

阿海水电站左岸开挖边坡稳定性分析研究

陈 华^{1,2}, 赵有明¹, 张发春²

(1 中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081; 2 云南省交通规划设计研究院, 云南 昆明 650011)

摘要: 在水电站建设中, 由于开挖而形成的一些高边坡, 其稳定性状态是影响水电站建设能否顺利进行的关键问题之一。阿海水电站工程地质条件复杂, 针对左岸开挖形成的岩质边坡, 考虑了不同水位变化、地震、降雨等, 对其典型边坡进行稳定性分析研究。采用极限平衡法定量分析了各种工况下的安全程度, 同时使用有限元强度折减法进行了应力变形和稳定性分析。在此基础上, 提出了对应的边坡治理措施, 为阿海水电站的边坡治理提供理论参考。

关键词: 水电站; 边坡稳定; 极限平衡法; 强度折减法

中图分类号: U416 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2010)03-0051-06

Research on Stability of an Excavation Slope on Left Bank of Ahai Hydropower Station

CHEN Hua^{1,2}, ZHAO You-ming¹, ZHANG Fa-chun²

(1. Railway Institute of Architecture, China Academy of Railway Sciences, Beijing 10008, China)

(2. Broadvision Engineering Consultants, Kunming 650011, China)

Abstract In the construction of hydropower stations, the stability of some high slopes due to excavation is one of the key issues. The geological conditions are very complicated in Ahai hydropower station. The stability of typical rock excavation slopes on the left bank of the station is analyzed with regard to water levels, earthquakes and rainfalls. The safety factors are obtained by the limit equilibrium method in variable conditions. At the same time, the finite element method is used in deformation analysis. The corresponding management measures of slopes are put forward and a theoretical reference is provided for slope treatment in Ahai hydropower station.

Key words hydropower station; slope stability; limit equilibrium method; strength reduction

0 引言

阿海水电站位于云南省丽江市玉龙县(右岸)与宁蒗县(左岸)交界的金沙江中游河段, 是金沙江中游河段一库八级的第四级, 电站装机容量 2 000 MW。坝体属碾压混凝土重力坝, 最大坝高 138 m, 枯期河水位高程 1 408 ~ 1 410 m, 正常蓄水位高程 1 504 m。坝址河谷为“V”型, 岸坡自然地形坡度一般 35° ~ 45°, 两岸冲沟发育。工程区基岩大面积裸露, 基岩主要为泥盆系(D)和志留系(S)层状岩体以及华力西晚期顺层侵入的辉绿岩($\beta\mu_4^3$)条带, 岩层呈横河向展布, 岩层中陡倾向上游, 主要结构面为层面及层间挤压面、带。

阿海水电站枢纽区开挖, 左岸将形成坝肩开挖边坡和消力池开挖边坡。左岸的溢洪道引渠、坝肩及消力池开挖边坡规模较大, 高度近 300 m; 这些岩质高边坡是否稳定直接影响到水电站建设的顺利进行。因此, 有必要对这些重要边坡进行稳定性状态分析研究, 为该段高边坡的治理提出了合理的建议。

收稿日期: 2010-03-18

作者简介: 陈华(1973-), 男, 在读博士, 高级工程师。主要研究方向: 边坡稳定和支挡结构。

E-mail: kjchenhua@126.com

1 边坡区域工程地质条件及稳定性分析方法

1.1 工程地质条件

工程区域地质构造背景十分复杂. 工程区外围分布多条晚更新世以来活动强烈的断裂, 地震活动频繁且强度大. 坝址区位于地震活动相对较弱的地段, 据国家地震安全性评定委员会审定, 坝址区地震基本烈度考虑为 VIII 度. 工程边坡区地下水不丰富, 岩体具弱~微透水性.

自然边坡地形坡度 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 在高程 1700 m 以下无相对缓坡地形. 岸坡坡面欠完整, 在坝轴线上、下游沿辉绿岩与层状岩体接触带发育两条小冲沟, 下游为规模较大的 3 号冲沟. 基岩大面积裸露, 崩积、坡积等覆盖层零星分布, 除冲沟部位, 覆盖层厚度一般小于 3 m. 地段内岩层呈横河向分布中陡倾向上游的单斜构造, 层状岩体以层面或层间挤压带、面为主要结构面, 辉绿岩体亦以平行层面的节理或挤压面延伸. 挤压面平均发育间距 4 m, 挤压带平均发育间距 15 m, 以碎裂岩、挤压片状岩为主夹少量泥质, 且多数挤压带被后期石英脉或透镜体充填或胶结. 层面发育, 面平直或略起伏、略粗糙, 间距一般 10~50 cm, 弱风化以下层面多闭合或为钙质、硅质胶结, 少量具碳薄膜. 层状岩体主要为中厚层状结构、互层状结构及似完整层状结构, 浅表部部分为层状碎裂结构; 辉绿岩主要为镶嵌碎裂结构、碎裂结构. 断层总体不发育, 均为陡倾角, 且仅在辉绿岩体内发育, 延伸规模有限.

综合工程地质环境、边坡开挖组合和边坡工作条件, 沿结构面的滑移是边坡最可能出现的坡体破坏模式, 软弱结构面、降雨和地震荷载作用对左岸开挖边坡的稳定性影响较大.

1.2 边坡稳定性分析方法

目前边坡稳定分析方法主要有极限平衡法和有限元分析方法^[1]. 极限平衡法只考虑静力平衡条件和摩尔-库伦破坏准则, 通过分析边坡在破坏那一时刻的力的平衡来求得问题的解. 由于在大多数情况下, 问题是静不定的, 极限平衡法通过引入不同的简化假设而使问题静定可解, 从而形成了不同的方法, 如: 瑞典法、Bishop 法、Morgenstem-Price 法、Spencer 法、Sarma 法等. 这些方法的不同假设条件可见文献 [2]. 该方法虽能给出边坡的稳定性状态, 但是无法考虑边坡体的变形状态. 对于开挖边坡来说, 开挖过程中的变形状态也是施工及设计单位极为关心的关键问题.

有限元强度折减法是基于边坡有限元变形分析和强度储备安全系数的稳定性分析方法. 其安全系数定义为: 对岩土体的强度参数黏聚力 c 和内摩擦因数 $\tan\varphi$ 按同一系数 F 进行折减, 一般地以有限元计算分析不收敛作为判据, 这时的折减系数 F 即为边坡的稳定安全系数^[3-4]. 由于该方法可以考虑边坡体的变形和破坏过程, 因此在实际工程中得到了广泛的应用.

为了合理地分析水电站左岸边坡的稳定性状态, 本文分别采用极限平衡法和有限元强度折减法, 分析不同工况下枢纽区开挖边坡的稳定性, 从而探讨水位变化、降雨、地震荷载等对边坡稳定性的影响及边坡可能的滑移模式.

2 计算条件及地质力学模型

2.1 计算条件

左岸开挖边坡稳定性分析中, 考虑的主要荷载有: 岩体自重、孔隙水压力 (包括水库蓄水、降雨以及库水位骤降等引起的孔隙水压力)、作用在边坡表面的外荷载以及地震荷载.

1) 岩体自重

在边坡体内, 边坡内部浸润线以上的岩(土)体采用天然容重, 浸润线以下的岩(土)体采用饱和容重计算自重. 位于坡外水库水位以下的岩(土)体按浮容重计算自重.

2) 孔隙水压力

边坡地下水的渗流作用非常复杂, 计算分析中对于孔隙水压力的数值, 主要依据边坡的基本水文地质条件, 考虑各工况下地下水头的大小. 在能够计算滑体内水头分布的情况下, 孔隙水压力由计算值确定; 其它情况下借鉴类似工程经验进行简化处理. 暴雨工况下滑体考虑潜在滑面以上 $1/3$ 滑体高水头.

3) 地震荷载

采用拟静力法计算地震惯性力^[5], 计算中只计入水平地震力作用, 水平向地震加速度代表值取基准期 50 年内超越概率 $P = 10\%$ 时的地震加速度 $0.16g$ 地震作用的效应折减系数取 0.25

4) 库水位骤降或泄洪雾化对孔隙水压力的影响

蓄水后水位骤降, 考虑库水由正常蓄水位降低 $5m$. 泄洪雾化, 受泄洪雾化影响的边坡区域, 坡外水库水位以上滑体部分考虑潜在滑面以上 $1/3$ 滑体高水头, 坡外水库水位以下滑体考虑全水头.

根据地质勘察资料及室内外试验, 边坡稳定分析计算采用的强度参数见表 1. 开挖边坡有限元计算采用的物理力学参数见表 2

表 1 边坡稳定计算岩体力学参数采用值

Tab. 1 Applied parameters in the computational rock mechanics for slope stability analysis

岩土类型	$\varphi' / (^\circ)$	c' / MPa	天然重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	饱和重度 $\gamma_{sat} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
强风化岩体	31	0.3	23.4	24.4
弱风化岩体	35	0.5	24.7	25.7
微风化岩体	47.7	1.0	26.1	26.5

表 2 有限元计算参数

Tab. 2 Parameters used in the Finite Element Method

2.2 计算模型

1) 极限平衡法: 水电站左岸开挖边坡主要有坝肩和消力池两个岩质开挖高边坡, 采用 G-sbpe 大型岩土分析软件, 选用 Spencer 法计算搜索潜在滑动面

及相应的边坡稳定安全系数, 具体的极限平衡计算模型见图 1 和图 2

2) 有限元强度折减法: 采用 ANSYS 大型有限元分析软件, 按照平面应变问题建立模型, 岩土材料用六节点三角形平面单元 PLANE2 模拟, 结构面采用接触单元来模拟, 岩土体材料本构模型采用理想弹塑性模型, 屈服准则为平面应变莫尔-库仑匹配 D-P 准则, 边界条件上部为自由边界, 四个侧面均法向约束, 底部固定约束. 具体的有限元分析计算模型见图 3~6

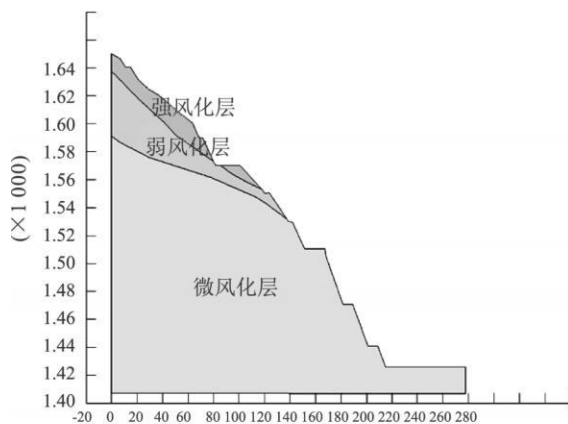


图1 左岸坝肩开挖后边坡模型

Fig.1 Slope model of the left dam after excavation

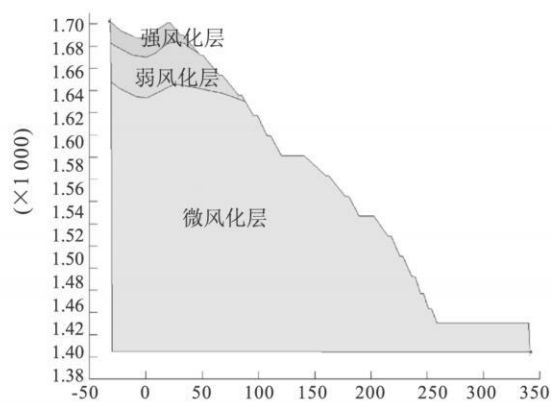


图2 左岸消力池开挖后边坡模型

Fig.2 Slope model of the left excavated slopes of the stilling basin

3 计算结果

3.1 极限平衡法结果

左岸开挖边坡稳定性分析中, 首先对枢纽区开挖边坡采用极限平衡法计算各剖面的安全系数, 在每一个工况下考虑了不同的滑移模式, 即控制不同的滑动区域, 搜索出不同的临界滑移面, 如图 7 图 8 所示.

表 3和表 4分别给出了用 Spencer 极限平衡法得到的坝肩开挖边坡和消力池开挖边坡不同工况下的安全系数.

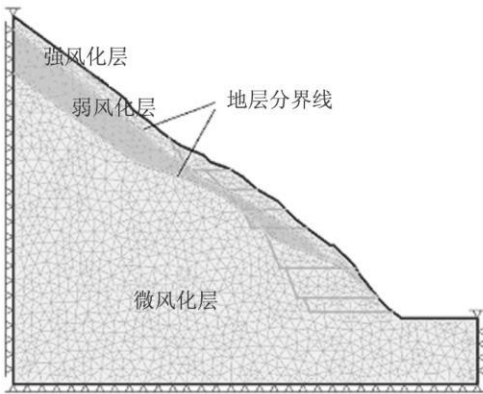


图3 左岸坝肩开挖边坡有限元模型(开挖前)
Fig.3 Finite element slope model of the left dam (before excavation)

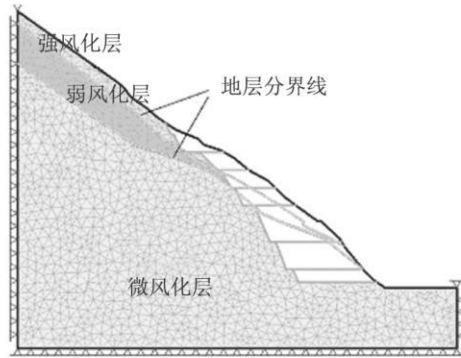


图4 左岸坝肩开挖边坡有限元模型(分步开挖结束)
Fig.4 Finite element slope model of the left dam (after step excavation)

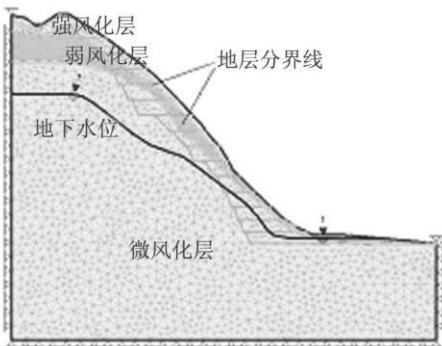


图5 左岸消力池边坡有限元模型(开挖前)
Fig. 5 Finite element model of the left excavated slopes of the stilling basin (before excavation)

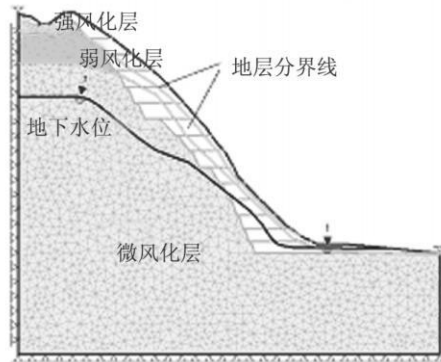


图6 左岸消力池边坡有限元模型(分步开挖结束)
Fig. 6 Finite element model of the left excavated slopes of the stilling basin (after step excavation)

3. 2 有限元强度折减法结果

对坝基左岸坝肩开挖边坡和消力池开挖边坡进行有限元计算分析, 开挖载荷只考虑岩体自重. 坝肩开挖边坡共分 7 步开挖, 消力池开挖边坡共分 15 步开挖. 通过有限元强度折减法分别提取左岸坝肩边坡和消力池边坡破坏时的最大剪应变等值线图 9 和图 10 进而获得可能的最危险滑动面及相应的稳定安全系数.

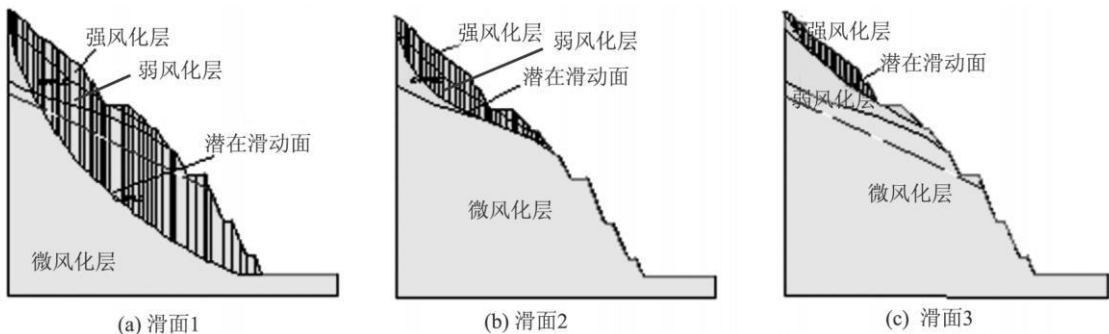


图7 左岸坝肩开挖边坡不同的临界滑移面

Fig.7 Different critical slide surfaces for the slopes of the left dam

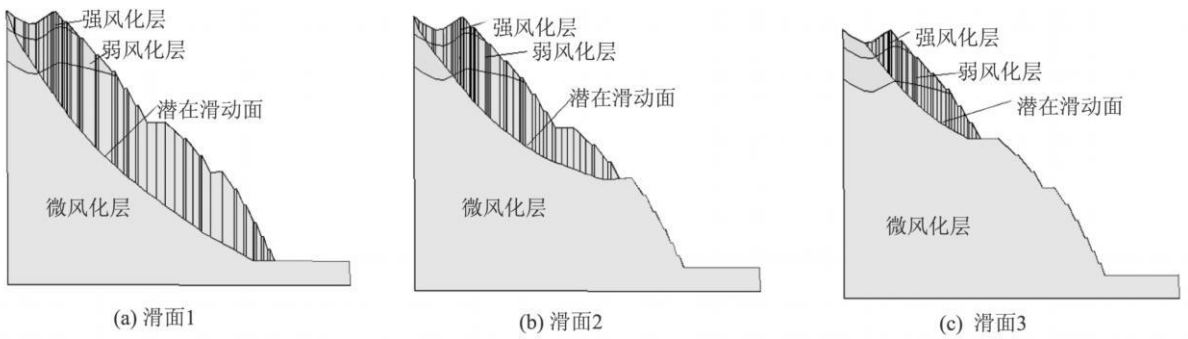


图8 消力池开挖边坡不同的临界滑移面

Fig.8 Different critical slide surfaces for the excavated slopes of the stilling basin

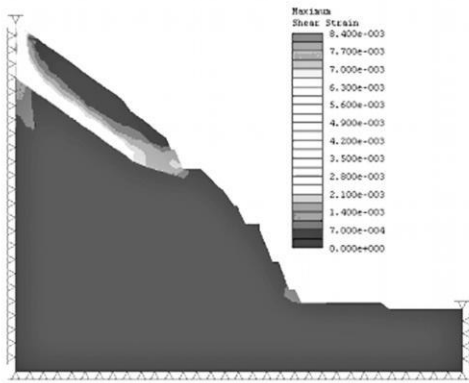


图9 左岸坝肩边坡破坏时的最大剪应变等值线 (安全系数为2.33)

Fig. 9 Contour of the shear strain at the failure state for the slopes of the left dam (Factor of safety is 2.33)

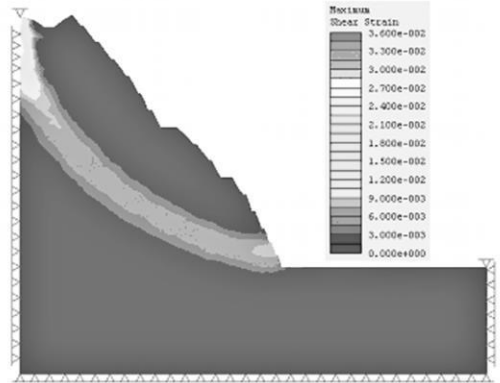


图10 左岸消力池边坡破坏时的最大剪应变等值线 (安全系数为1.92)

Fig. 10 Contour of the shear strain at the failure state for the left excavated slopes of the stilling basin (Factor of safety is 1.92)

3.3 计算结果分析

1)对于左岸坝肩开挖边坡, 在施工开挖、蓄水、地震等各种不同工况下的极限平衡法安全系数为 2.49~2.80, 安全系数均大于 2.0。有限元计算结果表明, 开挖结束时边坡开挖面最大位移 12.44 mm, 发生在高程 1470 m 处。由于该岩质边坡在高程 1560 m 以下为微风化层, 塑性区在开挖面分布范围很小, 主要因局部应力集中引起。塑性区在边界附近有一定范围的分布, 主要由边界约束效应引起的拉破坏形成; 在强风化与弱风化的交界面因强度参数的变化有一些突变, 也与边界约束效应有关。有限元强度折减法分析的最大剪应变等值线图说明最有可能形成的滑面也是沿弱风化层底面(对应图 7 的滑面 3), 在高程 1570 m 处剪出, 相应的安全系数为 2.33, 比极限平衡法计算得到的安全系数 2.49 小, 误差主要来自于两个方面, 一是有限元网格疏密, 二是边坡参数, 由于强度准则都只能适合于内摩擦角小于 30° 的剪切破坏型材料, 计算误差有随内摩擦角的增大而增大的趋势, 用于岩质边坡 ($\varphi > 35^\circ$) 计算必然产

表 3 坝肩边坡不同工况下的安全系数

Tab 3 Factors of safety for the dam slopes under different conditions

滑面	自然状态	施工期	蓄水后	蓄水后地震
滑面 1	2.82	2.70	2.70	2.49
滑面 2	3.51	3.10	3.10	3.00
滑面 3	2.80	2.77	2.77	2.68

表 4 消力池开挖边坡不同工况下的安全系数

Tab 4 Factors of safety for the excavated slopes of the stilling basin under different conditions

滑面	自然状态	施工期	蓄水后	蓄水后地震
滑面 1	2.41	2.18	2.18	2.06
滑面 2	3.13	2.90	2.90	2.74
滑面 3	3.26	3.05	3.05	2.89

生离散误差,误差处于可以接受的 5% 左右.可见该开挖边坡发生破坏的可能性不大,不需进行强加固支护.

2)对于左岸消力池开挖边坡,在各种不同工况下的极限平衡法安全系数为 2.06~2.41 安全系数也均大于 2.0 开挖结束时边坡开挖面最大位移 27.43 mm,发生在高程 1570 m 处,在该剖面由于开挖方量较大,应力释放量也较大.同坝肩开挖边坡相类似,塑性区在边界附近有较大范围的分布,主要由边界约束效应引起拉破坏形成;在强风化与弱风化的交界面因强度参数的变化有一些突变,也与边界约束效应有关.有限元强度折减法分析边坡破坏时的最大剪应变等值线图揭示,剪出口在边坡开挖高程 1400 m 处的滑面是最危险滑面(对应图 8 的滑面 1),对应安全系数为 1.92 比极限平衡法得到安全系数 2.18 稍小,但是边坡稳定安全系数均远大于 1.0 可见此边坡在无支护的状态下的安全系数是满足规范要求的,因此不需要进行支护加固.

4 结论和建议

针对阿海水电站左岸开挖形成的岩质高边坡^[6],采用目前广泛使用的极限平衡法和有限元强度折减法对其在各种荷载作用下进行变形与稳定性分析,通过计算分析了在自然状态、施工运行状态、蓄水后状态及蓄水后地震作用的不同工况下的稳定性程度,可以得出以下一些结论和建议:

1)工程开挖边坡的坡体中存在多组岩层面,边坡破坏决定于这些岩层面的空间组合,但无法确定究竟沿具体的哪一组滑动、哪几组面的空间组合发生滑动、滑动的范围是多大等问题,采用有限元强度折减法和极限平衡法对比分析成功地解决了这些问题.

2)由计算分析表明,左岸坝肩、消力池开挖边坡在各种工况下是稳定的,极限平衡法和有限元强度折减法得到的安全系数均远大于 1.0,不需进行强加固支护.

3)由不同工况下的计算结果知,降雨和地震荷载作用对左岸开挖边坡的稳定性影响较大,因此在开挖边坡表层应布置系统排水孔,坡体内设置深排水孔对坡体外雨水和坡体内裂隙水进行排泄,边坡马道采用混凝土进行封闭等.

4)在开挖边坡支护方面,应主要针对表层较薄的堆积物和强风化层进行清理,对岩体内不利的节理、裂隙和岩层面组合形成的潜在滑移块体,开挖引起的应力释放导致的开挖坡体表层的松弛进行处理,如采用系统砂浆锚杆、挂网喷混凝土支护坡体表面,局部设置加强长锚杆、预应力锚杆对不利结构面组合形成的关键块体进行加固.

参考文献:

- [1] Duncan JM. State of the Art Limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(7): 577-596.
- [2] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004.
- [4] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements. Géotechnique, 1999, 49(3): 387-403.
- [5] 中华人民共和国电力行业规范. DL/T 5353-2006 水利水电工程边坡设计规范[S].
- [6] 张有天. 岩石高边坡的变形与稳定[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.