

# 开挖条件对不同基覆界面滑坡堆积体 稳定性影响

黄 达<sup>1,2</sup>, 杨健康<sup>1</sup>, 李 钊<sup>1</sup>, 李子晔<sup>1,3</sup>, 吕 畅<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;  
3. 信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司, 四川 成都 610021)

**摘 要** 目的 研究开挖条件对不同基覆界面形态滑坡堆积体稳定性影响, 为滑坡堆积体大规模开挖方案提供参考。方法 利用有限元分析软件 ABAQUS 对类直线形和椅形基覆界面滑坡堆积体进行数值模拟, 分析开挖前后的滑坡体变形特征; 随后通过模拟正交试验分析开挖参数对滑坡堆积体稳定性影响规律, 最终得出最优开挖方案。结果 类直线形基覆界面滑坡堆积体最优开挖组合是开挖点至坡脚水平距离 150 m、开挖建筑平台宽度 20 m、开挖角度 110°、相邻开挖平台垂直高度 7.5 m; 椅形基覆界面滑坡堆积体的最优开挖方案是开挖点至坡脚水平距离 250 m、开挖建筑平台宽度 25 m、开挖角度 130°、相邻开挖平台垂直高度 15 m。结论 基覆界面形态对开挖方案的选取及边坡稳定性影响显著, 类直线形基覆界面宜选取在滑坡体中部开挖, 而椅形基覆界面宜选取在滑坡体后缘开挖。

**关键词** 基覆界面形态; 开挖条件; 稳定性; 数值模拟; 强度折减

中图分类号 TU94<sup>+</sup>3.2; P642.22

文献标志码 A

**引用格式:** 黄达, 杨健康, 李钊, 等. 开挖条件对不同基覆界面滑坡堆积体稳定性影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(1): 47-58. (HUANG Da, YANG Jiankang, LI Zhao, et al. Effect of excavation conditions on the stability of landslide deposits with different deposit-bedrock interfaces[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(1): 47-58.)

## Effect of Excavation Conditions on the Stability of Landslide Deposits with Different Deposit-Bedrock Interfaces

HUANG Da<sup>1,2</sup>, YANG Jiankang<sup>1</sup>, LI Zhao<sup>1</sup>, LI Ziyue<sup>1,3</sup>, Lü Chang<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300401;  
2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, China, 710054; 3. The IT Electronics Eleventh Design&Research Institute Scientific and Technological Engineering Corporation Limited, Chengdu, China, 610021)

收稿日期: 2023-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972297); 河北省自然科学基金项目(D2021202002)

作者简介: 黄达(1976—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事岩土工程等方面研究。

**Abstract:** Investigating the effect of excavation conditions on the stability of landslide deposits with different forms of deposit-bedrock interface, and providing references for large-scale excavation of landslide deposits. ABAQUS software was used to carry out numerical simulations of landslide deposits at the quasi-linear and chair-like deposit-bedrock interfaces. First, the deformation characteristics of landslide deposits before and after excavation, as well as the impact of excavation on the safety and stability of landslide deposits were analyzed. Secondly, the influence law of excavation on the stability of landslide deposits was analyzed via an orthogonal test. Finally, the optimal excavation scheme was obtained. The optimal excavation combination of landslide accumulation at the interface of quasi-linear linear foundation and cover is 150 m in excavation position, 20 m in width of excavation building platform,  $110^\circ$  in excavation angle, and 7.5 m in vertical height of adjacent excavation platform. The optimal excavation scheme for the landslide accumulation at the interface of the chair foundation is 250 m. The optimal width of the excavation building platform is 25 m, the excavation angle is  $130^\circ$ , and the vertical height of the adjacent excavation platform is 15 m. The morphology of the deposit-bedrock interfaces significantly affects the excavation plan and the stability of the landslide deposits. It is preferable to excavate in the middle of the landslide deposits at the quasi-linear base-bedrock interface, while it is preferable to excavate in the back edge of the landslide deposits at the chair-shaped base-bedrock interface.

**Key words:** morphology of the deposit-bedding interface; excavation conditions; stability; numerical simulation; strength reduction method

随着近年来我国经济的飞速发展及城市化进程的加快,国家对基础设施的需求也随之急剧增长。然而,我国西南地区地形多以山地丘陵为主,地质条件复杂多变,良好的建筑场地较为稀少,因此导致许多建筑场地不得不选址于滑坡堆积体之上或位于滑坡堆积体附近。因工程建造需在滑坡堆积体上进行开挖,这必然会对滑坡堆积体造成严重扰动,改变堆积体原有应力状态。若开挖高度较高,开挖范围较大,极易诱发滑坡地质灾害,如杜米滑坡、新区古滑坡、杨崖滑坡等<sup>[1-3]</sup>。因此,对于开挖条件下滑坡堆积体稳定性的研究至关重要。

目前众多学者已对边坡的开挖、稳定性及开挖方案优化进行了研究。通过现场研究和数值模拟研究发现,人工开挖是造成坡体变形及失稳的重要因素。陈鸿等<sup>[4]</sup>通过现场研究发现,施工开挖是古滑坡前缘局部复活的原因,并分析了开挖前后的稳定性。H. Wang等<sup>[5]</sup>通过模拟分析开挖边坡稳定性阶段变化,并提出工程开挖是坡体失稳的诱因。卢永兴等<sup>[6-7]</sup>同样认为人工开挖是坡体变形失稳破坏的诱因。此外边坡开挖的变形及稳定性也十分重要。李海潮等<sup>[8]</sup>通过实

际工程分析了开挖后边坡的变形特征,确定了边坡的稳定状态。冉涛等<sup>[9]</sup>通过数值模拟再现了开挖前后滑坡体变形特征和稳定性变化过程。J. H. Huang等<sup>[10]</sup>以高陡边坡为例,研究了开挖对边坡变形及稳定性的影响规律。为避免开挖引起滑坡,开挖参数优化得到了重视。C. Xiao<sup>[11]</sup>针对散体结构岩质高边坡,采用数值模拟方法分析了开挖参数对边坡稳定性的影响,并优化了开挖参数。钟晓勇等<sup>[12]</sup>以软岩边坡开挖为例,分析了边坡开挖变形失稳模式并提出合理优化参数。N. Ju等<sup>[13]</sup>分析了高边坡变形稳定性,提出了边坡优化设计。穆景超等<sup>[14]</sup>基于滑坡岩体性质,设计了3种开挖优化方案,并根据评价指标获得最优挖方案。刘楠<sup>[15]</sup>依托实际工程并结合数值模拟方法,得出了最优放坡方案。于丹等<sup>[16]</sup>采用数值模拟方法,分析了基坑开挖状态的稳定性,提出了有效的治理措施。

现有研究主要针对某些特定边坡在开挖条件下的稳定性,而对于基覆界面形态对其稳定性的影响却鲜有研究。基于此,笔者通过数值模拟探究开挖点至滑体坡脚水平距离、开挖

建筑平台宽度、开挖角度和相邻开挖平台垂直高度对不同基覆界面形态下(直线形和椅形基覆界面)滑坡堆积体稳定性的影响规律,根据所得规律提出最优开挖方案,研究结果为直线形及椅形基覆界面滑坡堆积体的开挖工程提供了指导。

1 数值模拟方案

1.1 滑坡堆积体基覆界面的主要形态

基覆界面几何形态对滑坡堆积体的稳定性起着至关重要的作用。罗世林<sup>[17]</sup>基于大量滑坡数据及结合已有研究提出滑坡堆积体基覆界面具有四种形态:靠椅形、弧形、直线形和阶梯形。随后根据界面形态特征,将基覆界面主要概化成类直线形和上陡-下缓形,即类直线形和椅形基覆界面(见图1)。通过对三峡库区263个滑坡堆积体基覆界面形态进行统计分析,发现类直线形约占30.42%,椅形约占69.58%。由图1(a)可知,类直线形基覆界面滑坡堆积体主要特征为基覆界面倾斜角度与坡体基本一致,上覆堆积体上部浅下部厚。由图1(b)可知,椅形基覆界面滑坡堆积体主要特征为后缘基覆界面较前缘基覆界面的倾角大,上覆堆积体总体较厚。

1.2 数值模型的建立

边坡稳定性分析常用两大类方法:极限平衡法和有限元法。对于复杂边坡分析常用有限元法中的强度折减法<sup>[18-22]</sup>进行计算,该方法能够对复杂地貌进行计算、考虑土体间的非线性本构关系、能够直观地分析滑坡堆积体破坏过程及滑动面形状。该方法是在理想弹塑性有限元计算过程中将滑坡岩土体抗剪强度参数折减直到达到破坏状态或计算不收敛为止。

笔者通过有限元分析软件 ABAQUS,基于强度折减法建立滑坡堆积体的数值模型进行稳定性分析。依据图1中两类滑坡堆积体基覆界面形态概化示意图建立二维数值模型(见图2)。两类基覆界面滑坡堆积体模型外轮廓尺寸相同,长为500 m,高为200 m,其中类直线基覆界面滑坡堆积体倾角为20°(见图2(a));椅形基覆界面滑坡堆积体的陡缓倾角选为10~40°(见图2(b))。为更加符合工程实际,模型的位移边界条件:侧边界约束水平位移,底边界约束水平和竖向位移,模型上表面为自由表面,使其只受重力作用。计算步骤为首先进行初始地应力平衡,随后对滑坡堆积体进行开挖(若研究未开挖滑坡堆积体,则不进行开挖模拟),最后开挖完成后利用强度折减法计算滑坡堆积体稳定系数。

数值模型均以四边形网格单元为主、三角形网格单元为辅的网格划分技术进行网格划分,并对滑坡堆积体的网格进行加密处理以保证计算精度,其中最小网格边长为3 m,最大网格边长为30 m。直线形基覆界面滑坡堆积体模型共2 924个网格单元,2 986个节点(见图2(a));椅形基覆界面滑坡堆积体模型共2 977个网格单元,30 35个节点(见图2(b))。数值计算所用模型材料均为均质理想弹塑性岩土体材料,并依据 Mohr-Coulomb 弹塑性模型进行计算。根据大量的滑坡堆积体岩土力学参数以及研究内容进行综合取值,模型物理力学参数见表1。

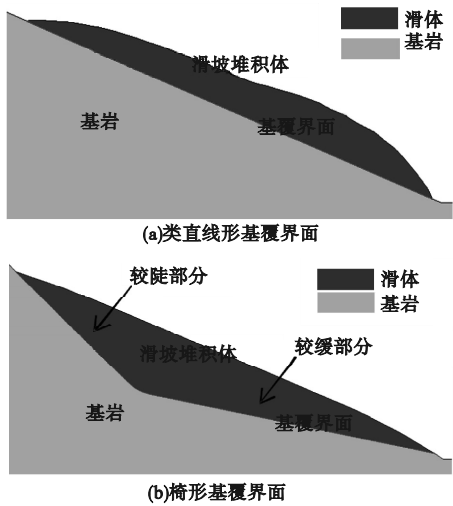


图1 两类滑坡堆积体基覆界面形态概化示意图

Fig.1 Schematic diagram of the shape of the interface between the foundation and the overburden of two types of landslide deposits

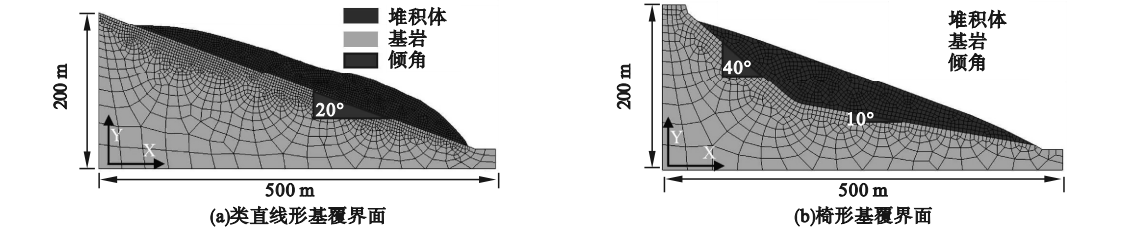


图2 两类基覆界面滑坡堆积体数值计算模型

Fig. 2 Numerical models of landslide deposit at two interface types

表1 岩土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

工况	岩土体名称	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	内聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
天然状态	滑坡堆积体	2 300	80	52	28
	基岩	2 690	28 000	3 000	40

1.3 模型开挖方案

假设滑坡堆积体需大规模开挖为建筑物提供建筑场地,并且将开挖过程简化为三步进行研究,开挖顺序均为自上而下。对于建筑物场地的开挖主要影响条件为开挖点至滑坡坡脚水平距离  $S$ 、开挖建筑平台宽度  $L$ 、开挖角度  $\theta$  和相邻开挖平台垂直高度  $H$ 。为研究开挖参数对不同基覆界面滑坡堆积体稳定性的影响,将每个开挖控制因素均设置 5 组研究方案,每组方案均进行单一变量分析,其余数值模型参数均保持一致,随后进行滑坡

体稳定性分析,通过正交试验确定出最为合适的开挖条件。二维数值模拟开挖方案中各开挖条件的参数取值见表 2。两种不同基覆界面形态的滑坡堆积体开挖的数值几何模型如图 3 所示。

根据所研究的内容,取坡体位移变形和塑性应变等对开挖前后的滑坡堆积体进行稳定性分析,以开挖后的安全系数为评价指标来分析不同开挖参数下滑坡堆积体的稳定性。

表2 两类基覆界面形态滑坡堆积体开挖参数

Table 2 Excavation scheme of landslide accumulation with two types of foundation and overburden interface

类直线形				椅形			
$S/\text{m}$	$L/\text{m}$	$\theta/(^{\circ})$	$H/\text{m}$	$S/\text{m}$	$L/\text{m}$	$\theta/(^{\circ})$	$H/\text{m}$
50	25	110	15	50	25	110	15
100	25	110	15	100	25	110	15
150	25	110	15	150	25	110	15
200	25	110	15	200	25	110	15
250	25	110	15	250	25	110	15
200	20	110	15	250	20	110	15
200	25	110	15	250	25	110	15
200	30	110	15	250	30	110	15
200	35	110	15	250	35	110	15
200	40	110	15	250	40	110	15

续表 2

类直线形				椅形			
S/m	L/m	$\theta/(^{\circ})$	H/m	S/m	L/m	$\theta/(^{\circ})$	H/m
200	30	90	15	250	25	90	15
200	30	100	15	250	25	100	15
200	30	110	15	250	25	110	15
200	30	120	15	250	25	120	15
200	30	130	15	250	25	130	15
200	30	110	7.5	250	25	110	7.5
200	30	110	10	250	25	110	10
200	30	110	12.5	250	25	110	12.5
200	30	110	15	250	25	110	15
200	30	110	17.5	250	25	110	17.5

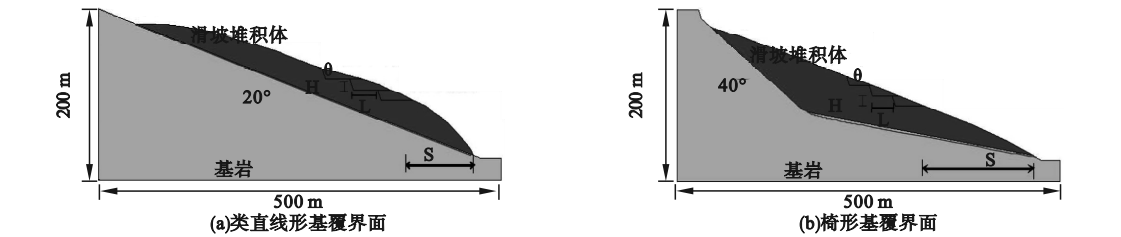


图 3 两类基覆界面滑坡堆积体开挖模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of excavation model of landslide deposit at two interface types

2 数值模拟计算结果

2.1 基覆界面形态对滑坡堆积体稳定性的影响

类直线基覆界面滑坡堆积体在天然状态下将土体强度参数折减到极限状态的位移云图和等效塑性应变云图如图 4 所示。从图中可以看出,坡体达到极限状态时,其位移云图显示变形主要发生在坡体前缘,坡体临空面位移变形导致其前缘堆积体在牵引力下发生滑动破坏,坡脚处最大位移值为 0.29 m(见图 4(a))。等效塑性应变沿基覆界面向上形成连续塑性区域贯通到堆积体中部(见图 4(b))。前缘堆积体滑移使得坡体应力发生变化,中部堆积体受牵引力发生塑性应变。此时滑坡堆积体安全系数为 1.346。椅形基

覆界面滑坡堆积体破坏时,在重力作用下,堆积体位移变形主要在坡顶处,位移变形沿着坡体方向逐渐减小,最大位移为 2.538 m(见图 4(c))。等效塑性应变区在基覆界面表面且贯通整个坡体,最大值位于较陡的基覆界面处,坡体极易发生推移式滑动破坏(见图 4(d))。椅形基覆界面滑坡堆积体在上部发生大变形位移时,下部堆积体能够起到良好缓冲作用,安全稳定系数为 2.256。

基覆界面形态对滑坡稳定性存在明显的影响。类直线形基覆界面滑坡堆积体易发生牵引式滑动破坏,而椅形基覆界面滑坡堆积体易发生推移式滑动破坏。以上是两种最为典型的破坏模式,从安全稳定系数上,椅形基覆形态滑坡堆积体稳定性更好。



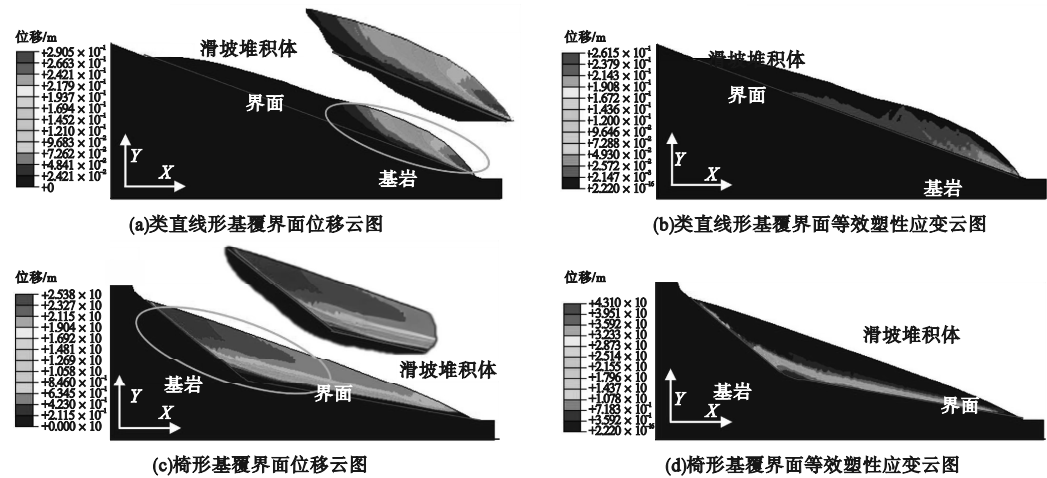


图4 类直线和椅形基覆界面滑坡模拟结果

Fig. 4 Landslide simulation results of the straight line interface and chair-like interface

2.2 开挖条件下两类基覆界面滑坡堆积体变形特征

开挖点至滑体坡脚水平距离的选择是根据两类基覆界面天然状态下的位移云图设置,即开挖滑坡堆积体位移变形较大位置,以便于进行开挖前后滑坡堆积体变形特征的对比分析,并证明开挖对其存在影响。

类直线形基覆界面滑坡堆积体天然状态下和开挖后位移图及位移矢量图如图5所示。天然状态下类直线形基覆界面滑坡堆积体的位移集中在坡脚,其他位置基本未发生变形。位移变形沿着基覆界面向上呈梯度变

化,且位移值逐渐减小(见图5(a))。坡脚处堆积体位移矢量指向向下及临空面,说明天然状态下堆积体存在向坡脚位置滑动的趋势(见图5(b))。滑坡堆积体开挖后坡体位移变形发生在开挖面附近,最大位移值为0.1203 m(见图5(c))。由位移矢量方向可知,堆积体开挖卸荷会引起开挖处土体回弹,矢量方向与开挖角度基本一致(见图5(d))。由位移矢量图可知,滑坡堆积体是否开挖,其中部堆积体内都出现了位移变形,说明坡体前缘滑坡堆积体变形产生了牵引力。数值模拟结果显示,天然状态下坡脚位移由

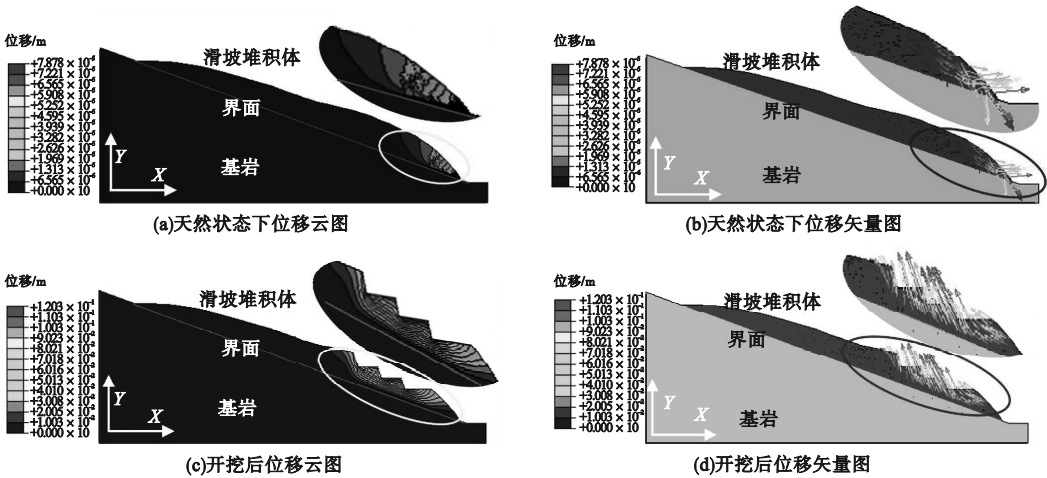


图5 类直线形基覆界面滑坡堆积体天然状态下和开挖后位移图及位移矢量图

Fig. 5 Displacement diagram and displacement vector diagram of landslide deposit at linear foundation cover interface in natural state and after excavation

0.000 027 m 增长到 0.010 5 m,可见坡脚处土体因开挖产生了扰动变形。

椅形基覆界面滑坡堆积体天然状态下和开挖后位移图及位移矢量图如图 6 所示。天然状态下椅形基覆界面滑坡堆积体的位移变形主要集中在坡顶,坡体其他位置基本未见变形,其具有明显的重力变形特征。由位移等值线可知,位移出现较为明显的梯度变化,且呈弧形向下发散且数值逐渐减小(见图 6(a))。坡顶堆积体位移矢量指向与上部基岩方向基本相同,这与实际情况相符。虽然坡脚处具有临空面,但由于滑坡体基覆

界面形态及自身结构使得后缘堆积体沿基覆界面向下产生了变形。然后在后缘坡体推挤下使得前缘坡体慢慢变形滑动,整个滑坡堆积体都存在变形,只不过在重力作用下的变形是较为缓慢且长期存在的(见图 6(b))。开挖后坡体变形主要出现在开挖面处,位移等值线呈舌形向下延伸发展,最大值达到 0.143 m(见图 6(c))。开挖后滑坡堆积体大量的开挖卸荷引起了土体斜向上回弹(见图 6(b))。由数值模拟结果可知,在开挖前后坡顶处最大位移值由 0.000 035 m 增大至 0.024 1 m。

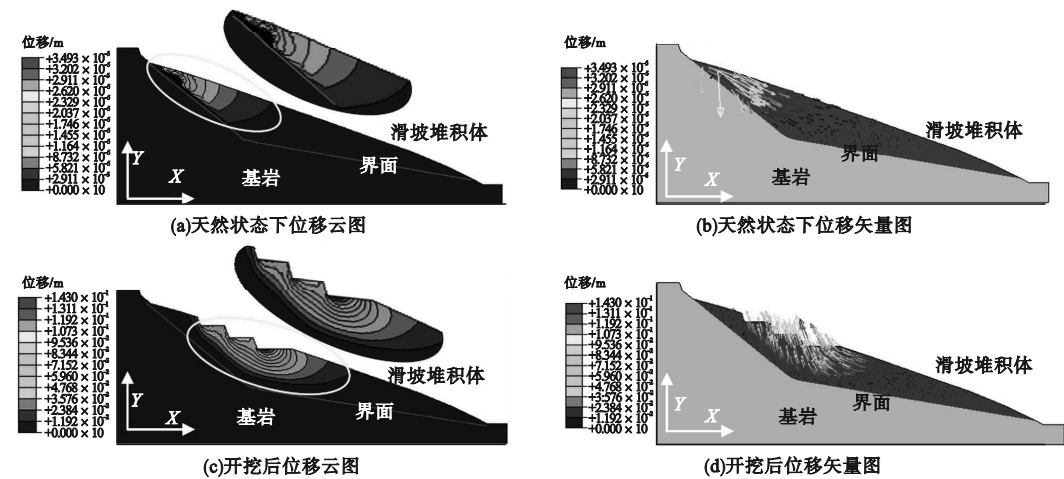


图 6 椅形基覆界面滑坡堆积体天然状态下和开挖后位移图及位移矢量图

Fig. 6 Displacement diagram and displacement vector diagram of landslide deposit at chair-shaped foundation cover interface in natural state and after excavation

2.3 不同开挖参数对两种基覆界面滑坡堆积体稳定性的影响

依据表 2 所示开挖方案,研究开挖点至滑体坡脚水平距离、开挖平台高度、开挖角度及相邻开挖平台垂直高度对两种基覆界面滑坡堆积体的影响规律。数值模型均以图 2 所示有限元模型为基准,进行不同开挖参数的数值模拟研究,模型材料参数均采用表 1 所示材料参数。

2.3.1 开挖点至滑体坡脚水平距离

为研究不同开挖点至滑体坡脚水平距离对滑坡堆积体稳定性所产生的影响,类直线形和椅形两种基覆界面滑坡堆积体开挖点至

滑体坡脚水平距离均取 50 m、100 m、150 m、200 m、250 m。

开挖点至滑体坡脚水平距离对基覆界面滑坡堆积体稳定性影响如图 7 所示。类直线基覆界面滑坡堆积体安全系数随着  $S$  的增加,先快速增加而后缓慢下降,其拐点出现在  $S = 150$  m 处(见图 7(a))。由曲线可知开挖点至滑体坡脚水平距离越靠近坡脚时,坡体稳定性越差。开挖点至滑体坡脚水平距离位于坡体中部处,坡体稳定性变化较小。这是由于坡体前缘处开挖会使前缘堆积体抗滑能力减小,使其安全系数降低;当开挖点至滑体坡脚水平距离在中部附近时,坡体前缘堆积

体能够起到一定的抗滑效果,使其安全系数有所提高。椅形基覆界面滑坡堆积体安全系数随着 $S$ 的增加而增大,当 $S > 150\text{ m}$ 时,安全系数出现陡增然后趋于稳定(见图7(b))。说明开挖点至滑体坡脚水平距离越靠近坡顶,坡体稳定性越好。这是因为坡体基覆界面下部较缓,且随着开挖点至

滑体坡脚水平距离增大堆积体厚度也随之增大,致使开挖点至滑体坡脚水平距离前的堆积体可以充分发挥抗滑作用。当开挖面处于较陡基覆界面上的堆积体时,坡体较缓处滑坡堆积体抗滑能力达到最大,于是导致安全系数快速上升然后趋于稳定。

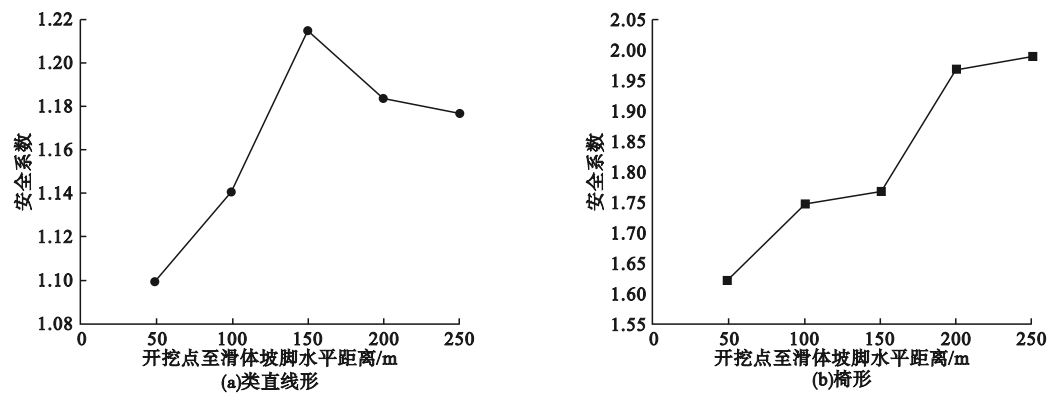


图7 开挖点至滑体坡脚水平距离对基覆界面滑坡堆积体稳定性影响

Fig.7 The effect of horizontal distance from the excavation point to the slope toe on the stability of landslide deposit

对于类直线形和椅形基覆界面形态滑坡堆积体,坡体前缘的开挖都会造成安全系数的急剧降低,而开挖点至滑体坡脚水平距离越在后缘处越安全,因此建议尽量选在滑坡堆积体后缘处进行开挖。

2.3.2 开挖建筑平台宽度

为了给建筑施工提供足够的平整场地,开

挖建筑平台宽度也是重要影响因素。笔者设置类直线形和椅形两种基覆形态滑坡堆积开挖建筑平台宽度为20 m、25 m、30 m、35 m、40 m。

开挖建筑平台宽度对基覆界面滑坡堆积体稳定性影响如图8所示。从图中可以看出,类直线基覆界面滑坡堆积体安全系数随着 $L$ 的增加而减小(见图8(a))。说明开挖

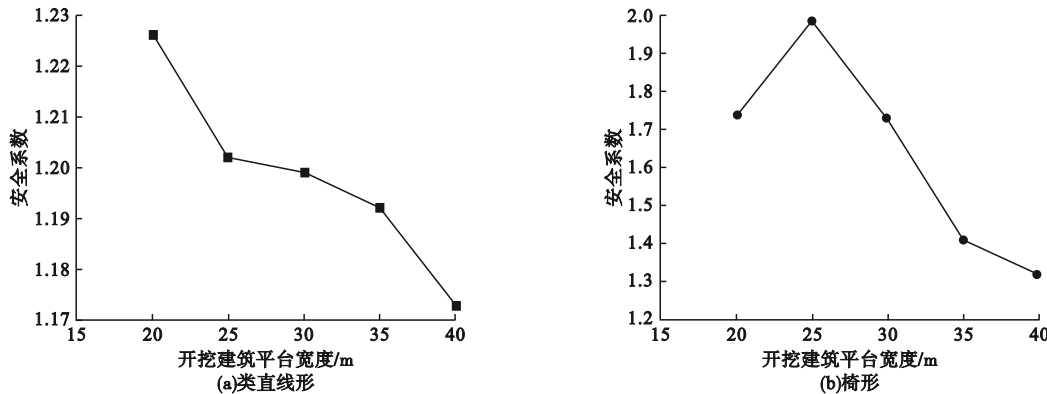


图8 开挖建筑平台宽度对基覆界面滑坡堆积体稳定性影响

Fig.8 Impact of the width of the excavation building platform on the stability of the landslide deposit



建筑平台宽度的增加会大面积地改变滑坡体原始的地形地貌,对其产生扰动。试验中安全系数最大值为 1.236,当  $L$  为 25 ~ 35 m 时,安全系数变化幅度较小,其值在 1.2 浮动。椅形基覆界面滑坡堆积体安全系数随着  $L$  的增加先增加而后减小(见图 8(b)),其变化数值幅度范围在 0.09 ~ 0.32。当  $L=25$  m 时,坡体安全系数最大,坡体稳定性最好。当开挖平台宽度较小时,坡体后缘堆积体自重产生较大的推移力,易发生推移式滑动破坏;当开挖平台较大时,坡体后缘土体卸荷引起开挖点至滑体坡脚水平距离附近产生较大变形,在坡顶堆积体推移作用下,坡体稳定性降低。

研究表明,类直线和椅形基覆界面安全系数都随着开挖平台宽度有所降低,但在开挖方案选取时截然不同,类直线形在实际施工中可以适当地增加建筑平台宽度,不会对坡体稳定性造成较大的影响;椅形在实际施工中,建筑平台宽度既不能单纯地选取较小值,也不能追求施工效率选取较大值,应根据实际情况进行合理选取。

2.3.3 开挖角度

为研究不同开挖角度对类直线形和椅形

基覆滑坡堆积体稳定性的影响,设置开挖角度为  $90^{\circ}$ 、 $100^{\circ}$ 、 $110^{\circ}$ 、 $120^{\circ}$ 、 $130^{\circ}$  进行数值模拟。

开挖角度对基覆界面滑坡堆积体安全系数影响如图 9 所示。从图中可以看出,类直线基覆界面滑坡堆积体安全系数随着开挖角度增加变化较为稳定。除了开挖角度为  $100^{\circ}$  时,滑坡堆积体安全系数的值比较特殊外,其他开挖角度下安全系数的差值非常小(见图 9(a)),最大差值仅为 0.015。安全系数变化微小的原因是坡体中部的堆积体厚度较薄且基覆界面呈直线,开挖角度的变化仅引起开挖处表面附近发生变形,对坡体下部抗滑段影响不大。特殊开挖角度的出现与堆积体基覆界面形态和上覆堆积体原始特征有着密切的关系。椅形基覆界面滑坡堆积体安全系数随着开挖角度的增大而增大。安全系数最小值为 1.432,最大值为 2.198(见图 9(b))。由图可知  $110^{\circ}$  是特殊开挖角度,当开挖角度小于  $110^{\circ}$  时,安全系数增幅相对较大,平均增幅约为 18%;大于  $110^{\circ}$  时,安全系数增幅相对较小,平均增幅约为 5%。

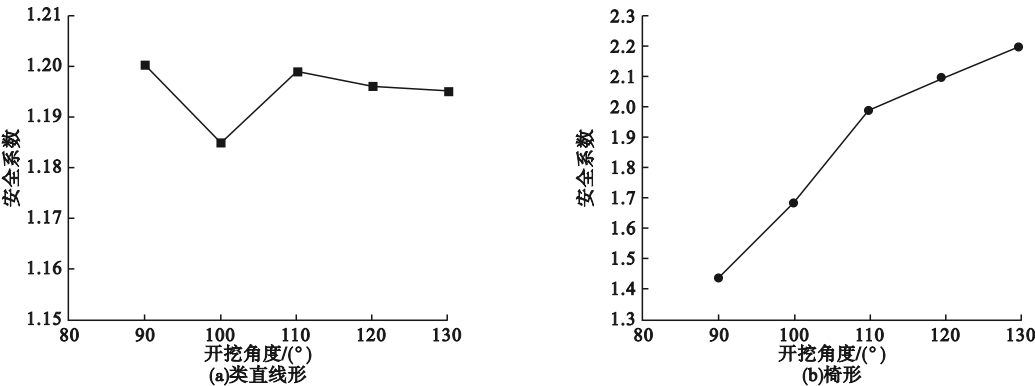


图 9 开挖角度对基覆界面滑坡堆积体稳定性影响

Fig. 9 Effect of excavation angle on stability of landslide deposit

研究表明,类直线形和椅形基覆界面堆积体存在特殊角度。类直线形基覆界面滑坡堆积体应避免此角度;在满足施工的情况下,椅形基覆界面滑坡堆积体尽可能地选取大于  $110^{\circ}$  的开挖角度。

2.3.4 相邻开挖平台垂直高度

为研究不同相邻开挖平台垂直高度对滑坡堆积体稳定性影响,设置类直线形和椅形两种基覆形态滑坡堆积体相邻开挖平台垂直高度为 7.5 m、10 m、12.5 m、15 m、17.5 m

进行数值模拟。

相邻开挖平台垂直高度对基覆界面滑坡堆积体稳定性影响如图 10 所示。从图中可以看出,类直线形基覆界面滑坡堆积体安全系数随着相邻开挖平台垂直高度的增加几乎呈直线下降(见图 10(a)),其拟合函数为 $y = 1.44x - 0.069$ ,拟合系数为  $R^2 = 0.992$ 。当  $H = 7.5$  m 时,坡体安全系数最大为 1.251。

椅形基覆界面滑坡堆积体安全系数随着相邻开挖平台垂直高度的增加持续上升而后突然下降,最大值为 1.922,出现在垂直高度为 15 m 处(见图 10(b))。说明坡体中部以上适当的开挖深度有利于坡体的稳定性,当开挖深度过大时,原始土体受到扰动过大,使坡体稳定性急剧下降。

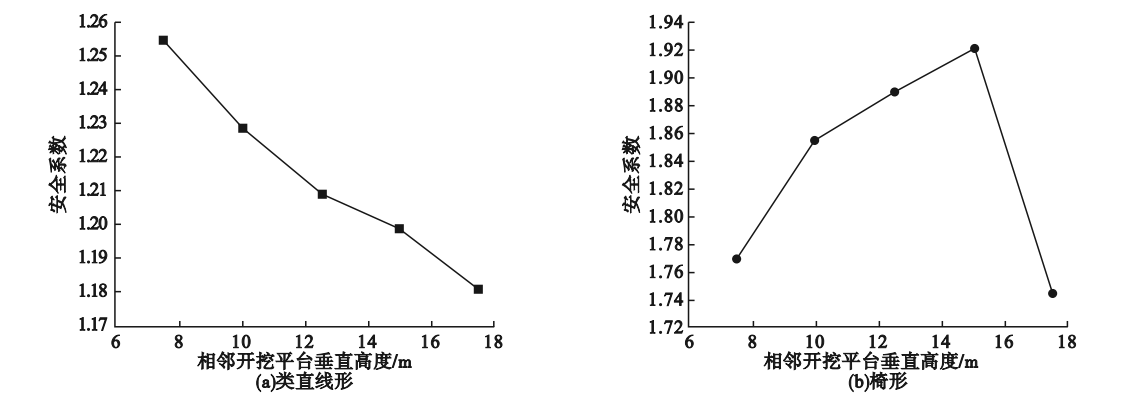


图 10 相邻开挖平台垂直高度对基覆界面滑坡堆积体稳定性影响

Fig. 10 Effect of vertical height of adjacent excavation platform on stability of landslide deposit

因此,安全系数随相邻开挖平台垂直高度的变化是由基覆界面形态决定的。类直线形基覆界面滑坡堆积体应选取较小的平台垂直高度,椅形基覆界面滑坡堆积体可适量增大开挖高度。

2.4 不同基覆界面滑坡堆积体开挖条件优化

以上述数值模拟的数据为基础,对开挖

点至滑体坡脚水平距离、开挖建筑平台高度、开挖角度和相邻开挖平台垂直高度开挖参数进行组合,得出滑坡堆积体最优开挖方案。根据滑坡稳定性分析<sup>[23]</sup>,以开挖条件下堆积体安全系数为评价指标,按照最优、中等、最差进行分类组合。类直线形和椅形基覆界面滑坡堆积体的各开挖参数及稳定性系数见表 3。

表 3 不同开挖参数及对应稳定性系数

Table 3 Parameters of each excavation condition and corresponding stability coefficient						
基覆界面形态	组合结果	S/m	L/m	$\theta/(^{\circ})$	H/m	K
类直线形	最优	150	20	110	7.5	1.264
	一般	250	30	120	12.5	1.181
	最差	50	40	100	17.5	1.076
	最优	250	25	130	15.0	2.198
椅形	一般	150	30	110	10.0	1.637
	最差	50	40	90	17.5	0.996

从表 3 可以看到,类直线形基覆界面滑坡堆积体开挖条件在最优组合下,滑坡稳定性系数  $K = 1.264 > 1.2$ ,处于稳定状态;在一般组合下,滑坡稳定性系数  $K = 1.181 > 1.0$ ,

处于欠稳定状态;在最差组合下,滑坡稳定性系数  $K = 1.076 > 1.0$ ,处于欠稳定状态,但比一般组合下的稳定性系数小很多。椅形基覆界面滑坡堆积体开挖条件在最优组合下,滑

坡稳定性系数  $K = 2.198 > 1.2$ , 处于稳定状态; 在一般组合下, 滑坡稳定性系数  $K = 1.637 > 1.2$ , 处于稳定状态; 在最差组合下, 滑坡稳定性系数  $K = 0.996 < 1.0$ , 处于不稳定状态。

可见, 不同组合开挖参数对类直线形基覆界面滑坡堆积体的稳定状态有着很大影响, 在最优组合下开挖滑坡体稳定性好, 而在最差组合下开挖滑坡体将处于不稳定状态。

### 3 结 论

(1) 基于统计分析, 滑坡堆积体基覆界面形态主要为类直线形和椅形。基覆界面形态对滑坡堆积体的稳定性及破坏模式起着决定性作用, 类直线形基覆界面滑坡堆积体易发生牵引式滑动破坏, 椅形基覆界面滑坡堆积体易发生推移式滑动破坏。坡体开挖后堆积体变形主要集中于开挖位置处。

(2) 类直线形和椅形基覆界面滑坡堆积体开挖位置越靠近滑坡堆积中后部稳定性越高。随着开挖建筑平台宽度和高度增加, 类直线形基覆界面滑坡堆积体安全系数总体呈现降低趋势, 椅形基覆界面滑坡堆积体安全系数, 呈现先增大后减小趋势。两类基覆界面滑坡堆积体均存在特殊开挖角度, 椅形基覆界面的滑坡堆积体, 可选取大开挖角度。

(3) 由数值计算结果可知, 类直线形基覆界面滑坡堆积体的最优开挖方案是开挖点至滑体坡脚水平距离取 150 m、开挖建筑平台宽度 20 m、开挖角度  $110^\circ$ 、相邻开挖平台垂直高度 7.5 m, 其安全稳定系数为 1.264; 椅形基覆界面滑坡堆积体的最优开挖方案是开挖点至滑体坡脚水平距离取 250 m、开挖建筑平台宽度 25 m、开挖角度  $130^\circ$ 、相邻开挖平台垂直高度 15 m, 其安全系数为 2.198。

### 参考文献

[1] 周洪福, 方甜, 夏晨皓, 等. 工程扰动诱发川西杜米滑坡复活变形特征及机理分析[J]. 现代地质, 2022(84): 1-11.

(ZHOU Hongfu, FANG Tian, XIA Chenhao, et al. Reactivation characteristics and mechanism of engineering disturbed Dumi landslide in western Sichuan province, China [J]. Geoscience, 2022(84): 1-11.)

[2] 舒述安, 王灿. 丹巴县章谷镇五里牌新区古滑坡复活机制分析及稳定性评价[J]. 科学技术创新, 2018(31): 97-100.

(SHU Shu'an, WANG Can. Revival mechanism analysis and stability evaluation of ancient landslide in Wulipai New Area, Zhanggu town, Danba county [J]. Scientific and technological innovation, 2018(31): 97-100.)

[3] 王佳运, 魏兴丽, 薛强. 陕西延安杨崖滑坡的形成机理及其致灾分析[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 5.

(WANG Jiayun, WEI Lixing, XUE Qiang. Formation mechanism and hazard causes of the Yangya landslide in Yan'an city, Shaanxi, China [J]. Geological bulletin of China, 2008, 27(8): 1230-1234.)

[4] 陈鸿, 吴娟. 古滑坡开挖稳定性分析及治理研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2022, 36(4): 65-70.

(CHEN Hong, WU Juan. Stability analysis and treatment of ancient landslide excavation [J]. Journal of Shandong university of technology (natural science edition), 2022, 36(4): 65-70.)

[5] WANG H, WANG X, PAN J. A case study of super-high cut slope I: simulation and analysis of instability mechanism of slopes [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2017, 36(4): 899-909.

[6] 卢永兴, 陈剑, 霍志涛, 等. 降雨与开挖作用下黄土滑坡失稳过程分析: 以关中地区长武县杨厂村老庙滑坡为例[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 95-104.

(LU Yongxing, CHEN Jian, HUO Zhitao, et al. Analysis of loess landslide instability process under rainfall and excavation: taking Laomiao landslide in Yangchang village, Changwu county, guanzhong district as an example [J]. Bulletin of geological science and technology, 2022, 41(6): 95-104.)

[7] LI Yurui, CHENG X, LAI T, et al. Geological analysis and model test study on the deformation mechanism of loess landslide in the North connection line of Yan'an [J]. The Chinese journal of geological hazard and control, 2019, 30(2): 35-42.

[8] 李海潮, 杨俊. 含软弱夹层顺层边坡开挖变形特征及稳定性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(2): 50-54.

(LI Haichao, YANG jun. Deformation characteristics and stability evaluation of bedding slope with weak interlayer [J]. Journal of geological hazards and environment preservation, 2021, 32(2): 50-54.)

[9] 冉涛, 陈浩, 王羽珂, 等. 工程开挖活动诱发堆积层滑坡变形机理及加固效果分析[J]. 地质与勘探, 2022, 58(6): 1236-1251.

- (RAN Tao, CHEN Hao, WANG Yuke, et al. Analysis on deformation mechanism and reinforcement effect of an accumulation landslide induced by engineering excavation activity [J]. Geology and exploration, 2022, 58 (6): 1236 – 1251. )
- [10] HUANG Junhui, LIU Xinrong. Numerical simulation and stability study on excavation process of multi-stage high steep slope [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2022, 39(4): 44 – 53.
- [11] XIAO C. Mechanism of slope failure and numerical simulation analysis under slope excavation and rainfall infiltration [J]. Journal of engineering geology, 2012, 20(1): 37 – 43.
- [12] 钟晓勇, 刘博文, 陈俊彬, 等. 露天矿顺层软岩边坡开挖变形特征与参数优化研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(3): 151 – 155.  
(ZHONG Xiaoyong, LIU Bowen, CHEN Junbin, et al. Deformation features of slope excavation and parameter optimization of soft-rock bedding slope in open-pit mine [J]. Coal engineering, 2021, 53(3): 151 – 155. )
- [13] JU N, ZHAO J, DENG H, et al. Stability evaluation of high slope for highways and optimized support design [J]. Chinese journal of rock mechanics & engineering, 2009, 28(6): 1152 – 1161.
- [14] 穆景超, 宋琨, 黄海峰, 等. 某工业园区岩质古滑坡复活影响因素及开挖优化方案[J]. 水电能源科学, 2020, 38(5): 125 – 128.  
(MU Jingchao, SONG Kun, HUANG Haifeng, et al. Influence factors and excavation optimization scheme of rock ancient landslide reactivation in an industrial park [J]. Water resources and power, 2020, 38(5): 125 – 128. )
- [15] 刘楠. 城市高边坡开挖稳定性分析及防护方案设计[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(10): 58 – 60.  
(LIU Nan. Stability analysis and protection scheme design of urban high slope excavation [J]. Communications science and technology Heilongjiang, 2022, 45(10): 58 – 60. )
- [16] 于丹, 郭举兴, 庄岩, 等. 某停车场深基坑支护方式的FLAC<sup>3D</sup>模拟分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(1): 38 – 44.  
(YU Dan, GUO Juxing, ZHUANG Yan, et al. Simulation and analysis on the support method for deep foundation pit of a parking lot by FLAC<sup>3D</sup> [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2015, 31(1): 38 – 44. )
- [17] 罗世林. 三峡库区堆积体滑坡稳定性的基覆界面控制机制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.  
(LUO Shilin. Study on controlling mechanism of deposit-bedding interface on colluvial landslides stability in three gorges reservoir, China [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. )
- [18] 张政杰, 王宏权, 李幼辉. 基于强度折减有限元法分析边坡稳定性[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(1): 135 – 137.  
(ZHANG Zhengjie, WANG Hongquan, LI Youhui. Slope stability analysis based on strength reduction finite element Method [J]. Low temperature building technology, 2015, 37(1): 135 – 137. )
- [19] 王晓东, 吴连海. 强度折减有限元法在降雨条件下土质边坡稳定性分析中的应用[J]. 铁道勘察, 2012, 38(6): 47 – 50.  
(WANG Xiaodong, WU Lianhai. Application of strength reduction finite element method in soil slope stability analysis under rainfall conditions [J]. Railway survey, 2012, 38(6): 47 – 50. )
- [20] 常朝凯, 高鹏. 基于有限元强度折减法的边坡开挖后稳定性分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2023, 59(6): 51 – 55.  
(CHANG Chaokai, GAO Peng. Stability analysis of slope excavation based on finite element strength reduction method [J]. Gansu water resources and hydropower technology, 2023, 59(6): 51 – 55. )
- [21] 李向群, 张啸天. 基于有限元强度折减法加固边坡稳定性分析[J]. 吉林建筑大学学报, 2023, 40(1): 31 – 35.  
(LI Xiangqun, ZHANG Xiaotian. Stability analysis of slope reinforcement based on finite element strength reduction method [J]. Journal of Jilin jianzhu university, 2023, 40(1): 31 – 35. )
- [22] 薛宏程, 彭杏瑶, 马倩, 等. 考虑阻力作用的碎石土滑坡涌浪数值模拟方法研究[J]. 人民长江, 2023, 54(7): 153 – 158.  
(XUE Hongcheng, PENG Xinyao, MA Qian, et al. Numerical simulation method of gravel soil landslide surge considering resistance effect [J]. Yangtze river, 2023, 54(7): 153 – 158. )
- [23] 杨曼, 王东仓. 基于地质环境因素与力学参数滑坡的稳定性综合分析[J]. 西部探矿工程, 2013, 25(12): 8 – 10.  
(YANG Man, WANG Dongcang. Comprehensive analysis of landslide stability based on geological environmental factors and mechanical parameters [J]. Western exploration engineering, 2013, 25(12): 8 – 10. )
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)