

大宁河特大拱桥拱座 - 基岩长期稳定性研究

杨建平, 陈卫忠, 于洪丹, 谭贤君

(中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 大宁河特大拱桥巫山端拱座建造在弱风化溶崩角砾岩基岩上, 拱座 - 基岩的长期稳定性是桥梁安全运营的关键。依据弱风化溶崩角砾岩蠕变试验得到的幂函数形式蠕变方程, 建立了三维拱座 - 基岩接触面有限元模型, 通过数值仿真研究了桥梁长期运营过程中弱风化溶崩角砾岩基岩的应力特征、变形特征、拱座的应力分布变化规律、拱座 - 基岩接触面剪切应力分布及张开度变化等特性, 研究成果表明: ①基岩长期蠕变导致应力调整, 拱座抗推桩会出现拉应力集中; ②长期蠕变过程中拱座 - 基岩协调变形, 接触面张开度很小, 拱座 - 基岩接触面上顺桥向剪切应力也较小。研究成果对于拱座设计、拱座 - 基岩长期稳定评价具有指导意义。

关键词: 大宁河大桥; 拱座; 接触面; 蠕变; 长期稳定性

中图分类号: TU471 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2011)08 - 1178 - 07

作者简介: 杨建平(1982 -), 男, 江苏泰州人, 助理研究员, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: jpyang@whrsm.ac.cn。

Long-term stability of arch support and bedrock of Daning River Bridge

YANG Jian-ping, CHEN Wei-zhong, YU Hong-dan, TAN Xian-jun

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The arch support at Wushan end of Daning River Bridge is constructed on weathered solution-collapse breccias, which is soft and prone to creep. Evaluation of long-term stability of arch support and breccias is of great importance for the security of service of Daning River Bridge. Based on the laboratory creep test results of weathered solution-collapse breccias, a creep constitutive model is established and the parameters are proposed. Using the creep model, the long-term evolution of stress and deformation of the arch support and breccias is analyzed by means of the 3D finite element method (FEM). The openings and shear stress between the contact surface of arch support and breccias are studied. Numerical results show that: (1) the creep of breccias can cause local tensile stress concentration on thrust resistance piles; (2) the arch support and bedrock show compatible deformation during long-term creep, and the opening of the contact surface is very small. In addition, the shear stress in most part of the contact surface is less than 0.1 MPa. This study may be helpful for the design of arch support and long-term maintenance of the slope.

Key words: Daning River Bridge; arch support; contact surface; creep; long-term stability

0 引 言

随着西部高速公路的大规模建设, 受山区地形的限制, 大跨度钢管混凝土拱桥建设越来越多, 许多学者对拱座、拱脚受力及拱座边坡稳定性进行了分析, 在山区大跨度钢管混凝土拱桥拱座设计、边坡加固方面取得了大量成果^[1-6]。软弱地基上拱座 - 基岩长期稳定性分析是保证桥梁安全运营的关键, 但这方面研究却鲜有分析报道, 而大宁河特大拱桥拱座正是建立在

溶崩角砾岩软弱边坡上。

大宁河特大桥^[5-9]位于重庆市巫山县巫峡镇早阳村至龙井乡白水村境内, 设计桥型为钢箱桁架拱结构桥, 主跨净跨 400 m, 净矢高 80 m, 横向设 3 片主桁, 拱上立柱间距 27 m, 桥宽 24.5 m, 大宁河桥型方案如图 1。大宁河大桥地质条件极其复杂, 工程区内广泛分布有可溶性碳酸盐岩, 普遍发育溶孔、溶隙, 溶洞发育, 溶崩角砾灰岩是大宁河大桥的主要地质特征, 溶崩角砾岩埋置深, 两岸分布不均, 强风化溶崩角砾灰岩在桥址区巫山端较发育, 揭露最大厚度 28.50 m,

裂隙较发育，隙宽 1~10 mm，多充填泥质，溶蚀现象较发育，多表现为溶孔、溶隙，溶孔孔径 2~15 mm，

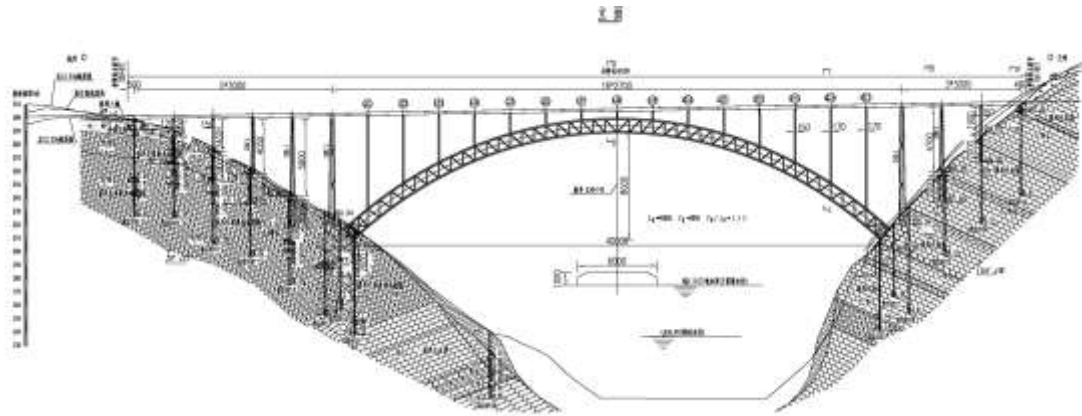


图 1 大宁河特大桥梁型方案

Fig. 1 Scheme of Daning River bridge

局部呈蜂窝状，无充填或半充填泥质；弱风化溶崩角砾灰岩、灰岩揭露最大厚度 84.20 m。呈角砾状结构，钙泥质胶结，中厚层一块状构造，风化不均匀，裂隙发育，角砾抗风化能力强，胶结物抗风化能力弱，夹较多强风化层，具有明显的二元结构。

大宁河特大拱桥拱座采用整体式钢筋混凝土结构，底面设计为阶梯型，利于拱座和基岩之间传力，减小拱座位移；拱座前缘横向设 3 根桩作竖向支撑，位置与拱肋对应；拱座后缘横向设 3 根倾斜 10° 的抗推桩；两岸拱座竖向支撑桩、抗推桩桩底均以弱或微风化岩作为持力层，竖向支撑桩、抗推桩能有效的传递拱座受力和控制拱座位移。由于拱座基坑地质条件较差，对基底及拱座以外 2 m 范围进行压浆加固。拱座型式见图 2。

座 - 基岩接触面是否会由于蠕变或剪切应力集中发生剪切破坏，影响拱座 - 基岩接触面稳定。本文通过对溶崩角砾岩长期力学特性开展研究，得到溶崩角砾岩的蠕变参数，同时建立三维拱座 - 基岩接触面有限元分析模型，对桥梁长期运营过程中溶崩角砾岩基岩及拱座的稳定性进行分析，研究结果对拱座设计、基岩边坡加固及拱座 - 基岩长期稳定评价具有指导意义。

1 溶崩角砾岩蠕变试验

通过对溶崩角砾岩进行室内蠕变实验，分析蠕变实验结果，得到溶崩角砾岩幂函数蠕变模型方程^[9]：

$$\Delta \varepsilon^{cr} = 1.054 \times 10^{-6} (\bar{\sigma}^{cr})^{0.681} \Delta t^{-0.843} \quad (1)$$

式中， $\Delta \varepsilon^{cr}$ 为等效蠕变应变增量， $\bar{\sigma}^{cr}$ 为等效蠕变应力 (MPa)， t 为时间 (h)。

2 三维数值模拟

2.1 三维计算模型

结合地形地质情况，计算范围和计算模型见图 3。顺桥向长 224 m，横桥向宽 88 m，高 174.8 m。竖向取到测时水位下 48.7 m。

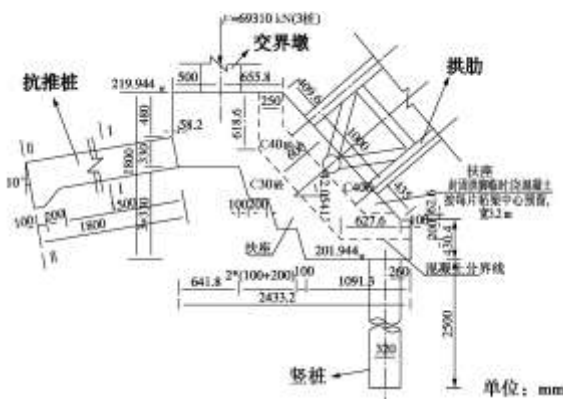


图 2 拱座设计型式

Fig. 2 Design scheme of arch support

运营过程中，大宁河特大桥梁将对拱座产生巨大的推力，同时溶崩角砾岩岩质又较差，因此桥梁长期运营中拱座及桥基的稳定性存在两个方面问题：①溶崩角砾岩基岩长期蠕变是否会导致拱座应力、变形过大，产生破坏，从而影响桥梁安全；②桥梁长期运营中拱

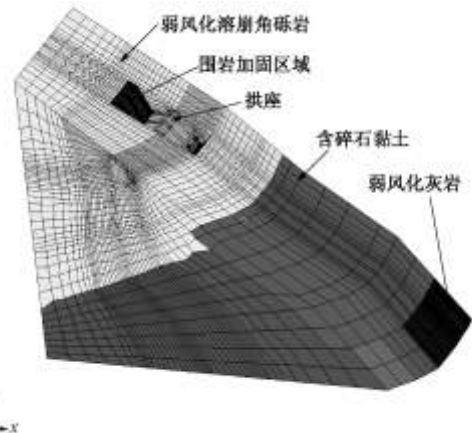


图3 大宁河特大桥拱座-基岩计算模型

Fig. 3 Numerical model for Daning River Bridge

本模型岩体和拱座采用六面体单元。岩体共划分了36601个单元,节点40882个;拱座共划分了3204个单元,节点4384个。

拱座-基岩接触模型:本文计算通过设置接触关系来模拟拱座-基岩之间的相互作用,接触面上拱座、基岩可以脱离或发生相对滑动,计算采用小滑动模式,即认为相对滑动距离较小,不超过单元尺寸。接触面的摩擦塑性为库伦摩擦:当接触面的剪应力超过临界剪应力 τ_{crit} 时,发生相对滑动,临界剪应力 τ_{crit} 与接触面上的压应力 p 有关($\tau_{crit} = \mu p$), μ 为滑动摩擦系数,根据室内试验结果取值。定义的接触面见图4。

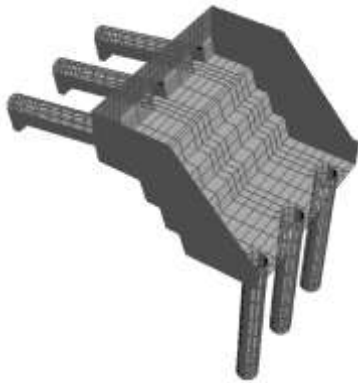


图4 大宁河特大桥拱座及拱座-基岩接触面

Fig. 4 Contact surface between arch support and solution-collapse breccias

蠕变计算模型:根据角砾岩蠕变试验的研究成果,应用幂函数蠕变力学模型对拱座及基础的长期稳定性开展三维仿真研究。等效蠕变模型的蠕变分量增量为^[10]

$$\Delta \varepsilon^{cr} = \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^{cr}}{f^{cr}} \left(\frac{q}{\sqrt{(e \bar{\sigma}_0 \tan \psi)^2 + q^2}} n + \frac{1}{3} \tan \psi I \right) \quad (2)$$

式中 $\Delta \varepsilon^{cr}$ 为蠕变应变分量增量; $n = \partial q / \partial \sigma$;

$$f^{cr} = \frac{1}{\bar{\sigma}^{cr}} \sigma \frac{\partial G^{cr}}{\partial \sigma}, \quad G^{cr} \text{ 为双曲线型蠕变势,}$$

$$G^{cr} = \sqrt{(e \bar{\sigma}_0 \tan \psi)^2 + q^2} - p \tan \psi, \quad (3)$$

其中, p 为等效压应力, q 为等效偏应力, e 为常数,

表1 材料参数表

Table 1 Mechanical parameters of different rock types

序号	分类	描述	重度 (kN m ⁻³)	计算参数			
				弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
1	弱风化溶崩角砾岩	角砾岩	26	3	0.33	0.5	40
2	拱座底部角砾岩加固	角砾岩加固	26	3	0.33	0.75	40
3	弱风化灰岩	灰岩	26	8	0.28	1.2	40
4	含碎石黏土或碎石土	碎石黏土	26	3	0.33	0.03	21
5	混凝土	C40(上部)	26	40	0.167		

反映双曲线蠕变势趋于渐进线的速率, ψ 为 $p-q$ 面上的剪胀角, $\bar{\sigma}_0$ 为初始屈服应力, $\bar{\sigma}^{cr}$ 为等效蠕变应力, 单轴压缩时定义为

$$\bar{\sigma}^{cr} = \frac{q - p \tan \beta}{1 - \frac{1}{3} \tan \beta}, \quad (4)$$

其中, β 为内摩擦角。

计算中 e 取 0.1, 岩体剪胀角 ψ 取 β 的一半。

2.2 计算工况及参数

荷载岩体自重, 水库蓄水后岸坡静水压力, 拱肋和交界墩部分所受的上部结构的荷载力组成。

拱肋部分的荷载考虑最不利的组合: 自重+体系升温 36°C+横风(52%)+汽车(含制动力); 交界墩部分的荷载作用为 69310 kN(3根)。拱肋处各杆件内力见图5。

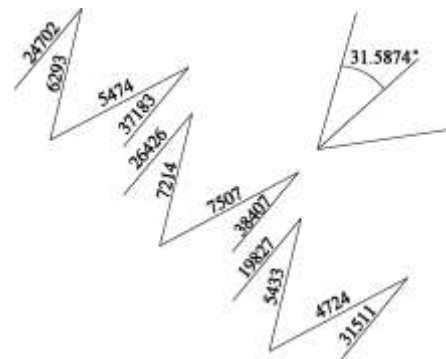


图5 拱肋处各杆件内力

Fig. 5 Internal forces of arch ribs

弱风化溶崩角砾岩、弱风化灰岩、含碎石黏土岩等基岩的材料参照大宁河桥地质报告、室内试验结果、《四渡河大桥岩体力学性质试验研究报告》推荐参数和《大宁河特大桥两岸岸坡冲刷及稳定性专题研究报告》推荐参数确定; 加固基岩按照经验提高 c 值强度; 混凝土参数按规范推荐值采用。

基岩采用弹塑性模型计算, 其屈服准则采用 Drucker-Prager 屈服准则; 拱座混凝土采用线弹性模型进行计算。各参数见表1。

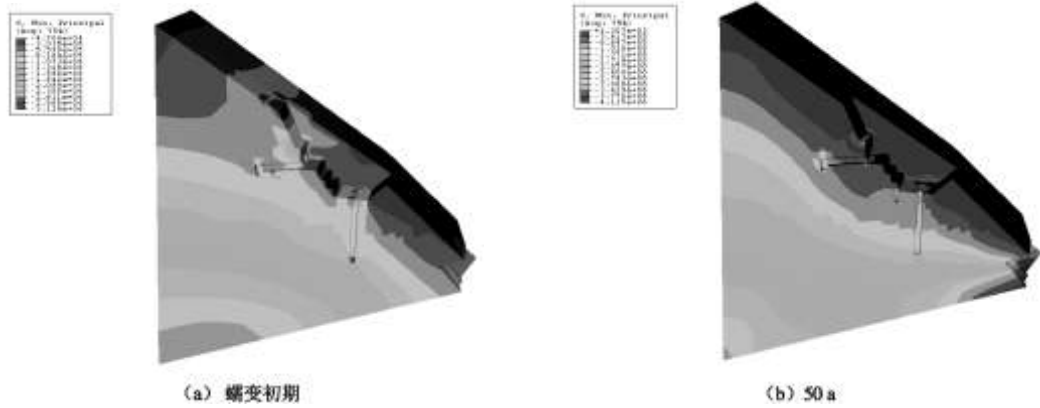


图 6 溶崩角砾基岩最小主应力云图

Fig. 6 Contour map of minimum stress of solution-collapse breccias

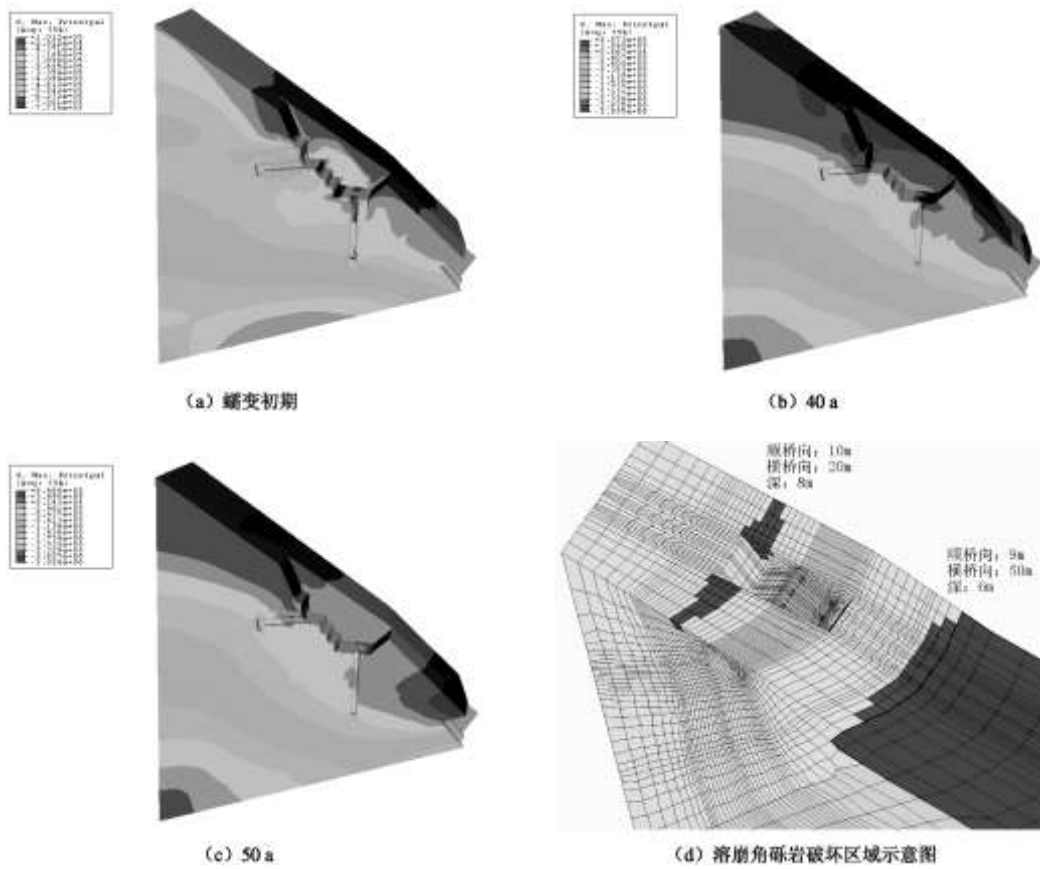


图 7 溶崩角砾基岩最大主应力云图及边坡破坏位置

Fig. 7 Contour map of maximum stress of solution-collapse breccias and failure zone of slope

计算分为以下 3 个步骤：①在自重应力作用下，拱座和基岩建立接触关系，达到平衡；②在上部荷载和水库蓄水静水压力下，对拱座 - 基岩进行静态分析，达到应力平衡；③桥梁运营 50 a 中拱座 - 基岩的稳定性。

3 数值计算结果

3.1 角砾岩压应力

图 6 显示了溶崩角砾岩蠕变初期及 50 a 后最小主

应力分布云图。计算结果表明，蠕变初期竖桩底部围岩压应力集中显著，为 3.1 MPa；桥梁运营 10 a 后，压应力集中减小为 1.5 MPa 左右；此后压应力分布变化不明显，压应力值略微降低；在溶崩角砾岩和微风化灰岩交界面接近岸坡处，压应力集中逐渐加强，蠕变初期为 0.8 MPa，50 a 后为 4.12 MPa。

3.2 角砾岩拉应力

图 7 (a) ~ (c) 显示了溶崩角砾岩基岩蠕变初期、运营 40 a 和 50 a 时最大主应力分布。由图可见，

蠕变初期拉应力集中在拱座底部坎齿部位和竖桩 - 拱座交界部位, 最大拉应力值为 0.1 MPa, 在地表拱座开挖体周围也出现拉应力区, 其值很小。桥梁长期运营过程中, 开挖基坑周围地表岩体拉应力区域增大, 拉应力值增大, 其值在 0.6 MPa 左右, 在 40 a 前最大拉应力区域集中在开挖体周围地表, 40 a 后最大拉应力区域出现在角砾岩和含碎石黏土交界部。图 7 (d) 中红色区域为长期蠕变引起的溶崩角砾岩破坏区域, 结果显示开挖基坑上方顺桥向 10 m、横桥向 20 m、深 8 m 范围出现拉破坏, 基坑下方溶崩角砾岩与含碎石黏土交界部位也出现拉破坏, 范围为顺桥向 9 m、横桥向 50 m、深 6 m, 这部分区域需要进行加固处理。

3.3 拱座拉应力

图 8 (a) ~ (d) 显示了拱座蠕变初期、10 a、20a 及 50 a 时最大主应力云图。计算结果表明, 蠕变初期拱座基本处于受压状态; 运营 10 a 后, 在抗推桩端部坎齿部位和第一级台阶坎齿部位有显著的拉应力集中, 最大值为 1.8 MPa; 20 a 时抗推桩上部出现显著的拉应力集中, 最大值为 2.5 MPa, 抗推桩和拱座交界处底端拉应力集中增大; 至 30 a, 应力集中区域不变, 最大拉应力为 2.8 MPa; 运营 50 a 后, 拱座应力分布调整较大, 拉应力集中程度降低, 在第一级台阶坎齿部位有拉应力集中, 大约为 0.95 MPa。

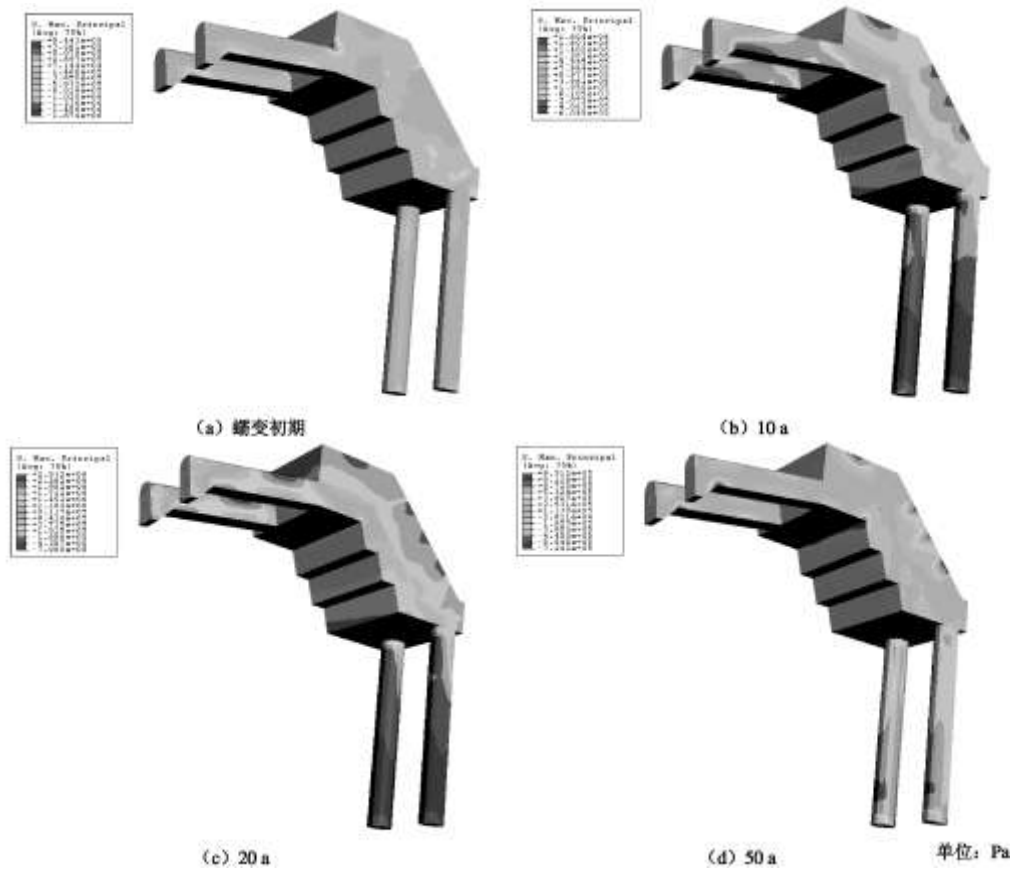


图 8 拱座最大拉应力云图

Fig. 8 Contour map of maximum stress of arch support

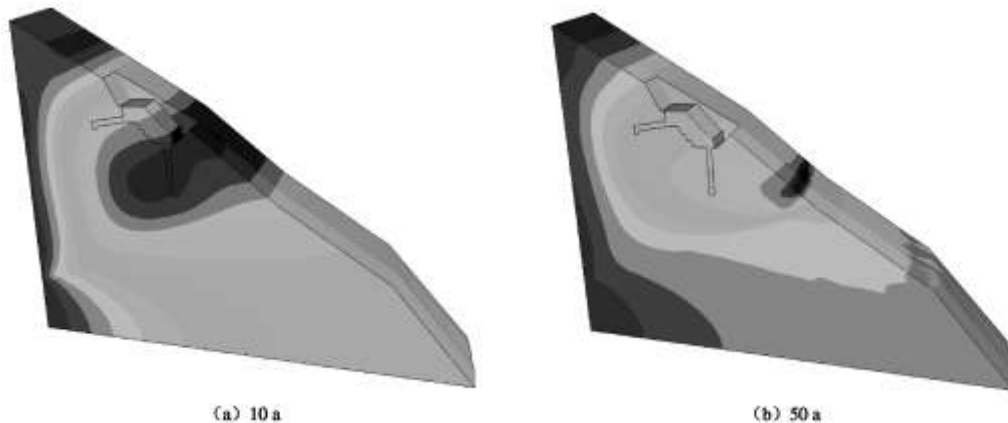


图 9 拱座 - 基岩位移云图及破坏区域

Fig. 9 Contour map of displacement of arch support and breccias

3.4 拱座 - 基岩位移

图 9 显示了运营过程中围岩的位移云图。由图可见，蠕变过程中拱座和基岩变形协调，没有显著张开、滑动现象。位移计算结果表明，桥梁运营 10 a, 20 a, 30 a, 40 a 后围岩最大位移出现在开挖基坑前方溶崩角砾岩部位，其位移值分别为 2.2, 3.1, 3.8, 4.5 cm。从 40 a 到 50 a 这段时段内，由于蠕变导致围岩应力状态调整，最大位移值出现在溶崩角砾岩和含碎石黏土交界部位，其值为 8.9 cm，该部位在应力调整后出现局部破坏，这和 3.2 节中溶崩角砾岩最大拉应力破坏区域分析结论一致。

3.5 拱座 - 基岩接触面顺桥向剪切应力

图 10 显示了桥梁运营过程中拱座 - 基岩接触面顺桥向剪切应力分布云图。由图可见，蠕变初期，顺桥向剪切应力局部集中明显，主要出现在竖桩底部前后缘和拱座结构变化部位，最大剪切应力值为 0.88 MPa；运营过程中，拱座底面、背面、侧面剪切应力分布趋于均匀，应力集中减弱，最大值为 0.66 MPa。

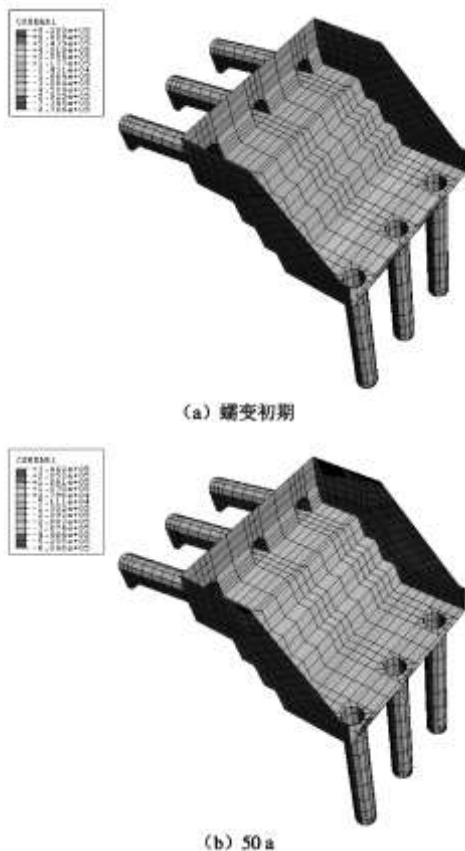


图 10 拱座 - 基岩接触面顺桥向剪应力云图

Fig. 10 Contour map of longitudinal contact shear stress between arch support and breccias

3.6 拱座 - 基岩接触面的张开度

图 11 显示了桥梁运营过程中拱座 - 基岩接触面

张开度（变形放大倍数：300）。计算结果表明：蠕变初期，拱座底面坎齿部位和竖桩 - 拱座交界部位张开最大，为 0.57 mm；运营过程中，拱座 - 基岩交界的前缘、抗推桩底端面部位和拱座后缘张开度逐渐增大，10 a, 20 a, 30 a, 40 a 时最大张开度分别为 1.0, 1.3, 1.9, 1.9 mm；50 a 时，拱座前缘和后缘张开度有所减小，最大值为 1.3 mm。

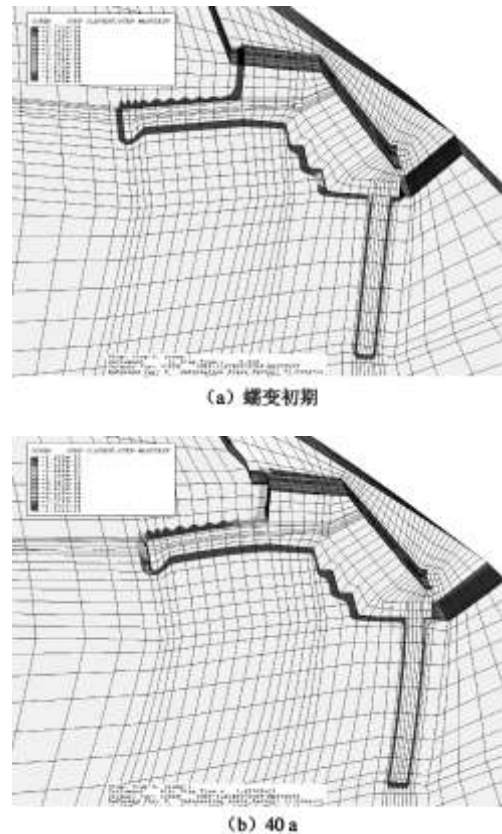


图 11 拱座 - 基岩接触面张开度

Fig. 11 Contour map of openings between arch support and breccias

4 结 论

根据室内试验确定的弱风化溶崩角砾岩蠕变力学模型和参数，结合建立的拱座 - 基岩接触面有限元模型，通过数值仿真研究了桥梁长期运营过程中拱座、溶崩角砾岩基岩、拱座 - 基岩接触面的应力分布特征及其随时间的变化规律，以及拱座 - 基岩长期蠕变位移特征和接触面张开度演化特征，得出以下 3 点结论。

(1) 运营过程中，溶崩角砾岩基岩压应力量值不大，不超过 4 MPa，由于力学性能差异，溶崩角砾岩和微风化灰岩交界面岸坡部位压应力集中逐渐加强；同时，开挖基坑周围地表拉应力区域逐渐增大，且在角砾岩和含碎石黏土交界部位有拉应力集中；因此，拱座开挖体下方溶崩角砾岩、微风化灰岩及碎石黏土

交界面的边坡需要进行加固,开挖基坑上方由于出现拉破坏区域,也需要进行加固。

(2)运营过程中,拱座抗推桩上部和下部坎齿部位会出现拉应力集中,最大达到 2.8 MPa,设计中要予以重视。

(3)长期运营过程中,拱座-基岩接触面上顺桥向剪切应力趋于均匀,量值较小,绝大部分区域在 0.1 MPa 以内;拱座和基岩在蠕变过程中协调变形,接触面没有显著张开和滑动情况,大部分区域处于闭合状态,在拱座后缘及拱座结构变化处有局部张开,张开度较小,最大不超过 2 mm;因此,拱座的阶梯型底面传力性能较好,在桥梁长期运营过程中,拱座-基岩接触面保持了较好的完整性,其抗剪能力基本不受蠕变影响。

参考文献:

- [1] 陈后军. 大跨度钢管混凝土拱桥拱座局部应力研究[J]. 世界桥梁, 2009, 2: 54 - 56. (CHEN Hou-jun. Study of local stress in arch seat of long span concrete-filled steel tube arch bridge[J]. World 's Bridge, 2009, 2: 54 - 56. (in Chinese))
- [2] 裴若娟, 宗金东, 李朝锋. 高速铁路提篮拱桥拱脚应力分析[J]. 铁道工程学报, 2002, 1: 23 - 29. (PEI Ruo-juan, ZHONG Jin-dong, LI Chao-feng. Stress analysis of end joint for long-span oblique arch bridge on high-speed railway [J]. Journal of Railway engineering society, 2002, 1: 23 - 29. (in Chinese))
- [3] 李法昶, 勾振铎. 下涝溪大桥宜昌端拱座下岩石岸坡稳定性分析及加固处理[J]. 铁道建筑技术, 1998, 3: 17 - 20. (LI Fa-chang, GOU Zhen-duo. Stability analysis and reinforcement of rock slope for end joint of Xialaoxi arch bridge[J]. Railway Construction Technology, 1998, 3: 17 - 20. (in Chinese))
- [4] 张振西, 刘光廷. 拱座接触应力的分布与改善[J]. 水利学报, 1989, 2: 36 - 45. (ZHANG Zhen-xi, LIU Guang-ting. The distribution and improvement of the contact stress on the abutment of arch[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 2: 36 - 45. (in Chinese))
- [5] 罗玉科, 彭元诚, 朱 玉. 厚覆盖层地基上大跨拱桥拱座设计[J]. 世界桥梁, 2007, 3: 24 - 27. (LUO Yu-ke, PENG Yuan-cheng, ZHU Yu. Design of arch seats of long span arch bridge on thick overburden layer ground[J]. World 's Bridge, 2007, 3: 24 - 27. (in Chinese))
- [6] 王 波, 刘 彬. 大宁河特大桥拱座受力分析与计算[J]. 山西建筑, 2008, 34(25): 306 - 307. (WANG Bo, LIU Bin. Forces analysis and calculation on the abutment of super large bridge over DaNing river[J]. Shanxi Architecture. 2008, 34(25): 306 - 307. (in Chinese))
- [7] 陈银生, 曾亚武. 三峡库区某高速公路特大桥岸坡再造趋势研究[J]. 中国水运(理论版), 2006, 4(9): 60 - 62. (CHEN Yin-sheng, ZENG Ya-wu. Research on the trends of the bank slop reformation for a certain highway super large bridge in Three Gorges reservoir area[J]. China Water Transport (Theory Edition), 2006, 4(9): 60 - 62. (in Chinese))
- [8] 万信华, 郭文增, 朱宏平. 大宁河大桥主桥结构极限承载力分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版). 2006, 23(3): 8 - 10. (WAN Xin-hua, GUO Wen-zeng, ZHU Hong-ping. Research on ultimate load capacity of daning river bridge's main span[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2006, 23(3): 8 - 10. (in Chinese))
- [9] 于洪丹, 陈卫忠, 彭元诚, 等. 大宁河特大拱桥桥址溶崩角砾岩力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 729 - 734. (YU Hong-dan, CHEN Wei-zhong, PENG Yuan-cheng, et al. Research on mechanical properties of solution-collapse breccias[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 729 - 734. (in Chinese))
- [10] ABAQUS. User documentation[R]. 2007.