

DOI: 10.11779/CJGE20220887

旱涝急转下斜墙坝险情孕育及灾变过程离心模型试验研究

叶伟¹, 马福恒^{1,3}, 胡江^{*1}, 李子阳¹, 顾行文²

(1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏南京 210029; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024; 3. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要:长历时、高强度干旱后遭遇极端暴雨诱发旱涝急转工况,为探究旱涝急转工况对上游黏土防渗体土石坝的致灾机理,首先基于土样试验,研究了影响黏土干缩裂缝扩展的关键因素,分析了干缩裂缝萌生、扩展演化过程;随后通过离心模型试验,明晰了旱涝急转下黏土防渗体缺陷产生至诱发工程失事的演进行为。研究结果显示,土体高初始含水率虽能限制干缩裂缝的产生,但也会在裂缝出现后造成土体内部出现高水势梯度,从而加快裂缝发育。离心模型试验中旱涝急转第一阶段的干旱过程使得黏土防渗体土体基质渗透性明显降低,但干旱引起的干缩裂缝减小了黏土防渗体有效渗径,削弱了黏土防渗体防渗性能;第二阶段的极端降雨造成库水位快速增长,导致含裂缝黏土防渗体发生了水力劈裂,裂缝贯穿防渗体使其完全丧失防渗性能。研究成果厘清了黏土斜墙坝材料性能改变-裂缝孕育险情-降雨触发灾变的旱涝急转工况致灾路径。

关键词:旱涝急转; 裂缝演变; 险情孕育; 水力劈裂; 灾变路径

中图分类号: TU411; TV64 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)10-2100-10

作者简介:叶伟(1992—),男,博士,高级工程师,主要从事水工建筑物安全诊断与评估相关工作。E-mail: wye@nhri.cn。

Centrifugal model tests on danger incubation and catastrophic process of inclined wall dams under drought-flood abrupt alternation

YE Wei¹, MA Fuheng^{1,3}, HU Jiang¹, LI Ziyang¹, GU Xingwen²

(1. Dam Safety and Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, China)

Abstract: The extreme rainstorm after long-term and high-intensity drought will lead to the drought-flood abrupt alternation (DFAA). In order to explore the disaster mechanism of the upstream clay impervious earth rock dams under DFAA, based on the soil sample tests, the key factors affecting the expansion of shrinkage cracks are studied, and the initiation, expansion and evolution process of shrinkage cracks at different stages are analyzed. Through the centrifugal model tests, the evolution behaviors from clay impervious body defects to engineering failures under DFAA are clarified. The results show that although the high initial water content of soil can limit the occurrence of dry shrinkage cracks, it will also cause high hydraulic gradient in the soil after the occurrence of cracks, thus accelerating the development of cracks. During the first stage of DFAA, the drought process significantly reduces the permeability of soil matrix, but the shrinkage cracks caused by drought reduce the effective seepage diameter of clay impervious core and weaken its impervious performance. The extreme rainfall at the second stage causes the rapid growth of the reservoir water level, which leads to the hydraulic fracturing of the clay impervious core with cracks. The cracks penetrate the impervious core, making it completely lose its anti-seepage performance. The test results clarify the disaster-causing path of DFAA: from the change of the material performance to the danger of crack incubation to the rainfall triggered disasters.

Key words: drought-flood abrupt alternation; crack evolution; danger incubation; hydraulic fracturing; catastrophic path

0 引言

近年来,中国极端旱涝事件呈加剧态势,流域降

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(Y721008);

国家自然科学基金项目(U2243244)

收稿日期:2022-07-18

水量的年际变化愈加悬殊, 极旱后遭遇集中性强降雨的旱涝急转极端天气更为频繁。2011 年长江中下游地区、2013 年青海省、2022 年 8 月陕甘川渝地区均遭遇前期严重干旱, 后期大范围降雨, 形成旱涝急转险情^[1-3]。目前针对旱涝急转的研究多关注旱涝急转演变规律, 单一地进行成因分析、规律演变及区域风险, 例如分析大气环流、海温异常、水汽输送通量对旱涝急转的影响^[4], 通过旱涝急转指数识别旱涝急转事件及规律分析^[4], 或从流域的角度构建旱涝急转风险评价模型^[5]。少有研究评估旱涝急转对土石坝结构安全带来的风险。旱涝急转工况的特殊性在于干旱与暴雨转变的突发性, 其对土石坝的影响主要体现在两方面, 其一是干旱过程对结构材料的影响, 对于黏土斜墙坝主要体现在防渗黏土受旱开裂; 其二是快速增长的水位带来的外部荷载, 导致工程隐患集中暴露, 诱发工程失事, 形成灾害链放大效应^[6]。历史上, 美国 Stockton 坝和 Wister 坝因土体干缩龟裂诱发管涌导致垮塌^[7]; 20 世纪 90 年代, 山东峡山水库经历久旱低水位运行后, 库区土体出现大范围干缩裂缝, 蓄水过程中库区涌现出大量气泡, 坝后出现严重渗漏险情^[8]; 2016 年河北黄壁庄水库因库区土体裂缝, 在库水位上升之后出现水面“冒泡翻滚”现象^[9]。

干缩裂缝的出现改变了土体渗透性, 裂缝成为水流入渗的优先通道, 针对该问题, 蔡武军等^[10]将裂隙作为高渗透性的多孔介质材料, 建立了含单一裂隙压实黏土层的饱和/非饱和渗流模型, 分析裂隙参数对水分击穿时间和稳定渗漏量的影响; 当水流进入裂隙后, 将从裂隙向两侧土体入渗, 此时入渗能力由土体基质与裂隙渗透性共同控制, 侯晓萍等^[11]结合“空气单元”的概念, 模拟水流沿裂隙优先入渗的现象, 分析裂隙流主导的渗流与基质流主导的渗流过程的转变。当土体含水率增大时裂隙会出现愈合, Greve 等^[12]发现土体裂隙即使在地表闭合后仍能保持优先流动的路径。渗流过程中土骨架变形导致的土体渗透性改变, 变形相对较小, 不会引起土体断裂, 然而当土体已存在裂隙时, 渗流作用可能会导致水力劈裂的发生。目前研究主要针对黏土心墙的水力劈裂, 旱涝急转工况下黏土铺盖、斜墙等同样具备了触发水力劈裂的必要条件, 低渗透性、含有裂隙、快速增长的水位, 此时是否存在发生水力劈裂的可能并造成裂缝进一步扩展而引起渗透破坏, 未见相关研究。

为掌握旱涝急转对斜墙坝的致灾作用机理, 提高应对旱涝急转的应急处置能力, 针对上述问题, 通过土样试验分析黏土干缩变形及演化特性, 采用离心模型试验模拟旱涝急转工况, 研究旱涝急转中的极端干

旱过程对防渗黏土造成的损伤, 探究黏土斜墙坝渗流性态演变, 揭示黏土防渗体隐患缺陷产生至诱发工程失事的灾变过程, 从中挖掘工程灾变路径。

1 试验材料

2014 年, 中国淮河流域遭遇 63 a 来最严重的夏旱, 白龟山、昭平台等多座水库接近或低于死水位运行, 导致大坝黏土斜墙和铺盖出现大范围干缩裂缝。2014 年 7 月 17 日, 白龟山水库上游未砌石的斜墙坝坡开始出现裂缝(图 1(a)), 临时采用塑料膜覆盖防护。2014 年 7 月 27 日, 黏土斜墙坝坡部位的裂缝最大宽度达到 30 mm(图 1(b)), 长度约为 3.0 m, 在裂缝最宽处进行人工开挖测量, 最大裂缝深度超过 1.0 m。

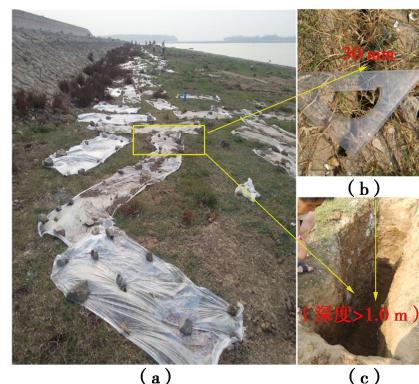


图 1 干缩裂缝测量

Fig. 1 Measurement of shrinkage cracks

本次试验中所用黏土取自白龟山水库坝坡, 原状土干重度约 16.0 kN/m³, 黏土、砂土材料参数分别见表 1, 根据《土工试验方法标准: GB/T 50123—2019》测定试验黏土颗粒曲线如图 2 所示。

表 1 黏土基本参数

Table 1 Basic parameters of clay

黏土	土粒相对质量密度 G_s	最大干密度 $\rho_{dmax}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	制样干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	饱和含水率/%
	2.73	1.72	1.60	35.9
砂土	土粒相对质量密度 G_s	最大干密度 $\rho_{dmax}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	内摩擦角 /($^{\circ}$)	压缩模量 /MPa
	2.698	1.77	38.9	37.5

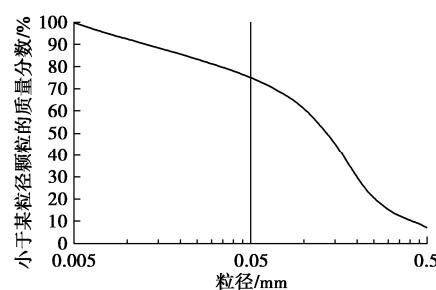


图 2 黏土颗粒曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of clay

2 黏土干缩特性

由于旱涝急转工况下前期极端干旱导致的土体干缩裂缝对土体工程性质有着重要影响,本次开展旱涝急转试验前,先针对土体干缩特性进行分析。

2.1 土体收缩曲线

根据《土工试验方法标准: GB/T 50123—2019》测定试验黏土密度 1.60 g/cm^3 时收缩曲线如图3所示。根据收缩曲线可以看出黏土干燥收缩过程分3个阶段。第一阶段为加速收缩阶段(图3中阶段I),其次为线性收缩阶段(图3中阶段II),这两个阶段的分界点约为塑限含水率15.8%。此后,在连续干燥过程中,可以清楚地看到零收缩阶段(图3中阶段III)。阶段II与阶段III之间的含水率可定义为收缩极限。

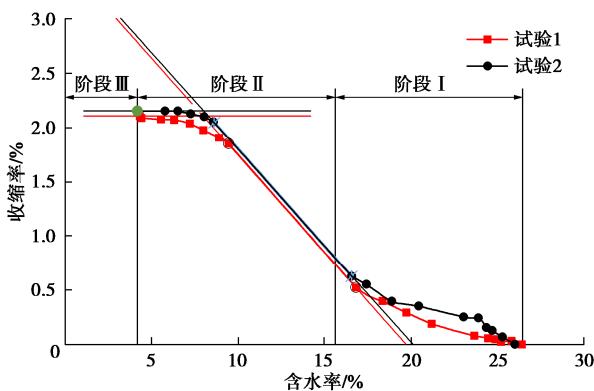


图3 土体收缩曲线

Fig. 3 Shrinkage characteristic curves of soil

表2 试验土样基本参数
Table 2 Basic parameters of test soil samples

序号	填筑密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	含水率/%	土层厚度/cm	孔隙比
S1	1.60	10	15	0.71
S2	1.60	20	15	0.71
S3	1.70	10	15	0.61

2.2 干缩裂缝扩展试验

为分析影响土体干缩裂缝演变的主要影响因素,试验制备了不同填筑密度和初始含水率的3个重塑土样(表2中S1、S2和S3)。将黏土填入直径为15 cm的玻璃模型中,压实至不同密度,放置在烘灯下(图4(a)),在夏季温度($40\pm1^\circ\text{C}$,相对湿度的50%±5%)下模拟干燥过程。在试样上方安装一台数码相机,用于监测裂缝扩展,通过图像处理技术定量确定裂缝几何参数(如图4(c))。试样放置于电子秤上,用于观察试验过程中土样重量变化。干燥开始阶段,每隔10 min记录一次土体表面的图像。当连续6次记录的图像中裂缝无明显变化时,认为干燥过程接近尾声,将观测时间间隔调整为每隔50 min记录一次。当样品

重量稳定时,即干燥过程完成。

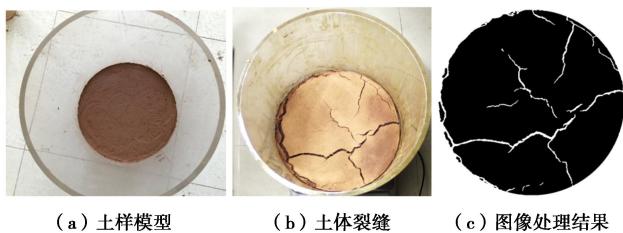


图4 干缩裂缝扩展模拟与分析

Fig. 4 Simulation and analysis of shrinkage crack propagation

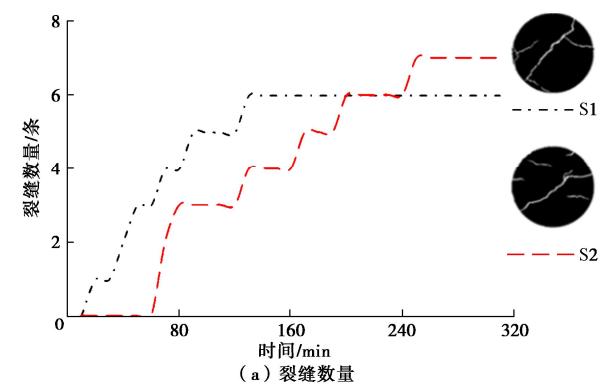
2.3 干缩裂缝演变分析

压实黏土受旱后裂缝的出现具有随机性,裂缝通常发生在表面缺陷处,在这些缺陷处会发生收缩变形和应力集中。在承受拉应力的土体单元中,开裂前的应变能累积可表示为^[13]

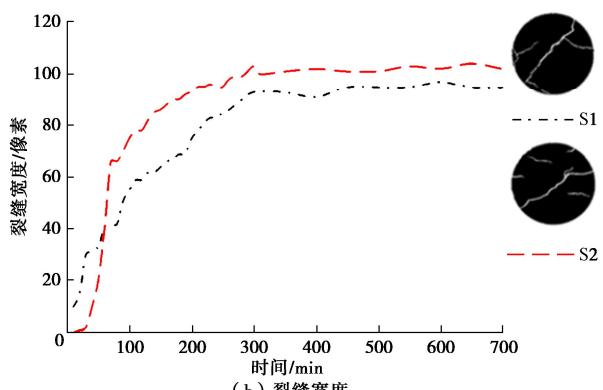
$$E_p = \frac{1.299\sigma^2 S^2 t}{E} \quad . \quad (1)$$

式中: E_p 为应变能; σ 为拉应力; S 为孔径; t 为土层厚度; E 为杨氏模量。

可以看出,应变能与孔隙大小呈正比,若填筑密度足够大,压实土体内部缺陷孔隙很小,在受旱过程中缺陷部位应变能较小,土体不易出现裂缝。本次3组试验中,S3在整个试验过程中没有出现开裂,可以认为,在填筑密度接近最大干密度的土体很难产生裂缝。其余两组试件S1、S2裂缝数量、裂缝宽度变化情况如图5所示。



(a) 裂缝数量



(b) 裂缝宽度

图5 干燥过程裂缝数量、裂缝宽度变化

Fig. 5 Change of crack numbers and width

对比 S1 与 S2 可以看出, 含水率较小的 S1 试样裂缝出现速率大于 S2 试样, 主要原因在于含水率较大的 S2 较长一段时间处于干燥脱水阶段 I (图 3), 需含水率降低至塑限含水率才有裂缝出现。由于两组试样填筑密度相同, 裂缝最终的发育条数基本一致。对于同一填筑密度不同初始含水率的两组试样, 含水率较低的 S1 试样裂缝宽度增长速率低于含水率较高的 S2, 但最终最大裂缝宽度相接近。

随着土体含水率不断减小, 裂缝宽度增长速率也不断降低。根据文献中的研究^[14], 影响裂缝发育的关键因素并非土体含水率, 而是水势梯度, 脱湿速率的空间分布以及土体渗透特性则是决定水势梯度大小的关键因素。由于土体渗透性小, 土体在短时间内难以将水势梯度自我平衡, 最终表现为脱失速率越大, 土体渗透系数越小, 水势梯度越大。而水势梯度越大, 导致裂缝出现之后的裂缝发育速度较快。

总体而言, 填筑密度和初始含水率对压实黏土试件的收缩性能有明显的控制作用。含水率控制裂缝发育速度, 填筑密度决定裂缝的最终发育状态。初始含水率越大的土体裂缝出现得越晚, 但出现裂缝后, 含水率越大的土体裂缝发育速度越快。后续模型试验中, 考虑增大土体初始含水率, 促使模型在受旱阶段裂缝发育尽快稳定。

3 离心模型试验

3.1 相似性分析

无论是常应力小比尺模型试验、足尺试验还是离心模型试验, 都需要明确原型的物理、力学作用过程, 针对研究重点控制其变化条件, 忽略对研究内容影响较小的因素, 突出研究中的主要矛盾。对旱涝急转离心模型试验的相似准则进行分析, 应首先考察旱涝过程离心模型试验的基本影响因素及试验过程各研究对象的物理、力学过程。根据文献[15], 离心模型试验中原型与模型各物理量的相似关系如表 3 所示。

表 3 离心试验相似比 (原型/模型)

Table 3 Similarities of centrifugal tests (model / prototype)

物理量	相似比	物理量	相似比
加速度	$1/N$	尺寸	N
质量	N^3	应力	1
应变	1	流速	N
时间	N^2	密度	1
位移	N	重度	N

3.2 试验模型填筑

试验采用南京水利科学研究院 100 g·t 土工离心机, 离心机有效半径 2.24 m, 加速度在 5~200g±

0.5%F·S, 有效载重为 300 kg, 挂篮空间为 0.9 m×0.8 m×0.8 m。试验所用模型箱尺寸为 950 mm×450 mm×300 mm。

试验模型以白龟山水库大坝为原型, 模型相似比为 1:100, 试验模型底部为砂土模拟的透水层, 上部结构为黏土铺盖及斜墙, 斜墙后为砂土模拟的透水体。根据《碾压式土石坝设计规范: SL 274—2020》中的要求, 铺盖的厚度自上游向下游逐渐加厚, 一般以 0.1 倍水头考虑, 最小不低于 1 m, 本次离心试验中模拟最大水头为 26 m (对应校核洪水位), 相应铺盖厚度为 2.6 m, 换算至试验中仅为 2.6 cm, 由于试验目的在于研究裂缝对渗流的影响, 为反映干缩裂缝在渗流过程中变化情况, 刚形成的裂缝不能贯穿铺盖, 对其进行加厚处理。黏土斜墙延续至模型坝顶, 坎顶处斜墙厚度为 5 cm。模型底部透水层厚度为 50 mm, 铺盖段长度为 280 mm, 厚度为 80 mm, 斜墙外坡比为 1:2, 底端厚度与铺盖相同, 斜墙内坡比为 1:2.2, 顶端厚度为 50 mm。模型内部共埋设孔隙水压力传感器 14 只 ($P_1 \sim P_{14}$), 沿模型上下游方向分两排布置, 在同一剖面上底部透水层有 2 只, 分别位于铺盖中部与斜墙底部; 铺盖层中有 3 只, 分别位于前端、中部与后端; 斜墙内有 2 只, 均贴近黏土-砂土接触面。模型尺寸及传感器埋设位置如图 6 所示。

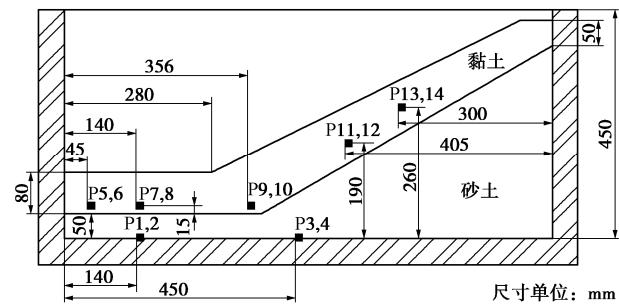


图 6 模型尺寸及传感器埋设

Fig. 6 Model sizes and embedding position of sensors

3.3 试验工况及试验过程

试验主要研究旱涝急转工况下黏土防渗体 (斜墙及铺盖) 裂缝变化及内部渗流情况。试验各阶段分区如图 7 所示, 具体试验过程如下:

(1) 初期蓄水阶段: 该阶段旨在使土体在 Ng 加速度下压实, 并形成稳定渗流场。为防止加水过程中水流对模型表面的冲刷, 在模型表面铺一层土工布, 在 $1g$ 条件下将水位升至预定水位线处, 然后将离心机加速度从 $1g$ 升至 $100g$ 。模拟原型渗流时长为 1.5 a, 计算模型试验时间为 1.5 h。

(2) 干旱过程: 该阶段旨在使模型表面形成裂缝 (裂缝深度难以控制, 该过程只需满足形成的裂缝不

贯穿防渗体)。停机将模型箱内的水排出,在模型箱顶部采用光照加热模型土体进行干燥。光照温度通过距离来控制,据实测,当光源距离模型顶部 12 cm 时,土体表面温度稳定在 40°C 左右。该过程试验模拟时间为 0.5 h, 实际相当于原型中的 208 d, 忽略加速与减速过程, 可认为模拟时间为半年左右。试验结束后停机, 人工量测裂缝宽度与长度。

(3) 旱涝急转过程: 该阶段旨在分析裂缝存在时模型内部渗流情况。在 1g 条件下将水位升至预定水位线处(模型水深 260 mm)然后将离心机加速度从 1g 升至 100g。模拟原型总渗流时长为 1 a, 计算模型试验时间约为 1 h。

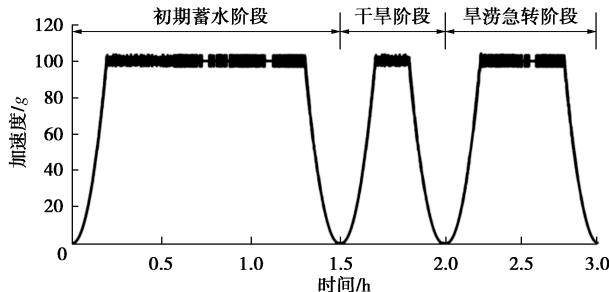


图 7 试验加速阶段时长

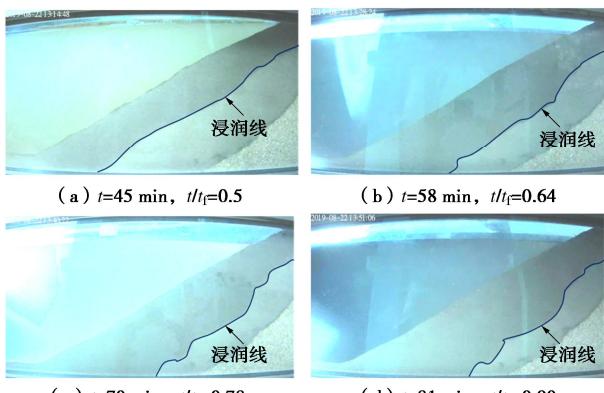
Fig. 7 Test procedure and acceleration during tests

4 结果与讨论

4.1 试验现象

(1) 初期蓄水阶段

初期蓄水阶段结束后认为底部砂土与顶部黏土均已压缩变形。从图 8 可以看出模型浸润线距离斜墙表面深度较浅, 且保持稳定, 表明斜墙防渗性能较好。



注: t 为稳定加速时长; t_f 为稳定加速总时长

图 8 初次蓄水浸润线

Fig. 8 Infiltration line at initial impoundment

(2) 受旱阶段

图 9 为模型受旱后的形态。在铺盖与斜墙连接部位, 由于土体收缩不均匀(铺盖层土体在水平方向收

缩, 整体收缩量约为 4.5 mm, 占铺盖长度的 1.6%, 斜墙段土体受斜坡土压力影响, 收缩量小于铺盖段, 仅为 2 mm, 占斜墙长度的 0.3%), 连接部位出现横向裂缝, 该现象在 1:28 水槽模型试验中同样出现^[16]。实际上, 产生如图 9 所示裂缝时土体含水率并非很低, 持续的干燥过程还会使得裂缝拓宽。因裂缝宽度扩展过程中深度也在发育, 而试验中裂缝深度难以定量控制, 在裂缝最大宽度达到 3 mm 左右时停止受旱过程。与裂缝 1 垂直的方向上土体宽度约 54.3 cm, 土体收缩率为 0.55%, 根据土体收缩曲线, 对应土体含水率为 12.8%, 沿模型深度方向, 土体含水率将增大。一般实际工程中斜墙上部设有保护措施, 干缩裂缝的发育会受到限制, 本次试验中斜墙裸露于外, 裂缝发展不受限制, 但试验中发现斜墙上部裂缝最大宽度约为 1 mm, 小于铺盖裂缝宽度。

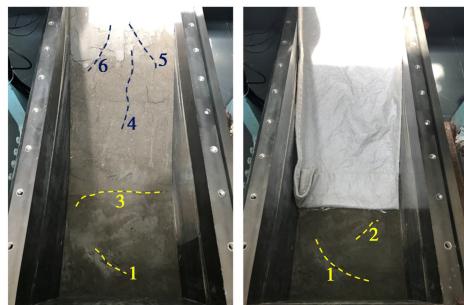


图 9 受旱后裂缝生成

Fig. 9 Crack formation after drought

(3) 旱涝急转阶段

从图 10 可以看出, 旱涝急转工况后坝坡面裂缝基本愈合(坝坡上部处于水位之上, 裂缝未发生变化), 而铺盖上的裂缝依旧存在。在渗流初期高水头作用下, 土体为非饱和, 外部的水压作用由内部孔压和土骨架共同承担, 坝坡土体受到垂直于模型底部的水压力作用, 导致坝坡裂缝闭合。铺盖由于平行于模型底面, 受到水压作用使土体垂直底面变形, 表面裂缝宽度不会因此而减小, 从图 10 可以看出, 铺盖上的裂缝表面形态未出现太大变化。若铺盖裂缝严格垂直于底面发育, 则在高水位作用下裂缝沿深度方向的各断面宽度不会因土体变形而减小, 但实际过程中裂缝是曲折发育的, 裂缝受土体重力挤压出现不同程度的愈合。此外, 当土体含水率增大, 土体裂缝会部分愈合, 湿化愈合存在黏土颗粒水化膨胀作用和裂缝边缘崩塌填充作用两种机制^[17]。

从图 11 可以看出, 存在裂缝的旱涝急转过程中斜墙浸润线不断抬高。裂缝的存在严重削弱了黏土体的防渗性, 试验进行 2 min 时浸润线已超过初期蓄水阶段的稳定状态, 2~7 min 时浸润线与过渡面的交点位

置有所抬高, 但坝后透水体内水位较低, 7~15 min 过程上游水流已流入坝后透水体, 在 26 min 时上游水位与透水体中的水位已齐平, 表明黏土防渗体已完全丧失防渗性能。

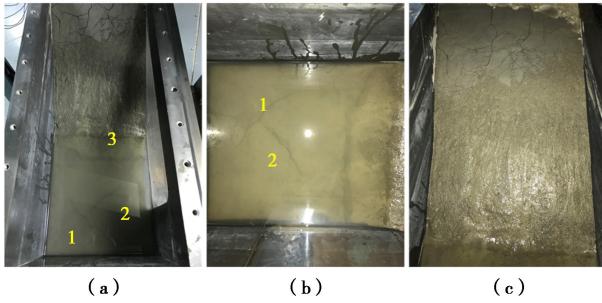


图 10 旱涝急转后模型形态

Fig. 10 Model shape after drought-flood abrupt alternation

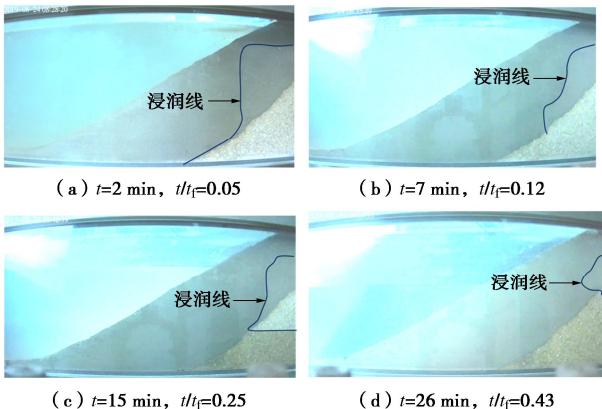


图 11 旱涝急转过程浸润线变化

Fig. 11 Change of infiltration line

4.2 裂缝相似比讨论

本次离心试验中涉及到裂缝参数, 裂缝是否出现取决于土层表面收缩应力与抗拉强度的大小关系, 发育深度是否增大取决于土体中某一深度的收缩应力与抗拉强度的大小关系^[18], 这两个量的相似比为 1, 因此判断土体是否出现裂缝时, 模型与原型中的判别标准一致。出现裂缝之后, 根据文献中对裂缝发育过程的分析^[19], 裂缝宽度扩展表现为裂缝两侧土体位移量的变化, 根据表 3 所示, 位移的相似比为 N , 若认为裂缝宽度变化等于土体位移, 则裂缝宽度的相似比为 N 。裂缝深度为不均匀变形土层的深度, 相似比为 N 。

根据受旱阶段试验结果(图 9)可以看出, 模型产生裂缝条数较少, 尤其铺盖部位只存在两条裂缝, 而实际工程中黏土体表面常常会出现龟裂纹, 每一条裂缝在深度方向上发展后会将完整的土体分割成单独的块体。由于干缩裂缝宽度变化源于土体收缩, 如图 12 所示, 裂缝①、裂缝②地表宽度取决于土块 I、II 和 III 的水平向收缩量。以模型中铺盖层裂缝 1 为例,

考虑单侧土体的收缩, 收缩方向垂直于裂缝发育方向, 裂缝一侧土体原始宽度与收缩量分别为 L 与 l , 裂缝宽度为 l , 根据相似比 N , 对应到实际工程土体宽度与收缩量为 NL 与 Nl , 实际裂缝宽度为 Nl 。表明裂缝发展至宽度 Nl 需要一侧完整土体的宽度达到 NL 。然而实际工程中, 很难出现大范围完整土体, 按本次试验尺寸对应实际情况下, 完整土体尺寸需达到 15 m, 在现场调查中并未发现。实际上, 大范围完整土块被分割成小土块, 因此模型与原型相似比需要考虑原型中裂缝一侧完整土体的宽度, 可以理解为一定范围内裂缝的条数, 相似比可表示为

$$\frac{l_p}{l_m} = \frac{N}{a} \quad (2)$$

式中: l_p 为原型中裂缝宽度; l_m 为模型中裂缝宽度; a 为宽度为 NL 土体上出现裂缝的条数。 a 的取值根据实际情况决定。

根据图 1 反映的情况, 白龟山水库现场实际铺盖层 30 m 范围内裂缝条数为 12~16 条, 对应相似比为 6.25~8.33, 试验中裂缝宽度为 2.7~3.3 mm, 模拟实际裂缝宽度为 1.69~2.75 cm, 与实际工程中裂缝宽度较为接近, 略小于实际测量值 3 cm, 误差约为 8.3%, 主要原因在于试验中为防止裂缝贯穿防渗层, 裂缝尚未发育至极限值便停止受旱过程。

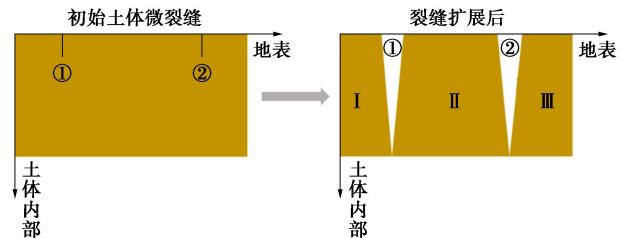


图 12 土体干缩过程简图

Fig. 12 Sketch of shrinkage process of soil

4.3 孔隙水压力分析

(1) 初期蓄水阶段

初期蓄水阶段, 从图 13(a)可以看出, 加速度增至 100g 后砂层中的孔压呈现逐渐增大的趋势, 从数值上看, 直至试验结束最大孔压不超过 10 kPa, 与试验水头相比可以忽略不计, 表明防渗体防渗性能较好。从砂层孔压增长曲线可以看出, 试验中期曲线斜率在不断减小, 而试验后期曲线近似直线增长(斜率趋于稳定)。由于模型试验过程中不排水, 随着试验进行, 砂层中水位会不断抬高, 曲线斜率的减小表明渗漏量越来越少, 曲线斜率不变表明渗漏量稳定, 因此从砂层孔压变化曲线可以初步看出模型整体渗流过程趋于稳定。

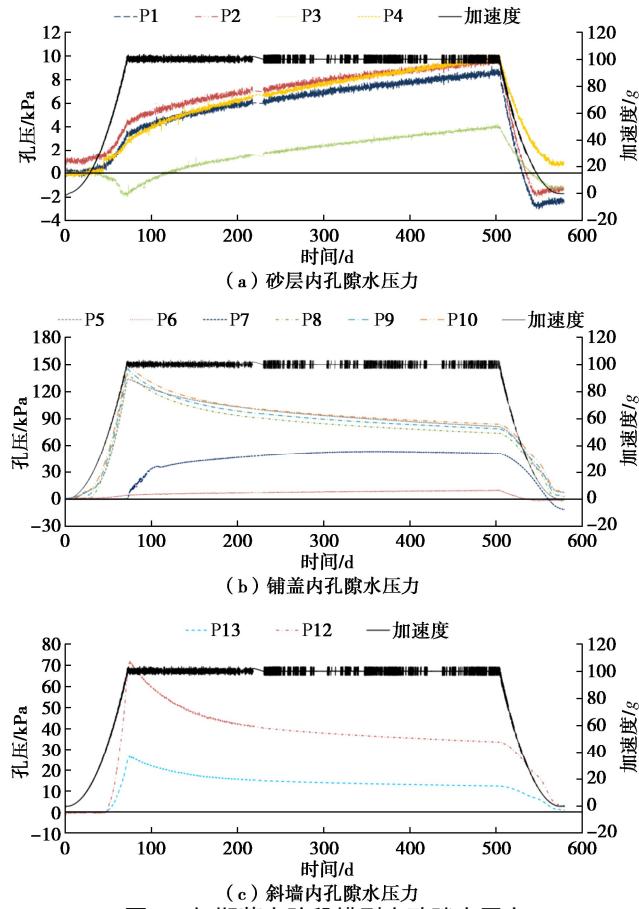


图 13 初期蓄水阶段模型内孔隙水压力

Fig. 13 Pore-water pressures at impoundment stage

从图 13 (b) 可以看出, 随后加速度稳定过程中铺盖内孔压在不断减小, 该现象的出现一方面是由于模型中试验水量一定, 在试验过程中水流不断渗入土体, 使得土体含水率增大, 导致模型库区的总水量减小, 水位相应地降低; 另一方面在于黏土体防渗性能好, 瞬时加压过程土体为不排水固结, 加速度增大后土颗粒受挤压产生超静孔压, 该部分超静孔压随着试验的进行逐渐消散。试验过程中, 前期水位下降速度快, 模型库区损失水量较大, 并且超静孔压消散速率快, 后期失水速率降低且趋于稳定, 表明模型内渗流过程逐渐稳定, 孔隙水压力值基本恒定在 80 kPa。

斜墙中部与上部各有一只传感器因连接问题未采集数据, 因此图中两个部位均只有一条曲线。图 13 (c) 显示斜墙内孔压变化与铺盖类似, 加速度达到 100g 时孔压最大, 后随着库水量的流失, 水位降低, 孔压减小且逐渐趋于稳定。斜墙上部孔压小于中部, 符合一般规律。

(2) 受旱阶段

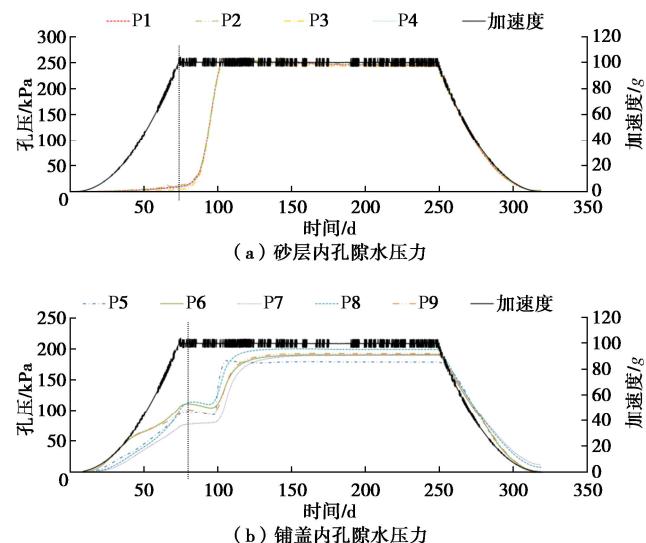
第二阶段的干燥过程没有进行孔压的测量, 该阶段的关注重点在于裂缝的发育情况。经测量铺盖表面发育有 3 条裂缝, 最大裂缝宽度约为 3.3 mm, 长度为 18 cm, 斜墙表面裂缝较为分散, 最大裂缝宽度为 1 mm, 长度为 25 cm。

(3) 旱涝急转阶段

从图 14 (a) 中可以看出, 在旱涝急转阶段, 当加速度刚达到 100g 时, 砂层孔压增长速率较慢, 但约 5 d 后砂层内孔压增长迅速, 孔压值达到静水压力值 (由于该阶段渗漏严重, 最后的坝前水位高出铺盖 12 cm), 表明从此刻开始有大量水进入砂层, 砂层水位抬升速度变快, 可以初步断定裂缝被贯穿, 防渗体丧失防渗性能。该阶段由于砂层中 4 只孔隙水压力传感器埋设高程相同, 变化趋势一致。

图 14 (b) 显示, 加速度达到 100g 后, 铺盖层各处孔压几乎在同一时刻降低(第 80 d, 加速度达到 100g 的 5 d 后), 同时砂层内孔压陡增, 表明大量的水迅速渗入砂层。由于试验前期已进行过一次离心加速过程, 可以排除该阶段由于底部砂土受压变形导致防渗体产生裂缝而渗漏的可能。因此, 孔压陡增的原因在于原先黏土防渗体上的裂缝此刻已贯穿防渗体, 出现水力劈裂。由于模型箱中总水量恒定, 当水流快速涌入砂层后, 水位出现陡降, 表现为铺盖层孔压减小。裂缝贯穿铺盖层后, 砂层孔压迅速增大后, 铺盖层孔压继续在渗流作用下逐渐增大, 但增长速率低于砂层。由于砂层中的水未排出, 所测孔压为静水压力, 当孔压等于上游静水压力时, 意味着模型整体已不存在渗流过程。在砂层孔压等于静水压力之前, 由于铺盖层土体未达到完全饱和, 黏土体内局部区域还存在渗流过程, 铺盖内孔压依旧增大 (如图 15 中竖直直线), 最终达到静水压力的时间滞后于砂层。

图 14 (c) 所示, 旱涝急转过程中斜墙中部由于位势较高, 孔隙水压较小, 孔压变化速率低于铺盖层, 在第 80 d 铺盖孔压下跌后斜墙中部孔压增长速率有少许减缓, 但由于驱动水头相对较小, 孔压增长速率出现明显减慢的时刻延迟至第 90 d。斜墙顶部由于位势更高, 驱动水头更小, 上游水位变化的短暂停时间内该部位孔压基本无变化。



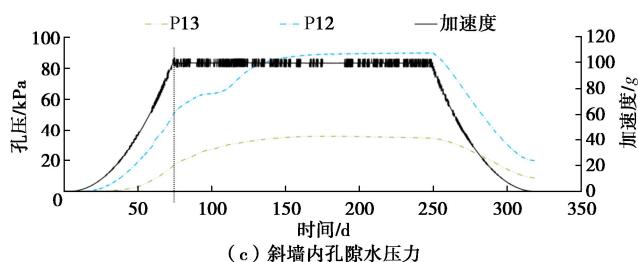


图 14 旱涝急转过程模型内孔压变化

Fig. 14 Change of pore water pressure under drought-flood abrupt alternation

对于黏土铺盖, 干旱前蓄水初期孔压变化曲线斜率约为 1.87, 旱涝急转初期孔压变化曲线斜率约为 1.33, 在水力劈裂出现之前, 干旱后孔压增长速率低于干旱前, 在不出现水力劈裂的情况下干旱过程使黏土防渗体防渗性能提高。然而从试验中观察到的浸润线位置可以看出, 干缩裂缝导致防渗体有效渗径减小, 削弱了防渗体防渗性能。因此可以认为, 当干旱后未产生裂缝的情况下黏土防渗体防渗性能提高, 而当出现裂缝后防渗性能会被削弱。

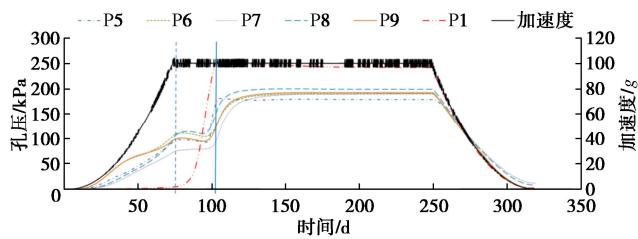


图 15 铺盖层与砂层同一时刻孔压变化

Fig. 15 Change of pore water pressure in blanket and permeable layer

4.4 旱涝急转工况致灾路径

基于试验结果, 从旱涝急转下斜墙坝黏土防渗材料结构性态变化出发, 分析旱涝急转下黏土斜墙坝险情孕育过程, 进一步探讨灾变演化情况, 从而明晰旱涝急转工况的致灾路径。

(1) 黏土材料结构性态

受旱过程中土体逐渐变为非饱和状态, 空气不断取代大孔隙中的水, 使孔隙流槽的过水断面减小, 并增加了流程的弯曲度。大孔隙中水的吸力较低, 易于在干燥时排空, 由于土的渗透系数主要取决于其大孔隙流槽, 大孔隙进气后使得流程中断, 渗透性降低。对于黏土体, 由于自身黏聚力的存在, 颗粒之间会存在拉力, 当毛细管因水体的排出而变形时, 颗粒之间的相对位置会产生变化, 此时部分颗粒之间的黏聚力无法保持颗粒稳定, 颗粒沿着毛细孔隙断开, 宏观上表现为土体出现裂缝, 而除去裂缝部位的土体由于土颗粒的收缩, 孔隙变小, 渗透性降低。

(2) 险情孕育过程

旱涝急转阶段的前期干旱过程导致黏土防渗体产生裂缝, 且根据前述土样受旱试验分析, 初始含水率越大, 干缩裂缝出现的时间越晚, 但裂缝出现后发育速度越快, 相比较未曾蓄水的水库, 库区正常蓄水的大坝, 随着干旱过程中库水位的下降, 裂缝短时间内不易形成, 但当裂缝出现后, 会快速发展成为致灾性裂缝。虽然干旱能降低土体基质的渗透性, 但造成的干缩裂缝成为水流入渗的优先通道, 缩短了防渗体渗径。因此, 综合考虑, 极端干旱削弱了防渗体整体防渗性能, 威胁大坝渗流安全。根据试验结果, 存在裂缝时防渗体结构内浸润线变化速率较快, 且坝后浸润线更高, 易导致渗透破坏险情。

(3) 灾变演化情况

旱涝急转工况的特点在于干旱与降雨转变的突然性以及降雨的高强度, 在工程上体现在突然间快速增长的库水位。试验中, 加速度逐渐增大过程可看做库水位的快速增长。在快速蓄水条件下, 渗流出口处孔隙水压力急剧增加, 尤其是在斜墙底部或干缩裂缝对应的铺盖处, 干缩裂缝成为渗流的“优先通道”, 同时由于干旱后土体基质的极低渗透性, 裂隙区域存在足够大的水力梯度, 出现较强的水楔作用, 水楔会改变裂缝尖端附近的应力强度, 导致土体劈裂。根据试验结果, 在防渗体防渗性能完好的情况下, 砂层孔隙水压力变化应如图 14(a) 所示呈现逐渐增大的趋势, 而在旱涝急转过程中砂层孔隙水压力出现瞬间增大的过程, 表明有大量的水涌入砂层, 出现水力劈裂导致黏土铺盖贯穿, 具有强透水性的地基层会不断将涌来的黏土颗粒送至下游, 易引发下游坝趾出现严重的涌水和沸沙现象。试验过程中由于水量固定, 水力劈裂后上游水头下降, 可以判断, 在试验条件下一条贯穿裂缝后, 其他裂缝不再具备水力劈裂的必要水力学条件, 而实际工程中会存在多条裂缝出现水力劈裂的情况。贯穿缝形成后, 水流会不断冲刷侵蚀, 导致裂缝宽度增大。土颗粒除了经透水层被水流带到下游外, 存在一部分积聚在裂缝底部, 一定程度上对裂缝愈合有贡献, 对比图 9, 10 能明显看到表层裂缝侵蚀, 缝内却被充填的现象。然而, 土颗粒自然堆积的土体强度低、渗透性大, 对干缩裂缝缺陷修复的作用基本可以忽略, 土体完整性无法再回到产生裂缝之前的状态, 自然愈合的裂缝后仍能保持优先流动的路径, 若不采取工程措施, 裂缝将永久削弱了防渗体防渗性能。

5 结 论

(1) 离心模型试验中, 模型与原型相似比需要考虑原型中裂缝一侧完整土体的宽度, 可以理解为一定

范围内裂缝的条数裂缝宽度。本次试验中考虑裂缝条数后的裂缝宽度推演至原型，结果与现场测量结果基本一致。

(2) 旱涝急转工况致灾特性在材料层面表现在干旱过程导致防渗黏土材料物理性能变化。干旱过程使得土体逐渐变为非饱和状态，防渗黏土土体基质渗透性降低，为后续水力劈裂提供够条件。

(3) 旱涝急转过程中险情孕育体现在干旱阶段干缩裂缝的产生与发展。随着干旱过程中库水位的下降，暴露出的防渗黏土含水率高，裂缝短时间内不易形成，但当裂缝出现后，受高水势梯度影响会快速成为致灾性裂缝。裂缝不仅导致防渗体有效渗径减小，使得蓄水过程中浸润线接近透水层，严重削弱防渗体防渗性能，而且是水力劈裂发生的必要条件。

(4) 旱涝急转下灾变演化表现在受裂缝两侧土体基质极低渗透性及快速增长的水压力作用影响，干缩裂缝尖端形成高孔隙水压力导致防渗体水力劈裂，使得防渗体防渗性能完全丧失，并在水流冲刷侵蚀作用下，出现渗透破坏。

(5) 研究成果可为旱涝急转工况下斜墙坝安全运行及应急处置提供支持。根据黏土干缩特性，在干旱初期未产生裂缝前可通过洒水提高防渗体土体含水率，而当裂缝出现后应降低裂缝处土体水分蒸发速率，可通过覆盖塑料薄膜进行防护。当处于上游黏土防渗体中的裂缝进一步发育后，应及时采取开挖回填、灌浆、埋设土工膜等措施，避免渗透破坏。

参考文献：

- [1] 沈柏竹, 张世轩, 杨涵洧, 等. 2011年春夏季长江中下游地区旱涝急转特征分析[J]. 物理学报, 2012, **61**(10): 530-540. (SHEN Bozhu, ZHANG Shixuan, YANG Hanwei, et al. Analysis of characteristics of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in spring and summer in 2011[J]. Acta Physica Sinica, 2012, **61**(10): 530-540. (in Chinese))
- [2] 时兴合, 郭卫东, 李万志, 等. 2013年青海北部春季旱涝急转的特征及其成因分析[J]. 冰川冻土, 2015, **37**(2): 376-386. (SHI Xinghe, GUO Weidong, LI Wanzhi, et al. The sudden turn of drought and flood in spring in northern Qinghai Province, 2013: characteristics and cause of formation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, **37**(2): 376-386. (in Chinese))
- [3] 张云帆, 翟丽妮, 林沛榕, 等. 长江中下游典型流域旱涝与旱涝/涝旱急转演变规律及其驱动因子研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, **54**(10): 887-897, 933. (ZHANG Yunfan, ZHAO Lini, LIN Peirong, et al. Variation characteristics and driving factors of drought and flood and their abrupt alternations in a typical basin in the middle reaches of Yangtze River[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, **54**(10): 887-897, 933. (in Chinese))
- [4] 赵东升, 张家诚, 邓思琪, 等. 1960—2018年中国西南地区旱涝急转的时空变化特征[J]. 地理科学, 2021, **41**(12): 2222-2231. (ZHAO D S, ZHANG J C, DENG S Q, et al. Spatio-temporal characteristics of drought-flood abrupt alternation in the southwest China from 1960 to 2018[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, **41**(12): 2222-2231. (in Chinese))
- [5] 毕吴瑕, 翁白莎, 王旭, 等. 基于知识图谱的旱涝急转研究进展[J]. 水资源保护, 2021, **37**(6): 40-48, 120. (BI Wuxia, WENG Baisha, WANG Xu, et al. Research progress of drought-flood abrupt alternation based on knowledge graph[J]. Water Resources Protection, 2021, **37**(6): 40-48, 120. (in Chinese))
- [6] YE W, MA F H, HU J, et al. Seepage behavior of an inclined wall earth ram under fluctuating drought and flood conditions[J]. Geofluids, 2018: 1-11.
- [7] SHERARD J L. Embankment Dam Cracking in Embankment-Dam Engineering (Casagrande Volume)[M]. New York: John Wiley & Sons, 1973: 271-353.
- [8] 杨正华, 刘嘉忻. 峡山水库大坝渗流安全评价[J]. 水利水电科技进展, 2007, **27**(2): 40-44. (YANG Zhenghua, LIU Jiaxin. Seepage stability evaluation for dam of Xiashan Reservoir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, **27**(2): 40-44. (in Chinese))
- [9] 赵兰浩, 管策, 张海容, 等. 坝前冒泡现象的水气两相运动机理数值模拟[J]. 水科学进展, 2020, **31**(1): 91-101. (ZHAO Lanhao, GUAN Ce, ZHANG Hairong, et al. Numerical simulation of water-gas two-phase movement mechanism of bubbling phenomenon in front of dam[J]. Advances in Water Science, 2020, **31**(1): 91-101. (in Chinese))
- [10] 蔡武军, 凌道盛, 徐泽龙, 等. 单一裂隙优势渗流对黏土层防渗性能的影响分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(10): 2838-2844, 2887. (CAI Wujun, LING Daosheng, XU Zelong, et al. Influence of preferential flow induced by a single crack on anti-seepage performance of clay barrier[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(10): 2838-2844, 2887. (in Chinese))
- [11] 侯晓萍, 樊恒辉. 基于 COMSOL Multiphysics 的非饱和裂隙土降雨入渗特性研究[J]. 岩土力学, 2022, **43**(2):

- 563-572. (HOU Xiaoping, FAN Hengui. Study on rainfall infiltration characteristics of unsaturated fractured soil based on COMSOL Multiphysics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(2): 563-572. (in Chinese))
- [12] GREVE A K, ANDERSEN M S, ACWORTH R I. Monitoring the transition from preferential to matrix flow in cracking clay soil through changes in electrical anisotropy[J]. Geoderma, 2012, **179-180**: 46-52.
- [13] COSTA S, KODIKARA J, SHANNON B. Salient factors controlling desiccation cracking of clay in laboratory experiments[J]. Géotechnique, 2013, **63**(1): 18-29.
- [14] 张家俊, 龚壁卫, 胡波, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(9): 2729-2734. (ZHANG Jiajun, GONG Biwei, HU Bo, et al. Study of evolution law of fissures of expansive clay under wetting and drying cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(9): 2729-2734. (in Chinese))
- [15] 蔡正银, 陈皓, 黄英豪, 等. 考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(11): 1977-1982. (CAI Zhengyin, CHEN Hao, HUANG Yinghao, et al. Failure mechanism of canal slopes of expansive soils
- considering action of wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(11): 1977-1982. (in Chinese))
- [16] 叶伟, 马福恒, 胡江, 等. 旱涝急转下斜墙坝渗流特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(10): 1923-1929. (YE Wei, MA Fuheng, HU Jiang, et al. Seepage behaviors of inclined wall dams under drought-flood abrupt alternation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(10): 1923-1929. (in Chinese))
- [17] 刘俊东, 唐朝生, 曾浩, 等. 干湿循环条件下黏性土干缩裂隙演化特征[J]. 岩土力学, 2021, **42**(10): 2763-2772. (LIU Jundong, TANG Chaosheng, ZENG Hao, et al. Evolution of desiccation cracking behavior of clays under drying-wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(10): 2763-2772. (in Chinese))
- [18] WANG J J, HUANG S Y. Limit of crack depth in KIC, testing for a clay[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, **164**: 19-23.
- [19] TOLLENAAR R N, VAN P L A, JOMMI C. Observations on the desiccation and cracking of clay layers[J]. Engineering Geology, 2017, **230**: 23-31.

第十一届软土地基地下工程岩土问题国际研讨会通知

第十一届软土地基地下工程岩土问题国际研讨会 (IS-Macau 2024) 将于 2024 年 6 月 14~17 日（周五至周一）在中国澳门特别行政区举行。本次会议由澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室 (IoTSC)、土木与环境工程系与国际土力学与岩土工程学会 (ISSMGE) TC204 共同举办。大会主席为澳门大学周万欢教授、东南大学徐涛副教授；副主席为剑桥大学 Giulia Viggiani 教授；秘书为澳门大学管铮博士。研讨会的主题为“智慧城市隧道与地下空间建设”，具体包括：软土基

本性质；本构与数值模型；软土地基处理新技术；大数据、人工智能和机器学习在隧道和地下工程中的应用；地下基础设施韧性与可持续发展；隧道与地下施工智能监测与可视化技术；观测法在地下工程中的应用；现场案例研究。

大会组委会诚邀业界专家学者、工程技术人员、管理人员和企业代表等拨冗莅临，共襄盛会！

会议网站：<https://is-macau2024.skliotsc.um.edu.mo>

咨询邮箱：ismacau2024@um.edu.mo

（会议组委会）