

DOI: 10.11779/CJGE20230034

泸定水电站坝基覆盖层深部潜蚀对土骨架变形影响评价试验研究

金伟^{1,2}, 邱子源², 张丹^{1,2}, 向雷², 杨林骏³, 罗玉龙^{*2}

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024;
3. 河海大学大禹学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 泸定水电站因坝基覆盖层深部①层潜蚀诱发涌水险情, 潜蚀过程中大量细颗粒持续流失能否诱发明显土骨架变形关系到电站自身、下游梯级电站及泸定县城的安全。土体颗粒级配、应力状态及细颗粒流失比例等均有可能影响土骨架变形, 但其影响机制尚不清楚。为全面评价①层潜蚀对土骨架变形的影响, 自行研制了可以模拟现场①层土体原始级配特征和应力状态的高应力、大直径的土体渗透稳定试验装置, 建立了土骨架发生明显变形的判据, 即潜蚀过程中试样累计体积应变大于等于1%时, 表明土骨架已发生明显变形, 提出了细颗粒运移比作为衡量细颗粒流失比例的评价指标。针对①层土体, 开展了一系列极端不利水力条件下的渗流应力耦合潜蚀试验研究, 重点探讨了颗粒级配、应力状态及细颗粒运移比对土骨架变形的影响规律。研究表明: 所有试样潜蚀全过程的累计体积应变介于0.1%~0.49%, 均小于1%, 即①层土体中细颗粒大量甚至全部流失也不会诱发明显骨架变形, ①层潜蚀诱发防渗墙开裂、折断, 甚至突然溃坝的风险不大。颗粒级配显著影响细颗粒运移比、潜蚀临界和破坏坡降, 5 mm以下颗粒含量越少, 细颗粒运移比越大, 潜蚀临界和破坏坡降越小; 上覆压力对细颗粒运移比影响不大, 但对潜蚀临界和破坏坡降影响显著, 上覆压力越大, 潜蚀临界和破坏坡降越大。研究成果为科学评价泸定水电站深部渗透稳定提供了重要依据, 同时, 也为其他类似工程安全评价提供了重要借鉴。

关键词: 深厚覆盖层; 潜蚀; 细颗粒运移; 骨架变形

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)04-0705-11

作者简介: 金伟(1972—), 男, 教授级高级工程师, 中国电建集团成都勘测设计研究院副总工程师, 河海大学兼职博士生导师, 主要从事高坝大型结构的设计和科研工作。E-mail: 2005008@chidi.com.cn。

Experimental study and evaluation on influence of deep alluvium foundation suffusion on deformation of soil skeleton in foundation of Luding Hydropower Station

JIN Wei^{1,2}, QIU Ziyuan², ZHANG Dan^{1,2}, XIANG Lei², YANG Linjun³, LUO Yulong²

(1. Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. College of Dayu, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Suffusion of stratum ① in deep alluvium foundation of Luding Hydropower Station induces water gushing incident. Continuous migration of fine particles may induce skeleton deformation, and then it may threaten the safety of Luding Dam, downstream cascade hydropower stations and Luding County. Particle size distribution of soil, stress and loss of fine particles may affect the skeleton deformation, but the detailed influence mechanism is not clear. In order to evaluate the influences of stratum ① suffusion on the skeleton deformation, a new high stress and large diameter soil suffusion apparatus which can simulate the stress and the characteristics of stratum ① particle size distribution is designed, and a criterion distinguishing the obvious skeleton deformation is proposed. When the volumetric strain during suffusion is greater than or equal to 1%, it indicates that the obvious skeleton deformation occurs.

A new evaluation index called migration ratio of fine particles is proposed to weigh the loss of fine particles. A list of hydro-mechanical coupling suffusion tests under the extreme adverse hydraulic conditions are performed on stratum ① soil to investigate the

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679070); 国家重点研发计划项目(2017YFC1502603); 中国科学院青海盐湖研究所基础研究青年创新交叉团队项目(islJCTD-2022-2); 湖南省水利科技项目(XSKJ2021000-35, XSKJ2022068-37)

收稿日期: 2023-01-09

*通信作者(E-mail: lyl8766@hhu.edu.cn)

influences of particle size distributions, stresses and losses of fine particles on the skeleton deformation. The results indicate that the cumulative volumetric strains during suffusion of all specimens range from 0.1% to 0.49%, and are lower than 1%, indicating that significant losses of fine particles in stratum ① soil do not induce obvious skeleton deformation, and suffusion of stratum ① soil cannot induce the cracks and breaking off of concrete cutoff wall and sudden dam break. The particle size distributions significantly affect the migration ratio of fine particles, hydraulic gradients initiating suffusion and failure. The less the percentage of finer than 5 mm, the larger the migration ratio of fine particles, and the lower the hydraulic gradients initiating suffusion and failure. The overburden pressure has a slight influence on the migration ratio of fine particles, but it significantly affects the hydraulic gradients initiating suffusion and failure. The larger the pressure, the larger the hydraulic gradients. The results may provide an important basis for the evaluation of deep seepage stability of Luding Dam, and an important reference for other similar projects.

Key words: deep alluvium foundation; suffusion; migration of fine particle; deformation of soil skeleton

0 引言

泸定水电站为大渡河干流水电梯级开发的第 12 级电站。水库正常蓄水位 1378.00 m, 总库容 2.195 亿 m³, 装机容量 920 MW, 最大坝高 79.5 m, 工程等别为二等, 工程规模为大(2)型。坝址区覆盖层深厚, 最大厚度为 148.6 m, 层次结构复杂, 为典型的双层地基结构, 其中, ①层和④层为强透水层, ②-2 层、③-1 层为相对隔水层, ①层和②-2 层之间不满足层间保护关系。坝体采用砾石土心墙防渗, 坝基河床段采用 110 m 深悬挂式防渗墙下接覆盖层和基岩帷幕灌浆封闭覆盖层, 两岸采用封闭式防渗墙的防渗方案。

泸定水电站首次蓄水时, 在下游右岸河道距离坝轴线约 448 m、高程约 1306 m 处发生涌水, 涌水量约 200 L/s, 且有较多灰黑色细颗粒涌出, 涌水点附近出现地面开裂、河床塌陷等不均匀变形现象。事故发生后, 通过大量地勘、渗漏水源水质分析、渗漏通道探测、三维渗流反演分析等工作, 推断事故原因为: 坝基覆盖层帷幕缺陷诱发防渗墙端部①层土体潜蚀^[1], 细颗粒不断向下游侧①层与②-2 层的接触面运移、聚集、淤堵, 逐渐增大①层与②-2 层的渗透性差距, 导致②-2 层底部形成高承压水, 最终顶穿②-2 层局部薄

弱部位而发生涌水。潜蚀是指渗流携带内部不稳定土体中的细颗粒在粗颗粒的骨架孔隙中运移流失, 逐渐在地基内形成局部被掏空、被充填的现象。Tarbela 大坝、Bennett 大坝、Three Sisters 大坝、Mogoto 大坝等, 均由于潜蚀诱发了坝体或坝基的不均匀变形, 导致了大量塌坑的出现, 严重威胁了大坝安全^[1]。那么, 泸定水电站坝基深部①层土体中细颗粒的持续大量流失会不会诱发明显土骨架变形, 如图 1 所示, 进而诱发防渗墙开裂、折断? 甚至突然溃坝呢? 该问题的准确评估关系到泸定水电站的自身安全, 也关系到下游泸定县城和大渡河下游其他梯级电站的安全。对于这一问题, 目前尚无法给出一个准确评估, 因为当前研究主要关注潜蚀发生的几何条件^[2-5]和水力条件等^[6-10], 很少关注潜蚀发生后会不会诱发土骨架变形以及由此产生的危害。要全面准确地进行评估, 必须开展相关系列试验研究。

潜蚀能否诱发土骨架变形与土体颗粒级配、应力状态、颗粒流失比例等密切相关。颗粒级配方面, 又与初始细颗粒含量和组成土体的粗细颗粒特征粒径比值等有关; 土体所处理深越大, 上覆压力越大, 细颗粒越不容易运移流失, 也就越不容易产生不均匀变形;

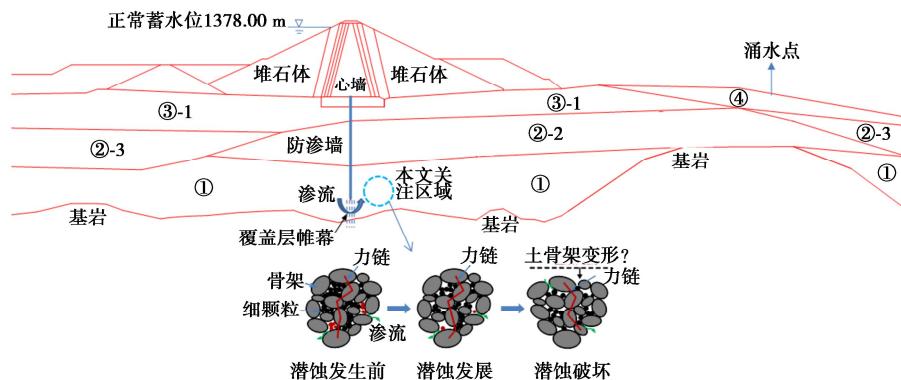


图 1 泸定水电站防渗墙端部附近潜蚀

Fig. 1 Suffusion at bottom of cutoff wall in deep alluvium foundation of Luding Hydropower Station

颗粒流失比例越高, 发生骨架变形的可能性越大。因此, 要基于试验准确评估泸定坝基深部①层中细颗粒流失会不会诱发明显骨架变形, 需解决以下三方面的技术难题:

(1) 试验土料需尽可能反映现场土体原始颗粒级配特征。泸定坝基深部①层土体最大和最小颗粒粒径分别达到 200 mm 和 0.005 mm, 如图 2 示。根据《水电水利土工试验规程: DL/T 5355—2006》^[11], 当试样直径与土体最大粒径比大于 5~6 时, 可以保证试样的均匀性, 从而确保试验结果的可重复性。因此, 大致要求试样直径要达到 460 mm, 然而, 目前大多数渗流试验试样直径介于 76~300 mm^[12-17], 无法满足当前研究要求。

(2) 试验需尽可能地模拟防渗墙端部附近土体所处的原位高应力状态。防渗墙端部附近原位竖向有效自重应力在 2.0 MPa 左右, 然而, 目前大多数渗流试验所施加的轴向压力大概在 25~900 kPa^[6-7, 12-13], 无法满足当前研究要求。

(3) 试验需建立土骨架发生明显变形的判据。潜蚀发展过程中细颗粒流失是孔隙尺度行为, 而骨架变形则是宏观尺度行为, 细颗粒流失由量变到质变的累计过程, 逐渐反映到土骨架宏观变形上, 因此, 这是一个宏细观多尺度问题, 要确定两者之间的关系相当困难。目前并未建立相关判据, 只有一些文献报道了潜蚀试验后试样的轴向或体积应变等。如有的细颗粒流失诱发的轴向应变达到 1.8%~2.4%^[18], 或超过 6.5%^[19], 或达到 1.7%~7.7%^[20] 等, 才认为发生明显骨架变形; 有的细颗粒流失诱发的体积应变达到 1.54%~2.19%^[21], 或达到 0.74%~1.15%^[22], 才认为发生明显骨架变形。

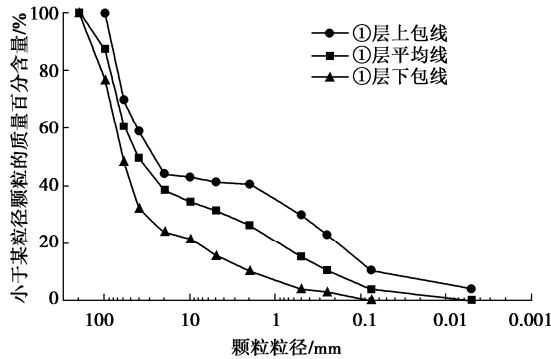


图 2 泸定水电站坝基①层原始级配包络线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of stratum ① soil

由此可见, 目前已有研究很少关注潜蚀发生后会不会诱发不均匀变形这一影响工程安全的关键工程技术问题, 同时, 尚未建立细颗粒流失诱发土骨架明显变形的相关判据, 已开展的相关渗流试验的试样尺寸、施加的应力状态等也无法满足本文研究的要求。为此,

针对泸定坝基深部①层土体, 本文研制了可考虑高应力的、大直径(内径 460 mm)的深厚覆盖层渗透稳定试验装置, 建立了土骨架发生明显变形的判据, 重点探讨了①层颗粒级配、所处应力状态、细颗粒流失比例等因素对潜蚀发生后骨架变形的影响规律, 基于大量试验结果, 定量评价了泸定坝基深部①层土体细颗粒持续流失对土骨架变形及坝基深部渗流安全的影响。

1 试验土料

1.1 土体内部稳定性评价

①层为漂(块)卵(碎)砾石土体, 系冰水堆积(fglQ₃), 以粗颗粒为主, 充填物以砂粒为主, ①层平均线的不均匀系数 259.1, 渗透系数介于 $2.0 \times 10^{-2} \sim 8.96 \times 10^{-4}$ cm/s, 属强一中等透水性。

根据地质总体判断, ①层土体整体上颗粒级配组成更偏向于平均线和下包线, 因此, 本文重点关注①层平均线和下包线及其附近级配组成对颗粒流失后土骨架变形的影响。这里选取了 5 条比较典型的颗粒级配曲线开展潜蚀试验, 如图 3 所示, 根据目前常用的土体内部稳定性判别方法 Kenney 等^[2]、Wan 等^[3]、Li 等^[4]方法判定: 该 5 条级配曲线代表的①层土体均为内部不稳定土, 会发生潜蚀现象, 如表 1 所示, 表中 F 为粒径小于 d 的颗粒质量百分含量; H 为粒径 d 和 $4d$ 之间的颗粒质量百分含量; P 为内部不稳定土体的概率。

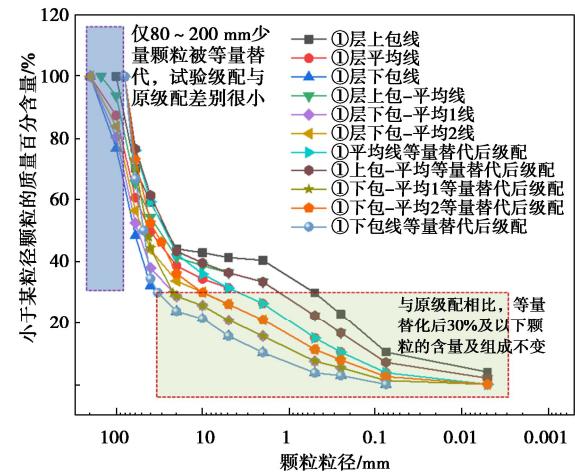


图 3 ①层土体原始级配与等量替代后颗粒级配对比

Fig. 3 Comparison between original and equivalent substitution grain-size distributions of stratum ① soil

1.2 颗粒级配的缩尺方法

本试验的试样直径为 460 mm, 根据《水电水利土工试验规程: DL/T 5355—2006》^[11], 拟定试验土体最大粒径 80 mm, 相应各土体级配曲线中粒径大于 80 mm 的颗粒需进行缩尺处理。根据已有研究成果^[23-24], 对于渗流试验, 缩尺处理应以尽量不改变 30% 以下颗

表 1 试验土体内部稳定性评价
Table 1 Evaluation of internal instability of test soils

土体颗粒级配曲线	内部稳定性评价结果		
	Kenney 等 ^[2]	Wan 等 ^[3]	Li 等 ^[4]
①层上包—平均线	内部不稳定 $((H/F)_{min}=0.64<1)$	内部不稳定($P=99.7\%$)	内部不稳定(当 $F>15\%$ 时, $H=10.8\%<15\%$)
①层平均线	内部不稳定 $((H/F)_{min}=0.51<1)$	内部不稳定($P=98.9\%$)	内部不稳定(当 $F<15\%$ 时, $(H/F)_{min}=0.91<1.0$; 当 $F>15\%$ 时, $H=10.1\%<15\%$)
①层下包—平均 2 线	内部不稳定 $((H/F)_{min}=0.38<1)$	内部不稳定($P=99\%$)	内部不稳定(当 $F<15\%$ 时, $(H/F)_{min}=0.86<1.0$; 当 $F>15\%$ 时, $H=6\%<15\%$)
①层下包—平均 1 线	内部不稳定 $((H/F)_{min}=0.41<1)$	内部不稳定($P=96.6\%$)	内部不稳定(当 $F<15\%$ 时, $(H/F)_{min}=0.69<1.0$; 当 $F>15\%$ 时, $H=8.2\%<15\%$)
①层下包线	内部不稳定 $((H/F)_{min}=0.51<1)$	内部不稳定($P=90.2\%$)	内部不稳定(当 $F<15\%$ 时, $(H/F)_{min}=0.93<1.0$; 当 $F>15\%$ 时, $H=8\%<15\%$)

表 2 ①层土体潜蚀试验组合
Table 2 Suffusion tests of stratum ① soil

试验编号	上覆压力/MPa	①层土体		
		级配曲线	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	D_r
①-1		①层平均线	2.241	0.85
①-2		①层下包线	2.106	0.85
①-3	2.0	①层上包—平均线	2.308	0.85
①-4		①层下包—平均 1 线	2.204	0.85
①-5		①层下包—平均 2 线	2.268	0.85
①-6	0.5			
①-7	1.0	①层平均线	2.241	0.85
①-8	1.5			
①-9	2.5			

粒含量及组成为原则, 此原则下等量替代法最适用。根据①层土体原始级配特征, 具体的等量替代方法如下: 当原级配中 $<5\text{ mm}$ 的细粒含量 $\geq 30\%$ 时, 按照《水电水利土工试验规程: DL/T 5355—2006》^[11]的相关规定进行等量替代, 即将超粒径颗粒(超过 80 mm 部分), 按比例等质量替换成 $5\sim 80\text{ mm}$ 粒径颗粒, 确保试验级配中 $<5\text{ mm}$ 的细粒含量与原级配一致。当原级配中 $<5\text{ mm}$ 的细粒含量 $<30\%$ 时, 利用最大粒径 80 mm 和原级配 30% 对应粒径颗粒, 按比例等质量替换超粒径颗粒。经缩尺处理后, 试验级配与原级配的相对关系如图 3 所示。从图 3 可以看出, 对于拟开展试验的 5 条级配曲线, 经等量替代后, 30% 及以下颗粒含量及组成均未发生变化, 同时, 仅 $80\sim 200\text{ mm}$ 的少量超粒径颗粒被等量替代, 试验土体级配与原级配差别很小。需要说明的是, 本文采用的等量替代方法的可靠性已在文献[25]中进行了讨论, 研究表明: 缩尺后试验土体的渗透及渗透稳定性能够反映原级配的渗透及渗透稳定性, 这里不再赘述。

1.3 潜蚀试验组合

为了全面系统地评估①层土体颗粒级配组成和所处应力状态对颗粒流失过程及骨架变形的影响, 拟定了如表 2 所示的试验组合。表 2 中“①-1~①-5”试

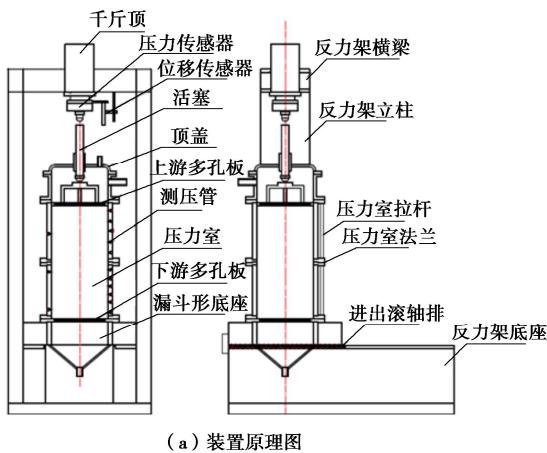
验组合重点探讨颗粒级配组成对①层土体潜蚀发生发展过程的影响, 试验上覆压力 2.0 MPa , 根据泸定水电站防渗墙端部附近①层土体的实际原位应力状态近似确定。“①-6~①-9”试验组合重点探讨上覆压力对①层平均线土体潜蚀发生发展过程的影响, 试验上覆压力范围介于 $0.5\sim 2.5\text{ MPa}$ 。根据地勘结果, 坝基①层土体的相对密度 D_r 在 0.85 左右, 为了确保室内试验结果尽可能代表现场实际情况, 室内试验不同颗粒级配曲线土料的填筑相对密度 D_r 也按照 0.85 控制, 填筑干密度 ρ_d 由相对密度试验确定。

2 试验装置及方法

2.1 试验装置

试验采用河海大学自行研制的高应力、大直径土体渗透稳定试验装置(如图 4 所示)开展。该装置包括轴向加压系统、渗透压力加载系统、流失细颗粒收集系统及数据采集系统。轴向加压系统能够模拟深厚覆盖层地基承受的上覆荷载, 最大轴向压力 3.0 MPa 。渗透压力加载系统模拟土体承受的渗流作用。流失细颗粒收集系统可实时收集潜蚀过程中流出试样的细颗粒及渗流量, 它主要由漏斗形出水口和下游侧多孔板

组成, 本试验中涉及的①层土料级配曲线较多, 可能流失颗粒的最大粒径跨度也较大。这里考虑到工程上一般将5 mm以下颗粒作为细颗粒, 经综合比较, 拟定下游侧多孔板孔径为5 mm。数据采集系统能够实时监测试样沉降、上下游水头差、渗流量、试样内各测点孔隙水压力等。试样直径460 mm, 高度550 mm。



(a) 装置原理图



图4 高应力、大直径土体渗透稳定试验装置

Fig. 4 High stress and large-diameter soil suffusion apparatus

2.2 试验方法

(1) 分层填筑击实, 制备试样。按照试验土体的颗粒级配曲线进行筛分, 根据填筑干密度和填筑体积准备适量土体, 将配比好的土颗粒加入适量水充分搅拌, 使细颗粒充分包裹在粗颗粒周围, 避免粗细颗粒分离, 最后将搅拌好的土体分5层填筑击实, 每层厚度11 cm。图5给出了①层平均线拌和前后对比情况。需要说明的是, 对于粗细颗粒差别显著的粗粒土, 试验填筑控制不好, 容易在仪器壁面产生接触渗透, 为减小壁面效应, 采取了多种有效措施: ①在壁面均匀涂抹了一定厚度的凡士林; ②对壁面附近土料进行额外击实; ③所有测压管探头均放置在试样中心, 主要依据测压管数据分析确定土体临界和破坏坡降; ④尽量避免大石块出现在壁面附近。

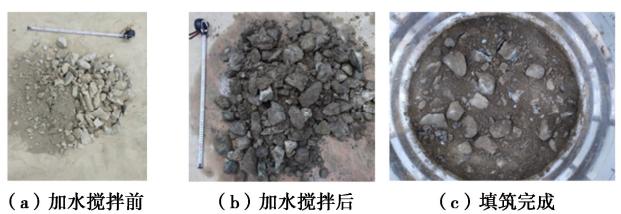


图5 ①层平均线土体试验填筑情况

Fig. 5 Compaction of stratum ① soil

(2) 缓慢施加轴向压力。施加轴向压力时, 逐级缓慢施加, 同时记录试样沉降量的变化, 当试样沉降量不再变化时, 施加下一级轴向压力。在轴向压力达到预定值后, 记录试样的沉降量, 作为上覆压力加载所产生的初始沉降量, 并在后续试验中始终保持轴向压力不变。

(3) 缓慢充分饱和试样。确保试样在低渗透压力下缓慢充分饱和, 避免试样在饱和过程中出现渗透破坏。饱和时渗透方向自下而上。待饱和结束后, 记录试样渗流量及各测压管的读数, 拍照记录试样饱和后的状态, 便于后期对比。

(4) 分级施加渗透压力, 开始潜蚀试验。待试样饱和完毕, 开始缓慢提升移动水箱, 分级施加渗透压力。加载过程中, 密切关注试样壁面颗粒移动情况, 每隔10 min记录渗流量、测压管读数等, 当各指标均稳定时, 表明试样已达到稳定状态, 记录渗流量、测压管读数, 并拍照记录仪器边壁细颗粒迁移情况及其他比较明显的试验现象, 开始施加下一级渗透压。当试样发生明显渗透破坏时, 如渗流量骤增、出水浑浊等, 再继续维持现有渗透压力12 h, 确保能够迁移的细颗粒均发生迁移。需要说明的是, 为了便于细颗粒流失, 渗流方向自上而下。

(5) 颗粒级配分析。试验结束后, 拍照记录试样上表面情况, 并将试样分层拆除, 拆除过程中仔细观察记录试样内部颗粒移动及渗漏通道形成情况, 烘干、筛分每层土样及每个加载步收集到的细颗粒, 并进行颗粒级配分析, 评价试验过程中细颗粒的移动情况。

2.3 潜蚀试验结果评价的相关指标及定义

(1) 土骨架发生明显变形的判据

为建立土骨架发生明显变形的判据, 笔者统计了部分文献中总计65个潜蚀试验结果, 如表3所示。表中“是否发生明显骨架变形”一栏给出了不同学者对土骨架是否发生明显变形的判断; 表中渗透试验有两类, 一类是无侧限三轴渗透试验, 给出了试样的轴向应变和体积应变监测结果, 另一类为有侧限试验, 给出了试样的轴向应变, 此时, 轴向应变等于体积应变。

表 3 部分相关文献潜蚀试验成果统计

Table 3 Suffusion test results in literatures

文献	试验土样编号	试验类型	颗粒流失诱发的体积应变/%	是否发生明显骨架变形
Li ^[26]	FR8-25-D0	有侧限试验	2.6	是
	FR8-25-D1		0.9	是
	FR8-25-D2		1.6	是
	FR8-50-D		0.7	是
	FR8-100-D		4.7	是
	FR8-200-D		3.9	是
	FR7-25-D		3.4	是
	FR7-50-D		0.98	是
	FR7-100-D		1.6	是
	FR7-150-D		0.6	是
Moffat 等 ^[27]	FR7-150-U	无侧限试验	3.0	是
	HF03-25-U		0.23	否
	HF03-50-U		0.14	否
	T-0-25-D		7.0	是
Ke 等 ^[18]	T-5-175-U	有侧限试验	5.0	是
	C-20-50-U		1.0	是
	C-30-80-U		2.4	是
	35E-50		2.4(轴向应变) 3.9(体积应变)	是
Chang 等 ^[19]	35E-50-R	无侧限试验	3.8	是
	35E-100		2.0(轴向应变) 3.2(体积应变)	是
	35E-100-R		3.6	是
	35E-200		1.8(轴向应变) 2.8(体积应变)	是
	35E-200-R		2.8	是
	25E-50		1.4	是
	15E-50		0.05	否
	GS-C-6	无侧限试验	6.5(轴向应变), 未给出体积应变	是
Sibille 等 ^[20]	GS-I-1		0.14(轴向应变) 0.26(体积应变)	否
	Test N1		3.9	是
Slangen 等 ^[21]	Test N2	有侧限试验	4.9	是
	Test N3		5.0	是
	Test N4		7.7	是
	Test N5		5.7	是
	Test N6		4.8	是
	Test N7		3.9	是
	Test N8		1.7	是
	6.0GB35-100		0.62(轴向应变) 1.54(体积应变)	是
Prasomsri 等 ^[22]	6.0GB35-100(R)	无侧限试验	0.7(轴向应变) 2.19(体积应变)	是
	6.5GB35-50		0.14(轴向应变) 1.89(体积应变)	是
	6.5GB35-100		0.04(轴向应变) 1.68(体积应变)	是
	4.8GB20-50		0(轴向应变) 0.12(体积应变)	否
	4.8GB20-50(R)		0.01(轴向应变) 0.03(体积应变)	否
	WE_F32.5		1.15	是
	WE_F35		0.09(轴向应变) 0.74(体积应变)	是
	WE_F15		0.01	否
	WE_F20		0.02	否

	WE_F25	0.01	否
	WE_F30	0.01	否
田大浪等 ^[28]	G-US-30	0.83	否
	G-US-35	0.57	否
	G-US-40	1.47	是
	G-CS-30	0.51	否
	G-CS-35	0.32	否
	G-CS-40	0.93	是
	B3-35	0.04	否
樊茹玉 ^[29]	C5-15	0.02	否
	C7-20	0.01	否
	C8-20	0.01	否
	D9-30	0.1	否
	D12-25	0.01	否
	A1-15	0	否
	B2-20	0	否
	C4-15	0	否
	C6-10	0.01	否
	D10-5	0	否
	D11-15	0	否

Slangen 等^[21]的研究发现,与轴向应变相比,体积应变更能反映试样整体发生的骨架变形情况,如对于表 3 中试样 6.5GB35-100,细颗粒流失后诱发的轴向应变和体积应变分别为 0.04%, 1.68%;类似的情况,还发生在 6.0GB35-100、6.0GB35-100(R)、6.5GB35-50 等其他 3 个试样。Prasomsri 等^[22]的试验结果也说明了这一情况。综合考虑表 3 试验结果,笔者建议选择体积应变作为土骨架发生明显变形的评价指标。从表 3 中大量试验数据中可以看出,当细颗粒流失全过程中诱发的累计体积应变大于等于 1% 时,多数研究认为土体已发生明显的骨架变形。为此,笔者建议:将颗粒流失过程中诱发试样的体积应变达到或超过 1% 时,作为土骨架发生明显变形的判据,也就是说,在潜蚀发生发展破坏的整个过程中,如果试样累计体积应变达到或超过 1%,即表明土骨架已发生明显变形。

需要说明的是,这里不是指①层整体上发生 1% 的体积应变,而是指容易发生潜蚀的防渗墙端部附近的局部区域产生了 1% 的体积应变。

(2) 细颗粒流失程度的定量评价指标

目前常采用细颗粒流失比定量评价潜蚀过程中颗粒流失程度,其为渗流出口收集的颗粒质量与试样初始细颗粒质量的比值。其实,采用这一指标进行评价并不合理,原因是:潜蚀过程中,可能只有一部分靠近下游渗流出口的颗粒被带出试样,而大部分远离下游出口的细颗粒,试验过程中也发生了明显地运移,但可能最终无法被带出试样,其实这部分运移的细颗粒同样显著地改变了试样的颗粒组成,但这部分颗粒并没有包含在细颗粒流失比中,这种现象尤其在试样高度比较大的情况下更加突出,因此,细颗粒流失比不能很好地反映颗粒流失程度,笔者建议采用细颗粒运移比作为评价指标更加科学。细颗粒运移比是指试样

内发生运移的细颗粒质量与试样初始细颗粒质量的比值,已有研究^[18, 28]表明,潜蚀过程中细颗粒移动相对比较显著的两个区域是上游侧渗流入口和下游侧渗流出口处,因此,本文选取这两处试样(层厚按照分层填筑厚度 11 cm 取)试验前后颗粒级配分析成果确定试样内发生运移的细颗粒量和细颗粒运移比。

(3) 潜蚀临界坡降和破坏坡降的确定

潜蚀临界坡降和破坏坡降的确定以《水电水利工程粗粒土试验规程: DL/T 5356—2006》^[11]规定的试样平均坡降和渗流速度双对数曲线 $lg i - lg v$ 的斜率变化作为主要判别依据,同时,以试样不同高度处测压管间的局部坡降、渗流量、试样沉降量、试验现象等作为辅助判别依据。

当 $lg i - lg v$ 曲线的斜率开始变化,并观察到细颗粒开始跳动或被水流带出时,认为达到了潜蚀临界坡降 i_{cr} ,其值为

$$i_{cr} = (i_1 + i_2)/2 \quad . \quad (1)$$

式中: i_1 和 i_2 分别为试样开始出现潜蚀前一级和开始出现潜蚀时的平均坡降。

随着水头逐步加大,细颗粒不断被冲走,渗流量变大,当水头增加到试样失去抗渗强度时,该坡降称为潜蚀破坏坡降 i_f ,其值为

$$i_f = (i'_1 + i'_2)/2 \quad . \quad (2)$$

式中: i'_1 和 i'_2 分别为破坏前一级和破坏时平均坡降。

3 试验结果分析

表 4 给出了 9 组潜蚀试验结果的统计情况,表中 k 为细颗粒发生移动前土体的渗透系数; ε_v 为上覆压力加载及饱和过程中试样累计体积应变; $\varepsilon_{v\text{潜蚀}}$ 为潜蚀过程中累计体积应变。下面将从①层土体潜蚀后能否诱发骨架变形、颗粒级配和应力状态对①层潜蚀特征

表 4 ①层土体潜蚀试验成果统计
Table 4 Suffusion test results of stratum ① soil

试验编号	土体名称	上覆压力 /MPa	i_{cr}	i_f	$k(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	细颗粒运移比/%	$\varepsilon_v / \%$	$\varepsilon_{v\text{潜蚀}} / \%$	$\frac{\varepsilon_{v\text{潜蚀}}}{\varepsilon_v} / \%$	是否发生骨架变形	最大平均/局部坡降
①-1	①层上包-平均线	2.0	2.41	4.81	6.0×10^{-5}	5.4	2.4	0.27	11.25	否	16.5/95.1
①-2	①层平均线	2.0	1.88	3.57	1.4×10^{-3}	7.1	3.8	0.20	5.26	否	16.7/22.5
①-3	①层下包-平均2线	2.0	0.82	2.17	1.0×10^{-2}	11.5	2.6	0.49	18.85	否	15.6/48.8
①-4	①层下包-平均1线	2.0	0.47	1.70	1.4×10^{-1}	40.6	4.3	0.10	2.33	否	13.2/35.1
①-5	①层下包线	2.0	0.06	1.19	1.9	43.3	4.3	0.16	3.72	否	1.2/7.4
①-6	①层平均线	0.5	0.16	0.55	5.6×10^{-2}	15.8	1.1	0.20	17.70	否	4.2/17.6
①-7	①层平均线	1.0	0.54	1.46	1.1×10^{-2}	10.6	2.5	0.20	7.91	否	3.6/38.4
①-8	①层平均线	1.5	1.09	2.06	2.2×10^{-3}	15.8	2.5	0.15	6.12	否	4.4/20.1
①-9	①层平均线	2.5	2.08	3.93	1.2×10^{-3}	18.1	4.5	0.25	5.57	否	4.4/15.4

坡降和细颗粒运移的影响等几个方面对试验结果进行分析和讨论。

3.1 ①层土体潜蚀能否诱发土骨架变形的评价

与土体内部稳定性评价结果一致, 本文所开展的 9 组试验均发生了比较明显的潜蚀现象, 但潜蚀发生发展破坏全过程中累计产生的体积应变整体均较小, 试验的体积变形仍然主要发生在上覆压力加载的过程中。从表 4 可以看出, 上覆压力加载及饱和过程中试样的累计体积应变 ε_v 介于 1.1%~4.3%, 而潜蚀过程中累计体积应变 $\varepsilon_{v\text{潜蚀}}$ 仅为 0.1%~0.49%, 两者的比值 $\varepsilon_v / \varepsilon_{v\text{潜蚀}}$ 介于 2.3%~18.9%。从所有 9 组潜蚀试验结果看, $\varepsilon_{v\text{潜蚀}}$ 均小于土骨架发生明显变形的判据 (体积应变 $\geq 1\%$), 也就是说, 从试验成果看: ①层土体中细颗粒持续大量流失也不会诱发明显的土骨架变形。

需要说明的是, 本文所开展的 9 组试验均达到或超出了现场①层土体的实际工作条件, 属于工程有可能遭遇的最不利条件。一方面, 试验水力条件足够大, 所有试验中, 最大平均坡降介于 1.2~16.7, 局部最大坡降介于 7.4~95.1, 其中, ①层下包线土体的潜蚀试验, 由于试样渗透系数过大, 无法加载至更高的渗透坡降, 但是其平均坡降和局部最大坡降也分别能达到 1.2 和 7.4, 完全超过泸定水电站实际运行过程中遇到的最不利水力条件; 另一方面, 所有潜蚀试验的持续时间均足够长, 所有试验在结束前, 均在最高坡降作用下, 持续加载了 12 h, 且长时间未见颗粒流出, 表明, ①层土体中可以运移的细颗粒已全部流失。

综上, 本文①层试验土体的级配能够比较好地反映现场原始级配, 同时, 室内试验条件也达到或超过了现场有可能遭遇的最不利水力条件, 试验测得的潜蚀全过程中的累计体积应变 $\varepsilon_{v\text{潜蚀}}$ 均远小于土骨架发生明显变形的判据 (体积应变 $\geq 1\%$), 因此, 可以得出评价结论: 泸定水电站坝基深部①层土体中细颗粒

的持续流失不会诱发明显的土骨架变形, ①层潜蚀诱发防渗墙开裂、折断, 甚至突然溃坝的风险不大。

3.2 颗粒级配及上覆压力对①层潜蚀临界和破坏坡降的影响

图 6 给出了试验①-4 基于 lg_i-lg_v 确定潜蚀临界坡降和破坏坡降的过程。从图 6 可以看出, 当坡降达到 0.43 时, 再继续增大坡降至 0.5, 曲线斜率发生较明显的变化, 说明, 发生潜蚀, i_1 和 i_2 分别为 0.43, 0.5, 根据式(1)即可确定试验①-4 的潜蚀临界坡降为 0.47; 当坡降达到 1.1 时, 上游侧多个测压管出现明显的水位波动现象, 再继续增大坡降至 2.29 时, 曲线发生明显转折, 渗流速度不增反降, 出水明显浑浊, 这说明试样已发生明显潜蚀破坏, i'_1 和 i'_2 分别为 1.1, 2.29, 根据式(2)即可确定试验①-4 的潜蚀破坏坡降为 1.7。此外, 根据试样沿程局部坡降的变化也能得到一致的判断, 这里不再赘述。试验结束后, 对试样下游出口附近 11 cm 厚的一层土体的颗粒级配分析发现, 下游渗流出口淤堵是导致试验后期渗透坡降增加, 而渗流速度减小的主要原因。与试验前的初始级配相比, 粒径 <0.075 mm 的颗粒增加了 1244 g。

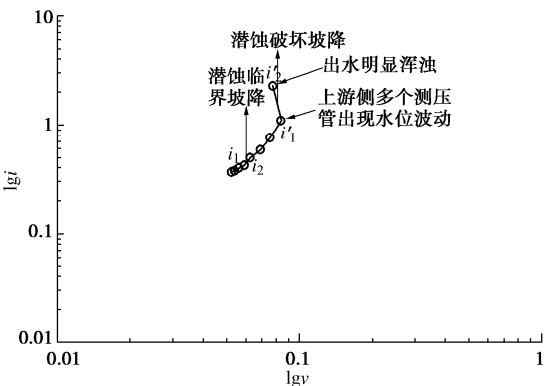


图 6 试验①-4 的 lg_i-lg_v 曲线

Fig. 6 lg_i-lg_v of Test ①-4

从表4可以看出, ①层土体的颗粒级配组成及所处应力状态对潜蚀发生临界坡降和破坏坡降均有显著影响, 粒径5 mm以下的颗粒含量越高, 潜蚀临界坡降和破坏坡降越大, 两者大致呈线性相关关系, 如图7所示。如①层上包-平均线, 5 mm以下颗粒含量为36.4%, 其临界坡降和破坏坡降分别为2.41, 4.81; 而5 mm以下颗粒含量最少(15.7%)的①层下包线, 其临界坡降和破坏坡降仅为0.06, 1.19, 显著低于①层上包-平均线。类似的, 上覆压力越大, 潜蚀临界坡降和破坏坡降也越大, 两者也大致呈线性相关关系, 如图8所示。如上覆压力为0.5 MPa时, ①层平均线土体的潜蚀临界坡降和破坏坡降分别为0.16, 0.55, 而上覆压力增大到2.5 MPa时, 临界坡降和破坏坡降分别增大到2.08, 3.93。

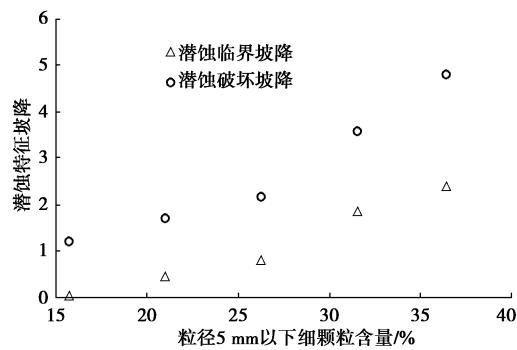


图7 粒径5 mm以下颗粒含量与潜蚀特征坡降的关系

Fig. 7 Relationship between percentage finer than 5 mm and suffusion hydraulic gradients

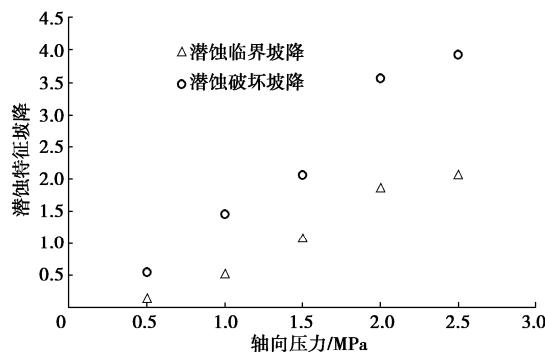


图8 ①层土体所处应力状态与潜蚀特征坡降的关系

Fig. 8 Relationship between overburden pressure and suffusion hydraulic gradient

3.3 颗粒级配及上覆压力对①层细颗粒运移的影响

①层土体的颗粒级配组成对细颗粒运移比影响显著, 粒径5 mm以下的颗粒含量越少, 未被填充的孔隙空间越大, 细颗粒相对越容易运移, 因此, 细颗粒运移比越大。如①层上包-平均线中5 mm以下颗粒含量为36.4%, 试验结束后最大的细颗粒运移比仅为5.4%, 而5 mm以下颗粒含量为15.7%的①层下包线,

最大的细颗粒运移比竟达到了43.3%, 试验过程中, 下游渗流出口一次最大出砂量达到了6174 g, 累计出砂量达到7298.9 g, 试验结束后, 对收集的颗粒进行级配分析, 发现: 粒径为0.5~2 mm的颗粒含量最多, 占37.9%, 粒径为0.075~0.25 mm的颗粒含量次之, 占29.3%。这也表明, 本文拟定下游多孔板孔径为5 mm是合适的, 该孔径足够大, 不会对运移出来的细颗粒造成明显阻碍。

与颗粒级配相比, ①层土体所处应力状态对细颗粒运移比影响不大, 应力状态与细颗粒运移比之间没有明显相关性, 虽然不同试验之间轴向压力变化范围较大, 由0.5 MPa变化到2.5 MPa, 但是, 细颗粒运移比的变化不大, 平均细颗粒运移比大概在10%左右。此外, 9组试验结果表明, 相对于细颗粒流失比, 选取细颗粒运移比这一指标衡量细颗粒流失程度更加客观合理。多数试验中, 试验内部细颗粒运移很明显, 相应的细颗粒运移比均比较大, 介于5.4%~43.3%, 而细颗粒流失比却很小, 多数试验细颗粒流失比介于0.04%~1.8%。如对于①层下包-平均1线土体, 试验结束后, 流出试样可以收集的细颗粒质量仅为112 g, 占比仅为0.3%; 而上游侧渗流入口处5 mm以下颗粒质量相对于初始状态减小了3430 g, 占比40.6%; 下游侧渗流出口处5 mm以下细颗粒质量相对于初始状态减少了35.6%。

3.4 颗粒级配及上覆压力对①层土体渗透性的影响

①层土体的颗粒级配组成和上覆压力均对渗透系数影响显著, 其中, 前者影响更显著, 土体中粒径5 mm以下的颗粒含量越高, 同一上覆压力条件下, 土体的渗透系数越小, 如5 mm以下颗粒含量为36.4%的①层上包-平均线土体, 其渗透系数可低至 6.0×10^{-5} cm/s, 而5 mm以下颗粒含量为15.7%的①层下包线土体, 其渗透系数可高达1.9 cm/s。相对而言, 上覆压力对同一颗粒级配组成土体的渗透系数影响略小, 大致趋势为上覆压力越大, 渗透系数越小, 如上覆压力为0.5 MPa时, ①层平均线土体的渗透系数为 5.6×10^{-2} cm/s, 而上覆压力增大到2.5 MPa时, 渗透系数减小到 1.2×10^{-3} cm/s, 如表4所示。

4 结论

本文针对泸定水电站坝基覆盖层深部①层土体, 利用自行研制的高应力、大直径土体渗透稳定试验装置, 开展了一系列极端水力条件下渗流应力耦合潜蚀试验, 主要得到以下5点结论。

(1) 在梳理归纳总结已有研究成果的基础上, 提出了土骨架发生明显变形的判据, 即试样在潜蚀全过

程中累计产生的体积应变大于等于 1%时，表明土骨架已发生明显变形。

(2) 目前常采用的细颗粒流失比不能很好地评价反映潜蚀过程中细颗粒的运移流失程度，本文提出采用细颗粒运移比作为评价指标更加合理，它是指试样内发生运移的细颗粒量与试样初始细颗粒量的比值，该指标可利用细颗粒运移比较显著的试样渗流入口处和出口处的颗粒级配分析成果加以确定。

(3) 所有 9 组试验中，①层试验土体级配能够比较好地反映现场原始级配，同时，试验条件也达到或超过了现场有可能遭遇的最不利水力条件，试验测得的潜蚀全过程中的累计体积应变介于 0.1%~0.49%，均远小于土骨架发生明显变形的判据，因此，可以推断：泸定水电站坝基深部①层土体中细颗粒持续大量甚至是全部流失也不会诱发明显的土骨架变形，①层潜蚀诱发防渗墙开裂、折断，甚至突然溃坝的风险不大。

(4) ①层土体颗粒级配组成对潜蚀临界坡降和破坏坡降影响显著，5 mm 以下颗粒含量越高，潜蚀临界坡降和破坏坡降越大，两者呈线性相关关系；颗粒级配组成还显著影响细颗粒运移比，5 mm 以下的颗粒含量越少，细颗粒运移比越大。

(5) 上覆压力对潜蚀临界坡降和破坏坡降也影响显著，上覆压力越大，潜蚀临界坡降和破坏坡降也越大，两者呈线性相关关系；上覆压力对细颗粒运移比影响不大，两者没有明显相关性。

参考文献：

- [1] 罗玉龙, 张兴杰, 张海彬, 等. 深厚覆盖层地基潜蚀研究综述[J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 3094-3106. (LUO Yulong, ZHANG Xingjie, ZHANG Haibin, et al. Review of suffusion in deep alluvium foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(11): 3094-3106. (in Chinese))
- [2] KENNEY T C, LAU D. Internal stability of granular filters [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22(2): 215-225.
- [3] WAN C F, FELL R. Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(3): 401-407.
- [4] LI M, FANNIN R J. Comparison of two criteria for internal stability of granular soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(9): 1303-1309.
- [5] 陈群, 刘黎, 何昌荣, 等. 缺级粗粒土管涌类型的判别方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2249-2253. (CHEN Qun, LIU Li, HE Changrong, et al. Criterion of piping types for gap-graded coarse-grained soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2249-2253. (in Chinese))
- [6] 蒋中明, 王为, 冯树荣, 等. 砂砾石土渗透变形特性的应力状态相关性试验研究[J]. 水力学报, 2013, 44(12): 1498-1505. (JIANG Zhongming, WANG Wei, FENG Shurong, et al. Experimental of study on the relevance between stress state and seepage failure of sandy-gravel soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(12): 1498-1505. (in Chinese))
- [7] CHANG D S, ZHANG L M. Critical hydraulic gradients of internal erosion under complex stress states[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(9): 1454-1467.
- [8] 姚志雄, 周健, 张刚, 等. 颗粒级配对管涌发展的影响试验研究[J]. 水力学报, 2016, 47(2): 200-208, 218. (YAO Zhixiong, ZHOU Jian, ZHANG Gang, et al. Experimental study of particle grading impact on piping mechanism[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(2): 200-208, 218. (in Chinese))
- [9] LIANG Y, YEH T C J, WANG J, et al. Onset of suffusion in upward seepage under isotropic and anisotropic stress conditions[J]. European Journal of Environmental & Civil Engineering, 2019, 23(12): 1520-1534.
- [10] LUO Y L, LUO B, XIAO M. Effect of deviator stress on the initiation of suffusion[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(6): 1607-1617.
- [11] 水电水利工程土工试验规程: DL/T 5355—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007. (Code for Soil Tests for Hydropower and Water Conservancy Engineering: DL/T 5355—2006[S]. Beijing: Chinese Electric Power Publishing House, 2007. (in Chinese))
- [12] 谢定松, 蔡红, 魏迎奇, 等. 覆盖层不良级配砂砾石料渗透稳定性及影响因素探讨[J]. 水力学报, 2014, 45(增刊 2): 77-82. (XIE Dingsong, CAI Hong, WEI Yingqi, et al. Discussion of seepage stability characteristic of bad graded sand and gravel overlay[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(S2): 77-82. (in Chinese))
- [13] CHEN C, ZHANG L M, PEI L, et al. Soil deformations induced by particle removal under complex stress states[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(9): 04020085.
- [14] 谷敬云, 罗玉龙, 张兴杰, 等. 基于平面激光诱导荧光的潜蚀可视化试验装置及其初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1287-1296. (GU Jingyun, LUO Yulong,

- ZHANG Xingjie, et al. A suffusion visualization apparatus based on planar laser induced fluorescence and the preliminary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(6): 1287-1296. (in Chinese)
- [15] 陈亮, 滕耀宗, 蔡国栋, 等. 变水头下管涌细颗粒迁移试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, **50**(5): 82-88, 110. (CHEN Liang, TENG Yaozong, CAI Guodong, et al. Experimental study on the migration of fine particles in piping under variable water head[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, **50**(5): 82-88, 110. (in Chinese))
- [16] 康捷, 任杰, 南胜豪, 等. 形状效应下砂土管涌试验及水力条件分析[J]. 水力发电学报, 2023, **42**(5): 97-106. (KANG Jie, REN Jie, NAN Shenghao, et al. Sand piping tests and hydraulic condition analysis with particle shape effect[J]. Journal of Hydropower Engineering, 2023, **42**(5): 97-106. (in Chinese))
- [17] DENG G, ZHANG L L, CHEN R, et al. Experimental investigation on suffusion characteristics of cohesionless soils along horizontal seepage flow under controlled vertical stress[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, **8**: 1-9.
- [18] KE L, TAKAHASHI A. Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil[J]. Soils and Foundations, 2014, **54**(4): 713-730.
- [19] CHANG D, ZHANG L, CHEUK J. Mechanical consequences of internal soil erosion[J]. HKIE Transactions, 2014, **21**(4): 198-208.
- [20] SIBILLE L, MAROT D, SAIL Y. A description of internal erosion by suffusion and induced settlements on cohesionless granular matter[J]. Acta Geotechnica, 2015, **10**(6): 735-748.
- [21] SLANGEN P, FANNIN R J. A flexible wall permeameter for investigating suffusion and suffosion[J]. Geotechnical Testing Journal, 2017, **40**(1): 1-14.
- [22] PRASOMSRI J, TAKAHASHI A. The role of fines on internal instability and its impact on undrained mechanical response of gap-graded soils [J]. Soils and Foundations, 2020, **60**(6): 1468-1488.
- [23] 谢定松, 蔡红, 魏迎奇, 等. 粗粒土渗透试验缩尺原则与方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(2): 369-373. (XIE Dingsong, CAI Hong, WEI Yingqi, et al. Scaling principle and method in seepage tests on coarse materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(2): 369-373. (in Chinese))
- [24] 朱国胜, 张家发, 陈劲松, 等. 宽级配粗粒土渗透试验尺寸效应及边壁效应研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(9): 2569-2574. (ZHU Guosheng, ZHANG Jiafa, CHEN Jinsong, et al. Study of size and wall effects in seepage test of broadly graded coarse materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(9): 2569-2574. (in Chinese))
- [25] 张丹, 邱子源, 金伟, 等. 粗粒土渗透及渗透变形试验缩尺方法研究[J]. 岩土力学, 2024, **45**(1): 164-172. (ZHANG Dan, QIU Ziyuan, JIN Wei, et al. Study on scale method of coarse soils seepage and seepage stability test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, **45**(1): 164-172. (in Chinese))
- [26] LI M. Seepage Induced Instability in Widely Graded Soils[D]. Vancouver BC: University of British Columbia, 2008.
- [27] MOFFAT R M, FANNIN R J, GARNER S J. Spatial and temporal progression of internal erosion in cohesionless soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(3): 399-412.
- [28] 田大浪, 谢强, 宁越, 等. 间断级配砂砾石土的渗透变形试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(11): 3663-3670. (TIAN Dalang, XIE Qiang, NING Yue, et al. Experimental investigation on seepage deformation of gap-graded sand-gravel soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(11): 3663-3670. (in Chinese))
- [29] 樊茹玉. 潜蚀发生后可诱发不均匀沉降的内部不稳定土体的颗粒级配特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2021. (FAN Ruyu. Study on Grain Size Distribution Characteristics of Internally Unstable Soil Causing Non-Uniform Settlement after Suffusion[D]. Nanjing: Hohai University, 2021. (in Chinese))