



基于水流牵引力的河道岸坡稳定性分析*

郭建军^{1,2}, 刘凯^{1,2}, 武臻维^{1,2}, 曹衡^{1,2}, 张伟^{1,2}

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 基于极限平衡理论, 结合水平条分法, 将 Bishop 法的竖直条间力关系转换到水平土条上, 推导出水流牵引力作用下均质岸坡稳定安全系数的理论计算公式, 将其结果与 ABAQUS 有限元软件的强度折减法模拟的计算结果进行对比分析。结合工程实际, 分析水流牵引力对不同坡比河流岸坡的稳定性影响规律。结果表明, 理论计算公式与软件模拟的结果基本吻合, 误差不超过 2.1%。河流中水流牵引力会增大岸坡土体的下滑力矩, 降低河流岸坡土体稳定安全系数; 当岸坡土体遭受降雨、坡脚土体劣化作用等多因素作用下而处于临界稳定状态时, 水流牵引力可能成为滑坡启动的关键因素; 在河流岸坡失稳滑动时, 水流牵引力将导致滑体向河道方向滑移更远距离, 加重滑坡对河流航道安全的危害; 坡度越陡, 岸坡稳定安全系数受水流牵引力的影响越大。在进行高陡河流岸坡稳定性分析时, 水流牵引力是与强降雨、泥石流等因素同样重要且不可忽视的导致岸坡突变失稳的外部荷载作用。

关键词: 水流牵引力; 岸坡稳定性; 极限平衡法; 有限元强度折减法

中图分类号: U656.3; TU432

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0226-06

Stability of river bank slope based on water flow traction force

GUO Jianjun^{1,2}, LIU Kai^{1,2}, WU Zhenwei^{1,2}, CAO Heng^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Based on the limit equilibrium theory, combining with the horizontal slice method, we convert the vertical inter-slice force relationship of Bishop method to the horizontal soil strip, derive the theoretical calculation formula of the stability safety factor of homogeneous bank slope under the action of water flow traction force, and compare the results with the simulation results of ABAQUS finite element software's strength reduction method. Then we analyze the influence law of water flow traction force on the banks with different slope ratios combining with engineering practice. The results show that the calculation results of theoretical calculation formula and simulated by software are basically consistent, and the error does not exceed 2.1%. The water flow traction force of river will increase the sliding moment and reduce the stability safety factor of the river bank slope soil. When the soil is in a critical stable state under the action of multiple factors, such as rain and soil degradation at toe etc, the water flow traction force can become the key factor for landslide initiation. When the river bank slope is sliding instability, the water flow traction force will cause the sliding body to slide further towards the channel, which can increase the harm of landslide to the safety of the channel. The steeper the slope is, the greater the influence of the flow traction force on the slope stability safety factor is. In the analysis of bank slope stability of high and steep rivers, the water flow traction force is an external load that cannot be ignored, which is as important as heavy rainfall, debris flow and other factors.

Keywords: water flow traction force; bank slope stability; limit equilibrium method; finite element strength reduction method

收稿日期: 2023-10-27

*基金项目: 重庆市自然科学基金项目 (CSTB2022 NSCQ-MSX0991); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN202100742)

作者简介: 郭建军 (1986—), 男, 博士, 讲师, 从事岩土边坡稳定性方面的研究。

我国河流地形复杂,在西部山区由于河床的纵比降和流水速度大,下蚀作用明显,形成了大量的河谷和岸坡。除了下蚀作用外,河流还会对岸坡产生侧蚀作用,特别是在流经弯道时,由于离心力的作用,河水的主流线会偏向于河的凹岸,加速对岸坡的侵蚀,若岸坡发生滑坡,会激起巨大涌浪、堵塞航道,影响通航安全,造成巨大经济损失^[1-4]。目前针对水流与岸坡间作用力对岸坡稳定性影响方面,已有众多学者开展了研究工作,如王党伟等^[5]指出,近岸水流冲刷力是导致岸坡土体崩塌的重要因素;武立华等^[6]基于有限元强度折减法,研究水流冲刷作用下岸坡失稳的破坏过程;Yang等^[7]通过物理模型试验,指出洪水冲刷和侵蚀过程,河流岸坡通常会发生剧烈的变化。以往研究中,大多只考虑了水流对岸坡的切向应力或法向冲击力的影响,而当河流流出弯道时,会对凹岸一侧岸坡产生法向的牵引力分力,容易导致岸坡发生牵引式滑坡,水流牵引力对岸坡稳定性的影响规律及计算方法有待进一步研究。

目前对于岸坡稳定性分析,主要采用的方法是极限平衡法和有限元强度折减法^[8-10]。极限平衡法在应用时大多通过竖直条分法实现^[11-15],经过众多学者的改进已趋于成熟,但在上述工况下,水流牵引力会使条间产生拉力,这明显不符合竖直条分法的基本假设^[16-17],当使用水平条分法分析时,各个竖直土条之间的拉力被转化为水平土条之间的剪切力,所以此时,水平条分法更加适用。最早,水平条分法多用于边坡加筋土分析^[18]和挡土墙后土压力分析^[19-20]等问题,且由于对条间力的作用考虑欠缺,计算出的安全系数结果与竖直条分法差别较大。后来,邓东平等^[21]将竖直条分法的条间力关系转化到水平条分法中,并用于分析均质土坡,得出的安全系数结果与竖直条分法接近一致。

本文基于极限平衡理论,结合水平条分法,并将 Bishop 法的条间力关系转化到水平条分法中,进而考虑水流法向牵引力的作用,建立河流弯道上水流流出处岸坡稳定性的理论计算公式,并基于 ABAQUS 有限元分析软件的强度折减法验证该公式的准确性,为分析此类岸坡稳定性问题提供借鉴和参考。

1 岸坡力学分析模型

1.1 条间力的转化

以往水平条分法计算结果不准确,主要是因为未能将竖直条分法的条间力与水平土条较好对应。本文建立的分析模型见图 1,对该土坡同时进行水平条分和竖直条分,土条 $abcd$ 为第 i 块水平土条,土条 $bcfe$ 为第 i 块竖直土条。

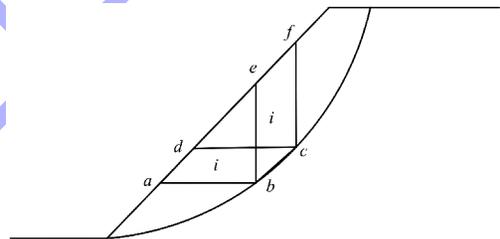


图 1 边坡水平条分法分析模型

土条受力见图 2,其中 $E_{sz,i}$ 、 $X_{sz,i}$ 为第 i 块竖直土条与右土条间的法向力、切向力, $E_{sz,i-1}$ 、 $X_{sz,i-1}$ 为第 i 块竖直土条与左土条间的法向力、切向力, $E_{sp,i}$ 、 $X_{sp,i}$ 为第 i 块水平土条与上土条间法向力、切向力, $E_{sp,i-1}$ 、 $X_{sp,i-1}$ 为第 i 块水平土条与下土条间法向力、切向力, T_i 、 N_i 分别为土条与滑裂面之间的切向力、法向力,取图 1 中第 i 块水平土条的上边界、竖直土条的右边界、坡面所围成的三角形隔离体 dcf , G_i 为第 i 个隔离体的重力,该隔离体受力见图 3,由该隔离体的水平方向和竖直方向受力平衡可以得出关系式:

$$\begin{cases} G_i + X_{sz,i} = E_{sp,i} \\ X_{sp,i} = E_{sz,i} \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)将竖直条间力与水平条间力建立联系。

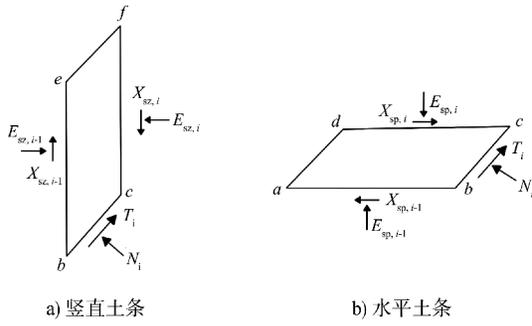


图2 土条受力分析

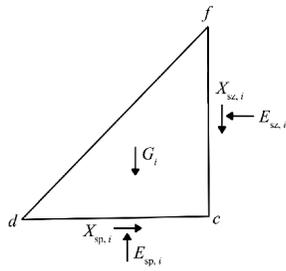


图3 隔离体受力分析

Bishop 法假设坡体滑动面为规则的圆弧形，且条块间不存在竖向剪切力，只考虑条块竖向力的平衡，式(2)在实际工程中被广泛应用^[22-23]，根据 Bishop 法的竖直条分法条间力关系式，得出 Bishop 法的水平条分条间力关系式见式(3)，文献[21]已证明，该种条间力关系转化可行。

$$\begin{cases} \Delta X_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n \Delta E_i = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \Delta X_i = 0 \\ \Delta E_i = G_i - G_{i-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中： ΔX_i 为第 i 块竖直土条右侧剪切力与左侧剪切力之差， ΔE_i 为第 i 块竖直土条右侧法向力与左侧法向力之差， ΔX_i 为第 i 块水平土条上侧剪切力与下侧剪切力之差， ΔE_i 为第 i 块水平土条上侧法向力与下侧法向力之差， G_i 为第 i 块水平土条的上边界、竖直土条的右边界、坡面所围成的三角形隔离体的重力。

1.2 分析模型的建立

建立岸坡力学分析模型见图4，其中 β 为边坡倾角， H 为坡高， h 为水深， R 为滑动面半径，根据 Bishop 法假定滑动面为标准圆弧，滑动面圆心

为 O 点，河流流向与坡脚切向方向夹角为 θ 。根据牛顿内摩擦定律，单位面积上水流产生的切应力：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (4)$$

式中： du/dy 为流速在水深方向上的变化速率， μ 为水的动力黏度。水流在坡面法向产生的牵引力 $\tau_s = \tau \sin \theta$ 。

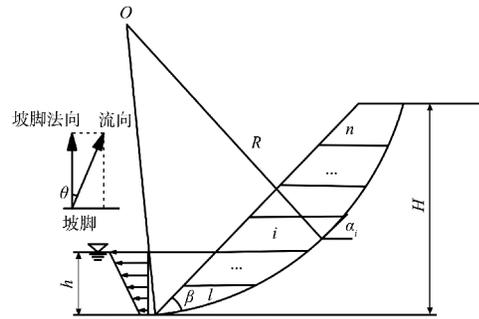


图4 考虑水流牵引力的边坡分析模型

Bishop 法对安全系数的定义为滑动面上的抗剪强度与实际的剪应力之比，则土条滑动面一侧的阻力为：

$$T_i = \frac{\tau_f}{F_s} = \frac{c_i l_i}{F_s} + N_i \cdot \frac{\tan \varphi_i}{F_s} \quad (5)$$

式中： τ_f 为滑动面上的剪切力， c_i 和 φ_i 分别为土条 i 的黏聚力和内摩擦角， l_i 为土条 i 的滑动面长度， F_s 为安全系数。

根据单个土条的竖直方向力平衡，可得：

$$E_i + W_i = T_i \sin \alpha_i + N_i \cos \alpha_i + E_{i-1} \quad (6)$$

式中： W_i 为土条 i 的重力， α_i 为土条 i 的滑动面曲线的切线与水平方向的夹角， E_i 为土条间的法向作用力。

假设 m 个土条受水流牵引力的影响，由各个土条对滑动圆心的抗滑力矩和滑动力矩相等，可得：

$$\sum_{i=1}^n W_i S_i + \sum_{i=1}^m \tau_{s,i} A_i L_i t_i \cos \alpha_i + \sum_{i=1}^m D_{w,i} d_{w,i} = \sum_{i=1}^n T_i R \quad (7)$$

式中： S_i 为土条 i 的重心至滑动面圆心的力臂， $\tau_{s,i}$ 为土条单位面积所受的水流牵引力， A_i 为水流牵引力影响面积， L_i 为土条受牵引力合力至滑动面圆心的力臂， t_i 为第 i 块土条所受的水流牵引力

的合力, $D_{w,i}$ 、 $d_{w,i}$ 为涉水土条所受的水压力、至滑动面圆心的力臂。

根据式(3)、(5)~(7), 求得安全系数计算公式为:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{R}{m_{\alpha,i}} [c_i l_i \cos \alpha_i + W_i + (G_i - G_{i-1})] \tan \varphi_i}{\sum_{i=1}^n W_i S_i \sin \alpha_i + \sum_{i=1}^m \tau_{s,i} A_i L_i t_i \cos \alpha_i + \sum_{i=1}^m D_{w,i} d_{w,i}} \quad (8)$$

其中:

$$m_{\alpha,i} = \cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \sin \alpha_i}{F_s} \quad (9)$$

2 算例分析

2.1 算例概况

某黏性土质岸坡见图5, 坡高为10 m, 坡度为1:1.5, 土密度1.88 t/m³, 黏聚力 $c=21.65$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=15^\circ$, 坡前水深为3 m, 假设坡脚法向流速水面为5 m/s, 底部流速为2 m/s, 且流速沿水深方向均匀变化。

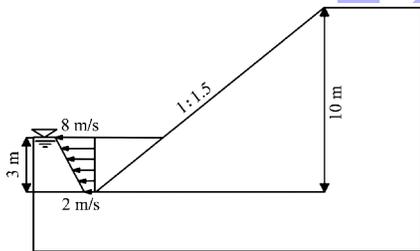


图5 边坡模型

2.2 理论分析

使用本文方法对该算例进行计算时, 首先令式(9)的安全系数 $F_s=0$, 求出对应的 m_α 值, 并通过该值求解出式(8)的 F_s , 再根据此 F_s 值求解出新的 F_s 与 m_α , 如此反复迭代, 直到假定的 F_s 值与求解出的 F_s 相等。通过上述方法, 计算该算例不考虑水流牵引力时的安全系数为1.185, 当考虑水流牵引力时安全系数为1.171, 主要原因是水流牵引力作用于坡脚, 使坡体的下滑力矩增大。当坡脚土体由于长期浸水发生劣化或遭遇强降雨时, 雨水的渗透与坡面径流共同作用于坡体, 水流牵引力将成为一种容易忽视的引起滑坡关键

因素。

2.3 数值模拟

有限元强度折减法本质上是一种强度储备分析法, 在计算过程中将边坡土体的 c 、 φ 值按照式(10)、(11)通过一个系数 F_r 进行折减, 将多次折减后得到的值进行反复试算, 直到边坡破坏为止, 此时的折减系数就视作边坡的安全系数。判断土坡失稳的依据主要有以下3种: 数值计算是否收敛、坡体特征点位移是否出现突变、坡体塑性区是否贯通。首先, 数值计算是否收敛受网格划分、建模流程等因素影响较大; 其次, 塑性区贯通时, 滑坡可能仍然继续发展, 计算结果也不一定收敛, 判断方法局限性较大, 而坡体特征点发生位移突变实际工程意义明确, 因此本文采用的标准是坡体位移是否发生突变为判别标准。与极限平衡条分法相比, 强度折减法不需要提前假定滑动面的类型和位置, 且可以体现坡体发生破坏的渐进过程, 但对于安全系数的表述, 强度折减法与极限平衡法有着相同的含义。

$$c_m = c/F_r \quad (10)$$

$$\varphi_m = \arctan(\tan \varphi / F_r) \quad (11)$$

式中: c_m 、 φ_m 为折减后的土体黏聚力、内摩擦角, F_r 为折减系数。

为了减少有限元分析中边界效应的影响, 在原模型基础上适当扩大尺寸, 见图6, 模型左右两侧约束水平位移, 模型底部约束竖向和水平位移。

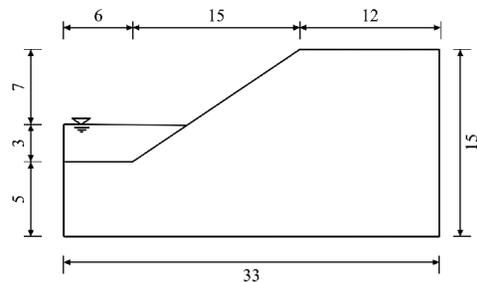


图6 有限元分析模型尺寸(单位:m)

在ABAQUS软件中使用强度折减方法进行计算结果为: 不考虑水流牵引力时边坡的安全系数为1.205, 当考虑水流牵引力时边坡安全系数为1.168; 施加水流牵引力前, 所求出的结果大于前文所述的条分法, 而施加水流牵引力后, 强度折

减法计算结果偏小。究其原因，可能是施加水流牵引力后，有限元法可以更精细地计算外力引起的坡体内部的应力-应变关系，减小了条分法土条间条间力假设造成的计算误差。与强度折减法计算结果相比，整体计算误差不超过 2.1%。

坡体失稳后的水平方向位移云图见图 7，坡体塑性区应变云图见图 8。由图 7 可知，与不考虑水流牵引力相比，考虑水流牵引力作用时的滑体向河道方向多滑移了 5.54 m，在工程实际中，滑体朝向河道方向位移增大往往意味着滑坡体将会堵塞更多的河道；由图 8 可知，不考虑水流牵引力，强度折减到后坡体的塑性区内，最大的塑性应变数值为 11.1，当考虑水流牵引力时坡体内最大的等效塑性应变值为 12.4，因此水流牵引力会使滑移面塑性区面积和土体塑性应变程度增加，加大滑坡的风险。

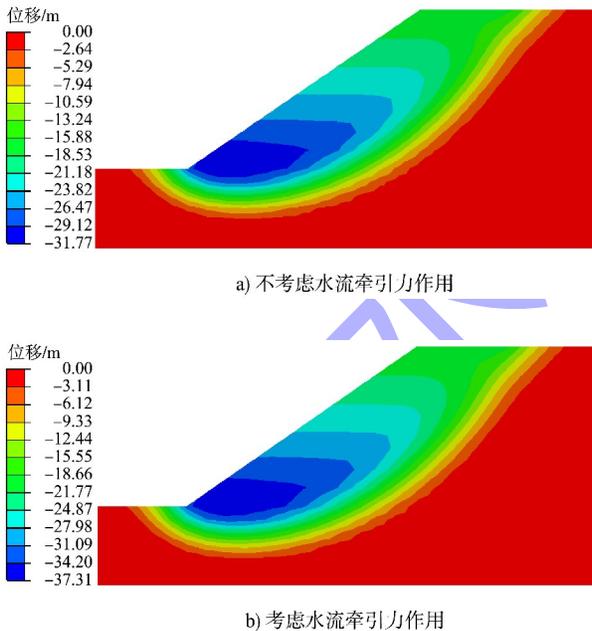
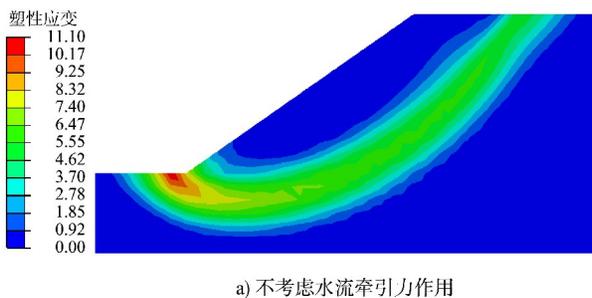
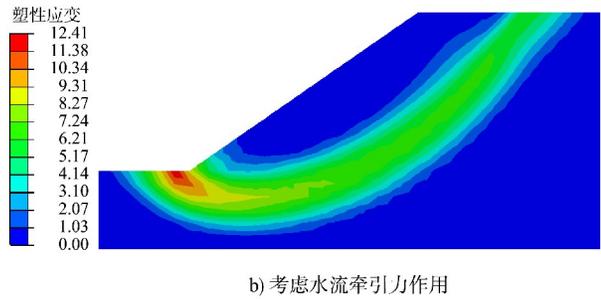


图 7 坡体失稳后的水平方向位移云图



a) 不考虑水流牵引力作用



b) 考虑水流牵引力作用

图 8 坡体失稳后塑性区应变云图

3 不同坡度的边坡受水流牵引力的影响

实际工程中，边坡坡度是影响边坡稳定性的关键因素^[24]。一般情况下，边坡的坡度越陡，越容易受外部因素影响，对稳定性就越不利。通过计算得到相同坡高、不同坡比的岸坡受水流牵引力影响下的稳定安全系数，见图 9。

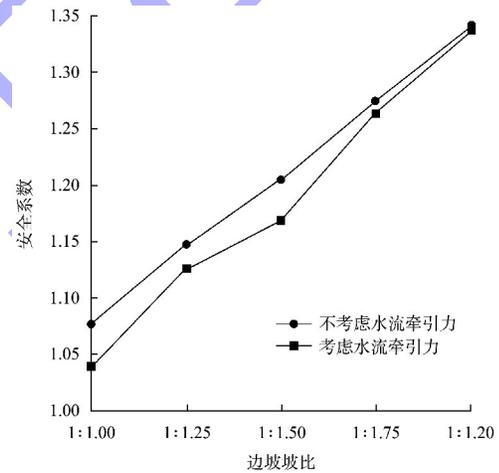


图 9 边坡坡比与稳定安全系数的关系

由图 9 可知，随着岸坡放缓，安全系数都不断增加。考虑水流牵引力时，岸坡的安全系数从 1.039 提高至 1.338；不考虑水流牵引力时，岸坡的安全系数从 1.076 提高至 1.341。当坡比为 1:1 时，水流牵引力使岸坡的安全系数降低了 2.6%。可见，在土质、坡高、水流牵引力等因素不变的情况下，坡度越陡，安全系数受水流牵引力的影响越大，当坡度放缓时，水流牵引力的影响减小，对于坡比为 1:2 的缓坡，水流牵引力的影响趋于消失。

所以对于高陡河流岸坡稳定性分析，水流牵引力的影响不可忽略。水流牵引力往往伴随着强降雨、泥石流等作用而增大。根据式(4)可以看

出,水体的动力黏度 μ 增大,随着水流情况复杂,流速沿水深变化加剧,必然会导致水流牵引力的增大,此时水流牵引力很可能是引起临界状态坡体失稳的重要因素。

4 结论

1) 本文基于水平条分法和 Bishop 法的条间力关系,提出一种考虑水流牵引力影响的河流岸坡稳定性分析方法。通过算例分析得出,本文方法与有限元强度折减法相比,两种方法计算结果接近,且误差不超过 2.1%,计算出的滑动面相似。本文的方法具有可行性。

2) 水流牵引力会增大边坡的下滑力矩,降低边坡的稳定安全系数。当与降雨和坡脚土体劣化等因素叠加作用于河流边坡时,边坡的灾变失稳风险加剧,很可能是导致临界状态边坡灾变失稳的关键影响因素。水流牵引力将导致滑体向河道方向滑移距离增大,堵塞河道,加重河岸滑坡对航道危害,在实际工程中应格外注意。

3) 边坡越陡,坡体稳定性受水流牵引力的影响越大;当坡度放缓时,水流牵引力的影响减小,坡比为 1:2 时,水流牵引力的影响趋于消失。对于发生强降雨、泥石流情况下的高陡河流岸坡,水流牵引力对坡体稳定性的影响不可忽视。

参考文献:

- [1] 石林. 三峡库区软硬岩互层反倾高边坡变形破坏机制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [2] 孙钱程, 徐晓, 刘圣, 等. 三峡库区碎屑岩岸坡岩体钻孔成像特征及质量评价方法研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(S1): 581-592.
- [3] 杨迪. 水位升降速率和边坡坡率对涉水岸坡的稳定性影响研究[J]. 绿色科技, 2023, 25(14): 245-251.
- [4] DOBLE R, BRUNNER P, MCCALLUM J, et al. An analysis of river bank slope and unsaturated flow effects on bank storage[J]. Groundwater, 2012, 50(1): 77-86.
- [5] 王党伟, 余明辉, 刘晓芳. 冲积河流河岸冲刷展宽的力学机理及模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(4): 14-19.
- [6] 武立华, 张庆海. 水流冲刷作用下对岸坡稳定性的有限元分析[J]. 绥化学院学报, 2022, 42(2): 149-153.
- [7] YANG Y, XIONG X, MELVILLE B W, et al. Dynamic morphology in a bridge-contracted compound channel during extreme floods: effects of abutments, bed-forms and scour countermeasures [J]. Journal of hydrology, 2021, 594: 125930.
- [8] 张政, 赖扬威, 欧阳礼捷, 等. 基于极限平衡理论与有限元强度折减法的某涉水高边坡稳定性分析[J]. 广东水利水电, 2023(2): 68-74, 104.
- [9] 陶丽娜, 周小平, 柴贺军. 用于边坡稳定分析的改进通用条分法[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(1): 106-113.
- [10] NIAN T K, HUANG R Q, WAN S S, et al. Three-dimensional strength-reduction finite element analysis of slopes: geometric effects [J]. Canadian geotechnical journal, 2012, 49(5): 574-588.
- [11] 蒋青江, 邓亚虹, 杨楠, 等. 基于严格条分法的拟动力地震边坡稳定性分析方法研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(3): 716-723.
- [12] 邓涛, 卢钦武, 吴尚杰, 等. 基于通用条分原理的锚框支护边坡地震动力稳定分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 601-607.
- [13] SU A J, FENG M Q, DONG S, et al. Improved statically solvable slice method for slope stability analysis [J]. Journal of earth science, 2022, 33(5): 1190-1203.
- [14] SINGH P, BARDHAN A, HAN F, et al. A critical review of conventional and soft computing methods for slope stability analysis [J]. Modeling earth systems and environment, 2023, 9(1): 1-17.
- [15] 王万禄, 王黎蝶, 夏钢源, 等. 基于瑞典条分法的某露天铁矿采场边坡稳定性分析[J]. 现代矿业, 2022, 38(9): 215-218, 227.
- [16] 钱佳欢. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.