

·地基与基础·



降雨入渗对边坡多场特征的影响规律分析

刘明维, 李佩伦, 曾启富, 谭定杰

(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: 为探究降雨入渗对边坡多场特征的影响, 选取实际工程边坡建立模型, 并结合区内实际降雨工况, 利用 Geo Studio 有限元软件的 SEEP/W、SIGMA/W、SLOPE/W 功能模块, 在降雨强度 189.3 mm/d、持续时间 24 h 的条件下, 针对未处理的原始边坡、全面化学加固的边坡、坡脚局部墩式加固的边坡以及等距离布孔加固的边坡, 进行渗透行为、位移变化趋势以及稳定性的分析评估。结果表明: 伴随着雨水的连续浸润, 坡面的上层土壤先行实现饱和, 从而构成临时性的饱和区域, 该区域的饱和界线逐步内向扩展; 同时, 鉴于粉土层具有较高的渗透率, 因此在降雨影响下, 原始边坡的稳定性指标迅速下降。在各类改良边坡措施中, 全面布设式的改良措施对于拦截雨水效果尤为显著。经过全面评估, 这种全面布设式的固坡方法在抗渗透性能上尤为突出, 而针对坡脚的定点墩式固坡方案则在确保边坡稳定性和经济成本上占据优势, 可为实际工程中的边坡稳定性分析提供参考。

关键词: 降雨入渗; 边坡; 边坡稳定性; 数值模拟

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0212-10

Influence of rainfall infiltration on multi-field characteristics of slopes

LIU Mingwei, LI Peilun, ZENG Qifu, TAN Dingjie

(National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To explore the influence of rainfall infiltration on the multi-field characteristics of slopes, the actual engineering slope is selected to establish a model, and combined with the actual rainfall conditions in the area, the SEEP/W, SIGMA/W and SLOPE/W functional modules of GeoStudio finite element software are used to analyze and evaluate the infiltration behavior, displacement trend and stability of the untreated original slope, the slope with comprehensive chemical reinforcement, the slope with local pier reinforcement at the foot of the slope and the slope reinforced with equidistant holes under the condition of 189.3 mm/d rainfall intensity and duration of 24 h. The results show that with the continuous infiltration of rainwater, the upper soil of the slope surface is saturated first, thus forming a temporary saturation area, and the saturation boundary of this area gradually expands inward. At the same time, in view of the high permeability of the silt layer, the stability index of the original slope decreases rapidly under the influence of rainfall. Among the various slope improvement measures, the comprehensive deployment of improvement measures are particularly effective for intercepting rainwater. After comprehensive evaluation, this comprehensive deployed slope consolidation method is particularly outstanding in terms of anti-permeability performance, and the fixed-point pier slope consolidation scheme for the slope foot has advantages in ensuring slope stability and economic cost, which can provide reference for slope stability analysis in practical engineering.

Keywords: rainfall infiltration; slope; slope stability; numerical simulation

收稿日期: 2024-12-26

作者简介: 刘明维 (1972—), 男, 博士, 教授, 从事港口工程设计计算理论的教学与研究。

边坡稳定性问题,作为土力学领域中的经典难题之一,其复杂性与重要性不言而喻^[1]。降雨入渗,作为影响边坡稳定性的关键因素,其作用不容忽视。随着降雨量的增加,边坡土体的饱和度随之上升,这不仅会导致土体的摩擦角降低,还会对边坡的稳定性造成不利影响。此外,降雨还可能为边坡带来额外的荷载,增加坡向力,进一步威胁边坡的稳定性。因此,深入研究降雨入渗对边坡稳定性的具体影响,对于边坡的设计和防护工程而言,具有至关重要的意义。这不仅能够提高边坡工程的安全性,还能为相关领域的科学研究提供宝贵的理论支持。

Neuman^[2]将坡体划分为饱和区域与不饱和区域,并据此构建了饱和与非饱和状态下的渗透流动方程,这为不同饱和度条件下岩土体渗透性的计算奠定了理论根基。Fredlund等^[3]通过融合饱和土壤中水分传输的理论以及非饱和土壤的固结原理,成功推导出饱和与非饱和状态下的渗流控制方程式,为模拟边坡在暂时性渗流状态下的行为提供了创新的理论支持。Trandafir等^[4]通过融合室内实验与仿真分析,对降雨环境下边坡基质的吸力变动进行探究,并构建了一个双参数的公式,该公式能够预测在给定降雨量级下,边坡土壤水分的渗透深度。张社荣等^[5]借助ABAQUS有限元软件,对降雨导致的瞬态渗流场进行模拟,进而探讨孔隙水压力分布、位移场以及等效塑性应变随时间演变的规律。通过对香港地区特定环境的深入研究,杨煜等^[6]运用数值模拟技术,全面探讨了降雨入渗对坡体稳定性的作用机制,结果表明,降雨的时长、强度以及土壤的初始湿度均与坡体稳定性有着紧密的联系。黄浩^[7]运用极限平衡原理及有限元分析技术,对由降雨引发的边坡破坏实例展开深入探讨,剖析了在降雨影响下边坡发生破坏的具体成因。魏刚强^[8]运用数值分析技术,探讨降水终止后对斜坡稳固性的作用,构建两种典型的降雨后滑坡数值模型,揭示了边坡稳定性滞后效应的内在原理,并明确了影响其稳定性的关键要素。通过对滇西红层软岩的工程特

性进行深入分析,吴国雄等^[9]采用FLAC3D软件探讨了在多样化降雨条件下,包括降雨强度及其延续时间对红层软岩构成的超高路堤稳定性和变形模式的作用规律。研究发现,在连续降雨影响下,超高路堤的安全性能指标呈现下降趋势,并且这一指标会随着降雨强度的增加而进一步减小。在FLAC3D环境下,蒋中明等^[10]利用FISH编程语言成功研发了一款针对边坡降雨入渗的修正模块,该模块能够进行饱和与非饱和条件下的渗流数值分析。通过与先前研究成果的对照分析,该程序的有效性和准确性得到了确认。吴旭敏等^[11]为合理评价降雨入渗对边坡稳定性的影响,选取西南地区某工程边坡建立模型,并结合区内实际降雨工况,运用GeoStudio等软件进行模型建立及参数选取,利用有限元法对考虑降雨历时、强度、主降雨类型、前期降雨的边坡稳定性进行分析。

在本研究中,以京杭大运河浙江区段三级航道的杭州八堡船闸建设项目为背景,利用有限元软件GeoStudio中的SEEP/W、SIGMA/W、SLOPE/W 3个模块,建立数值模型。分析在特定降雨条件下,在降雨强度189.3 mm/d且连续降雨24 h的情况下,对比原始边坡以及采用不同改良措施(涵盖全面化学改良、坡脚局部墩式加固和等距布孔加固3种改良方法)的边坡,分析其渗透特性、位移变化规律和稳定性表现。本研究旨在为边坡工程的设计与优化提供科学依据和技术支持。

1 边坡概况

项目依托工程为京杭运河浙江段三级航道整治工程杭州段(八堡船闸段)CZSG-2标段,是京杭大运河三级航道路线在杭州段的末端新开凿航道,总长度为2.973 km。本船闸工程土方开挖约265.4万m³,基坑开挖边坡高度最大约15 m,工程体量大、工期紧、各专业工程之间衔接要求紧密,施工交叉干扰多;与此工程紧密相关的地下水主要是第四系孔隙潜水,存在于地表浅层,主要含水层由冲积和海积作用形成的黏土、粉土层等组成,易振动液化,发生流土和管涌现象;八

堡船闸主体在施工过程中突出存在基坑开挖安全性、基坑降水可靠性等方面的问题。为保证施工安全,针对降雨对边坡的稳定性研究尤为重要。

在数值模拟分析中,为探究不同加固方式对边坡稳定性的影响,主要采用3种加固方式。

1) 全面化学加固的边坡:探究改良区的加固厚度对改良边坡稳定性的影响进行研究,在其他影响因素不变的情况下,选取1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 m 5种加固厚度进行分析。

2) 坡脚局部墩式加固的边坡:在其他影响因素不变的前提下,对不同深度与不同宽度墩体对改良边坡稳定性的影响进行研究。在墩体宽度统一取3 m时,选取墩体高度分别为0、0.5、1.0、1.5、2.0 m;在墩体高度统一取0.5 m时,选取墩体宽度分别为1、2、3、4、5 m。

3) 等距离布孔加固的边坡:在其他影响因素不变的情况下,对探究钻孔间距与钻孔深度对改良边坡稳定性的影响进行研究。在钻孔间距统一取1 m时,选取钻孔深度1、2、3、4、5、6 m;在钻孔深度统一取5 m时,选取钻孔间距2.5、2.0、1.5、1.0、0.5 m。

2 降雨入渗对边坡的多场特征影响规律模拟

2.1 边坡有限元网格划分

本研究针对京杭大运河浙江区段三级航道的整治工程中某一船闸基坑的边坡,构建了一个初始的边坡有限元分析模型。根据郑颖人等^[12]的成果表明,当模型右侧端点至坡脚的距离为坡高的1.5倍、左侧端点至坡顶的距离为坡高的2.5倍,且模型的垂直边界高度至少为坡高的2倍时,所得到的数值模拟结果最为精确。本文采用的分析模型见图1,其垂直边界的高度设定为坡高的2倍以上,即35 m。

为了避免过长的计算时间和防止软件崩溃,同时确保计算结果的精度不受影响,在不影响计算精度的前提下,有效地节约计算资源并提升运算效率,综合考虑精度要求、边界条件和计算时间等因素,优化了计算过程,实现效率与精度的

平衡。降雨边坡计算网格模型见图2,有限元分析所采用的网格划分共计包含7 583个单元以及7 806个节点。

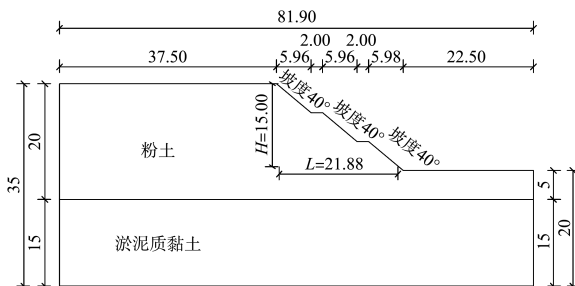


图1 边坡模型 (单位: m)
Fig. 1 Slope model (unit: m)

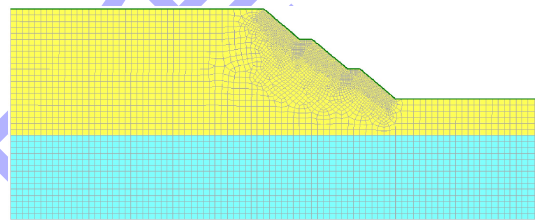


图2 降雨边坡计算网格模型
Fig. 2 Computational mesh model of rainfall slope

2.2 模型边界条件及初始条件确定

在开展数值模拟的过程中,明确设定解条件至关重要,其中包括边界设定与初始状态的定义,均为计算过程中不可或缺的参数。对模型边界条件及初始条件的具体设定说明如下:

1) 模型的基底设置为不可渗透边界,而模型的左右两侧则设定为恒定水头界面,水头以上则视为无流量边界。

2) 整个斜坡表面被划分为自然入渗边界,在降雨强度超过斜坡土壤渗透能力的情况下,部分雨水会沿斜坡表面流向低洼处,形成地表水流,并在斜坡底部汇集,此时将该边界视为恒定水头边界;反之,若降雨强度低于土壤渗透率,则可将边界作为流量边界来处理。

在降雨影响下,边坡的渗透流程展现为一种随时间逐渐变化的繁琐机制。在开展边坡的降雨渗透研究之始,确立模型的起始状态是不可或缺的步骤,以确保分析的正确性。本研究选用预设

水头值作为降雨渗透之前边坡稳定性分析的基准条件。

2.3 计算参数选取及降雨方案设计

2.3.1 土-水特征曲线

探究非饱和渗透现象时, 必须重视基质的吸力作用。该吸力的大小与土壤中水分含量紧密相连, 两者间的相互关系被称作土壤-水分特征曲线。较为繁琐的是获取土-水特征曲线的过程, 它通常依赖于多种参数的整合, 如体积压缩率、颗粒分布曲线、孔隙水压力区间以及饱和土壤水分含量等指标的综合分析。然而, GeoStudio 的 SEEP/W 功能模块能够简化这一流程, 用户仅需手动输入粒度分布曲线和饱和土壤水分含量, 软件便可以利用内置数据库中的资料进行拟合分析, 进而导出土-水特征曲线。粉土和淤泥质黏土的土水特征曲线见图 3。

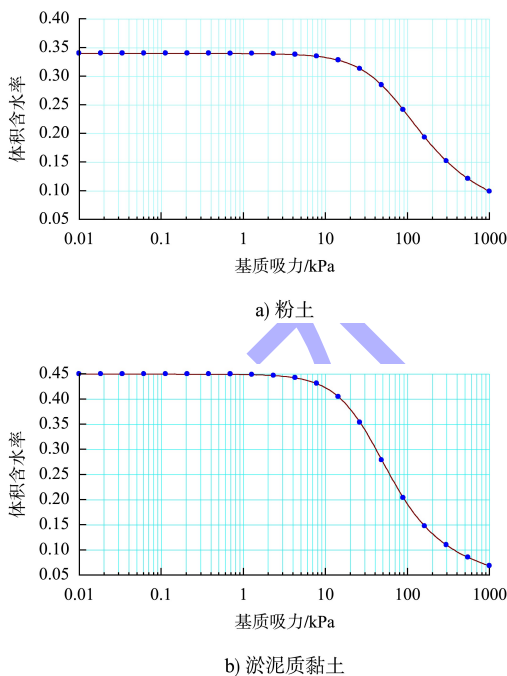


图 3 土-水特征曲线
Fig. 3 Soil-water characteristic curves

2.3.2 渗透系数曲线

在 GeoStudio 的 SEEP/W 组件里, 用户可以依据所提供的饱和土壤渗透率数据, 采用内嵌的 Fredlund 或 Van Genuchten 模型对土壤渗透率曲线进行匹配, 渗透系数曲线见图 4。

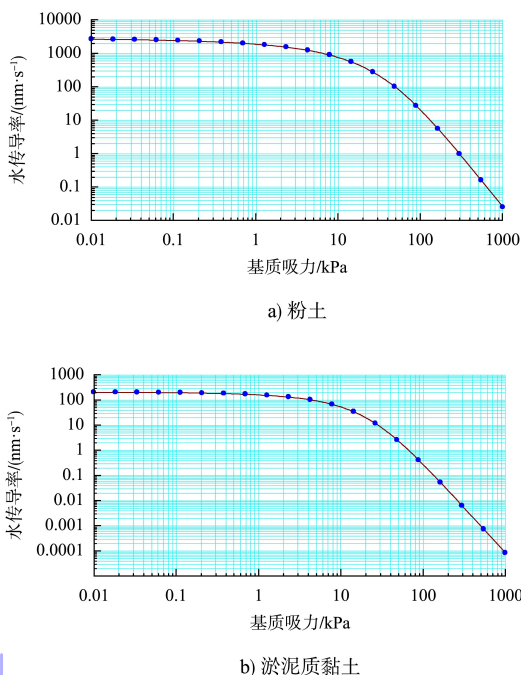


图 4 渗透系数曲线
Fig. 4 Permeability coefficient curves

2.3.3 土体其他参数

粉土层及淤泥质黏土层的参数见表 1。

表 1 土层参数
Tab. 1 Soil parameters

土层	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
粉土	1 940	11.0	0.25	7.18	24.04
淤泥质黏土	1 790	2.5	0.30	10.50	7.40

2.3.4 降雨方案设计

根据气象数据, 浙江省沙镇历年平均降雨量为 1 380 mm, 其中历史最高年降雨量达到 2 356 mm, 日降雨量巅峰值为 189.3 mm。历年平均降雨日数为 140.2 d, 而最长的一次连续降雨持续了 17 d。多年平均年降雪天数 9.8 d, 多年最大积雪深度 230 mm。在模拟计算过程中, 采用 189.3 mm 的日最大降雨量, 并假设每降雨 1 d 后暂停 3 d 降雨, 以此作为最不利的暴雨情况进行分析。

3 数值模拟结果分析

3.1 降雨入渗对边坡体积含水率分布的影响

通常情况下, 将地下水位以下的土层定义为

饱和状态土层，而地下水位以上的土层则被视为不饱和状态土层。然而，因为毛细现象的存在，地下水能够上升，导致不饱和土层并非完全没有水分，即其体积含水量并非为零。在工程实践和学术探讨中，常常采用 V - G 曲线来描述不饱和土层的含水量变化。

不同时刻边坡体积含水率等值线见图 5，由图 5 可知，在起始阶段，边坡顶端区域的体积含水率为 0.22。伴随着降雨的浸润作用，边坡表面的土体体积含水量率先出现变动，说明降水的浸润首先对边坡的表层土体产生了影响。在重力以及水力坡度的共同影响下，雨水在边坡的竖直及水平方向上开始了移动过程。在 4 h 的降雨影响下，坡脚位置的含水率由原先的 0.32 升至 0.34，从而在局部形成了临时饱和带；至 8 h 后，这一临时饱和带已逐步上升，并扩展至边坡的首层台阶平台位置。随着持续降雨，该临时饱和带预计将继续沿边坡表面向上推进，其影响区域也会逐步拓宽^[13-14]。

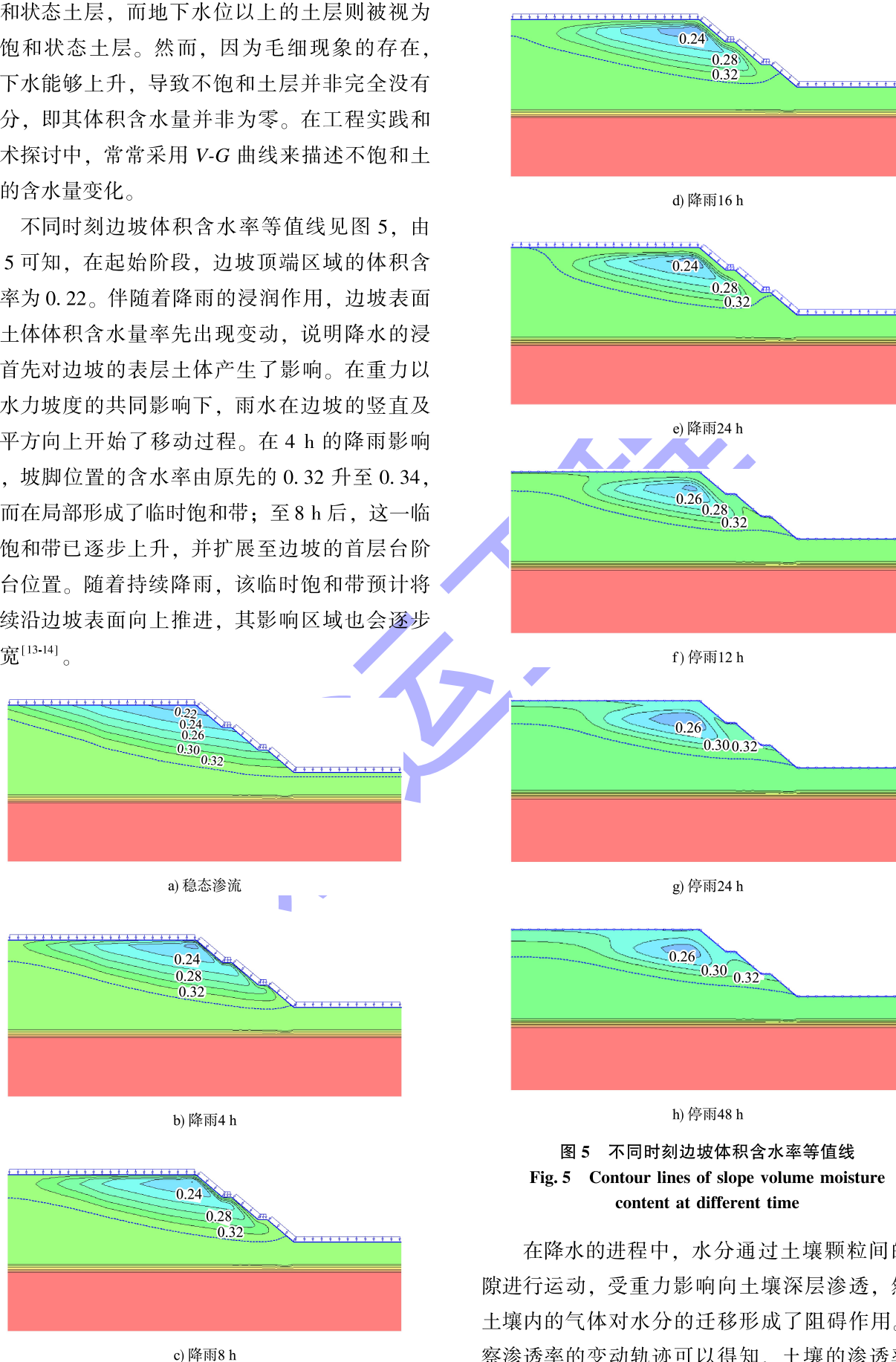


图 5 不同时刻边坡体积含水率等值线
Fig. 5 Contour lines of slope volume moisture content at different time

在降水的进程中，水分通过土壤颗粒间的缝隙进行运动，受重力影响向土壤深层渗透，然而土壤内的气体对水分的迁移形成了阻碍作用。观察渗透率的变动轨迹可以得知，土壤的渗透率并

非固定不变,它会跟随土壤水分含量的上升或下降而进行相应的调整。随着土壤中水分含量的上升,土壤的透水能力同样会增强,特别是在土壤水分趋近饱和的情况下,其透水性会达到顶峰。降水的渗透作用起初仅发生在坡面表层的土壤中,随着时间的延长,水分会逐步向坡体深处渗透。在降雨停止之后,土壤中的水分在重力的作用下持续进行迁移和再分布,直至土壤的体积含水量降低并稳定在一个相对固定的水平。

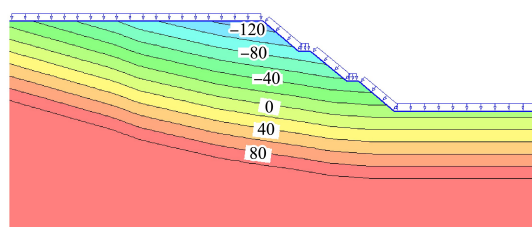
3.2 降雨入渗对孔隙水压力分布的影响

降水过程中,坡体内部的土壤含水量会发生变化,这将直接作用于内部孔隙水的压力分布状况。在地下水位以下,孔隙水压力通常为正值,这种压力通常被称为地下水静压,它随土壤深度的增加而呈线性增长,即深度越深,孔隙水压力越高。值得注意的是,这种压力的分布特性基本不会因雨水渗透而发生改变。地下水位线是正负孔隙水压力的分水岭,在此线上孔隙水压力恰好等于0;而在该线以上的地方,孔隙水压力则显示为负值。在非饱和土层中,基质吸力对于土层的抗剪性能起着决定性作用。雨水渗透会使土层的水分含量上升,此变化既提升了孔隙水压力,又削弱了基质吸力,进而引起土层抗剪能力下降,可能导致斜坡稳定性丧失及损坏。

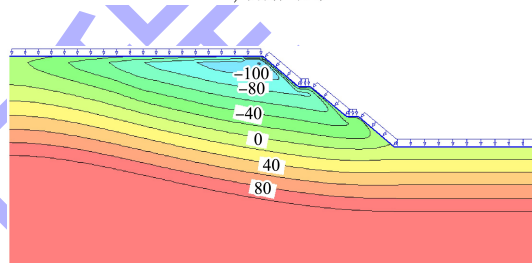
不同降雨时刻边坡孔隙水压力等值线见图6。由图6可知,在降雨的初始阶段,边坡表面的土壤层最先遭遇雨水的浸润作用,这使得土壤内的负孔隙水压由-120 kPa逐步上升至0 kPa,进而形成一个过渡性的饱和带。之后,伴随着降雨的持续进行,地下水的水位逐渐沿边坡的斜面上升。经过4 h的降雨,地下水的水位已经升至一级台阶的下方;当降雨持续至24 h,一级台阶已完全被积水淹没。降水停止后,坡体内部的孔隙水压开始缓缓降低。随着时间的延长,坡体中的孔隙水压持续减少,直至恢复至降雨前的初始水平。

由图6f)、g)、h)可以发现,一旦降雨停止,坡顶区域的孔隙水压力衰减速度明显快于坡底区域。这一差异主要由于坡顶土壤中雨水所具有的

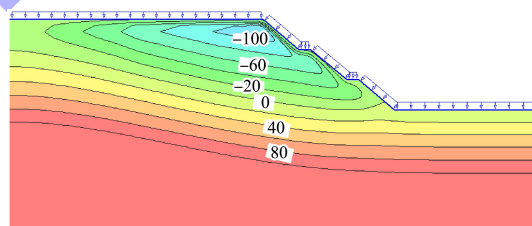
重力势能较高,重力作用促使孔隙水更快地向低处汇集和排出。无论是降雨渗透阶段还是雨水退去阶段,坡底区域都经历了更长时间的雨水浸泡,其受影响程度也最为严重。因此,在进行边坡加固设计时,应将坡底视为关键弱点,进行针对性的加固处理。



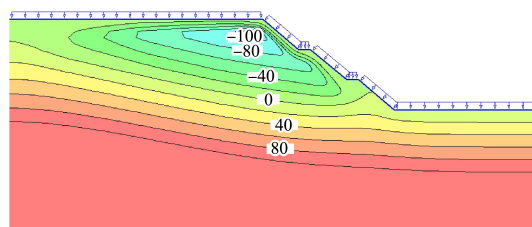
a) 初始时刻



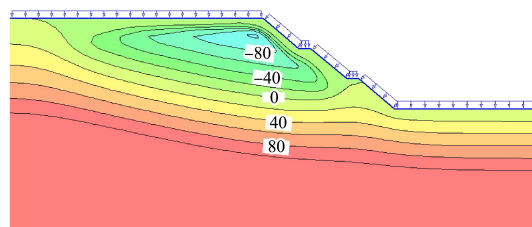
b) 降雨4 h



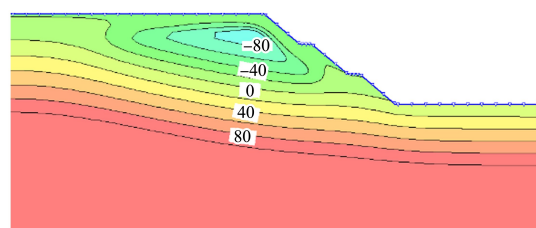
c) 降雨8 h



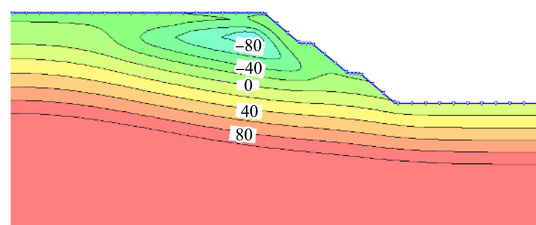
d) 降雨16 h



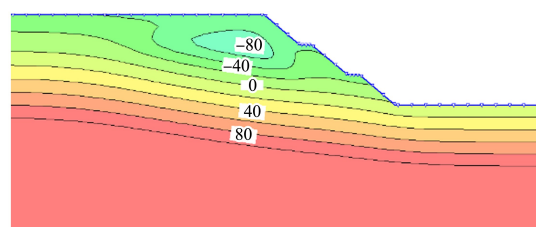
e) 降雨24 h



f) 停雨12 h



g) 停雨24 h



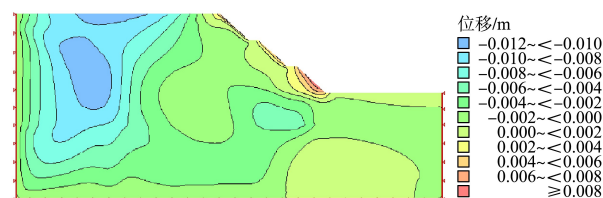
h) 停雨48 h

图6 不同降雨时刻边坡孔隙水压力等值线 (单位: kPa)

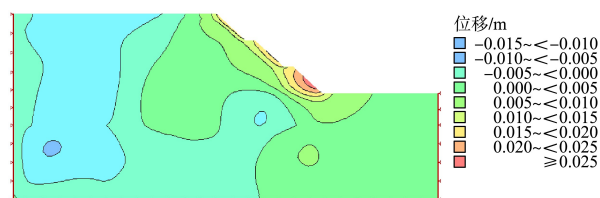
Fig. 6 Contour lines of pore water pressure on slope at different rainfall time (unit: kPa)

3.3 降雨对边坡位移场影响

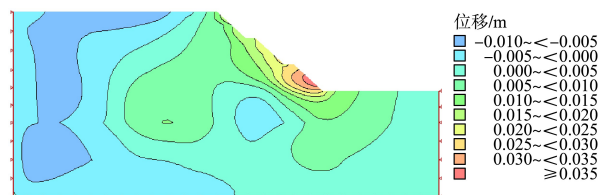
不同时刻边坡水平位移云图见图7。由图7可知,在连续降雨影响下,边坡的水平位移持续上升,位移场逐步向坡脚方向转移,并表现出朝临空面方向滑动的迹象。在首个台阶处,位移值达到最高点,表明该区域可能是边坡出现破坏时的最初滑动部位。从该点开始,边坡的位移朝上下两个方向逐步减少。降雨停止后,边坡的总位移量慢慢减小,位移场呈现向初始状态恢复的态势。



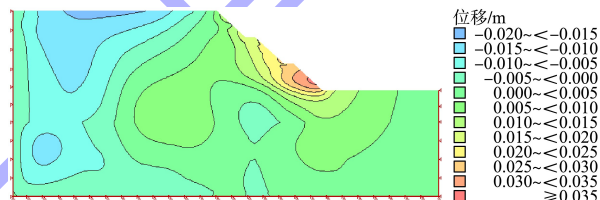
a) 降雨12 h



b) 降雨24 h



c) 停雨12 h



d) 停雨24 h

图7 不同时刻边坡水平位移云图

Fig. 7 Cloud diagram of slope horizontal displacement at different time

3.4 暴雨条件下边坡稳定性分析

不同时刻边坡稳定系数见图8,由图8可知,在起始阶段,该边坡的稳定系数为1.070。依照DL/T 5353—2006《水利水电工程边坡设计规范》^[15]的规定,采用极限平衡法得出的边坡稳定性系数需要符合特定的表格标准,见表2。考虑到该边坡划分为4级,在自然条件下采用常规运用标准,而在降雨条件下采用非常运用标准1,根据表2的数据分析,该边坡的稳定性已经不符合规定的标准。在暴雨侵袭的情况下,随着时间的推移,边坡的稳定性指标不断下降,其下降幅度随时间延长而逐步减小,见图9。降雨持续24 h时,稳定性系数降至谷值0.996,此刻边坡岌岌可危,失稳的风险极高。降雨停止后,稳定性系数逐渐回升,然而根据暴雨工况下不同时刻边坡稳定系数分析,即便在降雨停止后的2 d,稳定性系数仍未恢复到最初水平。

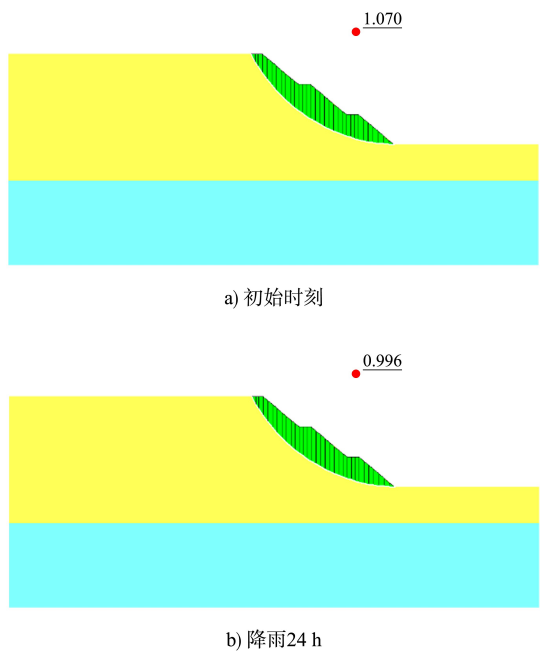


图 8 不同时刻边坡稳定系数

Fig. 8 Slope stability coefficient at different time

表 2 抗滑稳定安全系数标准

Tab. 2 standard of safety factor for anti-sliding

边坡等级	运用条件		
	正常运用条件	非常运用条件 1	非常运用条件 2
1	1.30~1.25	1.25~1.20	1.15~1.10
2	1.25~1.20	1.20~1.15	1.10~1.05
3	1.20~1.15	1.15~1.10	-
4	1.15~1.10	1.10~1.05	1.05~1.00

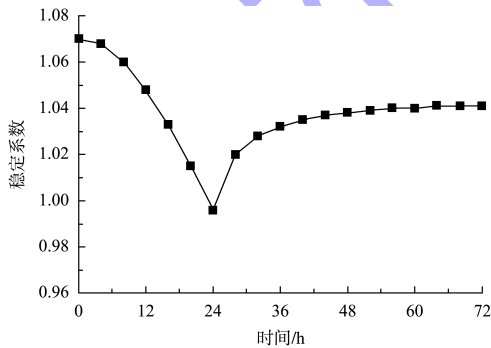


图 9 暴雨工况下不同时刻边坡稳定系数

Fig. 9 Slope stability coefficient at different time under rainstorm condition

在降水刚开始的阶段, 水分逐渐侵入坡面表层土壤, 引起土壤水分含量的升高, 进而使得负孔隙水压增大, 土壤基质的吸持力逐步减小。这种变动使得边坡的饱和线位置产生移动, 坡体内

在剪切强度相关参数随之降低, 导致边坡的防滑力矩削弱。雨水深入土壤层, 使得土壤的自身重力上升, 从而增强滑动力臂, 直接引起边坡稳定性下降。当降雨停歇, 土壤中的水分开始渐渐蒸发, 土壤的基团吸力也逐渐恢复, 边坡的稳固指数也开始缓慢上升。然而, 这一恢复过程极为迟缓, 需要经过较长的时间才能使稳定指数回归到降雨之前的程度^[16-18]。

3.5 不同加固方式边坡稳定性分析

不同加固厚度下稳定系数对比见表 3, 由表 3 可知, 全面化学加固方式下, 边坡稳定系数会随着加固厚度的增大而增大, 但是增加的量会逐渐变小, 因此可以得出加固厚度存在一个临界值, 当加固厚度低于临界值时, 加固厚度对边坡稳定性系数影响较大, 反之则影响较小。

表 3 不同加固厚度下稳定系数

Tab. 3 Stability coefficients under different reinforcement thickness

加固厚度/m	初始时刻	降雨 24 h	停雨 12 h	停雨 24 h
原始边坡	1.070	0.996	1.032	1.038
1.2	1.141	1.140	1.134	1.129
1.4	1.158	1.147	1.140	1.134
1.6	1.176	1.150	1.143	1.137
1.8	1.180	1.151	1.145	1.139
2.0	1.182	1.156	1.148	1.141

不同墩体高度和宽度对边坡稳定系数的影响分别见表 4、5。坡脚局部墩式加固方式下, 墩体高度与宽度对边坡稳定系数的影响规律基本相同, 当墩体高度(墩体宽度)小于临界值时, 稳定性的变化呈线性增长; 当墩体高度(墩体宽度)大于临界值时, 稳定性的变化并不明显。

表 4 不同墩体高度对边坡稳定系数的影响

Tab. 4 Influence of different pier height on slope stability coefficient

墩体高度 H	天然工况下稳定系数	降雨工况下稳定系数
原始边坡	1.070	0.996
0 m	1.117	1.036
0.5 m	1.158	1.051
1.0 m	1.160	1.055
1.5 m	1.163	1.061
2.0 m	1.164	1.069

表 5 不同墩体宽度对边坡稳定系数的影响
Tab. 5 Influence of different pier width on
slope stability coefficient

墩体宽度 <i>B</i>	天然工况下稳定系数	降雨工况下稳定系数
原始边坡	1. 070	0. 996
1 m	1. 105	1. 027
2 m	1. 132	1. 047
3 m	1. 158	1. 051
4 m	1. 182	1. 057
5 m	1. 183	1. 063

不同钻孔深度以及钻孔间距下边坡稳定系数分别见表 6、7。在等距离布孔加固方式下，边坡稳定系数随钻孔深度增大而增大，但存在一个临界深度，当钻孔深度小于临界值时，稳定性的变化呈线性增长；当钻孔深度大于临界值时，稳定性的变化并不明显。在等距离布孔加固方式下，边坡稳定系数随钻孔间距减小而增大，但同样存在一个临界间距，当钻孔深度大于临界值时，稳定性的变化呈线性增长；钻孔间距小于临界值时，稳定性的变化并不明显。

表 6 不同钻孔深度下边坡稳定系数
Tab. 6 Slope stability coefficients under
different drilling depth

钻孔深度	天然工况下稳定系数	降雨工况下稳定系数
原始边坡	1. 070	0. 996
1 m	1. 093	1. 031
2 m	1. 115	1. 056
3 m	1. 139	1. 081
4 m	1. 164	1. 111
5 m	1. 198	1. 137
6 m	1. 201	1. 151

表 7 不同钻孔间距下边坡稳定系数对比
Tab. 7 Comparison of slope stability coefficients
under different drilling hole spacing

钻孔间距	天然工况下稳定系数	降雨工况下稳定系数
原始边坡	1. 070	0. 996
2. 5 m	1. 119	1. 097
2. 0 m	1. 153	1. 111
1. 5 m	1. 180	1. 133
1. 0 m	1. 198	1. 137
0. 5 m	1. 204	1. 140

4 结 论

1) 在降雨影响下，边坡的表层土壤会率先进入饱和状态，从而形成一个临时的饱和带，该饱

和带会持续向边坡内部延伸。尤其是位于坡脚的土壤，因其较早饱和，且遭受雨水侵袭的时间最久，其影响尤为突出。因此在强降雨期间，这部分区域应当作为监控的关键脆弱带加以关注。

2) 鉴于粉土具有较高的渗透率，因此在降雨影响下，未处理的边坡其稳定性指标迅速下降。相对地，经过化学处理的边坡其稳定性衰减速度减缓，尤其是采用全面化学加固方式改良的边坡，其对降水的拦截效果尤为突出。

3) 在实施坡脚定位墩柱加固边坡的过程中，发现墩柱的宽度和高度全面化学加固存在一个最优值。一旦超出该最优范围，继续扩大墩柱的宽度或高度对提高边坡的稳定性指数的效能将不明显。

4) 在对边坡实施均匀布孔加固策略的过程中，发现存在一个最优的钻孔深度及孔距值。一旦钻孔深度或孔距超出或低于此临界值，即使进一步加深钻孔或缩小孔距，对提升边坡稳定性的效果也很微小。

5) 在对边坡实施全面化学加固策略时，此类加固方式中隐藏着一个最优的加固层厚度。一旦超出该厚度，继续加大加固层的厚度对于提高边坡的稳定性指数将变得微乎其微。

参考文献：

[1] 高玉峰, 王玉杰, 张飞, 等. 边坡工程与堤坝工程研究进展[J]. 土木工程学报, 2024, 57(8): 97-118.
GAO Y F, WANG Y J, ZHANG F, et al. State-of-the-art review on slope and embankment dams [J]. China civil engineering journal, 2024, 57(8): 97-118.

[2] NEUMAN S P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements [J]. Journal of the hydraulics division, 1973, 99(12): 2233-2250.

[3] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian geotechnical journal, 1978, 15(3): 313-321.

[4] TRANDAFIR A C, SIDLE R C, GOMI T, et al. Monitored and simulated variations in matric suction during rainfall in a residual soil slope [J]. Environmental geology, 2008, 55(5): 951-961.

- [5] 张社荣, 谭尧升, 王超, 等. 强降雨特性对饱和-非饱和边坡失稳破坏的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4102-4112.
- ZHANG S R, TAN Y S, WANG C, et al. Influence of heavy rainfall characteristics on saturated-unsaturated slope failure [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2014, 33(S2): 4102-4112.
- [6] 杨煜, 何忠明, 王保林, 等. 不同降雨条件下含软弱夹层土坡渗流特性数值分析[J]. 矿冶工程, 2018, 38(3): 15-19.
- YANG Y, HE Z M, WANG B L, et al. Numerical analysis for seepage characteristics of soil slope with weak intercalations under different rainfall conditions [J]. Mining and metallurgical engineering, 2018, 38(3): 15-19.
- [7] 黄浩. 降雨对福建地区残积土边坡稳定性影响的监测与分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- HUANG H. Monitoring and analysis of the effect of rainfall on the stability of residual soil slope in Fujian [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.
- [8] 魏刚强. 降雨和地震作用下炭质页岩路堑边坡稳定性分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.
- WEI G Q. Stability analysis of carbon shale cutting slope under rainfall and earthquake [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020.
- [9] 吴国雄, 吴北川, 陈乡寿. 降雨条件下滇西红层软岩高路堤稳定性分析[J]. 公路, 2014, 59(3): 43-47.
- WU G X, WU B C, CHEN X S. Analysis of high embankment stability of red-bed soft rock in west Yunnan under rain falling[J]. Highway, 2014, 59(3): 43-47.
- [10] 蒋中明, 曾铃, 付宏渊, 等. 降雨条件下厚覆盖层边坡的渗流特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(7): 2782-2788.
- JIANG Z M, ZENG L, FU H Y, et al. Seepage characteristics of thick coating slope in raining condition [J]. Journal of Central South University (science and technology), 2012, 43(7): 2782-2788.
- [11] 吴旭敏, 杨溢, 叶志程. 岩土体边坡在降雨入渗作用下的稳定性及影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(5): 189-199.
- WU X M, YANG Y, YE Z C. Stability of rock-soil slopes under rainfall infiltration and its influencing factors[J]. Journal of water resources and water engineering, 2022, 33(5): 189-199.
- [12] 郑颖人, 赵尚毅, 时卫民, 等. 边坡稳定分析的一些进展[J]. 地下空间, 2001, 21(4): 262-271.
- ZHENG Y R, ZHAO S Y, SHI W M, et al. Progress in analysis of slope stability[J]. Underground space, 2001, 21(4): 262-271.
- [13] 杨欣. 降雨入渗条件下含软弱夹层路堑高边坡渗流特性数值分析[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 38-42.
- YANG X. Numerical analysis of seepage characteristics of high slope with weak interlayer cutting under rainfall infiltration [J]. Journal of China & foreign highway, 2020, 40(4): 38-42.
- [14] 夏元友, 李梅. 边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1087-1091.
- XIA Y Y, LI M. Evaluation method research of slope stability and its developing trend [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2002, 21(7): 1087-1091.
- [15] 水利水电工程边坡设计规范: DL/T 5353—2006 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- Design specification for slope of hydropower and water conservancy project: DL/T 5353-2006[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2006.
- [16] 谭定杰. 粉土化学改良对基坑边坡稳定性影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- TAN D J. Research on the effect of chemical improvement of silt on the stability of foundation pit slope [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [17] 颜方方, 黄伦超, 周千凯, 等. 考虑降雨影响的深基坑边坡稳定性分析[J]. 水运工程, 2019(3): 24-28, 46.
- YAN F F, HUANG L C, ZHOU Q K, et al. Stability analysis of deep foundation pit slope considering rainfall impact [J]. Port & waterway engineering, 2019(3): 24-28, 46.
- [18] 史尧, 卢超, 刘守花. 深井降水条件下的高边坡土石围堰稳定性分析[J]. 水运工程, 2021(1): 207-214.
- SHI Y, LU C, LIU S H. Stability analysis of high earth-rock cofferdam under the condition of deep-well dewatering [J]. Port & waterway engineering, 2021(1): 207-214.