

### 边坡主动加固设计方法探讨

秦辉 尹小涛 汤华 程谔

引用本文:

秦辉, 尹小涛, 汤华, 等. 边坡主动加固设计方法探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(11): 86–95.

QIN Hui, YIN Xiaotao, TANG Hua, et al. Design method for active slope reinforcement: A case study of excavated slopes[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(11): 86–95.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.04.0258>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于宽窄平台相结合的黄土高边坡优化设计

Optimization design of high loess slope based on combination of wide and narrow platform: A case study of an industrial square in Zichang City

煤田地质与勘探. 2022, 50(6): 155–164 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.10.0566>

#### 格宾网加筋煤矸石界面剪切特性及路堤边坡稳定性研究

Interfacial shear behavior of gabion reinforced coal gangue and stability of embankment slope

煤田地质与勘探. 2021, 49(6): 186–192, 199 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.022>

#### 井下550 mm超大直径煤层孔钻进技术装备及工程应用

Down-hole 550 mm super large diameter coal seam borehole drilling technology and equipment and its engineering application

煤田地质与勘探. 2022, 50(2): 163–168 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.08.0469>

#### 高填方对红黏土地基力学性质影响及坡体稳定性

Study on slope stability and the effect of highfill on the mechanical properties of red clay foundation

煤田地质与勘探. 2019, 47(4): 131–137 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.020>

#### 基于RSM-BBD法胶结充填材料配比优化及工程应用

Optimization of cemented filling material ratio based on RSM-BBD method and engineering application

煤田地质与勘探. 2023, 51(3): 73–84 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.04.0238>

#### 煤矿采空区煤层气地面开发技术及工程应用

Ground development technology and engineering application of CBM in coal mine goafs: A case study of Jincheng mining area in Qinshui Basin

煤田地质与勘探. 2022, 50(5): 66–72 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.09.0533>



移动阅读

秦辉, 尹小涛, 汤华, 等. 边坡主动加固设计方法探讨——以挖方边坡为例[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(11): 86–95. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0258

QIN Hui, YIN Xiaotao, TANG Hua, et al. Design method for active slope reinforcement: A case study of excavated slopes[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(11): 86–95. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0258

# 边坡主动加固设计方法探讨

## ——以挖方边坡为例

秦 辉<sup>1,2</sup>, 尹小涛<sup>1,\*</sup>, 汤 华<sup>1</sup>, 程 谔<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

**摘要:** 【目的】边坡失稳破坏具有较强的时空特征, 现有被动设计方法造成大量挖方边坡工程失稳。分析边坡开挖时空演化规律, 探讨边坡主动加固设计方法, 对边坡信息化施工和安全控制尤为重要。

【方法】采用现场调研和数值模拟手段, 分析高边坡开挖破坏原因和滑带主应力演化规律, 揭示边坡开挖渐进破坏机制, 进一步构建以加固时机、加固深度、加固力为核心三要素的边坡主动加固设计方法体系, 并通过典型挖方边坡工程检验方法的可行性。【结果和结论】结果表明: (1) 挖方边坡开挖失稳破坏过程可划分为: 破坏应力孕育期、稳定发展期和急速发展期。(2) 建立挖方边坡变形阶段和安全系数( $F_s$ )与开挖步的表征关系, 可控弹塑性变形阶段  $1.05 \leq F_s \leq F_{sk}$  (设计安全系数) 为最佳加固时机; 临界坡高计算方法可以更加方便地确定加固时机,  $0.4 H_{cr} \sim 0.7 H_{cr}$  (临界坡高) 为最佳加固时机。(3) 提出主动加固深度上下界的界定方法, 主动加固时锚固段的深度需在锚固上界之下, 且达到锚固下界。(4) 考虑开挖损失应力补偿, 提出每级坡主动加固力的确定方法, 保证开挖过程中边坡稳定性。(5) 通过工程案例进行主动和被动加固设计比较, 得出采用提出的主动加固设计方法只需要相对较小的加固力即可较好地约束边坡变形和塑性区扩展。研究成果可为挖方边坡工程信息化施工和加固设计提供指导。

**关键词:** 边坡工程; 主动加固; 阶段特征; 时空维度三要素; 工程应用

中图分类号: TU457 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2024)11-0086-10

## Design method for active slope reinforcement: A case study of excavated slopes

QIN Hui<sup>1,2</sup>, YIN Xiaotao<sup>1,\*</sup>, TANG Hua<sup>1</sup>, CHENG Xu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** [Objective] Slope instability and failure exhibit extinct spatiotemporal characteristics. Existing design methods for passive reinforcement have resulted in the engineering instability of numerous excavated slopes. Therefore, analyzing the spatiotemporal evolutionary patterns of slopes during excavation and exploring the design methods for active slope reinforcement are particularly important for the information technology (IT)-based construction and safety control of slopes. [Methods] Using on-site investigations and numerical simulations, this study analyzed the causes of excavation-induced failure of high slopes, as well as the evolutionary pattern of the principal stresses in the sliding zone. Consequently, this study revealed the progressive failure mechanism of slopes during excavation and developed a design system for active slope reinforcement with reinforcement timing, depth, and force as key factors. Finally, this study verified

收稿日期: 2024-04-24; 接收日期: 2024-08-13

基金项目: 云南省重点研发计划项目(202303AA080010)

第一作者: 秦辉, 1998 年生, 男, 云南曲靖人, 博士研究生。E-mail: qinhui20@mails.ucas.edu.cn

\*通信作者: 尹小涛, 1975 年生, 男, 陕西咸阳人, 博士, 副研究员, 硕士生导师。E-mail: xtyin@whrsm.ac.cn

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

the feasibility of the system using typical slope excavation engineering. [Results and Conclusions] The results indicate that the excavation-induced failure process of a slope can be divided into three periods: the incubation, stable development, and rapid development periods of failure stress. The characterization of the deformation stage and safety factor ( $F_s$ ) of the excavated slope using the excavation steps was established, revealing that the optimal reinforcement timing was the time when  $1.05 \leq F_s \leq F_{st}$  (design safety factor) in the controllable elastic and plastic deformation stage. The reinforcement timing can be more conveniently determined using the calculation method for the critical slope height, which indicates that  $0.4-0.7 H_{cr}$  (critical slope height) represents the optimal reinforcement time. The method for determining the upper and lower boundaries of the active reinforcement depth indicates that the depth of the anchorage segment should be positioned below the upper boundary of the anchorage segment and extend to its lower boundary. Considering the compensation for excavation-induced stress loss, this study proposed a method for determining the active reinforcement force of each grade of a slope to ensure slope stability during excavation. The comparison of active and passive reinforcement designs for an engineering case suggests that the proposed design method for active reinforcement allows for the effective restriction of slope deformations and plastic zone expansion using a relatively small reinforcement force. The results of this study can serve as a guide for the IT-based construction and reinforcement design of slope excavation engineering.

**Keywords:** slope engineering; active reinforcement; stage characteristic; three spatiotemporal elements; engineering application

挖方边坡破坏主要由于开挖造成水平向约束消失, 扰动使力学参数弱化, 导致边坡难以维持稳定<sup>[1-3]</sup>。工程实践表明, 开挖后随即盲目地进行加固, 没有根据开挖后揭露的地质地层信息调整加固设计方案(信息化施工), 会使工程灾害频发。因此, 开展主动预加固的研究尤其关键。

在边坡稳定性与加固设计方面, 已有大量研究聚焦于边坡致灾机理<sup>[4-6]</sup>、稳定性评价<sup>[7-9]</sup>及加固策略<sup>[2,10]</sup>等。基于位移变化特征的边坡稳定性评价研究使位移趋势与安全系数联系更加紧密<sup>[11-13]</sup>, 方便了工程应用。为进一步厘清不同类型边坡变形阶段与稳定性的关系, 李红卫<sup>[14]</sup>通过对顺层挖方边坡变形破坏过程的调查和分析, 将边坡变形破坏过程分为卸荷松弛阶段、拉裂下错阶段、挤压鼓胀阶段、整体失稳阶段。许强<sup>[15]</sup>通过对各类滑坡变形破坏行为和变形-时间曲线的分析总结和分类, 并对每种类型变形发展阶段进行了划分。现有研究对滑坡的预报和加固时机的确定提供了重要参考。

加固力和加固深度是尤为重要的 2 个加固设计指标。有关加固力计算方面, 不同类型挖方边坡失稳机理和破坏模式不同, 因此, 需要采取不同的加固力计算方法。Qin Hui 等<sup>[16]</sup>基于 Hoek 定律, 从应力和变形 2 个角度提出隐伏型顺层挖方边坡加固力快速计算方法。竺明星等<sup>[17]</sup>在 Coulomb 理论上推导了考虑滑坡倾角影响的主动土压力系数, 并得出考虑土拱效应影响的加固力计算方法。李宁<sup>[18]</sup>、宋桂锋<sup>[19]</sup>、李培锋<sup>[20]</sup>等对不同类型的边坡破坏机理进行分析并进行加固设计, 为边坡防治提供了技术支撑。加固深度确定方面, 边坡未发生较大变形之前采取锚索格构梁方案可以取得较好的支护效果, 主要由于锚索可以主动施加反力, 而抗

滑桩只能被动产生抗力<sup>[21]</sup>。预应力锚索加固深度直接影响加固的效果, 因此确定加固深度尤为重要, 目前主要根据最危险滑动面位置确定锚固深度, 如李韬等<sup>[22]</sup>利用通用离散元软件 UDEC 建立边坡开挖变形分析模型, 确定加固深度并提出预应力锚索加固方案, 但基本以常规的单一滑带确定加固深度的方法, 没有考虑到持续开挖导致最危险滑动面变化等因素, 由此导致二次甚至多次加固的案例层出不穷<sup>[23]</sup>。主动加固则可以有效利用潜在滑动面的固有强度, 减少工程造价。

一般来说, 挖方边坡施工需开挖一级加固一级, 但通过现场工程实践表明, 在实际工程中, 考虑到工程施工难度以及信息化施工(根据揭露地质信息及时调整加固方案)需求, 并没有按照开挖一级加固一级的方式进行边坡加固。相反, 通过揭露的地质信息进一步优化加固设计较为合适。目前已有的预加固方法存在对加固时机和加固深度的确定缺乏指导的问题, 导致加固措施未产生应有的加固效果, 出现设计值足够稳定, 但实际发生失稳的现象。因此, 过早加固不易调整加固设计方案, 加固过晚则会形成被动加固, 造成更大的损失。

在广泛调研挖方边坡失稳案例的基础上, 结合数值模拟方法, 探讨开挖卸荷造成的变形失稳机制, 得到主动加固时机、加固深度和加固力 3 个关键性安全控制指标的确定方法, 形成边坡主动加固设计方法。结合工程实例, 进一步对比主动和被动加固设计差异, 以期对边坡工程设计、动态施工、监测预警和安全控制提供指导。

## 1 研究背景

图 1 为西南山区大漾云高速公路沿线发生的部分



加固后失效破坏的挖方高边坡,仅短短数公里出现十余起。边坡失稳范围主要为冲洪积层粉质黏土和碎石土层,不仅严重影响工程建设进度和质量,还造成了巨大经济损失和环境破坏。

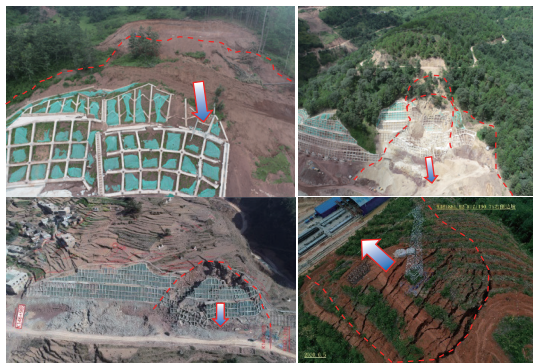


图 1 高速公路沿线的挖方边坡破坏情况实例  
Fig.1 Examples of excavation-induced slope failure along expressways

失稳的直接原因表现为加固不及时,加固深度不够,加固力不足等。根本原因在于地质条件复杂多变,没有开展信息化施工,开挖后随即盲目地进行加固,使得加固措施不能满足边坡稳定性需求,导致所有锚索框格梁加固失效。挖方边坡变形失稳的过程,伴随着应力、应变场的持续调整,坡体发生不同程度的变形和破坏,这种累积损伤效应将使坡体的强度参数出现较大的降低,将导致设计参数和实际参数不吻合,这也是常规方法下挖方边坡加固设计上安全,但实际工程中经常发生诸多失稳事件的原因。

信息化施工显得尤为重要。如果可以预知坡体强度演化的临界点、敏感阶段、扰动敏感范围并及时补偿足够的主动预加固力,则可以防控由此造成的挖方边坡失稳风险。然而,具体什么时候进行预加固,最佳时机确定的标准是什么,加固深度是多少,不同加固时机下不同坡体位置处加固力大小又该如何确定,均没有衡量的指标,导致在实际工程中出现了大量的工后失稳情况,如何提出合理的主动预加固方法成为高挖方边坡设计的首要问题。

## 2 边坡主动加固设计方法

本文以介入加固时机的不同,将挖方边坡加固的方法归纳为 2 种。

(1) 被动加固:即先开挖,后加固,或加固设计不足导致的再次加固。此类型的坡体产生较大塑性变形,需要补偿更多的加固力,加固范围也更广。该方法简单直接,方便施工,但因为难以把握边坡稳定性状态,容易错失加固时机,导致坡体失稳。

(2) 主动加固:指分级加固(边开挖边加固)或分段

加固(开挖一段加固一段)。主动采取锚固措施以防止产生较大的塑性变形,只要把握好加固时机、加固深度以及加固力 3 项指标(图 2),就可以实现边坡安全控制。

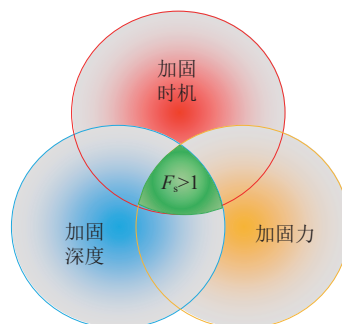


图 2 边坡主动加固时空维度三要素

Fig.2 Three spatiotemporal elements for active slope reinforcement

过早介入加固会造成作业空间有限,严重影响施工进度,且没有充分调动岩土体自身承载性能,经济性差。过晚则岩土体扰动广度扩大且强度降低太多,容易造成坡面施工载荷轻微扰动即产生不可控变形破坏,造成不可估量损失。加固深度和加固力 2 个关键指标则保证了加固措施的有效性和全面性,即保证加固力在实际工程中产生应有的加固效果。

边坡主动加固设计方法体系:提出采用不同的方法来确定边坡开挖后主动加固时机、加固深度和加固力。监测边坡开挖变形阶段特征,以挖方边坡变形阶段和安全系数之间的量化表征关系以及边坡临界高度联合来确定加固时机;在确定主动加固时机情况下提出利用加固深度上下界的界定方法确定主动加固深度;根据边坡损失水平应力沿坡面的分布形态,获得边坡主动加固力,形成主动加固设计方法。其技术路线如图 3 所示。

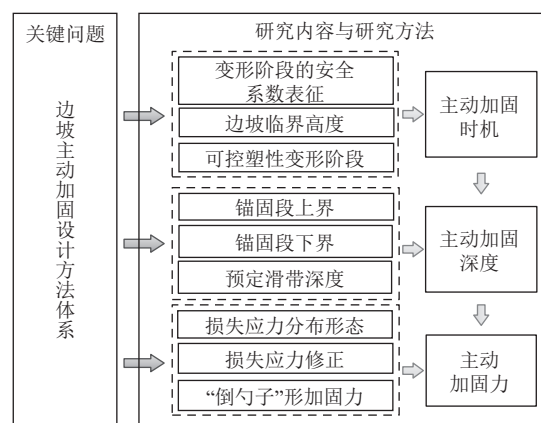


图 3 边坡主动加固设计技术路线

Fig.3 Technical route for the design of active slope reinforcement

以下为针对主动加固方法的实现开展的工作:

(1) 分析分级开挖过程中坡体整体包括滑带在内的应力和变形变化特征以及边坡失稳机理,获得开挖变形阶段特征与安全系数的表征关系。

(2) 对分级开挖边坡的变形和稳定状态进行阶段划分, 提出加固时机、加固深度及加固力三要素的确定方法。

(3) 工程应用, 方法检验。采用被动加固、主动分级和分段加固 3 种方法对分级开挖的边坡进行加固设计, 实现主动加固方法的应用。

### 3 主动加固设计三要素确定方法

#### 3.1 数值仿真模型

使用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型, 建立挖方边坡有限元分析网格模型, 如图 4 所示, 边坡分 6 级坡开挖, 每级高 10 m, 开挖深度约 60 m, 每级坡坡率为 1:1.25, 开挖挖方边坡土层物理力学参数见表 1。主应力监测坐标点沿预定滑面布设, 预定滑带的选取遵循规则为: (1) 有限元方法: 根据边坡开挖失稳形成的最大剪应变增量在边坡中的位置确定。(2) 极限平衡法: 自动搜索得到的滑动面位置确定。参考闫强<sup>[24]</sup> 监测点布设方法, 位移和应力监测点布设于开挖后坡表深度下 20 mm, 应力监测点为 1—7 号点, 位移监测点为 1—5 号点。

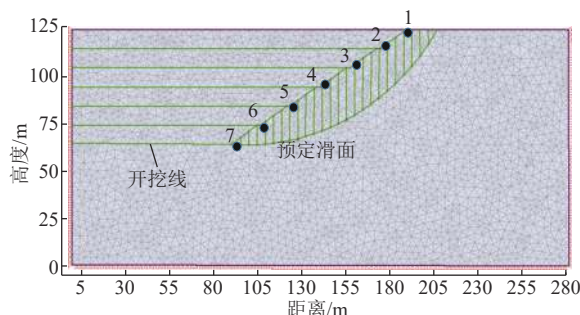


图 4 边坡有限元分析网格模型

Fig.4 Grid model for finite element analysis of a slope

表 1 边坡物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of a slope

土层	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$E/\text{MPa}$	$c/\text{kPa}$	$\phi/(^{\circ})$	$\nu$
黏土	19	50	15	46	0.38

#### 3.2 主动加固时机

##### 3.2.1 边坡开挖扰动机理

坡体应力状态和变形变化特征是确定加固时机的重要依据, 因此, 边坡将采用分级开挖的方式直至坡体处于极限平衡状态(图 5)。

提取开挖过程中预定滑面上主应力变化值, 获得滑面上最大最小主应力随开挖步变化情况与破坏应力比关系(图 6), 其中破坏应力比指利用应力 Mohr 圆获得土体破坏时的最大最小主应力比值。图 6 中曲线坐标原点即为图 5 中起点, 同时也对应图 7 预定滑带主应力云图。

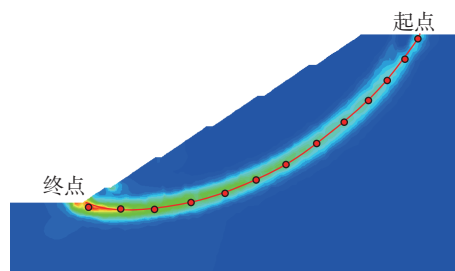


图 5 预定滑带上应力提取点布设

Fig.5 Layout of stress extraction points on the predetermined sliding zone

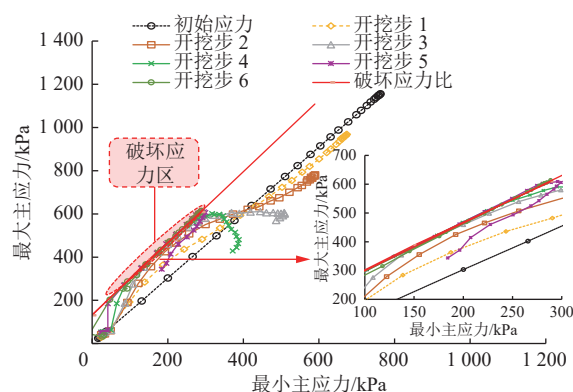


图 6 预定滑带上最大最小主应力比变化情况

Fig.6 Variations in the maximum and minimum principal stress ratio of the sliding zone

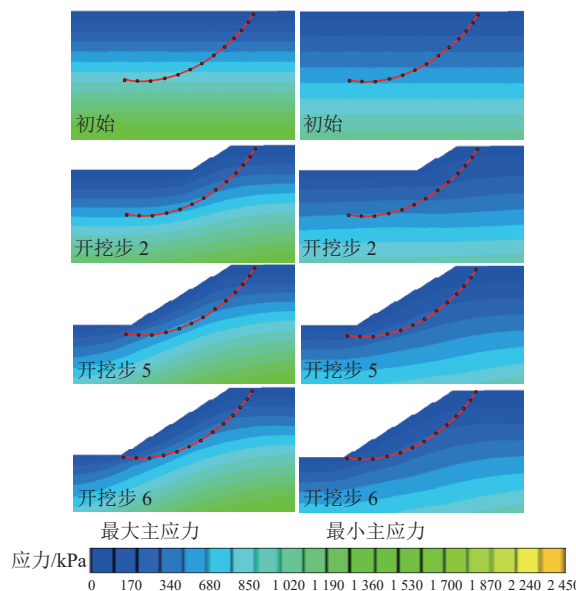


图 7 预定滑带上最大最小主应力云图

Fig.7 Nephograms showing the maximum and minimum principal stresses in the sliding zone

由图 6 和图 7 可知, 随开挖步增加, 最小主应力降低程度比最大主应力降低程度大, 导致滑带主应力曲线向破坏应力区偏移。图 6 中曲线与破坏应力区重合部分越多, 土体的破坏范围越大。具体分析, 该边坡破坏应力区内最大主应力在 200~600 kPa, 最小主应力在 50~290 kPa; 前 3 个开挖步下, 滑带的主应力曲线与破

坏应力曲线无相交,但有逐渐逼近破坏应力曲线的趋势。而从开挖步 4 开始,滑带的主应力与破坏应力曲线重叠范围不断扩大,并且开挖步 6 时已全部与破坏应力曲线重叠。滑带深度范围的土体从开挖步 4 开始均先后发生了不同程度的塑性变形,直到开挖步 6 时塑性区贯通,坡体失稳;根据预定滑带应力变化特征,进一步可将该挖方边坡开挖步 1—3 划分为破坏应力孕育期,开挖步 4 和开挖步 5 划分为破坏应力稳定发展期,开挖步 6 划分为破坏应力急速发展期。

上述规律揭示了挖方边坡开挖变形失稳时空演化机理。在该应力变化特征下,坡体的变形和稳定性变化情况是下文分析重点。

### 3.2.2 基于变形特征和稳定性的主动加固时机确定

通过分析挖方边坡坡表的变形随开挖步变化趋势,可得到挖方边坡开挖变形的阶段特征(图 8)。利用强度折减法获得边坡安全系数随开挖步变化规律(图 9),安全系数随开挖步增加而减小。图 9 和图 8 对比分析可知,开挖步 3 时,边坡安全系数为 1.28,此时边坡最大水平位移为 180 mm。继续开挖,预定滑带的破坏应力稳定发展,塑性区范围持续扩大,安全系数持续降低,在开挖步 5 时,边坡安全系数为 1.08,水平位移非线性增大,边坡最大水平位移达 440 mm(3 号点)。开挖步 6 时,边

坡安全系数为 0.98,边坡水平位移急剧增加,边坡失稳。

因此,可借鉴 GB 50330—2013《建筑边坡工程技术规范》中对边坡稳定状态的界定标准: $F_s \geq F_{st}$  为稳定,  $1.05 \leq F_s \leq F_{st}$  为基本稳定,  $1.00 \leq F_s \leq 1.05$  为欠稳定,  $F_s \leq 1.00$  为失稳。建立挖方边坡变形演化阶段与安全系数之间的量化表征关系(图 9),将挖方边坡开挖变形划分 3 个阶段:(1) 弹性变形阶段(绿色区域,对应稳定状态,  $F_s \geq F_{st}$ , 开挖步 1—3);(2) 可控弹塑性变形阶段(黄色区域,对应基本稳定状态  $1.05 \leq F_s \leq F_{st}$ , 开挖步 4—5);(3) 不可控变形破坏阶段(红色区域,对应欠稳定到失稳状态,  $F_s \leq 1.05$ , 开挖步 6)。可确定开挖步 3—5(开挖深度 30~50 m,  $1.05 \leq F_s \leq F_{st}$ , 可控弹塑性变形阶段)为最佳加固时机。

另外,为提高对最佳加固时机确定的可靠性和便捷性,借鉴《工程地质手册》中土坡临界高度计算经验公式(卡尔曼公式),并提出开挖深度在  $0.4H_{cr} \sim 0.7H_{cr}$  时为最佳的加固时机。经计算得本案例  $H_{cr} \approx 70$  m, 在 28~49 m 深度时为最佳加固阶段,这一方法所确定的加固时机与安全系数和变形阶段特征所确定的加固时机较为接近。卡尔曼公式如下:

$$H_{cr} = \frac{2c \sin \theta \cos \varphi}{\gamma \sin^2 \left( \frac{\theta - \varphi}{2} \right)} \quad (1)$$

确定加固时机的方法简要表述为:工程施工过程中,着重监测坡顶、坡面中部位置水平变形的发展规律,利用边坡变形阶段控制与安全系数之间的量化表征关系( $1.05 \leq F_s \leq F_{st}$ , 可控弹塑性变形阶段)、边坡临界坡高( $0.4H_{cr} \sim 0.7H_{cr}$ ) 综合确定最佳加固时机。

### 3.3 主动加固深度

不同加固时机下,加固深度应该是不同的,主动加固深度是在最佳主动加固时机确定的情况下所得到的加固深度。根据图 6 滑带应力状态变化特征,因为边坡开挖至开挖步 4 时,边坡进入破坏应力稳定发展期,此时滑带深度范围土体先后进入破坏应力状态,所以,开挖到开挖步 4 时,采取主动加固措施需保证锚固段在  $F_s = 1.0$  时滑带的下方(即锚固上界之下,图 10),这与常规的边坡加固设计方法中深度一致,但时机不同。锚固下界在现有挖方边坡加固中较少考虑,在本方法中规定,需要保证锚固段最大深度在  $F_s \geq F_{st}$  时滑动面位置处,可确定锚固下界位置如图 10 所示,图中上下界也是 2 个不同安全等级下边坡失稳的滑动面。

综上,定义主动加固深度上下界的界定方法为:锚固段深度的最浅位置必须在锚固上界之下,同时锚固段最深位置在锚固下界。因为锚固上界可对破坏应力稳定发展期内预定滑带上塑性变形的发展趋势产生有效

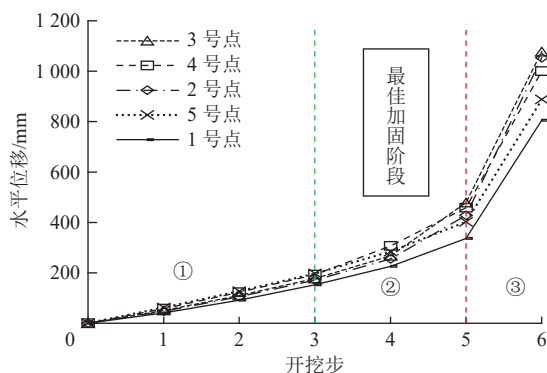


图 8 挖方边坡开挖变形阶段特征

Fig.8 Diagram showing the characteristics of excavation deformation stages of excavated slope

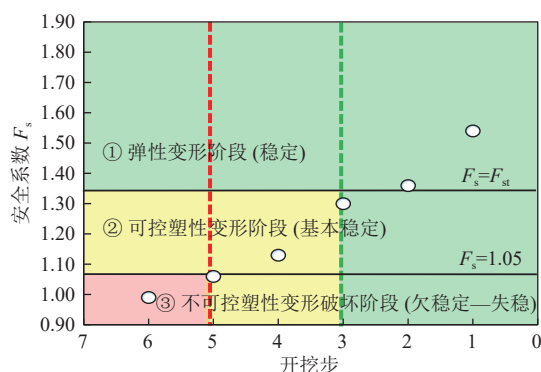


图 9 稳定性和变形阶段分区

Fig.9 Zoning of stability and deformation stages



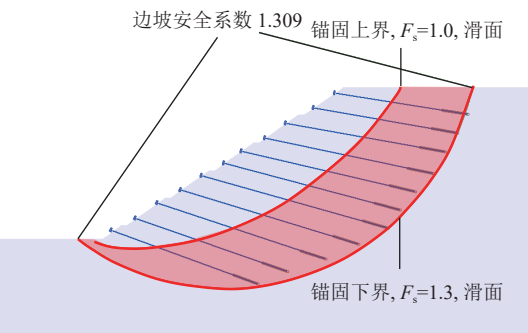


图 10 锚固段范围  
Fig.10 Anchorage segment range

约束作用,保证加固力的长期有效性,如果锚固段位于滑体,则锚索不能产生应有的锚固效果。锚固下界使边坡满足工程设计的安全等级。

3.4 主动加固力

不同坡级所施加的加固力大小直接决定了开挖过程中边坡临时和局部的稳定性。提取每级边坡开挖线处水平应力在开挖前后的变化值(提取点如图 4 中 1—7 号点位),可获得边坡开挖前后近坡处的损失水平应力分布形态(图 11)。由于坡脚应力集中效应影响,损失水平应力  $F_R$  随深度呈现“倒勺子”形分布。假设将损失的水平应力全部补偿加固得到边坡安全系数  $F_s$ ,与工程设计要求的设计安全系数  $F_{st}$  相比较,如果  $F_{st} > F_s$ ,表明损失应力全部补偿后仍达不到安全标准,需要将损失水平应力  $F_R$  进行修正方可得到加固应力  $F_{RH}$ 。为此,引入水平加固应力修正系数  $C$ 。如果  $F_{st} \leq F_s$ ,表明损失应力全补偿后可达到安全标准。对  $F_R$  进行修正可获得对应工程设计所需安全标准下所需加固应力  $F_{RH}$ ,负号表示  $F_{RH}$  方向与  $F_R$  方向相反。修正系数  $C$  和所需的加固应力  $F_{RH}$  可由下式求得。

$$C = \begin{cases} > 1, & F_{st} > F_s \\ \leq 1, & F_{st} \leq F_s \end{cases} \quad (2)$$

$$F_{RH} = -CF_R \quad (3)$$

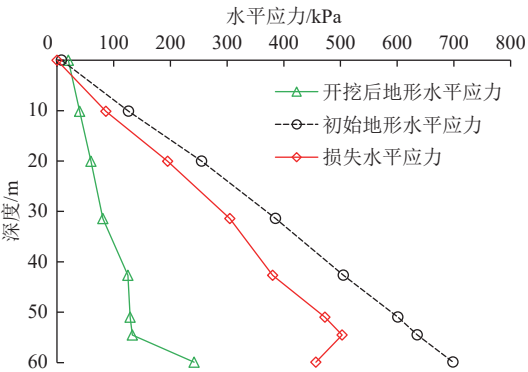


图 11 水平应力变化情况  
Fig.11 Variations in horizontal stress

4 工程应用与检验

4.1 工程简介

为了使主动加固设计和被动加固设计的优劣形成较好的对比,选用一个坡体处于临界状态的高边坡案例进行分析。该挖方边坡开挖深度约 60 m,分 7 级开挖(图 12),挖方边坡主要地层为粉质黏土层、强风化泥岩层、中风化泥岩层。对边坡稳定性影响较大的为强风化泥岩层,物理力学参数见表 2,参数主要通过室内三轴试验和岩土参数反分析方法确定,其中,稳定状态下,边坡岩土强度参数以室内固结不排水试验确定,临界状态时边坡的强度参数根据边坡实际的稳定情况进行参数反分析得到。开挖坡率上缓下陡。在开挖快结束时,挖方边坡的坡顶开始出现多条弧形裂缝,局部发生失稳,工程采取预应力锚索框架梁加固,但仍未控制住变形发展的趋势(图 13)。



图 12 失稳挖方边坡概貌  
Fig.12 Overall of an unstable excavated slope

表 2 岩土层物理力学参数  
Table 2 Physical and mechanical parameters of the soil layer

岩土层	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$E/\text{MPa}$	$\nu$	峰值强度		残余强度	
				$c/\text{kPa}$	$\phi/(\circ)$	$c/\text{kPa}$	$\phi/(\circ)$
粉质黏土	20	50	0.38	24	23	8	17
强风化泥岩	23	100	0.33	68	33	13	31
中风化泥岩	24	500	0.30	78	35	18	33.5

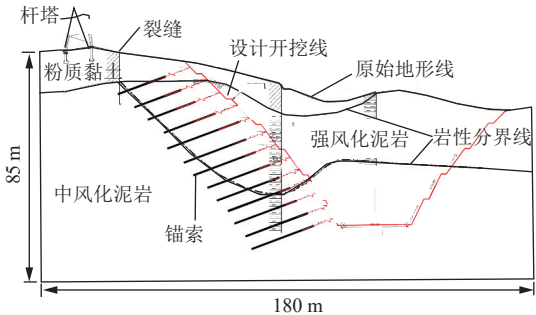


图 13 高挖方边坡原设计剖面  
Fig.13 Design profile of a high excavated slope

4.2 失稳原因分析

根据工程设计资料,提供的水平加固力为 4 277 kN/m。

利用理正岩土计算软件进行复核,参数取残余强度参数进行计算,得到了挖方边坡的剩余下滑力水平方向为 4 473 kN/m。水平加固力 4 277 kN/m 小于剩余水平下滑力 4 473 kN/m,并且过度开挖错过了加固时机,加固深度不够,坡体变形较大,预应力丧失严重,使用的预应力锚索加固措施不能保证提供足够的加固力成为该边坡失稳的原因。

### 4.3 主动加固设计

利用第 3 章提出的边坡主动加固设计方法对该边坡进行加固设计,逐一确定其加固时机、加固深度、加固力 3 项关键性指标。

**主动加固时机:**按照 3.2 节的结论,根据位移变化情况和安全系数随开挖步变化情况,可确定该边坡最佳加固时机在开挖步 4—6(40~60 m)。利用临界坡高确定最佳加固阶段为:开挖深度 28~56 m( $H_{cr} \approx 80$  m),对应开挖步 3—6。本案例选择在开挖步 4 完成后对已开挖完成的边坡进行加固。

**主动加固深度:**按照 3.3 节的结论,锚固段最深位置需要达到锚固下界,最浅位置在锚固上界之下,可保证地层提供足够的锚固力。本案例锚固上下界如图 14 所示,锚固段在红色区域内,且锚固段最深位置触及锚固段下界。

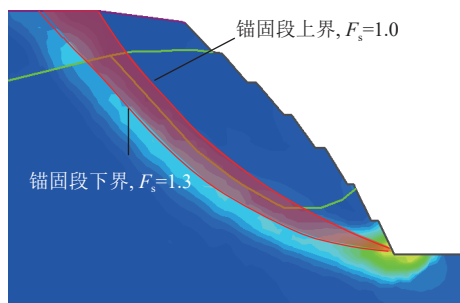


图 14 主动加固深度上下界

Fig.14 Upper and lower boundaries of the active reinforcement depth

**主动加固力:**按照 3.4 节的结论,根据损失应力呈“倒勺子”形分布特征,本案例得到损失应力分布特征如图 15 所示,将修正得到的加固应力进行修正补偿,共需要补偿水平加固力 3 450 kN/m,可满足工程所需的设计安全系数 1.30。

### 4.4 主动加固设计与被动加固设计比较

#### 4.4.1 加固力比较

为使边坡满足工程稳定性要求,分级主动加固力需要 3 450 kN/m,分段主动水平加固力需要 3 700 kN/m,被动加固(边坡稳定性处于极限状态时进行加固)时,根据反分析得到所需加固力为 4 500 kN/m,被动加固时,相对于主动加固设计需要额外增加约 31.8% 的加固力

才能满足工程稳定性要求。2 种加固方法下各级边坡加固力见表 3。

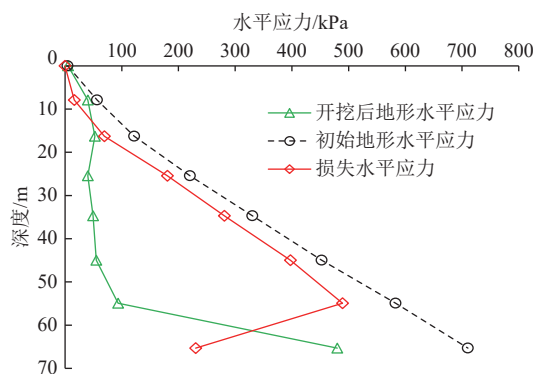


图 15 开挖前后水平应力变化情况

Fig.15 Variations in the horizontal stress before and after excavation

表 3 计算过程中各级边坡涉及的主要的力  
Table 3 Primary forces involved in various slope grades in the calculation  
单位: kN/m

坡级	被动加固力	分级主动加固力	分段主动加固力	剩余推力
7	200	150	150	
6	400	250	250	
5	650	300	300	
4	800	600	600	
3	900	800	900	
2	1 100	1 000	1 100	
1	450	350	400	
总和	4 500	3 450	3 700	4 473

#### 4.4.2 安全系数比较

利用有限元强度折减法求得不同加固方法下边坡安全系数与开挖步间的变化关系(图 16),主动加固和被动加固方法的差异主要体现在开挖步 4—7,加固力介入时机不同自然导致安全系数的差异。其中,分级主动加固时,从开挖步 4 后介入进行加固,所以边坡安全系数从 1.20 升至 1.75,往后每开挖一步,进行一次加固力

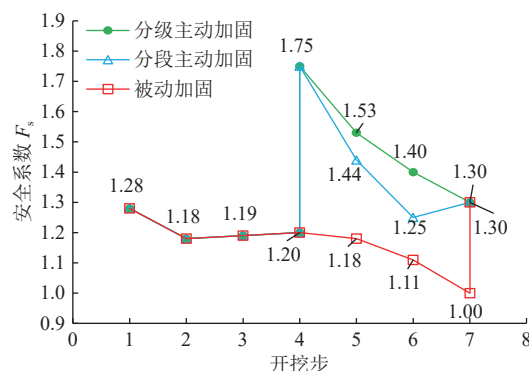


图 16 不同加固方法下边坡稳定性与开挖步关系

Fig.16 Relationship between slope stability and excavation steps under different reinforcement methods



的补偿,安全系数逐渐下降至 1.30。分段主动加固的安全系数有先降低后升高的现象,主要是由于分段加固在开挖步 5 和开挖步 6 没有加固力介入,在开挖步 7 后才有加固力的介入。被动加固措施下,开挖步 7 有加固力介入,因此安全系数在开挖步 7 的 1.00 陡升至 1.30。从安全系数变化情况可知,本文所采用的主要加固设计方法可以保证边坡在不同开挖步的稳定性,同时,为信息化施工提供支撑。

#### 4.4.3 云图比较

主动加固设计与被动加固设计数值仿真结果的位

移和塑性区分布云图对比如图 17 所示。锚索入射方向与水平方向的夹角为  $15^\circ$ 。根据锚索上下界的界定方法,确定锚索锚固段的深度在滑动面以下,锚固段长度为 6 m。根据云图显示,主动加固时,不论是分级主动加固还是分段主动加固,边坡塑性区范围均较小,仅坡顶和坡底土体受拉压应力作用局部进入塑性状态,坡顶由于卸荷作用产生拉裂缝,但边坡变形相对较小,在 120 mm 内。被动加固时,边坡塑性区已然发生贯通,边坡处于极限平衡状态,最大变形达 400 mm。

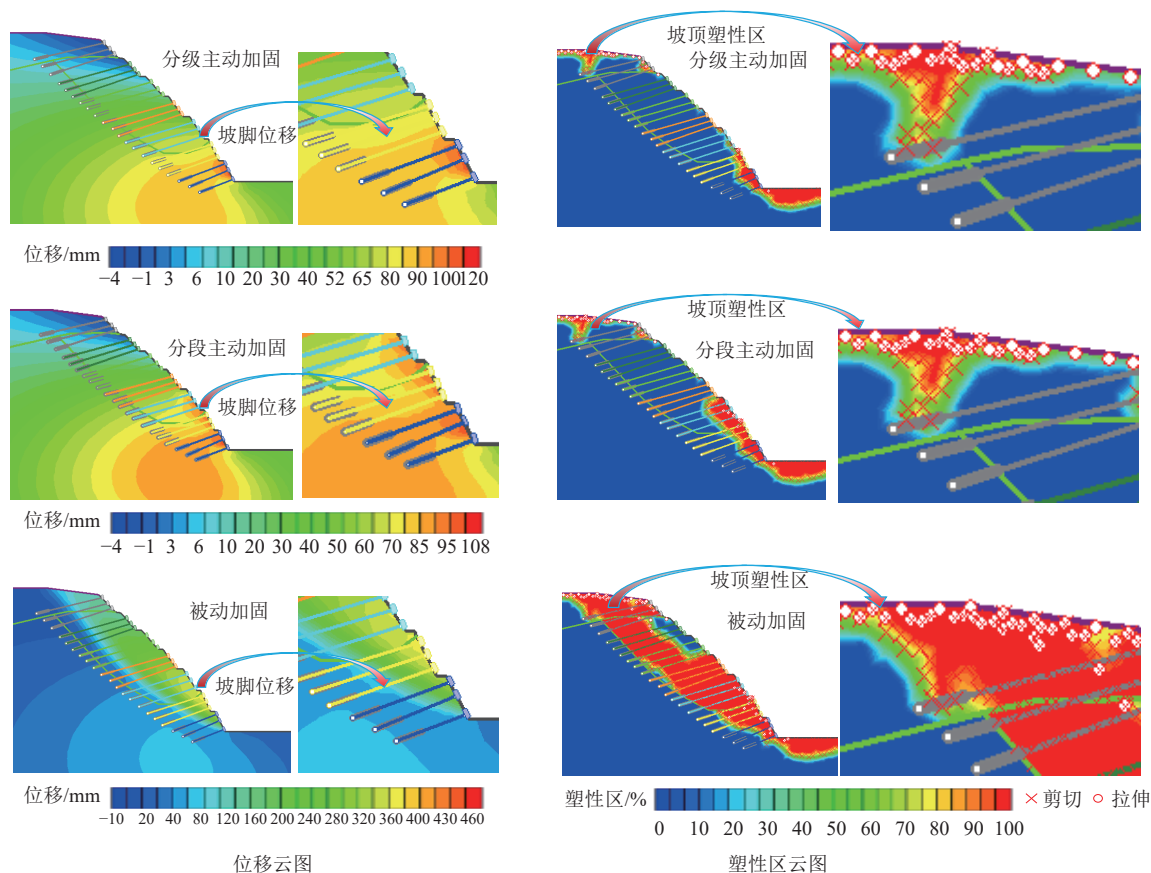


图 17 不同加固方法的水平位移和塑性区云图

Fig.17 Contour maps showing the horizontal displacement and plastic zones in different reinforcement methods

主动加固方法下,边坡在开挖过程中的临时稳定性或局部稳定性均良好,可以有效控制边坡塑性区和变形的发展,保证锚固的长期有效性,也进一步说明本文所提出的加固时机、加固深度和加固力的确定方法是合理的,具有较好的工程经济性和安全性。

#### 4.5 工程建议

通过上文对比主动和被动加固设计得知,在工程施工中,可优先采用分级(分段)主动加固设计方法,因为此时坡体变形相对较小,三要素容易确定,所需加固力小,预应力锚索加固措施下就可以产生较佳锚固效果。分段加固可有效解决工程作业面窄的问题,利于施工进

行和多种加固措施配合开展,提高施工效率,但需要加强变形监测,以免过度开挖导致坡体失稳。

被动加固设计下,由于错过最佳加固时机,坡体稳定状态难以把握,导致加固深度和加固力更加难以确定。如遇边坡不得不采用被动加固方法时,剩余推力法求解加固力具有快捷且相对保守的特点,但由于坡体变形较大,土体强度降低显著,在治理过程中尤其注意加固深度和实际产生有效预应力值的确定,而不是仅增加加固力值,且不宜单一地使用预应力锚索进行加固,这也直接提高了工程费效比。

## 5 结论

(1) 滑带深度范围的土体应力状态随开挖步增加均先后进入破坏应力区, 发生了不同程度的塑性变形破坏, 可将不同开挖步划分为破坏应力孕育期、稳定发展期、急速发展期。

(2) 挖方边坡开挖变形演化的主要阶段为: 弹性变形阶段、可控弹塑性变形阶段、不可控变形破坏阶段。根据挖方边坡变形阶段控制与安全系数之间的量化表征关系以及边坡临界高度可综合确定最佳加固时机。

(3) 提出锚固段上下界的界定方法, 进而确定加固深度, 保证所施加的加固力长期有效性。考虑损失应力补偿效应, 提出每级坡加固力确定的方法, 可保证边坡开挖过程中局部和临时的稳定性。

(4) 采用考虑时空维度三要素的主动加固设计具有良好的经济效应。被动加固时尤其注意加固深度的确定, 且不宜单一地使用预应力锚索框架梁进行加固, 容易导致锚索预应力值丧失较多。

### 参数注释:

$c$  为黏聚力, kPa;  $C$  为水平加固应力修正系数;  $E$  为弹性模量, MPa;  $F_R$  为损失水平应力, kN/m;  $F_{RH}$  为水平加固应力, kN/m;  $F_s$  为安全系数;  $F_{st}$  为设计安全系数;  $H_{cr}$  为边坡临界坡高, m;  $\varphi$  为内摩擦角, ( $^\circ$ );  $\theta$  为坡角, ( $^\circ$ );  $\gamma$  为容重, kN/m<sup>3</sup>;  $\nu$  为泊松比。

### 利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 参考文献(References)

- [1] QIN Hui, TANG Hua, YIN Xiaotao, et al. Disturbed zone calculation and stability evaluation method of footwall slope with slip-shear failure under excavation[J]. *Journal of Central South University*, 2024, 31(2): 589–601.
- [2] 南宁, 李鹏, 苏生瑞, 等. 基于宽窄平台相结合的黄土高边坡优化设计: 以陕西省子长市某工业广场高边坡为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(6): 155–164.  
NAN Ning, LI Peng, SU Shengrui, et al. Optimization design of high loess slope based on combination of wide and narrow platform: A case study of an industrial square in Zichang City[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(6): 155–164.
- [3] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(8): 1525–1544.  
HUANG Runqiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(8): 1525–1544.
- [4] 任东伟, 李波, 曾亮亮, 等. 典型路堑高边坡开挖变形机制及应对措施研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2020, 18(2): 190–194.  
REN Dongwei, LI Bo, ZENG Liangliang, et al. Deformation and failure mechanism of typical high cutting slope excavation and countermeasures[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2020, 18(2): 190–194.
- [5] 王浩, 王晓东, 泮俊. 超高路堑边坡治理工程案例研究 I: 边坡失稳机制模拟分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(4): 899–909.  
WANG Hao, WANG Xiaodong, PAN Jun. 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] QIN Hui, YIN Xiaotao, TANG Hua, et al. Reliability analysis and geometric optimization method of cut slope in spatially variable soils with rotated anisotropy[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 158: 108019.
- [7] CHENG Xu, TANG Hua, QIN Hui, et al. Stress field and stability calculation method for unloading slope considering the influence of terrain[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2024, 83(2): 60.
- [8] 宁永香, 崔希民. 矿山边坡地表变形的 PSO-ELM 预测模型[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(6): 201–206.  
NING Yongxiang, CUI Ximin. PSO-ELM prediction model for surface deformation of mine slope[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(6): 201–206.
- [9] 方汕澳, 许强, 修德皓, 等. 基于斜率模型的突发性黄土滑坡失稳时间预测[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 169–179.  
FANG Shan'ao, XU Qiang, XIU Dehao, et al. A study of the predicted instability time of sudden loess landslides based on the SLO model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 169–179.
- [10] 邓铭江, 蔡正银, 朱洵, 等. 北疆渠道膨胀土边坡破坏机制及加固措施[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(增刊 2): 50–55.  
DENG Mingjiang, CAI Zhengyin, ZHU Xun, et al. Failure mechanism and reinforcement measures of shallow slopes of expansive soils in Northern Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(Sup.2): 50–55.
- [11] 宁永香, 崔希民, 崔建国. 基于 ABC-GRNN 组合模型的露天矿边坡变形预测[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(3): 65–72.  
NING Yongxiang, CUI Ximin, CUI Jianguo. Deformation prediction of open-pit mine slope based on ABC-GRNN combined model[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(3): 65–72.
- [12] POSTILL H, HELM P R, DIXON N, et al. Forecasting the long-term deterioration of a cut slope in high-plasticity clay using a numerical model[J]. *Engineering Geology*, 2021, 280: 105912.
- [13] KARRAY M, HUSSEIN M N, DELISLE M C, et al. Framework to assess pseudo-static approach for seismic stability of clayey slopes[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(12): 1860–1876.
- [14] 李红卫. 陡倾顺层路堑高边坡变形破坏机制分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(增刊 1): 153–158.  
LI Hongwei. Deformation and failure mechanism of steeply dipping bedding high slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(Sup.1): 153–158.

- [15] 许强. 滑坡的变形破坏行为与内在机理[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(2): 145–151.  
XU Qiang. Theoretical studies on prediction of landslides using slope deformation process data[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(2): 145–151.
- [16] QIN Hui, YIN Xiaotao, TANG Hua, et al. Disturbance range characterization and reinforcement design method of concealed bedding slope[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 162: 108413.
- [17] 竺明星, 卢红前, 戴国亮, 等. 基于双土拱效应的砂性土滑坡中抗滑排桩滑坡推力研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(S0): 8–13.  
ZHU Mingxing, LU Hongqian, DAI Guoliang, et al. Research on landslide thrust of anti-slide row piles in sandy slope with consideration of double soil-arching effects[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(S0): 8–13.
- [18] 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 Ning, QIAN Qihu. Four criteria of stability analysis and assessment of high rock slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(9): 1754–1759.
- [19] 宋桂锋, 茶增云, 王庆龙, 等. 全强风化边坡破坏机理及加固措施研究[J]. *交通科学与工程*, 2020, 36(2): 7–15.  
SONG Guifeng, CHA Zengyun, WANG Qinglong, et al. Study on failure mechanism and reinforcement measure of completely weathered rock slope[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2020, 36(2): 7–15.
- [20] 李培锋, 李斯涛, 李春, 等. 潜在不稳定边坡复合式主动加固方法研究[J]. *施工技术*, 2021, 50(4): 95–98.  
LI Peifeng, LI Sitao, LI Chun, et al. Research on composite active reinforcement method for potentially unstable slope[J]. *Construction Technology*, 2021, 50(4): 95–98.
- [21] 董高一, 周春梅, 许方党, 等. 含球状风化体混合花岗岩边坡稳定性及加固方案[J]. *安全与环境工程*, 2024, 31(2): 180–192.  
DONG Gaoyi, ZHOU Chunmei, XU Fangdang, et al. Stability and reinforcement scheme of mixed granite slope with spherical weathering body[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2024, 31(2): 180–192.
- [22] 李韬, 徐奴文, 戴峰, 等. 白鹤滩水电站左岸坝肩开挖边坡稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2018, 39(2): 665–674.  
LI Tao, XU Nuwen, DAI Feng, et al. Stability analysis of left bank abutment slope at Baihetan hydropower station subjected to excavation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(2): 665–674.
- [23] 陈秀清, 王宝玉, 魏金龙, 等. 兰州徐家湾某边坡治理工程二次加固措施研究[J]. *安全与环境工程*, 2023, 30(5): 166–173.  
CHEN Xiuqing, WANG Baoyu, WEI Jinlong, et al. Secondary reinforcement measures of anti-slide piles in a slope treatment engineering in Xujiawan, Lanzhou[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2023, 30(5): 166–173.
- [24] 闫强. 高速公路改扩建工程高边坡开挖过程稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.  
YAN Qiang. Study on the slope stability in the excavation process of reconstruction highway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.

(责任编辑 周建军)