

三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析

蒋文明, 王鲁琦, 赵鹏, 黄波林, 张枝华, 胡明军

Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area

JIANG Wenming, WANG Luqi, ZHAO Peng, HUANG Bolin, ZHANG Zhihua, and HU Mingjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42

三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析

Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City

王平, 朱赛楠, 张枝华, 吴晓宾, 杨柳, 赵慧 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 24-32

破碎岩质边坡锚墩式主动防护网设计方法

Design method of anchor pier type active protective net on fractured rock slopes

吴兵, 梁瑶, 赵晓彦, 唐晓波, 吴晓春, 罗天成 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 101-108

强震区隧道软弱围岩洞口段桩-筏抗震措施的作用效果分析

Analysis on the effect of pile-raft anti-seismic measures for the tunnel section of weak surrounding rock in strong earthquake area

崔光耀, 李鹏宇, 王庆建 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 106-112

中等倾角岩层顺向坡滑坡发育特征及形成机制分析

Development characteristics and formation mechanism of the medium-dip bedding slopes: A case study of the landslide on the left bank of Tuodan reservoir dam

王玉川, 郭其峰, 周延国 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 17-23

基于失效概率的边坡降雨阈值曲面探讨

Investigation on slope rainfall threshold surface based on failure probability

邓夕胜, 张元, 唐煜 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 70-75



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-13

三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析

蒋文明^{1,2}, 王鲁琦^{1,3}, 赵 鹏⁴, 黄波林⁵, 张枝华⁴, 胡明军⁴

(1. 河北省地震灾害防御与风险评估重点实验室, 河北 三河 065201; 2. 重庆市地质矿产
勘查开发局 208 水文地质工程地质队, 重庆 400700; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆
400045; 4. 重庆市二零八地质环境研究院有限公司, 重庆 400700; 5. 三峡大学
防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要:本文以三峡库区箭穿洞危岩体为例,对涉水厚层危岩体的变形破坏模式和防护措施进行了研究。根据现场调查和长期监测数据可知,干湿循环作用下基座岩体的劣化是加速箭穿洞危岩体变形破坏的主导因素,并判定其破坏模式为基座滑移式崩塌。在此基础上,将危岩体的防护治理定为两部分,分别是基座软弱岩体的补强加固,以及中上部危岩体的锚索加固。通过数值模拟对防护前后危岩体的位移场以及应力场进行了分析,结果表明危岩体上部的锚索加固能够有效控制岩体的变形,基座补强能够有效控制危岩体的最大剪应力,综合防护可以显著提高箭穿洞危岩体的稳定性。该防护措施的理念及方法,可以为库区涉水危岩体的治理提供重要的参考价值。

关键词:危岩体;破坏模式;三峡库区;防护措施;有限元计算

中图分类号: P642 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2021)05-0105-08

Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area

JIANG Wenming^{1,2}, WANG Luqi^{1,3}, ZHAO Peng⁴, HUANG Bolin⁵, ZHANG Zhihua⁴, HU Mingjun⁴

(1. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe, Hebei 065201, China; 2. 208 Hydrogeology Engineering Geology Team, Chongqing Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Chongqing 400700, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4. Chongqing 208 Institute of Geological Environment Co. Ltd., Chongqing 400700, China; 5. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: In this paper, the Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area is taken as an example to study the failure mode and protection of submerged thick-layer dangerous rock mass. Based on field investigation and the monitoring data, it was found that the degradation of the base rock mass under the dry-wet cycles is the main factor to accelerate the deformation of the dangerous rock mass. Its failure mode is determined as slip collapse. According to the deformation and failure characteristics of the dangerous rock mass, the corresponding treatment measure is divided into two parts, including the reinforcement of the weak base rock mass, and anchor cable in the upper part of the dangerous rock mass. By comparing the displacement field and the stress field before and after protection, it is found that the prestressed reinforcement of the upper

收稿日期: 2020-11-30; 修订日期: 2021-04-29

基金项目: 国家重大研发计划项目(2018YFC1504803); 河北省地震灾害防御与风险评估重点实验室开放基金资助项目(FZ213203); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190637); 三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212019CC60001)

第一作者: 蒋文明(1964-), 男, 四川广安人, 教授级高级工程师, 主要从事地质灾害防治、岩土工程研究与技术创新方面的工作。
E-mail: 545324294@qq.com

通讯作者: 王鲁琦(1993-), 男, 山东菏泽人, 土木工程专业, 助理研究员, 主要从事地质灾害防治方面的研究。E-mail: wlq93@qq.com

dangerous rock mass can effectively control the deformation of the rock mass, and the reinforcement of base rock mass can effectively control the maximum shear stress of the dangerous rock mass. The comprehensive protection effect is significant to ensure the stability of dangerous rock mass. The protection method can provide important reference for the treatment of submerged dangerous rock mass in the reservoir area.

Keywords: dangerous rock mass; failure mode; the Three Gorges Reservoir area; control measures; finite element calculation

0 引言

对于内部不存在潜在滑移面和控制性结构面的厚层危岩体,其破坏机理十分复杂^[1-2]。这种危岩体具有分布区域广、发生频率高、突发性强、破坏范围大等特点,是一类典型的山区地质灾害,对人民生命财产安全和城镇建设造成严重威胁^[3-6]。对于涉水厚层危岩体,除了崩塌的直接危害以外,产生的涌浪次生灾害将进一步扩大威胁范围^[7-9]。

自 2008 年三峡库区正式蓄水以来,由于三峡库区水位的周期性涨落,在库岸形成了高达 30 m 的劣化带^[10-12]。库区涉水危岩体的基座部分位于劣化带区域,基座岩体长期处于上部岩体自重下,并在干湿循环作用下逐渐劣化,导致其变形破坏机理更为复杂,进一步加大了危岩体的防治难度^[13-15]。

文章在现场调查、监测数据以及室内试验的基础上,分析了三峡库区箭穿洞危岩体的变形破坏特征,并对其破坏模式进行了判定。根据其变形破坏特征,提出了危岩体的治理方案,并采用数值模拟对治理方案进行了定量评价。该危岩体的防护理念对于岩质库岸的防治具有重要的参考价值。

1 危岩体概况

箭穿洞危岩体位于重庆市巫山县望霞村。危岩体的上游侧边界为纵张裂缝(LF1: 150~226 m);下游侧边界裂缝在陡崖面上清晰可见,上宽下窄,充填或局部充填碎石土或溶蚀、残积碎石土,并向下逐渐收敛至 153 m 高程尖灭(LF2)。危岩体后缘边界为卸荷裂缝(LF3)张开度可达 3.15 m,裂隙在 226 m 以下底部均被碎石所填充。箭穿洞危岩体的正视图见图 1。

箭穿洞危岩体的三维切割边界清楚,其几何形态呈不规则的六面体,后缘高程为 278~305 m,基座高程为 155 m,平均高差为 135 m,危岩体平均横宽约 55 m,平均厚度约 50 m,危岩体体积分约 $36 \times 10^4 \text{ m}^3$,主崩方向为 260°。箭穿洞危岩主要为三叠系下统大冶组第四段

(T_1d^4)、高程 280 m 以上为嘉陵江组第一段(T_1j^1),基座以下为大冶组第三段(T_1d^3)。基座岩体位置处有一平洞,其中布有压力传感器。箭穿洞危岩体的典型剖面图见图 2。

2 危岩体的变形特征

由区域地质构造可知,箭穿洞危岩体是在斜坡岩体不断卸荷,长江不断侵蚀切割、构造应力释放等条件下



图 1 箭穿洞危岩体正视图

Fig. 1 Front view of the Jianchuandong dangerous rock mass

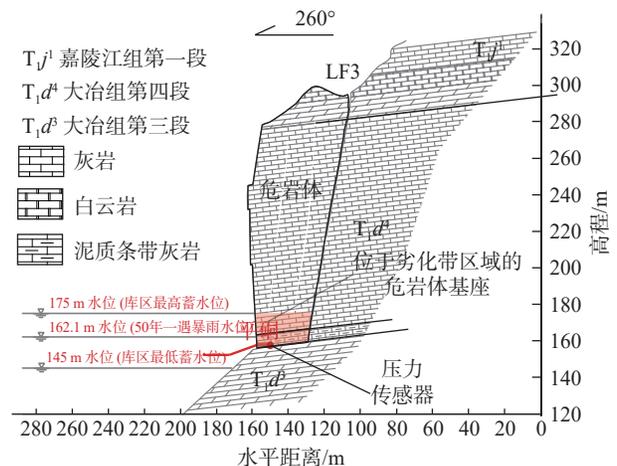


图 2 箭穿洞危岩体典型剖面 1-1'

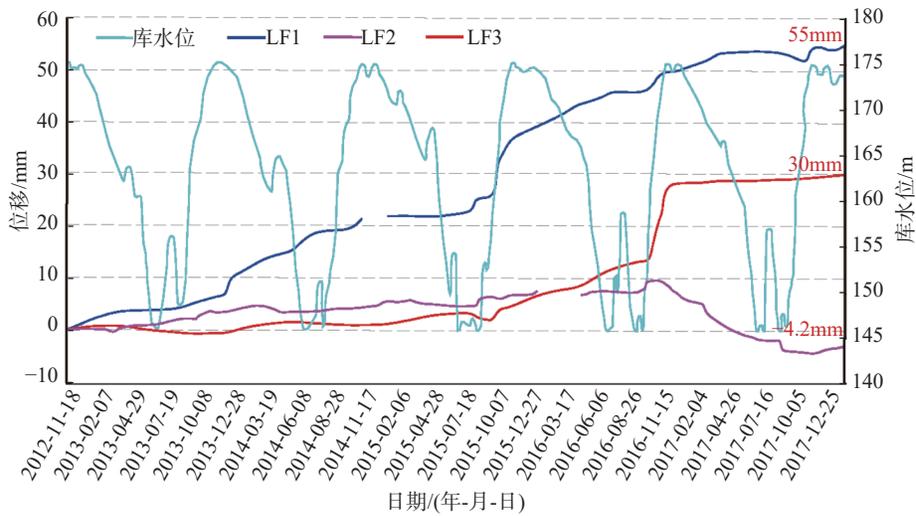
Fig. 2 Sectional view of the Jianchuandong dangerous rock mass

形成的。三维边界基本形成后,重力成为主导危岩体变形的因素。另外,干湿循环作用下基座岩体的持续劣化进一步加速了危岩体的变形。根据现场监测资料可知(图 3),危岩体的边界裂缝及基座压力随着库水位周期性升降次数的增加而持续增大。

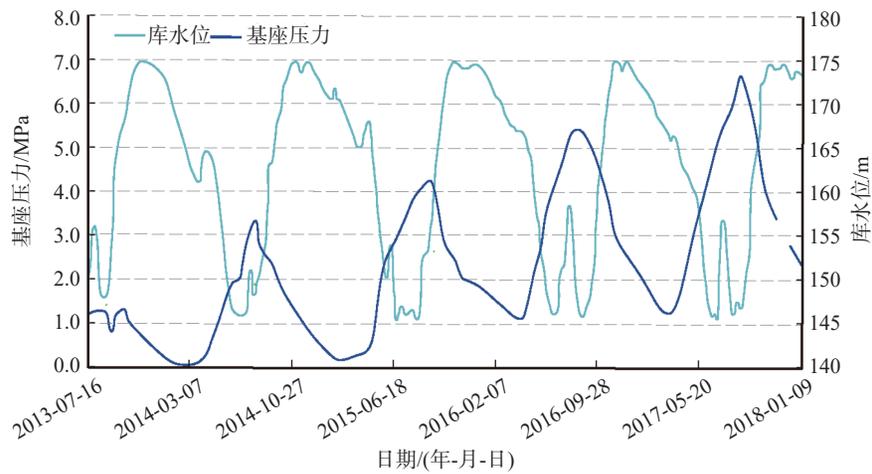
针对基座的泥质条带灰岩,在室内完成了 30 次干

湿循环试验,得到了初始状态、5 次、15 次、20 次以及 30 次干湿循环后基座岩体的力学参数(表 1)。

经过 30 次干湿循环后,基座岩体的单轴抗压强度下降约 21%~26%,随着循环次数的增加,其强度的劣化率有所下降,但尚未收敛;抗拉强度和黏聚力下降约 28%,随着循环次数增加,其劣化率有所下降,趋于收



(a) 边界裂缝的监测曲线



(b) 基座压力的监测曲线

图 3 箭穿洞危岩体的变形特征

Fig. 3 Deformation characteristics of the Jianchuandong dangerous rock mass

表 1 泥质条带灰岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of marlstone under dry-wet cycles in the Three Gorges Reservoir area

干湿循环次数	单轴抗压强度		抗拉强度 /MPa	抗剪强度		变形参数	
	天然状态/MPa	饱和状态/MPa		内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	弹性模量/(10 ⁴ MPa)	泊松比μ
0	19.07	13.24	1.10	32.6	3.36	0.405	0.30
5	18.39	12.25	0.99	32.2	3.16	0.373	0.31
15	16.96	11.10	0.89	31.8	2.91	0.351	0.32
20	16.22	10.44	0.83	30.1	2.83	0.272	0.33
30	14.98	9.67	0.79	28.4	2.76	0.238	0.35

敛;岩石的内摩擦角下降约 17%,在 15 次循环后劣化率有增大趋势,表明岩体的抗剪强度将持续降低;变形参数下降约 40%,变形模量趋于减小,泊松比趋于增大,并且在 15 次循环后劣化率有增大趋势,表明岩体质量将持续降低。

3 危岩体的失稳破坏模式

根据危岩体的变形特征可知,箭穿洞危岩体以基座的变形破坏为主导,内部不存在潜在的剪切面或导致倾倒变形的控制性结构面。对于这种类型的危岩体,其变形破坏发展一般有 2 种趋势,分别是基座压裂型崩塌和基座滑移型崩塌^[1-2](图 4)。

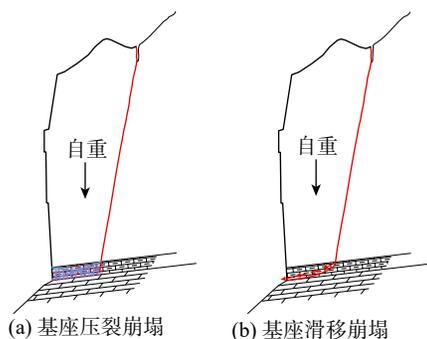


图 4 箭穿洞危岩体破坏模式

Fig. 4 Failure mode of Jianchuandong dangerous rock mass

基座压裂型崩塌见图 4(a)。如果缓坡岩体较坚硬,基座底部岩体受压集中,会导致基座岩体和接触岩体出现压致拉裂现象;基座破坏时,大量的拉裂缝和剪裂缝会出现,导致岩体整体失稳。基座滑移型崩塌见图 4(b)。如果缓坡岩体较为软弱,在上部压力作用下,基座软弱岩体可能会出现剪切破坏,上覆岩体压力将软弱基座挤出,从而发生后靠滑移式的整体破坏。

基座碎裂型崩塌和基座滑移型崩塌的判定与基座岩体强度有关,根据 HUNGR 等^[1]提出的判定方法^[1],可采用应力比值(N_s)来界定危岩的破坏模式, N_s 的建议值为 0.25,其判定公式如下:

$$N_s = \frac{\gamma H}{\sigma_c} \quad \begin{array}{l} N_s > 0.25 \text{ 基座滑移崩塌} \\ N_s < 0.25 \text{ 基座碎裂崩塌} \end{array} \quad (1)$$

式中: γ ——危岩体重度,此处取 27.2 kN/m³;

H ——上部危岩体的高度,此处取 135 m;

σ_c ——基座的抗压强度,此处取 5.775 MPa;该抗压强度根据规范对室内试验数据进行了折减^[16-17]。

计算可知, N_s 为 0.63,大于 0.25,因而确定箭穿洞危岩体将发生滑移破坏。

4 危岩体的防护设计

基于箭穿洞危岩体的破坏模式,将危岩体的治理定为两部分,分别是基座软弱岩体的补强加固,以及危岩体中上部的锚索加固(图 5)。其中,基座岩体的补强是为了阻断危岩体的滑移剪出;中上部锚索加固是为了控制危岩体的变形。防护治理所涉及的力学改善措施如下:

(1) 基座软弱岩体补强加固工程

基座平洞采用 C30 钢筋混凝土键体充填支撑;基底设置 3 排锚桩,锚桩间距为 1.75 m、2.25 m,锚桩孔径为 150 mm,锚固段长度为 6.00 m,基座涉水岩体的表面采用板肋式锚杆挡墙。

(2) 防护工程(锚索、主动防护网、被动防护网、水下柔性防护垫)

在危岩体中上部布置 6 排 2 000 kN 级锚索,水平夹角为 15°,水平及竖向间距均为 6.00 m,锚索为 16 ϕ s 15.2 mm,锚固段总长度为 17.00 m(3.00, 3.00, 2.50, 3.00, 3.00, 2.50 m 分 6 段设置)。

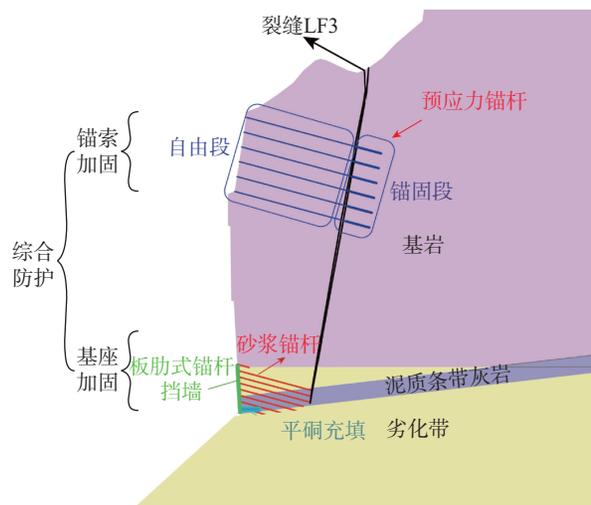


图 5 箭穿洞危岩体防护(1-1'剖面)

Fig. 5 Preventative methods for the Jianchuandong dangerous rock mass

5 防护效果分析

针对防护方案,将提高岩体稳定性的防护措施进行简化后,进行有限元数值计算(所采用数值软件为 MIDAS GTS),涵盖上部危岩的预应力锚索、消落带区域砂浆锚杆、板肋式锚杆挡墙及平洞充填。未进行防护加固时,平洞区域作隧洞处理;防护加固后,平洞区域采用 C30 钢筋混凝土的强度参数(参考值)进行分析。此外,砂浆锚杆、预应力锚杆及板肋式锚杆挡墙相关参数均为参照值^[18-19],数值分析过程中的计算参数见表 2。

以初始状态下的危岩防护为例, 对防护措施的有效性进行评价。根据相关规范要求^[20-21], 泥质条带灰岩的岩体黏聚力由岩石黏聚力乘以折减系数, 取 0.20; 岩体内摩擦角由岩石内摩擦角乘以折减系数, 取 0.80; 岩体变形参数由岩石变形参数乘以折减系数, 取 0.70。数值计算时, 对数值模型右侧边界和左侧边界的水平方向进行了约束, 底部边界采用固定约束, 将危岩体的自重设定为诱发失稳的关键因素。

通过对箭穿洞危岩典型剖面的有限元计算, 得到该

剖面加固前后的位移云图见图 6。分析可知, 上部岩体的锚索加固是控制危岩体变形的关键措施。危岩体的最大位移位于后缘部分, 这是因为危岩体形状不规则, 存在偏压应力, 导致其具有沿基座滑移的变形趋势, 与之前的破坏机制分析相符。在防护加固前, 危岩体的最大位移为 0.323 5 m, 综合防护加固后其最大位移为 0.131 3 m, 降低了 59.41%, 危岩体的变形趋势得以控制。

箭穿洞剖面最大剪应力云图见图 7, 分析可知, 岩体基座加固是控制剪切应力集中的关键措施。防护加

表 2 有限元数值计算岩体参数

Table 2 Mechanical parameters of the marlstone used in the numerical simulation

岩性	本构模型	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
灰岩(基岩)	摩尔库伦	47 800	0.26	27.20	5.21	44.4
灰岩(消落带)	摩尔库伦	42 000	0.24	24.50	4.82	40.2
泥质条带灰岩(消落带)	摩尔库伦	27 200	0.33	26.50	1.79	37.6
泥质条带灰岩(水上基岩)	摩尔库伦	40 500	0.30	26.60	2.36	37.6
水上灰岩(基岩)	摩尔库伦	50 400	0.28	27.10	5.48	44.4
平洞(充填)	摩尔库伦	27 000	0.20	24.20	3.18	48.6
砂浆锚杆	弹性	196 000	0.28	78.50	-	-
预应力锚杆	弹性	196 000	0.28	78.50	-	-
板肋式锚杆挡墙	弹性	27 000	0.25	23.00	-	-

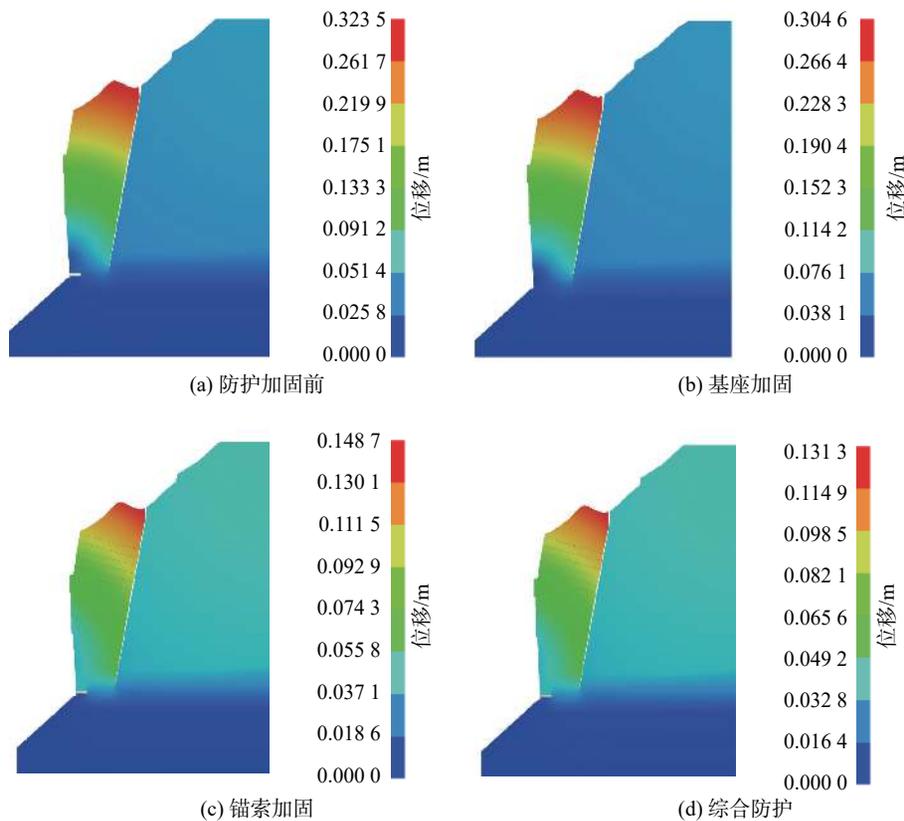


图 6 箭穿洞危岩体位移云图

Fig. 6 The displacement field of the JDRM under different working conditions

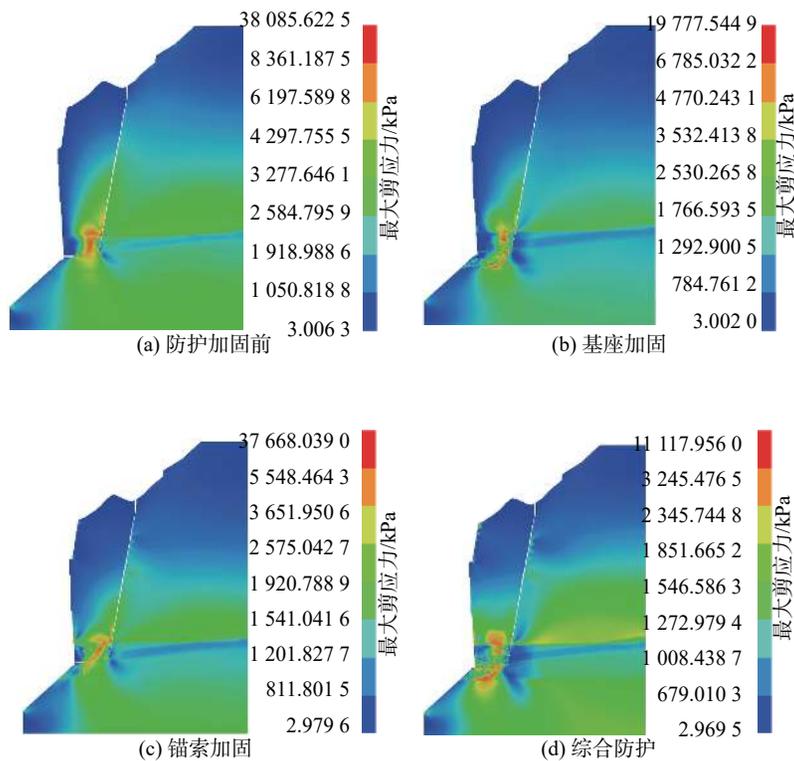


图 7 箭穿洞危岩体最大剪应力云图

Fig. 7 The maximum shear stress field of the JDRM under different working conditions

固前,剪应力的最大值为 38.085 MPa,且在裂隙尖端出现应力集中现象。综合防护加固后,裂隙尖端的最大剪应力为 11.117 MPa,降幅可达 70.81%。

对应力场及位移场进行分析可知,预应力锚索可有效控制危岩体由于偏压而引发的变形趋势,而基座加固在保证基座岩体完整性的同时,可以有效降低基座岩体的最大剪应力。

通过强度折减法对危岩体的稳定性进行了分析(图 8)。根据防护前危岩体的塑性变形可知,其破坏模式为基座滑移式破坏,与前文滑移破坏模式的判定是一致的,其塑性变形区由后缘裂缝尖端向平硐位置延伸,此时危岩体稳定系数为 1.04,处于临界失稳状态。在平硐充填的基础上,进行砂浆锚杆以及格构梁的支护,提升基座岩体的完整性之后,其塑性变形区下移见图 8(b),危岩体的稳定性大幅度提升,稳定系数可达 1.82,其提高幅度为 75%。当上部岩体采用预应力锚索进行加固时,见图 8(c),可有效控制危岩体的变形,与防护前的危岩体相比,其稳定性提高了 17.78%。当完成综合支护后,见图 8(d),其稳定性可达 2.451,与防护前的稳定性相比提高了 135.67%。在综合防护下,基座补强尤其是砂浆锚杆的施工阻断了塑性变形区的连续性,危岩体塑性变形区的剪出口下移到破碎带下方的消落带区域,

且上部预应力锚索控制住了危岩体的整体变形,从而大幅提升了危岩体的稳定性。

通过数值模拟可知,在综合防护之后,危岩体的剪出口将下移至 145 m 高程处。根据原有设计方案,在 145 m 水位处会设置防水层以及竖向锚杆,因而,能够在之后的劣化中进一步提升危岩体的长期稳定性。由于 145 m 高程处的防护并非主体设计,本文在计算时并未考虑相关防护措施。箭穿洞危岩体的防护工程已经按照文中所陈述的措施完成了施工,相应的演化趋势将在之后做进一步的研究。

6 结论

在现场调查、实时监测以及室内试验的基础上,本文采用公式判定和数值模拟等方法对三峡库区箭穿洞危岩体的破坏机理和防护效果进行了分析和研究,得到以下结论:

(1)由于箭穿洞危岩体为内部不存在潜在滑移面和控制性结构面的涉水厚层危岩体,其变形破坏机理较为复杂。箭穿洞危岩体基座部分的软弱岩层不仅承担着上覆岩层的自重,同时在库区水位的周期性升降下持续劣化,加速了危岩体的变形破坏。

(2)通过公式判定可知,在上部压力作用下,箭穿洞

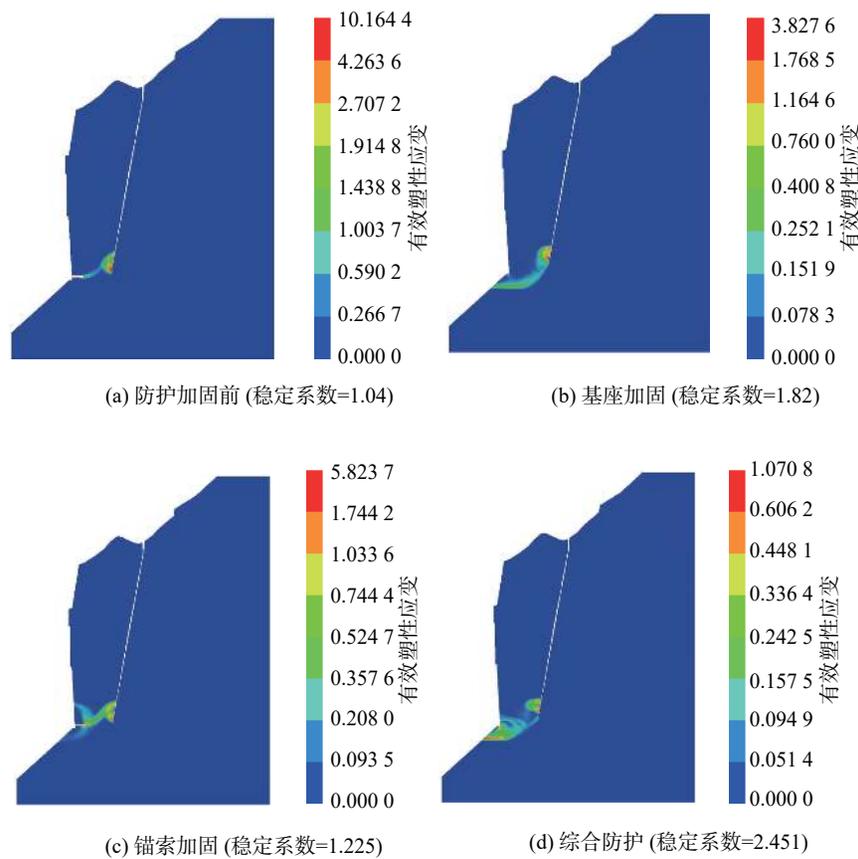


图8 箭穿洞危岩体塑性变形区

Fig. 8 The plastic deformation zone of the JDRM under different working conditions

危岩的基座软弱岩体可能会出现剪切破坏,上覆岩体压力将软弱基座挤出,并最终发生基座滑移式的整体破坏。

(3)针对该危岩体的变形破坏模式,提出了基座加固及上部岩体固定的防护措施,其中,上部岩体的锚索加固用于控制危岩体的变形,基座加固用于控制危岩体的滑移。

(4)数值模拟结果表明,本文涉及的综合防护措施效果显著,能够有效的控制危岩体的变形,使得危岩体的塑性变形区域下移,并最终提高危岩体的整体稳定性。

参考文献 (References) :

- [1] HUNGR O, EVANS SG. The occurrence and classification of massive rock slope failure [J]. *Felsbau—Rock and Soil Engineering*, 2004(22): 16–23.
- [2] HUNGR O, LEROUEIL S, PICARELLI L. The Varnes classification of landslide types, an update [J]. *Landslides*, 2014, 11(2): 167–194.
- [3] YIN Y P, SUN P, ZHU J L, et al. Research on catastrophic rock avalanche at Guanling, Guizhou, China [J]. *Landslides*, 2011, 8(4): 517–525.
- [4] XING A G, WANG G H, YIN Y P, et al. Investigation and dynamic analysis of a catastrophic rock avalanche on September 23, 1991, Zhaotong, China [J]. *Landslides*, 2016, 13(5): 1035–1047.
- [5] FENG Z, LI B, HE K. Rock collapse mechanism on high-steep slope failure in sub-horizontal thick-bedded mountains [J]. *Journal of Geomechanics*, 2014(20): 123–131.
- [6] FENG Z, LI B, YINY P, HE K. Rockslides on limestone cliffs with subhorizontal bedding in the southwestern calcareous area of China [J]. *Nature Hazards and Earth System Sciences*, 2014(14): 2627–2635.
- [7] YIN Y P, HUANG B L, LIU G N, et al. Potential risk analysis on a Jianchuandong dangerous rockmass-generated impulse wave in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(3): 2595–2607.
- [8] YIN Y P, HUANG B L, WANG W P, et al. Reservoir-induced landslides and risk control in Three Gorges Project on Yangtze River, China [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(5): 577–595.
- [9] 赵海林, 黄波林, 张全, 等. 柱状危岩体崩塌产生涌浪的物理试验与数值模拟分析 [J]. *地质力学学报*, 2020, 26(4): 500–509. [ZHAO Hailin, HUANG Bolin, ZHANG Quan, et al. Physical experiment and numerical model analysis of

- surge caused by collapse of columnar dangerous rock mass [J] . *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(4): 500 – 509. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 邓华锋,肖瑶,方景成,等.干湿循环作用下岸坡消落带土体抗剪强度劣化规律及其对岸坡稳定性影响研究 [J] . *岩土力学*, 2017, 38(9): 2629 – 2638. [DENG Huafeng, XIAO Yao, FANG Jingcheng, et al. Shear strength degradation and slope stability of soils at hydro-fluctuation belt of river bank slope during drying-wetting cycle [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(9): 2629 – 2638. (in Chinese with English abstract)]
- [11] WANG X G, WANG J D, GU T F, et al. A modified Hoek-Brown failure criterion considering the damage to reservoir bank slope rocks under water saturation-dehydration circulation [J] . *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(4): 771 – 781.
- [12] 余姝,张枝华,黄波林,等.三峡库区青石-抱龙段顺层灰岩库岸坡变形破坏机理 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(3): 18 – 23. [YU Shu, ZHANG Zhihua, HUANG Bolin, et al. Deformation mechanism of bedding limestone bank slope from Qingshi to Baolong, the Three Gorges Area [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(3): 18 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 唐红梅.群发性崩塌灾害形成机制与减灾技术[D].重庆:重庆大学,2011. [TANG Hongmei. Developing mechanism and mitigation techniques of massive collapse[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张枝华,杜春兰,余姝,等.三峡库区巫峡箭穿洞危岩体稳定性分析及防治工程设计 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(2): 48 – 54. [ZHANG Zhihua, DU Chunlan, YU Shu, et al. Stability analysis and design of control works on Jianchuandong dangerous rockmass in Wuxia Gorge, the Three Gorges Reservoir [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(2): 48 – 54. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 陈小婷,王健,黄波林,等.库水位变动条件下柱状危岩体变形破坏机理 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(2): 9 – 18. [CHEN Xiaoting, WANG Jian, HUANG Bolin, et al. Deformation and failure mechanism of pillar-shaped dangerous rock mass under reservoir's water level fluctuation [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(2): 9 – 18. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 贺凯.塔柱状岩体崩塌机理研究[D].西安:长安大学,2015. [HE Kai. Research on collapse mechanism of tower rock[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [17] HUANG B L, YIN Y P, ZHANG Z H, et al. A case study of pillar-shaped rock mass failure in the Three Gorges Reservoir Area, China [J] . *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2016, 49(3): 195 – 202.
- [18] ULUSAY R. The isrm suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014 [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
- [19] 闫玉平,肖世国.双排抗滑桩加固滑坡的前桩后侧推力算法 [J] . *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 55 – 63. [YAN Yuping, XIAO Shiguo. A calculation method for thrust on the fore piles of double-row stabilizing piles used to reinforce landslides [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 55 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 三峡库区地质灾害防治工作指挥部.三峡库区三期地质灾害防治工程地质勘查技术要求[S].2012. [Headquarters for Geological Hazard Prevention of the Three Gorges Reservoir Region. The technical requirements of the 3rd phase geological exploration in the Three Gorges Reservoir Region[S]. 2012. (in Chinese)]
- [21] 闫国强,黄波林,代贞伟,等.三峡库区巫峡段典型岩体劣化特征研究 [J] . *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 62 – 72. [YAN Guoqiang, HUANG Bolin, DAI Zhenwei, et al. A study of the deterioration effect of limestone bank slope rock mass at the Wuxia section of the Three Gorges Reservoir area [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 62 – 72. (in Chinese with English abstract)]