

库岸边坡在不同水位下降模式下的稳定性分析

马新民

(临朐县水库运行维护中心, 山东 临朐 262605)

【摘要】通过引入瞬态饱和/非饱和渗流模型,结合有限元强度折减法(SR-FEM),精确评估库岸边坡在水位下降过程中的稳定性,以弥补传统方法在水位变化条件下安全系数估算不足的问题。利用SR-FEM对全缓降和全快降条件下的边坡稳定性进行基准测试,并与极限平衡法(LEM)结果进行对比。再建立瞬态饱和/非饱和渗流模型,详细考察潜水面位置、水位下降比、水位下降速率、导水率及基质吸力等因素对岸坡稳定性的影响。研究表明,在高导水率土体中,孔隙水压力和安全系数(FOS)对压降速率的敏感性显著;低导水率及中高降水率或高导水率与高降水率组合条件下,边坡行为更趋近于完全快速降水模式。此外,随着降水速率或降水比的增加,FOS显著降低;考虑非饱和区基质吸力后,FOS略有回升。瞬态饱和/非饱和渗流模型结合有限元强度折减法能够更为真实地反映边坡在水位下降过程中的复杂应力-渗流耦合效应,为库岸边坡稳定性评估提供了更为精准和全面的方法。

【关键词】边坡稳定性;有限元强度折减法;瞬态饱和/非饱和渗流

【中图分类号】TV223

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2025)-11-0044-05

Stability Analysis of Reservoir Bank Slope under Different Water Level Decline Modes

MA Xinmin

(Reservoir Operation and Maintenance Center of Linqu County, Linqu, Shandong 262605, China)

Abstract: This paper aims to accurately evaluate the stability of reservoir bank slopes during water level decline by introducing a transient saturated/unsaturated seepage model, combined with the finite element strength reduction method (SR-FEM), so as to make up for the deficiency of traditional methods in estimating the safety factor under water level change conditions. The SR-FEM is used to conduct benchmark tests on slope stability under the conditions of full slow drop and full fast drop, and the results are compared with those of the limit equilibrium method (LEM). Then, a transient saturated/unsaturated seepage model is established to investigate in detail the influences of factors such as phreatic surface position, water level drop ratio, water level drop rate, hydraulic conductivity, and matrix suction on bank slope stability. The research shows that in soils with high hydraulic conductivity, the pore water pressure and factor of safety (FOS) are significantly sensitive to the pressure drop rate; under the conditions of low hydraulic conductivity combined with medium-high water level drop rate, or high hydraulic conductivity combined with high water level drop rate, the slope behavior is closer to the complete rapid water level drop mode. In addition, with the increase of water level drop rate or drop ratio, the FOS decreases significantly; after considering the matrix suction in the unsaturated zone, the FOS rises slightly. The transient saturated/unsaturated seepage model combined with the finite element strength reduction method can more truly reflect the complex stress-seepage coupling effect of the slope during water level decline, providing a more accurate and comprehensive method for the stability evaluation of reservoir bank slopes.

Key words: Slope stability; Finite element strength reduction method; Transient saturated / unsaturated seepage

近年来,随着计算技术的发展,有限元强度折减法(SR-FEM)因其能够直接评估安全系数并确定临界滑移面,无需预设破坏机制,逐渐成为边坡稳定性分析的重要工具^[1]。该方法结合瞬态

饱和/非饱和渗流模型,能够更准确地模拟边坡在复杂渗流条件下的应力-应变关系,为边坡稳定

收稿日期:2025-01-31

作者简介:马新民(1977—),男,工程师

性评估提供了更为科学和精细的手段。但在瞬态饱和/非饱和渗流条件下的应用研究仍显不足,尤其是针对岸坡(水库、河流、湖泊和海洋)这一特殊地质环境的多因素耦合效应分析尚待深入。因此,本文旨在通过系统研究潜水面位置、水位下降比、水位下降速率、导水率及基质吸力等关键因素对边坡稳定性的影响,为库岸边坡稳定性评估提供技术手段。

1 材料与方法

1.1 土体非饱和-非稳定渗流分析

达西定律(Darcy's Law)定律已被广泛验证适用于非饱和土壤及完全饱和土壤中的水流运动^[2]。饱和土与非饱和土在渗流特性上的显著差异在于,前者的渗透系数保持恒定,而后者则随体积含水率或基质吸力的变化而变化,这一特性对于分析非饱和土体的渗流过程尤为重要。对于非饱和土元,可假定气相的流动忽略不计。因此,暂态流动的控制方程是结合达西定律考虑非饱和土中固、液相的质量守恒而产生的:

$$d/dt = \left(\int_V \frac{\rho_w}{\rho_w^0} S n dV \right) + \int_V \frac{\rho_w}{\rho_w^0} S n n_0 \cdot v_w dV = 0 \quad (1)$$

式中: ρ_w 为水的密度,kg/m³; ρ_w^0 为归一化参考密度,kg/m³;S为饱和度;n为向边界外法线;n₀为孔隙度; v_w 为流体平均速度,m/s;可表示为:

$$v_w = K(\theta) / (S n_0 g \rho_w) \cdot (\partial u_w / \partial x - \rho_w g) \quad (2)$$

式中:g是重力加速度,m/s²;渗透率K(θ)与体积含水率 θ 有关,可定义为孔隙度与饱和度的乘积,即 $\theta = n_0 S$,m/s; u_w 为孔隙水压力,kPa;其他均与前文相同。K(θ)与饱和度和孔隙度有关,可以用描述土壤水分特征曲线和渗透率函数的拟合公式定义,如下式所示:

$$K(\theta) = K_s K_r = K_s S_e^2 \left[1 - (1 - S_e^m)^m \right]^2 \quad (3)$$

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) = (1 + |\alpha \psi|^n)^{-m} \quad (4)$$

式中, K_s 为饱和渗透率,m/s; K_r 为相对渗透率,m/s; $m = 1 - 1/h$, $n > 1$; S_e 为相对饱和程度,由饱和含水率和剩余体积含水率定义; θ_s 、 θ_r 分别为饱和和体积含水量和残余体积含水量^[3]; α , n , m 为水力特性经验参数; ψ 为负压头,m。因此, Van Genuchten模型通过5个关键参数(α , n , m , θ_s , θ_r , K_s)全面描述了非饱和土的水力特性。其中, θ_s 和 K_s 可通过

室内试验直接测定,其余参数则通过拟合土壤水分特征曲线及非饱和渗透率数据获得。

1.2 考虑瞬态非饱和渗流的有限元强度折减

为了准确评估边坡在瞬态非饱和渗流条件下的稳定性,对有限元强度折减法进行了拓展应用。通过连续减小抗剪强度参数(包括有效黏聚力 c'_R 和 ϕ'_R 摩擦角的强度折减系数F),直至边坡达到临界破坏状态,此时的强度折减系数即为边坡的安全系数(FOS)。具体表达如下:

$$c'_R = c' / F = \tan \phi'_R = \tan \phi' / F \quad (5)$$

式中:F为强度折减系数; c' 、 ϕ' 为原抗剪强度参数。为了获得真正的安全系数,需要逐渐增大强度折减系数,直到强度折减参数 c'_R 和 ϕ'_R 使边坡达到破坏状态(在规定的最大迭代次数内出现数值不收敛),此时边坡的安全系数等于强度折减系数,FOS=F。在这个过程中,假设因子F对 c' 和 $\tan \phi'$ 都具有相等的作用。

本文采用非饱和土 Mohr-Coulomb 破坏准则的修正强度形式^[4],可表示为:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi'_R + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (6)$$

式中 τ_f 为非饱和土破坏时的剪应力,kPa; c' 和 ϕ' 为抗剪强度参数(即有效黏聚力和摩擦角), σ 为剪切面法向应力,kPa; ϕ^b 为随基质吸力变化的摩擦角, u_a 和 u_w 分别为孔隙水和孔隙空气压力,kPa; u_a 可设为0。因此式(6)可以化简为:

$$\tau_f = c' + \sigma \tan \phi' - u_w \tan \phi^b \quad (7)$$

$$\tau_f = c' + (\sigma - x u_w) \tan \phi' \quad (8)$$

式中: $x = \tan \phi^b / \tan \phi'$ 。

基于有限元软件 ABAQUS,用 Fortran 6.5 编写确定瞬态非饱和渗流下的潜水面和渗流场的子程序。为了真实模拟瞬态非饱和渗流,渗流分析中充分考虑了式(4)中土体水分特征曲线和式(3)中相对渗透系数与饱和度的关系。在有限元程序中引入强度折减技术,得到边坡在瞬态非饱和渗流和瞬态渗流(不考虑非饱和区基质吸力)两种情况下的 FOS。

2 结果与讨论

2.1 快速下降与缓慢下降条件下的边坡稳定性

为了验证改进的有限元强度折减法的适用性,对缓降和急降条件下边坡的稳定性进行评估。边坡整体构型如图1所示,几何形状和材料

属性列于图 1。斜率比 $H:V=2:1$, $c'/\gamma H=0.05$, 摩擦角 $\phi'=20^\circ$, 杨氏模量 $E=10^5$ kPa, 泊松比 $\nu=0.3$ 。将坡顶水平自由面设为 $L=0$, 自由面上下水位随时间线性波动。对于快速下降, 当自由面内部段是水平的, 并且在水库水位下降之前的水平面上 (图 1a), 而缓慢下降或部分淹没时, 自由面内部段已经稳定到新的水库水位 (图 1b)。在这些极端情况下, 测压面和潜水面与水平流线是一致的, 除了斜坡面本身。下一部分将考虑流线为倾斜或弯曲的中间渗流情况 (图 1c)。水位下降比 L/H 是水下降的深度 L 与坡高 H 之比。

利用上述方法, 计算了几个不同的下降比 L/H 值下斜坡的 FOS, 这些下降比 L/H 值从 -0.2

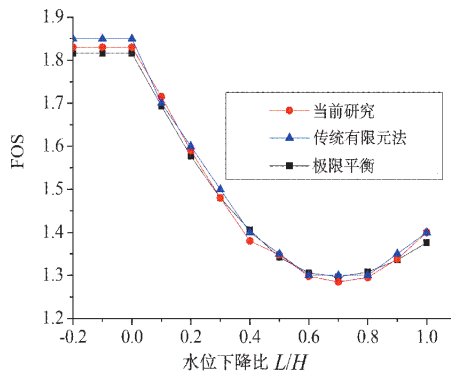


图 2 不同方法下的边坡 FOS 和水位下降比 L/H 之间的关系

还采用了 Bishop 方法、传统有限元法以及极限平衡软件 SLOPE 对同一案例进行了分析。结果表明, 在整个水位下降比范围内, 3 种方法的结果均保持高度一致, 验证了本文方法的可靠性。特别地, 当水位下降比 L/H 约为 0.7 (即水库水位约为坡高的 30%) 时, 边坡达到最小 FOS 值约 1.3; 而当下降比 L/H 为 1.0 (即水库水位降至底部) 时, 快速下降条件下的 FOS 最小值降至约 0.85, 显示出边坡稳定性的显著变化。

2.2 瞬态非饱和渗流对岸坡稳定性的影响

通过将瞬态渗流有限元分析预测的各时间步孔隙水压力和基质吸力作为输入, 结合有效应力强度折减法进行位移弹塑性有限元分析, 系统地评估了边坡的动态响应。特别地, 在固定土壤空隙比为 0.2 的条件下, 采用一组典型的 Van Genuchten (VG) 模型参数 ($\alpha=1.06$ m⁻¹, $n=1.395$, $r_0=0.106$, $s_0=0.469$), 由式 (3) 和式 (4) 准确拟合土水特征曲线及相对渗透系数与饱和度的关系, 进而计算瞬态非饱和渗流下的边坡稳定性。

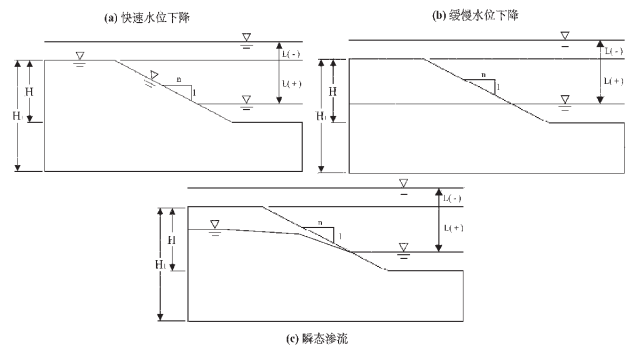
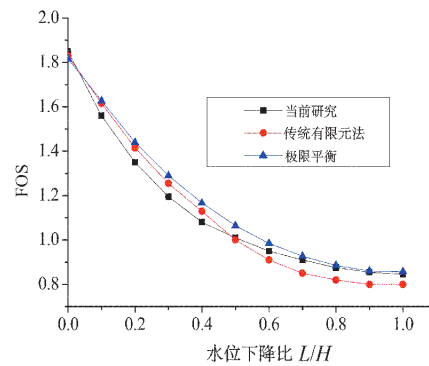


图 1 边坡稳定性分析的三种水位下降模式 (坡度完全被淹没, 水位高于峰顶 $0.2H$ 到 1.0 (坡度底部水位), 间隔为 0.1)。

快速下降和缓慢下降条件下边坡 FOS 随下降比 L/H 变化的曲线如图 2 所示。为进行对比,



2.3 边坡最终潜水面的特征分析

为探究瞬态非饱和渗流对淹没边坡稳定性的影响, 研究模拟了不同土壤导水率 (1.0×10^{-4} , 1.0×10^{-6} cm/s) 和水位下降率 (0.1 m/d 和 1.0 m/d) 下的地下水流动态。斜坡中最终潜水面的分布情况如图 3 所示。分析表明, 低导水率或高水位下降率条件下, 边坡内孔隙水压力显著增加, 特别是在高导水率土壤中, 孔隙压力增幅高达 25% (图 3a, c), 而在低导水率土壤中增幅较小 (图 3b, d)。

2.4 导水率对边坡安全系数 FOS 的影响

对于 $0.1 \sim 1.0$ m/d 的水位下降率和 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ cm/s 的导水率, 安全系数随水位下降比的变化如图 4 所示。从图 4 可以看出, 对于低导水率和高水位下降率的土壤, 边坡行为接近完全快速水位下降条件 (图 4 a), 潜水面几乎保持在坡面 (图 4 b)。在这种情况下, 可以做出完全快速的水位下降假设, 并且可以省略渗流和固结分析。对于相同低渗透性的土壤, 在下降速度慢 10 倍的情况下, FOS 与 L/H 曲线仍然接近完全快速的下降曲线,

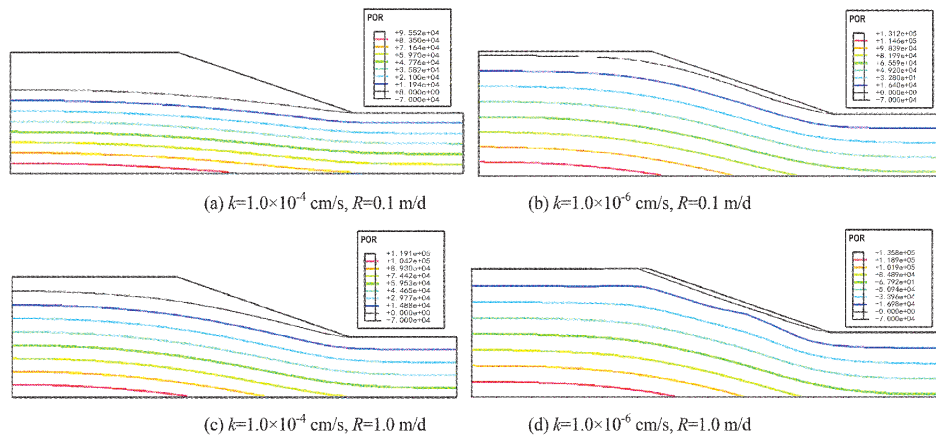


图3 不同电导率系数 k 和水位下降率 R 的潜水表面

可以观察到很少的排水。可以得出结论,在低渗透性土壤中,导水率是控制边坡行为的主要因素,而不是水位下降率。

在土壤导水率相对较高和水位下降速度相对较慢的情况下,即使水位下降过程中有部分排水,计算出的 FOS 仍低于完全缓慢下降的情况,

高于完全快速下降的情况。这种情况需要进行高级耦合分析,因为它们不能用极限情况来近似。对于相同的较高土壤渗透率,采用 1 m/d 的高水位下降率,边坡行为接近完全不排水行为,类似于完全快速水位下降条件。可以得出结论,在高渗透性土壤中,水位下降率是控制边坡行为的主

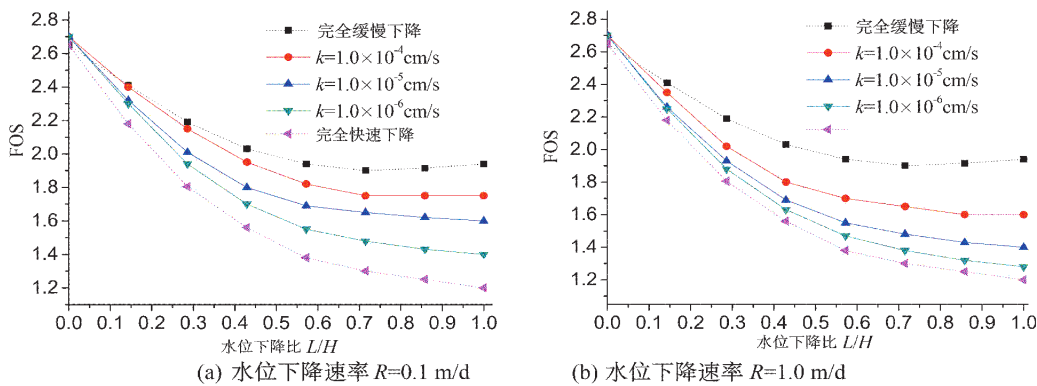


图4 不同导水率 k 和水位下降率 R 下 FOS 随水位下降率的变化

要因素,而不是导水率。

2.5 水位下降速率对边坡安全系数 FOS 的影响

不同导水率下 FOS 随水位下降速率 L/H 的变化如图 5 所示。结果表明,无论导水率如何, FOS 均随水位下降速率的增加而显著降低。在低导水率下,当降压速率为 0.1 和 1.0 m/d 时, FOS 与 L/H 的关系曲线接近完全快速下降情况;而高导水率时,当降水速率为 0.1 和 1.0 m/d 时, FOS 与 L/H 的关系曲线则趋于完全缓慢下降。这一现象说明,高导水率条件下良好的排水性能够有效缓解孔隙压力积聚,提高边坡稳定性。

2.6 水位下降比对边坡安全系数 FOS 的影响

图 6 为降水率 0.1 和 1.0 m/d 下 FOS 随导水率的变化情况。从图 6 可以看出,当降水比 L/H

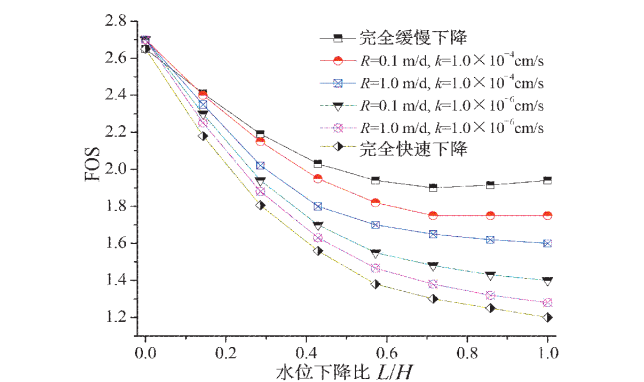


图5 不同水位下降率和导水率下 FOS 随水位下降率的变化
较小时, FOS 随导水率的变化很小或不显著;当 L/H 增大时, FOS 与导水率的变化呈线性增长,最大增幅达 25%。在一定的导水率下,随着压降比 L/H 从 0 增加到 1.0, FOS 显著降低,最大降幅

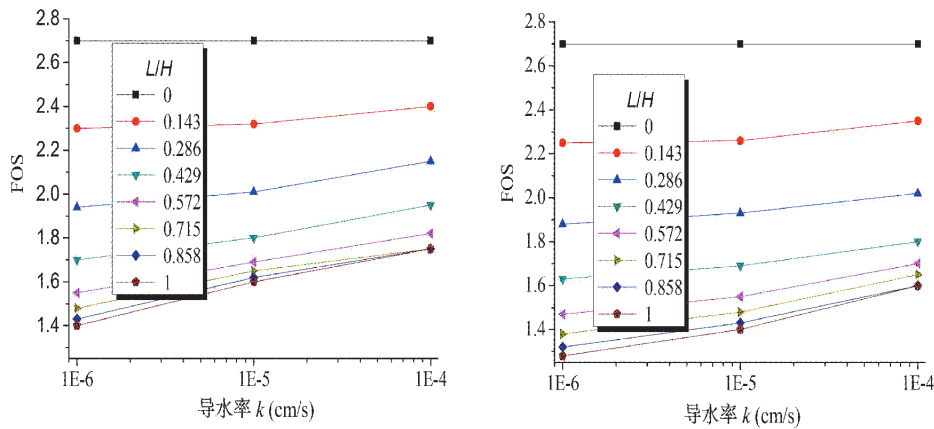


图 6 不同水位下降比 L/H 下 FOS 与导水率 k 的变化

超过 50%。

2.7 基质吸力对边坡安全系数 FOS 的影响

为研究非饱和区基质吸力对边坡稳定性的影响,采用有限元强度折减法对有和无基质吸力两种情况下的边坡进行 FOS 计算,结果见表 1。

由表 1 可以看出,在不同的导水率和水位下

降率下,坡面 FOS 随降水比的增大而显著减小,有基质吸力的坡面 FOS 略高于无基质吸力的坡面 FOS,且随着降水比从 0 增大到 1.0,两者的差值增大。其原因是随着降水比的增大,非饱和区面积增大,从而使基质吸力增大。但是,在有基质吸力和没有基质吸力的情况下,两者的差异并不

表 1 有或无基质吸力(MS)边坡的 FOS 比较

| 导水率 $k/$ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) | 水位下降率 $R/$ ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$) | 水位下降比 L/H | | | | | |
|---|--|-------------|------|-------|------|-------|------|
| | | 0.143 | | 0.571 | | 1.000 | |
| | | 有 MS | 无 MS | 有 MS | 无 MS | 有 MS | 无 MS |
| 1E-6 | 0.1 | 2.30 | 2.31 | 1.55 | 1.57 | 1.40 | 1.44 |
| 1E-4 | 0.1 | 2.40 | 2.41 | 1.82 | 1.83 | 1.75 | 1.78 |
| 1E-6 | 1.0 | 2.25 | 2.26 | 1.47 | 1.49 | 1.28 | 1.31 |
| 1E-4 | 1.0 | 2.35 | 2.36 | 1.70 | 1.71 | 1.60 | 1.62 |

显著,在 $L/H=1.0, R=0.1 \text{ m/d}, k=1\times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 时,两者的差异最大,达到 3%。这表明,在大多数情况下,暂态非饱和和渗流作用下的边坡稳定性分析可以合理忽略基质吸力。然而,在极端或特殊工况下,仍需谨慎评估基质吸力的潜在影响。

3 结论

本研究通过对岸坡进行有限元强度折减分析,深入探讨了瞬态饱和/非饱和渗流条件下水位下降比、水位下降速率、导水率及基质吸力等关键因素对边坡稳定性的影响,并得出以下结论:一是在高导水率土体中,降水率对孔隙压力的调控作用显著,而在低导水率条件下,其影响则可忽略。二是低导水率和中高降水率,或较高导水率和高降水率的土壤条件下,边坡展现出接近完全不排水的行为特性,与快速降水情境相似;而高导水率低降水率时,边坡 FOS 处于缓降与快降之

间的过渡态,需特别关注并进行耦合效应深入分析。三是无论土壤导水系数如何,水位下降速率的增加均会导致边坡稳定性 FOS 显著下降,特定条件下 FOS 降幅可超 50%。四是尽管考虑非饱和区基质吸力能轻微提升边坡 FOS,但从工程安全角度出发,其贡献可视为安全储备而忽略,以简化评估流程并提升实用性。

参考文献

- [1] 黄小平,蒋志坚,黄旭东,等.基于有限元强度折减法的多层边坡支护模拟研究[J].吉林水利,2024(10):1-6.
- [2] 王海曼,倪万魁.不同干密度压实黄土的饱和/非饱和和渗透系数预测模型[J].岩土力学,2022,43(3):729-736.
- [3] 徐杰,李湛.非饱和土瞬态渗流无限边坡稳定性研究[J].低温建筑技术,2024,46(6):87-90.
- [4] 张涛,张慧,黄文雄.坡面水位下降对非饱和土质边坡稳定性影响的有限元分析[J].重庆大学学报,2020,43(6):12-20.

(责任编辑 赵其芬)