DOI:10.14188/j.1671-8844.2026.0041 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-12

极端降雨作用下土石混合体边坡破坏模式试验研究

郭哲恒[1,2],苏正洋[1,2],王凯玉[1,2],游铭[1,2],王顺[1,2]

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点试验室,湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学水利水电学院水工程风险与防灾研究所,湖北 武汉 430072)

摘要: 基于滑槽模型试验,模拟不同降雨强度、坡度及含石量条件下土石混合体边坡的变形与破坏过程,结合体积含水率、孔隙水压力和土压力等多源监测数据,分析其失稳演化特征及主控影响因素。结果表明,土石混合体边坡在降雨入渗过程中呈现明显的阶段性演化特征,失稳过程可归纳为坡脚软化、牵引式崩塌和整体滑移三个典型阶段。降雨强度和坡度的增大显著加快了坡体渗流-变形耦合过程,导致失稳时间提前、破坏范围扩大;而含石量的提高通过增强骨架结构与排水通道作用,有效抑制孔隙水压力积聚,从而显著提升边坡稳定性。随着降雨强度与坡度的增加,体积含水率、孔隙水压力及土压力的峰值均显著增大,而随含石量增加,上述响应指标整体呈下降趋势。本研究从试验尺度上揭示了土石混合体边坡在降雨作用下的多场耦合致滑机理,可为此类边坡稳定性评价与防灾减灾工程提供重要理论依据。

关键词: 土石混合体;降雨入渗;边坡失稳;物理模型试验

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A

Failure patterns of soil-rock mixture slopes under extreme rainfall: A flume modelling test study

Guo Zheheng[1,2], Su Zhengyang[1,2], Wang Kaiyu[1,2], You Ming[1,2], Wang Shun[1,2]

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan 430072, China;
2. Institute of Hydraulic Engineering Risk and Disaster Prevention, School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A series of flume modelling tests were conducted to investigate the deformation and failure processes of soil-rock mixture slopes under different scenarios, considering various rainfall intensities, slope gradients, and rock contents. Some key monitoring data, including volumetric water content, pore water pressure, and earth pressure, were used to analyze the evolutionary characteristics and dominant controlling factors of rainfall-induced failure. The results indicate that the instability of soil-rock mixture slopes during rainfall infiltration exhibits distinct stage-dependent behavior, which can be generalized into three typical phases: toe softening, traction-type collapse, and overall sliding. Increasing rainfall intensity and slope gradient significantly accelerate the coupled seepage-deformation process, leading to earlier failure and larger damage extent, whereas a higher rock content enhances the skeleton structure and drainage pathways, effectively suppressing pore water pressure

收稿日期: XXXX-XX-XX

作者简介: 郭哲恒(2000-),男,硕士研究生,主要从事地质灾害链研究,E-mail: zhehengguo@whu.edu.cn。

通信作者: 王顺(1986-),男,教授,博士,主要从事地质灾害链与水电工程安全研究,E-mail: shun.wang@whu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号:42472355);国家自然科学基金青年学生基础研究项目(博士研究生)(编号:523B2091)。

本文引用格式: 郭哲恒,苏正洋,王凯玉,等.极端降雨作用下土石混合体边坡破坏模式试验研究[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-12.

Citation: Guo Zheheng, Su Zhengyang, Wang Kaiyu, et al. Failure patterns of soil-rock mixture slopes under extreme rainfall: A flume modelling test study[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-12.

accumulation and thereby improving overall slope stability. The peak values of volumetric water content, pore water pressure, and earth pressure increase with increasing rainfall intensity and slope gradient, but decrease overall with increasing rock content. This study reveals the multi-field coupled failure mechanism of soil - rock mixture slopes under rainfall, providing an important theoretical basis for stability assessment and disaster prevention of such slopes.

Key words: soil - rock mixture; rainfall infiltration; slope instability; physical model test

土石混合体作为一种典型的非均质松散堆积材料[1],广泛发育于山区交通、水利水电及重大基础设施工程区,其稳定性问题长期以来是工程地质与岩土工程领域的研究热点[2]。与均质土体或完整岩体不同,土石混合体由细粒土体与尺度、形态高度离散的块石共同组成,其内部结构与力学性质受两相介质协同控制,表现出显著的非均质性、非连续性及各向异性特征[3]。在降雨入渗、库水位波动等外部环境扰动作用下,坡体内部渗流场与应力场发生强烈重构,极易诱发渐进变形乃至整体失稳,对工程安全与周边环境构成严重威胁[4-5]。

已有研究表明,降雨诱发土石混合体边坡失稳的本质机制主要包括孔隙水压力快速累积、基质吸力衰减以及细粒土体强度软化等过程[6-7],而块石与细粒土体之间复杂的接触关系与空间分布特征,又进一步导致坡体水力 - 力学响应呈现非均匀性和阶段性的演化特征[8-9]。因此,从多场耦合角度揭示土石混合体边坡在降雨作用下的失稳机理,对于提升山区工程灾害防控能力具有重要科学意义和工程价值[10]。物理模型试验为研究降雨诱发边坡失稳的演化过程提供了直观而有效的技术手段,可在可控边界条件下实现对坡体渗流演化、变形发展及破坏过程的全过程观测[11-12]。既有研究多以均质土质边坡为对象,揭示了降雨入渗条件下土体强度退化与累积变形特征,并对不同降雨工况下的失稳动力过程进行了探讨[13-15]。然而,自然边坡中普遍发育块石结构,其存在会显著改变坡体内部的渗流通道、应力传递路径及局部变形模式,均质土坡模型难以真实反映土石混合体的非均质结构特征及其对失稳过程的控制作用。针对土石混合体边坡,已有研究多从单一或双因素角度出发,分别探讨了含石量、降雨强度及坡度对边坡变形与破坏特征的影响[16-20],但多因素耦合作用下的失稳演化规律及其内在机制仍缺乏系统认识,尤其是在强降雨与陡坡等不利工况条件下,相关试验与机理研究仍较为不足。

基于此,本文依托变角度滑槽试验系统与喷嘴式人工模拟降雨装置,开展了不同降雨强度、坡度及含石量条件下土石混合体边坡的室内物理模型试验。不同于既有研究多侧重于单一因素的定性分析,本文重点探讨在极端降雨与高陡坡度耦合作用这一不利工况下,土石混合体内部渗流场重构与应力场重分布之间的关系,并深入分析块石骨架如何动态调控超孔隙水压力的消散路径。试验设定的最大降雨强度(100 mm/h)参考了我国山区局地短历时特大暴雨的典型阈值,结合变角度滑槽模拟的陡坡环境,具有显著的工程灾害代表性。尽管受物理尺寸限制,模型内部有效应力水平较低,但通过保持几何比例与材料结构的相似性,本试验仍能有效还原边坡失稳的动态演变逻辑。本文通过对体积含水率、孔隙水压力及土压力等多参数时空演化特征的综合监测,旨在提炼出判别土石混合体边坡在极端条件下失稳状态的定量指标,系统阐明多因素互馈作用下的多场耦合致滑机理,为此类边坡的灾害早期预警与稳定性评价提供更为精确的理论依据与试验支撑。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

本试验所用土石混合体为人工配制材料,由细粒土与块石两相介质组成。细粒土选用标准砂,主要矿物成分为石英,颗粒粒径小于 2 mm,级配良好。块石材料选用砾石,其原岩为灰岩,颗粒形态以次棱角状和棱角状为主,粒径范围为 3 - 5 cm。该粒径选择遵循了模型相似比要求,确保模型最小尺寸大于最大块石粒径的7倍,旨在模拟天然土石混合体中的骨架嵌挤作用。本试验基于实验室制备的精确性考虑,采用质量分数作为控制指标。根据混合体干密度与块石密度,含石质量分数10%、20% 和 30% 约对应体积分数 6.5%、13.1% 和 19.6%。

图 1 为图示混合体材料的级配曲线,随着含石量的增加,级配曲线在粗粒径区间逐渐出现明显的平台特征,反映出粗颗粒骨架效应的增强。

为保证不同工况下模型试验结果的可比性,试

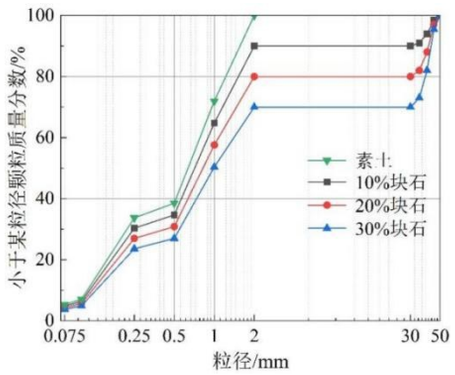


图1 土石混合体级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of soil-rock mixture

样干密度统一控制为1.75 g/cm³，初始含水率设为5%。试样制备过程中，首先将标准砂与定量水充分拌合，使含水率分布均匀，随后按设计比例加入块石并进行人工拌合，以确保块石在模型中随机分布且避免局部集聚。滑槽试验中，土石混合体边坡模型采用分层填筑法成型，单层填筑厚度控制为10 cm，层间进行刮毛处理以增强层间结合效果，各层填筑质量均严格按设计干密度进行控制。填筑至预定高度后，使用切土刀进行人工削坡，制成坡角为30°的边坡模型。

1.2 试验装置与监测系统

试验装置主要由人工模拟降雨系统、变角度滑槽装置及多参数监测系统组成，用于模拟不同降雨条件和坡度工况下土石混合体边坡的渗流－变形－失稳过程。整体试验装置及监测系统布置如图2所示。模型箱内部有效尺寸为长度53 cm、高度20 cm、宽度35 cm。为研究坡度变化对土石混合体边坡稳定性的影响，试验采用可调坡度的变角滑槽装置。初始状态下，边坡坡面与滑槽底板夹角设定为30°，通过设置千斤顶调节底座抬升高度，实现不同坡度工况的模拟。为减小模型整体滑移并增强基底约束条件，在滑槽底部铺设砂纸以提高底板摩擦系数。试验过程中布设多类型传感器对坡体内部水力与力学响应进行同步监测。监测系统主要包括CYY-EC型含水率传感器（W_1－W_4，量程0－100%）、CYY2型孔隙水压力计（P_1－P_4，量程0－100 kPa）以及CYY9型土压力传感器（S_1－S_4，量程0－100 kPa），各类传感器均设置4个，并依据关键监测断面进行分层埋设。此外，在模型箱正前方架设高清工业相机，用于实时记录降雨条件下边坡表面变形演化及失稳破坏过程。所有传感器信号均通过多通道数据采集系统同步传输至计算机终端，实现数据的连续采集与存储。

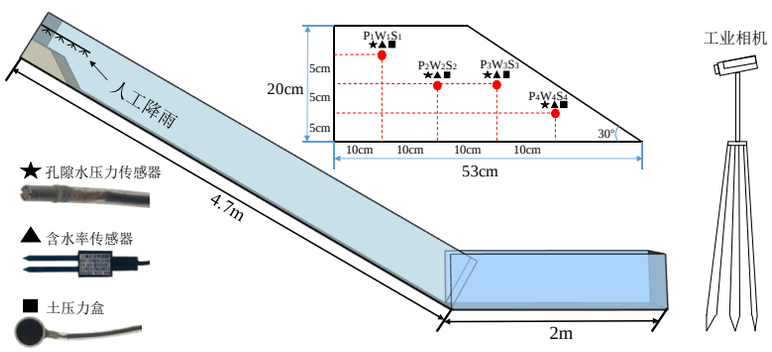


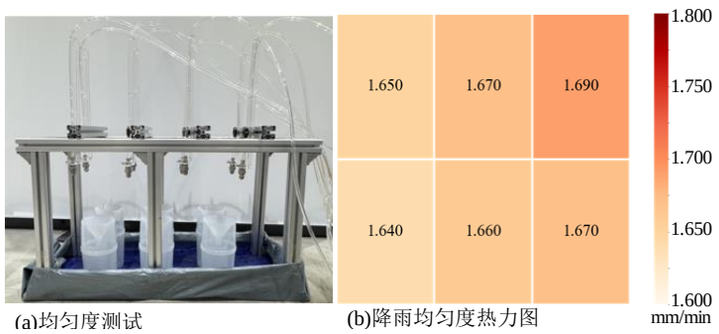
图2 试验装置及监测系统

Fig.2 Experimental setup and monitoring system

模型试验采用喷嘴式人工模拟降雨系统，该系统由供水水箱、变频调速水泵、流量计及雾化喷头阵列组成。为保证降雨范围能够有效覆盖模型边坡，在模型箱正上方沿坡向均匀布置8个雾化喷嘴，装置实物如图3(a)所示。通过调节水泵转速与供水流量，实现降雨强度的连续可控。为验证降雨条件的空间均匀性，在试验前对降雨系统进行均匀度测试。设定目标降雨强度为100 mm/h，连续喷洒10 min，并对模型箱范围内的雨量分布进行测定，其结果如图3(b)所示。可以看出，各测点雨强分布较为均匀，表明该降雨系统能够满足模型试验对水力边界条件均一性的要求。

1.3 试验方案设计

试验采用单因素控制变量法对土石混合体边坡在降雨条件下的失稳响应进行分析。选取含石量、坡度和降雨强度作为主要控制因素，分别代表材料结构特征、几何条件及外部水力作用，是影响降雨诱发边坡失稳的关键参数。为明确几何边界



(a)均匀度测试 (b)降雨均匀度热力图

图3 降雨装置(a)均匀度测试及(b)测试结果

Fig.3 (a) Uniformity test of the rainfall simulation device and (b) the test results

条件,本文定义:滑槽倾角(α)为底座抬升角度;堆积角(β)为人工削坡形成的坡面与底板夹角(本试验统一固定为30°);边坡坡度(θ)为坡面与水平面的总夹角,满足$\theta=\alpha+\beta$。

以工况T1(含石量10%、滑槽倾角30°、降雨强度50 mm/h)作为基准工况,在保持其余条件不变的前提下,分别改变单一因素,设计T1至T8共8组试验工况。其中,工况T2~T4在保持坡度(30°)和降雨强度(50 mm/h)不变的条件下,分别设置含石量为0%、20%和30%,用于分析块石含量变化对土石混合体边坡渗流特性、应力分布及失稳过程的影响。工况T5~T6在保持含石量(10%)和降雨强度(50 mm/h)不变的条件下,通过将滑槽倾角由0°调整至15°,用于探究坡度变化对边坡水力-力学响应及稳定性的影响规律。工况T7~T8在保持含石量(10%)和坡度(30°)不变的条件下,分别设置降雨强度为75 mm/h和100 mm/h,用于分析不同降雨强度条件下土石混合体边坡含水率、孔隙水压力及应力演化特征。通过上述分组对比试验,系统揭示含石量、坡度和降雨强度等关键因素对土石混合体边坡降雨致滑过程的影响机制,各试验工况参数见表1。

表1 土石混合体边坡模型试验工况

Table.1 Test conditions for the soil-rock mixture slope model

试验编号	含石量(%)	滑槽倾角(°)	堆积角(°)	边坡坡度(°)	降雨强度(mm/h)	试验目的
T1	10	30	30	60	50	基准工况
T2	0	30	30	60	50	分析含石量影响
T3	20	30	30	60	50	
T4	30	30	30	60	50	
T5	10	0	30	30	50	分析坡度影响
T6	10	15	30	45	50	
T7	10	30	30	60	75	分析降雨量影响
T8	10	30	30	60	100	

2 试验结果分析

2.1 边坡破坏过程

为揭示含石量、坡度及降雨强度等关键因素对土石混合体边坡破坏模式的影响,依据单因素控制原则,从表1所列试验工况中选取四组具有代表性的工况进行对比分析,分别为基准工况T1、最大含石量工况T4、最缓坡度工况T5以及最大降雨强度工况T8。四组典型工况下边坡在降雨作用下的变形演化及破坏过程如图4所示。

在基准工况T1下,边坡破坏呈现明显的渐进演化特征。降雨开始后,坡体整体保持稳定状态;当降雨持续至t=200 s时,坡体前缘首先出现张拉裂缝,随后在坡脚区域软化与局部剥落的牵引作用下,裂缝逐步向坡体内部扩展。至t=600 s,潜在滑动面贯通,坡体发生整体失稳破坏。在高含石量工况T4中,由于块石骨架的支撑与嵌挤作用增强了坡体整体结构稳定性,边坡破坏明显滞后。坡体起裂时间推迟至t=1380 s,较基准工况延后约1180 s。破坏过程中,坡体未发生整体滑移,而主要表现为坡脚及坡面局部块石剥落与松散土体流失,破坏模式由整体滑动转变为局部渐进破坏。在低坡度工况T5下,由于沿坡向的重力切向分量显著

减小,降雨过程中坡体整体保持稳定状态。试验期间坡面仅发生轻微冲刷侵蚀现象,未形成贯通滑动面,也未出现整体失稳破坏,表明坡度对土石混合体边坡降雨致滑具有显著控制作用。在极端强降雨工况T8中,边坡破坏表现出突发性和快速演化特征。降雨开始后t = 60 s,坡脚即出现明显裂缝;至t = 120 s,坡体迅速发生整体失稳破坏,其破坏起裂时间较基准工况提前约140 s,显示强降雨条件显著加速了坡体失稳进程。

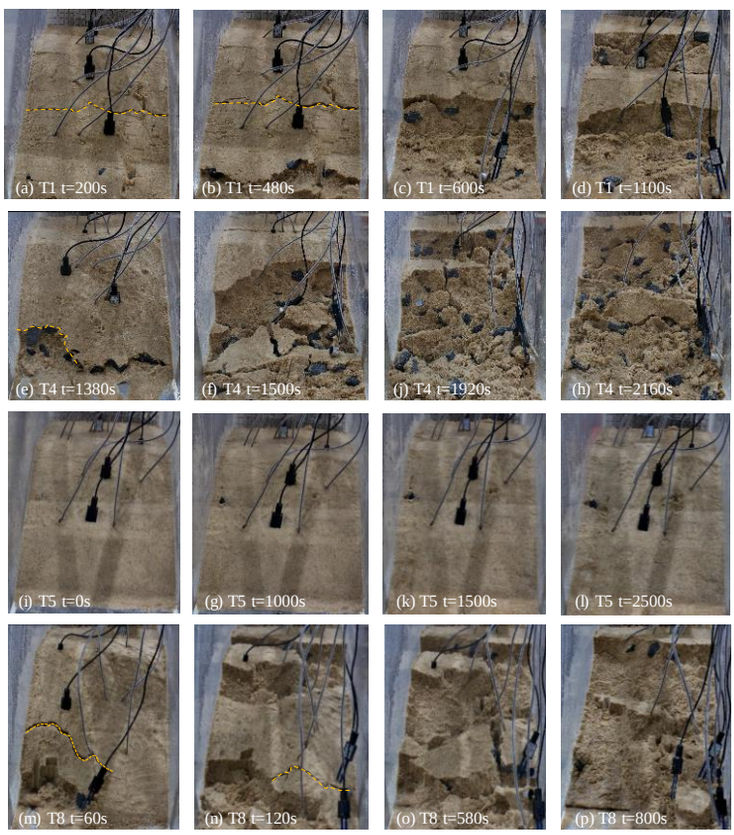


图4 土石混合体边坡破坏过程

Fig.4 Failure process of a soil-rock mixture slope

在细粒土非均匀软化与应力转移阶段,雨水倾向于沿土石界面优先入渗,导致湿润锋向坡内推进。由于介质差异,坡脚细粒土因应力集中含水率率先升高,基质吸力丧失引起抗剪强度衰减,迫使局部荷载向块石骨架转移;该阶段的定量判据表现为坡脚监测点(如W_4和P_4)开始产生响应,且体积含水率达到饱和峰值的80%。随后进入绕石裂缝扩展与骨架解体阶段,坡脚软化区扩展剥落形成临空面,牵引上部坡体产生变形。内部张拉裂缝向下发育时受块石阻挡,被迫沿薄弱界面形成复杂的“绕石”扩展路径,使潜在滑动面进入塑性变形阶段。此时,由于变形累积导致骨架嵌挤失效与内部结构重排,产生瞬时的应力冲击。最终边坡进入骨架控滑与差异化失稳阶段,随着绕石裂缝逐渐贯通并成为主要入渗通道,边坡的破坏形态受块石骨架效应严格控制,表现为低含石量下的整体贯通滑移,或高含石量下的局部渐进剥落。无论何种失稳模式,该临界状态对应的定量判据均为含水率、孔隙水压力与土压力监测曲线同步出现突变式卸载,数据骤降至零。这种结合宏观介质演化特征与内部力学指标突变的分析方法,能够更科学地界定土石混合体边坡在降雨作用下的演化状态。

2.2 降雨入渗规律

图5给出了不同试验工况下各监测点体积含水率随时间的演化过程。总体来看,各工况含水率变化均表现出明显的阶段性特征,可概括为初始稳定阶段、快速上升阶段以及峰值维持或突变卸载阶段。

在初始稳定阶段,坡体含水率基本保持在初始水平,该阶段对应降雨入渗初期湿润锋尚未到达监测位置的滞后响应过程。受降雨入渗路径及重力作用影响,坡脚测点最先响应,含水率开始上升,而

坡体内部及上部测点的响应相对滞后,反映出坡体内部明显的非均匀入渗特征。随着降雨持续,湿润锋逐步推进至各监测位置,坡体进入快速上升阶段,各测点含水率迅速增加并接近饱和状态。该阶段含水率曲线的上升斜率可表征坡体的入渗速率,其大小受降雨强度和坡度的显著控制。对比不同工况可见,强降雨及大坡度条件下含水率增长更为迅速,表明坡体内部渗流过程显著增强。在峰值维持或突变卸载阶段,含水率演化特征与边坡宏观稳定性密切相关。在稳定或未发生整体破坏的工况中,含水率在达到峰值后保持相对稳定,表明坡体内部形成了相对稳定的渗流场结构;而在发生失稳的工况中,含水率曲线在短暂达到峰值后迅速降为零,该突变卸载现象表明坡体发生明显位移或破坏,导致传感器随土体剥落或滑移而脱离有效监测区域。因此,该阶段含水率的突变特征可作为边坡失稳发生的重要判据。

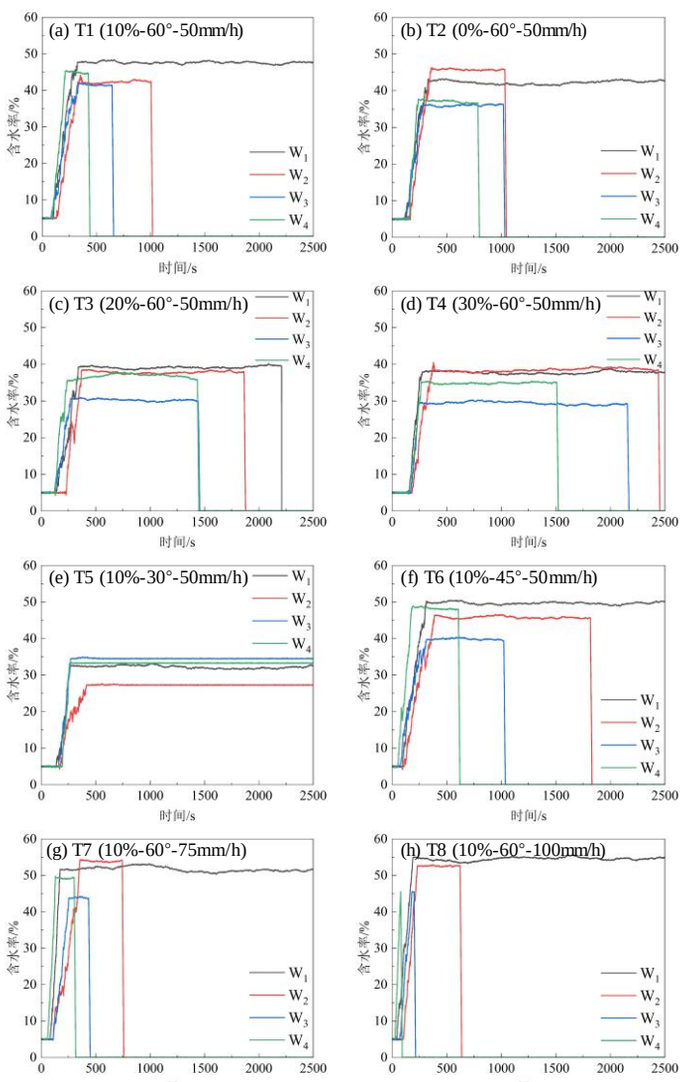


图5 土石混合体边坡破坏过程中含水率的变化

Fig.5 Changes in water content during the failure process of a soil-rock mixture slope

进一步对比不同影响因素可发现,随着降雨强度和坡度的增加,坡体雨水入渗量整体增大,各监测点的峰值含水率呈现明显上升趋势。在降雨强度为100 mm/h、坡度为60°的极端工况下,坡体最大含水率可达约55%,显著高于其他工况,反映出强降雨与陡坡条件对坡体饱和过程的显著促进作用。相较之下,在高含石量工况中,坡体峰值含水率整体低于低含石量工况。这主要是由于块石占据部分孔隙空间并改变了坡体内部渗流路径,削弱了细粒土体的蓄水能力,从而抑制了含水率的持续增长。试验结果表明,含石量为30%的边坡其最大含水率较含石量10%的边坡降低约10%,显示块石骨

架结构对坡体入渗过程具有一定的调控作用。

2.3 孔隙水压力响应特征

图6展示了不同试验工况下各监测点孔隙水压力随时间的演化过程。整体来看,孔隙水压力的演化同样表现出明显的阶段性特征,可划分为初始稳定、快速上升、峰值维持/突变卸载三个阶段,但其响应相较于含水率存在一定滞后性。

在初始稳定阶段,坡体处于非饱和状态,入渗雨水主要用于补偿土体基质吸力。此阶段孔压变化不明显,表明降雨入渗尚未在坡体内部形成连续饱和渗流通道。随着降雨持续,土体逐步由非饱和状态向饱和状态转变,孔隙水压力进入快速增长阶段。此时,监测曲线呈现陡升特征,说明入渗水在坡体内部迅速积聚并转化为孔隙水压力。不同测点的响应存在明显差异,坡面及坡脚测点孔压响应最为迅速且峰值较高,而坡体内部测点孔压峰值相对较低。在发生失稳的工况中,孔隙水压力在达到峰值后出现突变式下降。该突变卸载现象表明,孔压快速积聚导致坡体有效应力显著降低,当达到极限平衡状态时,边坡发生瞬时失稳破坏,传感器随滑体位移或剥落而脱离有效监测区域。相反,在未发生整体破坏的工况中,孔压在达到峰值后保持相对稳定,表明坡体内部渗流场逐渐趋于稳定状态。

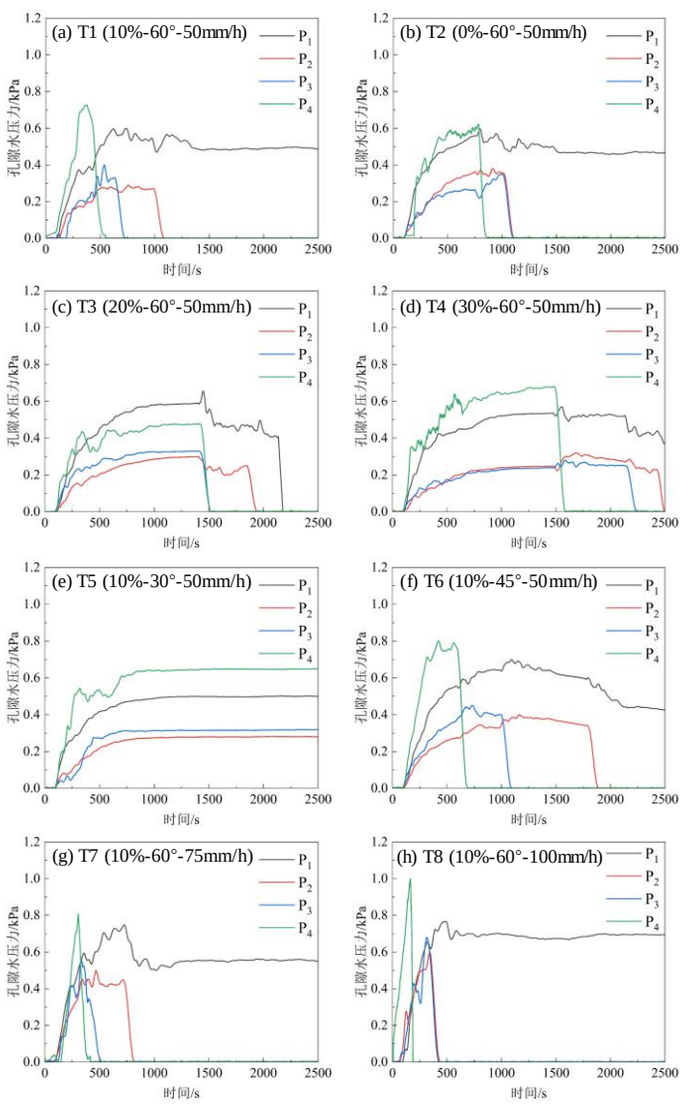


图6 土石混合体边坡破坏过程中孔隙水压力的变化

Fig.6 Changes in pore water pressure during the failure process of a soil-rock mixture slope

进一步对比不同影响因素可以发现,降雨强度对孔隙水压力的增长速率和峰值大小具有显著控制作用。与50 mm/h工况相比,100 mm/h强降雨条件下孔压响应时间明显提前,增长速率显著加快,峰值孔压更高,显示强降雨条件显著促进了坡体内部孔压的快速积聚。在坡度为30°的工况中,坡

体未发生整体失稳,各测点孔压在达到峰值后趋于稳定,表明坡度较小时渗流-应力系统能够维持相对平衡状态。含石量对孔隙水压力的演化亦具有重要影响。随着含石量的增加,坡体孔压峰值整体呈下降趋势。其中,含石量为30%的工况下孔压峰值约为0.68 kPa,而不含块石工况的最大孔压约为0.75 kPa。这表明块石骨架结构在一定程度上改变了坡体内部的渗流路径并增强了排水能力,从而抑制了孔隙水压力的过度积聚。在降雨强度为100 mm/h、坡度为60°的极端工况下,坡体最大孔隙水压力约1.0 kPa,显著高于其他工况,进一步验证了强降雨与陡坡条件对边坡失稳的协同放大效应。

2.4 土压力响应特征

图7给出了不同试验工况下各监测点土压力随时间的演化过程。与含水率和孔隙水压力的阶段性演化特征不同,土压力响应整体呈现出震荡累积增长与峰值维持或突变卸载两类典型特征。

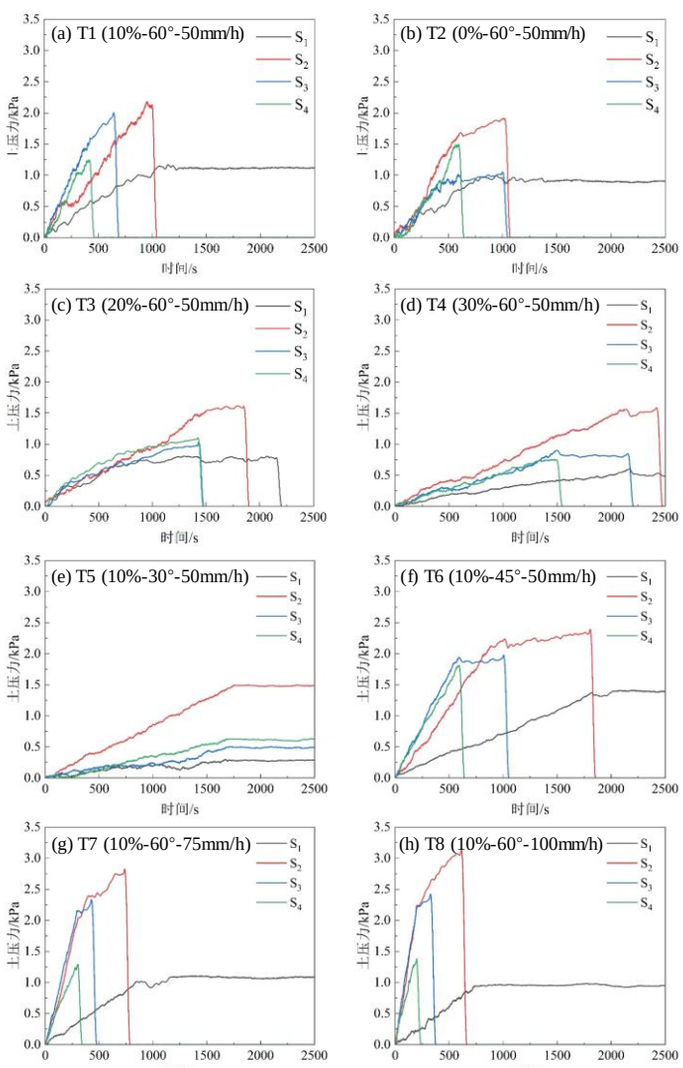


图7 土石混合体边坡破坏过程中土压力的变化

Fig.7 Changes in earth pressure during the failure process of a soil-rock mixture slope

在降雨入渗过程中,雨水进入坡体导致土体容重逐渐增大,坡体内部应力随之持续累积,表现为土压力整体随时间上升。然而,由于土石混合体内部块石与细粒土体在变形特性和承载方式上的差异,局部区域会发生应力重分布与结构重排,使监测曲线呈现明显的震荡波动特征。试验结果表明,最大土压力多出现在坡体内部测点,而非坡面位置,说明内部结构调整对坡体稳定性具有重要控制作用。在发生失稳的工况中,土压力曲线在达到峰值前常出现短暂的脉冲式突增,该现象对应边坡启动滑移或局部结构突然调整时对传感器产生的瞬时冲击效应。随后,随着坡体发生整体破坏,传感

器随滑体位移或剥落而迅速卸载,监测值骤降至零。该脉冲-卸载特征可视为边坡即将发生整体失稳的重要前兆信号。相反,在未发生整体破坏的工况中,土压力在达到峰值后保持相对稳定,未出现突变卸载现象。

不同影响因素对土压力响应特征具有显著调控作用。强降雨条件下,土压力增长速率明显加快,在降雨强度为100 mm/h的工况中,土压力在较短时间内迅速升至3.0 kPa以上,显著高于其他工况,表明高雨强条件加速了坡体内部应力积聚并促进了失稳发生。随着含石量的增加,土压力峰值整体呈下降趋势,其中含石量为30%的工况其土压力峰值约为1.7 kPa,低于低含石量工况,且压力响应明显滞后。这表明块石骨架在一定程度上分担了坡体下滑推力,对坡脚及细粒土体起到了支撑与缓冲作用。在低坡度工况中,土压力随时间呈现单调、平缓的增长趋势,最大值约为1.5 kPa,整个试验过程中未出现脉冲式突增或突变卸载现象,说明在较小坡度条件下,坡体内部应力调整过程较为平稳,整体稳定性较高。

3 试验结果讨论

边坡失稳本质上是多场耦合作用下的整体失稳过程。尽管上述分析分别从含水率、孔隙水压力和土压力等角度揭示了土石混合体边坡在降雨作用下的水力与力学响应特征,然而,单一时间序列的指标难以全面反映边坡稳定性演化规律。为进一步明确不同控制因素对边坡稳定性的综合影响,有必要对关键稳定性指标的协同演化特征进行对比和追踪分析。基于此,选取对边坡失稳最为敏感的坡脚监测点作为代表位置,对T1(基准工况)、T4(最大含石量)、T4(最缓坡度)、T8(最大降雨强度)四种典型工况下含水率、孔隙水压力及土压力的同步演化过程进行对比,其结果如图8所示。

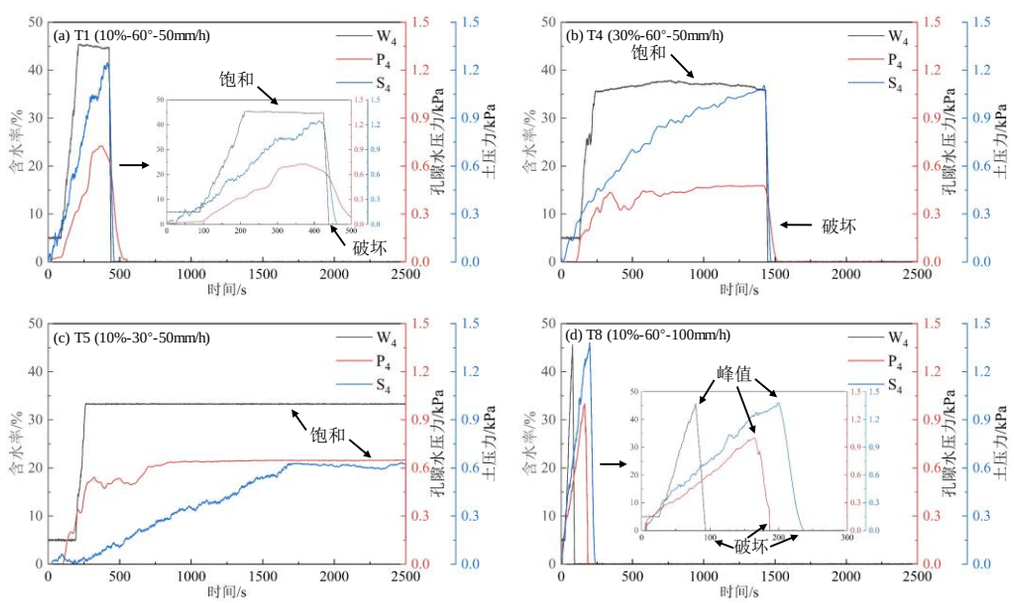


图8 典型工况下边坡稳定性指标与多场耦合响应特征对比

Fig.8 Comparison of stability indices and multi-field coupled response characteristics of slopes under typical conditions

最大含石量工况与基准工况的对比旨在揭示块石含量变化对边坡降雨致滑过程的调控作用。如图8(a)与8(b)所示,两种工况在降雨入渗初期均表现出含水率快速上升并达到饱和状态的特征,说明坡脚区域对降雨入渗具有高度敏感性。然而,两者在后续演化过程中呈现显著差异。在T1工况下,孔隙水压力与土压力在达到峰值后迅速发生突变卸载,边坡随即发生整体失稳破坏。而在T4工况中,尽管坡脚区域同样达到饱和,但孔隙水压力与土压力的增长速率明显减缓,峰值水平显著降低,且失稳发生时间明显滞后。这种演化差异的本质在于含石量对土石混合体渗透系数与强度参数的双重调控:高含石量改变了混合体原有的孔隙结构,大量土石界面的存在易形成优势排水通道,提高了渗透系数,从而有效抑制了入渗过程中超孔隙水压力的快速积聚,表现为T4工况下孔压增长减缓且峰值显著降低。另一方面,30%的含石量促使坡体内部形成了连续的粗颗粒骨架,块石间的强力嵌挤与咬合作用大幅提升了混合体的内摩擦角等综合抗剪强度参数。结果表明,高含石量边坡不仅

在改善了排水释压能力,更增强了坡体结构稳定性并分担了下滑推力,两者协同作用,从而显著延缓了失稳演化进程并改变了破坏模式。

最大含石量工况与最缓坡度工况的对比主要用于分析坡度变化对边坡整体失稳发生条件的控制作用。对比图8(b)与8(c)可知,两种工况在降雨过程中均经历了坡脚区域的饱和阶段,但两者的稳定性响应存在本质差异。在T4工况中,坡体最终仍发生整体破坏,而在T5工况中,即使坡脚区域含水率达到饱和、孔隙水压力与土压力持续累积,边坡仍未发生整体滑移破坏。该差异表明,坡度作为几何控制参数,决定了边坡是否具备发生整体失稳的势能条件。当坡度较小时,沿坡向的重力分量不足以克服土石混合体的抗剪强度,边坡系统能够在降雨作用下维持动态稳定状态,即使水-力响应较为显著,也难以触发整体失稳。

最大降雨强度工况与基准工况的对比可以揭示降雨强度对边坡失稳速率及破坏突发性的控制作用。图8(a)与8(d)对比显示,基准工况与最大降雨强度工况在失稳模式上呈现出明显差异。T8工况下,含水率、孔隙水压力及土压力在极短时间内同步快速增长并迅速达到峰值,随后发生突变卸载,边坡表现出明显的突发性整体失稳特征;而T1工况下上述指标的演化过程相对缓慢,边坡失稳呈渐进演化特征。这表明强降雨显著加快了坡体由非饱和状态向饱和状态转变的过程,迅速消除基质吸力并促使孔隙水压力与土压力快速积聚,从而压缩了失稳演化的时间尺度,使边坡破坏由渐进型转变为快速饱和控制下的突发型破坏。

土石混合体边坡的失稳模式是块石骨架效应与细粒土强度软化相互竞争的结果。在低含石量工况下,细粒土占据主导,雨水入渗导致的基质吸力丧失极易形成连续塑性区,诱发整体滑移。随着含石量增加,块石间的嵌挤与咬合作用形成稳定的结构骨架。即使细粒土在强降雨下发生饱和软化,块石骨架仍能有效分担下滑推力并重构应力传递路径,防止滑动面横向贯通,从而促使破坏模式由整体滑移向局部渐进剥落转变。

综合上述对比分析可以认为,土石混合体边坡的降雨致滑过程受多因素协同控制:降雨强度主导失稳演化速率并控制破坏的突发性,含石量通过结构骨架效应调控边坡稳定性并延缓失稳发生,而坡度决定边坡是否具备发生整体失稳的几何与能量条件。三者共同作用,控制了边坡由稳定状态向失稳状态转变的路径与模式。

4 结论

本研究通过开展降雨条件下土石混合体边坡模型试验,分析了降雨强度、坡度和含石量对土石混合体边坡失稳破坏过程的影响,揭示了边坡失稳破坏过程中含水量、土压力和孔隙水压力的变化规律,主要得出以下结论:

1)土石混合体边坡在降雨作用下的失稳过程呈现坡脚软化(细粒土非均匀软化与应力转移阶段)、牵引式崩塌(绕石裂缝扩展与骨架解体阶段)及整体失稳(骨架控滑与差异化失稳阶段)的渐进演化规律,其破坏模式受多因素耦合作用控制。降雨强度主导失稳演化速率,强降雨显著压缩破坏历时,易诱发突发性整体失稳;含石量通过块石骨架支撑效应改变破坏形态,高含石量显著延缓起裂时间,并使深层滑移转化为局部剥落破坏;坡度是驱动整体失稳的重要几何条件,在缓坡工况下边坡破坏主要表现为表层冲刷侵蚀,未发生整体滑移。

2)边坡体积含水率与孔隙水压力的演化均表现为初始稳定、快速上升及峰值维持或突变卸载三个阶段,其中峰值后的突变卸载特征可作为判定边坡失稳发生的重要判据。降雨强度与坡度显著加快坡体渗流过程,在降雨强度为100 mm/h、坡度为60°的工况下,坡体峰值含水率与孔隙水压力分别达到约55%和1.0 kPa;含石量对含水率和孔压具有明显抑制作用,含石量为30%时峰值含水率约为40%,孔压峰值降至0.68 kPa,且在未失稳工况中含水率与孔压在达峰后维持稳态平衡。

3)土压力响应呈现震荡累积增长及峰值维持或突变卸载两阶段特征,其中上升阶段的震荡主要源于块石-细粒土骨架结构的局部应力重分布,而临界时刻出现的脉冲式突增可视为边坡整体失稳的重要前兆信号。降雨强度显著加速坡体内部应力积聚,在强降雨条件下土压力峰值迅速突破3.0 kPa;随着含石量增加,块石骨架分担下滑推力,使土压力峰值降低至约1.7 kPa且响应明显滞后;缓坡工况下土压力演化平缓,未出现突变卸载特征。

4)土石混合体边坡的降雨致滑机制受多因素协同控制,各因素对失稳路径与模式的作用机制存在显著差异:降雨强度是控制失稳速率与突发性的主导因素,强降雨显著压缩了边坡从非饱和至饱和的演化历程,促使孔隙水压力与土压力爆发式积聚,导致破坏由渐进演化转变为突发性整体失稳破坏;含石量通过骨架嵌挤效应,有效分担下滑推力

并耗散超孔隙水压力,从而显著延缓失稳进程并降低破坏烈度;坡度则作为几何阈值决定了边坡是否具备发生整体失稳的势能条件,缓坡工况下即使水力响应显著,沿坡向的重力分量仍不足以克服抗剪强度,边坡维持动态稳定而不发生整体滑移。

参考文献:

[1] WANG S, WU W, CUI D S. On mechanical behaviour of clastic soils: numerical simulations and constitutive modelling[J]. Géotechnique, 2022, 72(8): 706-721.

[2] 徐文杰, 胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 50-56.
XU Wenjie, HU Ruilin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(4): 50-56.

[3] 边宏光, 王顺, 马海善, 等. 基于随机场理论的土石混合体边坡稳定性[J]. 地质科技通报, 2024, 43(6): 162-170.
BIAN Hongguang, WANG Shun, MA Haishan, et al. Stability of soil-rock mixture slopes based on random field theory[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(6): 162-170.

[4] QIU Z F, LIU Y, TANG S L, et al. Effects of rock content and spatial distribution on the stability of soil rock mixture embankments[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 29088.

[5] KANG X, XU G L, YU Z, et al. Experimental investigation of the interaction between water and shear-zone materials of a bedding landslide in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(8): 4079-4092.

[6] KANG X, WANG S, WU W, et al. Soil - water interaction affecting a deep-seated landslide: From field monitoring to experimental analysis[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(2): 82.

[7] WANG R J, WANG S, LI D Q, et al. Elevated pore-water pressure regulating dynamic liquefaction of a flow-like landslide in loess[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2025, 130(8): e2025JF008318.

[8] KANG X, WANG S, WU W, et al. Mechanical behaviour and shear localisation of gravel soils: experimental study and numerical modelling[J]. Géotechnique, 2026, 76(1): 56-71.

[9] SU Z Y, KANG X, DING X C, et al. SPH - DEM modeling of rainfall-induced slope failure in partially saturated soil - rock mixture[J]. Computers and Geotechnics, 2026, 189: 107635.

[10] ABIOGA A, RACHMANSYAH A, et al. Rainfall-induced slope stability on soil-rock mixture[J]. Rekayasa Sipil, 2025, 19(1): 83-96.

[11] 王斌, 李洁涛, 王佳俊, 等. 强降雨诱发堆积体滑坡模型试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(S1): 234-248.
WANG Bin, LI Jietao, WANG Jiajun, et al. Model tests on accumulation landslides induced by extreme rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(S1): 234-248.

[12] LI C Z, CHEN G Q, GUO L X, et al. Slope stability and post-failure analysis of soil-rock-mixture using the modified 2D DDA-SPH method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 157: 105170.

[13] 周亮梅, 王翠英, 崔岚, 等. 降雨条件下边坡渐进性破坏的模型试验研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 752-761.
ZHOU Liangmei, WANG Cuiying, CUI Lan, et al. Model experimental study of asymptotic failure of slopes under rainfall conditions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 752-761.

[14] 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 slope under different rainfall intensities and slope angles[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(6): 48-63.

[15] LI L Q, LI Y L, XU Y G. Instability evolution of expansive soil slope due to short duration-varying intensities of rainfall[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 161: 108313.

[16] LIU H L, ZHONG W H, ZHANG W G, et al. Hydraulic erosion characteristics based on transparent soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(9): 1868-1877.

[17] HU J B, WENG X L, YANG L X, et al. Centrifugal modeling test on failure characteristics of soil-rock mixture slope under rainfall[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106775.

[18] FU Y Y, LIU Z H, ZENG L, et al. Seepage characteristics test of carbonaceous mudstone soil-rock mixture considering rock content and rainfall infiltration angle[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(10): 3467-3480.

[19] ZHOU F Y, WU H B, QIANG Y, et al. Investigating

the coupling effects of rainfall intensity and slope inclination on soil-rock mixture slope stability and failure modes[J]. PLoS One, 2025, 20(2): e0314752.

[20] 丁军领, 吉锋, 魏松, 等. 降雨及库水位作用下碎石土岸坡变形破坏机制模型试验研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(12): 3740-3756.
DING Junling, JI Feng, WEI Song, et al. Model test of deformation and failure mechanism of gravel soil bank slope under rainfall and reservoir water level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(12): 3740-3756.