

## 考虑水库岸坡特征的滑坡稳定性计算修正传递系数法

苏培东, 严磊, 邱鹏, 梁宇, 汪意凌

**Improved transfer coefficient method for landslide stability evaluation based on reservoir bank slope characteristics**

SU Peidong, YAN Lei, QIU Peng, LIANG Yu, and WANG Yiling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202111034>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 国产GB-InSAR在特大型水库滑坡变形监测中的应用

Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area

郭延辉, 杨溢, 杨志全, 高才坤, 田卫明, 何玉童 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 66-72

#### 组合式棚洞结构优化及其计算方法

\$\_{suggestArticle.titleEn}

陈飞, 陈洪凯 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(1): 79-88

#### 基于指标变权重复合云模型的岩质边坡稳定性评价初探

A preliminary study on evaluation of rock slope stability based on index variable weight compound cloud model

陈忠源, 戴自航 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 9-17

#### 基于不同方法的江苏镇江地区下蜀土边坡稳定性分析与评价

Evaluation of Xiashu loess slope stability in Zhenjiang area using different methods

瞿婧晶, 陆燕, 吴曙亮, 刘健, 苟富刚 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 35-42

#### 湖南通道播阳镇楼团滑坡发育特征及稳定性分析

Development characteristics and stability analysis on the Loutuan Landslide in Boyang Town, Tongdao County, Hunan Province

周小飞, 曹红娟 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 48-53

#### 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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202111034

苏培东, 严磊, 邱鹏, 等. 考虑水库岸坡特征的滑坡稳定性计算修正传递系数法 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 40-48.  
SU Peidong, YAN Lei, QIU Peng, et al. Improved transfer coefficient method for landslide stability evaluation based on reservoir bank slope characteristics[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 40-48.

# 考虑水库岸坡特征的滑坡稳定性计算修正传递系数法

苏培东<sup>1</sup>, 严磊<sup>1</sup>, 邱鹏<sup>1</sup>, 梁宇<sup>2</sup>, 汪意凌<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500;

2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川成都 611130)

**摘要:**随着低碳能源的推行, 大量水电站的兴建引发了大量库岸滑坡问题。库岸滑坡与普通滑坡有着显著区别, 但在实际工程的稳定性计算过程中, 工程人员常将二者归为一体, 采用同样的思路和方法进行研究。为了更好地治理库岸滑坡, 根据库岸自身的特点, 在长期野外地质调查和室内文献调研的基础上, 提出按结构面特征、坡体位置和滑体物质成分进行库岸斜坡分区的原则; 针对库岸滑坡的特点, 推导了被牵引段有推力+后缘拉裂面有剪力、被牵引段不存在推力+后缘拉裂面有剪力、被牵引段不存在推力+后缘拉裂面无剪力三种情况的水库岸坡滑坡稳定性计算公式; 结合工程实例, 验证基于水库岸坡特征滑坡稳定性计算修正传递系数法的正确性。

**关键词:**库岸滑坡; 分区原则; 计算方法; 牵引式滑坡

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)01-0040-09

## Improved transfer coefficient method for landslide stability evaluation based on reservoir bank slope characteristics

SU Peidong<sup>1</sup>, YAN Lei<sup>1</sup>, QIU Peng<sup>1</sup>, LIANG Yu<sup>2</sup>, WANG Yiling<sup>1</sup>

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Chengdu Engineering Corporation Limited, Power China, Chengdu, Sichuan 611130, China)

**Abstract:** With the implementation of low-carbon energy, the construction of a large number of hydropower stations has caused a large number of reservoir bank landslides. Reservoir bank landslides are significantly different from ordinary landslides, but in the process of actual engineering stability calculations, engineers still confuse the two and use the same ideas and methods for research. In order to better control the reservoir bank slope instability, according to the characteristics of the reservoir bank slope, and long-term field geological survey and indoor literature research, this paper puts forward the principle of reservoir bank slope zoning according to the structural surface characteristics, slope position and landslide material composition. According to the characteristics of reservoir bank landslide, the stability calculation formulas of traction landslide is derived in three cases: the traction section has thrust + the trailing edge tensile fracture surface has shear force, the traction section does not have thrust + the trailing edge tensile fracture surface has shear force, and the traction section does not have thrust + the trailing edge tensile fracture surface has no shear force. Combined with engineering examples, the improved transfer coefficient method for landslide stability evaluation based on reservoir bank slope characteristics is verified.

**Keywords:** reservoir bank landslide; partition principle; calculation method; retrogressive landslide

收稿日期: 2021-11-25; 修订日期: 2022-02-23

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 四川省科技厅应用基础研究项目(19YYJC1060); 云南省建设投资控股集团科技项目(2019DJR010)

第一作者: 苏培东(1973-), 男, 四川眉山人, 教授, 博士, 主要从事地质工程方面的研究。E-mail: spdong@126.com

0 引言

自从意大利瓦伊昂水库滑坡<sup>[1]</sup>发生后, 库岸滑坡一直都是工程界关注的热点问题。库岸滑坡是由于斜坡岩土体抗剪强度降低或下滑力增加形成的, 影响斜坡岩土体抗剪强度降低及下滑力增大的因素很多, 包括库岸地形<sup>[2]</sup>、地质构造<sup>[3]</sup>、物质组成<sup>[4]</sup>、库水位变化<sup>[5]</sup>、人类活动等。中国水力资源主要分布在西南高山峡谷地区。随着中国西部大开发战略修建了三峡、溪洛渡、小湾、紫坪铺等大中型水电站水库, 这些水库的建设无疑会促进国民经济建设和社会发展, 但水库建设必然会加剧库区古滑坡的复活或新滑坡的产生, 威胁库区人民的生命和财产安全。据不完全统计, 三峡库区自 2003 年蓄水以来, 探明了 2 600 多个涉水滑坡<sup>[6-7]</sup>; 溪洛渡库区自 2013 年蓄水以来, 探明滑坡点 200 多处, 滑坡数量仍呈现上升趋势。因此, 为了防治库岸滑坡, 大量学者从多个方面进行了研究。

自 Reh binder<sup>[8]</sup>首次提出水对岩土体的软化效应后, 研究人员经过多年的研究总结发现, 随着库水与岸坡长期的接触, 库岸岩土体发生的物理和化学作用改变了岸坡岩土体的渗透性和吸水性, 以及岩土体的物质组成、结构、化学成分和岸坡的完整性, 从而导致岩土体抗剪强度等力学指标衰减, 最终诱发水库滑坡。同时库水的周期性波动导致岸坡消落带遭受干湿循环作用的影响。如崔激等<sup>[9]</sup>首次进行了荷载作用下膨胀土的干湿循环试验, 发现了膨胀土的干密度和塑性性能会因此降低; 吴珺华等<sup>[10]</sup>最先通过现场剪切试验提出干湿循环对土体内摩擦角和黏聚力的差异作用。这些实验都证明了干湿循环环境会引起岸坡岩土体物质组成、物理力学性质以及矿物组成的改变, 但在实际工程中, 人们仍未对此方面引起重视, 仍将库岸滑坡的岩土体进行统一看待。同时, 针对滑坡稳定性的计算方法, 人们也做了许多研究, 其中最主要的方法是极限平衡法, 大量学者也基于此进行了研究。徐青等<sup>[11]</sup>第一次提出滑坡稳定性计算的改进剩余推力法, 并在三板溪滑坡中进行了验证; 刘茂等<sup>[12]</sup>首先提出简化 Bishop 法的剩余下滑推力的计算方法。但目前仍未根据库岸滑坡的特点提出适合其的稳定性计算方法。

普通滑坡位于丘陵斜坡, 坡体整体含水率相对稳定, 滑坡种类多为块碎石、土质堆积物滑坡或岩性较为统一的岩质滑坡, 因此普通滑坡的稳定性计算能采用统一的计算公式, 对软弱面(带)进行统一的取值, 采用圆弧滑动法或传递系数法进行计算。但库岸滑坡受库水涨落的影响, 坡体含水率变化大, 若继续沿用普通滑坡

统一的思想来进行分析计算, 会使得计算结果出现偏差。因此, 本文提出的斜坡特征分区原则, 考虑了库岸滑坡与普通滑坡的共性和差异性, 从库岸滑坡自身的特征出发, 以结构面强度、坡体位置、物质成分作为分区的出发点, 对不同区块采用不同的物理力学参数, 使得分析结果更趋近于滑坡体的真实情况; 同时, 根据库岸滑坡的特点, 在传递系数法的基础上, 提出了适用于库岸滑坡的稳定性计算方法, 即基于水库岸坡特征滑坡稳定性计算修正传递系数法。

1 斜坡特征分区

1.1 结构面(滑面)强度分区

结构面(滑带)强度主要由  $\varphi$  值和  $c$  值确定。受多种因素的影响, 不同结构面(滑带)的黏聚力和内摩擦角会有显著的不同。对于库岸滑坡, 在库水反复作用下, 软弱结构面首当其冲受到劣化效应<sup>[13-21]</sup>。其中, 水对软弱结构面的劣化效应可分为物理作用和化学作用。在两者长期的反复作用下, 淹没区和消落区结构面的物理力学性质等都会与干燥区软弱结构面形成明显的差别。

在中国水利行业中, 根据软弱结构面成分的不同, 将软弱结构面分为岩块岩屑型、岩屑夹泥型、泥夹岩屑型和泥型, 不同软弱结构面的强度参数见表 1。

表 1 不同软弱结构面参数推荐表<sup>[16]</sup>  
Table 1 Recommended parameters for different weak structural planes

| 类型    | 抗剪断强度       |                 | 抗剪强度        |                 |
|-------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|
|       | $f'$        | $c'/\text{MPa}$ | $f'$        | $c'/\text{MPa}$ |
| 岩块岩屑型 | 0.55 ~ 0.45 | 0.20 ~ 0.10     | 0.50 ~ 0.40 | 0               |
| 岩屑夹泥型 | 0.45 ~ 0.35 | 0.10 ~ 0.05     | 0.40 ~ 0.30 | 0               |
| 泥夹岩屑型 | 0.35 ~ 0.25 | 0.05 ~ 0.01     | 0.30 ~ 0.25 | 0               |
| 泥型    | 0.25 ~ 0.18 | 0.01 ~ 0.002    | 0.25 ~ 0.15 | 0               |

注:  $f'$  为摩擦系数;  $c'$  为黏聚力。

从表 1 可以看出不同结构面的强度参数有着显著区别, 不能一概而论。实际工作中, 岸坡滑坡不同区域的岩土体是有明显区别的, 往往涵盖多种类型的结构面。若继续按照目前统一结构面参数来计算滑坡的稳定性, 会使得计算结果与实际产生偏差。因此, 有必要在实际工作中, 根据滑坡软弱面(带)分区来对滑坡稳定性进行分区计算。

1.2 坡体位置分区

对于库岸滑坡, 坡体所处位置的地质条件存在较大差异。总结发现, 库岸斜坡可以分为三个区域, 淹没

区、消落区和干燥区(图 1)。淹没区岩土体一直处于被淹没状态,各项物理力学指标均为饱和状态指标。消落区岩土体受库水涨落的影响,物理力学指标处于一个动态变化的过程;在库水位变化过程中,岩土体物理力学指标处于动态变化,建议根据勘察时实际情况取值。干燥区岩土体受库水影响较小,因此在不考虑降雨的情况下,其物理力学参数应取天然状态指标。

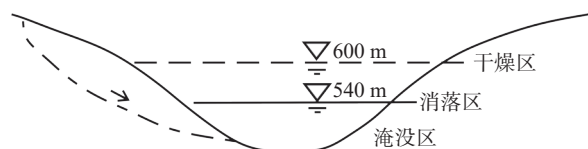


图 1 岸坡位置分区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bank slope location division

同时,坡体所处位置不同,坡体自身受力状态不同。在淹没区,岩土体除了受到自重应力外还受到水浮力的影响,因此该区域的岩土体重度为有效重度,岩土体物理力学参数为饱和参数。在消落区,库水上涨期间,与普通滑坡相比还受到孔隙水压力的影响;库水下降期间,由于地下水水位滞后效应,坡体还会受到渗流

压力和地下水的饱水加载效应。在干燥区,坡体的受力状态则是普通滑坡的受力状态相同。

因此,在对库岸滑坡进行稳定性计算时,要根据坡体位置对滑坡进行分区计算。

### 1.3 坡体物质成分分区

在实际滑坡稳定性计算中,受工作精度的影响,常将滑体物质混为一体来取统一的物理力学参数,没有按照不同区域滑体物质的不同进行分区取值。对于一般山区丘陵斜坡地带上的滑坡,其坡体表层堆积物通常为崩坡积或残坡积物质,这样的块碎石堆积层物理力学参数变化不大,因此勘察人员在工作中将滑体的物理力学参数进行统一取值是可行的。但对于库岸滑坡,由于水的长期作用,淹没区与消落区的滑体物质成分长期处于动态变化中,与干燥区有着显著的差别。如图 2 所示的白衣庵滑坡,滑体后部为散裂岩,滑体前部为冲积(洪积)亚黏土、碎石土,滑带为砾质亚黏土。后部以散裂岩为主的滑体与前部以冲洪积亚黏土、碎石土为主的滑体物理力学性质存在着显著差异,应此在稳定性计算时因对该滑坡按滑体成分进行前后部分区研究。

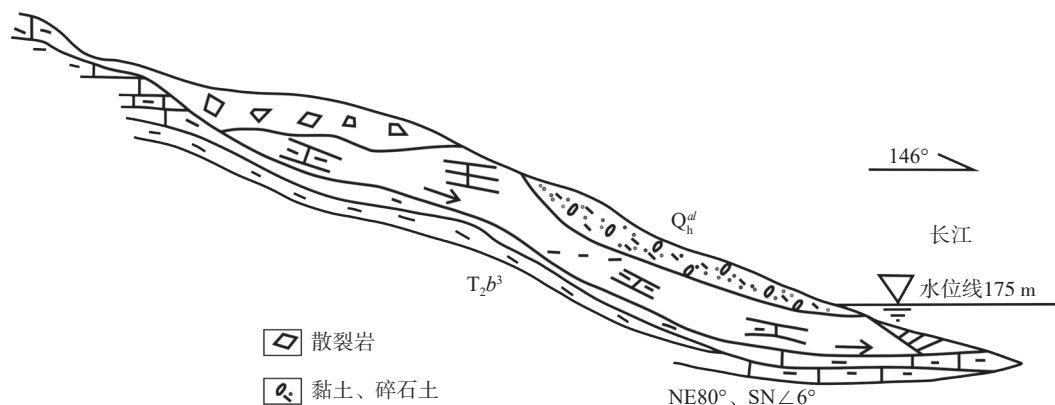


图 2 白衣庵滑坡坡体结构剖面图<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Cross-section of Baiyi'an landslide structure

## 2 分区稳定性计算公式

传递系数法因其简单易懂,计算方便,受到中国工程人员的青睐。考虑到库岸边坡通常是前缘受到库水侵蚀破坏后引发的牵引式滑坡,而传统的传递系数法是从后缘算到前缘,这种算法适用于推移式滑坡。因此,本文在前人工作的基础上<sup>[20-21]</sup>,结合库岸滑坡的特点,以牵引段后缘拉裂面的受力情况分三种状况提出适用于库岸滑坡的传递系数法。

现场调查表明,库岸牵引式滑坡逐级失稳的过程中,滑坡体会被分割成大小不一的各级滑块,各级滑块

之间以拉裂缝分界。对于从下往上逐级发展的牵引式滑坡,滑块间产生的拉裂缝对力的传递起到了阻隔作用。具体来说,拉裂缝常产生于软弱结构面(带),其抗拉强度很低,因此前部滑块对于后部滑块基本无拉力作用,但当牵引段与被牵引段未分离时,前部牵引段块体运动时会受到块体后缘拉裂面的剪应力作用。同时,若被牵引段滑体能给牵引段块体提供推力,则牵引段块体还会受到推力的作用。当拉裂缝贯通,则牵引段不受到后缘拉裂面的剪应力作用。因此本文在上述分析和前人的基础上提出牵引式滑坡的稳定性计算公式。本文

仅对自然状态下的库岸滑坡进行稳定性公式推导,若实际中需要考虑水的作用效果或者其他荷载的作用效果,则在计算下滑力时加入动静水压力和其他荷载的作用效果,在计算抗滑力时加入动静水压力、浮拖力和其他荷载的作用效果。在计算库岸牵引式滑坡稳定性时,应先对各个滑体的稳定性采用传递系数法进行初步的试算,初步判断被牵引段块体对牵引段块体是否存在推力。再根据野外勘察结果,根据库岸滑坡变形情况,来判断牵引段后缘剪应力存在情况。

## 2.1 有推力+有后缘面剪力

根据库岸滑坡特点,进行模型划分见图3,1滑体为2滑体的牵引段,2滑体此时为1滑体的被牵引段;2滑体为3滑体的牵引段时,3滑体此时为2滑体的被牵引段。

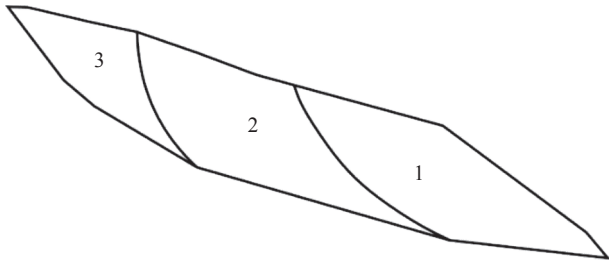


图3 典型牵引式滑坡模型

Fig. 3 Typical retrogressive landslide model

结合牵引式滑坡特点,对牵引式滑坡进行简单条分(图4),即牵引段滑块*i*对应被牵引段滑块*n+i*,以此类推。

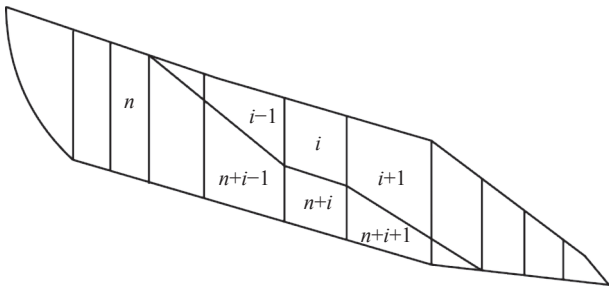


图4 牵引式滑坡条块划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of segmentation of retrogressive landslide

当被牵引段滑体自身处于不稳定状态时,会对牵引段块体产生推力。因此,牵引段块体在向临空面运动时会不仅受到后缘潜在拉裂面对其的剪应力,还会受到被牵引段块体对其的推力。

对于库岸滑坡,典型条块见图5,作用于条块*i*上的推力仅由HIE区域提供,则牵引区第*i*条块受到被牵引区滑体条块的推力为:

$$F_i = S_{n+i} \frac{h_i - h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}} \quad (1)$$

第*i*条块的下滑力为:

$$T_i = (W_i) \sin \alpha_i + F_i \cos (\beta_{n+i} - \alpha_i) \quad (2)$$

第*i*条块的抗滑力为:

$$R_i = [(W_i) \cos \alpha_i + F_i \sin (\beta_{n+i} - \alpha_i)] \tan \varphi_i + c_i l_i \quad (3)$$

牵引区内部条块传递系数 $\Psi_i$ 为:

$$\Psi_i = \cos (\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin (\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i / F_a \quad (4)$$

则牵引区第*i*条块的剩余下滑力:

$$E_i = T_i - \frac{R_i}{F_a} + \Psi_i E_{i-1} \quad (5)$$

稳定系数为:

$$F_{S1} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left( R_i \prod_{j=i+1}^n \Psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left( T_i \prod_{j=i+1}^n \Psi_j \right) + T_n} \quad (6)$$

式中:  $F_a$ ——滑坡安全系数;

$R_i$ ——牵引区第*i*滑动条块抗滑力/kN;

$\Psi_i$ ——牵引区第*i-1*滑动条块对第*i*滑动条块的传递系数;

$T_i$ ——牵引区第*i*滑动条块下滑力/kN;

$W_i$ ——牵引区第*i*滑动条块重量/kN;

$\alpha_i$ ——牵引区第*i*滑动条块底面与水平面的夹角/(°);

$c_i$ 、 $\varphi_i$ ——牵引区第*i*滑动条块底面的有效黏聚力/kPa

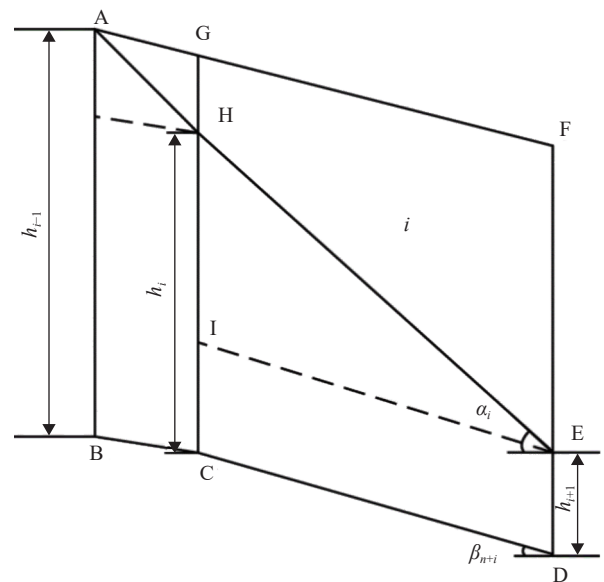


图5 推力计算简图

Fig. 5 Simplified diagram of thrust calculation

和内摩擦角/(°);

$l_i$ ——牵引区第*i*滑动条块沿滑面的长度/m;

$E_i$ ——牵引区第*i*滑动条块的剩余下滑力/kN;

$F_i$ ——牵引区第*i*条块受到被牵引区条块的推力/kN;

$S_{n+i}$ ——被牵引区第*n+i*块体的剩余下滑力/kN;

$\beta_{n+i}$ ——被牵引区滑体*n+i*条块底面与水平面夹角/(°)。

## 2.2 无推力+有后缘面剪力

当被牵引段滑体自身处于稳定状态时,不会对牵引段块体产生推力。同时,牵引段块体在向临空面运动时会受到后缘潜在拉裂面对其的剪应力。因库岸滑坡在蓄水前处于稳定状态,蓄水后条件的改变才形成滑坡,因此库岸滑坡以此类为主。稳定性计算公式如下。

第*i*条块的下滑力为:

$$T_i = (W_i) \sin \alpha_i \quad (7)$$

第*i*条块的抗滑力为:

$$R_i = [(W_i) \cos \alpha_i] \tan \varphi_i + c_i b_i \quad (8)$$

牵引区内部条块传递系数 $\Psi_i$ 为:

$$\Psi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i / F_a \quad (9)$$

则牵引区第*i*条块的剩余下滑力:

$$E_i = T_i - \frac{R_i}{F_a} + \Psi_i E_{i-1} \quad (10)$$

稳定系数为:

$$F_{S2} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left( R_i \prod_{j=i+1}^n \Psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left( T_i \prod_{j=i+1}^n \Psi_j \right) + T_n} \quad (11)$$

式中,各符号含义同前。

## 2.3 无推力+无后缘面剪力

当牵引段块体的后缘拉裂面贯通且与被牵引段块体形成缝隙时,此时牵引段块体的后缘拉裂面将不再有剪应力形成。即在后缘拉裂面段将不再产生抗滑力,仅存在下滑力。但因为后缘拉裂面贯通,自然状态下,地下水会在后缘拉裂隙中进行汇聚,汇聚的地下水将对牵引段块体产生静水压力。假设后缘拉裂面段划分*m*个条块,则这些段的抗滑力为零;后缘第*j*个条块开始受到静水压力作用。

当  $j \leq n \leq m$ , 静水压力为:

$$P_i = \frac{1}{2} \gamma_w \left( \sum_{i=j}^n l_i \sin \alpha_i \right)^2 \quad (12)$$

后缘拉裂面段下滑力为:

$$T_i = (W_i) \sin \alpha_i \quad (13)$$

滑移面段第*i>m*条块的抗滑力为:

$$R_i = [(W_i) \cos \alpha_i] \tan \varphi_i + c_i b_i \quad (14)$$

牵引区内部条块传递系数 $\Psi_i$ 为:

$$\Psi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i / F_a \quad (15)$$

则牵引区第*i*条块的剩余下滑力:

$$E_i = T_i - \frac{R_i}{F_a} + \Psi_i E_{i-1} \quad (16)$$

稳定系数为:

$$F_{S3} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left( R_i \prod_{j=i+1}^n \Psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=m}^{n-1} \left( T_i \prod_{j=i+1}^n \Psi_j \right) + T_n} \quad (17)$$

式中:  $P_i$ ——牵引区第*i*条块受到静水压力;

其余符号含义同前。

## 3 案例验证

### 3.1 朱家店滑坡

朱家店滑坡位于长江和东瀼河交汇地带,后缘高程 340 m,前缘部分滑体被水淹没。滑坡纵长 423 m,宽约 100 m,滑体厚度约 25 m,平面面积约  $4.02 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,体积约  $100.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡变形方向为  $215^\circ$ ,平面形态为舌状。经勘察,朱家店滑坡为土质滑坡,滑带为含角砾粉质黏土,滑床为紫红色泥质粉砂岩,滑体分上下两层,上层为崩坡积土,下层为残坡积物,两者均为结构松散的粉质黏土夹块碎石。其中,滑体天然重度为  $20.5 \text{ kN/m}^3$ ,饱和重度为  $21.0 \text{ kN/m}^3$ ;滑带黏聚力天然为 28 kPa,饱和为 22 kPa,内摩擦角天然为  $20^\circ$ ,饱和为  $17^\circ$ 。根据勘察结果对朱家店滑坡进行分区(图 6、图 7),初步试算后确定被牵引区对牵引区滑体存在推力。先根据分析结果对计算剖面进行分区和条分,再将文中 2.1 章节的公式编辑到 excel 中,再将滑体参数按分区原则输入到公式当中,计算结果见表 2,牵引区稳定性系数为 1.055,牵引区处于欠稳定性状态;被牵引区稳定性系数为 1.092,处于基本稳定性状态;若不进行分区,只将剖面进行条分,将同样的参数带入传统传递系数法,统一按传统方式进行计算,计算结果如表 3,为 1.008,处于欠稳定状态。由此可见,若采用传统方法进行稳定性计算则会使得计算结果趋于危险,增加滑坡治理的成本,造成不必要的浪费。



图 6 朱家店滑坡全貌<sup>[20]</sup>

Fig. 6 Overall perspective of the Zhujiadian landslide

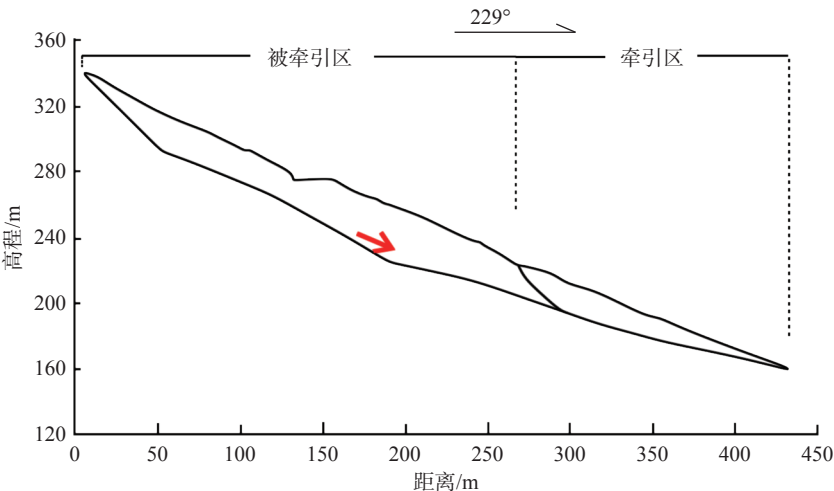


图 7 朱家店滑坡计算简图

Fig. 7 Zhujiadian landslide calculation diagram

表 2 分区稳定性计算结果

Table 2 Calculation results of partition stability

| 斜坡特征分区 | 稳定性系数 | 稳定状态 |
|--------|-------|------|
| 牵引区    | 1.045 | 欠稳定  |
| 被牵引区   | 1.073 | 基本稳定 |

表 3 传统方式稳定性计算结果

Table 3 Stability calculation results of traditional method

| 斜坡特征分区 | 稳定系数  | 稳定状态 |
|--------|-------|------|
| 整体     | 1.008 | 欠稳定  |

### 3.2 溪洛渡水电站河口滑坡

溪洛渡水电站云南库区河口滑坡位于云南省昭通市永善县大兴镇河口村。河口滑坡及邻区夹持于莲峰断裂和峨边—金阳断裂之间,区域内发育有一系列次级断层,其中规模稍大的两条为 $f_1$ 断层和 $f_2$ 断层;其中 $f_1$ 距滑坡右边界约 60 m 到 195 m; $f_2$ 断裂距滑坡左边界 5 m 到 75 m。溪洛渡水电站正常蓄水水位为 600 m,死水位为 540 m,库水位长期处于动态变化中。从平面上看,河口滑坡呈舌状,变形方向为 SE325°NW,前(NW)缘临库,宽度约 174 m,后(SE)缘宽度约为 82 m,纵向长度约 229 m 滑坡滑体平均厚度约 35 m,平面面积约  $3.0\times 10^4\text{ m}^2$ ,总体方量约  $130\times 10^4\text{ m}^3$ ,属于大型深层牵引式滑坡。野外勘察发现河口滑坡发育一系列横向拉裂缝,拉裂缝截面形状上宽下窄,浅部拉张深部闭合,能提供剪应力。现场勘察显示,河口滑坡目前已经产生局部变形,坡体上道路已经产生局部破坏(图 8、图 9),整体处于欠稳定状态。

河口滑坡是从前缘开始变形带动后部块体变形的

牵引式滑坡。经勘察,受库水作用的影响,前缘的软弱结构面为泥夹碎屑型,中后部的软弱结构面为碎屑夹泥型。滑体为寒武系中下统龙王庙组和陡坡寺组并组的强风化灰泥岩,受构造作用的影响,岩体极为破碎。滑带岩土体具体物理力学参数见表 4。结合拉裂缝发育情况和上述分区原则对河口滑坡进行分区稳定性计算,分区情况见图 10。

河口岩质滑坡岩层反倾,受构造作用产生两组结构面(图 10),在这两组结构面的控制下滑体被分割成四



图 8 河口滑坡后缘变形

Fig. 8 Trailing edge deformation of Hekou landslide



图 9 公路变形破坏

Fig. 9 Road deformation and failure

表 4 滑带物理力学分区参数计算结果

Table 4 Zoning parameters calculation results of physical mechanics for slip belt

| 块体编号  | 含水状态 | 重度/(kN·m <sup>-3</sup> ) | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) |
|-------|------|--------------------------|---------|----------|
| I -1  | 天然   | 25.2                     | 18.0    | 11.5     |
|       | 饱和   | 25.7                     | 16.0    | 11.0     |
| II -1 | 天然   | 25.2                     | 18.0    | 11.5     |
|       | 饱和   | 25.7                     | 16.0    | 11.0     |
| II -2 | 天然   | 25.2                     | 15.0    | 13.0     |
|       | 饱和   | 25.7                     | 13.0    | 12.5     |
| II -3 | 天然   | 25.2                     | 15.0    | 13.0     |
|       | 饱和   | 25.7                     | 13.0    | 12.5     |

个块体,不同滑块以后缘拉裂面为界,前部块体为后部块体的牵引段。前缘在高陡临空面的作用下,产生倾倒变形,后部三个块体为滑移变形。滑移体的三个块体位于干燥区,倾倒地体位于消落区。初步试算之后发现被牵引块体处于稳定状态,结合前文叙述可知:牵引段块体无推力作用但后缘拉裂面存在剪应力作用,因此按文中 2.2 节公式进行计算。先根据分析结果对计算剖面

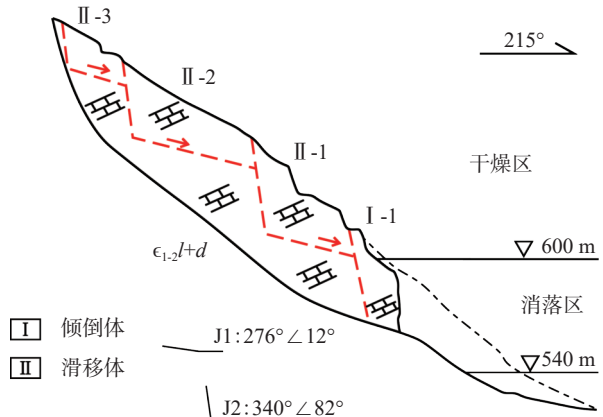


图 10 河口滑坡剖面简图

Fig. 10 cross section of Hekou landslide

进行分区和条分,再将文中 2.2 节的公式编辑到 excel 中,再将表 2 中的滑体参数按分区原则输入到公式当中,计算结果如表 5;若不进行分区,只将剖面进行条分,将同样的参数带入传统传递系数法,统一按传统方式进行计算,计算结果如表 6,其稳定性为 1.22。

表 5 分区稳定性计算结果

Table 5 Calculation results of partition stability

| 块体编号      | 稳定系数  | 稳定状态 |
|-----------|-------|------|
| 倾倒地 I -1  | 1.040 | 欠稳定  |
| 滑移体 II -1 | 1.019 | 欠稳定  |
| 滑移体 II -2 | 1.034 | 欠稳定  |
| 滑移体 II -3 | 1.045 | 欠稳定  |

表 6 传统方式稳定性表

Table 6 Stability calculation results of traditional method

| 块体编号 | 稳定系数 | 稳定状态 |
|------|------|------|
| 倾倒地  | 1.04 | 欠稳定  |
| 滑移体  | 1.22 | 稳定   |

从上述计算结果可以看出,对于被牵引段滑体处于自身稳定的河口牵引式滑坡,若按照传统计算方式进行稳定性计算,计算结果为 1.22,表示该滑坡现状处于稳定状态,但是此计算结果与工程已经出现拉裂变形的情况不吻合。而按照库岸斜坡特征分区的稳定性计算方法来对此滑坡进行稳定性计算,计算结果处于 1.00 ~ 1.05,结果显示此滑坡处于欠稳定状态,与工程实际情况相符合。

因此,对于库岸滑坡应基于斜坡特征分区原则进行分区,并根据后缘拉裂面发育情况,结合被牵引段是否有下滑推力和后壁是否存在剪应力来进行稳定性计算,使计算结果更趋近于滑体的真实情况。

假设河口滑坡继续发展,后缘拉裂缝完全拉开,变

为 2.3 节的工况。则此时按照 2.3 节稳定性计算公式计算,结果见表 7。而按照库岸斜坡特征分区的稳定性计算方法来对此滑坡进行稳定性计算,计算结果处于 0.97~1.00,结果显示此滑坡处于不稳定状态,与工程实际未来发展情况符合;若仍然按照传统整体计算的方法,则与实际情况不符。

表 7 分区稳定性计算结果  
Table 7 Calculation results of partition stability

| 块体编号     | 稳定系数  | 稳定状态 |
|----------|-------|------|
| 倾倒体 I-1  | 1.040 | 欠稳定  |
| 滑移体 II-1 | 0.985 | 不稳定  |
| 滑移体 II-2 | 0.973 | 不稳定  |
| 滑移体 II-3 | 0.992 | 不稳定  |

#### 4 结论

根据库岸滑坡自身的特点,在野外地质调查、文献调研和公式推导的基础上,结合具体工程案例,得出如下结论:

(1)库岸滑坡的斜坡特征分区原则应根据结构面、坡体位置、滑体物质成分等进行综合分区。

(2)根据库岸滑坡多为牵引式滑坡的特点,提出被牵引段存在推力+后缘拉裂面存在剪力、被牵引段不存在推力+后缘拉裂面存在剪力、被牵引段不存在推力+后缘拉裂面不存在剪力三种情况的牵引式滑坡稳定性计算公式。

(3)基于水库岸坡特征分区的计算与传统计算方式相比,滑坡稳定性计算更符合实际,但需要更高精度的勘探手段来查清滑坡工程地质条件,也需要更多的实践来验证,需要工程师与科研人员一起探讨。

(4)对比朱家店滑坡与溪洛渡水电站河口滑坡的分区稳定性计算与传统稳定性计算结果可知,分区稳定性计算结果更符合实际情况。

#### 参考文献(References):

[1] ALONSO E E, PINYOL N M. Criteria for rapid sliding I. A review of Vaiont case [J]. Engineering Geology, 2010, 114(3/4): 198–210.

[2] 陈长江, 杨静熙, 刘忠绪. 锦屏一级水电站蓄水后岸坡变形破坏规律研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 622–628. [CHEN Changjiang, YANG Jingxi, LIU Zhongxu. Mechanism of reservoir bank deformation and failure in Jinping I hydropower project after impoundment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 622–628. (in Chinese with English abstract)]

[3] 胡启芳, 范雷, 董治军, 等. 基于模糊综合评价的改进层次分析法在滑坡危险评价中的应用 [J]. 长江科学院院报, 2014, 31(5): 29–33. [HU Qifang, FAN Lei, DONG Zhijun, et al. Application of modified analytic hierarchy process based on fuzzy comprehensive evaluation to landslide risk assessment [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(5): 29–33. (in Chinese with English abstract)]

[4] 卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 等. 三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 73–81. [WEI Tongyao, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 73–81. (in Chinese with English abstract)]

[5] 张彦锋, 铁永波, 白永健, 等. 云南永善县上坝老滑坡复活机制及新滑坡稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 41–49. [ZHANG Yanfeng, TIE Yongbo, BAI Yongjian, et al. Reactivation mechanism of the old landslide and stability analysis of the new landslide in Shangba, Yongshan County of Yunnan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 41–49. (in Chinese with English abstract)]

[6] 杨何, 汤明高, 许强, 等. 长江三峡库区滑坡变形统计特征研究 [J]. 灾害学, 2021, 36(2): 37–42. [YANG He, TANG Minggao, XU Qiang, et al. Research of statistical characteristics of deformation of landslides in the Three Gorges Reservoir area of the Yangtze River [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 37–42. (in Chinese with English abstract)]

[7] 赵松琴, 朱思军. 三峡库区典型滑坡预测预报研究 [J]. 安全与环境学报, 2013, 13(6): 259–264. [ZHAO Songqin, ZHU Sijun. On forecasting typical landslides in the ThreeGorge Reservoir [J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(6): 259–264. (in Chinese with English abstract)]

[8] REHBINDER P. New physico-chemical phenomena in the deformation and mechanical treatment of solids [J]. Nature, 1947, 159(4052): 866–867.

[9] 崔激, 张志耕, 闫澍旺. 膨胀土的干湿循环性状及其在边坡稳定性分析中的应用 [J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(5): 24–27. [CUI Wei, ZHANG Zhigeng, YAN Shuwang. Cyclic behavior of expansive soils and its application in slope stability analysis [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(5): 24–27. (in Chinese with English abstract)]

[10] 吴珺华, 袁俊平. 干湿循环下膨胀土现场大型剪切试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊1): 103–107. [WU Junhua, YUAN Junping. Field tests on expansive soil

- during wetting-drying cycles using large shear apparatus [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup 1): 103–107. (in Chinese with English abstract)
- [11] 徐青, 陈士军, 傅少君, 陈胜宏. 改进剩余推力法及其在三板溪滑坡稳定研究中的应用 [J]. 安全与环境学报, 2005, 5(4): 73–77. [XU Qing, CHEN Shijun, FU Shaojun, et al. Improved residual thrust method and its application to stabilization study of Sanbanxi Landslide [J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(4): 73–77. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘茂, 杨红娟, 钱江澎. 简化Bishop法的剩余下滑推力计算方法研究 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1056–1062. [LIU Mao, YANG Hongjuan, QIAN Jiangpeng. Calculation method of landslide residual sliding force using simplified bishop method [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1056–1062. (in Chinese with English abstract)]
- [13] PREUTH T, GLADE T, DEMOULIN A. Stability analysis of a human-influenced landslide in eastern Belgium [J]. Geomorphology, 2010, 120(1/2): 38–47.
- [14] 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 等. 粘土矿物与斜坡失稳 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 729–740. [XU Zemin, HUANG Runqiu, TANG Zhengguang, et al. Clay minerals and failure of slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 729–740. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 谢小帅, 陈华松, 肖欣宏, 等. 水岩耦合下的红层软岩微观结构特征与软化机制研究 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 966–972. [XIE Xiaoshuai, CHEN Huasong, XIAO Xinhong, et al. Micro-structural characteristics and softening mechanism of red-bed soft rock under water-rock interaction condition [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 966–972. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水力发电工程地质勘察规范: GB 50287-2016 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for hydropower engineering geological investigation: GB 50287-2016 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016.]
- [17] 邓宏艳. 大型水电工程区库岸滑坡形成机理与水作用影响研究 [J]. 西南交通大学, 2011. [Deng Hongyan. Research on the Mechanism of reservoir landslides and the effect of water in the important hydropower engineering regions [J]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 吴朋宇, 张志红, 戴福初, 等. 顺层岩质边坡溃屈变形机制及失稳判定方法 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 517–525. [WU Pengyu, ZHANG Zhihong, DAI Fuchu, et al. Buckling deformation mechanism and instability judgment method of bedding rock slope [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 517–525. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 唐军峰, 唐雪梅, 周基, 等. 滑坡堆积体变形失稳机制——以贵州剑河县东岭信滑坡为例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 503–516. [TANG Junfeng, TANG Xuemei, ZHOU Ji, et al. Deformation and instability mechanism of landslide accumulation: a case study of donglingxin landslide accumulation in Jianhe County, Guizhou Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 503–516. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 谭福林. 基于不同演化模式的滑坡—抗滑桩体系动态稳定性评价方法研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2018. [TAN Fulin. Evaluation method for dynamic stability of landslide stabilizing pile system with different evolution modes [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 孙立娟. 基于滑带软化的牵引式滑坡渐进失稳机理及其演化试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019. [SUN Lijuan. Experimental study on progressive instability mechanism and evolution of retrogressive landslide based on sliding zone softening [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese with English abstract)]