

基于挡墙裂缝特征的滑坡活动性判识及降雨对滑坡稳定性影响的分析

张元胤, 赵 文

Landslide identification based on characteristics of retaining wall fractures and rainfall stability analysis A case study of fill slope in Zheng'an County, Guizhou Province

ZHANG Yuanyin and ZHAO Wen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202308027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Mein-Larson入渗模型的凹形边坡稳定性分析

Stability analysis of concave slope based on Mein-Larson infiltration model

胡庆, 吴益平, 苗发盛, 张龙飞, 李麟玮 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 26-35

基于FLAC~(3D)的米贝复式滑坡稳定性分析

罗忠行, 雷宏权

中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(4): 52-62

考虑抗剪强度衰减特性的膨胀土边坡稳定性分析

Stability analysis of expansive soil slopes considering shear strength decay characteristics

李晋鹏, 汪磊, 王俊, 陈洋, 徐永福 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(6): 29-36

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

对水致黄土斜坡破坏模式及稳定性分析原则的思考

Thoughts on modes of loess slope failure triggered by water infiltration and the principals for stability analysis

李同录, 李颖, 赵丹旗, 胡向阳, 李萍 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(2): 25-32

岩溶山区危岩稳定性分析及危害性预测

Stability analysis and hazard prediction of dangerous rock masses in karst mountainous area: A case study of Changchong dangerous rock mass in Songtao County, Guizhou Province

王琦, 胡亚净, 宋伟利, 穆启超 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(1): 75-84



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202308027

张元胤, 赵文. 基于挡墙裂缝特征的滑坡活动性判识及降雨对滑坡稳定性影响的分析——以贵州正安一处填方边坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(2): 126-135.

ZHANG Yuanyin, ZHAO Wen. Landslide identification based on characteristics of retaining wall fractures and rainfall stability analysis: A case study of fill slope in Zheng'an County, Guizhou Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 126-135.

基于挡墙裂缝特征的滑坡活动性判识及降雨对滑坡 稳定性影响的分析 ——以贵州正安一处填方边坡为例

张元胤¹, 赵文²

(1. 贵州送变电有限责任公司, 贵州 贵阳 550002; 2. 贵州开源爆破工程有限公司,
贵州 贵阳 551400)

摘要: 滑坡的变形特征以及机理是边坡稳定性分析和边坡破坏预警的关键。正安县芙蓉江镇某填方边坡挡墙在雨季产生了显著变形, 挡土墙裂缝发育显著, 为确定边坡的安全状态, 对边坡的地质以及水文条件进行了调查, 对挡墙以及周边地面裂缝特征进行了统计, 并通过 FLAC^{3D} 对非饱和降雨入渗后边坡的稳定性进行了计算。研究结果: (1) 挡墙裂缝沿最大主应力的主平面发育, 挡墙沿沟槽轴线对称沉降; (2) 通过降雨强度为 10 mm/d(小雨)和 250 mm/d(暴雨)的入渗分析, 小雨 8 d 和雨停后 5 d 安全系数分别降低 14.5% 和 4.3%, 暴雨 1 d 和雨停后 2 d 安全系数降幅分别为 10% 和 3.5%; (3) 分析了边坡的变形机理, 认为填方加载和降雨后土体重度增加导致下滑力增加; 降雨导致基质吸力、有效应力降低, 而土体的抗剪强度和抗滑力降低; (4) 根据挡墙裂缝特征和变形监测结果预测了边坡的主滑方向、几何边界和滑坡分区, 后续边坡前缘鼓胀现象说明滑坡判识结果准确。

关键词: 滑坡判识; FLAC^{3D}; 降雨入渗; 挡墙裂缝; 稳定性分析

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)02-0126-10

Landslide identification based on characteristics of retaining wall fractures and rainfall stability analysis: A case study of fill slope in Zheng'an County, Guizhou Province

ZHANG Yuanyin¹, ZHAO Wen²

(1. Guizhou Power Transmission and Transformation Co. Ltd., Guiyang, Guizhou 550002, China;

2. Guizhou Kaiyuan Blasting Engineering Co. Ltd., Guiyang, Guizhou, 551400, China)

Abstract: The deformation characteristics and mechanism of landslides are crucial for slope stability and slope failure warning. Significant deformation occurred in the retaining wall of a fill slope in Furongjiang Town, Zheng'an County, during the rainy

收稿日期: 2023-08-16; 修订日期: 2023-12-17

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

第一作者: 张元胤(1988—), 男, 湖南吉首人, 矿业工程专业, 硕士, 工程师, 主要从事岩土勘察与设计方面的工作与研究。

E-mail: 491057661@qq.com

通讯作者: 赵文(1989—), 男, 山东济宁人, 采矿工程专业, 硕士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程爆破方面的工作与研究。

E-mail: 741037778@qq.com

season, with notable development of soil wall cracks. In order to determine the safety status of the slope, geological and hydrological conditions of the slope were investigated, and the characteristics of the retaining wall and surrounding ground cracks were statistically analyzed. The stability of the slope after unsaturated rainfall infiltration was calculated by FLAC^{3D}. The results are as follows: (1) retaining wall cracks develop along the principal plane of maximum principal stress, and the retaining wall settle symmetrically along the axis of the groove; (2) Through the infiltration analysis of rainfall intensity of 10mm/d (light rain) and 250mm/d (heavy rain), the safety factors of light rain on 8 days and 5 days after rainfall cessation decreased by 14.5% and 4.3%, respectively, and the safety factors of heavy rain on 1 day and 2 days after rainfall cessation decreased by 10% and 3.5%, respectively. (3) The deformation mechanism of the slope was analyzed, indicating that the increase in gravitational force after filling and rainfall led to increased sliding force. Rainfall reduced matric suction and effective stress, resulting in decreased shear strength and sliding resistance of the soil. (4) Based on the characteristics of retaining wall cracks and deformation monitoring results, the main sliding direction, geometric boundaries, and landslide zones of the slope were predicted, and subsequent swelling phenomenon at the forefront of the slope confirmed the accuracy of the landslide identification results.

Keywords: landslide identification; FLAC^{3D}; rainfall infiltration; crack in retaining wall; stability analysis

0 引言

在我国西部山区的建设过程中,大量的填方边坡场坪形成于山区斜坡。斜坡是易引发滑坡的基本地貌单元,近年降雨诱发填方边坡失稳的案例频发^[1-2],填方边坡以下为软弱地基时滑坡风险更高^[3-4]。且填方边坡的渗透系数大,降雨作用易导致孔隙水压力增大、抗剪强度降低^[5],可能诱发沉降、填土界面和深层滑移的变形破坏。这些场坪多紧邻建筑物和公路,多采用挡墙支挡,填方边坡滑坡的一个重要现象是挡墙开裂,研究挡墙裂缝特征与滑坡演化的关系,对保护场坪、建筑物和公路等周边环境具有重要指导意义。

滑坡裂缝是滑坡形成和演化过程中的重要伴随特征之一,金德山^[6]认为滑坡裂缝是判断滑坡规模、分析滑坡机制和预测滑坡发展趋势的关键。杨阳^[7]对黄土滑坡中裂缝特征及其与边坡稳定性关系进行了研究,发现裂缝主要在滑坡的后缘和两侧发育,并成为地表水渗透的通道,裂缝的发育加速了滑坡的演变进程;陈菲^[8]等采用测斜和渗压监测成果预测了白格滑坡裂缝区发展趋势和滑坡区的稳定性。于永堂等^[9]研究了黄土高填方场地的裂缝发育特征和分布规律,发现沟谷地形、填土厚度差异等引起的差异沉降和水平位移是裂缝产生的主要原因。

众多学者开展了降雨作用下填方边坡滑坡的形成机理和影响因素研究。赵建军等^[10]采用物理模拟试验研究了碎石土、泥状页岩地基填方路堤降雨条件下孔隙水压力与变形间关系,认为堆载、降雨自重增加和雨水软化滑带后滑面贯通是变形破坏的主要因素;陈林万^[11]等进行了室内填方边坡降雨模型试验,记录了坡面

裂缝演化方向和发展过程,总结了黄土填方边坡的变形破坏模式。周禹熹^[3]研究了粉质黏土地基填方路堤滑坡形成机制和影响因素,结果表明软弱地基厚度影响沉降和挤出变形,降雨是引起填方路堤变形增大的主要原因;胡勇生等^[4]研究了碎石土、泥岩和碳质页岩地基高填方边坡的失稳模式,认为复杂地基结构具有多种破坏模式,暴雨工况稳定性显著降低。

综上所述,滑坡和地基沉降均会导致裂缝发育,通过对裂缝的研究可分析滑坡机理并预测发展趋势。目前综合挡墙裂缝分布特征、裂缝的应力状态和变形监测判识滑坡,研究滑动特征、范围的相关研究较少,对降雨入渗后边坡稳定性的研究多集中在碎石土、黄土、泥岩等软岩地基填方场地,红黏土地基填方场地研究较少。因此,本文以芙蓉江岸红黏土地基填方边坡为研究对象,采用现场调查、应力状态分析、变形监测和数值模拟,研究挡墙裂缝特征与滑坡演化的关系以及降雨入渗对填方边坡稳定性影响。相关结论可为类似红黏土地基填方边坡雨季滑坡识别和防治提供参考。

1 研究区概况

1.1 研究区地质环境

该填方边坡处于正安县芙蓉江东岸,属于河流侵蚀峡谷地貌,东南高西北低,自然坡向 312°坡度约 12°,区内出露地层为下奥陶统湄潭组(O_1m),岩性为灰黑色泥灰岩,岩土构成由上到下分别为素填土,红黏土,全、强、中风化泥灰岩,岩层产状 $324^\circ \angle 15^\circ$,研究区地质平面图见图 1,剖面见图 2。填方边坡最大回填厚度 7 m,重力式挡墙支挡,以下为芙蓉江,水平和垂直距离约为 110 m、25 m,以上为银百高速,水平和垂直距离约为

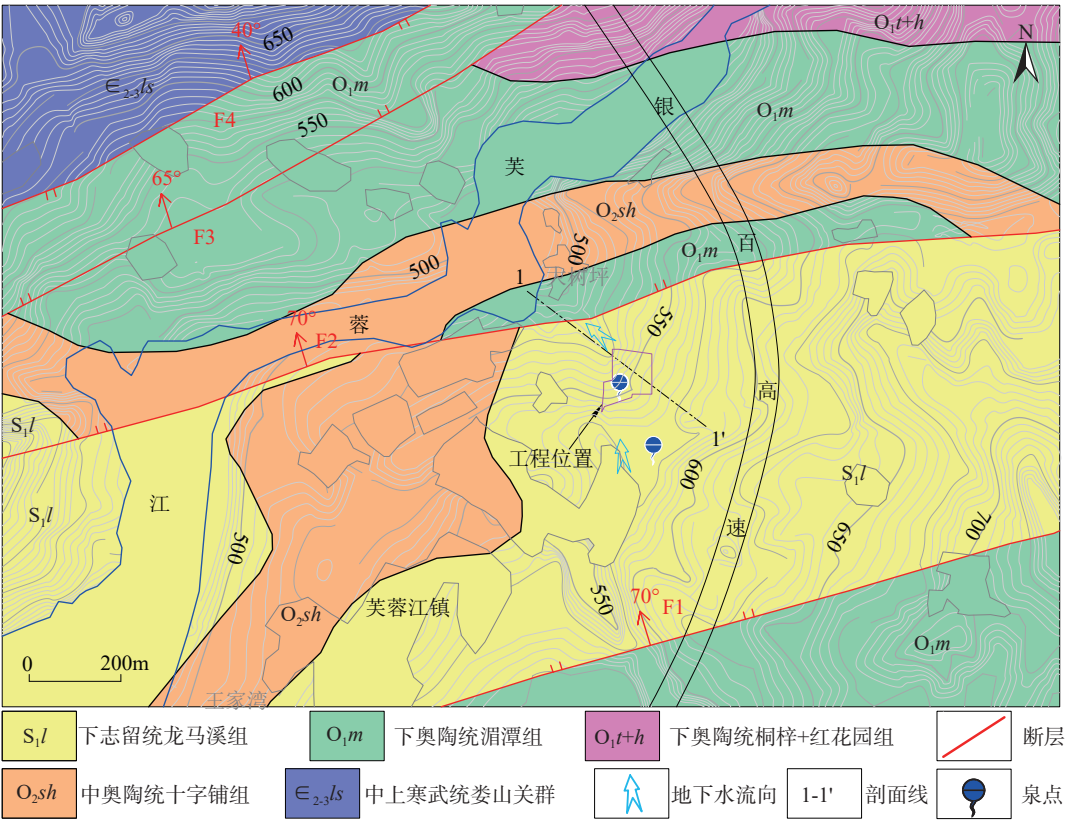


图 1 研究区地质平面图

Fig. 1 Geological plan of study area

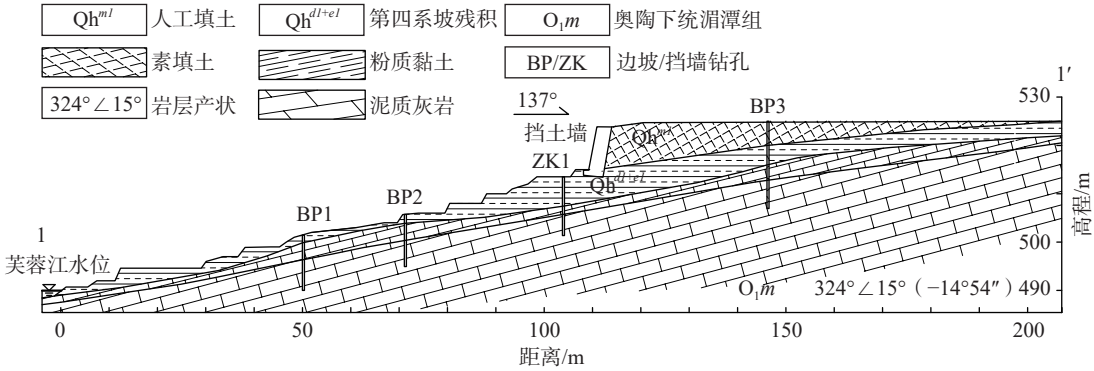


图 2 1-1'地质剖面图

Fig. 2 Geological cross-section 1-1'

120 m、60 m。地下水主要为第四系孔隙水和岩溶裂隙水,由大气降水入渗补给,由东南向西北径流,排入芙蓉江;工程位于沟槽中,地表和地下水易汇聚,填方边坡以上 30 m 有泉点,填方区有泉点,常年有水流出。

1.2 填方边坡概况

填方边坡高度约 7 m,挡墙分西侧和北侧两段,2020 年 4 月开挖挡墙基础,持力层为红黏土,6—7 月雨季回填土碾压过程中,挡墙顶、墙面和墙脚多处出现裂缝并不断扩展,挡墙基底红黏土较厚但地质剖面资料缺失,可能同时存在地基沉降和填方边坡滑坡,为保证安

全并查明边坡挡墙开裂原因开展以下工作:(1)墙后土体卸载,地表截水,疏通挡墙排水孔;(2)布置缝宽监测点 F1—F12,沉降兼水平位移监测点 C1—C6;(3)补充勘察:挡墙墙趾钻孔 ZK1—ZK6,1-1'断面钻孔 BP1—BP3。

2 裂缝形态及受力分析

2.1 裂缝形态与主平面关系

挡墙预设沉降缝,挡墙和路面各有裂缝 11 条、1 条;裂缝宽 5~10 mm,长 2~8 m,多贯穿挡墙顶底。挡墙形变、裂缝形态见图 3。

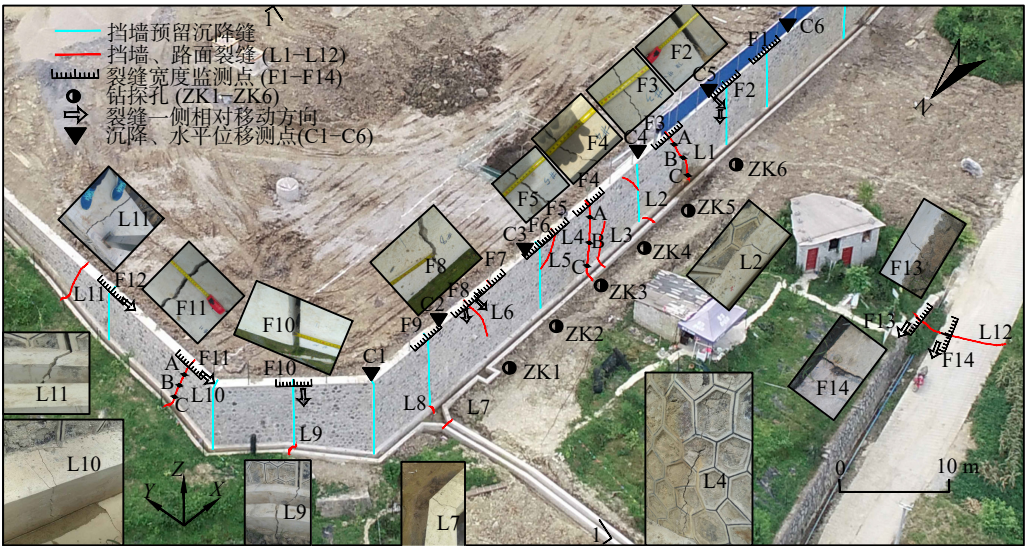


图3 挡墙沉降缝、监测点布置和裂缝形态图

Fig. 3 Layout of retaining wall settlement joints, monitoring points and crack forms

断裂是强度失效的主要形式之一,混凝土属于脆性材料,适用第一强度理论,断裂发生于最大主应力的主平面,裂缝沿主平面与墙面的交线发育。墙体一点最大主应力的主平面由应力状态决定,应力状态与约束条件和受力状态相关,挡墙约束条件、墙后土压力产生的墙体弯矩和水平剪力已知,仅挡墙沉降或挡墙滑动产生的墙体竖向剪力方向未知,对裂缝一点的三向应力状态分析可得到竖向剪力的方向,从而分析挡墙沉降或滑动的规律。

取裂缝一点的单元体,挡墙约束条件为墙顶、两侧自由,墙底嵌固,力学简化模型见图4,土体力学参数见表1,采用朗肯理论计算墙后土压力,由土压力计算弯矩得出竖向正应力,墙前和两侧自由面正应力和剪应力均为零,进而得出单元体的正应力和剪应力。

取裂缝一侧墙体自重计算竖向剪力,按均匀受剪得出单元体侧面竖向剪应力的方向,假设一个方向,则单元体应力分量可由式(1)表示。

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为应力的法向分量, τ_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{xz} 、 τ_{zx} 、 τ_{yz} 、 τ_{zy} 为应力的切向分量,坐标轴见图4,设最大

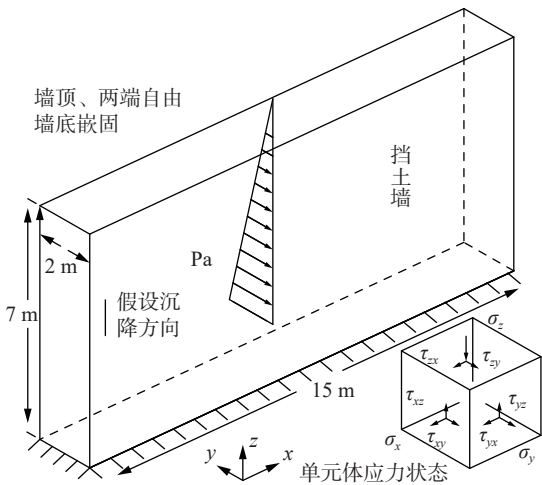


图4 挡墙力学简化模型

Fig. 4 Simplified mechanics model of retaining wall

拉应力的3个方向余弦为 l 、 m 、 n ,应力不变量 I_1 、 I_2 、 I_3 计算如式(2)—(4),特征方程见式(5)。

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (2)$$

$$I_2 = -(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yx}^2 + \tau_{zx}^2 \quad (3)$$

$$I_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 \quad (4)$$

表1 岩土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock-soil mass

岩土名称	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	孔隙比	饱和渗透系数/(m·s ⁻¹)
素填土	22	3	0.2	5	35	1.2	1×10 ⁻⁵
红黏土	19	2	0.19	35	7	1.1	1×10 ⁻⁷
中风化泥灰岩	26	200	0.2	300	35	0.6	1×10 ⁻⁹
挡土墙	26	200	0.2	300	35	0.6	1×10 ⁻⁵

$$\sigma^3 - I_1\sigma^2 - I_2\sigma - I_3 = 0 \quad (5)$$

式中, σ 为主应力, 解特征方程(5)可得 3 个主应力的值, 将最大主应力值代入式(6)可得到方向余弦, 确定主平面。

$$\begin{cases} (\sigma_x - \sigma)l + \tau_{xy}m + \tau_{xz}n = 0 \\ \tau_{xy}l + (\sigma_y - \sigma)m + \tau_{yz}n = 0 \\ l^2 + m^2 + n^2 = 1 \end{cases} \quad (6)$$

由主应力的唯一性, 当主平面和墙面的交线与裂缝形态相符, 说明假设竖向剪力方向与实际相符, 可知裂

缝两侧墙体相对沉降或滑动关系。根据墙体沉降规律和变形监测结果, 分析填方边坡滑动特征和范围。

2.2 应力结果分析

根据裂缝受力特点和倾斜方向可分为三组, 第一组 L1、L2、L6, 第二组 L3、L4、L5, 第三组 L9、L10、L11, 各组选取代表性裂缝 L1、L4、L10 进行研究, 每条裂缝取 A、B、C 三个单元体, L1A、L1B、L1C 分别代表墙顶以下 1.5、4、6 m 高度处 L1 裂缝的单元体, L4、L10 裂缝单元体高度相同。各单元体的应力和主平面见图 5。

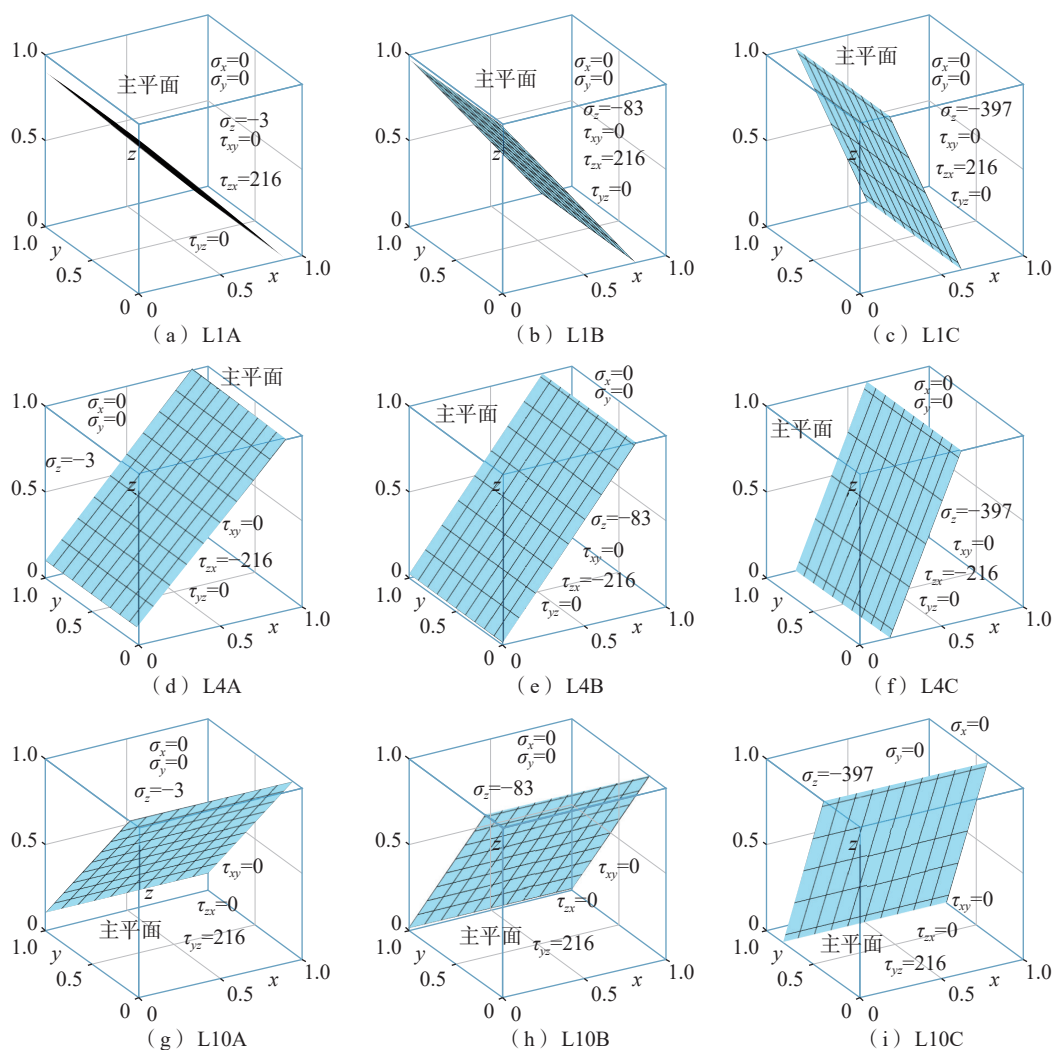


图 5 单元体应力状态

Fig. 5 Stress state of individual element

由图 5 得到以下结论: (1) 墙顶向下, 最大主应力的主平面与水平方向倾角逐渐变大, 实际裂缝倾角表现出相同的规律, 这是由于墙顶以下土压力逐渐增大, σ_z 逐渐增大而 τ_{xz} 不变, 因此主平面逐渐变陡, 挡墙破坏面与

主平面变化规律一致。 (2) 第一组裂缝各单元体的 τ_{xz} 为正, 作用在 x 轴正面剪应力沿 z 轴正向, 裂缝南侧竖向剪力向上, 南侧相对沉降小; 同理可知第二组裂缝南侧相对沉降大, 第三组裂缝西侧相对沉降大, L12 可简化

为平面应力状态,剪应力与裂缝夹角约 45° ,可知该区域边坡土体蠕滑方向为西北向。(3)三组裂缝两侧墙体相对沉降可知,挡墙、边坡整体沉降对称分布,对称轴为地形沟槽轴线,沉降两侧小中间大,虽然 L3、L4 裂缝局部不对称,但总体的趋势明显。

2.3 挡墙变形监测结果分析

挡墙的沉降监测结果见图 6。图 6 显示 C1、C2、C3 沉降量 1~3 mm, C4、C5、C6 沉降量分别为 15, 11, 12 mm, 前期沉降量、沉降速率较大,原因是前期降雨较多土体含水量高、压缩模量小,后期降雨少土体含水量减小,且经前期压密后,土体难以再压缩,因此后期沉降趋于稳定。图 6 显示 C4 沉降最大,沉降监测与应力分析揭示的相对沉降关系相符,表明通过应力状态分析的沉降结果准确。

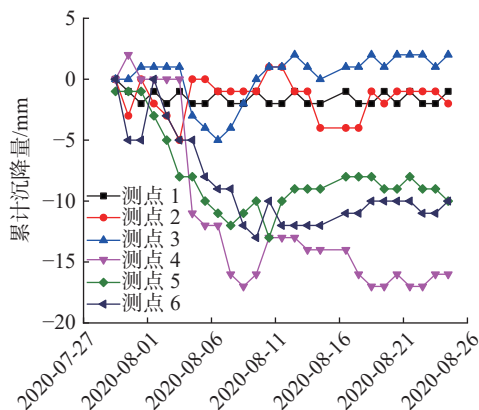


图 6 墙顶监测点沉降-时间曲线
Fig. 6 Settlement-time curve of retaining wall

地基沉降和滑坡都是引起挡墙沉降的因素,假设地基沉降主导, C1—C6 段挡墙高度相同基底附加压力相近,根据地基沉降分层总和法,基底附加压力产生的沉降量与压缩层厚度成正比,补勘揭示挡墙基底以下为红黏土、强中风化泥灰岩, C2—C5 基底压缩层厚度分别为 3.1, 3.1, 2.5, 2.1 m, 沉降量与压缩层厚度无比例关系,说明地基压缩沉降为挡墙开裂的次要因素,主导因素为挡墙的蠕滑。

挡墙水平位移监测结果见图 7,各测点中 C4 水平位移最大,原因是该点地下水发育,监测期间上升泉水量约 1 L/min,地下水导致土体软化墙底摩擦系数降低,因此在外力作用下沉降和滑移均较大, C1—C3 段水平位移相近约为 35 mm,说明该段挡墙属同一滑动区,该段挡墙位移较大而沉降较小,原因是挡墙底有反坡,墙体向前滑移的同时上移,抵消了一部分沉降; C5、C6 水平位移量逐渐减小为 11 mm 和 8 mm,原因是稳定区墙

体约束作用逐渐增大。各测点前期位移量和位移速率较大,原因是前期降雨量多土体为可塑、软塑状,挡墙底面摩擦系数小,后期降雨量少土体为硬塑状摩擦系数大,且挡墙发生位移后主动土压力减小,因此水平位移趋于稳定。

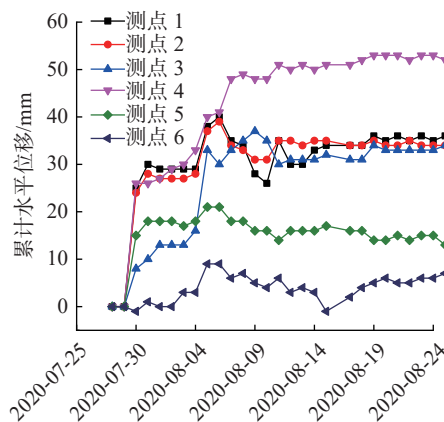


图 7 墙顶监测点水平位移-时间曲线
Fig. 7 Displacement-time curve of retaining wall

3 非饱和降雨入渗影响分析

填方边坡降雨后发生挡墙开裂和蠕滑,说明降雨对其稳定性的影响较大,为研究降雨强度和持续时间对其稳定性的影响程度,采用 FLAC^{3D} 进行研究,具体步骤为: (1)建立几何模型、设定边界条件; (2)确定渗流分析参数和工况(降雨强度、入渗边界和持续时间); (3)采用 fish 函数实现非饱和降雨入渗,渗透系数、负孔隙水压力、入渗边界条件随饱和度实时变化,抗剪强度的修正; (4)强度折减法计算边坡安全系数。

3.1 模型建立和约束边界条件

基于 1-1'剖面建立三维模型,长×高×厚为 120 m×27 m×4 m,共划分 11 420 个六面体网格, 14 334 个节点,采用摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)本构模型,对模型 4 个侧面施加法向速度约束,对底面施加固定约束,计算模型见图 8。

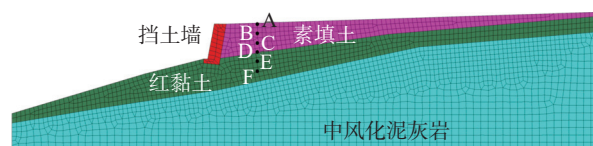


图 8 计算模型及测点布置图
Fig. 8 Calculation model and layout of measuring points

3.2 计算参数及工况

岩土体物理力学参数见表 1。默认土颗粒不可压

缩, Biot 系数 1, 流体模量 2 GPa, 流体抗拉强度 200 kPa, 流体重度 10 kN/m³。

降雨滑坡常见 2 种情况^[12]: (1)暴雨、大暴雨持续时间短。(2)中雨、小雨持续时间长。根据气象资料, 研究区最大降雨强度 250 mm/d。因此选择一般工况、小雨(10 mm/d)持续 8 d 和暴雨(250 mm/d)持续 1 d, 3 种工况进行计算。

降雨入渗边界条件在地表积水前后分别采用流量入渗和压力入渗边界。入渗流量取降雨强度和入渗率的较小值, 入渗率简化取饱和和渗透系数; 压力入渗边界取水压力为 0 kPa(表 2)。

表 2 计算工况
Table 2 Calculated working conditions

工况	一般工况	小雨工况	暴雨
降雨强度/(mm·d ⁻¹)	0	10	250
降雨持续时间/d	—	8	1
流量入渗边界/(m·s ⁻¹)	—	1.1×10 ⁻⁷	2.8×10 ⁻⁶
压力入渗边界/kPa	—	0	0

3.3 非饱和降雨入渗的 Fish 函数

采用 Fish 函数对渗透系数、入渗边界条件和抗剪强度的变化过程进行编程。

(1)非饱和渗流分析功能的 Fish 函数

地下水位以上土体为非饱和状态, 存在负孔隙水压力, 而 FLAC^{3D} 软件默认饱和度小于 1 时孔隙水压力为 0 与实际情况不符, 采用 Fish 语言编写饱和度与负孔隙水压力关系函数。非饱和渗流的关键是根据饱和度实时更新渗透系数, 思路参考文献[7]、[12]。

负孔隙水压力与体积含水率关系通常用 Van^[13]在 1980 年提出的式(7)表示。

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\varphi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (7)$$

式中: θ ——体积含水率(cm³/cm³);

θ_r 、 θ_s ——残余、饱和和体积含水率/(cm³·cm⁻³);

φ ——基质吸力/kPa;

a 、 n 、 m ——拟合参数, 假定黏土、素填土 a 分别取 40、30, n 均取 3.3, m 均取 1。

由 $\theta = ns$, n 为孔隙率, s 为饱和度, 代入可得出负孔隙水压力与饱和度的关系, 如式(8)。

$$s = s_r + \frac{1 - s_r}{\left[1 + \left(\frac{\varphi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (8)$$

式中: s ——土体饱和度/%;

s_r ——残余饱和度/%, 一般取 5%。

按勘察的红黏土塑性状态和素填土含水量设置节点初始饱和度; 由节点饱和度计算负孔隙水压力赋给单元。

非饱和渗透系数与负孔隙水压力的关系常采用 Gardner 总结出的式(9)表示。

$$k_w = \frac{k_s}{1 + a \left[\frac{(u_a - u_w)}{\rho_w g} \right]^n} \quad (9)$$

式中: k_w 、 k_s ——非饱和、饱和渗透系数/(m·s⁻¹);

a 、 n ——拟合参数, 一般土体取 $a=1$ 、 $n=2$;

$(u_a - u_w)$ ——孔隙内气压与孔隙水压力差/kPa;

ρ_w ——流体密度/(kg·m⁻³);

g ——重力加速度 (m·s⁻²)。

由单元负孔隙水压力计算非饱和渗透系数赋给单元。

(2)降雨入渗边界功能的 Fish 函数

入渗边界是动态变化的, FLAC^{3D} 入渗边界改变的流程为: (1)坡面 face 分组在 slot1、slot2 中分别为 m1、m2; (2)遍历所有单元, 根据单元上部 face 是否为 m1 分组选择位于坡面的单元; (3)判断单元上部节点是否饱和, 在 slot1 中对饱和单元的上表面分组 m11; (4)遍历结束后 slot1 中饱和、非饱和的单元表面分组为 m11、m1, 分别施加压力、流量边界条件; (5)下一循环前重置分组, slot2 中选择 m2 分组的表面, 在 slot1 中将坡面重分组为 m1。将流程定义为 Fish 函数, 渗流计算时调用实现入渗边界的变化。相比文献[7]采用 interface 寻找单元外表面, 无需额外建立接触面和定义接触面刚度, 但为确保坡面均为单元上表面, 建模需采用六面体单元。

(3)非饱和区抗剪强度修正的 Fish 函数

非饱和土体抗剪强度采用 Fredlund 公式, Fish 函数编写参考文献[14]。

$$\tau_f = c' + (\sigma - \mu_w) \tan \varphi' + (\mu_a - \mu_w) \tan \varphi'' \quad (10)$$

式中: c' ——土体有效黏聚力/kPa;

φ' ——土体有效内摩擦角/(°);

σ ——破坏面总法向应力/kPa;

μ_w 、 μ_a ——破坏面孔隙水压力、孔隙气压力/kPa;

φ'' ——抗剪强度随基质吸力变化的内摩擦角/(°)。

式(10)表明非饱和区负孔隙水压力提高了抗剪强度。

3.4 计算结果与分析

FLAC^{3D} 中渗流时长(工况时间)等于时间步乘以步

数。渗流计算完成后按强度折减法计算边坡安全系数,安全系数和监测结果如图 9—12。

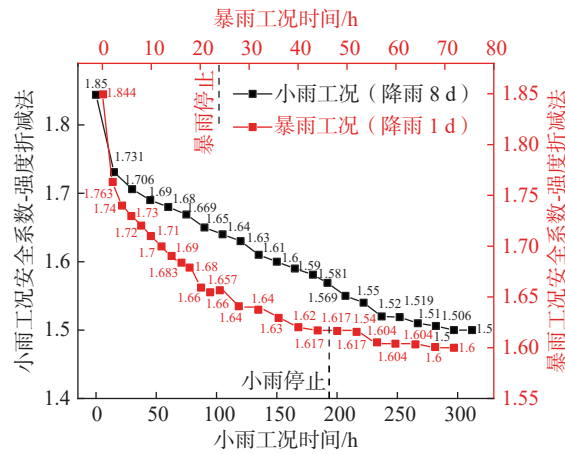


图 9 安全系数与时间曲线
Fig. 9 Safety factor-time curve

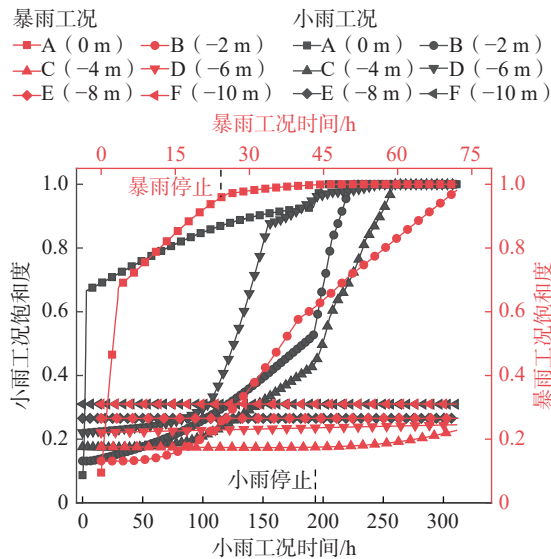


图 10 饱和度与时间曲线
Fig. 10 Saturation-time curve

(1)安全系数与降雨关系

由图 9 可知一般工况安全系数为 1.85,此时回填土和红黏土为非饱和状态,负孔隙水压力和抗剪强度不受降雨削弱,整体稳定性较好。降雨初期安全系数降低较快,原因是坡面未饱和降雨全入渗,土体重度增加较快,坡面饱和后产生地表径流仅部分入渗,因此后期安全系数降低较慢。小雨持续 8 d,安全系数降低 14.5%,降雨停止后降低 4.3%;暴雨持续 1 d,安全系数降低 10%,降雨停止后降低 3.5%。结合图 9、图 10 可知,降雨停止后各监测点饱和度继续增大,有效应力持续减小,因此雨停后一段时间安全系数会持续降低,原因是雨水继续

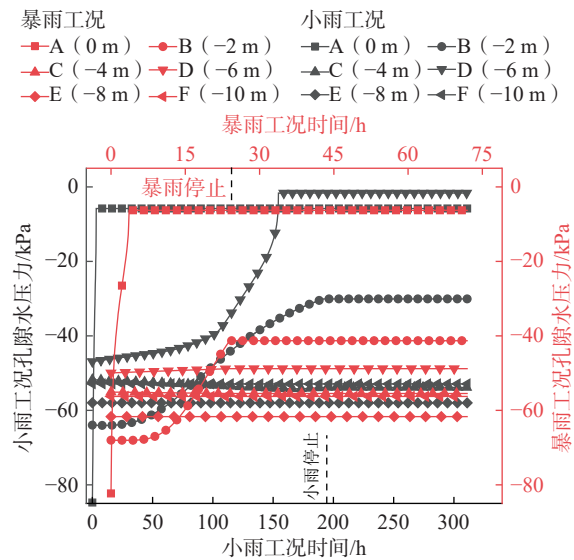


图 11 孔隙水压力与时间曲线
Fig. 11 Pore water pressure-time curve

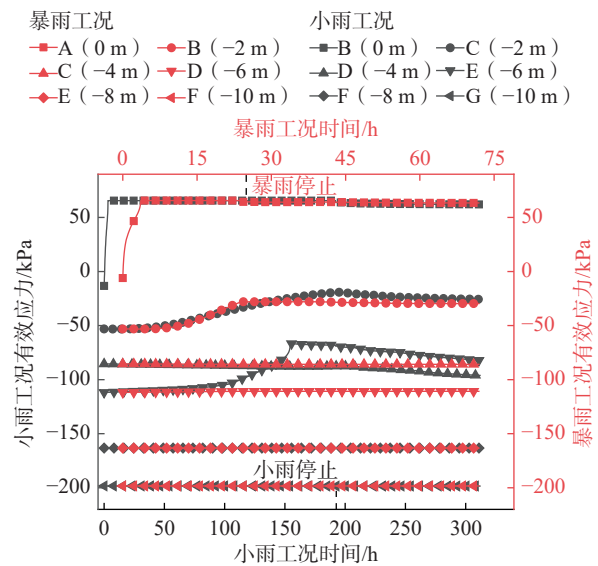


图 12 有效应力与时间曲线
Fig. 12 Effective stress-time curve

下渗,但由于坡面无雨水入渗补给,安全系数降低幅度较小,安全系数仍较大,无整体失稳风险。

(2)饱和度与降雨关系

由图 10 可知,降雨后边坡土体饱和度逐步增大,小雨工况坡面下 6 m 达到饱和时间仅次于坡面,说明入渗的雨水汇集在填土和红黏土界面,原因是红黏土渗透系数小为相对隔水层,降雨停止后坡面下 2 m、4 m 位置饱和度持续增大。暴雨工况,仅坡面下 2 m 范围饱和度受入渗影响,降雨停止后饱和度持续增大。入渗的雨水受重力作用向下运移从而导致雨停后饱和度持续增大。

(3) 孔隙水压力与降雨关系

由图 11 可知,降雨后边坡土体负孔隙水压力逐步消散,小雨工况坡面下 6 m 位置消散速度仅次于坡面,原因是红黏土为相对隔水层,入渗雨水汇集于红黏土界面。暴雨工况仅坡面下 2 m 范围负孔隙水压力依次消散。小雨和暴雨停止后一段时间,各点孔隙水压力均保持不变。

(4) 有效应力与降雨关系

由图 12 可知,小雨工况边坡土体负孔隙水压力逐渐消散,导致有效应力逐步减小,坡面土体有效应力变为拉应力。根据朗肯土压力理论,黏性土表面主动土压力为负值,存在张拉裂缝区,文献[1]模型试验坡面出现拉裂缝,因此数值模拟与理论和试验结果相符;6 m 深位置有效应力降低幅度较大,说明红黏土界面受降雨入渗影响较大。暴雨工况坡面土体同样产生拉应力,降雨对有效应力影响深度为 2 m。土体有效应力降低后,将导致抗剪强度降低。

4 边坡变形机理和分区

4.1 边坡变形机理分析

综上所述,诱发边坡变形的影响因素主要包括:(1)填方边坡位于沟谷地形,地表水和地下水易汇集,红黏土遇水后抗剪强度降低,为边坡滑动提供了良好的滑床条件;(2)填方边坡回填加载下滑力增加;(3)回填碎石土孔隙率和渗透系数大,形成了良好的入渗通道,降雨入渗后土体重度增大,负孔隙水压力消散,有效应力降低,抗剪强度降低;(4)红黏土渗透系数小,为相对隔水层,雨水在红黏土界面汇集,导致界面有效应力、抗剪强度降低。以上不利因素共同作用导致了填方边坡的变形。

4.2 滑坡分区

裂缝应力状态分析和变形监测结果显示,填方边坡整体沉降对称分布,滑坡主轴沿沟谷主轴,裂缝 L11、L1、L12 为滑坡两侧周界,滑坡可分为 I、II 两个区域见图 13, I 区为整体滑动区, II 区为局部滑动区。由于 II 区地下水发育,其变形和沉降均大于 I 区。

1 个月后发现下方道路水沟预埋钢筋鼓胀见图 13,说明该位置位于滑坡的鼓胀区,填方边坡滑动方向判别与实际相符。

5 结论

(1)由挡墙裂缝单元体应力分析的剪力方向可判断裂缝两侧挡墙相对沉降关系,与变形监测揭示的沉降变

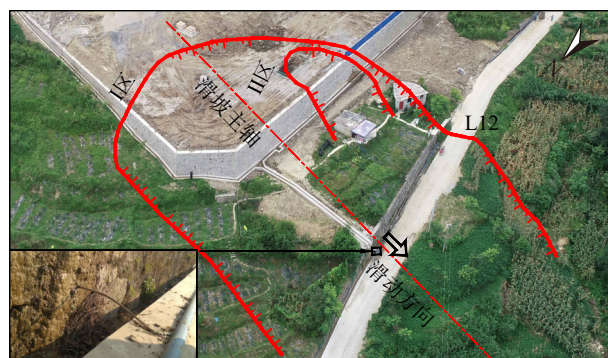


图 13 滑坡分区图

Fig. 13 Landslide zoning map

形结论一致。因此可通过挡墙裂缝特征分析、判别填方边坡的沉降变形。

(2)填方边坡受长期小雨和短期暴雨入渗作用后安全系数均显著降低,长期小雨较短期暴雨影响深度大,降雨停止后边坡安全系数会持续下降,防治填方边坡滑坡的关键是防降雨入渗。

(3)降雨后土体负孔隙水压力逐步消散,有效应力逐步降低,长期小雨红黏土界面饱和度显著增大,负孔隙水压力消散较快,界面有效应力和抗剪强度降低,因此边坡安全系数不断降低。

(4)降雨后坡面产生拉应力与理论和模型试验结果相符。挡墙裂缝发育和发展的过程与边坡变形阶段的对应关系还有待进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 孟生勇, 江兴元, 杨义, 等. 降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 104 - 112. [MENG Shengyong, JIANG Xingyuan, YANG Yi, et al. An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 104 - 112. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 许源华, 谭化川, 刘品. 桩墙联合支挡结构在陡坡填方滑坡治理中的应用 [J]. 路基工程, 2022(5): 144 - 149. [XU Yuanhua, TAN Huachuan, LIU Pin. Application of pile-wall combined retaining structure in treatment of steep slope filled landslide [J]. Subgrade Engineering, 2022(5): 144 - 149. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 周禹熹. 软基填方路堤滑坡的形成机制与影响因素分析——以达陕高速公路某滑坡为例 [D]. 成都: 成都理工大学, 2019. [ZHOU Yuxi. Analysis on the formation mechanism and influencing factors of landslide in soft ground embankment [D]. Chengdu: Chengdu University of

- Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 胡勇生, 燕俊松, 唐宁. 贵州某拟建机场高填方边坡破坏模式及稳定性分析 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2018, 29(3): 38 - 42. [HU Yongsheng, YAN Junsong, TANG Ning. Failure mode and stability analysis of high fill slope of a proposed airdrome in Guizhou Province [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2018, 29(3): 38 - 42. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 汪标, 易庆林, 邓茂林, 等. 降雨与库水作用下谭家河滑坡变形响应规律分析 [J]. *人民长江*, 2023, 54(4): 141 - 149. [WANG Biao, YI Qinglin, DENG Maolin, et al. Analysis on deformation response law of Tanjiahe landslide induced by rainfall and reservoir water [J]. *Yangtze River*, 2023, 54(4): 141 - 149. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 金德山. 滑坡裂缝的识别与分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2002, 13(2): 50 - 52. [JIN Deshan. Identification and analysis of landslide fissures [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2002, 13(2): 50 - 52. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 杨阳. 黄土滑坡裂缝发育特征及其对滑坡孕灾模式的影响——以泾阳南塬黄土滑坡为例 [D]. 西安: 长安大学, 2016. [YANG Yang. Crack characteristics of loess landslides and its influence on landslides geo-hazard model [D]. Xi'an: Changan University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陈菲, 王塞, 高云建, 等. 白格滑坡裂缝区演变过程及其发展趋势分析 [J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(5): 71 - 78. [CHEN Fei, WANG Sai, GAO Yunjian, et al. Evolution of the cracking zones at the site of the Baige landslides and their future development [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(5): 71 - 78. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 于永堂, 郑建国, 张继文, 等. 黄土高填方场地裂缝的发育特征及分布规律 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(4): 85 - 92. [YU Yongtang, ZHENG Jianguo, ZHANG Jiwen, et al. Development and distribution characteristics of ground fissures in high loess filled ground [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 85 - 92. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 赵建军, 余建乐, 解明礼, 等. 降雨诱发填方路堤边坡变形机制物理模拟研究 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(8): 2933 - 2940. [ZHAO Jianjun, YU Jianle, XIE Mingli, et al. Physical model studies on fill embankment slope deformation mechanism under rainfall condition [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(8): 2933 - 2940. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陈林万, 张晓超, 裴向军, 等. 降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(6): 151 - 160. [CHEN Linwan, ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, et al. Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(6): 151 - 160. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王青友. 基于FLAC^{3D}二次开发降雨入渗诱发非饱和黄土边坡破坏规律数值模拟研究 [D]. 石家庄铁道大学, 2019. [Wang Qingyou. Numerical simulation of failure law of unsaturated loess slope induced by rainfall infiltration in secondary development based on FLAC^{3D} [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [13] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892 - 898.
- [14] 谢强, 田大浪, 刘金辉, 等. 土质边坡的饱和-非饱和渗流分析及特殊应力修正 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(3): 879 - 892. [XIE Qiang, TIAN Dalang, LIU Jinhui, et al. Saturated unsaturated seepage analysis and special stress correction of soil slopes [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2019, 40(3): 879 - 892. (in Chinese with English abstract)]