

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.03.001

# 降雨入渗条件下锚固边坡的动态响应及稳定性分析

毛延翩<sup>1</sup>, 齐智勇<sup>1</sup>, 张丽华<sup>3</sup>, 王海涛<sup>3</sup>, 张业晨<sup>3</sup>, 都旭煌<sup>1,2</sup>, 杨龙伟<sup>1</sup>

(1. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002;

2. 水工程材料与应用技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430000;

3. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为研究降雨入渗条件下锚固边坡的动态响应规律, 以三峡库区典型边坡为研究对象, 基于 midas GTS 构建非饱和渗流-应力耦合数值模型, 结合 VG 土水特征模型及强度折减法, 系统分析不同降雨工况下预应力锚索加固边坡的稳定性、渗流场及位移场的演化特征。结果表明: 降雨入渗导致天然边坡孔隙水压力呈“急剧增长-增速放缓-趋于稳定”的三阶段演化特征, 并引发基质吸力衰减与塑性区贯通, 导致稳定性降低。预应力锚索支护能显著抑制塑性区发展和位移变形, 极端降雨工况下安全系数提升达 53.6%, 边坡位移抑制率最高达 31.2%。随降雨强度与历时的增加, 预应力锚索的加固效能呈非线性衰减趋势。研究成果量化了锚固边坡在降雨条件下的动态响应机制, 可为复杂地质条件下边坡工程的防灾设计与风险评估提供理论依据。

**关键词:** 降雨入渗; 锚固边坡; 非饱和渗流; 动态响应; 稳定性分析

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0001-08

## Dynamic Response and Stability Analysis of Anchored Slopes Under Rainfall Infiltration Conditions

MAO Yanpian<sup>1</sup>, QI Zhiyong<sup>1</sup>, ZHANG Lihua<sup>3</sup>, WANG Haitao<sup>3</sup>, ZHANG Yechen<sup>3</sup>,

DU Xuhuang<sup>1,2</sup>, YANG Longwei<sup>1</sup>

(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang, Hubei 443002, China;

2. Hubei Provincial Key Laboratory of Hydraulic Engineering Materials and Application Technology, Wuhan, Hubei 430000, China;

3. Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** To explore the dynamic response of anchored slopes under rainfall infiltration, a typical slope in the Three Gorges Reservoir area is taken as the research object. A numerical model coupling unsaturated seepage and stress was developed using Midas GTS, incorporating the Van Genuchten soil-water characteristic model and the strength reduction technique. The evolution characteristics of stability, seepage field, and displacement field of prestressed anchor cable-reinforced slopes under different rainfall conditions are systematically analyzed. The results demonstrate that rainfall infiltration induces a three-stage evolution pattern of pore water pressure in the natural slope, characterized by rapid increase, growth rate deceleration, and eventual stabilization. This process triggers matrix suction attenuation and plastic zone connectivity, thereby reducing slope stability. Prestressed anchor cables significantly inhibit plastic zone development and displacement. Under extreme rainfall, the safety factor increases by 53.6%, and the displacement suppression rate reaches 31.2%. With increasing rainfall intensity and duration, the reinforcement efficiency of prestressed anchor cables exhibits a nonlinear degradation trend. The research findings quantify the dynamic response mechanism of anchored slopes under rainfall conditions, providing a theoretical basis for disaster prevention design and risk assessment of slope engineering in complex geological settings.

**Keywords:** rainfall infiltration; anchored slope; unsaturated seepage; dynamic response; stability analysis

收稿日期: 2026-02-01

修稿日期: 2026-03-25

基金项目: 中国长江电力股份有限公司科研项目 (Z152402063)

作者简介: 毛延翩 (1972—), 男, 正高级工程师, 主要从事大坝安全监测等方面工作。E-mail: mao\_yanpian@ctg.com.cn

通讯作者: 张丽华 (1987—), 女, 工程师, 主要从事边坡稳定等方面工作。E-mail: lihua2018@dlut.edu.cn

边坡稳定性作为岩土工程的核心课题,其降雨诱发机制一直是学术界和工程界关注的焦点<sup>[1]</sup>。特别是在三峡库区这类地质条件复杂、降雨充沛的地区,降雨型滑坡灾害尤为突出。目前,国内外学者围绕降雨入渗与边坡稳定性开展了大量理论与工程实践。

传统饱和渗流理论难以精确描述雨水入渗过程中边坡从非饱和到饱和的动态变化。谭新等<sup>[2]</sup>较早系统阐述了降雨条件下土坡的饱和-非饱和渗流分析方法,并强调了初始渗流场对入渗过程的控制作用。王述红等<sup>[3]</sup>进一步深化了该理论,通过 VG 模型揭示了多层土质边坡中入渗雨水方向的时空演变规律,指出水平方向的基质吸力差是决定水流方向的关键,且渗透性差异大的土层交界面易产生剧烈的水平渗流。这些研究从微观机理上解释了雨水在边坡内的运移路径,为理解暂态饱和区的形成提供了理论依据。陈梦发等<sup>[4]</sup>和 Lan 等<sup>[5]</sup>进一步从机理层面阐明了降雨入渗导致边坡失稳的本质过程,指出孔隙水压力增大和有效应力削弱是稳定性降低的根本原因,而塑性区沿特定界面的贯通则是失稳的前兆特征。

既有研究的稳定性分析方法中强度折减法因其能充分考虑孔隙水压力变化而被广泛应用,随着研究深入,分析方法呈现出从确定性分析向可靠度评价、从单一因素向多场耦合的发展趋势。高小霞等<sup>[6]</sup>通过三维耦合模型系统揭示了均匀型与间断型降雨模式下边坡稳定性的演化规律,发现了降雨停滞后期边坡响应的滞后效应与周期性规律。何正迎等<sup>[7]</sup>创新性地引入可靠度理论,证实降雨强度的时间分布模式对边坡失效概率具有决定性影响,强调了考虑降雨不确定性的必要性。叶俊等<sup>[8]</sup>基于永泰县滑坡案例进一步证实,强降雨导致安全系数快速降低,干湿循环周期后安全系数下降约 0.1。刘修水<sup>[9]</sup>和冯天阔等<sup>[10]</sup>的研究则进一步考虑了多场耦合作用,分别探讨了不同雨型及风雨耦合条件对边坡稳定性的影响。边坡工程锚固措施研究重点已从早期的有效性验证转向工作机制的深入剖析。华栋等<sup>[11]</sup>通过数值模拟验证了锚杆支护的有效性,而 Zhuang 等<sup>[12]</sup>和 He 等<sup>[13]</sup>则进一步揭示了预应力锚索在降雨过程中的力学响应特性。幸添等<sup>[14]</sup>通过精细的三维数值模拟,证明了联合支护体系在极端工况下的优越性能。

关于降雨入渗下边坡稳定性分析,现有研究取得了显著进展,然而对不同降雨条件下锚固结构的

加固效能、与边坡稳定性演化的内在关联缺乏系统量化分析。基于此,本文以三峡库区某边坡为研究对象,建立考虑非饱和渗流-应力耦合与锚固作用的数值模型,系统量化不同降雨工况下锚固边坡的动态响应,探究稳定性演化规律,研究结果可为类似工程的防灾设计提供理论依据。

## 1 基本方程

### 1.1 饱和-非饱和渗流理论

降雨入渗条件下边坡稳定性的核心在于渗流场与应力场的耦合作用。传统饱和渗流理论已不足以准确描述降雨入渗过程中边坡从非饱和到饱和状态的动态变化,因此需采用饱和-非饱和渗流理论进行分析。非饱和渗流遵循广义达西定律,以质量守恒定律为基础,则推导出非饱和渗流微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \times \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \times \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = M_w Y_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $k_x$  和  $k_y$  分别为土体  $x$  和  $y$  方向的渗透系数,  $m^2/s$ ;  $H$  为地下水总水头,  $m$ ;  $Q$  为源汇项;  $M_w$  为土水特征曲线的斜率;  $Y_w$  为水的重度,  $kN/m^3$ ;  $t$  为渗流时间,  $s$ 。

土水特征曲线反映土体含水量和基质吸力的变化关系,以此来确定土体非饱和渗透特性,选用 Van Genuchten 函数拟合,该模型通过公式(2)描述土壤含水量  $\theta$  与基质势  $h$  的关系,参数变化会显著影响土壤水分特性曲线的形状及水力导度特性。

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |h|)^n]^m}, m = 1 - \frac{1}{n}, h < 0 \quad (2)$$

式中: $\theta_r$  为残余含水量; $\theta_s$  为饱和含水量; $\alpha$  为与土壤孔隙分布相关的尺度参数,  $m^{-1}$ ,反映了土壤的孔隙分布特性, $\alpha$  较大表示土壤水分容易排出,基质势下降较快; $n$ 、 $m$  为形状参数,反映了土壤水分特性曲线的陡峭程度, $n$  较大表示含水量随基质势的变化更敏感。

### 1.2 强度折减法

强度折减法是边坡稳定性分析中广泛应用的数值方法,其通过逐步降低岩土体的抗剪强度参数直至边坡发生失稳,从而确定安全系数。本次模拟岩土体服从 Mohr-Coulomb 屈服准则,首先进行饱和-非饱和渗流分析,获取降雨过程中不同时刻的孔隙水压力分布,然后采用强度折减法,当折减系数增大至边坡发生失稳时,对应的折减系数即为该时刻边坡的安全系数,计算程序公式为:

$$\begin{cases} c' = \frac{c}{F_s} \\ \varphi' = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F_s}\right) \\ \tau = c' + \delta \tan(\varphi') \end{cases} \quad (3)$$

式中: $c'$ 为折减后的黏聚力,kPa; $\varphi'$ 为折减后的内摩擦角, $(^\circ)$ ; $F_s$ 为折减系数; $\tau$ 为折减后的抗剪强度,kPa。

该方法能够充分考虑降雨入渗过程中孔隙水压

力变化对边坡稳定性的影响,准确反映边坡稳定性的动态演化过程,为降雨条件下锚固边坡的稳定性分析提供可靠的理论基础。

## 2 数值计算模型及参数

### 2.1 工程概况与计算参数

本文依托长江三峡库区某边坡工程,该边坡地层条件复杂,各层岩土体的力学性质差异显著,详细地质特征如下,主要特性参数见表1。

表1 各层岩土体特性参数

地层名称	力学参数				渗流特性参数			
	重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力 $c$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	弹性模量 $E/\text{kPa}$	饱和含水量 $\theta_s/\%$	初始含水量 $\theta_i/\%$	尺度参数 $\alpha$	形状参数 $n$
粉质黏土层	20	31	27.5	40000	0.45	0.05	0.4	1.2
砂砾石土层	22	33	35.0	160000	0.48	0.06	0.3	1.3
风化泥质砂岩	26	36	35.8	200000	0.50	0.07	0.1	2.0

根据工程地质测绘及勘察报告,该边坡表层为早期滑坡堆积形成,结构松散,呈灰黄色,以含砾粉质黏土为主,混杂碎石角砾,该层抗剪强度离散性大,受含水率变化影响显著,暴雨后易形成滑移弱面,是该边坡的主要滑坡体;中层主要由砂、砾石及少量黏土组成,级配良好,层理清晰,结构相对密实,渗透性较好,有利于孔隙水压力的消散,为边坡提供

了较好的抗滑力;底层岩体风化强烈,泥质胶结,原岩结构已遭破坏,呈破碎块状,但岩芯仍保持一定硬度,排水性尚可,持水特性受泥质成分影响显著。

各层岩土体渗透参数如表1所示,选用 Van Genuchten 函数拟合水土特征曲线,定义体积含水率函数和渗透系数函数,最终确定的非饱和渗透曲线如图1所示,拟合效果良好。

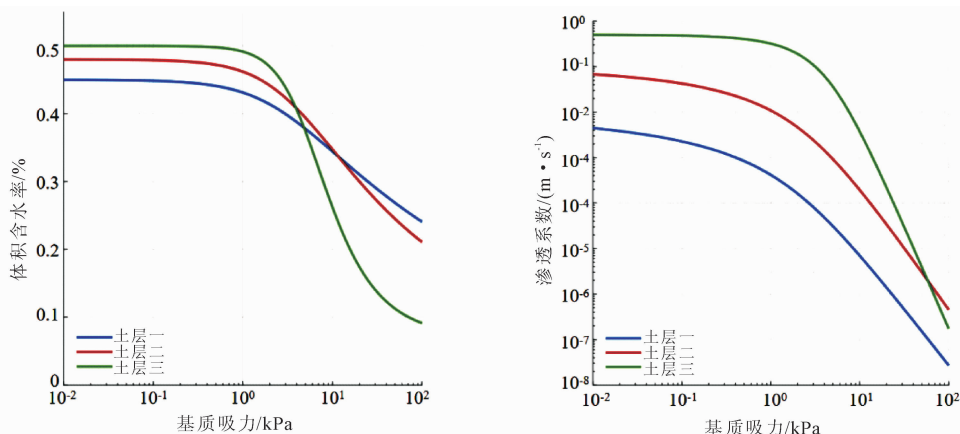


图1 非饱和和渗透曲线图

### 2.2 锚索支护设计

预应力锚索钻孔直径为130 mm,内置 $6 \times 7\Phi 5$ 高强度无粘结钢绞线,标准强度1 860 MPa。注浆材料采用42.5 MPa水泥,水灰比控制在0.45~0.50,锚索设计值1 000 kN,根据变形控制要求,预应力取设计值的50%~75%,约为500 kN。锚索详细参数见表2。

### 2.3 降雨工况拟定

根据中央气象局数据及国家标准 GB/T 28592—201,通过降雨量可以分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨六种降雨类型。长江三峡地区降雨量丰富,年降雨量一般在1 000~1 400 mm之间,局部地区可达1 600 mm以上,且降雨量空间分布不均匀,库区周边山地降雨量较大,而河谷地区相对较少。夏季是暴雨多发期,短时强降雨事件频

发。为全面分析降雨对边坡稳定性的影响,结合该地区降雨特征,设置降雨工况如下:

其中大雨和暴雨工况反映了三峡地区常见的降雨条件,大暴雨和特大降雨工况则聚焦于极端降雨情况,为防灾减灾设计提供了科学依据。工况清晰地展示了“低强度长历时”、“短时强降雨”到“极端强度长历时”的多种情景,涵盖了从常见到极端的天气状况,为实际工程中边坡防护和灾害预警提供有力支持。

表 2 锚索详细参数

序号	入射角/(°)	直径/mm	自由段长度/m	锚固段长度/m
1	15	130	22	12
2	15	130	21	12
3	15	130	20	12
4	15	130	18	9
5	15	130	16	9
6	15	130	14	9
7	15	130	11	9
8	15	130	11	9

表 3 不同降雨强度与时长工况设置

降雨等级	工况编号	降雨强度 /(mm·d <sup>-1</sup> )	降雨时长 /h
大雨	工况一	25	24
暴雨	工况二	50	24
	工况三 a	100	1
	工况三 b	100	12
大暴雨	工况三 c	100	24
	工况四 a	200	1
	工况四 b	200	12
特大暴雨	工况四 c	200	24

## 2.4 数值计算模型

采用 midas GTS NX 软件建立锚固边坡数值分析模型,模型断面尺寸长 155 m,高 70 m,宽 20 m,模拟岩土体采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。加密潜在滑动区域和锚索附近网格以提高计算精度,在边坡表面设置降雨入渗边界条件,根据不同工况设置边坡曲面流量大小。在边坡坡面及内部布置监测点 A—G,监测降雨时边坡各点位移,其中坡面 4 个监测点,坐标依次为 A(105,70)、B(80,60)、C(66,45)、D(45,30),垂直方向设置 3 个测点,E(105,60)、F(105,45)、G(105,30)。边坡数值计算模型如图 2 所示。

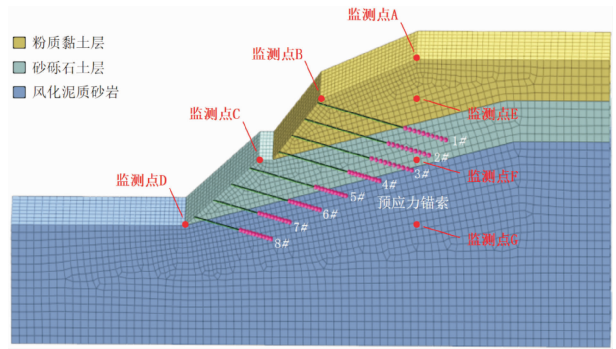


图 2 有限元数值计算模型

## 3 降雨入渗对锚固边坡的影响

### 3.1 稳定性分析

#### 3.1.1 塑性区发展

图 3 为锚固前后边坡塑性区的演化过程,选取工况四 c 分析锚索在极端降雨下的加固机制。由图 3(a)、(c)可知,降雨入渗后天然边坡坡脚区域因表层土体饱和,导致基质吸力丧失、抗剪强度显著劣化而率先产生塑性变形。随着孔隙水压力上升,塑性区持续向坡体深部扩展并最终贯通,形成潜在滑移面,导致边坡失稳风险急剧增大。

锚索支护有效穿越了潜在滑移面,通过提供附加抗滑力,显著改善了边坡的力学响应。由图 3(b)、(d)可知,加固后边坡的塑性应变大幅降低,塑性区分布范围明显收缩,原有的贯通趋势得到有效抑制。与此对应,边坡安全系数从加固前的 1.056 3 提升至加固后的 1.622 37,增幅达 53.6%,充分验证了锚索在极端水文条件下的加固有效性。分析表明,尽管长期降雨入渗可能引发渐进式破坏,但锚索支护无疑显著延缓了这一过程,提升了边坡的整体稳定性与抗灾能力。尽管塑性区贯通可作为失稳判据之一,基于马晓雨<sup>[15]</sup>的研究可知其判断存在一定主观性,数值计算不收敛法得出的合理、有效的安全系数更具有普遍性。

#### 3.1.2 安全系数分析

图 4 为降雨入渗下不同边坡安全系数变化曲线,揭示了降雨强度与时长对边坡安全系数的耦合影响规律。图 4(a)为降雨 24 h 后不同降雨强度下安全系数变化。随着降雨强度由 25 mm/d 增大至 200 mm/d,天然边坡安全系数自 1.099 3 降至 1.056 3,降幅达 3.9%;锚固边坡安全系数相应由 1.662 89 降至 1.622 37,降幅为 2.4%。结果表明,安全系数随降雨强度增加呈现下降特征,且锚索加

固虽能显著提升稳定性,但未能完全抵消强降雨带来的负面效应。塑性区分析进一步揭示,低降雨强

度下塑性区局限于表层,扩展缓慢;而强降雨强度则驱动塑性区向深部快速扩展,导致稳定性显著下降。

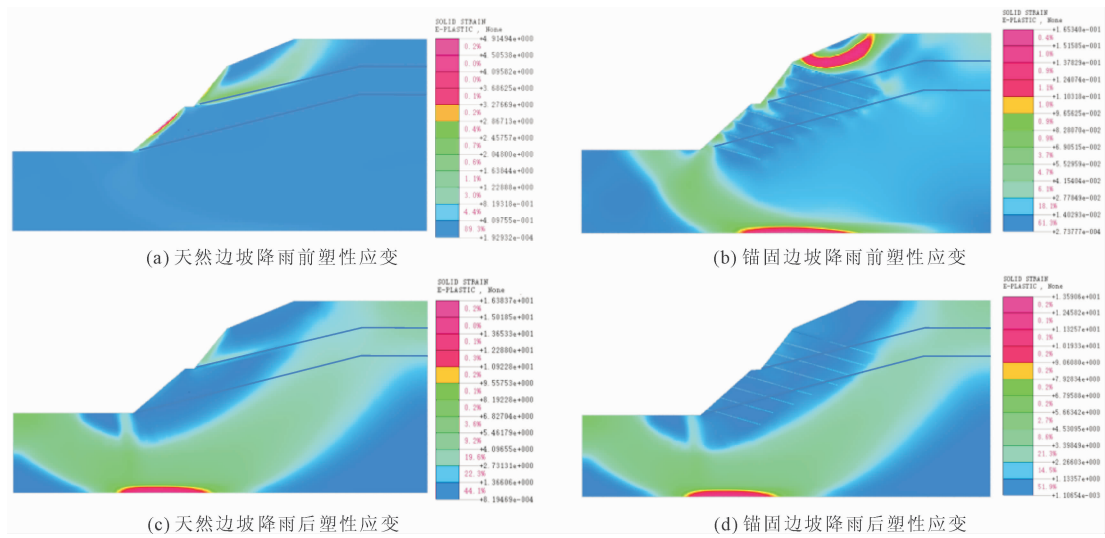


图 3 降雨入渗下不同边坡塑性应变

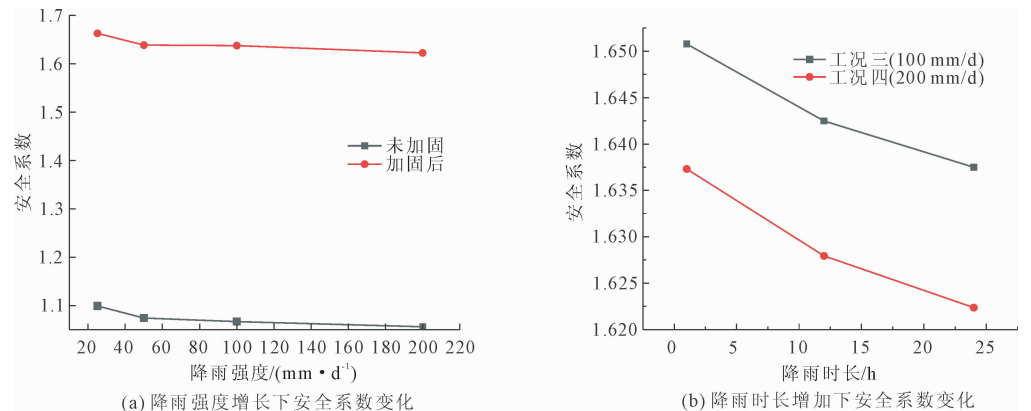


图 4 降雨入渗下不同边坡安全系数变化

选取工况三、工况四进行降雨时长效应分析,由图 4(b)可知,安全系数随降雨历时延长呈现持续衰减特征。当降雨强度为 100 mm/d 时,24 h 后安全系数由 1.650 78 降至 1.637 50,降幅 0.8%;当降雨强度增至 200 mm/d,降幅扩大至 0.95%。降雨历时延长加剧了失稳风险,且此效应在高强度降雨条件下更为显著。对比可知,24 h 后工况四的安全系数较工况三进一步降低约 0.92%。这证实了高强度降雨通过加速土体饱和、促进孔隙水压力骤升及抗剪强度急剧损失,从而更大幅度地削弱了边坡稳定性。研究明确了降雨强度与时长在边坡稳定性劣化过程中存在显著的协同放大效应。

3.2 渗流场演化分析

锚索支护对孔隙水压力及土体饱和度的空间分布影响不显著,但其通过提升边坡整体抗滑能力,有

效抵消了渗流场恶化带来的部分不利效应,从而间接提升了稳定性。图 5 为孔隙水压力分布云图,对比各工况可知,孔隙水压力随降雨强度增大呈非线性增长。在低强度降雨下,如图 5(a)、(b)所示,孔隙水压力增长缓慢;当降雨强度增至中高强度时,如图 5(c)、(d)所示,孔隙水压力显著上升且增长速率渐趋稳定,表明土体入渗能力趋于极限,地表径流加剧。

图 6 为降雨入渗下不同工况边坡渗流场时间演化曲线。由图 6 可知,孔隙水压力发展呈现明显的三阶段特征。以 200 mm/d 强降雨工况四为例,降雨前期孔隙水压力急剧增长;降雨中期增速明显放缓;至降雨后期逐渐趋于稳定。200 mm/d 工况的稳定孔隙水压力值较 100 mm/d 工况高出 96.1 kPa,进一步说明降雨强度是控制孔隙水压力发展的主导

因素,降雨强度越大,坡体则越快趋于饱和。

上述研究表明,降雨入渗通过改变渗流场直接影响边坡稳定性,短期表现为孔隙水压力骤升导致

的基质吸力丧失与抗剪强度劣化,长期则体现为持续高孔隙水压力作用下的蠕变变形与渐进破坏。

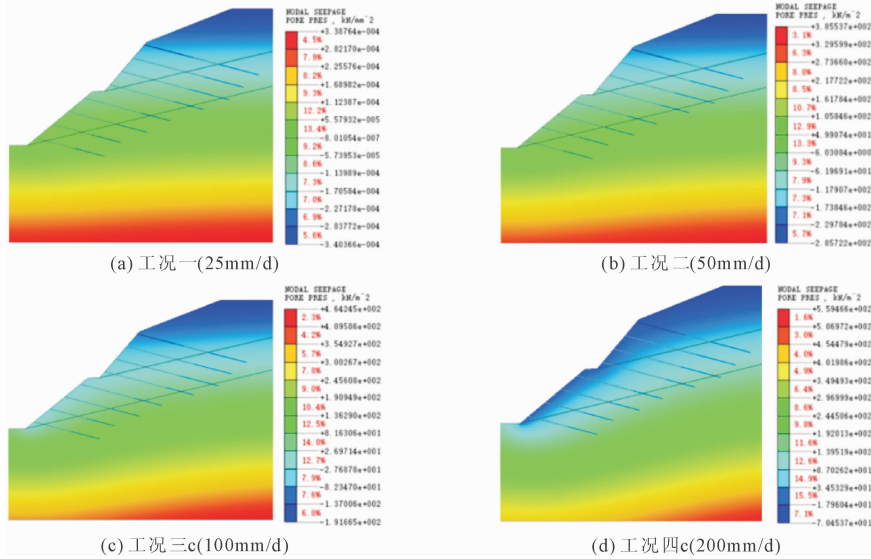


图 5 不同降雨强度孔隙水压力分布

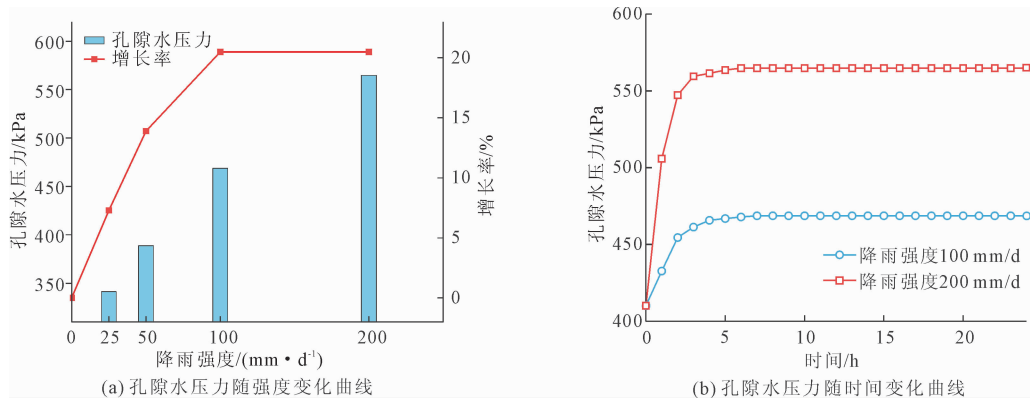


图 6 降雨入渗下孔隙水压力变化曲线

### 3.3 位移场分析

#### 3.3.1 降雨入渗下位移分析

位移场演变是表征边坡稳定性的关键指标。不同工况下边坡最大位移分布云图如图 7 所示,随降雨强度增大,非饱和区土体软化范围扩展增大,位移场呈现从坡面向坡内延伸、最终形成贯通剪切带的演化规律,典型特征为坡顶沉降与坡脚隆起。

锚索支护有效抑制位移发展,降雨入渗下边坡最大位移变化曲线如图 8 所示,由图 8 可知,在中低降雨强度下,土体未完全饱和,锚索主要通过界面摩擦与轴向拉力控制浅层位移;当降雨强度超过 100 mm/d 时,边坡趋于临界饱和状态,竖向分量抵抗剪切滑移,水平分量则补偿土体强度损失,位移抑制量呈非线性增长;在极端工况下,降雨 1 h 后天然边坡

最大位移达 22.36 mm,而锚固边坡为 16.24 mm,抑制率达 27.4%。随降雨持续,位移进入渐进增长阶段,24 h 后锚固边坡仍保持 31.2% 的位移抑制效果,证明锚索具有持续控制能力,但长期饱和条件下锚固效能呈现衰减趋势,表明需结合排水措施共同提升边坡长期稳定性。

#### 3.3.2 监测点位移分布规律

开展工况四 c 下各监测点位移变化对比,分析位移分布规律,各监测点最大位移由表 4 所示。

表 4 监测点最大位移

监测点	A	B	C	D	E	F	G
最大位移/mm	27.60	26.08	17.73	5.97	19.23	3.41	0.49

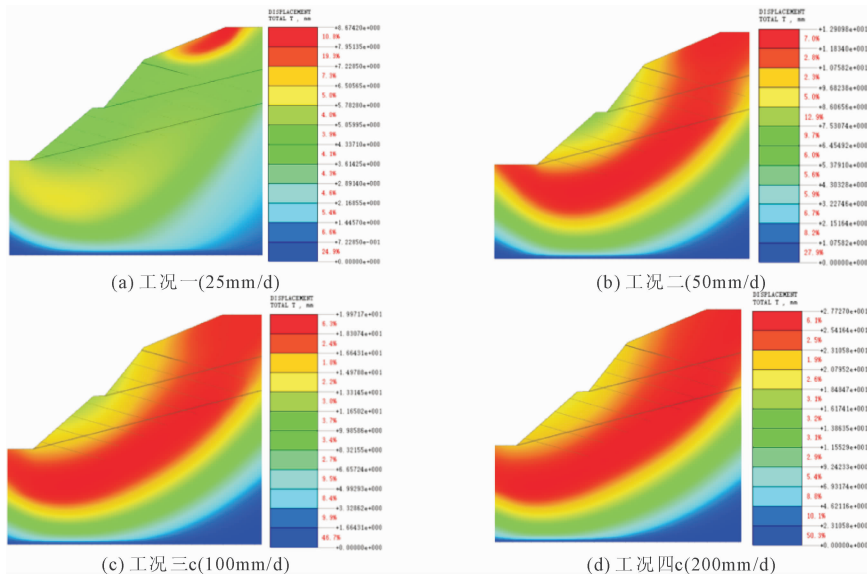


图 7 不同降雨强度位移场分布

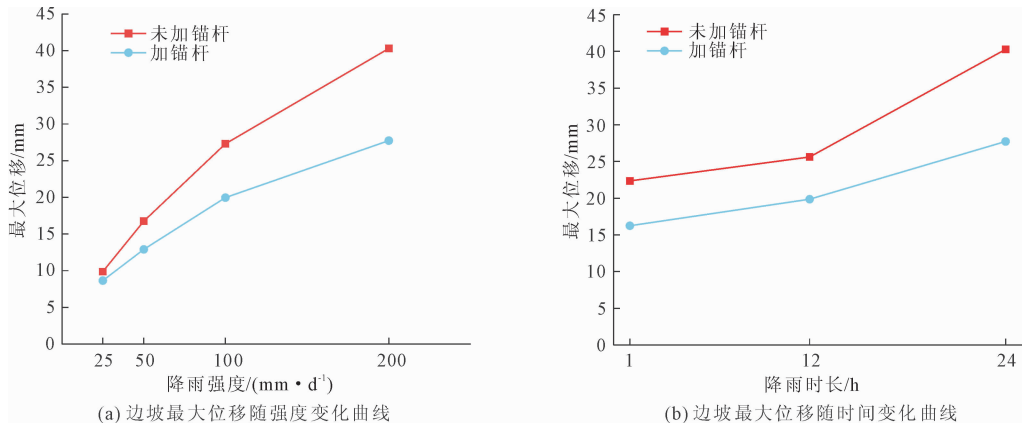


图 8 降雨入渗下边坡最大位移变化曲线

各监测点最大位移变化曲线如图 9 所示,位移空间分布呈现典型牵引式滑坡特征。坡顶监测点 A 位移为 27.60 mm,其正下方点 E 为 19.23 mm,揭示该区域存在显著竖向变形;沿坡面向下,监测点 B、

C、D 位移依次递减至 5.97 mm,形成自坡顶至坡脚的明显位移梯度。这种衰减模式表明潜在滑裂面出口位于坡顶区域。坡面位移分布呈现显著非线性特征:坡顶至坡中位移梯度变化平缓,而坡中至坡脚衰

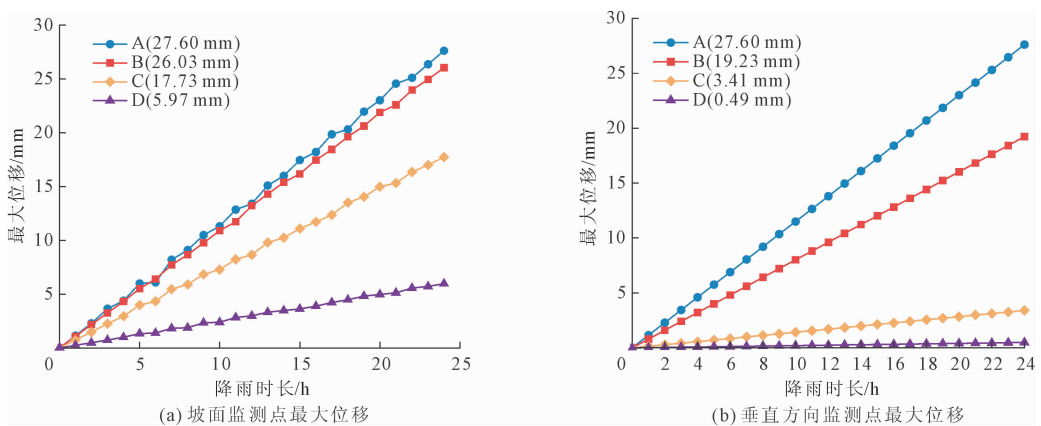


图 9 各监测点最大位移

减剧烈,反映坡体中下部岩土层相对稳定。垂向位移随深度增加急剧减小,深层监测点 G 位移仅 0.49 mm,证实变形主要集中于浅层土体。

表层土体因雨水渗透导致强度软化而发生蠕滑,该位移分布模式符合降雨型浅层滑坡机理。监测结果表明,其空间分布模式揭示了潜在滑裂面的出口位置与边坡的破坏机制,为边坡稳定性评估与加固设计提供了重要依据。

## 4 结 论

基于渗流-应力耦合理论,本文运用 midas GTS 有限元软件建立三维数值模型,模拟锚固边坡在不同降雨作用下渗流变形,系统研究了降雨入渗下的动态响应及稳定性演化规律,主要得出以下结论:

(1) 揭示了降雨入渗过程中边坡稳定性的动态劣化机制。孔隙水压力呈三阶段演化特征,其增长直接导致基质吸力丧失与抗剪强度劣化。塑性区自坡脚产生并随降雨持续向上扩展,最终形成贯通滑移面,高强度长历时降雨会加速此过程,表现出明显的协同效应。

(2) 通过数值模拟量化了预应力锚索的加固效能,在特大暴雨工况下,锚索使安全系数提升 53.6%,对边坡位移的抑制率可达 27.4%~31.2%。锚索通过抑制塑性区贯通和补偿土体强度损失,有效提升了边坡稳定性。且锚索加固效能随降雨历时增加呈衰减趋势,表明在极端降雨条件下需结合排水措施形成协同防灾体系。

(3) 监测数据表明,边坡位移自坡顶至坡脚非线性递减分布,明确了锚固边坡的破坏模式。位移场呈现典型的浅层牵引式滑坡特征,即坡顶位移量最大,并向坡体内部逐渐减小,清晰地揭示了潜在滑裂面的发展规律,为基于变形监测的滑坡预警提供了理论依据。

### 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(08):97-118.  
[2] 谭 新,陈善雄,杨 明. 降雨条件下土坡饱和-非饱和和渗流分析[J]. 岩土力学,2003,24(03):381-384.

[3] 王述红,何 坚,刘 欢. 多层土质边坡入渗的水流方向演变机理[J]. 东北大学学报(自然科学版),2019,40(08):1172-1177,1204.  
[4] 陈梦发,刘 毅,姜润昱. 降雨入渗作用下边坡动态响应及稳定性分析[J]. 四川建筑,2025,45(04):150-152,156.  
[5] Lan Haijian, Chen Liangsheng. Stability analysis of soft rock slope considering seepage softening and damage effects [J]. International Core Journal of Engineering, 2025,11(09):42-50.  
[6] 高小霞,查文华,齐新炬,等. 不同降雨条件下非饱和土滑坡三维渗流变形及稳定性数值模拟[J]. 科学技术与工程,2025,25(20):8445-8454.  
[7] 何正迎,黄 雨. 考虑降雨强度时间模式不确定性的边坡可靠度分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2025,53(10):1527-1534.  
[8] 叶 俊. 降雨入渗对滑坡稳定性的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2024,22(04):112-119.  
[9] 刘修水. 降雨对水库涉水岸坡侵蚀稳定的机理影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2025,23(S1):311-316.  
[10] 冯天阔,李勇泉,李国维,等. 梅州地区极端风雨条件下风化花岗岩收陡边坡稳定性分析[J]. 中国安全生产科学技术,2025,21(09):77-84.  
[11] 华 栋,臧庆吉,高 涛. 基于 GeoStudio 软件的降雨入渗条件下引调水工程弃渣场稳定性分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2025,23(S1):263-268.  
[12] Zhuang Yizhou, Hu Xiaoyao, He Wenbin, et al. Stability analysis of a rocky slope with a weak interbedded layer under rainfall infiltration conditions [J]. Water, 2024,16(04):604.  
[13] He Lu, Shang Yuqi, Lei Xinghai, et al. Destabilization mechanism and prevention technology of open-pit mine slope with soft interlayer under rainfall infiltration conditions: a case study[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2024,41(02):859-873.  
[14] 幸 添,陈齐民,詹双桥,等. 基于三维数值仿真的网格梁锚杆联合加固渠岸边坡稳定性分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2025,58(09):1376-1383.  
[15] 马晓雨. 基于强度折减有限元法的土坡稳定性分析研究[D]. 大连:大连理工大学,2008:13-25.