

水位上升条件下陡坡破坏离心模型试验研究

赵杰¹, 马卓娜², 黄会宝¹, 张嘎²

(1. 国能大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610041;
2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 基于变形与破坏过程耦合分析的研究思路, 针对水位上升条件下黏性土陡坡变形破坏开展了离心模型试验, 测定了试验过程中边坡的位移时程及其分布, 并进行点对分析确定了边坡破坏过程, 揭示了边坡的破坏机理。研究结果表明: 水位上升引起的陡坡剪切破坏从坡脚开始, 逐渐向上发展与坡顶张拉裂缝共同形成整体滑裂面; 水位上升过程导致陡坡产生显著变形并在一定区域内集中, 出现了明显的变形局部化, 导致该处出现局部破坏, 局部破坏逐渐发展并贯通形成滑裂面; 滑裂面形成后边坡变形主要出现在滑动体内部, 滑动体上不同点的位移特征受到所在位置的影响。
关键词: 陡坡; 渐进破坏; 变形局部化; 水位上升; 离心模型试验

中图分类号: TU411.93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2022)06-0086-06

Centrifuge modeling of steep slope failure under water-level rising conditions//ZHAO Jie¹, MA Zhuona², HUANG Huibao¹, ZHANG Ga²(1. China Energy Group Dadu River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A centrifuge model test was conducted on the deformation and failure of a cohesive soil steep slope under the water-level rising conditions. The failure mechanism was analyzed based on integrated analysis scheme of deformation and failure processes using measured displacement of the slope. The test results showed that the water-level rising resulted in a progressive slippage failure of the slope which started at the toe and gradually developed upwards to form an integral slip surface with the tensile cracks on the top. The water-level rising process induced significant deformation and concentrated within a limited zone. The development of deformation localization resulted in the local failure of the slope and the coupling development of both was essential to the full slip surface of the steep slope. Significant deformation occurred after the full slip surface appeared and the deformation characteristics of each point were related to its location.

Key words: steep slope; progressive failure; deformation localization; water level rise; centrifuge model test

滑坡作为一种常见的地质灾害, 每年对我国造成的经济损失高达上百亿元。随着水利工程的兴建, 水库区陡坡数量也随之增加, 库区蓄水过程引起了很多边坡破坏。为了满足防洪、发电等需要, 大多数库区边坡(尤其是陡坡)一定时期内的水位上升及稳定蓄水过程所引发滑坡的风险随之增加。在实际工程中, 目前通常采用极限平衡法和数值模拟分析法等对边坡破坏进行分析^[1-8]。然而, 水位上升条件下边坡发生渐进破坏的机理复杂, 极限平衡法等传统方法不足以达到分析需要的精度。近年来, 各类数值模拟技术快速发展, 但由于受到模型、算法等的限制, 很难直接应用于实际边坡工程的安全分析与设计。有效的边坡稳定分析方法的基础之一是阐

明水位变动条件下陡坡的破坏机理。因此, 对于水位上升条件下陡坡发生破坏的机理研究与揭示, 是发展合理的边坡稳定性分析方法的依据和基础。

土工离心模型试验可以保证原型与模型在几何相似的前提下, 保持应力相等、变形相似, 因而其不同条件下的边坡变形破坏研究中应用广泛^[9-12]。苗发盛等^[13]以三峡库区边坡为背景, 开展了水位升降条件下边坡离心模型试验, 试验结果表明滑坡总体呈牵引式破坏, 发生滑坡失稳为动水压力所致。Zhang等^[14]研究发现水位变动引起孔隙水压力增加, 进而导致类似边坡破坏的边坡失稳模式。综上所述, 目前开展的水位变动条件下滑坡离心模型试验主要集中在边坡失稳模式的研究上, 针对边坡渐

进破坏特性的试验还比较少。在考虑土性、坡度、水位等因素影响的边坡变形破坏的相关试验研究还有待加强。

针对以往研究不足,本文开展了水位上升条件下黏性土陡坡变形破坏的离心模型试验,测定了水位上升过程中边坡的全场位移时程及其分布。根据位移测量结果定量确定了边坡的破坏过程,采用变形与破坏过程耦合分析的研究思路进行破坏分析,揭示了陡坡的拉裂与剪切耦合破坏特征、变形规律和渐进破坏机理,可为改进陡坡稳定性及变形分析方法提供依据。

1 离心模型试验

1.1 试验设备

离心模型试验在某土工离心机上开展,该离心机有效半径为 2 m,最大离心加速度为 250g。离心机配有高刚度铝合金模型箱,可忽略模型箱自身变形,其内部长、宽、高分别为 50 cm、10 cm 和 35 cm。为满足在试验过程观测边坡的要求,专门在模型箱长度方向一侧配置厚度为 4 cm 的透明有机玻璃板。

水位升降采用超重力场水位变动模拟设备^[15]进行模拟,该设备可以在试验采用的离心加速度条件下进行蓄水使得水位上升,并通过置于底部的孔压传感器实现对水位的全程记录。

1.2 试验模型

采用某种粉土(相对密度 2.7,塑限 18.5%,液限 25%)制备边坡模型,如图 1 所示。在制样过程中控制含水率为 18%,按 5 cm 厚度进行分层夯实,土样干密度为 1.55 g/cm³,黏聚力为 33 kPa,摩擦角为 27°。模型填筑完成后,削坡至设定坡度。边坡模型的高度和坡度分别为 20 cm 和 1.5 : 1,其底部与模型箱直接接触以模拟基岩。为减小试验过程中模型箱边界对边坡变形破坏的约束影响,预先在边坡与模型箱边坡的接触面上涂抹硅油。

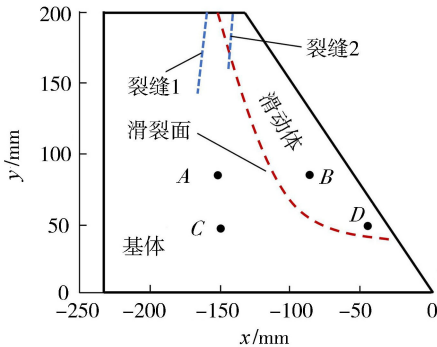


图 1 边坡及滑裂面示意图

1.3 试验过程

a. 对边坡从 g 到 50g 逐步增加离心加速度,每

隔 10g 待边坡变形稳定后继续加载。

b. 当离心加速度达到 50g 后,等待 30 min 以达到边坡变形基本稳定。此后从坡脚开始蓄水。每次蓄水 50 mm,待变形稳定再继续蓄水,共蓄水 100 mm。

c. 在每级水位稳定过程中,边坡发生入渗并产生渗透变形,试验全程监测边坡变形破坏情况。

d. 待边坡发生破坏后停止试验。

1.4 测量方法

试验采用专为离心场图像采集和土体位移测量开发的系统^[16]来观测边坡变形破坏情况。通过该系统采集图像系列,在此基础上进行数据相关性分析,进而确定边坡侧面任一点的位移。为提高图像位移分析精度,坡侧面的灰度需要有较大差别。为此,在制备边坡模型过程中于坡侧面随机性地嵌入白色标记点。水位和位移等测量结果均基于试验模型给出,根据模型相似律,乘以 50 可得到原型结果。

2 破坏现象

离心模型试验过程中,水位上升与坡顶沉降随时间的发展过程如图 2 所示。可以看出,第一阶段水位 h 从 0 上升至 50 mm,并维持了 547 s;第二阶段水位从 50 mm 上升至 100 mm,并维持了 697 s。除此之外,还可以看出在第一阶段坡顶沉降 s 很小且稳定在 3.5 mm 左右;在第二阶段水位由 50 mm 上升至 100 mm 的过程中,变形迅速增大,当水位稳定在 100 mm 时,沉降也逐渐趋于稳定。根据观察与分析,水位上升过程产生较大变形,可判断滑裂面在水位上升过程中已经形成(图 1),还可以看出陡坡未发生浅层剥落、坍塌等破坏,而是发生了深层滑动。为满足定量分析需求,在坡侧平面建立直角坐标系,以坡脚为原点,以水平向右和竖直向上为坐标轴的正方向,x 和 y 分别为水平方向、竖直方向某位置距坡脚的距离。

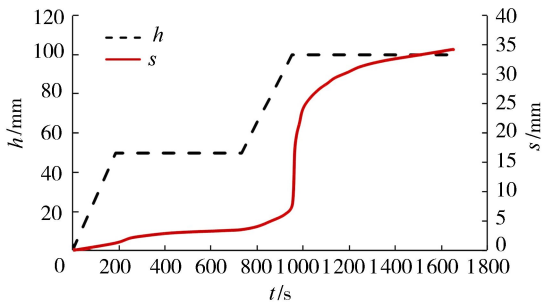


图 2 水位上升与坡顶沉降时程

3 变形特性分析

3.1 位移场变化过程

在试验过程中,观察边坡形态照片可以发现,以

水位开始上升为起始时刻(此时边坡处于稳定状态),在水位上升到 50 mm 及其后的稳定过程中,坡体发生沉降较小,以竖向的位移为主;水位继续上升至 100 mm 及其后的稳定过程中,坡体产生明显的竖向和水平位移。图 3 给出了两次水位上升稳定后的位移矢量分布。从图中可以看出,在 100 mm 水位稳定过程中,边坡内部的位移较小,并向坡面逐渐增大。边坡最大位移出现在 100 mm 水位附近,并向上下两侧递减。在边坡临空面内侧已经出现了明显的位移集中区域。可以推断,该区域为滑裂面产生后形成的滑动体。

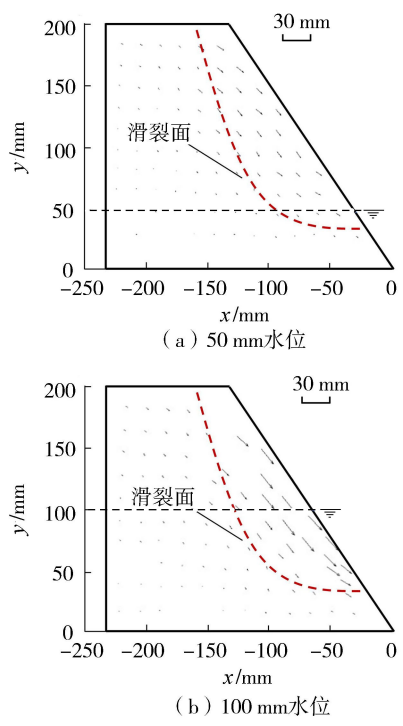


图 3 水位稳定后边坡位移矢量分布

3.2 位移分布特征

由图 1 可以看出,边坡滑裂面分为基体和滑动体两个组成部分。在滑裂面两侧的基体和滑动体上分别选取不同高程上的典型点 A~D,测量其位移时程曲线与水位变化,见图 4。从图 4 可以看出,边坡位移在滑动体和基体表现出很大的差别,在相同高程上,滑动体上的位移显著大于基体。位于基体上的 A、C 点在水位上升过程中,产生的水平位移 u 和竖向位移 v 都很小;而位于滑动体上的 B、D 点在水位上升至 100 mm 的过程中产生了明显的位移增量。由此可以判断,水位上升造成坡体滑动进而引起边坡的明显变形。在水位上升至 50 mm 及后续的稳定过程中,滑动体各点的位移较小且增速缓慢;在水位上升至 100 mm 的过程中,滑动体各点的位移迅速增大。总体来看,水位上升条件下边坡变形主要发生在滑动体内部,基体可视为刚体。

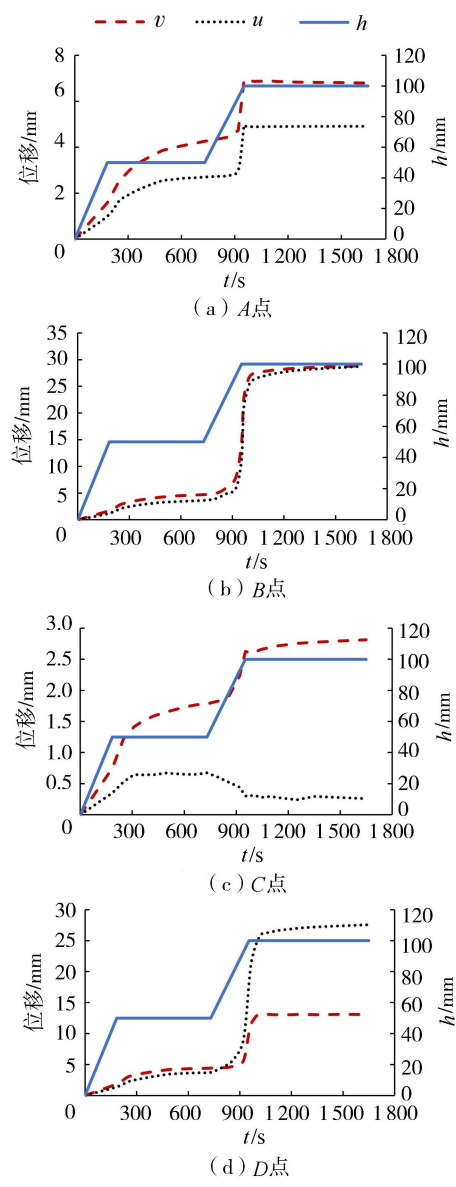


图 4 典型点位移时程曲线

对比滑动体上各典型点随水位上升的位移时程曲线可得,不同点的位移随时间的变化规律并不是一致的。例如,在 920 s 左右(对应水位 92.5 mm)时,位于 100 mm 高程附近处的 B 点水平位移和竖向位移同步迅速增大然后逐渐趋于稳定,竖向位移略大于水平位移。对于坡脚处 D 点,在 910 s 左右(对应水位 92 mm),水平方向和竖直方向的位移均增大,水平向位移显著大于竖向位移,坡脚鼓起。这意味着在水位上升条件下,滑动体内部各点的变形特征并不一致,与所在位置相关。推测与滑裂面的形状或发展过程相关,或者与水位上升导致应力场及渗流场的变化相关。

4 破坏特性及机理分析

4.1 裂缝分析

在水位上升至 100 mm 的过程中,首先在坡顶位

置处出现了一条明显的裂缝(图1所示裂缝1),该裂缝发展到一定深度后基本稳定。随后,在坡顶原裂缝外侧产生第二条裂缝(图1所示裂缝2),并向下发展与已形成的滑裂面贯通形成整体的滑裂面,边坡发生滑动破坏。

图5给出了裂缝两侧点对(两点处于同一高程,距离14.5 mm)的相对位移随水位变化曲线。可基于点对相对位移确定裂缝的类型;当法向相对位移 d_n 大于切向相对位移 d_s 时属于拉裂缝,反之则属于剪裂缝。由图5可知,在水位上升的过程中,位于裂缝两侧的点对的相对位移时程曲线在某个水位发生突变,即表明在此水位裂缝开始出现。可以判断

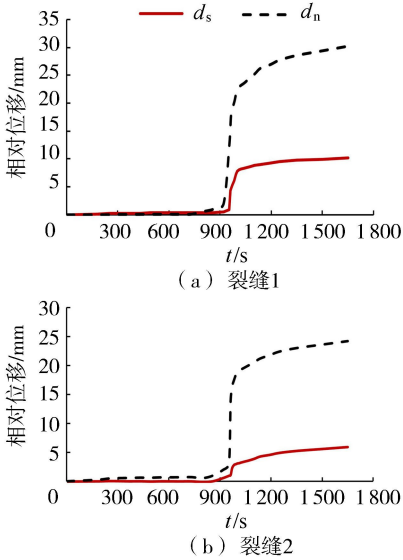


图5 裂缝点对的相对位移时程曲线

出,在水位达到92.5 mm左右(920 s)时,裂缝1出现;随后在水位100 mm稳定过程中(953 s),裂缝2出现。裂缝出现时,两点对的法向相对位移逐渐大于切向相对位移,表明两点对之间的裂缝均为张拉破坏。水位上升导致坡顶沉降速率突然增大,坡脚隆起并发生较大的侧向位移,引起坡顶产生拉裂缝,这与高长胜等^[17]试验结果是一致的。随着滑裂面的产生和发展,裂缝在受拉过程中受到剪切带的综合作用,切向位移不断增大,但始终小于法向位移,裂缝的扩张受到了拉伸和剪切的综合作用。

4.2 滑动破坏过程

为进一步分析滑裂面产生与发展的特性,选取边坡潜在滑裂面不同高程的典型点对进行相对位移分析。点对的位置和高程如图6所示。1组点对由2个点组成,分别位于滑裂面两侧且处于同一高程,2点的距离为29 mm。

由坡顶沉降位移时程曲线和裂缝分析可知,较大的边坡变形主要发生在50 mm水位以后的上升及稳定过程,因此选取730 s后的点对位移时程曲线进

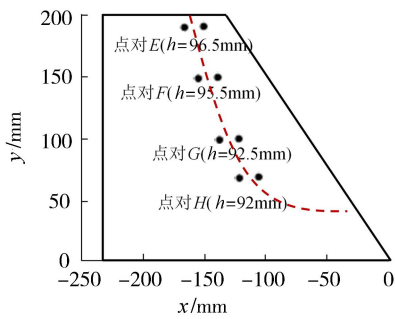


图6 点对位置及滑裂面发展过程

行重点分析,如图7所示。可以看出,在水位上升初期,各点对相对位移增长缓慢且增长量较小。当水位继续上升至100 mm的过程中,在某一时刻相对位移增长速率迅速上升,位移时程曲线存在转折点。转折点产生的原因是边坡在此位置出现了局部破坏,从而引起该处点对的相对位移迅速增大。可将转折点所对应的时刻确定为滑裂面发展到点对所处位置的时刻。在图7中用虚线标示出各点对位置发生局部破坏时的时刻,并将对应的水位标注于图6。

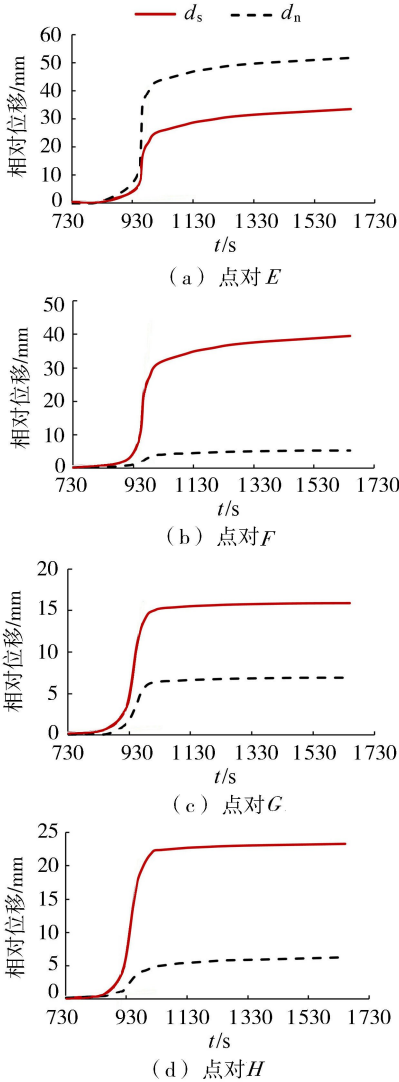


图7 滑裂面上各点对的相对位移随时间变化过程

可以看出,水位上升引起边坡发生破坏,滑裂面首先在边坡下部出现,并逐渐向上发展。也就是说,边坡呈现出由底部向上发展的渐进破坏过程。在滑裂面发展过程中,坡顶产生裂缝1。滑裂面形成后在坡顶产生裂缝2。裂缝2与滑裂面相连从而形成了整体的滑裂面。

进一步分析可知,无论是切向还是法向,各点对相对位移时程曲线上的转折点对应的水位大致相同。考虑到坡顶点对受到张拉裂缝的影响,其余点对的切向位移量总体上明显大于法向位移量,这说明边坡总体上发生了剪切破坏。

4.3 滑动破坏机理

图8给出了滑裂面形成前边坡水平位移的水平分布。可以看出,水位上升导致边坡在不同高程均出现位移。位移随水位上升而增大,总体表现为边坡深部位移很小,并随距坡表距离减小而增大。这意味着边坡发生滑动破坏之前的水位上升过程已经导致坡体出现显著的变形。

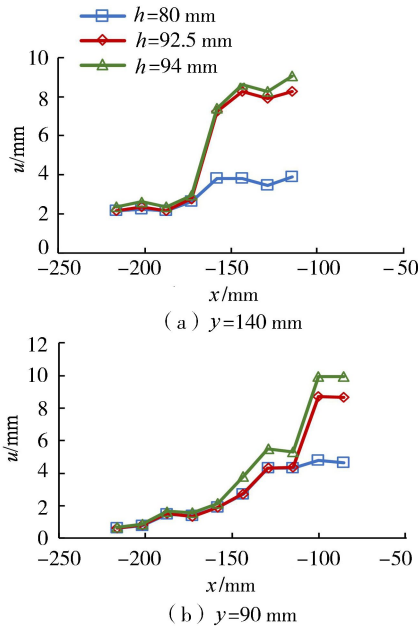


图8 滑裂面形成前边坡水平位移分布

为了进一步分析边坡变形与破坏之间的关系,图9给出了滑裂面形成前边坡水平应变 ϵ_x 的水平分布。可以看出,水平应变分布曲线存在峰值,在峰值附近的区域水平应变明显增大,说明在此区域内变形程度较大且集中,即产生了变形局部化;同时,该变形局部化主要位于最终滑裂面位置左右各20 mm的范围内,当水位上升至80 mm时已经出现,随着水位的上升,同一高程的峰值应变不断增加,变形局部化的程度逐步增强。需要注意的是,滑裂面的位置处于变形局部化区域内,且在水平应变的峰值位置附近。这表明滑裂面是变形局部化发展到一

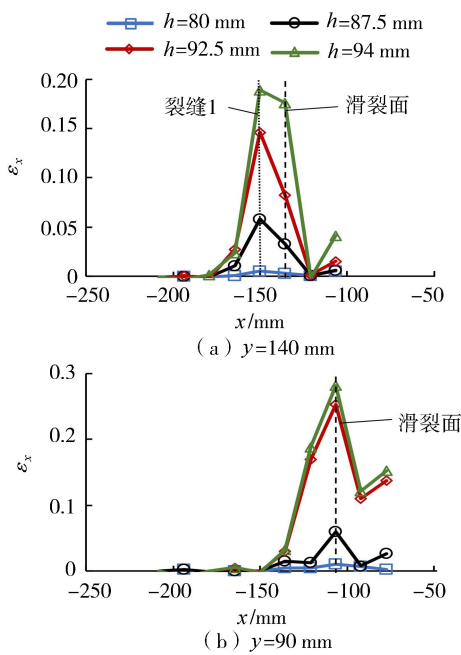


图9 滑裂面形成前边坡水平应变分布

定程度后出现的。可以推断,水位上升过程导致陡坡出现显著的变形过程,该变形并不是均匀分布的,而是在一定区域内集中,出现了明显的变形局部化。变形局部化发展导致在该处出现局部破坏,局部破坏随变形局部化增强发展形成滑裂面,这是水位上升引起陡坡整体滑动破坏的机理。

5 结 论

- a. 水位上升导致陡坡发生剪切破坏,破坏过程从坡脚开始逐步向上发展。同时,在坡顶产生张拉裂缝,与剪切破坏面贯通后形成整体滑裂面。
- b. 边坡滑动破坏的机理为:水位上升过程导致陡坡出现显著的变形,并在一定区域内集中,出现了明显的变形局部化进而导致在该处出现局部破坏并逐渐发展成滑裂面。
- c. 在滑裂面形成后的边坡变形主要出现在滑动体内部,可将基体视作刚体,滑动体上不同点的位移特征受到所在位置的影响。

参考文献:

[1] 谭福林,胡新丽,张玉明,等. 不同类型滑坡渐进破坏过程与稳定性研究[J]. 岩土力学,2016,37(增刊2): 597-606. (TAN Fulin, HU Xinli, ZHANG Yuming, et al. Study of progressive failure processes and stabilities of different types of landslides [J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(Sup2) :597-606. (in Chinese))

[2] 卢应发,黄学斌,刘德富. 推移式滑坡渐进破坏机制及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(2): 333-345. (LU Yingfa, HUANG Xuebin, LIU Defu. Mechanism and stability analyses of progressive failure of

- thrust-type landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (2): 333-345. (in Chinese))
- [3] 沈华章,王水林,郭明伟,等. 应变软化边坡渐进破坏及其稳定性初步研究[J]. 岩土力学, 2016, 37 (1): 175-184. (SHEN Huazhang, WANG Shuilin, GUO Mingwei, et al. A preliminary study of the progressive failure and stability of slope with strain-softening behavior[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (1): 175-184. (in Chinese))
- [4] ZHANG X, SHENG D C, SLOAN S W, et al. Lagrangian modelling of large deformation induced by progressive failure of sensitive clays with elastoviscoplasticity [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2017, 112(8): 963-989.
- [5] HU, Q J, SHI R D, ZHENG L N, et al. Progressive failure mechanism of a large bedding slope with a strain-softening interface [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(1): 63-85.
- [6] YUAN W H, LIU K, ZHANG W, et al. Dynamic modeling of large deformation slope failure using smoothed particle finite element method[J]. Landslides, 2020, 17(7): 1591-1603.
- [7] 郑成成, 龙小刚, 胡广柱, 等. 基于离散元的高陡堆石边坡失稳过程模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (6): 92-98. (ZHENG Chengcheng, LONG Xiaogang, HU Guangzhu, et al. Failure process simulation of a high and steep rockfill slope based on discrete element method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 92-98. (in Chinese))
- [8] 徐卫亚, 周伟杰, 闫龙. 降雨型堆积体滑坡渗流稳定性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 87-94. (XU Weiya, ZHOU Weijie, YAN Long. Research progress on seepage stability of rainfall-induced accumulation landslide [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 87-94. (in Chinese))
- [9] CHEN G Q, HUANG R Q, XU Q, et al. Progressive modelling of the gravity-induced landslide using the local dynamic strength reduction method [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(4): 532-540.
- [10] 王维早, 许强, 郑光, 等. 强降雨诱发缓倾堆积层边坡失稳离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 87-95. (WANG Weizao, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Centrifugal model tests on sliding failure of gentle debris slope under rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 87-95. (in Chinese))
- [11] 林蓓, 罗方悦, 张嘎. 水位变动条件下土坡变形累积致损特性[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(6): 73-76. (LIN Lyu, LUO Fangyue, ZHANG Ga. Slope failure due to local deformation accumulation under water level fluctuation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(6): 73-76. (in Chinese))
- [12] 李世俊, 马昌慧, 刘应明, 等. 离心模型试验与数值模拟相结合研究采空边坡渐进破坏特性[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1577-1583. (LI Shijun, MA Changhui, LIU Yingming, et al. Centrifuge model tests and numerical simulation on progressive failure behavior of slope above a mine-out area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (4): 1577-1583. (in Chinese))
- [13] 苗发盛, 吴益平, 谢媛华, 等. 水位升降条件下牵引式滑坡离心模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 605-613. (MIAO Fasheng, WU Yiping, XIE Yuanhua, et al. Centrifugal test on retrogressive landslide influenced by rising and falling reservoir water level [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 605-613. (in Chinese))
- [14] ZHANG S, PEI X J, WANG S Y, et al. Centrifuge model testing of a loess landslide induced by rising groundwater in northwest China [J]. Engineering Geology, 2019, 259: 105170.
- [15] 罗方悦, 张家豪, 张泽凡, 等. 水位下降条件下土坡破坏的离心模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50 (3): 108-114. (LUO Fangyue, ZHANG Jiahao, ZHANG Zefan, et al. Centrifuge model test on failure of soil slope under drawdown of water level [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50 (3): 108-114. (in Chinese))
- [16] ZHANG G, HU Y, ZHANG J M. New image analysis-based displacement-measurement system for geotechnical centrifuge modeling tests [J]. Measurement, 2009, 42(1): 87-96.
- [17] 高长胜, 徐光明, 张凌, 等. 边坡变形破坏离心机模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 478-481. (GAO Changsheng, XU Guangming, ZHANG Ling, et al. Centrifuge modeling of deformation and failure of slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 478-481. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-12-02 编辑: 骆超)

