

阿尔塔什水利枢纽大坝右岸高边坡 W19 危岩体稳定分析

秦国强

(新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 阿尔塔什水利枢纽工程大坝右岸边坡高陡,高边坡危岩稳定问题成为该工程的主要地质问题之一,针对其中规模最大的W19号危岩体,对其地质条件、主要特征和失稳模式进行了细致分析,对其稳定性采用三维刚体极限平衡法进行了计算分析和评价,为设计、工程处理提供了可靠的依据,可供类似工程参考。

关键词: 危岩体;稳定性;三维刚体极限平衡法

中图分类号: TV697.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)03—0059—06

Stability Analysis of W19 Dangerous Rock Mass on the Right Bank High Slope of the Aertashi Hydro Project

QIN Guoqiang

(Xinjiang Investigation and Design Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: The right bank slope of the Altash Water Conservancy Project is high and steep, and the problem of high-slope dangerous rock stability becomes one of the major geological problems, the geological conditions, main characteristics, and instability modes of W19 which is the largest dangerous rock mass, were analyzed in detail. The stability was calculated and analyzed by the 3D rigid body limit equilibrium method, which can provide a reliable basis for design and engineering treatment.

Keywords: dangerous dock mass; stability analysis; 3D rigid body limit equilibrium method

1 工程概况

阿尔塔什水利枢纽工程位于叶尔羌河中游河段,西南距新疆莎车县城约130 km,坐标:北纬37°57'20",东经76°27'25",见图1。工程是叶尔羌河干流目前唯一在建的控制性水利枢纽工程,任务集灌溉、发电、防洪和改善生态。水利枢纽建筑物主要包括:拦河大坝、导流洞、发电引水洞、泄洪排沙洞及电站厂房等。水库总库容 $22.40 \times 10^8 \text{ m}^3$,正常蓄水位1820 m,最大坝高162.8 m,电站装机容量755 MW,年发电量23.32亿kW·h,属大(1)型I等工程。

工程具有“三高一深”的特点,即:高坝位于高地震烈度区,大坝右岸高边坡和坝基深厚覆盖层^[1-2]。

2 右岸边坡地质条件

阿尔塔什水利枢纽工程大坝段河水水面高程1667 m,右岸坡顶高程2250 m,坡高583 m,属超高边坡,高程1845 m以下坡度为50°~70°,1845 m以上近似直立(见图2),由此造就了大坝右岸边坡工程第1大重难点——边坡高陡。

根据现场对右岸边坡发育的随机结构面进行大量的量测、统计分析,右岸高陡边坡主要发育有以下三组结构面,即产状为NW300°—NE10°∠60°~80°的卸荷裂隙,产状为SW230°∠30°~50°的层面与50°~110°∠50°~70°的结构面。这些结构面与倾向NW或NE的边坡临空面相互切割组合,在边坡

表面形成了诸多体积大小不等的潜在不稳定块体。这些块体在降雨、地震等情况下可能发生滑塌破坏,直接关系着大量水利枢纽建筑物以及施工人员的安全。

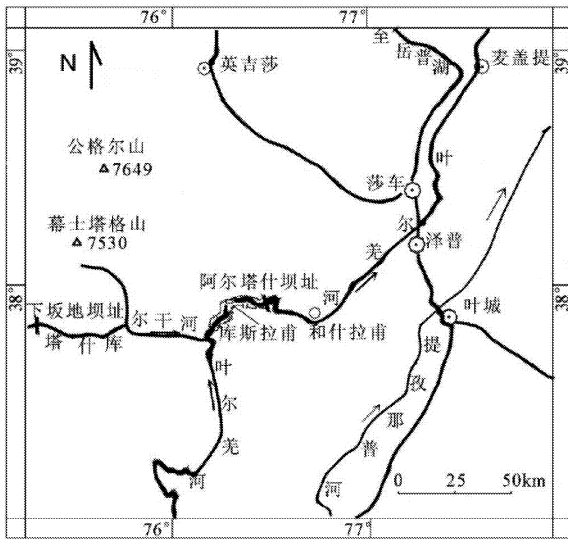


图 1 阿尔塔什水利枢纽地理位置图



图 2 阿尔塔什坝址河谷地貌图

本次研究结合水工建筑物的布置,对右岸高边坡中所存在的潜在不稳定体失事所造成的危害大小与损毁建筑物的范围进行了分区与分类(见图 3),通过对各区的危岩体进行详细的调查与测量,对各区内的危岩体方量进行了估算,本次研究即针对其中规模最大的 W19 号危岩体。

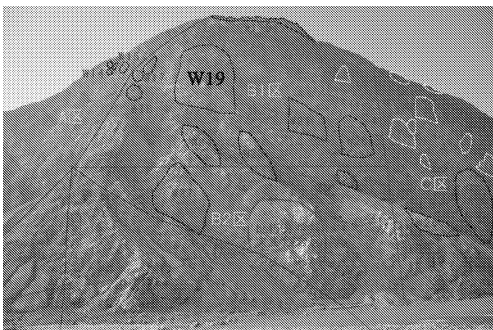


图 3 右岸高陡边坡危岩体分布示意图

3 W19 主要特征及失稳模式分析

3.1 主要特征

通过对 W19 危岩体进行专项调查与测量,得出 W19 分布高程在 1 931 m~2 105 m 之间,位于坝肩以上陡坡面,出露面积 22 320 m²,厚度在 4.0 m~34.0 m 之间,平均厚度为 11.3 m,总方量 25.3 万 m³。

3.2 失稳模式分析

根据在 W19 岩体内进行的调查与结构面测量可知,该危岩体属于楔形体失稳破坏模式^[3-6],主要是在右岸高边坡内发育有三组主要的结构面,分别是倾向 NW 的陡倾角的卸荷裂隙,倾向 SW 的中缓倾角的层面,另外还有一组垂直边坡表面发育的倾向 E/SE 的陡倾角的随机结构面,在几组结构面相互组合能够形成可能失稳的楔形体,两个底滑面主要是卸荷裂隙和倾向 E/SE 的陡倾角结构面(见图 4 和图 5)。

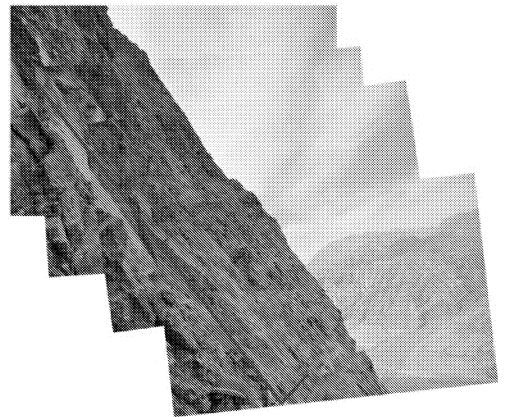


图 4 下游临空面看 W19 内发育的卸荷裂隙

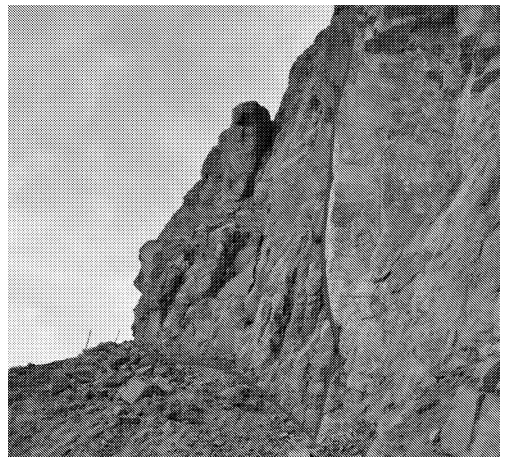


图 5 上游临空面看 W19 内发育的卸荷裂隙

4 W19 稳定性分析

通过对各种方法适用性进行对比分析,采用三维刚体极限平衡法对 W19 危岩体的稳定性进行分析评价^[7-11]。

4.1 计算工况与计算条件

计算工况选择在天然状况、天然状况考虑降雨和天然状况遭遇地震三种工况条件下的稳定状况。

关于降雨工况对边坡内地下水的考虑。本区域内多年平均降水量 51.6 mm,多年平均蒸发量 2 244.9 mm,表明区内降雨量稀少,蒸发量大。冬季天气寒冷,最大积雪厚度 14 cm。但根据现场调查情况,坝址区降雨时间相对比较集中,且雨季多在每年的 5 月—7 月,且在坝址区上下游山前多见泥石流形成的冲洪积扇地貌以及泥石流对地表侵蚀后形成的冲沟,表明一次极端暴雨的降水量是比较大的。

本次计算对危岩体在降雨工况下底滑面的水压力的处理方式:假定危岩体不透水,仅在其滑面与后缘面存在地下水。对于单滑面滑移模式,假定滑面上的孔压系数 $r_u = 0.1$,这里孔压系数的定义公式为:

$$r_u = \frac{r_w h}{r_d H} \quad (1)$$

式中: r_w 、 r_d 分别为水与岩石的重度, kN/m^3 ; h 与 H 分别为计算点处的水压力与块体高度, m 。初步估计,当 $r_u = 0.1$ 时,等价于滑面上的水头 h 为该点处块体高度 H 的 $1/3$ 。

考虑两种水压力的分布方式:其一为假定块体充水 $\frac{1}{3}H$,其二是假定块体充水 $\frac{1}{2}H$,这是暴雨期的极端情况,其最大水头位于交棱线上的 $\frac{1}{3}H$ 或 $\frac{1}{2}H$ 处,块体与边坡面的交线上的水头值为 0,内部点的水头沿线性分布。图 6 为这两种情况下交棱线上的水头分布情况。

对于地震工况,工程区基本烈度为 VIII 度,设防烈度取 IX 度,工程区基岩 50 a 超 5% 概率水平向动峰值加速度 $0.227 g$, 100 a 超 2% 概率水平向动峰值加速度 $0.32 g$ ^[12-14]。

本次研究对阿尔塔什右岸高边坡的危岩体进行稳定性分析时,按 100 a 超越概率为 2% 的基岩峰值加速度 $a = 0.320 g$ 进行稳定性计算。

《水工建筑物抗震设计规范》^[15] (SL 51247—2018) 建议,采用刚体极限平衡法进行土石坝的抗震稳定计算方法,即通过在每个土条的重心处施加

一个水平与竖向地震力,相应不同的设防烈度,规范规定了其水平向与竖向的加速度分量。具体的规定如下:

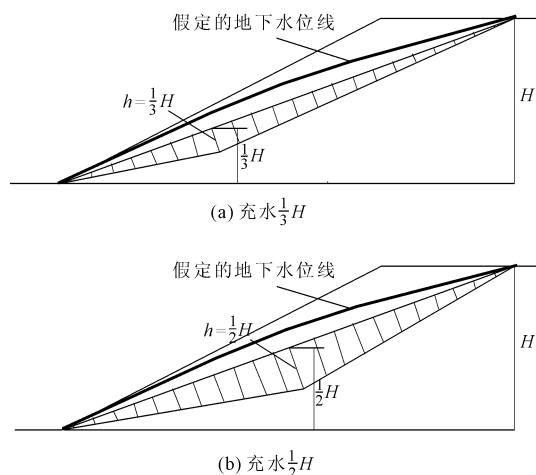


图 6 考虑降雨时坡体内地下水及水压力的分布形式

(1) 计算地震作用效应采用拟静力法时,随建筑物高度作用在质点 i 上水平向地震惯性力代表值采用下式计算:

$$F_i = a_h \xi G_{ei} \alpha_i / g$$

式中: F_i 为作用在质点 i 上水平向地震惯性力代表值, kN ; a_h 为水平向设计地震加速度代表值, m/s^2 ; ξ 为地震作用的效应折减系数,一般取值 0.25; G_{ei} 为集中于质点 i 的重力作用标准值, kN ; α_i 为质点 i 的动态分布系数; g 为重力加速度, $9.8 \text{m}/\text{s}^2$ 。

(2) 进行抗震计算当采用拟静力法时,质点 i 的动态分布系数 α_i 取值如图 7 所示,其中 α_m 在设计烈度为 7° 、 8° 和 9° 时,分别取值 3.0、2.5 和 2.0。

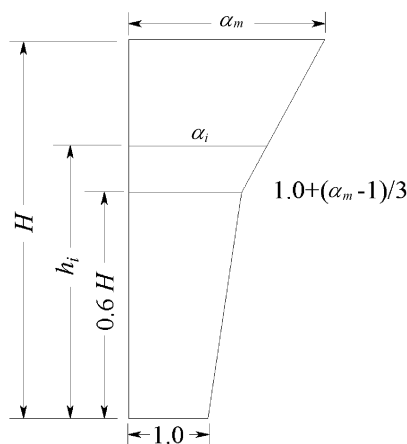


图 7 系数 α_i 沿高程的分布情况

考虑到危岩体的高度较小,本次计算时在其重心处施加一个沿竖向放大的水平方向的地震加速

度,但对竖向地震加速度不予考虑。

4.2 计算参数

计算时各结构面的力学参数见表 1。

表 1 不同类型结构面的参数建议值与计算取值

结构面类型	摩擦系数 f		黏聚力 c/MPa	
	参数建议值	计算取值	参数建议值	计算取值
卸荷裂隙张开有填充物	0.35 ~ 0.55	0.450	0.00 ~ 0.05	0.025
结构面闭合及其他结构面	0.55 ~ 0.70	0.600	0.10 ~ 0.20	0.150
岩层层面有泥膜	0.25 ~ 0.30	0.300	0.05 ~ 0.10	0.100
小型断层等软弱夹层	0.25 ~ 0.30	0.275	0.05 ~ 0.10	0.075

注:岩石重度 $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ 。

在本次计算中,对于边坡中发育的陡倾角卸荷裂隙,其抗剪强度参数按张开有充填物的结构面取值,对岩层层面按有泥膜的岩层层面参数取值,参考周边其他类似工程摩擦系数 f 和黏聚力 c (MPa) 均取较大值更稳妥,其它结构面的抗剪强度参数按闭合结构面取值。

对于安全系数控制标准取值,据《水利水电工程边坡设计规范》^[16] (SL 386—2007),阿尔塔什水利枢纽为大(1)型一等工程,考虑到右岸边坡安全在整个枢纽工程中的重要性,将右岸边坡级别设为 I 级,在进行稳定性分析计算时,天然状况、正常蓄水位工况下安全系数取值大于 1.25,地震工况下安全系数取值大于 1.10。

4.3 计算结果

根据对 W19 危岩体现场调查,该危岩体内卸荷裂隙十分发育,其出露情况见图 4、图 5。在现场对该区发育的随机结构面进行了大量的量测,统计结果见图 8。

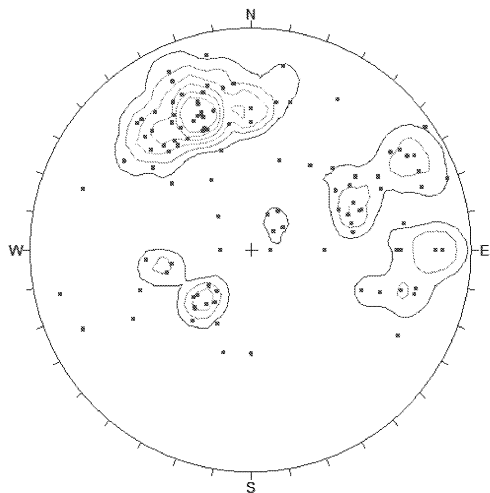


图 8 危岩体 W19 分区的结构面统计结果

根据结构面的统计结果,并结合现场调查情况,该区主要发育有以下 2 组结构面:

(1) J1: $5^\circ \angle 80^\circ$,卸荷裂隙。

(2) J2: $230^\circ \angle 30^\circ$,层面。

边坡面的产状为 $0^\circ \angle 70^\circ$,交棱线产状为 $278.8^\circ \angle 20.8^\circ$ 。

该危岩体在下游方向临空,其产状为 $30^\circ \angle 70^\circ$ 。该分区的失稳模式见图 9。从图中可以看出,因 J1 与 J2 的交棱线位于滑动区,可能会发生楔体破坏。结构面相互切割形成的块体的空间形状见图 10。

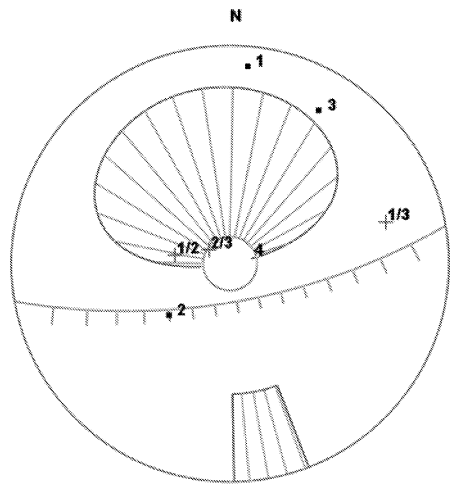


图 9 危岩体 W19 区的失稳模式图

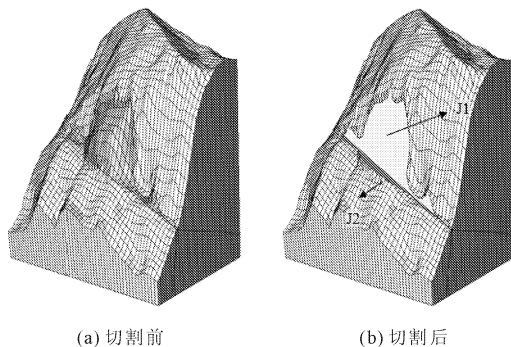


图 10 由结构面切割形成的危岩体 W19 空间形状

经计算,该块体的几何参数为:

① 块体体积 $V = 25.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

② 块体自重 $W = 717.79 \times 10^4 \text{ kN}$ 。

③ 底滑面 J1 面积: $22\ 127 \text{ m}^2$ 。

④ 底滑面 J2 面积: $5\ 468.2 \text{ m}^2$ 。

在进行稳定性分析时,卸荷裂隙参数按“张开有充填物的卸荷裂隙”的参数取值,层面按“有泥膜的岩层层面”的参数取值,表 2 列出了该块体各工况下的稳定分析成果。

表 2 危岩体 W19 各工况下的稳定分析成果

计算 工况	底滑面上 的水压力		底滑面上的 有效法向力		安全 系数 F
	$U/(\times 10^4 \text{ kN})$		$N/(\times 10^4 \text{ kN})$		
	J1	J2	J1	J2	
天然状况	0.00	0.00	672.5	257.6	1.77
降雨工况	297.34	75.43	375.2	182.2	1.27
地震工况	0.00	0.00	652.1	249.8	1.43

4.4 敏感性分析

考虑到 W19 危岩体的重要性,此小节对卸荷裂隙的倾向作敏感性分析^[17]。

根据现场结构面的量测结果,W19 发育的卸荷裂隙的产状 NW330°—NE20°∠50°~80°,而边坡面的平均产状为 0°∠70°。这表明随着卸荷裂隙的产状由 NW 向 NE 方向过渡时,与层面的交棱线方向在上游方向由走向山里逐渐向临空面过渡。受地形的限制,若要使卸荷裂隙与层面相互组合在边坡面上形成可动块体,卸荷裂隙与层面的交棱线在上下游方向与边坡面存在交点。此外,当卸荷裂隙的倾向由 NW 向 NE 向过渡时,其与层面的交棱线的倾角逐渐变缓,同时所形成的块体体积也逐渐变大。

(1) 卸荷裂隙的产状为 350°∠80°,层面产状为 220°∠50°,交棱线产状 268.07°∠38.53°。

图 11 为由结构面切割形成的块体的空间形状。该块体的几何参数为:

- ① 块体体积 $V = 2.34 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。
- ② 块体自重 $W = 63.44 \times 10^4 \text{ kN}$ 。
- ③ 侧滑面(卸荷裂隙 J1)的面积:5 811.4 m^2 。
- ④ 底滑面(层面 J2)的面积:879.67 m^2 。

表 3 列出了相应的计算结果。

表 3 卸荷裂隙产状为 350°∠80°时危岩体 W19 各工况下的稳定分析成果

计算 工况	底滑面上 的水压力		底滑面上的 有效法向力		安全 系数 F
	$U/(\times 10^4 \text{ kN})$		$N/(\times 10^4 \text{ kN})$		
	J1	J2	J1	J2	
天然状况	0.00	0.00	52.1	30.4	1.44
降雨工况	52.25	7.95	52.3	0.0	0.62
地震工况	0.00	0.00	48.8	28.5	1.27

注:考虑极端降雨工况时,受侧滑面扬压力作用,块体将脱离侧滑面沿层面单面滑动。

(2) 卸荷裂隙产状为 0°∠80°,层面产状为 220°∠50°,交棱线产状 276.64°∠33.24°。

图 12 为由结构面切割形成的空间块体形状,该块体的几何参数为:

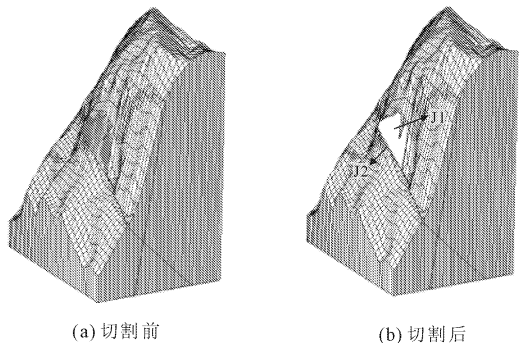


图 11 卸荷裂隙产状为 350°∠80°时切割形成的块体的空间形状

- ① 块体体积 $V = 12.69 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。
 - ② 块体自重 $W = 342.89 \times 10^4 \text{ kN}$ 。
 - ③ 侧滑面(卸荷裂隙 J1)的面积为:15 383 m^2 。
 - ④ 底滑面(层面 J2)的面积为:2 904 m^2 。
- 表 4 列出了相应的计算结果。

表 4 卸荷裂隙产状为 0°∠80°时危岩体 W19 各工况下的稳定分析成果

计算 工况	底滑面上 的水压力		底滑面上的 有效法向力		安全 系数 F
	$U/(\times 10^4 \text{ kN})$		$N/(\times 10^4 \text{ kN})$		
	J1	J2	J1	J2	
天然状况	0.00	0.00	317.1	207.4	1.46
降雨工况	169.22	31.95	285.1	381.9	0.96
地震工况	0.00	0.00	300.4	196.5	1.25

注:考虑极端降雨工况时,受侧滑面扬压力作用,块体将脱离侧滑面沿层面单面滑动。

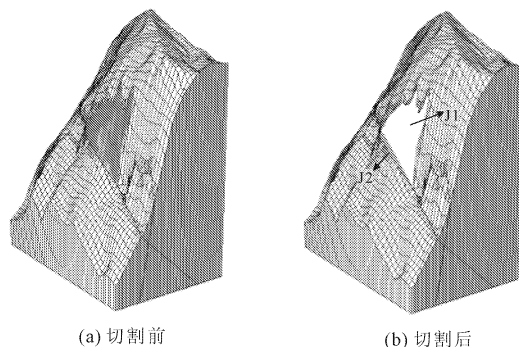


图 12 卸荷裂隙产状为 0°∠80°时切割形成的块体的空间形状

5 结 论

采用三维刚体极限平衡法对阿尔塔什右岸边坡表面分布的危岩体 W19 进行了稳定性分析研究,结果表明:

(1) 危岩体 W19 岩层层面向坡里(层面产状为 230°∠30°),且走向与边坡走向基本平行,而卸

荷裂隙倾向坡外(卸荷裂隙产状为 $5^\circ \angle 80^\circ$),且走向与边坡面基本平行(边坡面产状为 $0^\circ \angle 70^\circ$),这一特定的组合模式导致了交棱线倾向上游且倾角相对较缓,从而使得楔体的稳定性较好,在不同工况下的稳定安全系数均满足规范要求。

(2) 卸荷裂隙产状为 $350^\circ \angle 80^\circ$,层面产状为 $220^\circ \angle 50^\circ$ 和卸荷裂隙产状为 $0^\circ \angle 80^\circ$,层面产状为 $220^\circ \angle 50^\circ$ 在极端降雨工况时,受侧滑面扬压力作用,块体将脱离侧滑面沿层面单面滑动,滑动块体体积分别为 $2.34 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $12.69 \times 10^4 \text{ m}^3$,需尽量清除表面危岩孤石,然后采用锚杆结合主被动柔性防护技术以及锚索结合框格梁进行支护。

参考文献:

- [1] 李万逵. 激光扫描在阿尔塔什右岸高边坡稳定性分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(2): 66-72.
- [2] 王玉杰. 新疆阿尔塔什水利枢纽工程右岸高陡边坡稳定性专题研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.
- [3] 王吉亮, 李会中, 等. 乌东德水电站右岸引水洞进口边坡稳定性研究[J]. 水利学报, 2012, 43(11): 1271-1278.
- [4] 张永兴. 边坡工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] 孙超, 孙益哲, 单博. 某变电站边坡稳定性分析及评价[J]. 吉林建筑大学学报, 2019, 36(6): 7-12.
- [6] 陈祖煜. 岩质边坡稳定性分析—原理、方法、程序

[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

- [7] 韩鸿彬. 极限平衡法在边坡稳定分析中的应用[J]. 中国矿业, 2008, 17(S1): 186-187.
- [8] 袁闻, 徐青, 陈胜宏, 等. 边坡稳定分析的三维极限平衡法及工程应用[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 56-61, 84.
- [9] 宋胜武, 巩满福, 雷承第. 峡谷地区水电工程高边坡的稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 226-234.
- [10] 孙平, 陈玺, 王玉杰. 边坡稳定极限分析斜条上限法的全局优化方法[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 741-748, 756.
- [11] 吴梦喜, 杨家修, 湛正刚. 边坡稳定分析的虚功率法[J]. 力学学报, 2020, 52(3): 663-672.
- [12] 寇昊, 李宁, 郭双枫. 地震作用下岩体边坡破坏机制及稳定性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(4): 81-88.
- [13] 宋丹青, 陈志荣, 陈俊栋. 岩质边坡地震动力响应研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(6): 1-7.
- [14] 马冲, 邢天海, 郑有雷, 等. 近断层地震动对边坡稳定性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 49-53, 60.
- [15] 水工建筑物抗震设计规范: SL 51247—2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [16] 水利水电工程边坡设计规范: SL 386—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [17] 祁小辉, 李典庆, 曹子君, 等. 考虑地层变异的边坡稳定不确定性分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1385-1396.

(上接第 8 页)

- [3] Thomas M T. Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes[J]. Engineering Geology, 1999, 52(1/2): 23-33.
- [4] 刘之葵, 梁金城, 周建红. 岩溶区土洞发育机制的分析[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 45-49.
- [5] 张丽芬, 曾夏生, 姚运生, 等. 我国岩溶塌陷研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007(3): 126-130.
- [6] 李前银. 再论岩溶塌陷的形成机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(3): 52-55.
- [7] 罗小杰, 罗程. 土洞型岩溶地面塌陷物理模型[C]//2016年全国工程地质学术年会论文集, 北京: 科学出版社, 2016: 1246-1254.
- [8] 张少波, 简文彬, 洪儒宝, 等. 水位波动条件下覆盖型岩溶塌陷试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 659-667.
- [9] 周建, 张映钱, 方亿刚, 等. 水位变动及降雨入渗联合作用对岩溶地面塌陷的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 218-222.

- [10] 罗小杰. 也论覆盖型岩溶地面塌陷机理[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 886-895.
- [11] 王飞, 柴波, 徐贵来, 等. 武汉市岩溶塌陷的演化机理研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 824-832.
- [12] 贾龙, 蒙彦, 管振德. 岩溶土洞演化及其数值模拟分析[J]. 中国岩溶, 2014, 33(3): 294-298.
- [13] 丁庆忠. 弱透水盖层岩溶塌陷的水—气压力致塌机理物理模型研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [14] 曹细冲. 矿井疏干区岩溶塌陷的水击气爆作用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [15] 刘奔. 覆盖型岩溶致塌模式及其临界判据研究[D]. 福州: 福州大学, 2018.
- [16] Karl T. Theoretical Soil Mechanics [M]. 4th Edition. New York: John Wiley & Sons, 1947: 66-76.
- [17] 林军, 池永翔. 永定县培丰镇樟坑自然村地面塌陷地质灾害调查监测报告[R]. 福州: 福建省地质调查研究院, 2015.