分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2004,32(9):76-81. (WU Yi, MO Haihong, YANG Chun. Analyses of dynamic characteristics of large-scale aqueduct-water coupling systems [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(9):76-81. (in Chinese))
- [11] 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 Donghui, CHANG Zhoumei. Study on the stress and deformation law of aqueduct structure under multi-factor coupling [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2017, 23 (1): 1-9. (in Chinese))
- [12] 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,2004,35(1):76-79. (ZHANG Boyan, LIU Yunhe, CHEN Houqun. Analysis on static and dynamic characteristics of large-scale U-shaped aqueduct [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35 (1): 76-79. (in Chinese))
- [13] 胡少伟,游日.南水北调大型渡槽结构抗震安全性研究[J].防灾减灾工程学报,2011,31(5):496-500. (HU Shaowei, YOU Ri. Structural safety analysis of large-sized aqueduct for South-North Water Diversion Project[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011,31(5): 496-500. (in Chinese))
- [14] 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 Huiying, SHI Mingxing, YAN Juan. Study on temperature stress distribution law of rectangular aqueduct during winter operation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50 (1): 103-108. (in Chinese))
- [15] 杨乐,王亚红,李宗利,等.湿度对薄壁渡槽受力变形的影响分析[J].水利水运工程学报,2019(4):92-99. (YANG Le, WANG Yahong, LI Zongli, et al. Analysis of influences of humidity on stress deformation of thin-wall aqueduct [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019 (4): 92-99. (in Chinese))
- [16] 中华人民共和国水利部.灌溉与排水工程设计标准:GB50288—2018[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [17] 中国水利水电科学研究院.水工建筑物抗震设计规范:GB 51247—2018 [S]. 北京:中国计划出版社,2018.
- [18] 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.
- [19] 中国地震局.中国地震动参数区划图:GB 18306—2015 [S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [20] 贵州省水利厅.砌石坝设计规范:SL25—2006[S].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [21] 马福恒,胡江.红旗渠安全综合评级报告[R].南京:南京水利科学研究院,2019.

(收稿日期:2019-11-20 编辑:雷燕)

(上接第54页)

- [21] 胡义明,梁忠民,杨好周,等.基于趋势分析的非一致性水文频率分析方法研究[J].水力发电学报,2013,32(5):21-24. (HU Yiming, LIANG Zhongmin, YANG Haozhou, et al. Study on frequency analysis method of non-stationary observation series based on trend analysis [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32 (5):21-24. (in Chinese))
- [22] 孙华锋.变化环境下非一致性洪水频率分析及重现期研究[D].天津:天津大学,2017.
- [23] RIGBY A R, STASINOPOULOS D M. Generalized additive models for location scale and shape[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 2005, 54(3):507-554.
- [24] YAN L, XIONG L H, GUO S L, et al. Comparison of four nonstationary hydrologic design methods for changing environment[J]. Journal of Hydrology, 2017, 551(8):132-150.
- [25] 李凌琪,熊立华,江聪,等.气温对长江上游巴塘站年径流的影响分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(7):1142-1149. (LI Lingqi, XIONG Lihua, JIANG Cong, et al. Impact of air temperature on annual runoff of batang station in the headstream of Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(7):1142-1149. (in Chinese))
- [26] FILLIBEN J J. The probability plot correlation coefficient test for normality[J]. Technometrics, 1975, 17(1):111-117.
- [27] 郑锦涛,陈伏龙,张鑫厚,等.基于GAMLSS模型的玛纳斯河设计年径流分析[J].气候变化研究进展,2018,14(3):257-265. (ZHENG Jintao, CHEN Fulong, ZHANG Xinhou, et al. Analysis of design annual runoff of Manas River based on GAMLSS model [J]. Advances in Climate Change Research, 2018, 14 (3): 257-265. (in Chinese))
- [28] 高洁.基于GAMLSS的雅砻江流域极端降水时空特性研究[J].水力发电,2019,45(1):13-17. (GAO Jie. Study on the spatiotemporal characteristics of extreme precipitation in Yalong River Basin based on GAMLSS Model [J]. Water Power, 2019, 45 (1): 13-17. (in Chinese))

(收稿日期:2019-09-07 编辑:彭桃英)