

文章编号:1000-4653(2026)01-0116-09

基于动能演化的船闸岩质高边坡开挖稳定分析

王能^{1*}, 袁维海², 刘铭², 王昊程²

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南长沙 410200;
2. 河海大学, 江苏南京 210098)

摘要: 船闸改建时需要对两侧山体进行开挖, 由于目前判断边坡是否失稳破坏主要依靠土体位移、塑性区以及计算迭代次数, 该方法在进行边坡稳定性分析时往往需要人为判断, 较为主观, 无法准确确定边坡是否失效。基于上述原因, 本文提出了一种基于动能演化判断准则的边坡稳定性分析方法, 并结合白市水电站改建船闸边坡开展研究: 通过选取该船闸边坡开挖的典型截面, 采用强度折减法, 分析在不同折减系数下船闸边坡土体的动能演化趋势并判断边坡是否发生失稳破坏, 同时与传统基于位移的判断的静力分析方法进行了对比。结果表明: 本文提出的基于动能演化判断准则的边坡稳定性分析方法可得到准确的边坡安全系数, 且相较于传统位移判断方法, 本文提出的基于动能演化判断准则的边坡稳定性分析方法在识别边坡失稳滑坡时更加客观且明确, 具有更大的优势。本文的研究成果为岩质高边坡工程提供了宝贵的实用价值和指导意义, 可为相关领域的专业人士提供有力支持和借鉴。

关键词: 岩质高边坡; 边坡开挖破坏; 基于动能的失效准则; 动力分析方法

中图分类号: U641 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2026.01.012

Stability analysis of ship lock high rock slopes during excavation using kinetic energy evolution

WANG Neng^{1*}, YUAN Weihai², LIU Ming², WANG Haocheng²

(1. Hunan Provincial Communications Planning, Survey&Design Institute CO. LTD., Changsha 410200;
2. Hohai University, Nanjing 210098)

Abstract: During the reconstruction of the ship lock, excavation of the rock masses on both sides is often required. In current practice, slope instability is commonly judged using indicators such as displacement, the extent of the plastic zone, and the number of numerical iterations. These criteria typically rely on manual interpretation, which can be subjective and may not clearly determine whether slope failure has occurred. Thus, this paper proposes a slope stability analysis method based on a kinetic-energy evolution criterion, and applies it to the reconstructed ship-lock slope at Baishi Hydropower Station. A representative excavation cross-section at the ship lock is selected and the strength reduction method is adopted to analyze the kinetic energy evolution of the slope soil under different reduction coefficients, thereby identifying the occurrence of instability and failure. The proposed criterion is further compared with the conventional static assessment method based on displacement. The results show that the dynamic analysis method based on the kinetic energy evolution can obtain an accurate slope safety factor. Compared with the traditional displacement judgment method, the method proposed in this paper provides a more objective and explicit identification of slope instability which has greater advantages. The findings of this paper provide practical value and guidance for the high rock slope engineering, which can serve as useful reference for professionals in related fields.

Key words: high rock slopes; excavation-induced slope failure; kinetic energy failure criterion; dynamic analysis method

收稿日期: 2025-01-09

基金项目: 贵州省交通科技项目(2022-221-009), 湖南省交通科技项目(202512)资助

作者简介: 王能(1985—), 男, 高级工程师, 研究方向为水运工程设计与咨询。*通信作者: 347112411@qq.com

引用格式: 王能, 袁维海, 刘铭, 等. 基于动能演化的船闸岩质高边坡开挖稳定分析[J]. 中国航海, 2026, 49(1): 116-124.

WANG N, YUAN W H, LIU M, et al. Stability analysis of ship lock high rock slopes during excavation using kinetic energy evolution[J]. Navigation of China, 2026, 49(1): 116-124. (in Chinese)

随着交通强国战略实施,水运作为交通短板在中西部地区尤为明显。为实现国家战略,促进西部地区经济社会发展,贵州省计划 2021 至 2030 年建设清水江水运通道,旨在提升航道通航能力,发展绿色交通,促进黔东南地区及少数民族地区的经济社会繁荣。近年来,随着高等级航道建设的延伸,白市水电站需增建船闸以实现通航。鉴于白市位于多山的贵州省,船闸扩建需对两侧山体进行开挖,故需研究边坡稳定性。船闸岩质高边坡因其独特的结构要求、巨大的高度、复杂的形态、严格的稳定性和变形特性要求、作为结构组成部分的岩体、施工难度、复杂的地质条件以及水文和环境影响而与一般岩质高边坡有所不同。这些特点要求对船闸高边坡进行专门的开挖稳定分析研究,以确保船闸的安全稳定运行。白市船闸边坡地形复杂,边坡高 200 米以上,为超高岩质边坡,需研究不同开挖方案以确保工程施工的稳定性和安全性。

岩质高边坡因其结构的复杂性和不连续性,受力情况比土质边坡更复杂,破坏分析也更为困难^[1]。周永强等通过物理模型试验对极端降雨作用下不同相对位置杆塔基础边坡易发生的破坏模式进行了分析^[2];马鹏飞等通过动力扩展有限元法(Dynamic Extended Finite Element Method, XFEM)与强度折减法(Strength Reduction Method, SRM)相结合对内部含裂隙的岩质边坡分析,确定了可能形成的破坏通道^[3];张宜杰通过节理网络有限元(Joint Network Finite Element, JFEM)计算边坡稳定性状态,发现边坡中不稳定滑块容易产生“滑移-拉裂”的失稳形式^[4];YUAN 等^[5]使用光滑粒子有限元(SPFEM)对边坡稳定性进行了研究;徐镇凯等^[6]基于组合赋权模糊云理论评价了边坡稳定性;刘春龙等^[7]通过块体极限平衡理论研究了边坡稳定坡角与边坡安全系数;张信贵等^[8]对饱和-非饱和土开挖边坡稳定性进行了分析。李宁等^[9-10]使用边坡潜在滑动面力学参数的反演分析方法探讨了岩质边坡在动力荷载作用下的稳定性。

边坡稳定性研究主要采用极限平衡分析法和强度折减有限元法。极限平衡法计算简便、效率高,能计算安全系数和临界滑移面,但依赖滑移面假设,不考虑土体变形。强度折减法通过降低土体粘聚力或摩擦角模拟破坏,形成连续滑动面,导致边坡失稳。该方法考虑应力-应变关系和土体变形,但需人为判断破坏标准,并无明确标准判断边坡是否破坏。

本文采用动能作为边坡失效的判断标准。当折减系数较小时,边坡不发生破坏,土体速度较小,其

动能也较小;当折减系数较大边坡失稳时,土体出现速度急剧增加,其动能也会急剧增加。因此可以使用动能作为边坡破坏的判断标准。边坡破坏时土体动能急剧增大,其动能曲线将明显区别于稳定状态下边坡土体动能曲线,因此使用动能变化作为边坡破坏的标准能够客观地对边坡状态进行判断,准确给出边坡稳定性状态及安全系数。本文将对使用动能作为边坡失效的判断标准的边坡稳定性判别方法进行说明并与传统的静力计算位移推定方法进行对比证明其优势。

1 强度折减理论及能量演化准则相关理论

1.1 强度折减理论

为了分析边坡的稳定性,本文使用有限元计算软件(ABAQUS)结合强度折减法模拟岩质高边坡。此过程需要计算一系列降低的抗剪强度参数:

$$c_t = \frac{c}{I_{\text{srf}}} \quad (1)$$

$$\phi_t = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{I_{\text{srf}}}\right) \quad (2)$$

其中, c 为粘聚力, φ 为摩擦角, c_t 和 ϕ_t 分别为折减后的粘聚力和摩擦角, I_{srf} 为强度折减系数(strength reduction factor, SRF)。首先将 I_{srf} 的初始值设为 1.0,使边坡在重力作用下地应力稳定。然后增加 I_{srf} 值,使土体强度逐渐减弱,直到土体强度足够低,边坡土体出现较大速度,边坡失稳。尽管土体位移是否剧增、边坡塑性区域是否贯通以及迭代计算是否收敛是否剧增三种常见的失效标准在理论上是一致的,但它们主观上依赖于相应的实际问题进行解释,这导致安全系数(Factor of safety, FOS)的确定是不同的。

1.2 动能演化准则

从能量的角度来看,边坡内部固有的引力势能是恒定的,因此其转化为不同数量弹性应变能、耗散能和动能总量也是恒定的,最终达到动态平衡并保持稳定。TU 等^[11]证明了坡内的能量总是与外部环境交换,因此坡的变形过程遵循能量守恒规律。因此,能量守恒原理可以表示为一个能量平衡方程,即:

$$\Delta E_{\text{SRFP}} = \Delta E_{\text{SRFe}} + \Delta E_{\text{SRFd}} + \Delta E_{\text{SRFk}} \quad (3)$$

ΔE_{SRFP} 、 ΔE_{SRFe} 、 ΔE_{SRFd} 、 ΔE_{SRFk} 分别表示在特定下的重力势能、弹性应变能、耗散能和动能的变化。HUANG 等^[12]研究表明,当强度降低系数增加时,在再次保持稳定的过程中,斜坡中的应力和应变会重

新分布,从而导致各种能量的不断交换。在此过程中,斜率本身有一个能量存储的上限,称为总应变能,由弹性应变能和耗散能 E_e 和耗散能 E_d 组成。当坡度达到临界状态时,动态平衡就会被打破。这是因为总的输入能量大于总应变能,剩下的所有能量都转化为动能。使用有限单元法结合强度折减法进行边坡稳定性分析时,在选取逐个增大的折减系数令土体强度减小的过程中,边坡系统的能量响应满足能量守恒定律。通常,还原过程只考虑自重的影响。因此,对于一个典型的 I_{stf} 值,每种形式的能量的计算如下:

$$E_p = \int_{\Omega} \rho g \Delta h d\Omega \quad (4)$$

$$E_e = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \sigma : \varepsilon_e d\Omega \quad (5)$$

$$E_d = \int_{\Omega} \left(U_{\sigma} - \frac{1}{2} \sigma : \varepsilon_e \right) d\Omega \quad (6)$$

$$E_k = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \rho v^2 d\Omega \quad (7)$$

式(4)~式(6)中, ρ 为土体密度, g 为重力加速度, Δh 为各节点的高度, σ 和 ε_e 分别为应力张量和弹性应变张量, U_{σ} 为总应变能, v 为速度。当边坡动态平衡处于稳定状态时,边坡为稳定状态。当平衡被扰动时,边坡重力势能 E_p 会首先释放并在边坡内部转移,转化为耗散能 E_d 。滑坡发生时,动能 E_k 急剧增大,边坡失稳。虽然 TU 等^[11] 和 HUANG 等^[12] 已经注意到这些能量的变化可以用来定义一个新的边坡失效准则,但他们没有进一步考虑动能对斜坡失稳的一个更重要的影响因素。

YUAN 等^[5] 和 NAEIJ 等^[13] 进行了一些基于动能的测试。在 eSPFEM 的帮助下, YUAN 等^[5] 主要关注整个边坡失效后过程,因此不采用二阶工作准则,式(7)可以理解为:

$$E_k = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \rho v^2 d\Omega = \sum_{k=1}^{Nn} \frac{1}{2} m_k v_k^2 \quad (8)$$

式(8)中, m_k 和 v_k^2 分别为粒子 k 的质量和速度, Nn 为粒子数量。在 TU 等^[11] 和 HUANG 等^[12] 的工作中也没有考虑到这一点。MEDICUS 等^[14] 和 YUAN 等^[5] 讨论了基于动能的失效判断准则优于二阶功准则的原因。因此,可以直接引入边坡动能,并监测失效分析过程中边坡动能的变化。当选取某一折减系数边坡动能与上一折减系数相比出现较大变化时,边坡失稳。在有限元计算软件(ABAQUS)中,可以通过对输出数据库文件进行脚本提取存储在节点上的速度和材料参数,从而实现动能法判定。

2 工程概况和模型简介

2.1 工程概况

本研究以白市水电站为案例,探讨岩质高边坡开挖的稳定性。通过强度折减法有限元分析和动能演化分析对比边坡稳定性。白市船闸施工区有多处高边坡,主体结构建在开挖边坡上。赤平投影分析显示边坡稳定性良好,但地质调查发现部分边坡存在倾向坡外的陡倾角断层,破坏岩体完整性,对稳定性产生不利影响。

根据实地勘探的地质资料,沿船闸轴向方向选取典型剖面作为船闸高边坡稳定性分析剖面,为高边坡工程开挖施工、船闸结构设计提供依据,如图1所示。该剖面为开挖前边坡剖面,包含粉质黏土、强风化砂质板岩、中风化砂质板岩和微风化砂质板岩、断层,各岩层相应的岩体力学参数见表1。采用分层开挖的形式对该船闸高边坡进行开挖施工,如图2所示。其中深色区域为边坡开挖区域。

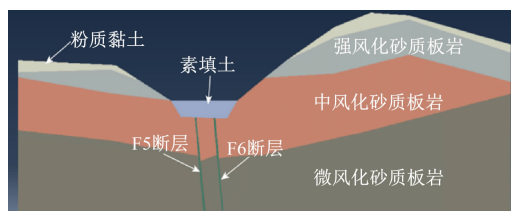


图1 船闸高边坡典型剖面岩层结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rock structure in the typical profile of the ship lock high slope

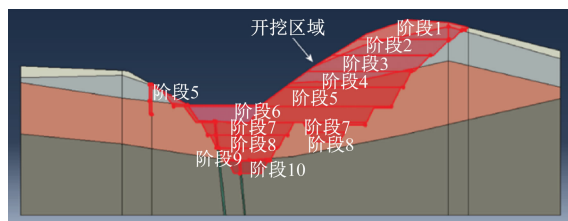


图2 船闸高边坡整体分层开挖流程

Fig. 2 Overall stratified excavation process of the ship lock high slope

2.2 船闸高边坡关键截面选取与建模

本文选取了典型剖面中的三个截面对边坡土体进行模拟,分别为增加了桩基和锚杆等人为建筑工程的 AA 面(见图3a)、桩基较高且顶部为素填土的 BB 面(见图3b)、断层数量较多且无锚杆的 CC 面(见图3c)。边坡锚杆单根长 12 m,砂浆 M25,直径 $D = 25$ mm,钻孔土类中风化岩,桩采用 C30 混凝土进行灌注。

AA 剖面左侧高 81.4 m,底部约 109 m,右侧高 43.4 m。土层自上至下为粉质黏土,强风化砂质板

表1 船闸高边坡各岩层材料力学参数表

Tab.1 Mechanical properties of rock materials for each stratum of the ship lock high slope

土层	密度/ (KN/m ³)	摩擦角/ (°)	粘聚力/ MPa	弹性模量/ GPa	界面摩 擦系数
素填土	1 880	24	0.02	0.004 42	0.3
粉质黏土	1 910	27.81	0.022	0.004 95	0.3
强风化岩 砂质板岩	2 490	24.23	0.15	1.3	0.35
中风化砂 质板岩	2 640	34.99	0.55	6	0.3
微风化砂 质板岩	2 680	41.99	0.88	20	0.25
断层	2 490	14.04	0.02	1.3	0.35

岩,中风化砂质板岩及微风化砂质板岩。BB剖面左侧高81.4 m,底部约109 m,右侧高43.4 m。土层

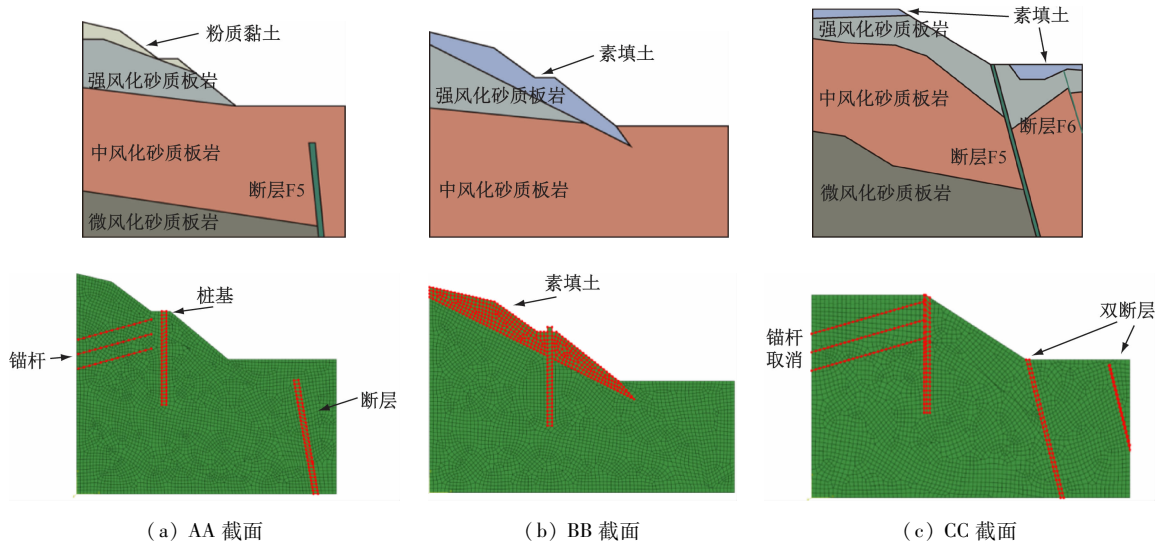


图3 包含断层的三个关键截面岩体结构分层图(上方图)及其有限元建模(下方图)

Fig.3 Rock mass stratification of three key sections with faults and their finite-element modeling

3 边坡开挖稳定性的有限元分析结果

3.1 地应力平衡分析

在进行岩土边坡开挖模拟前,需要先进行地应力平衡计算,以消除边坡自重对模型的影响。在这一过程中,重力加速度设为 9.81 m/s^2 ,模型的左右两端和底面分别设置为水平和完全约束。地应力平衡后,三个关键截面的竖向应力分布和位移云图如图4,坡脚的最大位移小于 $2 \times 10^{-6} \text{ m}$,说明地应力平衡对模型几何的影响很小。

3.2 边坡开挖安全系数分析

本文选取了不同折减系数进行了计算分析了边

自上至下为素填土,强风化砂质板岩及中风化砂质板岩。CC剖面左侧高64.5 m,底部约120 m,右侧高42.4 m。土层自上至下为素填土,强风化砂质板岩,中风化砂质板岩及微风化砂质板岩。

AA面不仅考虑岩质高边坡的自然地质情况,也增加了桩基和锚杆等人为建筑工程。在图中展示了左侧埋入的三根锚杆和桩基,同时右侧的条状网格为断层。该边坡的整体材料参数基本按重力方向分层。边坡模型采用四边形网格及缩减积分,锚杆采用WIRE几何模型且可发生形变。BB面的桩基相较AA高出地面,顶部为素填土,增加了模型顶部的不稳定性。CC面相较于上文中两个界面增加了断层的数量,且均位于开挖处,除此之外取消了桩基后的锚杆以研究相关影响。本算例的目的是综合评估多种潜在的地质灾害条件,特别是断层等地质缺陷,对开挖工程安全性的具体影响,为工程设计和施工提供科学依据。

坡的稳定性。由于本文提出的基于动能演化判断准则的边坡稳定性分析方法需要对边坡土体动能进行计算,因此选用隐式动力算法对开挖完成后边坡稳定性进行模拟分析,并将模拟分析的总时间设置为10 s。由于模型中存在不同岩层,模型节点的岩土参数为分层分布,在计算时需要考虑节点自身的非均质质量。为此,基于编程语言python编写用于节点结果提取的子程序脚本,该脚本可读取并遍历模型参数中的集合*SET设置,对节点的所属合集进行识别定位并确定节点对应的岩土材料参数,从而计算出准确的动能值。

图5为模拟边坡开挖完成后AA截面在不同强

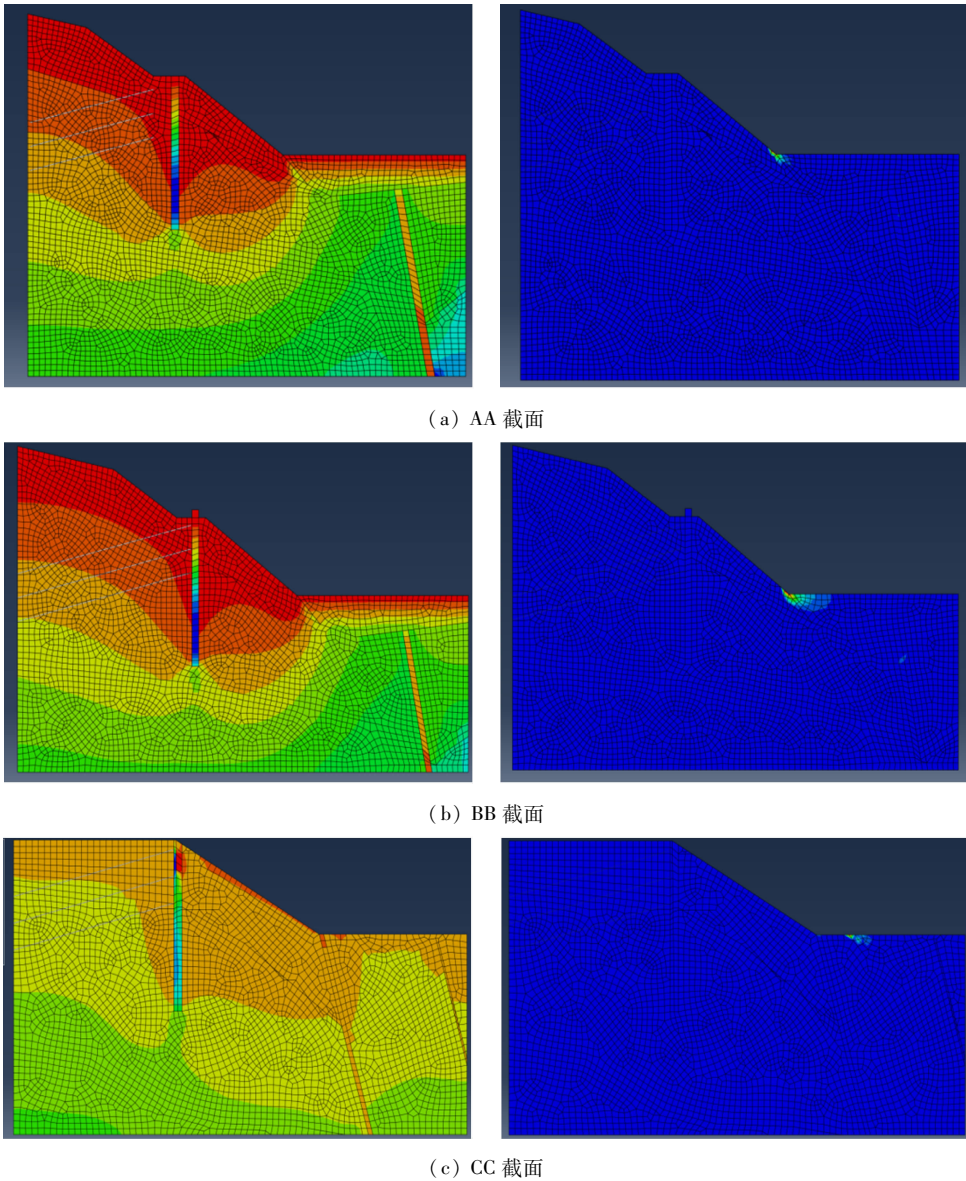


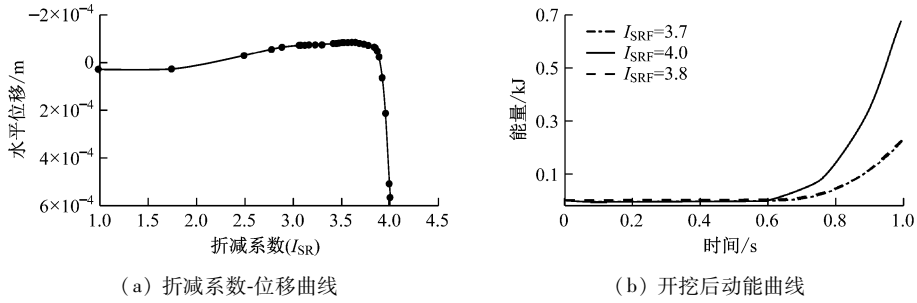
图4 关键截面地应力平衡分析结果(左列为竖向应力;右列为总位移云图)

Fig. 4 In-situ stress equilibrium analysis results for key sections (left; the vertical stress distribution; right; the total displacement contour)

度折减系数条件下边坡位移及动能曲线,其中图 5a 为边坡土体位移曲线,图 5b 为边坡土体动能曲线。由图 5a 可知,当 $I_{SRF} \leq 3.8$ 时边坡土体水平位移较小,边坡处于稳定状态;当 $I_{SRF} > 3.8$ 时边坡土体出现较大位移,边坡发生失稳破坏,因此可以认为 AA 截面边坡安全系数为 3.8。采用位移作为边坡是否失稳破坏的判断准则时,需要找出位移出现较大变化的拐点,这种判断存在较大的主观性。如图 5a 中 $I_{SRF} = 3.7$ 、 $I_{SRF} = 3.8$ 及 $I_{SRF} = 3.9$ 时均出现了一定的位移变化,采用位移作为判断准则难以判断此时边坡是否出现破坏。另一方面,在图 5b 中可以明显观察到,当 $I_{SRF} \leq 3.8$ 时动能拐点较小且基本一致,表明此时边坡未发生失稳;当 $I_{SRF} > 3.8$ 时(即 $I_{SRF} =$

4.0) 动能曲线出现了明显拐点,此时边坡土体速度较大,边坡失稳。通过对不同 I_{SRF} 下动能曲线是否发生突变进行判断得到边坡的安全系数(Factor of safety, FOS)大致为 3.8,此结果与位移法分析的结果一致,说明可以将动能作为边坡是否发生失稳的判断标准,且相比采用位移作为边坡失稳的判断准则更容易识别边坡是否发生破坏。通过观察图 5b 中的动能曲线,当 I_{SRF} 为 3.7 及 3.8 时动能曲线几乎一致,当 I_{SRF} 为 3.9 时可以清楚地看到边坡土体产生较大的动能,此时边坡失稳。

同样地,对模拟边坡开挖完成后截面 BB 采用不同 I_{SRF} 开展边坡稳定性计算,图 6a 为边坡土体位移曲线,图 6b 为边坡土体动能曲线。由图 6a 可知,

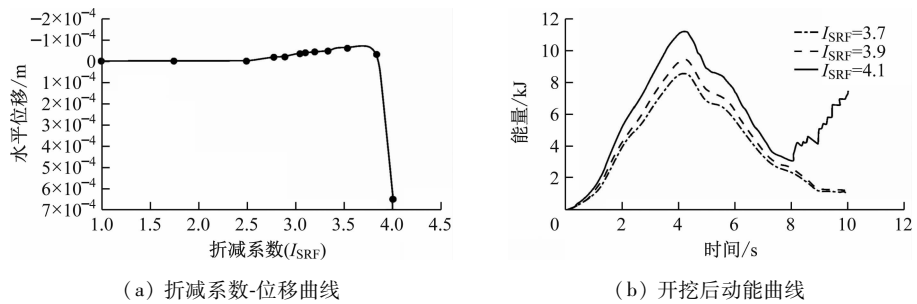


(a) 折减系数-位移曲线 (b) 开挖后动能曲线
图 5 AA 面折减系数-位移曲线和开挖后动能曲线

Fig. 5 Reduction factor-displacement curve and post-excitation kinetic energy curve for section AA

当 $I_{SRF} \leq 3.9$ 时边坡土体水平位移较小,边坡稳定;当 $I_{SRF} > 3.9$ 时边坡土体的水平位移出现拐点,边坡失稳。若采用位移作为边坡失稳的判断准则,则可以主观上判断 BB 截面边坡安全系数为 3.9。若采用动能作为边坡失稳的判断准则,从图 6b 中则可明显地观测到,当 I_{SRF} 为 3.9 时,边坡土体动能并未发生较大突变;而当 I_{SRF} 增加到 4.1 时,边坡土体在第 8 s 时动能突然增大,这表明此时边坡土体失稳破

坏。与此同时,由于滑坡大变形的发生,数值计算出现不收敛的现象,由此可判断出边坡的安全系数应为 4.1。由此可知,通过位移是否发生突变作为判断准则难以准确识别出 BB 截面边坡开始破坏的折减系数,在主观上模糊地判断出安全系数为 3.9;而通过动能曲线则可以清晰地得到 BB 截面边坡在 I_{SRF} 为 3.9 时仍旧处于稳定状态,当 I_{SRF} 为 4.1 时边坡发生破坏。

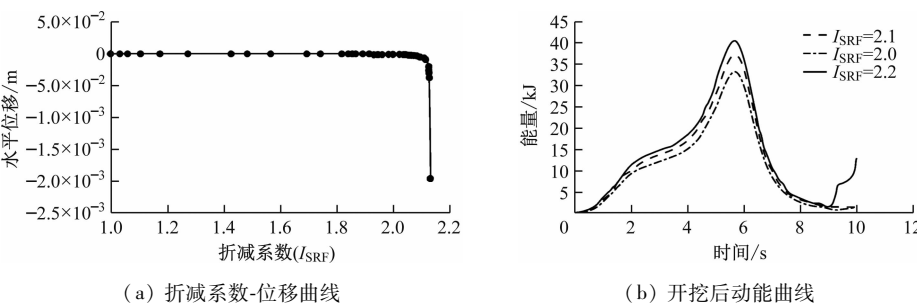


(a) 折减系数-位移曲线 (b) 开挖后动能曲线
图 6 BB 面折减系数-位移曲线和开挖后动能曲线图

Fig. 6 Reduction factor-displacement curve and post-excitation kinetic energy curve for section BB

最后,采用不同 I_{SRF} 对模拟边坡开挖完成后 CC 截面边坡稳定性进行计算分析,结果如图 7 所示,其中图 7a 为边坡土体位移曲线,图 7b 为边坡土体动能曲线。从图 7a 中可以看出当 $I_{SRF} \leq 2.1$ 时边坡土体位移几乎为 0 m,而当 $I_{SRF} > 2.1$ 时土体则开始出现较大位移。由此可以得出其安全系数约为 2.1。此处可以明显发现虽然 $I_{SRF} > 2.1$ 后土体开始产生较大位移,但此时位移只是相对 $I_{SRF} \leq 2.1$ 时土体位

移而言较大,其位移依然较小,很难判断出此时边坡是否发生破坏。而在图 7b 中, I_{SRF} 为 2.1 时土体动能曲线与 I_{SRF} 为 2.1 时土体动能曲线几乎重合,而当 I_{SRF} 为 2.2 时出现明显突变,很明显地表示出此时边坡土体出现较大速度,边坡发生破坏。结合上文对 AA 截面、BB 截面以及 CC 截面边坡是否发生失稳破坏的分析可知,相比采用位移作为判断依据,采用动能作为边坡破坏的判断依据可更清晰识别边



(a) 折减系数-位移曲线 (b) 开挖后动能曲线
图 7 CC 面折减系数-位移曲线和开挖后动能曲线图

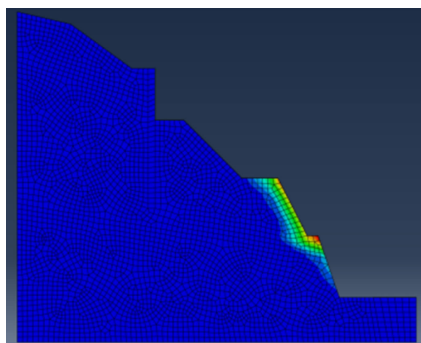
Fig. 7 Reduction factor-displacement curve and post-excitation kinetic energy curve for section CC

坡是否发生失稳破坏,且更加客观明确。

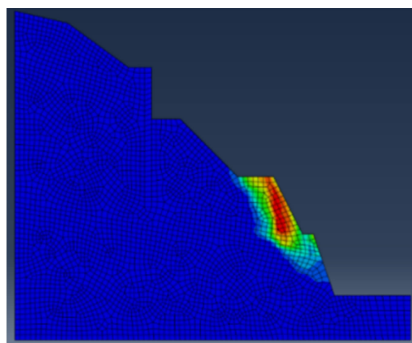
3.3 边坡开挖失稳临界状态分析

3.3.1 AA 截面开挖失稳临界状态

AA 截面开挖完成后的土体位移以及速度分布如图 8 所示。由图中可以看出,AA 截面开挖后位移主要发生在较陡的两个坡角,这是边坡开挖边缘的几何特性导致的。同样的,AA 截面开挖后的土体速度分布与位移分布基本一致,且土体内部也具有较大速度,速度最大值为 1 m/s,这对于岩土工程



(a) 开挖后边坡位移云图



(b) 开挖后边坡土体速度云图

图 8 折减系数为 3.9 时 AA 面开挖后边坡位移云图与开挖后边坡土体速度云图

Fig. 8 The contour of post-excitation slope displacement and contour of post-excitation soil velocity for section AA with SRF = 3.9

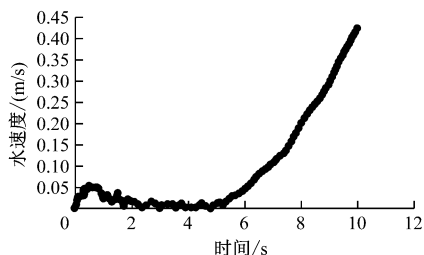
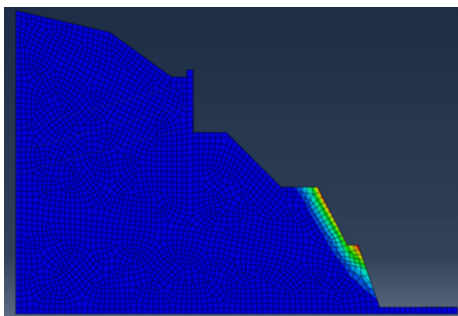


图 9 折减系数为 3.9 时 AA 面开挖后速度趋势曲线图

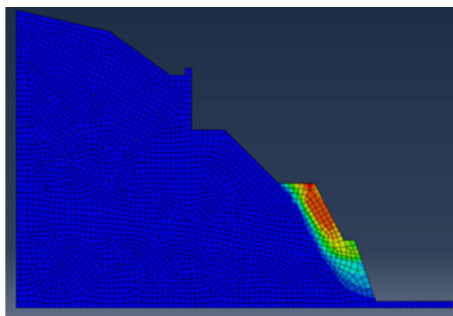
Fig. 9 Post-excitation velocity trend curve for section AA with SRF = 3.9

3.3.2 BB 截面开挖失稳临界状态

BB 截面开挖完成后的土体位移以及速度分布



(a) 开挖后边坡位移云图



(b) 开挖后边坡土体速度云图

图 10 折减系数为 4.1 时 BB 面开挖后边坡位移云图与开挖后边坡土体速度云图

Fig. 10 The contour of post-excitation slope displacement and contour of post-excitation soil velocity for section BB with SRF = 4.1

来说是较为危险的速度。

选取 AA 截面最底部节点输出速度-时间曲线(图 9)。可以观察到曲线前 0.7 s 速度呈上升趋势,而到 5 s 之前则呈现为下降趋势,之后大幅度上升。其原因是前 0.7 s 的速度上升来源于地应力的释放转化为了动能导致速度上升,土体并未破坏,土体结构稳定,所以动能转化为较小的位移之后,速度逐渐下降,而后下方土体破坏,重力势能转化为动能,导致速度急速上升。

如图 10 所示。与 AA 截面开挖后的变形规律相同, BB 截面土体位移主要发生在靠近底面的两个坡角。桩基的摆放对于上层素填土边坡有着较好的稳定性,而对于下方的边坡控制较为薄弱,因此开挖完成后边坡仍会发生局部滑移、裂缝发展等破坏。BB 截面的土体速度分布则与 AA 面基本一致。

选取 BB 截面速度最大节点输出曲线如图 11,呈现出与 AA 面不同规律,速度达到最高 3 m/s 之后开始回落,呈现出在 1 m/s 的稳定趋势。速度的减慢主要是由于下方破坏较慢的坡体给位于第二平台的坡体支撑,使其逐渐减速,致使两处坡体速度趋同。

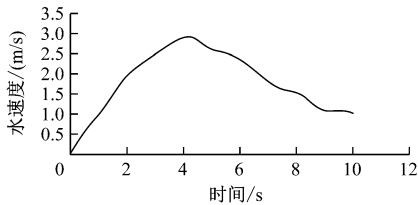
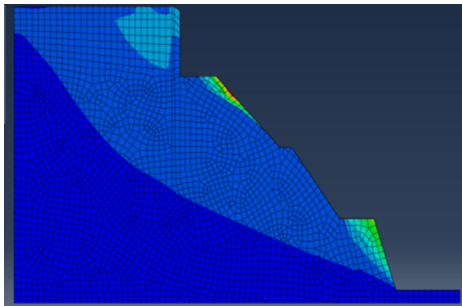


图 11 折减系数为 4.1 时 BB 面开挖后速度趋势曲线图

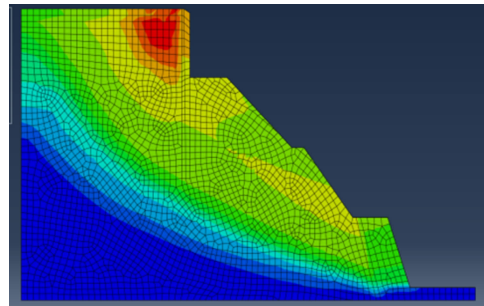
Fig. 11 Post-excitation velocity trend curve for section BB with SRF = 4.1

3.3.3 CC 截面开挖失稳临界状态

CC 截面开挖完成后土体位移以及速度分布如图 12 所示。与 AA、BB 截面不同,CC 截面土体破坏



(a) 开挖后边坡位移云图



(b) 开挖后边坡土体速度云图

图 12 折减系数为 2.2 时 CC 面开挖后边坡位移云图与开挖后边坡土体速度云图

Fig. 12 The contour of post-excitation slope displacement and contour of post-excitation soil velocity for section CC with SRF = 2.2

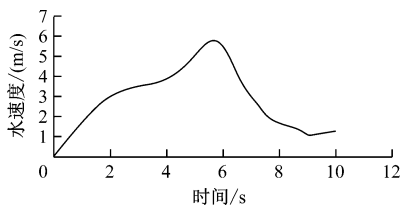


图 13 折减系数为 2.1 时 CC 面开挖后速度趋势曲线图

Fig. 13 Post-excitation velocity trend curve for section CC with SRF = 2.1

4 结论

本研究聚焦于岩质高边坡的开挖,借助有限元方法结合强度折减法对边坡开挖稳定性进行了模拟研究。考虑到贵州白市实际的工程地质结构特征的分层情况以及附近建筑物对边坡的影响,选择了三个具有代表性特点的典型截面进行模拟研究。

在讨论边坡是否发生破坏时,本文提出了一种基于动能演化判断准则的边坡稳定性分析方法,并与基于位移判断准则的静力计算结果进行了对比讨论。可得到以下结论:1) 本文提出的基于动能演化判断准则的边坡稳定性分析方法得到的边坡安全系数与基于位移判断准则的静力计算结果大致相同,

多发生在桩基附近,位移小但需加固。CC 截面因残留三角形弱素填土,易变形破坏。这表明在复杂岩层和软弱土体环境下,分层开挖需防残留软弱材料带来的风险。

由 CC 截面开挖后的土体速度分布结果可知,由于存在舍弃锚杆,桩基提供的侧向支撑不足以稳定上方的素填土,桩基左侧土体产生较大速度,桩基左侧素填土将发生更大变形,导致边坡失稳。CC 截面开挖后土体速度如图 13 所示,其规律与 BB 截面类似,土体速度达到 6 m/s 之后开始回落,最后稳定在 1 m/s 左右。

验证了本文所提出的动能演化分析方法在判断边坡稳定性方面的正确性;2) 通过选取不同截面进行计算,相较于传统基于位移判断准则的静力计算方法,本文提出的基于动能演化判断准则的边坡稳定性分析方法在判断边坡是否发生失稳滑坡时更加客观且明确,更能够准确地计算出边坡的安全系数,对于相关工程及科研具有重要参考价值。

本文提出的动能演化边坡稳定性分析方法有助于深入理解破坏细节,提出更精确的工程改进措施,提升工程效率与安全。研究成果对岩质高边坡工程具有实用价值和指导意义,可为专业人士提供支持与参考。

参 考 文 献

- [1] DONG M L, KULATILAKE P, ZHANG F M. Deformation and stability investigations in 3-D of an excavated rock slope in a hydroelectric power station in China [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 96: 132-149.
- [2] 周永强, 盛谦, 宋顶峰, 等. 降雨作用下裂缝对杆塔基础滑坡影响的物理模型试验[J]. 工程科学与技

- 术,2022,54(4): 88-98.
- ZHOU Y Q, SHENG Q, SONG D F, et al. Physical model test on the influence of crack on tower foundation landslide under rainfall [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(4): 88-98. (in Chinese)
- [3] 马鹏飞, 郭德龙, 许文年, 等. 内部裂隙对节理岩质边坡失稳影响的数值分析[J]. *安全与环境工程*, 2023,30(1): 128-139.
- MA P F, GOU D L, XU W N, et al. Numerical modeling of influences of internal fractures on the instability process of jointed rock slopes [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2023, 30(1): 128-139. (in Chinese)
- [4] 张宜杰, 任光明, 常文娟, 等. 节理岩质边坡稳定性概率分析[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2021,48(2): 235-241.
- ZHANG Y J, REN G M, CHANG W J, et al. Probabilistic analysis of stability of jointed rock slope [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2021, 48(2): 235-241. (in Chinese)
- [5] YUAN W H, LIU K, ZHANG W, et al. Dynamic modeling of large deformation slope failure using smoothed particle finite element method [J]. *Landslides*, 2020, 17(7): 1591-1603.
- [6] 徐镇凯, 温勇兵, 魏博文, 等. 基于组合赋权模糊云理论的高边坡稳定性评价[J]. *水利水运工程学报*, 2017(1): 10-17.
- XU Z K, WEN Y B, WEI B W, et al. Stability evaluation method for high slope based on fuzzy cloud theory combined with weights [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2017(1): 10-17. (in Chinese)
- [7] 刘春龙, 张志强, 袁继国, 等. 岩质边坡稳定坡角影响因素及其确定方法[J]. *水利水运工程学报*, 2016(1): 23-29.
- LIU C L, ZHANG Z Q, YUAN J G, et al. Rock slope stability influence factors of slope angle [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(1): 23-29. (in Chinese)
- [8] 张信贵, 许胜才, 易念平. 基于流固耦合理论的饱和-非饱和土开挖边坡稳定性分析[J]. *水利水运工程学报*, 2016(3): 10-19.
- ZHANG X G, XU S C, YI N Q. Stability analysis of slopes excavated in saturated and unsaturated soils based on coupled consolidation theories [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(3): 10-19. (in Chinese)
- [9] 李宁, 钱七虎. 岩质高边坡稳定性分析与评价中的四个准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(9): 1754-1759.
- LI N, QIAN Q H. Four criteria of stability analysis and assessment of high rock slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(9): 1754-1759. (in Chinese)
- [10] 李宁, 姚显春, 张承客. 岩质边坡动力稳定性分析的几个要点[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(5): 873-881.
- LI N, YAO X C, ZHANG C K. Several points in dynamic stability analysis of rock slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(5): 873-881. (in Chinese)
- [11] TU Y L, LIU X R, ZHONG Z L, et al. New criteria for defining slope failure using the strength reduction method [J]. *Engineering Geology*, 2016, 212(9): 63-71.
- [12] HUANG L, HUANG S, LAI Z. On an energy-based criterion for defining slope failure considering spatially varying soil properties [J]. *Engineering geology*, 2020, 264(1): 1-11.
- [13] NAEIJ M, GHASEMI H, GHAFARIAN D, et al. Explicit finite element analysis of slope stability by strength reduction [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2021, 26(2): 133-146.
- [14] MEDICUS G, SCHNEIDER-MUNTAU B, KOLYMBAS D. Second-order work in barodesy [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(5): 1483-1493.