

DOI: 10.11779/CJGE2022S2009

特高心墙坝岸坡接触黏土层变形特性离心模型试验研究

程瑞林^{1,2}, 慕洪友¹, 顾行文^{*3,4}, 任国峰^{3,4}, 王年香^{3,4}

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 2. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072;

3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 4. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 通过 4 组特高心墙坝岸坡接触黏土层离心模型试验, 分析了岸坡不同位置处接触黏土与心墙在坝体填筑加载过程中的变形, 以及变形在竣工后的发展情况。试验结果表明: 接触黏土层与岸坡、心墙土体之间的相对变形较小, 没有分离现象, 变形协调性较好; 上覆荷载引起接触黏土产生垂直岸坡的压缩变形和平行岸坡的剪切变形, 压缩和剪切变形均随荷载对数线性增加, 接触黏土始终处于压剪状态; 变形随荷载的发展程度, 在坝基坡度较缓时较小, 坝基坡度较陡时较大, 在坝基坡度变化处则介于两者之间; 接触黏土层的变形在竣工后渐趋稳定。

关键词: 特高心墙坝; 接触黏土; 变形特性; 离心模型试验; 变形协调

中图分类号: TV641.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0040-05

作者简介: 程瑞林(1980—)男, 湖北鄂州人, 正高级工程师, 从事水利水电工程勘测设计及高土石坝安全方面的研究工作。E-mail: 42900174@qq.com。

Centrifugal model tests on deformation behavior of contact clay of ultra-high core dams

CHENG Rui-ling^{1,2}, MU Hong-you¹, GU Xing-wen^{3,4}, REN Guo-feng^{3,4}, WANG Nian-xiang^{3,4}

(1. PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China; 2. School of Water Resources and hydropower,

Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing

210024, China; 4. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to study the deformation behavior of contact clay of an ultra-high core dam, 4 groups of centrifugal model tests are carried out. The results show that the differential deformations among the contact clay, bank and core wall are acceptable, and no separation are observed at contact parts. The deformations of the contact clay caused by vertical loads include the compression deformations vertical to the bank and the shear ones parallel to the bank. The contact clay is in the compression-shear state. The compression and shear deformations both increase with the loads in a log-linear trend. This trend is greater at steeper bank slope. The deformation development of the contact clay gradually becomes stable after construction.

Key words: ultra-high core dam; contact clay; deformation behavior; centrifugal model test; deformation compatibility

0 引言

我国已建、在建的一批重大水利工程采用了特高心墙坝, 如苗尾(131.3 m)^[1]、毛尔盖(147 m)^[2]、长河坝(240 m)^[3]、糯扎渡(261.5 m)^[4]、两河口(295 m)^[5]、双江口(312 m)^[6]、如美(315 m)等。心墙坝具有就地取材、适应复杂地形、施工机械健全的优点, 但也存在一个直接关系到大坝安全性能的凸出技术难点: 接触黏土与岸坡和心墙变形协调性问题。对于高心墙堆石坝来说, 接触界面处复杂的应力和变形条件及可能存在的剪切裂缝, 是导致事故发生的可能原因。

接触黏土是心墙坝重要的特殊用途的土料。设置接触黏土的目的在于提高心墙与坝基岸坡接触部位抗

冲刷能力和抗裂性能, 保证心墙出现不均匀沉降时不与岸坡脱裂。接触黏土必须具备良好的塑性和黏性、良好的抗渗变形能力, 一般采用高塑性黏土填筑^[7-8]。

如美水电站位于西藏自治区芒康县境内, 是澜沧江上游河段(西藏境内河段)规划一库七级开发方案的第五个梯级。工程规模为一等大(I)型工程, 采用砾石土心墙堆石坝, 最大坝高 315 m。心墙与岸坡之间设置水平厚度 4 m 的接触黏土层。研究接触黏土层在大坝填筑期和运行条件下的变形特性, 分析是否有

基金项目: 贵州省高层次创新型人才项目([2018]5630); 贵州省科技支撑计划项目([2019]2869); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y321001, Y321002)

收稿日期: 2022-12-06

***通信作者** (E-mail: xwgu@nhri.cn)

大剪切变形及剪切裂缝的产生可能, 对于大坝的安全具有重要的理论和实际工程意义。因此, 本文重点关注不同坝高区域内高塑性接触黏土层在坝体填筑加载过程中的变形, 以及变形在竣工后的发展。

1 试验原理和设备

1.1 离心模型试验技术

土工离心模型试验技术^[9]是一项崭新的土工物理模型技术。通过施加在模型上的离心惯性力使模型的重度变大, 从而使模型的应力与原型一致, 这样就可以用模型反映、表示原型。离心模型是各类物理模型中相似性最好的模型。我国岩土力学的开拓者、两院院士黄文熙先生称“离心模型是土工模型试验技术发展的里程碑”^[10]。

1.2 试验设备

试验在南京水利科学研究院 NHRI60gt 中型土工离心机上开展。该机的有效半径 2 m, 最大加速度 200g, 最大负荷 300 kg; 配有 40 路应变信号和 20 路电压信号高精度数据采集系统, 以及图像实时监控采集系统。试验用模型箱的内部有效尺寸为 700 mm×450 mm×350 mm (长×高×宽), 其一侧面为有机玻璃窗口, 便于监控试验过程。

1.3 数据图像分析系统

通过数据图像分析 (PIV) 系统, 记录试验过程中土体照片, 该系统由高清摄像机、支持 POE 供电的 Hub、无线路由器、监视 PC 机组成。试验时, 通过摄像机透过模型箱一侧的有机玻璃板, 实时记录模型土体在试验过程中的变化情况。对模型土体变形照片进行镜头校正后, 应用 PIV 技术^[11]进行分析, 得到土体的变形情况。

2 试验方案

2.1 模型设计

如图 1 中虚线框所示, 沿着左侧坝基的岸坡, 选择了 4 个不同高程的位置, 开展 4 组接触黏土层变形特性离心模型试验 (表 1)。模型几何比尺为 1/20, 每组试验分别模拟了特定上覆压力下 (采用铅丸作为等效荷载), 高度为 6 m 范围内的接触黏土层和部分心墙土体的变形情况。模型的布置如图 2~4。

表 1 试验条件

Table 1 Details of tests

编号	高程/m	上覆压力/MPa	岸坡情况
L1	2850—2856	0.59	1 : 1.2
L2	2800—2806	1.23	1 : 1.2
L3	2764—2770	1.56	变坡处
L4	2710—2716	2.33	1 : 0.85

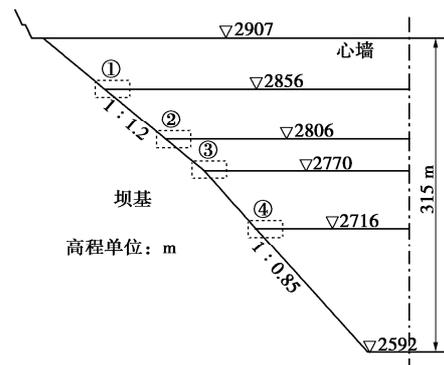


图 1 试验模拟位置示意图

Fig. 1 Model locations

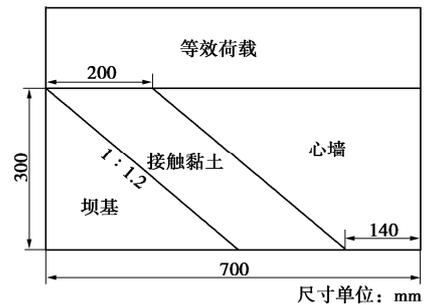


图 2 模型布置图 (L1, L2)

Fig. 2 Model setup (L1, L2)

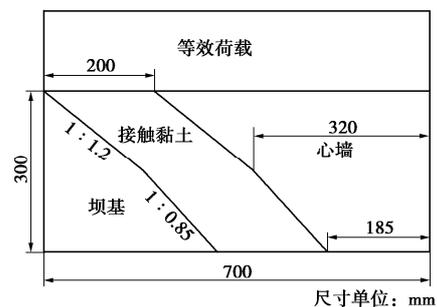


图 3 模型布置图 (L3)

Fig. 3 Model setup (L3)

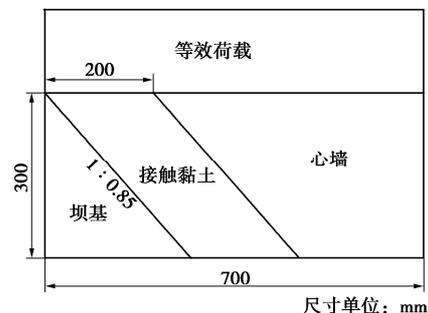


图 4 模型布置图 (L4)

Fig. 4 Model setup (L4)

2.2 试验土料

试验需要模拟岸坡、接触黏土层、心墙。岸坡采用混凝土模拟。接触黏土和心墙土料均取自工程现场, 级配如图 5。

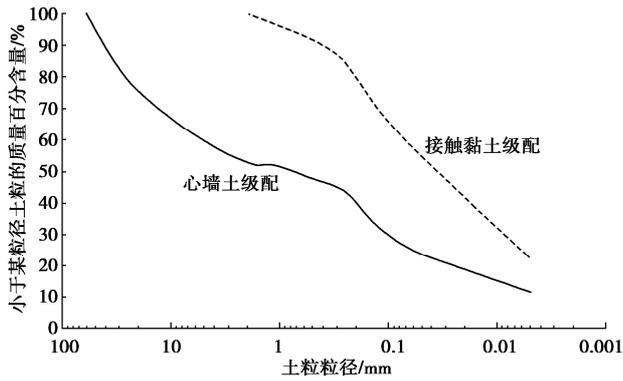


图5 试验土料级配曲线

Fig. 5 Grain-size distribution curves of soils

2.3 试验过程

(1) 在模型箱内浇筑混凝土,充分振捣、整平后进行养护(28 d 以上),模拟河谷左侧的岸坡。

(2) 整理接触黏土和心墙防渗料(5 mm 以下),剔除杂质,密封 24 h 后,采用四分法取样测定风干含水率^[12];再按施工含水率分别进行配制,密封 24 h 以上备用。

(3) 采用先分层击实再切削成的方法制备接触黏土层。接触黏土施工含水率为 14%,按 98% 压实度控制,制样干密度约为 1.93 g/cm³。

(4) 采用分层击实法制备防渗心墙。5 mm 以下粒径心墙土料按照含水率 6.3% 配制,掺入 5 mm 以上级配料,拌和均匀后,加入模型箱中击实。击实时按 98% 压实度控制,制样干密度约为 2.15 g/cm³。

(5) 打开模型箱侧面有机玻璃,在模型土体侧面绘制变形网格和标记点。

(6) 安装模型箱侧面有机玻璃面(其上布置有固定的参考点,用于在 PIV 分析中把像素坐标转换为实际坐标),在模型土体上部加铅丸,模拟上部坝体的应力。将制备好的模型吊入离心机吊篮平台,调整配重。

(7) 开启离心机,逐级提高离心加速度至设计值,增加铅丸的自重,对模型进行分级加载,加载至设计上覆压力即认为上覆荷载施加稳定,而后稳定运行 4 h (相当于原型约 66.7 d),模拟长期稳定荷载作用。试验期间记录土体的图像。加载过程如表 2。

(8) 试验完成后停机。

表 2 试验过程

Table 2 Loading procedures of tests

编号	上覆压力/MPa	逐级加载过程/kPa (至设计压力后运行 4 h)
L1	0.59	0→148→295→442→590
L2	1.23	0→308→615→922→1230
L3	1.56	0→390→780→1170→1560
L4	2.33	0→518→1036→1553→1942→2330

3 试验结果

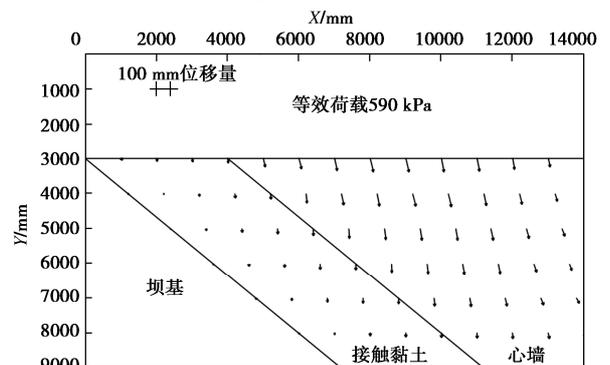
本文给出的试验结果均已换算至原型。

3.1 变形矢量图和网格图

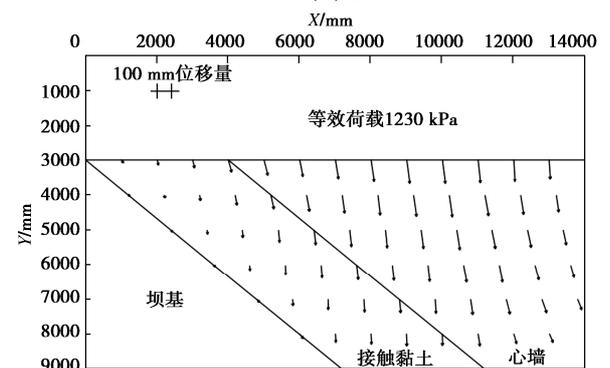
图 6 给出了 4 组模型填筑完成时(加载至设计上覆荷载)的土体变形矢量场(放大 4 倍)。可以直观地看出:上覆荷载越大变形越大;心墙土体在荷载下产生以竖向下沉为主的变形;接触黏土层与岸坡之间的相对变形较小,有轻微错动但没有明显的分离现象;接触黏土与心墙土体之间也没有错动,土体的变形是协调的。

3.2 接触黏土变形分解

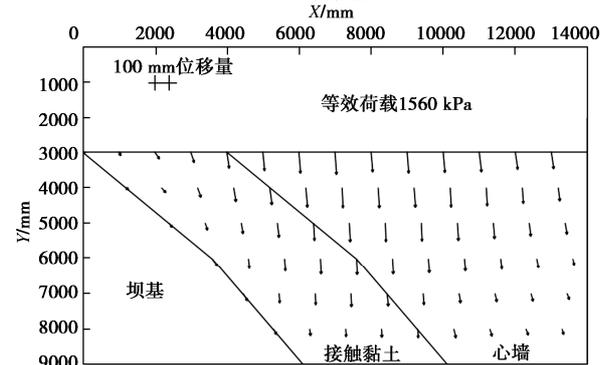
如图 7 所示,接触黏土在荷载作用下发生了变形,对于接触黏土层中的某一点,变形量可以分解为沿坝基切向的剪切变形和沿坝基法向的压缩变形。本文选择模型顶部接触黏土与心墙结合点(土体变形最大点)进行分解,以开展进一步的分析。



(a) L1



(b) L2



(c) L3

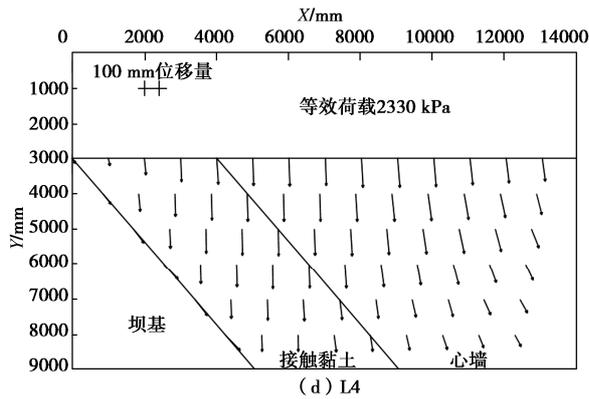


图 6 填筑完成时的变形矢量场 (放大 4 倍)

Fig. 6 Vector fields at completion moment (magnification of 4 times)

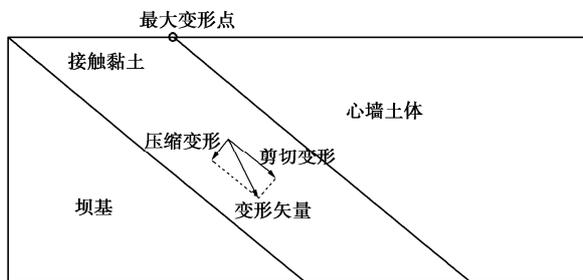


图 7 土体变形分解示意图

Fig. 7 Decomposition of soil deformation

图 8 和图 9 给出了 4 组局部模型接触黏土最大压缩变形和剪切变形与上覆荷载的关系。可以发现：①接触黏土变形随着荷载逐渐增加，大体呈现出随着荷载对数线性增加的趋势；②压缩变形和剪切变形大体相当，接触黏土处于压剪状态；③接触黏土变形随荷载的发展程度，在坝基坡度较缓时较小，坝基坡度较陡时较大，在坡度变化处则介于两者之间。

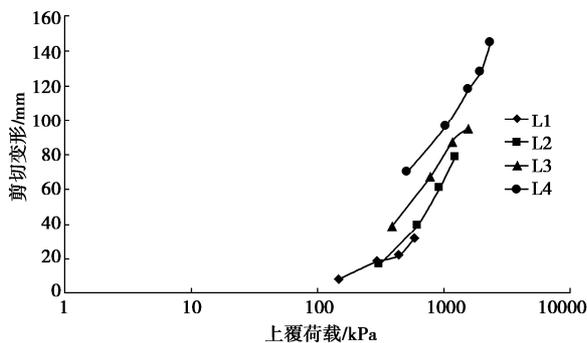


图 8 最大剪切变形与上覆荷载的关系

Fig. 8 Relationship between shear deformation and vertical load

3.3 接触黏土长期变形规律

图 10 和图 11 给出了坝体填筑完成后运行期接触黏土最大压缩变形和剪切变形随时间的发展情况。接触黏土层的压缩和剪切变形在运行期初期有所增加，而后增长速度较慢，平均约为 0.8 mm/d；在试验所模

拟的约 66.7 d 时间内，变形渐趋稳定，且始终保持压剪状态。

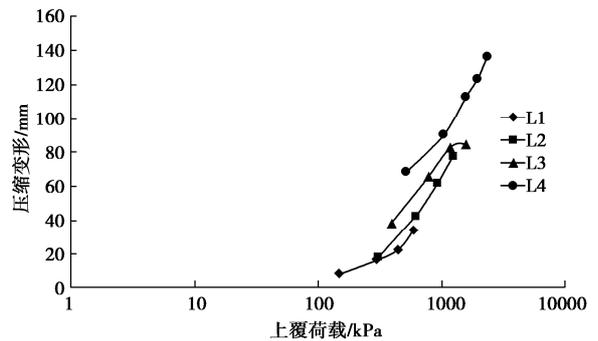


图 9 最大压缩变形与上覆荷载的关系

Fig. 9 Relationship between compression deformation and vertical load

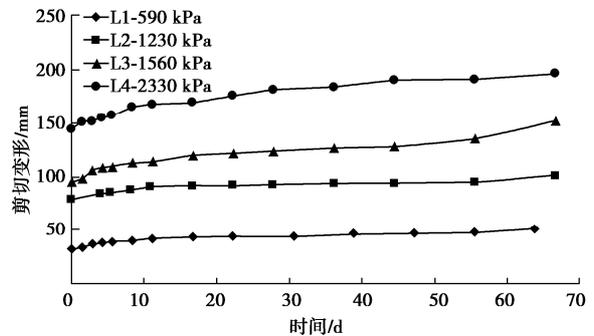


图 10 上覆荷载稳定后剪切变形随时间的发展

Fig. 10 Development of shear deformation after completion

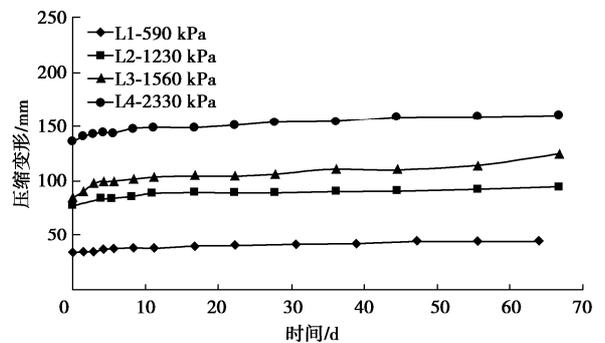


图 11 上覆荷载稳定后压缩变形随时间的发展

Fig. 11 Development of compression deformation after completion

4 结 论

通过 4 组局部模型试验，得到以下结论：

(1) 接触黏土层与岸坡之间的相对变形较小，有轻微错动但没有明显的分离现象；接触黏土与心墙土体之间也没有错动，土体的变形是协调的。

(2) 上覆荷载引起接触黏土产生垂直坝基的压缩变形和平行坝基的剪切变形，荷载越大变形越大；压缩和剪切变形均大体呈现出随着荷载对数线性增加的

规律。

(3)接触黏土变形随荷载的发展程度随岸坡的坡度而加剧,在坝基坡度较缓时较小,坝基坡度较陡时较大,在坝基坡度变化处则介于两者之间。

(4)填筑完成后的运行期,接触黏土层的压缩和剪切变形在初期有所增加,而后变形增长速度较慢,平均约为0.8 mm/d;在试验所模拟的约66.7 d时间内,变形渐趋稳定。

(5)填筑过程和运行期,接触黏土层压缩变形和剪切变形大体相当,接触黏土始终处于压剪状态。

参考文献:

- [1] 孟永旭,董育烦,尹飞,等.苗尾水电站心墙坝接触土料质量控制指标探析[J].岩土工程技术,2020,34(6):325-328.(MENG Yong-xu,DONG Yu-fan,YIN Fei,et al. Quality control index for contact caly in core wall dam of Miaowei hydropower project [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2020, 34(6): 325 - 328. (in Chinese)).
- [2] 谢红英,王达会,张连明.毛尔盖水电站防渗墙结构设计[J].四川水力发电,2011,30(增刊 2):249-252.(XIE Hong-ying,WANG Da-hui,ZHANG Lian-ming. Structural design cutoff wall of Mao'ergai Hydropower Station[J]. Sichuan Water Power, 2011, 30(S2): 249 - 252. (in Chinese))
- [3] 保华富,庞桂,王坤,等.大坝心墙接触黏土工程特性试验研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(6):56-60.(BAO Hua-fu,PANG Gui,WANG Kun,et al. Test study for engineering characteristics of contact clay of dam core wall[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(6): 56 - 60. (in Chinese))
- [4] 马洪琪.糯扎渡水电站掺砾黏土心墙堆石坝质量控制关键技术[J].水力发电,2012,38(9):12-15.(MA Hong-qi. Key technologies on construction quality control of rockfill dam with core wall filled by clay soil mixed with gravel in Nuozhadu hydropower station project[J]. Water Power, 2012, 38(9): 12 - 15. (in Chinese))
- [5] 欧阳学金.两河口水电站心墙堆石坝防渗心墙料的研究[J].中国水能及电气化,2014(8):67-70.(OUYANG Xue-jin. Research of core wall rock-fill dam anti-seepage core wall materials in Lianghekou hydropower station [J]. China Water Power & Electrification, 2014(8): 67 - 70. (in Chinese))
- [6] 李鹏.双江口水电站特高心墙堆石坝建设关键技术研究[J].水电与新能源,2020,34(2):1-9.(LI Peng. Research on key techniques for the construction of ultra-high core wall rockfill dam in Shuangjiangkou hydropower station[J]. Hydropower and New Energy, 2020, 34(2): 1 - 9. (in Chinese))
- [7] 碾压式土石坝设计规范:SL 274—2020[S].2020.(Design Code for Rolled Earth-Rock Fill Dams: SL 274—2020[S]. 2020. (in Chinese))
- [8] 碾压式土石坝施工规范:DL/T 5129—2013[S].2013.(Specifications for Rolled Earth-Rock Fill Dam Construction: DL/T 5129—2013[S]. 2013. (in Chinese))
- [9] TAYLOR R N. Geotechnical Centrifuge Technology[M]. London: Blackie Academic & Professional, 1985.
- [10] 朱维新.土工离心模型试验研究状况[J].岩土工程学报,1986,8(2):82-90.(ZHU Wei-xin. Centrifugal modelling for geotechnical engineering in the world[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(2): 82 - 90. (in Chinese))
- [11] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 619 - 631.
- [12] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].2019.(Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))

(编校:明经平)