

正反粒序结构条件下滑坡堰塞坝破坏模式研究

吴茂林, 罗刚, 高延超, 陈西南, 翟新乐

A study of the failure mode of landslide dam under the structural conditions of positive and reverse grain sequences

WU Maolin, LUO Gang, GAO Yanchao, CHEN Xi'nan, and ZHAI Xinle

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112062>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

土工格室加筋垫层路堤破坏模式和稳定性评价

Failure mode and stability evaluation of geocell-reinforced cushion embankment

金家庆, 徐超, 梁程, 刘若桐 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 86-86

不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究

A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness

陈林万, 裴向军, 张晓超, 张硕, 钟玉健, 罗欣 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 137-147

降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验

Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall

陈林万, 张晓超, 裴向军, 张硕, 龚伟翔, 钟玉健 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 151-160

含裂隙膨胀土无侧限抗压强度特征试验研究

An experimental study of the unconfined compressive strength characteristics of the expansive soil with cracks

李关洋, 顾凯, 王翔, 施斌 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 62-70

基于黏聚力裂缝模型的反倾层状岩质边坡倾倒破坏模拟

A numerical study of the toppling failure of an anti-dip layered rock slope based on a cohesive crack model

马文著, 徐衍, 李晓雷, 陈敏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 150-160

滑源区粒序分布及颗粒粒径对碎屑流冲击作用的影响研究

Particle sequence distribution and the effect of particle size on the impact effect in a fluidized landslide-debris flow

张志东, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 49-59



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112062

吴茂林, 罗刚, 高延超, 等. 正反粒序结构条件下滑坡堰塞坝破坏模式研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 124-132.

WU Maolin, LUO Gang, GAO Yanchao, *et al.* A study of the failure mode of landslide dam under the structural conditions of positive and reverse grain sequences[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 124-132.

正反粒序结构条件下滑坡堰塞坝破坏模式研究

吴茂林¹, 罗刚¹, 高延超², 陈西南¹, 翟新乐¹

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031;

2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要: 滑坡堰塞坝是大型滑坡堆积体堵塞河道形成的土石坝。正、反粒序结构作为大型远程滑坡所特有的 2 种具有显著差异的地质结构特征, 2 种情况下坝体的破坏模式差异及稳定性影响因素亟需试验研究。文章通过室内水槽物理模型实验, 对比不同粒径、不同结构的滑坡堰塞坝坝体的破坏过程差异, 探究了正、反粒序结构条件下堰塞坝的稳定性差异、破坏模式及影响因素。研究表明: (1) 堰塞坝破坏模式的变化取决于浸润线在下游坡面的出露位置, 相比上游水位有一定的延迟性; (2) 正、反粒序堰塞坝的破坏模式取决于坡体渗流与下游坡面临界起动坡降的关系; (3) 细砂层的位置分布, 不同埋深细砂层的起动临界坡降差异和细砂与中粗砂的孔隙率差异是造成正、反粒序坝体破坏差异的主要原因。该研究成果可为大型滑坡堰塞坝的防灾减灾提供理论指导。

关键词: 滑坡堰塞坝; 粒序结构; 破坏模式; 起动临界坡降; 物理模型试验

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)06-0124-09

A study of the failure mode of landslide dam under the structural conditions of positive and reverse grain sequences

WU Maolin¹, LUO Gang¹, GAO Yanchao², CHEN Xi'nan¹, ZHAI Xinle¹

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan

610031, China; 2. Chengdu Geological Survey Center of China Geological Survey,

Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: Landslide dam is an earth-rock dam formed by the deposits of large river-blocking landslides. Because the unique geological structure characteristics of large-scale long-runout landslides under the conditions of positive and reverse grain sequence structures differ significantly, the experimental study of the differences of failure modes and influencing factors of landslide stability of dams under these two conditions are urgently needed. In this paper, the failure process differences of landslide dams with different particle sizes and different structures are compared through indoor water tank model experiments, and the stability differences, failure mechanism and influencing factors of landslide dams with positive and reverse grain sequence structures are explored. The results show that (1) The change of failure mode of the landslide dam depends on the position where

收稿日期: 2021-12-28; 修订日期: 2022-03-25

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505404); 四川省科技厅科技计划项目(2021YJ0033); 四川省自然资源科研项目(Kj-2022-29); 自然科学基金青年基金项目(42107155)

第一作者: 吴茂林(1999-), 男, 硕士, 主要从事工程地质方向的研究。E-mail: 919006401@qq.com

通讯作者: 罗刚(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害防治工作。E-mail: luogang@home.swjtu.edu.cn

the phreatic line is exposed on the downstream slope, which has a certain delay compared with the upstream water level; (2) The failure modes of landslide dams with positive and reverse grain sequence structures depend on the relationship between slope seepage and startup critical gradient of downstream slope. (3) The location distribution of fine sand layer, the difference of startup critical gradients of fine sand layers at different depths and the difference of porosities between fine sand and medium coarse sand are the main reasons for the difference in the failures of dams with positive and reverse sequences. The research results can provide the theoretical guidance for the disaster prevention and mitigation of large landslide dams.

Keywords: landslide dam; grain structure; failure mode; startup critical gradient; physical model experiment

滑坡堰塞坝是由滑坡快速下滑堵塞河道而形成的一种土石坝,其结构松散、渗透性强、稳定性差^[1-2]。Costa 等^[1]总结了堰塞坝的形成原因、稳定时长和破坏模式。在上游水位快速上升的情况下,滑坡堰塞坝很容易发生渗透管涌、坝体失稳甚至漫顶破坏,引发洪灾。由于影响堰塞坝稳定性的因素众多,破坏模式复杂,且无法及时采取工程措施加固坝体,使得坝体具有失稳概率高、突发性强、影响范围广等特点。

目前滑坡堰塞坝在不同坝体结构下的破坏模式差异性研究主要有 2 种。一种是通过宏观分析堆积体结构,总结坝体失稳的一般性规律。胡卸文等^[3]用 Visual Modflow 模拟唐家山堰塞坝的溃决模式,发现其表层土主要为渗透破坏、溯源侵蚀,下层土主要为不同粒径导致的渗透坡降差异产生的冲刷下切。杨阳等^[4]通过水槽模型试验分析了溃坝过程中水流条件与坝体侵蚀的关系,得出堰塞坝溃决主要集中于溯源侵蚀退和溃口展宽下切阶段。杨琴等^[5]利用 GIS 和遥感技术,分析了唐家山堰塞坝的坡体复滑形成机制,得出坡体复滑源于近期地震活动和河流侵蚀坡脚等内外动力地质作用。Zeng 等^[6]利用 PFC3D 软件分析了蔡家坝滑坡堰塞坝的形成机理,并评估了大坝溃决风险。Sammen 等^[7]研究了峰值流量与溃坝时间的关系,提出用 ANN 估算堰塞坝溃坝参数的新方法。吴瑞安等^[8]研究了沃达滑坡的后续发育变化特征,分析了滑坡堆积体复活变形阶段及后续风险。

另一种则是通过微观分析坝体内部颗粒,找到决定堰塞坝破坏模式的关键影响因素。吴梦喜等^[9]验证了砂砾石土内部颗粒的渗透力与颗粒表面积正相关,推导出颗粒群起动的临界渗透坡降公式。邓明枫等^[10]通过物理模型试验研究了宗渠堰塞坝坝体密度和级配特征对溃决过程的影响,得出密度越大溃决越慢,级配越粗溃决越慢。石振明等^[11]发现材料级配决定了坝体的渗流破坏,坝体的渗透能力主要取决于粗料孔隙被细料填充的程度。杨江涛等^[12]基于 ABAQUS

建立堰塞坝渗流及动力响应分析模型,得出堰塞坝内部动力响应具有“表面放大”效应,余震会加速漫顶溢流。王明年等^[13]分析细颗粒的受力情况,建立渗流作用下土颗粒的受力模型,发现埋深小时起动临界坡降受粒径影响较大,暴露角对起动临界坡降的影响随埋深增加而减小。久田裕史等^[14]对细砂含量不同的堆积体进行模拟破坏实验,得出细砂含量高的堆积体更易破坏。综上所述,目前对于滑坡堰塞坝整体性、宏观性破坏模式的研究比较充分,但是从微观的角度分析土颗粒引起的滑坡堰塞坝破坏模式的差异主要集中于研究单一粒径颗粒或者是研究均匀混合碎屑材料形成的不同级配状况对坝体稳定性的影响,鲜有人研究不同粒序排列下其破坏模式的差异^[15-16]。

对于滑坡堰塞坝,其上下游的颗粒粒径分布存在显著差异^[17]。大型岩质滑坡如果运动距离短,短程刹车制动,堰塞坝会保持原有层序^[18],呈现正粒序结构特征,例如唐家山堰塞坝^[19]和白格滑坡堰塞坝^[20]。如果运动距离远,动力破碎作用引起粒径分选,堰塞坝会呈现反粒序结构特征^[21-22],例如文家沟滑坡堰塞坝、红石岩滑坡堰塞坝、牛圈沟滑坡堰塞坝^[23-25]。这种结构性差异将会影响堰塞坝破坏过程和溃决过程,对其破坏模式的影响不可忽视^[26]。本文通过构筑不同颗粒粒径的均匀坝体、正粒序坝体和反粒序坝体物理模型,开展不同结构特征条件下堰塞坝破坏模式的试验来研究堰塞坝粒序结构对其破坏机理的影响。

1 试验材料与方法

本次试验为室内物理模型试验,水槽长、宽、高分别为 3.15、0.90、0.30 m(图 1)。堰塞坝模型的原型为唐家山堰塞坝,唐家山堰塞坝长约 800 m、宽 400~600 m、高 80~120 m,本文分别取为 750、450、150 m;考虑到试验主要研究坝体粒序结构对稳定性的影响,增大模型上下游坡度至 30°,并将模型缩小 500 倍,比例系数 $K=1/500=0.002$,模型尺寸如图 1 所示。

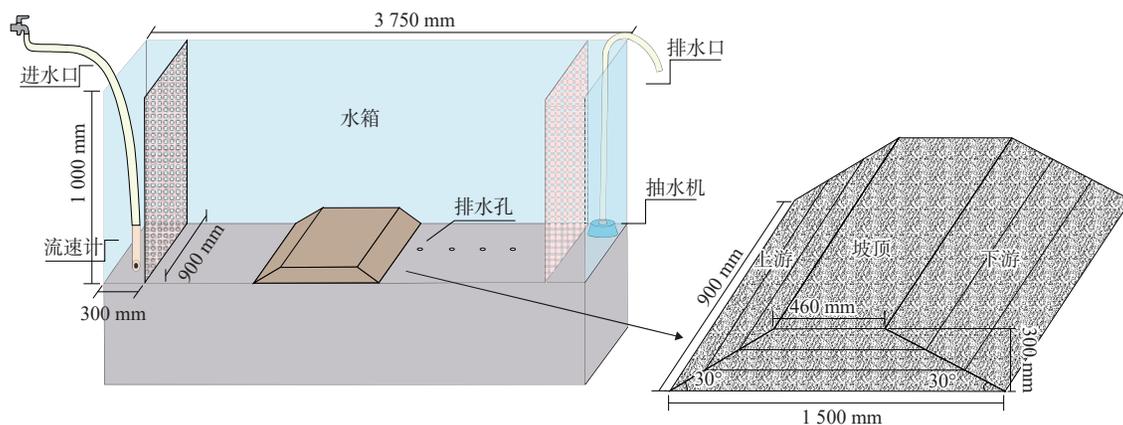


图 1 堰塞坝水槽物理模型试验

Fig. 1 Flume model test for landslide dam

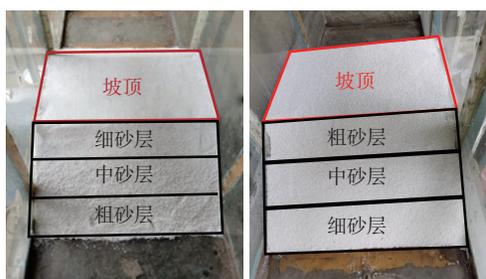
坝体堆筑材料为无黏性石英砂, 细砂粒径为 0.84 ~ 1.60 mm、中砂粒径为 2.00 ~ 3.00 mm、粗砂粒径为 4.00 ~ 6.00 mm。以均匀细砂、均匀中砂、均匀粗砂、正粒序结构(从上至下细、中、粗砂)、反粒序结构(从上至下粗、中、细砂)分别堆积 5 种堰塞坝模型, 每个坝体体积形状和压实度保持一致^[7], 试验设计见表 1, 正反粒序的坝体模型如图 2 所示。测量系统由流速

计、刻度尺和高速相机组成。流速计在入水口处, 保证供水量稳定在 30 L/h, 而坝体上游前端的细孔挡板可使水流缓慢没过坝体, 避免水流冲击的影响。将刻度尺贴在水箱内部, 观测水位变化。用记号笔在水箱上画出堆好的堰塞坝模型轮廓, 对比滑坡堰塞坝破坏前后形态的变化。

表 1 试验设计方案

Table 1 Test design scheme

试验方案	纯细砂	纯中砂	纯粗砂	正粒序结构			反粒序结构		
	上、中、下	上、中、下	上、中、下	上	中	下	上	中	下
粒径/mm	0.84 ~ 1.60	2.00 ~ 3.00	4.00 ~ 6.00	0.84 ~ 1.60	2.00 ~ 3.00	4.00 ~ 6.00	4.00 ~ 6.00	2.00 ~ 3.00	0.84 ~ 1.60



(a) 正粒序坝体 (b) 反粒序坝体

图 2 正、反粒序的堰塞坝模型

Fig. 2 Experimental dams with positive and reverse grain sequence structures

2 试验结果

2.1 均匀砂粒堆积试验

2.1.1 纯细砂

坝体上游进水后, 坝体内浸润线几乎与上游水位同步上升, 下游坡面无渗流产生。上游水位逐渐上

升, 11 min 22 s 时, 浸润线达到下游坡面, 下游坡面出现不含砂土颗粒的渗流, 并在 30 s 内横向覆盖整个下游坡面下部, 形成稳定的渗流通道且有细砂流出, 见图 3(a)(b)。坝体上游坡面水位继续上升, 12 min 开始由下至上发生渗流破坏并随渗流量加剧而增大, 出现陡坎, 坝体下游坡面整体下沉, 见图 3(c)。这是由于: 坝体在出现不含砂粒流动的渗流时, 内部渗透系数保持不变, 渗流量较低。随着上游水位上升, 内部水压力加大, 坝体渗透量逐渐增大, 导致内部一些砂粒被带动, 一些随着渗流被带出, 有一些堵塞内部孔隙, 下游渗透系数增大加剧了坝体破坏。

此后, 渗流形成的破坏向上蔓延, 18 min 时上游水位达到 30 cm, 超过坝体, 坝体破坏形式由渗流破坏转为漫顶破坏。漫顶的水流沿着现有水流通道不断对坝体下蚀、侧蚀、溯源侵蚀形成冲蚀陡坎(图 4)。从上游开始进水至发生漫顶破坏直到坝体下游坡面基本稳定共耗时 25 min。

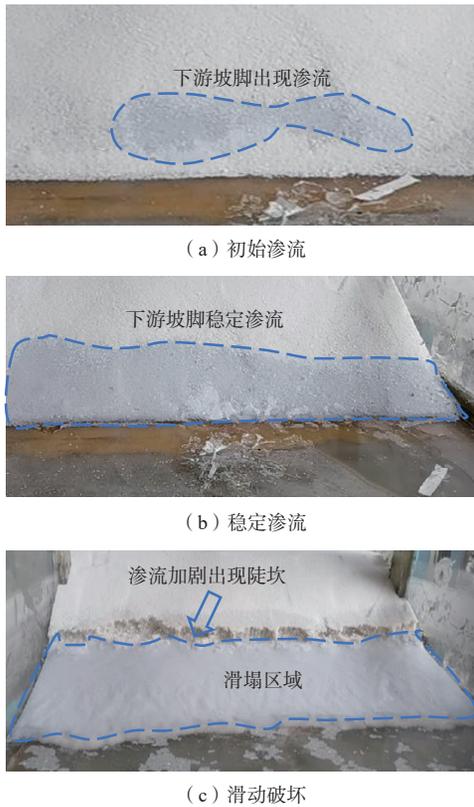


图3 纯细砂坝体渗流破坏过程

Fig. 3 Seepage damage process of pure fine sand dam

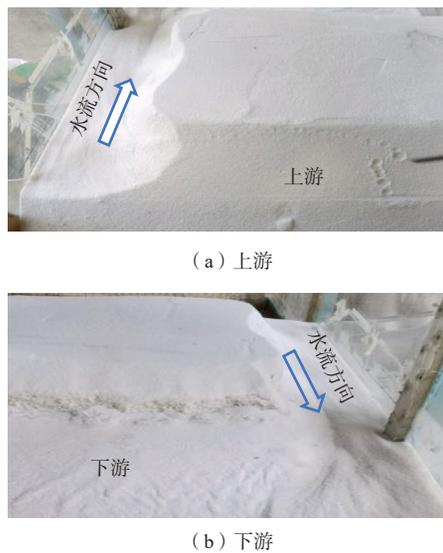


图4 纯细砂坝体漫顶破坏后上下游情况

Fig. 4 Upstream and downstream of pure fine sand dam after overtopping failure

2.1.2 纯中砂

坝体上游坡面进水后, 上游水位上升, 坝体内部浸润线同时以低于水位线速度上升, 5 min 20 s 时下游坡面出现渗流, 6 min 时整个下游坡面底部出现稳定渗流。18 min 开始出现滑塌, 此后坝体破坏与纯细砂

的坝体类似, 渗流量更大, 陡坎由下向上蔓延但滑塌区域的面积与沉降程度小于纯细砂的坝体, 直至 38 min 时发生漫顶破坏。从上游开始进水至发生漫顶破坏直到坝体下游坡面基本稳定共耗时 45 min。

2.1.3 纯粗砂

坝体浸润线在 50 s 达到下游坡面, 出现渗流并迅速形成稳定渗流通道, 随着上游水位上升, 参与渗透排水的区域增加, 在水位上升至 18 cm 左右时, 形成了上游补水与下游排水的动态稳定, 此后上游水位不再上升, 下游坡面除少量沉降外未发生其他破坏。

2.2 正粒序结构

坝体上游进水后, 坝体下游坡脚在 30 s 时出现稳定的清澈渗流, 侧面观察到浸润线通过第 1 层粗砂层时, 渗流量加大, 坝体中部出现局部滑塌; 39 min 时侧面观察到浸润线通过第 2 层中砂层, 渗流加剧, 坝体右侧中砂与细砂交界处出现裂隙, 见图 5(a)(b)。裂缝逐渐向两侧和下方扩大引起滑塌, 形成圈椅状构造, 见图 5(c)。之后, 左侧中砂与细砂交界处也出现相同现象。上游水位超过中砂层时, 左右塌陷连通, 见图 5(d)。这是由于: 在水流通过粗砂层时, 介质内部孔隙较大、渗透梯度小、渗流场变化稳定, 表现出稳定流的渗水特点。当上游水位上升至中砂层时, 虽然渗流梯度仍然小于中、粗砂层的允许梯度, 但下游坡面的渗流梯度会大于其允许梯度的下限, 下游坡面出现局部渗流破坏, 但不影响坝体整体稳定性。当上游水位逐渐上升超过中砂层与细砂层分界时, 由于细砂的渗透性较差, 水流受阻, 且上游水位增高, 水压力增大, 因此下部渗透水量增大。虽然渗透梯度仍小于中、粗砂层的允许梯度, 但下游坡面的渗透梯度将大于允许梯度的上限。因此, 下游坡面中砂层与细砂层的交界处出现了管涌和裂隙, 进而导致坝体滑塌, 出现 2 处圈椅状陡坎, 并逐渐向两侧扩展。

41 min 时上游水位达到 30 cm, 超过细砂层, 坝体发生漫顶破坏, 见图 6(a)。这是由于细砂的渗透性较差, 水流受阻, 上游水位迅速上升。漫顶的水流沿着现有水流通道不断对坝体下蚀、侧蚀、溯源侵蚀形成梯形沟槽和冲蚀陡坎, 见图 6(b)。从上游开始进水到发生漫顶破坏至破坏基本稳定耗时 47 min。

2.3 反粒序结构

8 min 时侧面观察到上游浸润线完全通过粗砂层, 内部浸润线到达下游坡面底部, 坝体下游坡脚出现轻微浑浊渗流, 见图 7(a)。这是由于: 水流通过细砂层时, 细砂颗粒细、渗透梯度大、渗流场变化不稳定。

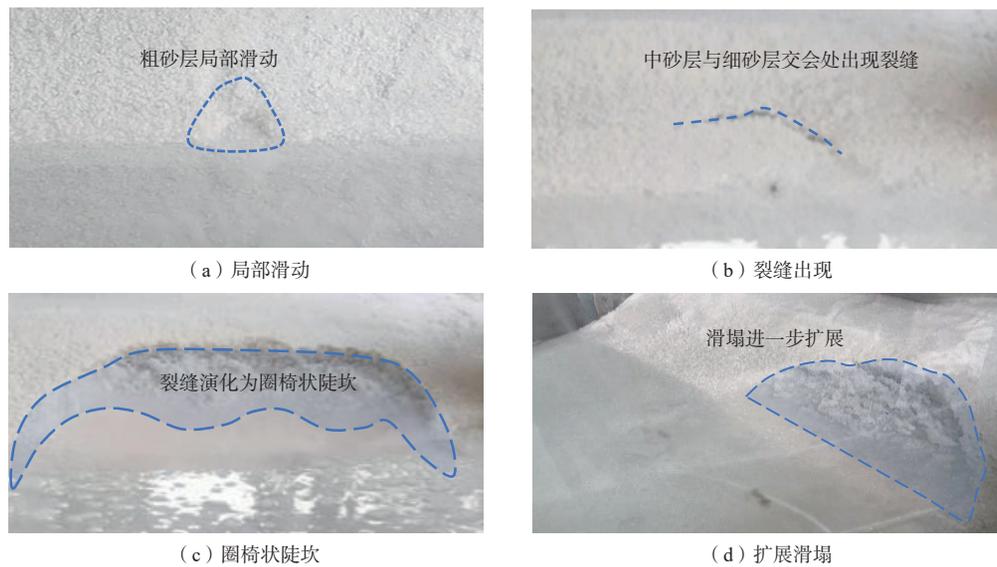


图 5 正粒序坝体滑塌破坏过程

Fig. 5 Slump of dam with positive grain sequence structure

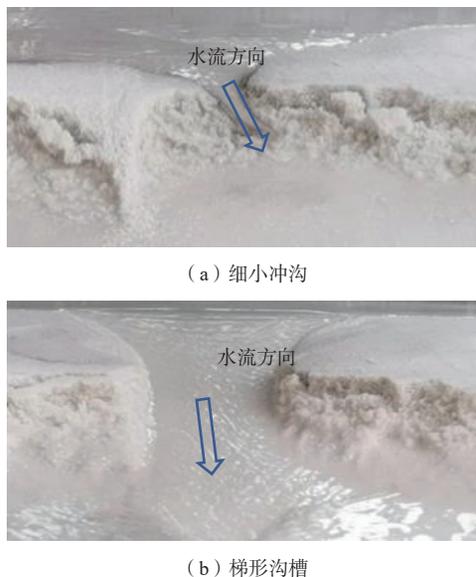


图 6 正粒序坝体漫顶溃口的演变

Fig. 6 Evolution of breach during the overtopping failure

因此,浸润线上升不均匀,坝体无法及时排水。

下游浸润线逐步上升,渗流加剧,坝体下游坡面出现局部滑塌并逐渐扩大形成整体滑动,同时坝体下游坡面出现管涌破坏,见图 7(b)。侧面观察到浸润线超过细砂层时,坝体下游坡面的下半部迅速滑塌形成“陡坎”并连通使渗流水量增大。同时,管涌水量加剧并携带细砂流出堆积至坝脚。坝体持续向上滑塌,上覆滑塌砂层覆盖管涌通道,并在塌陷砂土上出现了新的管涌通道,中砂层迅速向下滑塌,见图 7(c)。浸润线上升至粗砂层,中砂层与粗砂层交界处发生显著沉降,排水量猛增,坝体滑塌、管涌破坏、渗流破坏加

剧,坝体逐级滑塌,见图 7(d)。这是由于:当下游水位逐渐上升时,细砂层渗透坡降大于允许坡降,下游坡面发生渗透破坏并逐步加剧,排出的水出现紊流状态。随着浸润线升高至中砂层,坝体下游坡面发生了开裂、管涌、渗流破坏,并逐步向周围扩展导致了整体滑塌。坝体浸润线达到粗砂层,由于粗砂层颗粒大、堆积松散、排水能力强、渗透梯度大,坝体下游坡面渗流量增大,携带更多砂粒流出进而引发坝体整体向下滑塌,沉降更加明显。排水量越大,坝体破坏越严重,形成恶性循环,坝体下游失稳。

粗砂层中出现了多个渗流通道,坝体上游水位几乎不再上升,坝体逐步通过渗流滑塌和溯源侵蚀向上游破坏至坝体上下游贯通。此时坝体已经完全变形。从上游开始进水到破坏基本稳定耗时 53 min。

3 讨论

试验中坝体先后共出现了 4 类破坏情况,即渗流管涌、失稳滑塌、漫顶破坏和冲蚀陡坎。分析破坏特征,统计不同坝体不同破坏形式出现的顺序以及作为主要破坏所持续的时间,可以对比得出不同粒径砂粒以及不同粒序堆积之间的差异。

3.1 坝体破坏的发展过程

3.1.1 渗流管涌

渗流管涌破坏一般可以分为 2 个阶段:(1)薄弱部分的颗粒被带入水体中并且出现了漏水通道;(2)渗透及孔隙水压力使坝体局部抗滑稳定性降低而产生沉降,在正粒序中表现明显。

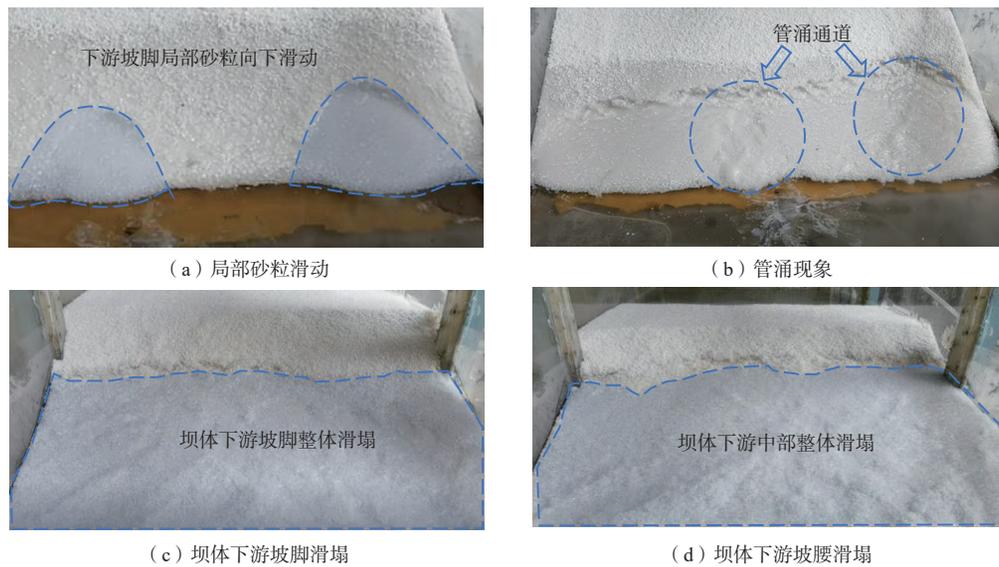


图 7 反粒序坝体破坏过程

Fig. 7 Failure process of reverse grain sequence dam

3.1.2 失稳滑塌

由于下游坡面发生渗透破坏并逐步加剧,排出的水出现紊流状态。随着浸润线升高,坝体下游坡面发生沉降、开裂,并逐步向周围扩展导致了整体滑塌。下部部分水流通道受阻使上部渗流量加大,携带更多砂粒流出,引发坝体滑塌,沉降加剧,形成恶性循环。

3.1.3 漫顶破坏

基于水槽模型实验中观察的现象,堰塞坝漫顶溃决过程可以划分为 4 个阶段^[28]。

第 1 阶段,当水流漫过堰塞坝坝顶,相应溃口处坝顶高程降低;在水流冲击下,下游坡面不断发生溯源侵蚀。由于水流外侧冲刷速度较内侧更快、冲击力更大,下游坡面逐渐形成陡坎(图 8)。第 2 阶段,下游坡面继续保持陡坎形态,溃口破坏在水流剪切冲刷、陡坎底部滑塌及下游壁面块体失稳滑塌等众多因素的相互作用下加剧,逐步形成大尺度陡坎。第 3 阶段,溃口处继续发生溯源侵蚀,由于溃口处坝体横断面相对单薄,冲刷速度加快,溃口底坡随泥砂休止角向上游后退,直至坝体被完全贯穿,溃决水流急剧增大

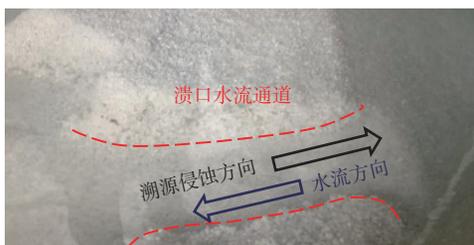


图 8 溃口处溯源侵蚀

Fig. 8 Headward erosion at the breach

(图 8)。第 4 阶段,溃口以横向扩展为主,在剪切冲刷作用下,溃口两侧发生滑塌,滑塌部分被水流带走,坝体改变最终停留在形成稳定贯通水流的时刻。

3.1.4 冲蚀陡坎

漫顶水流在坝体陡坎边缘处以类似冲击水流的形式下泄。水流在下游剧烈运动,在下游已滑塌的坡面上形成一个冲刷坑,并使冲刷坑沿垂向和纵向不断扩大。由于“陡坎”壁面材料长时间处于饱和状态,增大了坝体滑塌的可能性。综上,砂石坝漫顶溃坝冲刷过程可以分为:(1)陡坎顶部水流剪切冲刷;(2)冲击水流对下游坡面的淘蚀;(3)陡坎壁面受水流冲刷;(4)陡坎壁面失稳破坏。

3.2 不同坝体破坏对比

3.2.1 纯砂坝

纯细砂坝体发生渗流后立即产生失稳滑塌,上游水位迅速上升至坝顶。纯中砂坝破坏过程与纯细砂坝类似,但中砂颗粒较大,在一定的水流中运动速度较慢;加之中砂的水流速度比细砂小,导致中砂的破坏表现为渐变破坏,失稳滑塌的时间更久、程度却较小。而粗砂与中砂相比破坏程度更小(表 2)。

考虑纯砂坝渗流流速小,忽略动水头变化,采用吴良骥^[29]给出的单个颗粒渗透力(F_w)的计算公式分析纯砂坝:

$$F_w = \frac{1}{6} \pi D^2 \gamma_w I (D + \varepsilon D_{ok}) \quad (1)$$

式中: D_{ok} ——粗颗粒的等效粒径/m, $D_{ok} = 1 / \sum (p_i / D_i)$;

p_i ——粒径为 D_i 的颗粒的质量分数/%;

表 2 纯砂坝体主要破坏形式持续时间

坝体类型	无渗流 /min	渗流 /min	失稳滑塌 /min	漫顶破坏 /min	冲蚀陡坎 /min	总计 /min
纯细砂	11.0	0.5	6.0	5.0	2.0	23.5
纯中砂	5.3	12.7	20.0	5.0	2.0	45.0
纯粗砂	1.0	59.0	0.0	0.0	0.0	60.0

D ——颗粒粒径/m;

γ_w ——水的重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$);

I ——单位土体平均水力坡降;

ε ——土体的孔隙比。

由式(1)可知,细砂坝粒径最小,因此渗透性最差。从试验过程可以看出,纯砂坝坝体的稳定性与破坏程度取决于坝体内部的渗流,而坝体内部渗流程度主要取决于粒径大小及其所决定的孔隙率。这是由于颗粒在坝体中起骨架作用,本身不透水,坝体内部的流速(u)在单一变量条件下仅与孔隙率(ϕ)有关:

$$u = Q / (A\phi) \quad (2)$$

式中: Q ——渗透流量/($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$);

A ——过水面积/ m^2 。

此外,在渗流过程中,砂土强度会随含水率发生变化,同时应力状态也会发生改变。在垂直向上的渗流作用下,粒径 D_0 颗粒的起动临界条件为渗透力与浮重度平衡。吴梦喜等^[9]提出了粒径为 D_0 的单个颗粒的起动临界渗透坡降(J_c)公式:

$$J_c = (1 - \phi) \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) D_0 \int_0^1 \frac{1}{D(p)} dp \quad (3)$$

式中: γ_s ——土颗粒的重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$);

p ——颗粒体积累计含量, $0 < p < 1$ 。

结合试验过程,砂土的颗粒较小时,孔隙率大,孔隙水的流速较小,水向上浸润,浮重度降低,从而引起坡面起动临界坡降比同位置的中粗砂低,不承担应力传递的颗粒发生移动的概率较大,这将提高局部的渗透系数,导致管涌的发生,所以粗砂的管涌时间较长,细砂相对较短。失稳和应力状态直接相关,细砂在管涌发生后,由于孔隙水压力的升高和有效应力传递面积的减小,使得强度变低,导致细砂的失稳时间更短。而孔隙率的增加使坝体的过水面积增加,增大的孔隙尺寸使平均渗流速度增加;因此细砂渗透性差,上游水位无法及时排出,造成下游坡面的失稳滑塌,且容易发生漫顶破坏,而中砂、粗砂则相对更加稳定。因此,细粒砂含量是判断不同堆积结构破坏模式差异的最关键的影响因素。

3.2.2 正、反粒序坝

正粒序坝体渗流管涌时间较长,但期间坝体几乎没有破坏。浸润线通过中砂层与细砂层交界处时,短时间内发生了严重的失稳滑塌和漫顶破坏,破坏突然而剧烈。反粒序坝体在浸润线到达下游坡面发生渗流后一直发生破坏程度较低且逐渐降低的失稳滑塌,直到最后溯源侵蚀连通上下游(表3)。

表 3 正、反粒序坝体主要破坏形式持续时间

坝体类型	无渗流 /min	渗流 /min	失稳滑塌 /min	漫顶破坏 /min	冲蚀陡坎 /min	总计 /min
正粒序	2.0	37.0	1.0	5.0	2.0	47.0
反粒序	8.0	4.0	41.0	0.0	0.0	53.0

对于正、反粒序坝体,破坏模式的差异主要取决于细砂层的位置分布。根据王明年等^[13]对不同埋深和粒径的颗粒的起动临界坡降试验得出:埋深较小时,起动临界坡降受粒径影响更大,随埋深增加,粒径影响逐渐降低(图9)。

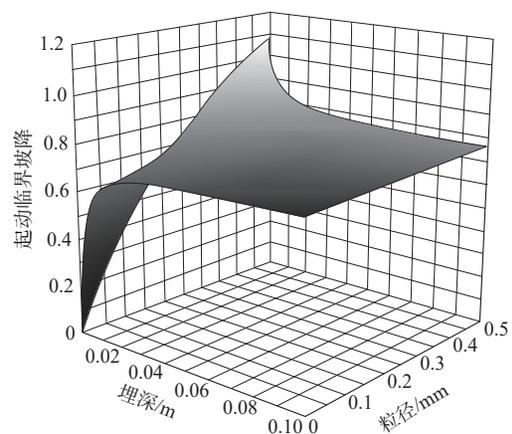
图 9 起动临界坡降^[13]

Fig. 9 Startup critical hydraulic gradient

正粒序的坝体,下部中粗砂层排水稳定,中砂层与细砂层交界处不均匀系数增大,细颗粒向中砂层孔隙填充,且不易被水流带出,使中砂颗粒作为骨架的坝体的渗透性降低,坝体内部水压力短时间内快速上升。而细砂层起动临界坡降远低于中砂层,又因为埋深浅,起动临界坡降跟下部中砂层差异更大,引起突然且剧烈的垮塌,上游水位在细砂层内迅速上升,进而引发漫顶。对于反粒序坝体,底部的细砂层迅速达到起动临界坡降并发生破坏,开始滑落,且由于细砂层渗透性差,上游水迅速漫过细砂层形成稳定通道;此后细颗粒对坝体整体排水几乎没有影响。对渗流

有影响的坝体颗粒平均粒径增大,骨架作用增强,坝体渗透性加大,堰塞坝内部渗流特征表现为沿坝高从上到下,坝体渗流速度逐渐减小,后续破坏持续减弱。

4 结论

(1)堰塞坝破坏模式的变化取决于浸润线达到下游坡面的位置,与上游水位相比有一定的滞后性。

(2)正、反粒序堰塞坝的破坏模式受坡体渗流与临界起动坡降控制。正粒序堰塞坝下部渗流低于起动临界坡降,上部远超起动临界坡降,以失稳滑塌与漫顶破坏为主,反粒序下部开始渗流就超过起动临界坡降,破坏以渗流管涌产生的沉降为主。

(3)正、反粒序堆积的坝体破坏模式与细砂层分布位置有关,细砂层不同埋深的起动临界坡降差异和细砂与中粗砂的孔隙率差异是坝体破坏差异的主要原因。

参考文献 (References) :

- [1] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, 100(7): 1054 - 1068.
- [2] EHTESHAMI-MOINABADI M, NASIRI S. Geometrical and structural setting of landslide dams of the Central Alborz: A link between earthquakes and landslide damming[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(1): 69 - 88.
- [3] 胡卸文, 罗刚, 王军桥, 等. 唐家山堰塞体渗流稳定及溃决模式分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(7): 1409 - 1417. [HU Xiewen, LUO Gang, WANG Junqiao, et al. Seepage stability analysis and dam-breaking mode of Tangjiashan barrier dam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(7): 1409 - 1417. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 杨阳, 曹叔尤. 堰塞坝溃决机理试验研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(增刊2): 60 - 67. [YANG Yang, CAO Shuyou. Experimental study on breach growth mechanisms of natural barrier dams[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(Sup2): 60 - 67. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 杨琴, 范宣梅, 许强, 等. 北川唐家湾滑坡变形历史与形成机制研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(2): 136 - 141. [YANG Qin, FAN Xuanmei, XU Qiang, et al. A study of the deformation history and mechanism of the Tangjiawan landslide[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2): 136 - 141. (in Chinese with English abstract)]
- [6] ZENG N, LIU B, XIE J. Numerical investigation on the barrier dam risk caused by landslide-A case study on Caijiaba landslide[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 658(1): 012036.
- [7] SAMMEN S S, MOHAMED T A, GHAZALI A H, et al. An evaluation of existent methods for estimation of embankment dam breach parameters[J]. *Natural Hazards*, 2017, 87(1): 545 - 566.
- [8] 吴瑞安, 马海善, 张俊才, 等. 金沙江上游沃达滑坡发育特征与堵江危险性分析[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 120 - 128. [WU Reian, MA Haishan, ZHANG Juncai, et al. Developmental characteristics and damming river risk of the woda landslide in the upper reaches of the Jinshajiang River[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 120 - 128. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 吴梦喜, 高桂云, 杨家修, 等. 砂砾土土的管涌临界渗透坡降预测方法[J]. *岩土力学*, 2019, 40(3): 861 - 870. [WU Mengxi, GAO Guiyun, YANG Jiayou, et al. A method of predicting critical gradient for piping of sand and gravel soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(3): 861 - 870. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 邓明枫, 陈宁生, 廖世春, 等. 堰塞坝漫顶溃决过程及其受组成结构的影响[J]. *人民长江*, 2012, 43(2): 30 - 35. [DENG Mingfeng, CHEN Ningsheng, LIAO Shichun, et al. Overtopping outburst process of barrier dam and influence by dam component and structure[J]. *Yangtze River*, 2012, 43(2): 30 - 35. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 石振明, 张公鼎, 彭铭, 等. 堰塞坝体材料渗透特性及其稳定性研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(5): 1182 - 1189. [SHI Zhenming, ZHANG Gongding, PENG Ming, et al. Study on the permeability and stability of landslide dam materials[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(5): 1182 - 1189. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 杨江涛, 石振明, 郑鸿超, 等. 堰塞坝渗流稳定性及坝体动力响应研究[J/OL]. *工程地质学报*. (2021-07-14) [2021-12-01]. [YANG Jiangtao, SHI Zhenming, ZHENG Hongchao, et al. Study on the seepage stability and dynamic response under earthquake of landslide dam[J/OL]. *Journal of Engineering Geology*. (2021-07-14) [2021-12-01]. <http://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2021-0023>. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王明年, 江勇涛, 张艺腾, 等. 渗流作用下颗粒土起动临界坡降研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(增刊1): 87 - 93. [WANG Mingnian, JIANG Yongtao, ZHANG Yiteng, et al. Study on the critical starting slope of granular soil under the action of seepage[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(Sup1): 87 - 93. (in Chinese with English abstract)]

- [14] 久田 裕史, 中田 幸男. 細粒分に着目したまさ土斜面の降雨崩壊特性[J]. 土木学会論文集C(地圏工学), 2016, 72(4): 368 – 376.
- [15] 杨华, 陈云良, 何利君, 等. 三种堰塞坝溃口发展及最大溃决流量公式拟合[J]. 中国农村水利水电, 2015(5): 129 – 132. [YANG Hua, CHEN Yunliang, HE Lijun, et al. Breach development and peak break discharge formula for three types of barrier dams[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(5): 129 – 132. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 石振明, 周明俊, 彭铭, 等. 崩滑型堰塞坝漫顶溃决机制及溃坝洪水研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2173 – 2188. [SHI Zhenming, ZHOU Mingjun, PENG Ming, et al. Research progress on overtopping failure mechanisms and breaching flood of landslide dams caused by landslides and avalanches[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(11): 2173 – 2188. (in Chinese with English abstract)]
- [17] ZHENG H, SHI Z, SHEN D, et al. Recent advances in stability and failure mechanisms of landslide dams[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021(9): 659935.
- [18] HEWITT K. Catastrophic landslides and their effects on the Upper Indus streams, Karakoram Himalaya, Northern Pakistan[J]. *Geomorphology*, 1998, 26(1/2/3): 47 – 80.
- [19] 付建康, 罗刚, 胡卸文. 滑坡堰塞坝越顶溢流破坏的物理模型实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(1): 203 – 212. [FU Jiankang, LUO Gang, HU Xiewen. Physical model experiment on overtopping overflow failure of landslide dam[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2018, 48(1): 203 – 212. (in Chinese with English abstract)]
- [20] ZHANG S, YIN Y, HU X, et al. Dynamics and emplacement mechanisms of the successive Baige landslides on the Upper Reaches of the Jinsha River, China[J]. *Engineering Geology*, 2020, 278: 105819.
- [21] ZHOU Y, SHI Z, ZHANG Q, et al. Damming process and characteristics of landslide-debris avalanches[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 121: 252 – 261.
- [22] 彭双麒, 许强, 郑光, 等. 碎屑流堆积物粒度分布与运动特性的关系——以贵州纳雍普洒村崩塌为例[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 122 – 129. [PENG Shuangqi, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Relationship between particle size distribution and movement characteristics of rock avalanche deposits: A case study of the Pusa Village rock avalanche in Nayong of Guizhou[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(4): 122 – 129. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王玉峰, 程谦恭, 朱圻. 汶川地震触发高速远程滑坡-碎屑流堆积反粒序特征及机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1089 – 1106. [WANG Yufeng, CHENG Qiangong, ZHU Qi. Inverse grading analysis of deposit from rock avalanches triggered by Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(6): 1089 – 1106. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 石北啸. 滑坡型堰塞坝典型特征分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2020, 3(4): 1 – 8. [SHI Beixiao. Analysis on the typical characteristics of barrier dam[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2020, 3(4): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 郝明辉, 许强, 杨兴国, 等. 高速滑坡-碎屑流颗粒反序试验及其成因机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 472 – 479. [HAO Minghui, XU Qiang, YANG Xingguo, et al. Physical modeling tests on inverse grading of particles in high speed landslide debris[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(3): 472 – 479. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 郑光, 许强, 彭双麒. 滑坡-碎屑流的堆积特征及机理分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27(4): 842 – 852. [ZHENG Guang, XU Qiang, PENG Shuangqi. Mechanism analysis of the accumulation characteristics of rock avalanche[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(4): 842 – 852. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 杨阳, 曹叔尤. 堰塞坝漫顶溃决与演变水槽试验指标初探[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(2): 1 – 7. [YANG Yang, CAO Shuyou. Preliminary study on similarity criteria of the flume experiment on the breach process of the landslide dams by overtopping[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(2): 1 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 刘定竺, 崔鹏, 蒋德旺. 堰塞坝溃口展宽过程实验研究[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(6): 19 – 26. [LIU Dingzhu, CUI Peng, JIANG Dewang. Experimental study on breach broadening process of landslide dam[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(6): 19 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 吴良骥. 无粘性土管涌临界坡降的计算[J]. 水利水电科学, 1980, 4(1): 90 – 95. [WU Liangji. Computation of the critical hydraulic gradient for piping of non-cohesive soil[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 1980, 4(1): 90 – 95. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华
实习编辑: 刘真真