

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.03.017

考虑动水压力的改进 Bishop 法及其 在岸坡稳定性评价中的应用

陈卫兵¹, 江浩¹, 王立波¹, 张振华², 陈明亮², 李成杰²

(1. 山东电力工程咨询院有限公司 勘测事业部, 山东 济南 250013; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:抽水蓄能电站岸坡在周期性水位变动下易发生变形失稳, 危及库区人民生命财产安全。为评价水库运行期的岸坡稳定性, 文章提出一种基于改进 Bishop 法的稳定性评价方法, 通过引入取矩中心及其确定方法, 使其适用于包括圆弧滑动面在内的任意形状的滑动面, 其次在评价库水位变动对岸坡稳定性时引入了动水压力的计算公式。以 Fredlund 的考题为例, 通过与 Spencer 法和 Morgenstern-Price 法进行对比验证了该方法的可行性, 对不同库水位变化情况下的安全系数进行敏感性分析。结果表明:改进 Bishop 法计算得到的规律与 Morgenstern-Price 法基本保持一致, 而该方法与 Morgenstern-Price 法计算的安全系数最大偏差为 0.4; 此外由于考虑了动水压力, 与传统方法相比, 计算结果更准确地反映了边坡稳定性。将改进 Bishop 法应用于周宁抽水蓄能电站下库区某岸坡的分析, 结果表明, 在未考虑动水压力时, 该岸坡的安全系数为 1.287, 与描述的失稳迹象相符, 而在考虑了动水压力后, 安全系数降低了 0.272, 说明在水库运行期间, 该岸坡存在较大的失稳潜力。改进的 Bishop 法可以更加准确地评价抽水蓄能电站水库运行期岸坡的稳定性, 为科学评价岸坡稳定性提供依据。

关键词:抽水蓄能电站岸坡; 稳定性; 改进 Bishop 法; 动水压力; 折线滑动面

中图分类号:TV743 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)03-0395-06

Improved Bishop method considering hydrodynamic pressure and its application to bank slope stability evaluation of pumped storage power station

CHEN Weibing¹, JIANG Hao¹, WANG Libo¹,
ZHANG Zhenhua², CHEN Mingliang², LI Chengjie²

(1. Survey Division, Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The bank slope of pumped storage power station is prone to deformation and instability under periodic water level changes, which endangers the safety of people's life and property in the reservoir area. In order to evaluate the bank slope stability of reservoir during operation, a stability evaluation method based on improved Bishop method is proposed. This method introduces the center of moment taking and its determination method, which makes it suitable for any shape of sliding surface including circular sliding surface. The calculation formula of hydrodynamic pressure is also introduced when evaluating the stability of bank slope under the changes of reservoir water level. Taking Fredlund's test questions as an example, the feasibility of the proposed method was verified through comparison with Spencer's method and Morgenstern-Price method. The sensitivity analysis of the safety

收稿日期:2023-09-19;修回日期:2023-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51979068);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2023HGQA0096)

作者简介:陈卫兵(1979—),男,湖北天门人,博士,山东电力工程咨询院有限公司高级工程师;

张振华(1977—),男,福建政和人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail:zenithzhang@sina.com.

factor under different reservoir water level changes was carried out. It is found that the law calculated by the improved Bishop method is basically consistent with that calculated by Morgenstern-Price method, and the maximum deviation in the safety factor calculated by the improved Bishop method and Morgenstern-Price method is 0.4. In addition, considering the hydrodynamic pressure, the calculated results can reflect the slope stability more accurately than the traditional method. The improved Bishop method was applied to the analysis of a bank slope in the lower reservoir area of Zhouning Pumped Storage Power Station. The calculated results show that the safety factor of the bank slope is 1.287 when the hydrodynamic pressure is not considered, which is consistent with the described signs of instability. However, taking into account the hydrodynamic pressure, the safety factor is reduced by 0.272. This means that there is a great instability potential of the bank slope during the operation of the reservoir. Therefore, the improved Bishop method can more accurately evaluate the bank slope stability of pumped storage power station reservoir during operation, and provide a basis for scientific evaluation of bank slope stability.

Key words: bank slope of pumped storage power station; stability; improved Bishop method; hydrodynamic pressure; broken-line sliding surface

0 引言

近些年来,随着我国国民经济的高速发展,电力系统需求不断增加,抽水蓄能电站应运而生。抽水蓄能电站能够缓解电力压力,同时符合“双碳”目标,保护环境^[1]。在电力负荷低谷时,将水抽至下水库;在电力负荷高峰时,从上水库放水至下水库,利用地势高差将水的重力势能转化为电能,缓解国内对电力的需求^[2]。然而,一些抽水蓄能电站的运行导致水位在短周期内快速“上升-下降”循环,这会对岸坡稳定性造成不利影响。目前,针对水位长周期波动时岸坡稳定性的传统极限平衡法已经开展一些研究^[3-4]。文献[3]利用 Fortran 语言编写了水位长周期波动时渗流作用造成的坡内颗粒迁移对岸坡的稳定性影响;文献[4]研究库水周期性渗透作用造成岸坡消落带土体内部颗粒流失,导致土体强度劣化,进而对岸坡稳定性产生不利影响。但是,水位短周期波动时,往往水位的下降速度大于坡体的渗透系数,从而导致动水压力的产生,传统的岸坡稳定性分析方法往往未考虑动水压力因素,可能会导致某些边坡滑坡潜力被低估。因此,在进行岸坡稳定性分析时,需要充分考虑水位短周期变化时产生的动水压力影响,以提高滑坡预测的准确性。

作为岸坡稳定分析中的一种经典方法,极限平衡法因其计算简易、安全系数保守而被广泛应用于工程实践中。其中,简化 Bishop 法是我国现行水利水电设计规范中推荐的极限平衡

法之一^[5]。文献[6]从理论角度证明了简化 Bishop 法是特殊的严格条分法,为岸坡稳定性分析提供了更可靠的依据。然而,尽管简化 Bishop 法的应用范围广泛,但该方法只适用于圆弧形滑动面(均质土坡)的岸坡稳定性分析,并且未考虑水位短周期运行时产生的动水压力对岸坡稳定性的影响。

为解决上述问题,本文基于改进 Bishop 法提出了一种可考虑动水压力的抽水蓄能电站岸坡稳定性评价方法。以周宁抽水蓄能电站下水库岸坡(岩质边坡)的稳定性分析为例,利用本文方法计算该类岸坡的安全系数,研究结果可为该类岸坡的治理提供一定的参考。

1 理论框架

1.1 简化 Bishop 法的改进

改进 Bishop 法仍需满足简化 Bishop 法的基本假设,即假设条块之间不受条间切向力的作用,且每个条块、条间正应力大小相等、方向相反。改进 Bishop 法计算简图如图 1 所示。

对于单个条块 i 而言,所受到的力有抗滑力 T_i 、条块底边正应力 N_i 及条块自重 W_i ,相邻条块间有条间正应力 E_i 和 E_{i-1} 、条间切向力 X_i 和 X_{i-1} ,条块的倾角为 α_i ,条块底边的长度 L_i 。

在竖直方向上有:

$$N_i \cos \alpha_i = W_i - T_i \sin \alpha_i \quad (1)$$

单个条块的抗滑力为:

$$T_i = \frac{cL_i + N_i \tan \varphi}{k} \quad (2)$$

其中: c 、 φ 为滑坡体的黏聚力和内摩擦角; k 为安全系数。

整体力矩平衡情况下,重力和滑动面上的切向力、条块底边的正应力对圆心产生力矩,对圆心力矩平衡有:

$$\sum_{i=1}^n W_i x_i = \sum_{i=1}^n T_i R_i \quad (3)$$

其中: x_i 为条块底部中心点与圆心的水平距离,即重力对圆心产生力矩时的力臂; R_i 为条块底部的抗滑力对圆心产生力矩时的力臂。

联立式(1)~(3)可得:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i l_i + N_i \tan \varphi) R_i}{\sum_{i=1}^n W_i x_i} \quad (4)$$

其中, F_s 为滑坡体的安全系数。

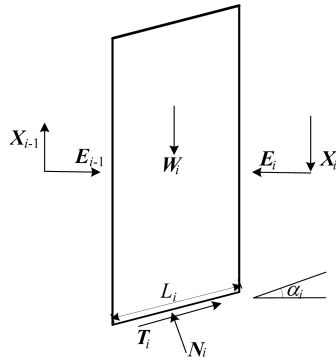


图 1 改进 Bishop 法计算简图

1.2 库水位变动对岸坡的影响

对于孔隙水压力增大导致的滑坡,作用在条块 i 上的力除重力 W_i 外,滑动面上有切向力 T_i 和法向力 N_i ,条块的侧面分别有条间法向力 E_i 、 E_{i-1} ,条间的切向力 X_i 、 X_{i-1} 和静水压力 P_i 、 P_{i+1} ,条块底部受到静水压力 U_i ,各力的分布如图 2 所示。

根据流线和等势线垂直的性质,在条块底边 A 、 B 这 2 点分别做浸润线的垂线,与浸润线相交于点 C 、点 G ,然后过点 C 、点 G 做条块侧边的垂线,与条块侧边相交于 D 、 H 这 2 点,如图 3 所示。可得条块侧面的静水压力 P_i 、 P_{i-1} 计算公式为:

$$P_i = \frac{1}{2} \gamma_w h_i^2 \cos^2 O_i \quad (5)$$

$$P_{i-1} = \frac{1}{2} \gamma_w h_{i-1}^2 \cos^2 O_{i-1} \quad (6)$$

在条块底边 AB 上的静水压力为:

$$U_i = \frac{\gamma_w (h_i + h_{i-1}) l_i}{2} \cos^2 O_i \quad (7)$$

其中: γ_w 为条块的饱和容重; h_{i-1} 和 h_i 为浸润线到条块底边左、右两侧的高度; O_i 为浸润线与水平方向的夹角。

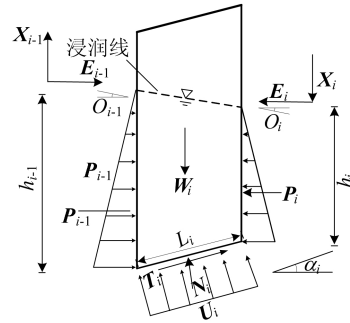


图 2 单个条块受力分析图

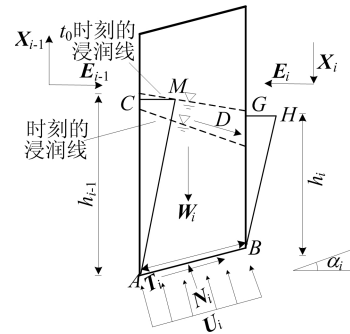


图 3 静水压力计算示意图

由图 3 可得在竖直方向上静力平衡式为:

$$N_i \cos \alpha_i + U_i \cos \alpha_i = W_i - T_i \sin \alpha_i \quad (8)$$

各个条块对滑坡体产生的力矩总和为 0,因此有:

$$\sum_{i=1}^n (P_i e_i - P_{i-1} e_{i-1}) + \sum_{i=1}^n (W_i R \sin \alpha_i) = \sum_{i=1}^n T_i R \quad (9)$$

其中: e_i 、 e_{i-1} 为条块侧面的静水压力对取矩中心点做力矩时的力臂大小; R 为条块底边中心点到取矩中心的直线距离。

联立式(5)~(9),整理可得安全系数的表达式为:

$$F_s = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{m_{\alpha}} \left[c l_i \cos \alpha + (W_1 + W_2 - U_i \cos \alpha) \times \tan \varphi \right] \right\} / \sum_{i=1}^n \left[(W_1 + W_2) \sin \alpha + \left(P_i \frac{e_i}{R} - P_{i-1} \frac{e_{i-1}}{R} \right) \right] \quad (10)$$

$$m_{\alpha} = \cos \alpha_i + \sin \alpha_i \tan \varphi / k \quad (11)$$

其中: W_1 、 W_2 分别为条块的自然重力、饱和重力;

m_{ai} 为待定参数。

对于动水压力导致的滑坡,滑坡失稳受多种因素(如滑坡体的形状、水位速率、初始孔隙水压力分布等)共同作用的影响。动水压力是指在库水位下降过程中,当水位下降速度超过岸坡的渗透系数时所产生的体力,这种体力会对岸坡土体(包括颗粒框架和内部水分)产生作用。这种动水压力参见图 3 中的 D 。动水压力的计算公式为:

$$D = \gamma_w h_w L_i \cos \alpha \sin O \quad (12)$$

考虑动水压力的安全系数的计算表达式为:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{cL_i \cos \alpha + (W_w + D \sin O) \tan \varphi}{m_{ai}}}{\sum_{i=1}^n (W_w \sin \alpha + S)} \quad (13)$$

$$W_w = W_1 + W_2 - W_{2w} \quad (14)$$

$$S = \gamma_w h_w L_i [\cos \alpha \sin \alpha + \sin(O - \alpha) \cos O] - \frac{D h_w \cos O - \gamma_w L_i^3 \sin^2(O - \alpha) (\sin O \cos \alpha + 2 \sin \alpha \cos O)}{24 R \cos O} \quad (15)$$

其中: h_w 为条块底边中心点到浸润线的垂直高度; W_{2w} 为条块中浸润线以下水的重量。

2 验证分析

在折线滑动面中,对取矩中心点的坐标并不是很明确,本文选取取矩中心点坐标的方法是将整个滑坡体的起始点坐标与终点坐标相连,作为等腰三角形的底边,从等腰三角形底边的中点做垂线,通过改变底角的角度,总有等腰三角形的腰与该垂线相交于一点,相交的点作为折线滑动面的取矩中心^[4]。

对于第 i 条块而言,该条块的底边与水平方向的倾角为 α 时,做一条过取矩中心点且与水平方向的倾角为 α 的直线,与过等腰三角形中点且垂直于等腰三角形底边的直线交于一点,这一点作为第 i 条块的取矩中心点。

以 Fredlund 的考题为例^[7-8],物理力学参数 c 取 29 kPa, φ 取 20°, γ 取 18.8 kN/m³,滑坡体计算简图如图 4 所示。

为分析等腰三角形底角取值对本文计算安全系数的影响,利用 MATLAB 软件计算等腰三角形底角取值从 10°~60°,角度增量为 10°,将计算得到的安全系数与 Geo Studio 软件 Morgenstern-Price 法和 Spencer 法比对,检验结果的可

靠性。

计算结果及其相对误差对比如图 5 所示。

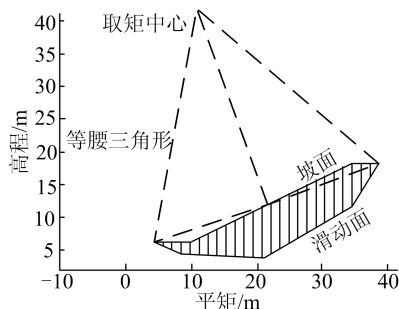
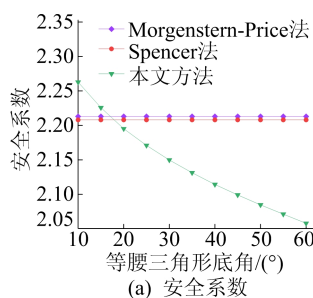
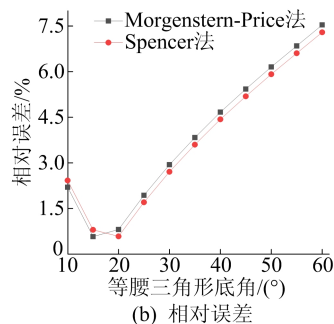


图 4 折线滑坡体剖面图



(a) 安全系数



(b) 相对误差

图 5 等腰三角形底角角度对安全系数及其相对误差的影响

从图 5 可以看出,在等腰三角形底角取 15°~20°时,本文方法计算的安全系数为 2.19,与 Morgenstern-Price 法和 Spencer 法的结果相近,相对误差小于 1%;在等腰三角形底角取 60°时,相对误差小于 8%。

3 库水位变化的敏感性分析

算例依旧采用图 5 的滑动面以及相关的物理力学参数,在此基础上引用饱和容重 γ_{sat} 。设计 3 种不同的水位工况:① 浸润线与滑动面的终点坐标位置不变,改变坡外水位的高度;② 改变静态水位的高度;③ 坡外水位不变,改变浸润线的斜率。使用本文的方法以及 Morgenstern-Price 法比对分析,3 种不同工况下边坡安全系数计算结果如图 6 所示。

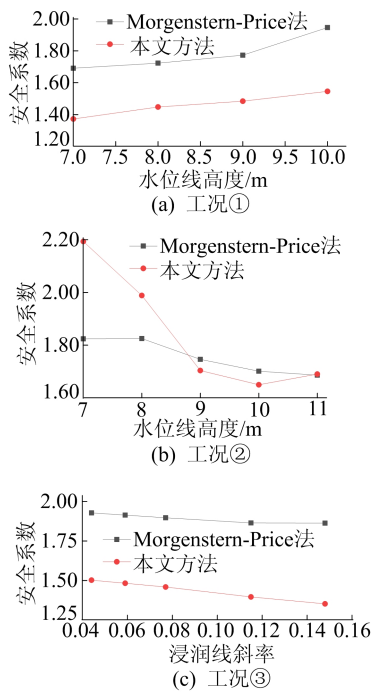


图 6 3 种不同工况下边坡安全系数计算结果

由图 6a 可知,本文方法计算的安全系数随着坡外水位降低而减小,这是由于水位下降导致滑坡体内的动水压力增大,加大了下滑力。由图 6b 可知,随着坡外静态水位的下降,滑坡体内动水压力趋近于 0,浮托力开始起主导作用,随着浮托力的降低,滑坡体的抗滑力增大,因此安全系数也会增加。上述水位波动致使安全系数变动机理分析如图 7 所示。

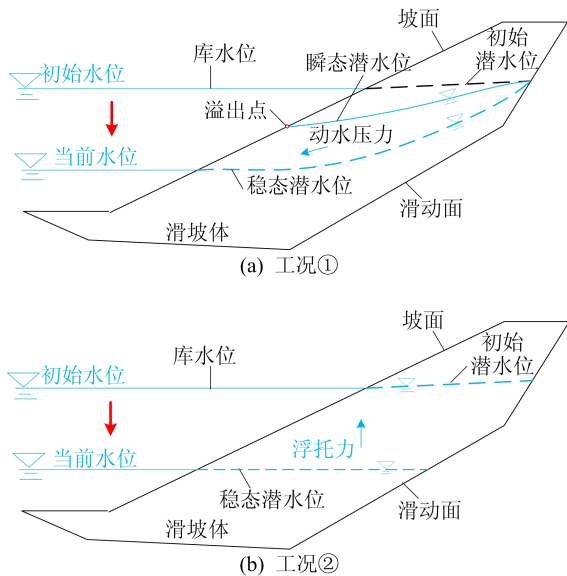


图 7 水位波动致使安全系数变动机理分析

从 3 种不同水位变化工况中,可以直观看出改进 Bishop 法与 Morgenstern-Price 法计算的安全系数变化规律近似一致,改进 Bishop 法与

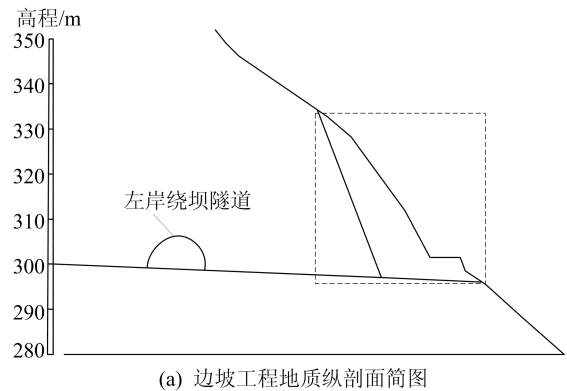
Morgenstern-Price 法计算的安全系数最大偏差是 0.4。因此,改进 Bishop 法计算考虑动水压力的边坡安全系数具有合理性。

4 工程应用

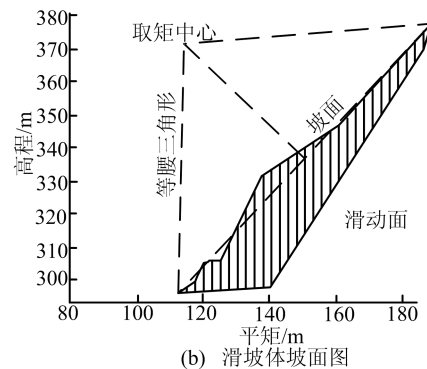
周宁抽水蓄能电站^[9-10]位于福建省宁德市周宁县境内,下水库边坡高陡,岩体浅层卸荷作用严重,裂隙多为顺坡缓倾角、陡倾角,基岩以钾长花岗岩为主,辉绿岩脉和石英二长班岩脉较发育,左坝肩边坡有明显的断层迹象,断层之间组合可形成潜在不利块体,其下库区高程 296~378 m 段边坡有明显失稳现象,因此需要对周宁抽水蓄能电站下水库在运行期内的岸坡进行稳定性分析^[11-19]。下库区的正常蓄水位为 300 m,死水位为 262 m,变化幅度为 28 m。利用 GeoStudio 软件模拟渗流条件得到浸润线。岸坡材料的物理力学参数见表 1 所列,周宁抽水蓄能电站下水库左坝肩岸坡工程地质纵剖面图如图 8 所示。

表 1 岸坡材料的物理力学参数

参数	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN}/\text{m}^3)$
数值	100	24	22	26



(a) 边坡工程地质纵剖面简图



(b) 滑坡体坡面图

图 8 下水库左坝肩岸坡典型断面剖面示意图

使用本文计算方法研究周宁抽水蓄能电站下水库在蓄水期之前与运行期水位骤降工况下的安

全系数。蓄水期之前该岸坡的安全系数比《水电工程边坡设计规范》(NB/T 10512—2021)的最小规定值高了 0.237,而运行期的安全系数比最小规定值低 0.035,计算结果见表 2 所列。结果表明,该下水库岸坡需布置锚索等加固措施,以防止滑坡的发生,造成资源的浪费。

表 2 安全系数计算结果

工况	蓄水期前	运行期
安全系数	1.287	1.015

5 结 论

为研究水位短周期变动对抽水蓄能电站库岸岸坡的影响,本文基于简化 Bishop 法提出一种适用于任意滑动面的极限平衡方法,与 Spencer 法和 Morgenstern-Price 法进行对比验证。同时研究在不同库水位变动时的安全系数进行敏感性分析,并结合周宁抽水蓄能电站运行期间下水位发生短周期性变动时的库岸坡采用改进 Bishop 法进行合理性论证,得到如下结论。

1) 绘制等腰三角形确定改进 Bishop 法中取矩中心点的位置,通过改变等腰三角形底角大小提高安全系数准确性。等腰三角形底角取 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 时,计算得到的安全系数与 Spencer 法和 Morgenstern-Price 法计算得到的安全系数的相对误差均小于 1%。结果验证了利用改进 Bishop 法进行岸坡稳定性分析的合理性。

2) 分析不同库水位变动时安全系数的变化规律,说明改进 Bishop 法相较于 Morgenstern-Price 法,计算得到的安全系数更低,并且与 Morgenstern-Price 法计算的安全系数变化规律一致。结果表明,改进 Bishop 法在进行库岸岸坡的稳定性分析中所得到的安全系数具有有效性。

3) 利用本文方法计算周宁抽水蓄能电站下水库岸坡的安全系数是 1.015。结果表明,该电站下水库某岸坡需布置锚索等加固措施以降低发生滑坡的风险。

设分析[J]. 水科学与工程技术,2023(2):93-96.

- [2] 李新利,陈力,任向宇. Sarma 法分析动水压力对藤子沟水电站边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程界,2006(12):58-60.
- [3] 任聪聪. 水库运行期涉水岸坡稳定系数计算的传递系数法改进[D]. 合肥:合肥工业大学,2020.
- [4] 汪文达. 水库岸坡消落带碎石土强度劣化规律及稳定性研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
- [5] 国家能源局. 水电工程边坡设计规范:NB/T 10512—2021[S]. 北京:中国水利水电出版社,2021:1-77.
- [6] 朱大勇,邓建辉,台佳佳. 简化 Bishop 法严格性的论证[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(3):455-458.
- [7] 张鲁渝,郑颖人. 简化 Bishop 法的改进及其在非圆弧滑面中的应用[J]. 岩土力学,2004,25(6):927-929,934.
- [8] FREDLUND D G, KRAHN J. Comparison of slope stability methods of analysis [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977,14:429-439.
- [9] 陈言文. 福建周宁抽水蓄能电站上库正常蓄水位选择[J]. 福建水力发电,2016(2):6-8,14.
- [10] 牛正威,潘兵,陈冬冬. 福建周宁抽水蓄能电站下水库右岸下游侧边坡稳定性分析[J]. 大坝与安全,2020(6):18-22.
- [11] 甘恩来,李芝军,彭斌,等. 三峡库水位升降对动水压力型滑坡稳定性的影响分析:以上安坪滑坡为例[J]. 中国水运(下半月),2016,16(3):157-158.
- [12] 莫伟伟,徐平,丁秀丽. 库水位涨落对滑坡稳定性影响研究进展[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(6):997-1002.
- [13] 朱冬林,任光明,聂德新,等. 库水位变化下对水库滑坡稳定性影响的预测[J]. 水文地质工程地质,2002(3):6-9.
- [14] 严福章,王思敬,徐瑞春. 清江隔河岩水库蓄水后茅坪滑坡的变形机理及其发展趋势研究[J]. 工程地质学报,2003,11(1):15-24.
- [15] 夏麾,刘金龙. 库水位变化对库岸边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程技术,2005,19(6):292-295.
- [16] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社,2000:119-121,308-301.
- [17] 柯云斌. 库区浸水路堤稳定性计算方法分析[J]. 路基工程,2010(6):25-28.
- [18] 张娜,董化宏,何学铭. 我国抽水蓄能电站建设必要性和前景[J]. 中国三峡,2010(11):16-20.
- [19] 赵兰明,沙志成,董霜. 山东电网建设抽水蓄能电站的必要性[J]. 电力与能源,2012,33(3):266-270.

(责任编辑 吴 亮)

[参 考 文 献]

- [1] 肖广磊,王振明,李晓雯,等. “双碳”目标下抽水蓄能电站建