

降雨作用下湿陷性黄土边坡稳定性演化机制研究

王江锋¹, 刘华秋¹, 杜春雪¹, 徐超^{2,3}, 王继锋⁴, 董新华⁴

(1. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 4. 驻马店市水旱灾害防御中心, 河南 驻马店 463900)

摘 要:【目的】针对湿陷性黄土边坡在降雨入渗及饱和作用下的稳定性演化与失稳机制问题, 基于工程地质勘察资料, 为该地区同类边坡的稳定性评价与防治设计提供科学依据。【方法】以河南省三门峡市侯桥村滑坡为研究对象, 选取地形特征差异显著的 3 个典型剖面, 开展非饱和与降雨饱和工况下的边坡稳定性对比研究。基于 MIDAS-GTS 有限元平台, 采用 Mohr-Coulomb 本构模型及强度折减法进行数值模拟, 并以简化毕肖普法进行极限平衡验证, 以检验计算结果的可靠性。【结果】①非饱和工况下边坡整体表现为稳定至欠稳定状态, 位移主要集中于中下部、坡脚及临空面附近; ②降雨饱和工况下, 3 个剖面的位移集中区由中下部及坡脚浅表区域向坡体深部和折坡带扩展, 潜在滑移带连通性增强, 安全系数平均下降 11.8%, 不同地形条件下的失稳响应存在明显差异, 其中上陡下缓且坡高较大的剖面整体失稳最为显著, “台阶状坡面—缓坡”组合剖面表现为局部失稳, 坡体较规整的剖面其位移发展和滑移带贯通性介于二者之间; ③极限平衡验证表明, 简化毕肖普法与强度折减法所得安全系数变化趋势一致, 验证了数值计算的可靠性。【结论】研究揭示了降雨饱和作用导致黄土基质吸力丧失从而表现黏聚力骤降 12%~17%, 并伴随“溶蚀—软化”效应引发结构强度与抗剪强度衰减的内在机制, 促使边坡由局部变形逐渐向整体失稳演化。

关键词: 黄土边坡; 稳定性分析; 非饱和工况; 饱和工况; 数值模拟; 简化毕肖普法

中图分类号: TU444

文献标识码: A

豫西黄土高原地跨华北平原与西北黄土高原的地理与地质过渡地带, 该广泛覆盖的第四纪沉积物具有极其特殊的工程地质特性, 其微观结构疏松, 垂直节理与大孔隙高度发育, 表现出强烈的湿陷性与遇水快速崩解的物理力学特征。在自然非饱和状态下, 黄土虽具备一定的初始结构强度, 但其抗剪强度指标 (特别是黏聚力与内摩擦角) 对含水率的变化较为敏感。一旦遭遇水分入渗, 水-土耦合作用将迅速破坏土体骨架, 导致结构性发生不可逆的劣化^[1]。近年来, 受全球极端气候事件频发的影响, 集中降雨及持续性暴雨已成为诱发豫西黄土高原地区边坡失稳与致灾的最主要外部诱因。降雨入渗过程不仅增加了坡体的自重应力, 同时驱动了非饱和土体内部的水

分运移, 导致基质吸力急剧消散; 这一吸力衰减过程直接引发了土体有效应力的降低和抗剪强度的断崖式下降^[2-5], 最终在重力驱动下演化为灾难性的滑坡与崩塌。

国内外学者针对湿陷性黄土滑坡及边坡稳定性问题, 已开展了大量的研究探索。目前, 主流研究多依托系统的工程地质测绘、钻探与原状土取样以及室内土工试验, 以获取湿陷性黄土关键的物理力学参数; 在此基础上, 广泛引入有限元法 (Finite Element Method, FEM)、有限差分法 (Finite Difference Method, FDM) 等数值模拟技术, 并结合经典的极限平衡法 (Limit Equilibrium Method, LEM), 对坡体的变形破坏特征及失稳演化进行量化分析, 同时指出降雨渗透引起的孔隙水压力变化

收稿日期/Received: 2026-04-27

修回日期/Revised: 2026-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42172297)。

第一作者: 王江锋 (1976—), 男, 教授, 博导, 博士, 从事隧道及地下工程方面的研究。

E-mail: wangjiangfeng@ncwu.edu.cn。

通信作者: 杜春雪 (1991—), 女, 讲师, 博士, 从事土工合成材料和基础加固方面的研究。

E-mail: duchunxue@ncwu.edu.cn。

是诱发滑坡失稳的主要因素。薛海斌等^[6]考虑降雨入渗条件下黄土强度参数的时空演化特征,建立了相应的极限平衡分析方法,为揭示降雨作用下边坡稳定性随时间变化的规律提供了新的分析思路。王华宁等^[7]从黄土结构非均质特性出发,分析了空间参数差异对边坡稳定性的影响,研究表明非均质性会改变潜在滑动面的分布并影响边坡安全系数。蒋一帆、李家科^[8]通过控制雨强与坡度条件揭示了黄土边坡在不同降雨输入下的失稳演化差异;黄晓虎等^[9]从裂隙优势流入渗出发阐明了降雨在非均质介质中“快速下渗—浅层破坏”的促滑路径;李鑫等^[10]进一步对黄土斜坡优先流促滑研究进行了综述,指出裂隙/孔洞等优势通道对入渗过程与失稳阈值具有显著控制作用;在极端降雨背景下,范文等^[11]从灾变链与风险防控视角系统总结了黄土体灾变机理与防控思路,为极端气候情景下的分析提供了研究框架。现有研究在复杂工况的精细化评估中仍显现出一定的局限性,部分工程评价往往依赖单一的数值模拟结果,缺乏与传统极限平衡法的深度交叉验证,导致安全系数计算结果在实际工程应用中的可靠性面临争议;湿陷性黄土在降雨条件下的非线性力学响应极为复杂,现有常规计算往往未能充分耦合水分入渗导致的基质吸力衰减及其引起的抗剪强度参数非线性退化特征^[12-14]。

为深入揭示豫西黄土台塬地貌区边坡的变形规律,本文选取河南省三门峡市湖滨区交口乡侯桥村滑坡为典型案例。该滑坡覆盖层由黄土与粘土交互沉积而成,且该坡体具备强降雨诱发滑动历史记录,地质灾变特征典型。基于边坡现状及岩土工程勘察成果,采用有限元法强度折减法(Finite Element Method-Strength Reduction Method, FEM-SRM)对不同工况下的天然边坡进行数值模拟,并引入简化毕肖普(Bishop)极限平衡法构建交叉验证体系,系统揭示了降雨饱和条件下湿陷性黄土边坡的失稳演化机制、潜在滑动带的空间展布特征及关键致灾控制因素。研究为黄土高原同类复杂地质环境下的边坡稳定性评价、早期灾害预警及工程防治优化提供了理论支撑与量化依据。

1 地质原型

1.1 工程地质概况

本文研究区位于三门峡市湖滨区交口乡侯桥村7组,地处黄土台塬前缘高陡斜坡地带。该

边坡最大高差约42 m,整体坡度约35°~50°,滑体宽约120 m,属典型的小型土质牵引式滑坡,其潜在失稳严重威胁着坡脚居民及房屋的安全。地勘资料表明,滑体主要由第四系黄土状粉土和黄土状粉质黏土组成;土体结构疏松、孔隙和节理发育,具有明显湿陷性、遇水软化和抗剪强度降低等特征。同时,坡体后缘汇水条件较强,前缘受切坡建房、道路扰动及临空卸荷影响显著,工程地质条件极为复杂。历史变形特征揭示,该滑坡于2002年前后曾发生过较严重滑动,而在2021年强降雨后,滑坡上部再次出现小规模滑动、局部崩塌及裂缝扩展。因此,深入研究降雨入渗驱动下该黄土边坡的渗流演化与滑坡破坏机制,不仅是保护坡脚居民生命财产安全的迫切要求,更能为该区后续截排水系统、抗滑挡土墙等永久性防治工程的优化设计提供必不可少的科学依据。

依据现场地形,钻孔资料以及地质测绘的地质条件,揭示从坡顶至坡脚的地层结构变化、风化层厚度、软弱夹层延续性及潜在滑动带的发育特征。各剖面均穿越多个钻孔,保证地质信息连续可靠,从而全面反映场地的工程地质结构。基于上述资料,选取3个具有代表性的剖面1—1、2—2、3—3。其中,1—1剖面坡顶为较宽的台地面,上部坡体为较陡边坡,坡度约78°,下部坡体自折坡线起向前下方缓倾展布,坡度为45°~50°,形成“上陡下缓”的形态,整体坡高和相对高差在3个剖面中最大,滑坡体厚度亦较大。2—2剖面较1—1剖面明显减缓,坡体呈“台阶状坡面—缓坡”组合。3—3剖面坡脚埋深浅,边坡形态较规整。3个剖面地层组合基本一致,如图1—3所示,土层厚度见表1。

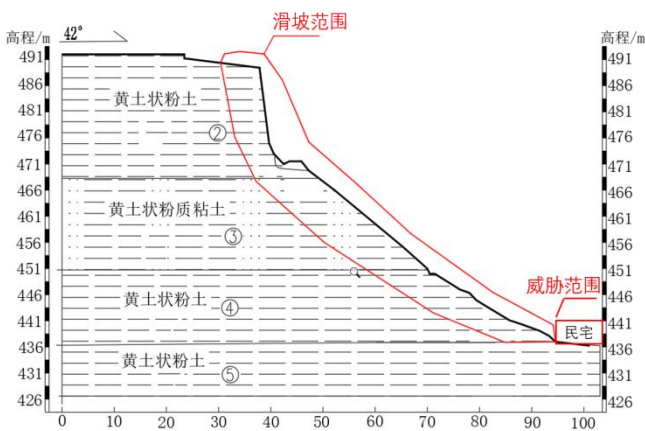


图1 1—1剖面

Fig. 1 Cross-section 1-1

图 3 3—3 剖面

Fig. 3 Cross-section 3-3

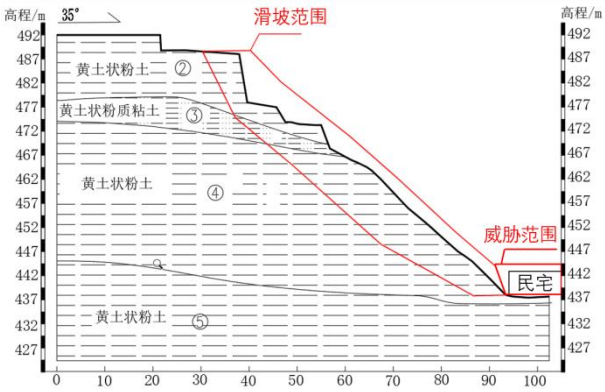


图 2 2—2 剖面

Fig. 2 Cross-section 2-2

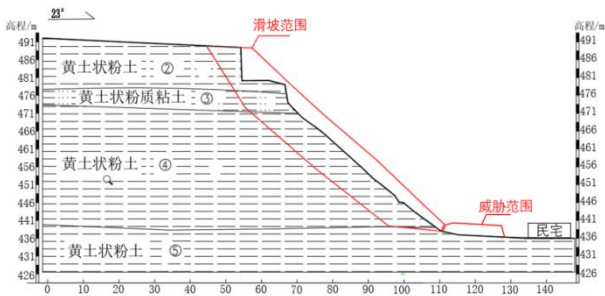


表 2 岩土物理力学参数表

Tab.2 Physico-mechanical parameters of soil and rock layers

岩土体内名称	土层代号	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$		非饱和抗剪强度		饱和抗剪强度		弹性模量/MPa	泊松比
		非饱和	饱和	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$		
黄土状粉土	②	16.1	19.1	29.0	27.0	24.0	21.0	12	0.3
黄土状粉质黏土	③	16.9	19.9	31.0	24.0	27.0	18.0	15	0.33
黄土状粉土	④	16.9	19.9	33.0	25.0	29.0	24.0	20	0.32

2 数值计算模型

为研究非饱和土边坡在不同水文条件下的稳定性变化及其失稳演化机制，在建立边坡数值模型的基础上开展数值模拟分析。考虑到非饱和土边坡在非饱和状态与降雨作用下力学特性的显著差异，分别设置非饱和工况和饱和工况两种计算条件，对边坡稳定性及其变形特征进行对比分析。为定量评价边坡在不同工况下的稳定性，采用 MIDAS 有限元数值仿真平台，结合 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型对边坡进行数值计算分析。

2.1 求解方法

为了准确描述非饱和土边坡在不同水文条件下的力学响应，本研究建立了三维弹塑性有限元数学模型，土体遵循 Mohr-Coulomb 本构关系^[15-16]。边坡初始条件的设定包括初始应力场、初始孔隙压力及初始位移，作为数值模拟的计算起始状态^[17]。

在初始条件基础上，边坡的边界条件用于约束模型区域，确保数值模拟能够真实反映边坡整体受力和变形行为^[18]。底部节点在 3 个方向固定，模拟坡体与下部岩土层的刚性约束公式表达为：

$$u_x = u_y = u_z = 0 \tag{1}$$

侧边节点限制水平位移而保持垂直方向自由，防止坡体水平无限扩展，表达为：

$$u_x = 0, u_z = \text{自由} \quad (2)$$

坡顶及坡面节点允许自由位移，并考虑降雨作用下孔隙水压力随时间变化表达如下：

$$u_{top} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix}_{\text{自由}}, u_w = u_w(t) \quad (3)$$

为准确获取边坡的安全系数，引入强度折减法（Shear Strength Reduction Method, SRM）。该方法的核心力学思想在于：在保持边坡模型几何尺寸、边界约束条件以及内外荷载恒定不变的前提下，人为地将土体实际的抗剪强度参数进行逐级等比折减，并以此折减后的虚拟参数进行有限元求解，直至边坡岩土体达到极限平衡状态并诱

发整体失稳^[19]。此时所对应的临界折减系数，即被定义为该边坡的安全系数（ F_s ）。

2.2 模型建立

基于3个剖面分别构建了对应的三维有限元模型，相比二维分析，三维模型能够考虑坡体纵向（垂直于剖面方向）的应力传递与变形协调，弥补二维分析忽略侧向约束的不足，使计算结果更接近实际工况。具体操作中，将坡体的3个剖面CAD图导入软件MIDAS-GTS中建立三维模型。根据不同地层、结构的尺寸及该地层的重要程度，按照不同的尺寸对剖面进行网格划分。其中1—1剖面共划分了28361个单元，16104个节点；2—2剖面共划分了28187个单元，15884个节点；3—3剖面共划分了27621个单元，15345个节点。3个剖面的三维网格剖分，如图4所示。

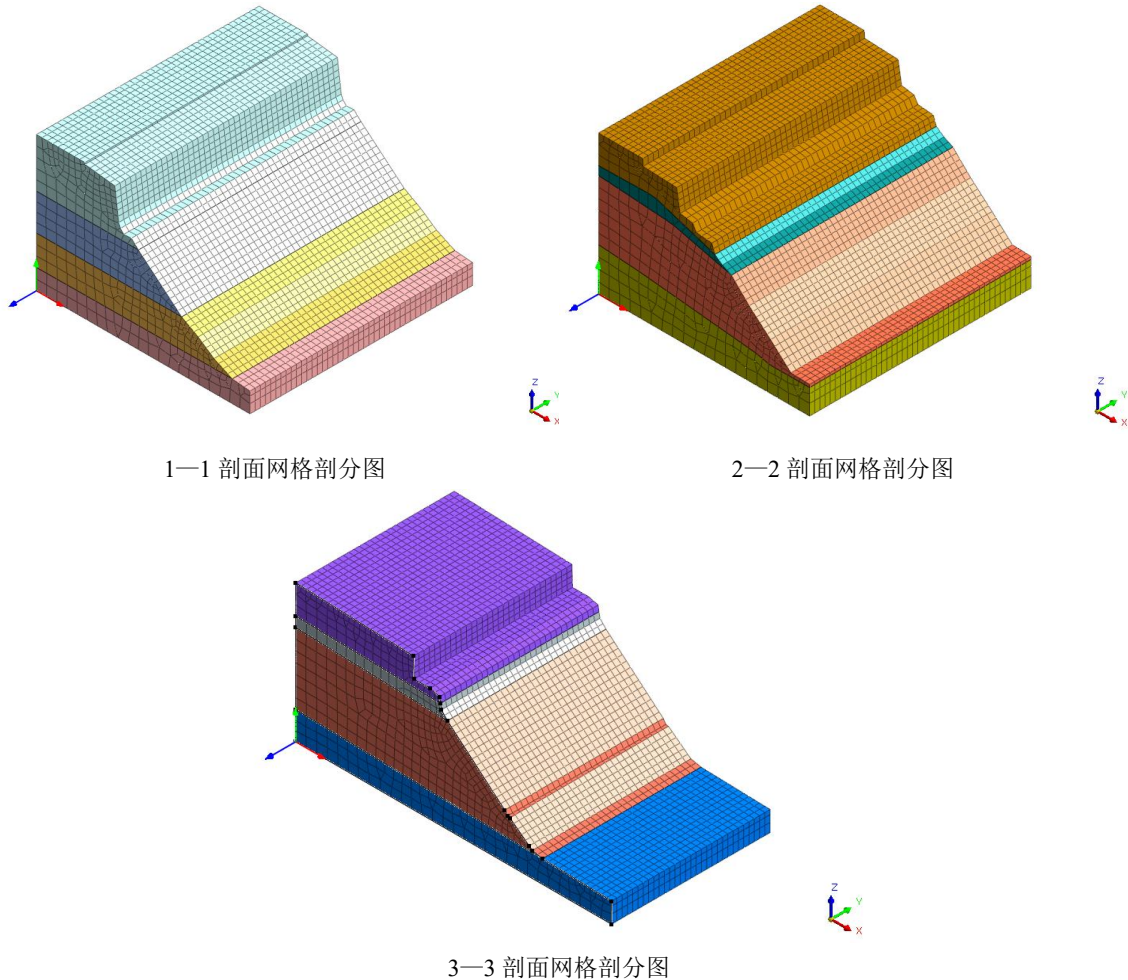


图4 网格剖分图

Fig.4 Grid Partitioning Diagram

3 多工况下稳定性演化分析

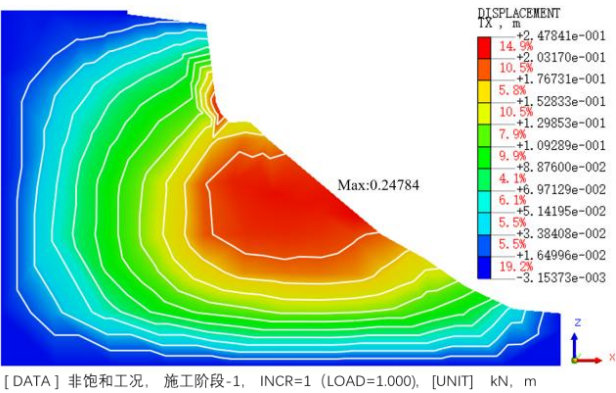
3.1 非饱和工况

由数值模拟结果可得，在非饱和工况下3个

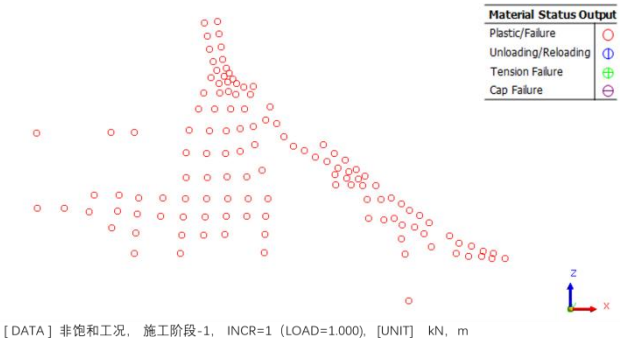
剖面的安全系数分别是1.001、1.314、1.121。图5为非饱和工况下3个典型剖面的位移及塑性应变云图。从图5(a)可以看出，1—1剖面水平位移集中分布于边坡中下部及坡面浅表区域，最大水平位移量

达 0.248 m。坡体在自重及卸荷作用下向临空面发生了明显的侧向挤出变形。图 5(b)显示, 1—1 剖面塑性破坏单元自坡顶后缘张拉区萌生, 沿坡体内部剪应力集中带向深部延伸至坡脚处剪出。数值计算结果显示, 该工况下边坡的整体安全系数为 1.001 处于欠稳定的状态。图 5(c)显示, 2—2 剖面边坡位移集中分布于边坡中下部及坡面浅表区域, 最大水平位移量达 0.232 m。从图 5(d)可以看出, 2—2 剖面当前工况下坡体内部塑性破坏单元主要集中于坡体中后部深层区域跟坡脚浅层区。两者尚未形成连续的带状发展。该工况下边坡的整体安全系数 1.314, 整体处于稳定状态。图 5(e)显示, 3—3 剖面坡体的位移集中分布

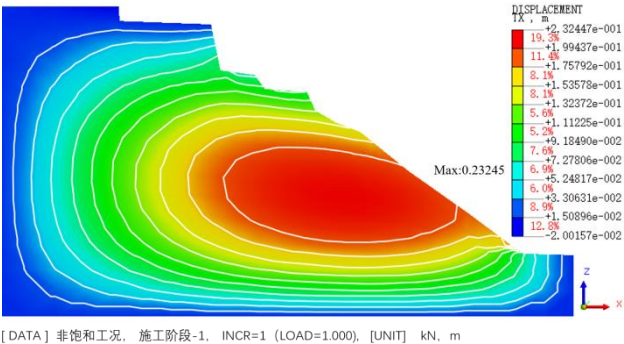
于边坡中下部及坡面浅表区域, 最大水平位移量达 0.313 m。由图 5(f)可以看出, 3—3 剖面塑性破坏单元集中分布于坡脚及中下部区域, 沿潜在剪切面范围向坡体深部延伸且具有贯通趋势, 该工况下边坡的整体安全系数为 1.121 处于基本稳定的状态。由以上分析可得, 各剖面的水平位移均集中分布于边坡中下部及坡脚的浅表区域, 塑性破坏演化及稳定状态具有较为明显的差异, 2—2 剖面内部塑性区呈零散、分段式局域发育, 尚未形成连续的滑移面。1—1 与 3—3 剖面内部塑性区已突破局部的零散发育阶段, 呈现出大范围连片及高度的空间连续性, 在这两个剖面中, 塑性贯通带的演化范围与位移高值区在空间上高度一致, 潜在破坏路径清晰。



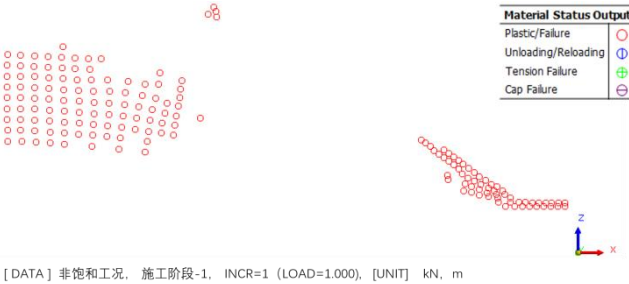
(a) 1—1 剖面位移云图



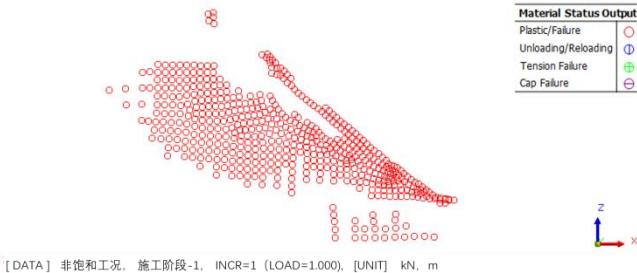
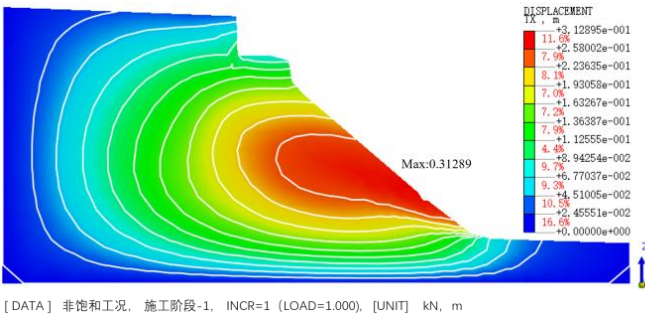
(b) 1—1 剖面塑性应变云图



(c) 2—2 剖面位移云图



(d) 2—2 剖面塑性应变云图



[DATA] 非饱和工况, 施工阶段-1, INCR=1 (LOAD=1.000), [UNIT] kN, m

[DATA] 非饱和工况, 施工阶段-1, INCR=1 (LOAD=1.000), [UNIT] kN, m

(e) 3—3 剖面位移云图

(f) 3—3 剖面塑性应变云图

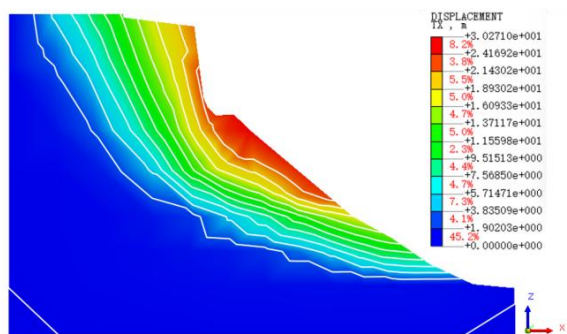
图 5 非饱和工况下 3 个典型剖面的位移及塑性应变云图

Fig.5 Displacement and plastic strain contours of three typical sections under unsaturated conditions

3.2 饱和工况

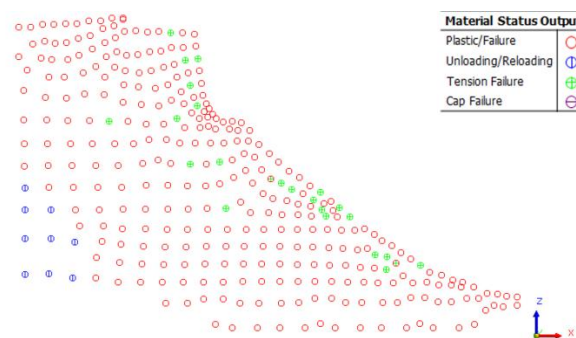
图 6 给出了降雨饱和工况下 3 个典型剖面的位移与塑性应变云图。由图 6 可以看出, 3 个剖面的安全系数分别为 0.859、1.169、1.005。在降雨入渗导致坡体土体达到饱和状态后, 1—1 剖面相较于非饱和工况, 坡体位移由中下部迅速向坡体深部及折坡带扩展, 位移场显示明显整体滑移趋势, 计算终止时模型不收敛, 最大水平位移呈发散趋势 (计算终止时为 30.27 m) (图 6(a))。由图 6(b)可知, 饱和工况下 1—1 剖面坡体内部塑性区塑性破坏单元沿内部主剪应力带迅速蔓延, 形成了范围广阔且高度连续的厚大带状贯通区。坡顶后缘的张拉破坏 (拉伸屈服单元) 与中下部及坡脚的剪切破坏全面贯连具有整体贯通趋势。结合数值计算结果, 该工况下边坡整体安全系数为 0.859, 当 $F_s < 1.0$ 时, 计算已不收敛, 此时位移值为奇异解, 不具有直接物理意义, 故仅以安全系数作为失稳判据。由图 6(c)可知, 2—2 剖面水平位移集中区由坡脚及中下部向折坡带及坡体深部发生扩展, 最大位移约 0.252 m。由图 6(d)

可知, 饱和工况下 2—2 剖面在非饱和工况下原本呈零散、分段发育的局部塑性破坏单元, 经饱和和软化后, 沿内部主剪应力集中带向深部及两侧蔓延。数值计算结果显示, 该工况下 2—2 剖面边坡整体安全系数降至 1.169。由图 6(e)可知, 3—3 剖面水平位移集中区由中下部及坡脚向坡体深部及折坡带发生扩展, 最大位移为 3.459 m。进一步结合塑性应变图 6(f)分析表明, 塑性破坏单元在饱和工况下沿内部主剪应力集中带向深部蔓延, 形成连续的带状塑性区, 并呈现整体贯通趋势。数值计算结果显示, 饱和工况下 3—3 剖面边坡的整体安全系数急剧劣化至 1.005, 整体由稳定状态劣化为欠稳定。由以上分析可得, 与非饱和工况相比降雨饱和后, 两类边坡的稳定安全系数均明显下降, 3 个剖面的位移场均呈现出扩展趋势, 折坡带在饱和状态下的变形敏感性增强。结合塑性应变图, 坡顶后缘的张拉破坏与中下部的剪切破坏贯连。中下部、坡脚及折坡带等敏感变形区域在饱和状态下的持续塑性屈服与连通, 极易诱发沿潜在贯通通道发生整体牵引式失稳破坏。



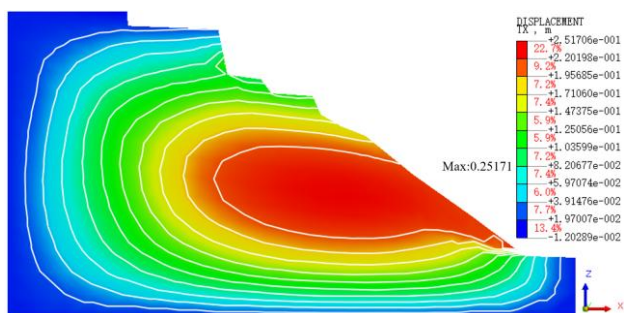
[DATA] 饱和工况, 施工阶段-2, INCR=7 (LOAD=1.000), [UNIT] kN, m

(a) 1—1 剖面位移云图



[DATA] 饱和工况, 施工阶段-2, INCR=7 (LOAD=1.000), [UNIT] kN, m

(b) 1—1 剖面塑性应变云图



[DATA] 饱和工况, 施工阶段-2, INCR=1 (LOAD=1.000), [UNIT] kN, m

(c) 2—2 剖面位移云图



[DATA] 饱和工况, 施工阶段-2, INCR=1 (LOAD=1.000), [UNIT] kN, m

(d) 2—2 剖面塑性应变云图

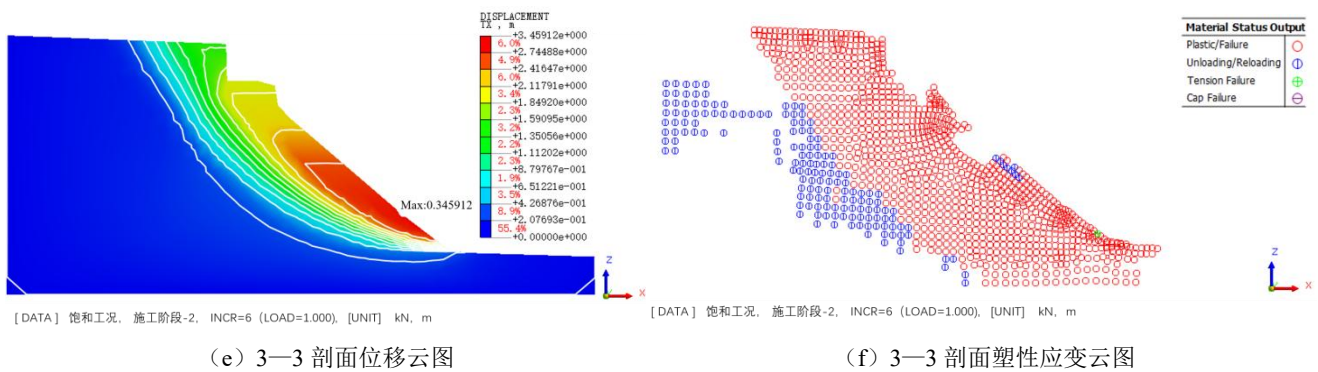


图 6 饱和工况下 3 个典型剖面的位移与塑性应变云图

Fig.6 Displacement and plastic strain contours of three typical sections under saturated conditions

3.3 典型剖面稳定性对比

对比非饱和与饱和工况下各剖面的计算结果可知,受降雨入渗及水理软化效应的显著影响,边坡整体稳定性呈现出急剧劣化的演化趋势。从安全系数变化特征来看,2—2 剖面安全系数由非饱和工况稳定状态的 1.314 退化为饱和工况下的 1.169; 3—3 剖面安全系数由非饱和工况的基本稳定状态的 1.121 降至欠稳定状态的 1.005; 而变形最剧烈的 1—1 剖面安全系数在非饱和工况下已处于欠稳定状态的 1.001,在饱和工况下安全系数降为 0.859 演变为不稳定状态。非饱和工况下,各剖面水平位移集中分布于中下部及坡脚的浅表区域;而在饱和工况下,位移集中区彻底突破了原有的浅表局限,向坡体深部及折坡带发生大范围显著扩展。各剖面最大位移集聚于中下部坡面及折坡带附近,且由深部至浅表的位移梯度增大,折坡带在饱和状态下的变形敏感性增强。结合塑性单元状态图的演化特征表明,饱和工况下加速驱动了内部滑动带的全面贯通。非饱和工况下,除 1—1 剖面外,其余剖面内部塑性区多呈零散、分段式局域发育;然而在饱和工况下,各剖面内部塑性区沿主剪应力带向深部及两侧蔓延。各分段塑性破坏单元交汇融合,由局部屈服演化为范围广且连续的带状贯通区。该塑性高值区的范围与位移核心区在空间边界上表现出一致性,坡顶后缘的张拉破坏与中下部及坡脚的剪切破坏贯连,潜在滑动通道极其清晰,具有整体贯通趋势。综合上述特征演化规律充分说明,中下部、坡脚及折坡带等敏感变形区域在饱和软化作用下的持续塑性屈服与连通,削弱了坡体的整体抗滑能力,极易诱发沿潜在贯通面发生的大规模整体牵引式滑动破坏。

4 失稳机制与方法验证

4.1 降雨入渗失稳机理

在降雨入渗作用下,黄土边坡失稳机制表现为结构强度削弱—抗剪强度衰减—由局部变形向整体失稳演化的过程^[20]。入渗初期,雨水在重力与基质吸力梯度的共同驱动下由地表向下迁移,形成明显的湿润前沿。随着含水率的升高,土体基质吸力依据土—水特征曲线快速降低,导致非饱和有效应力减损。根据非饱和土抗剪强度理论,吸力的丧失直接削弱了由吸力贡献的表观黏聚力,使得土体抗剪强度发生显著下跌。与此同时,水分入渗导致孔隙气被压缩或排出,局部孔隙水压力升高,进一步抵消了颗粒间的法向有效应力,诱发土体进入应变软化阶段^[21]。从微观机理来看,黄土特有的架空孔隙结构对水分极具敏感性,在 1—1 剖面中,坡脚及中下部塑性区率先发展(图 6b),印证了在剪应力集中区域率先诱发微裂隙的机理;随着饱和作用加剧,塑性区沿潜在滑动带向坡体深部及两侧蔓延,局部分段塑性单元逐渐贯通,显示水力—力耦合效应导致的剪切带完全贯通(图 6a),数值模型捕捉到的宏观位移突变正体现了这一阶段的整体失稳;进一步结合安全系数下降(1.001→0.859),可看出局部破坏向整体牵引式滑移的演化趋势。入渗水分首先削弱了颗粒接触处的毛细压力,随后溶解并软化了以碳酸钙为主的矿物胶结物。在这种“溶蚀—软化”效应下,黄土的结构强度发生破坏,颗粒排列由疏松的架空结构向密实的堆积结构转化,宏观上表现为湿陷变形。这种结构性的丧失与剪切强度的衰减互为因果,在剪应力集中区域率先诱发微裂隙^[22-23]。

边坡失稳的演化路径呈现出阶段性与递进性。演化初期,破坏局限于表层湿润带,表现为局部的剪切滑移和不均匀沉降。随着降雨持续,局部变形区域产生的微裂隙成为水分入渗的“快车道”,加剧

了深部土体的基质吸力丧失。在重力剪应力作用下，局部滑移点通过应力重分布逐渐向周边扩展，促使孤立的剪切破坏区相互贯通，形成连续的剪切滑移带。当这种水力-力耦合效应导致的剪切带完全贯通整个潜在滑动面时，边坡内部的抗滑力矩将不足以抵消下滑力矩，边坡由局部的蠕变变形转变为整体性的动力破坏，最终演化为典型的黄土滑坡^[24]。

4.2 计算方法可靠性验证

为验证强度折减法 (Strength Reduction Method, SRM)数值模拟结果的合理性，针对研究边坡的潜在破坏模式以圆弧滑动为主。结合现

场工程地质主剖面测绘等多手段综合勘探资料分析，以及条分法的相关假定，提出以下假定：该边坡土体相对均质，其潜在滑动面在空间上发育连续，剖面几何形态表现为典型的近似圆弧形。为保证计算精度，本次稳定性分析选取简化毕肖普法(Simplified Bishop Method)。该方法充分运用条分思想，将潜在滑体离散为若干垂直土条，在假定滑动面为圆弧的前提下，严格建立各土条的竖向受力平衡与整体力矩平衡方程^[25]。将 SRM 数值模拟所得安全系数 $F_{S,SRM}$ 与毕肖普法 $F_{S,Bishop}$ 对比，并计算相对误差，计算结果如表 3 所示。

表 3 安全系数计算结果对比表
Tab.3 Comparison of calculated safety factors

工况	剖面	$F_{S,SRM}$	$F_{S,Bishop}$	$\delta/\%$
非饱和工况	1—1	1.001	1.055	5.0%
	2—2	1.314	1.139	15.0%
	3—3	1.121	1.116	0.4%
饱和工况	1—1	0.859	0.754	13.0%
	2—2	1.169	1.003	16.0%
	3—3	1.005	0.974	3.0%

由表 3 可知，简化毕肖普法与强度折减法所得安全系数在不同工况下总体表现出一致的变化规律。非饱和工况下，3 个剖面的安全系数均大于饱和工况，表明边坡在非饱和状态下具有较高的稳定性，而在饱和条件作用下稳定性明显降低，说明降雨入渗及饱和软化效应对边坡稳定性具有显著削弱作用。这一规律与数值模拟结果所反映的变形增大、塑性区扩展及潜在滑动范围加深的变化特征基本一致。

从误差分布来看，各剖面的相对误差存在一定差异。非饱和工况下，1—1、2—2 和 3—3 剖面的相对误差分别为 5%、15%和 0.4%；饱和工况下，3 个剖面的相对误差分别为 13%、16%和 3%。其中，3—3 剖面在两种工况下的误差均较小，说明该剖面采用简化毕肖普法进行验算时，与数值模拟结果吻合程度较高；1—1 剖面在非饱和工况下误差较小，而在饱和工况下误差有所增大；2—2 剖面在两种工况下的误差相对较大，表明该剖面的极限平衡验算结果与数值模拟结果之间存在一定差异。

从误差分布来看（表 3），SRM 与简化毕肖普法计算得到的安全系数存在一定差异，其中 2—2 剖面误差高达 15%~16%。这一显著差异主要来源于两方面：①两种方法的基本假定不同，SRM 能够自动搜索最危险滑面并反映应力重分布，而简化毕肖普法假定滑面为圆弧且仅考虑条分受力平衡，因

此在复杂滑动模式下易产生系统性偏差；②2—2 剖面呈“台阶状-缓坡”组合，其潜在滑动面偏离圆弧假定，使 Bishop 法误差自然增大。由此可见，对于复杂地形边坡，SRM 具有更高的适用性，而毕肖普法可作为快速初判的有效补充。

简化毕肖普法与强度折减法在安全系数大小规律及工况变化趋势方面保持一致，均表明非饱和工况下边坡稳定性较好，而饱和工况下稳定性显著下降。同时，两种方法对潜在失稳部位的判定也具有较好的对应关系。因此，可以认为数值模拟结果总体上具有较好的合理性与可靠性，可为后续边坡失稳机理分析及防治措施研究提供依据。

5 结论

本文以豫西典型非饱和黄土边坡为研究对象，基于 Mohr-Coulomb 本构模型，采用有限元强度折减法(SRM)与简化毕肖普极限平衡法，系统揭示了非饱和与降雨饱和工况下边坡的变形响应特征、稳定性演化规律及失稳致灾机制。主要研究结论如下：

1)非饱和工况下边坡整体呈稳定至欠稳定状态，坡体力学平衡主要依赖黄土固有结构强度及基质吸力提供的附加抗剪强度。位移响应较小，主要集中于中下部、坡脚及临空面附近，未形成贯通塑性区，整体以局部蠕滑为主。

2)降雨入渗导致基质吸力衰减与抗剪强度弱化是诱发边坡失稳的关键外部因素。在饱和工况下,塑性区由局部分段分布演化为沿潜在滑移路径的连续扩展与贯通。3个典型剖面响应差异显著:1—1剖面整体失稳最为显著;2—2剖面表现为局部先行失稳;3—3剖面位移及贯通性介于两者之间,位移集中区迅速向坡体深部及坡脚外缘迁移,滑动带呈连续弧形状空间展布,边坡由局部变形逐渐向整体失稳演化。

3)简化毕肖普法与强度折减系数法所得安全系数变化趋势一致,滑动面的空间位置判定基本吻合,验证了数值计算的可靠性。受方法假定和剖面形态差异影响,二者在2—2剖面等复杂地形条件下存在一定差异,表明SRM在自动识别潜在滑动面及反映应力重分布方面更具适用性,简化毕肖普法可作为边坡稳定性快速判别和结果校核的有效补充。

4)鉴于降雨入渗是诱发该类边坡失稳的核心外因,且破坏模式表现为牵引式渐进演化特征,建议采取“前部阻滑、后部减载”的综合防治策略:即在坡顶实施减载以降低下滑驱动力,在坡脚临空面等关键部位增设抗滑桩或挡土墙等支挡结构,以有效阻断渐进破坏通道,确保边坡的长效稳定。

参 考 文 献

- [1] 黄志全,陈宇,曹继辉,等.小浪底水库1#滑坡非饱和土土水特性试验研究[J].华北水利水电学院学报,2010,31(2):67-70.[Huang Zhiquan, Chen Yu, Cao Jihui, et al. Experimental study on the soil-water characteristics of unsaturated soil from the 1# landslide in Xiaolangdi Reservoir[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2010,31(2):67-70.]
- [2] 叶帅华,时铁磊.降雨入渗条件下多级黄土高边坡稳定性分析[J].工程地质学报,2018,26(6):1648-1656. [Ye Shuaihua, Shi Yilei. Stability analysis of multistage high loess slopes under rainfall infiltration conditions[J]. Journal of Engineering Geology, 2018,26(6):1648-1656.]
- [3] 余岱金,黄强兵,康孝森,等.黄土填方边坡界面渗流破坏机制模型试验研究[J].水文地质工程地质,2022,49(5):119-128.[Yu Daijin, Huang Qiangbing, Kang Xiaosen, et al. Model test study on the mechanism of interface seepage failure in loess fill slopes[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2022,49(5):119-128.]
- [4] Song Zhaoyang, Zhang Zhihong. Shear strength equation of soils in a wide suction range under various initial void ratios[J]. Vadose Zone Journal, 2024, 23: e20368.
- [5] Ke Chen, He Xuzhen, Liang Fayun, et al. Contribution of capillary pressure to effective stress for unsaturated soils: role of wet area fraction and water retention curve[J]. Computers and Geotechnics, 2023,154: 105140.
- [6] 薛海斌,张聪敏,党发宁,等.考虑参数时空演化规律的黄土边坡极限平衡分析法研究[J].岩土工程学报,2018,40(增刊2):162-166.[Xue Haibin, Zhang Congmin, Dang Faning, et al. Study on the limit equilibrium analysis method for loess slopes considering the spatiotemporal evolution of parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018,40(S2):162-166.]
- [7] 王华宁,魏奕淼,宋飞,等.考虑非均质特性的黄土边坡稳定性分析[J/OL].工程力学,1-10[2026-03-05] [Wang Huaning, Wei Yimiao, Song Fei, et al. Stability analysis of loess slopes considering heterogeneity[J/OL]. Engineering Mechanics, 1-10[20 26-03-05]].
- [8] 蒋一帆,李家科.不同雨强和坡度条件下黄土边坡失稳机理研究[J].中国地质灾害与防治学报,2025,36(6):48-63.[Jiang Yifan, Li Jiake. Study on the instability mechanism of loess slopes under different rainfall intensities and slope gradients[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025,36(6):48-63.]
- [9] 黄晓虎,魏兆亨,易武,等.裂隙优势流入渗透发堆积层滑坡浅层破坏机理研究[J].岩土工程学报,2024,46(6):1136-1145.[Huang Xiaohu, Wei Zhaozheng, Yi Wu, et al. Study on the shallow failure mechanism of accumulation layer landslides induced by fracture-preferential flow infiltration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024,46(6):1136-1145.]
- [10] 李鑫,卢玉东,范文,等.黄土斜坡优先流促滑机理研究现状及展望[J].水土保持通报,2019,39(1):294-301,324.[Li Xin, Lu Yudong, Fan Wen, et al. Research status and prospects of the sliding-promoting mechanism of preferential flow in loess slopes[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(1):294-301,324.]
- [11] 范文,邓龙胜,于渤,等.极端降雨下黄土体灾变机制与滑坡风险防控[J].地球科学与环境学报,2025,47(3):285-312,282.[Fan Wen, Deng Longsheng, Yu Bo, et al. Catastrophic mechanism of loess masses and landslide risk prevention and control under extreme rainfall[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2025,47(3):285-312,282.]

- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.[Ministry of Housing and Urban-Rural Development of PRC. Technical code for building slope engineering: GB 50330—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.]
- [13] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程边坡设计规范: SL 386—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.[Ministry of Water Resources of PRC. Design specification for slope of water resources and hydropower engineering: SL 386—2007[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.]
- [14] 丁保艳,杨校辉,陈昆全.某黄土多级贴坡高填方稳定性分析与综合治理[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(5):117-122.[Ding Baoyan, Yang Xiaohui, Chen Kunquan. Stability analysis and comprehensive treatment of a multistage high loess fill slope[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022,20(5):117-122.]
- [15] Griffiths D V, Fenton G A. Probabilistic slope stability analysis by finite elements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(5): 507-518.
- [16] 陈正汉,郭楠,秦冰,等.非饱和土抗剪强度有效应力参数的分析与检验[J]. 岩土工程学报,2026,48(8):1565-1584.[Chen Zhenghan, Guo Nan, Qin Bing, et al. Analysis and verification of effective stress parameters for shear strength of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2026, 48(8): 1565-1584.]
- [17] Du Guangbo, Liu Nina, Xia Zhao, et al. Laboratory investigation on the stress-dependent anisotropic shear wave velocity (V_s) and coefficient of lateral earth pressure at rest (K_0) of granular materials[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 1: 6639178.
- [18] Garakani A A. Coefficient of lateral soil pressure in unsaturated soils[M]//Desai C S, Xiao Y, Zaman M, et al. DSC/HISS modeling applications for problems in mechanics, geomechanics, and structural mechanics. Boca Raton: CRC Press, 2023: 117-132.
- [19] 黄志全,李小慧,孙怡,等.魏家沟滑坡滑带土非饱和蠕变特性试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(1):47-50.[Huang Zhiquan, Li Xiaohui, Sun Yi, et al. Experimental study on the unsaturated creep characteristics of slip-zone soil from the Weijiagou landslide[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2015,36(1):47-50.]
- [20] 宋日英,陈宇.三门峡地区黄土状粉土静力学特性试验研究[J]. 华北水利水电学院学报,2013,34(4):10-13.[Song Riying, Chen Yu. Experimental study on the static mechanical properties of loess-like silt in the Sanmenxia area[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2013,34(4):10-13.]
- [21] 黄志全,何鹏.用有效降雨量监测黄土边坡稳定性的研究[J]. 华北水利水电学院学报,2007,28(6):53-55.[Huang Zhiquan, He Peng. Study on monitoring the stability of loess slopes using effective rainfall[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2007,28(6):53-55.]
- [22] Kim J, Kim Y, Jeong S, et al. Rainfall-induced landslides by deficit field matric suction in unsaturated soil slopes[J]. Environmental Earth Sciences, 2017: 808.
- [23] Tan Weijia, Huang Qiangbing, Chen Xing. Physical model test on the interface of loess fill slope[J]. Land, 2022,11: 1372.
- [24] Kong Jiaxu, Zhuang Jianqi, Zhan Jiewei, et al. A landslide in Heifangtai, northwest of the Chinese Loess Plateau: triggered factors, movement characteristics, and failure mechanism. Landslides, 2021, 18(10): 3407-3419.
- [25] Ouyang Weihang, Liu Siwei, Yang Yi. An improved Morgenstern-Price method using Gaussian quadrature[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 148: 104754.
- [26] Jia Zhaolin, Zhu Liang, Guo Mengying, et al. Rainfall-induced failure mechanisms of cohesive slopes in DEEP excavations[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2025,43(9):495.

Evolution of the Stability Mechanism of Collapsible Loess Slopes under Rainfall

Wang Jiangfeng¹, Liu Huaqiu¹, Du Chunxue¹, Xu Chao^{2,3}, Wang Jifeng⁴, Dong Xinhua⁴

(1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou

450046, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3.Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Zhumadian City Flood and Drought Disaster Prevention Center, Zhumadian 463900, China)

Abstract: **【Objective】** To address the stability evolution and failure mechanism of collapsible loess slopes in western Henan under rainfall infiltration and saturation, this study, based on engineering geological investigation data, aims to provide a scientific basis for the stability assessment and mitigation design of similar slopes in the region. **【Methods】** The Houqiao Village landslide in Sanmenxia, Henan Province, was investigated using three representative cross-sections with distinct topographic characteristics. Slope stability under unsaturated and rainfall-saturated conditions was compared using finite-element simulations in MIDAS GTS, incorporating the Mohr-Coulomb constitutive model and the strength reduction method. Safety factors were further evaluated using the simplified Bishop limit-equilibrium method. **【Results】** Under unsaturated conditions, the slopes ranged from stable to marginally stable, and displacement was mainly concentrated in the middle-to-lower slope, slope toe and areas adjacent to the free face. Under rainfall-saturated conditions, displacement zones extended from the middle-to-lower slope and shallow slope-toe regions into the deeper slope mass and slope-break zones. Connectivity of the potential slip zones increased, and safety factors decreased by an average of 11.8%. Failure responses varied substantially with slope geometry: the steep-upper, gentle-lower section with the greatest slope height showed the most pronounced overall instability; the stepped-gentle slope section exhibited localized instability; and the more regular slope showed an intermediate degree of displacement development and slip-zone connectivity. The simplified Bishop and strength reduction methods yielded consistent trends in safety factor, supporting the reliability of the numerical results.

【Conclusions】 The study reveals the intrinsic mechanism by which rainfall-induced saturation leads to the loss of matric suction in loess, resulting in a sharp decrease of 12%-17% in apparent cohesion. This process is accompanied by a “dissolution-softening” effect, which causes the degradation of structural strength and shear strength, thereby promoting the progressive evolution of the slope from localized deformation to overall instability.

Keywords: loess slopes; stability analysis; unsaturated condition; saturated condition; numerical simulation; Simplified Bishop method