

DOI: 10.11779/CJGE2023S10023

探讨低围压条件下如何准确测试土体强度

李小梅¹, 凌小东², 王芳¹, 米占宽¹, 占鑫杰¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024; 2. 南京工业大学海外教育学院, 江苏南京 211816)

摘要: 准确测试土体的强度指标对地基基础的受力变形分析、稳定计算具有重要意义, 对低围压(小于100 kPa)条件下的三轴试验而言, 压力室传力杆的活塞摩擦、橡皮膜的径向约束不可忽视, 同时设备的测试精度及量程也是应当考虑的重要影响因素。试图通过开展不同条件下的无侧限抗压强度试验、不同设备的三轴剪切试验等测试方案探讨活塞摩擦、橡皮膜等因素对测试结果的影响程度, 探讨根据现有的测试条件如何测得试样的抗压及抗剪强度, 为设计施工及数值计算提供可靠数据。针对国产三轴测试设备存在的不足提出了合理化建议, 期望三轴测试设备从机械制造上进一步改造升级, 推动中国精密三轴测试设备的研发。

关键词: 低围压; 活塞摩擦; 橡皮膜; 量程; 三轴试验

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0148-05

作者简介: 李小梅(1986—), 女, 河南新乡人, 博士, 高级工程师, 从事土的基本特性、测试技术及标准化研究。E-mail: xmli@nhri.cn。

On how to accurately testing compressive strength of soils under low confining pressure

LI Xiaomei¹, LING Xiaodong², WANG Fang¹, MI Zhankuan¹, ZHAN Xinjie¹

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China, 2. College of Overseas Education, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: It is important to study the stress deformation and stability of foundation by accurately testing the strength index of soils. For the triaxial tests under low confining pressures (less than 100 kPa), the influences of the piston friction and the rubber membrane can not be ignored. At the same time, the test accuracy and measuring range of equipments are also the important factors that should be considered. This study attempts to explore the influences of factors such as the piston friction and the rubber membrane on the test results by carrying out unconfined compressive strength tests under different conditions and triaxial consolidated undrained shear tests of different equipments, and to explore how to measure the compressive and shear strengths of samples according to the existing test conditions, so as to provide reliable data for design, construction and numerical calculation. In view of the shortcomings of domestic triaxial test equipments, reasonable suggestions are put forward, and it is expected that the triaxial test equipments should be further transformed and upgraded from mechanical manufacturing so as to promote the researches and development of precise triaxial test equipments in China.

Key words: low confining pressure; piston friction; rubber membrane; measuring range; triaxial test

0 引言

土工测试技术是岩土工程学科发展的根本动力, 随着中国各类工程建设高、大、深、重的发展趋势, 科技工作者更多追求高温、高压、高频、高荷等技术性能^[1-3], 使得土工测试技术发生日新月异的变化同时也取得了显著的成绩。但是, 据调研分析, 测试技术先进、精度高、性能稳定、技术成熟的三轴测试设备基本通过进口国外GDS、VJ-TECH、GCTS、GEOCOMP等厂家的设备来满足科研需求。目前中国现有三轴测试设备在精细化测试方面与国外相比尚有诸多需要改

进提高的方面, 比如体变、孔压、变形及加载的控制精度、测试性能的稳定性、水下力传感器的研发、设备软件硬件等, 因此有针对性、有目标的提高中国三轴测试设备的基础研制能力显得十分必要。

随着中国经济社会的快速高效发展, 铁路、公路、堤防、市政管线、箱涵、海底输油管道等民生工程不断发展完善, 上述民生工程中土体所处的应力水平较低^[4-6]。低应力状态下开展三轴试验所用橡皮膜的径向约束对试样强度的影响比较大^[7-8], 通过采取对橡皮膜

影响进行修正^[9-10]措施达到了一定的效果。而低应力状态下开展三轴试验对测试设备的精度及测试技术提出了更高要求^[9, 11], 但目前三轴试验系统的加载精度及系统的非线性摩擦是影响测试结果的重要影响因素, 有学者也采取了非线性补偿控制策略、数字图像测量技术^[12-13]等措施在一定程度上改善了试验系统的控制及测试精度, 但未能从机械制造层面改进设备。

鉴于目前开展低围压条件下三轴试验存在测试精度不足的问题, 笔者通过开展不同试验条件下的无侧限抗压试验探讨外置力传感器的活塞摩阻及橡皮膜径向约束对试验结果的影响程度, 同时采用外置力传感器的国产三轴仪及内置力传感器的GDS三轴仪平行开展了4组试样在低围压条件下的三轴固结不排水剪切试验探讨了外置力传感器活塞摩阻对破坏强度、强度指标的影响, 根据试验过程中的经验教训, 提出了一些合理化建议, 但更多期望三轴测试设备从机械制造上有进一步的改造升级, 推动中国精密三轴测试设备的研发进步。

1 试验方案

1.1 试验土样及制备

试验土样包括2组, 其中土样1-1取自江苏无锡某填土工程, 其细粒含量为47.6%, 黏粒含量为4.3%, 工程分类为粉土质砂(SM); 土样1-2取自山东淄博某人防工程, 其粗粒含量为28.4%, 工程分类为含砂低液限黏土(CLS)。土样1-1及1-2的相关物理性指标详见表1, 颗粒级配曲线如图1所示。将试验土样风干碾散, 并过2 mm筛, 按照最优含水率配制, 将拌制好的土样密封浸润一昼夜, 测其真实含水率。试样直径39.1 mm、高80 mm, 按压实度0.90制备试样, 试样分3层静压法制备, 然后对试样进行真空抽气饱和。

表1 试验土样物理指标汇总表

Table 1 Physical indices of soil samples

试样 编号	G_s	$w_l/$ %	$w_p/$ %	I_p	$\rho_{dmax}/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	$w_{op}/$ %	工程 分类
1-1	2.72	33.6	19.8	13.8	1.54	21.0	SM
1-2	2.70	32.6	18.7	13.9	1.78	17.8	CLS

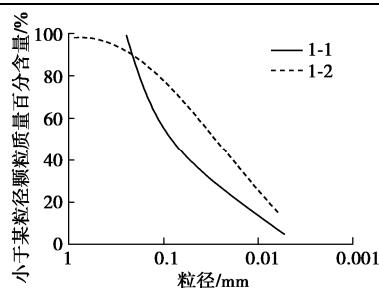


图1 试验土样颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of soil samples

1.2 试验方案

三轴试验采用国产全自动三轴仪、GDS三轴仪分别开展, 均采用应变控制方式, 国产三轴仪的轴向力传感器为外置式, 通过活塞传力杆传递轴向力, 精度为 $\pm 0.5\%FS$, GDS三轴仪的轴向力传感器为内置式, 其在压力室内与试样直接接触测得轴向力, 精度为 $\pm 0.1\%FS$, 二者量程均为10 kN。国产及GDS三轴仪均通过底座测试样剪切过程中的孔压, 孔压传感器量程均为2 MPa, 二者的围压控制器量程也为2 MPa, 前者精度为 $\pm 0.5\%FS$, 后者精度为 $\pm 0.1\%FS$, 试验设备如图2所示, 具体试验方案详见表2。方案1, 2, 3采用同一国产三轴仪开展抗压强度试验, 剪切速率为1.0 mm/min, 方案1与方案2的区别在于是否放置压力室, 压力室的存在使得剪切过程中活塞传力杆的摩擦阻力对抗压强度有影响, 方案3比方案2增加了橡皮膜的径向约束。方案4及方案5针对土样1-1、方案6及方案7针对土样1-2分别采用不同的三轴设备开展三轴CU试验。

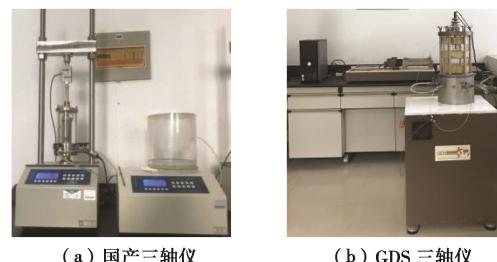


图2 三轴仪

Fig. 2 Triaxial apparatus

表2 试验方案汇总表

Table 2 Summary of test scheme

方案 序号	试样 编号	压实 度	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	围压 σ_3/kPa	试验条件
1	1-1-1	0.9	1.39	—	无侧限抗压
2	1-1-2	0.9	1.39	—	压力室内无侧限
3	1-1-3	0.9	1.39	—	压力室内套橡皮膜
4	1-1-4	0.9	1.39	—	三轴CU, 国产三轴
5	1-1-5	0.9	1.39	10, 20,	三轴CU, GDS三轴
6	1-2-1	0.9	—	40, 60	三轴CU, 国产三轴
7	1-2-2	0.9	1.60	—	三轴CU, GDS三轴

2 试验结果及分析

2.1 不同条件下的抗压强度

常规无侧限抗压强度试验无需安装压力室、试样无需套橡皮膜, 本文为研究国产三轴仪试验时的活塞摩阻及橡皮膜的影响, 笔者试图对试样1-1-1, 1-1-2, 1-1-3开展3种不同试验条件下的无侧限抗压强度试验, 3个试样均在同一台三轴仪上开展, 剪切速率为1.0 mm/min。对试样1-1-1进行常规的无侧限抗

压强度试验, 作为另 2 个试样的参考对象。试样 1-1-2 则开展压力室内的无侧限抗压强度试验, 与试样 1-1-1 相比, 增加了压力室活塞传力杆的摩阻作用, 三轴压力室的活塞传力杆在无荷载作用下处于可自由滑落的状态。试样 1-1-3 与 1-1-2 相比, 试样套了橡皮膜, 橡皮膜的厚度为 0.3mm, 橡皮膜的内半周长为 61.1 mm。试验结果详见图 3。

由图 3 可以发现:

(1) 试样 1-1-2 与 1-1-1 相比, 抗压强度曲线在轴应变小于 7% 内存在一定的波动, 虽然活塞传力杆处于可以自由滑落的状态, 但活塞传力杆的均匀性及光滑度还有待提高, 这是三轴仪机械制造上的更高技术要求; 试样 1-1-1, 1-1-2 在轴向应变 15% 时对应的强度分别为 13.98, 18.24 kPa, 试样 1-1-2 的抗压强度增加了 30.5%。

(2) 试样 1-1-3 与 1-1-2 相比, 曲线形态相似, 均存在一定波动, 但试样 1-1-3 在较小应变时强度增长较快, 在轴向应变达 3% 时, 强度增长速度趋缓, 二者在轴向应变 4%~15% 内近乎平行, 试样 1-1-2, 1-1-3 在轴向应变 15% 时对应的强度分别为 18.24, 26.84 kPa, 试样 1-1-3 的抗压强度较 1-1-2 增加了 47.1%。

(3) 轴向力传感器的量程为 10 kN, 精度为 $\pm 0.5\%FS$, 针对直径 39.1 mm 的试样而言, 最大允许误差为 ± 41.7 kPa, 对于无侧限抗压强度试验来讲, 传感器的量程过大, 为准确测得试样的无侧限抗压强度, 根据试样的密度大小, 应选择一款合适量程的传感器方可满足测试精度要求。

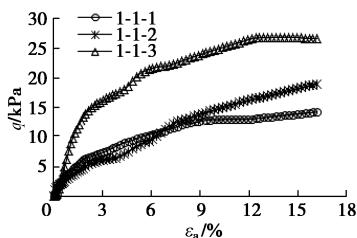


图 3 不同条件下抗压强度应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of compressive strength under different conditions

综上, 通过设置不同试验条件的抗压强度试验发现活塞传力杆的摩阻及橡皮膜的径向约束对实验结果的影响不可忽视。为测得较为准确的试验数据, 尽可能减少试验结果外部因素的影响。由于每台三轴仪活塞传力杆的摩阻大小不一、橡皮膜厚度及尺寸是影响试验结果的直接外在因素。试验前应检查压力室活塞传力杆的工作状态, 若能满足自由滑落是较好的状态。橡皮膜的影响可以考虑对其修正, 其内周长尽可能选择与试样周长接近, 建议内周长为 120~123 mm, 橡

皮膜的厚度根据试样粒径大小确定, 试样含较多粗粒则选用 1 mm 厚, 细颗粒越多则可选用 0.3 mm 厚的橡皮膜。

2.2 总应力强度

由于孔隙水压力的测试结果不受活塞摩阻的影响, 本文不再讨论有效应力强度。为探讨传力杆活塞摩阻在三轴剪切试验中的影响, 对土样 1-1, 1-2 分别在国产三轴仪及 GDS 三轴仪上开展三轴固结不排水剪切试验, 为方便比较, 每级围压条件下破坏点的取值统一按有峰值取峰值、无峰值取轴向应变 15% 对应的强度作为破坏点强度。一组三轴 CU 试验包含 4 个围压, 为方便清晰对比不同设备测得的试验结果之间差异, 将此两台设备在围压 10, 40 kPa 及 20, 60 kPa 作用下的应力应变曲线分别绘制在 2 张图中展示。三轴试验结果详见表 3, 图 4~6。

表 3 三轴试验结果汇总表
Table 3 Summary of triaxial test results

试样 编号	总应力强度指标		不同围压下破坏点强度 q/kPa			
	c_{cu}/kPa	$\phi_{cu}/(^{\circ})$	10 kPa	20 kPa	40 kPa	60 kPa
1-1-4	16	25.8	71.3	78.5	108.5	147.4
1-1-5	13	22.8	48.9	65.7	90.8	117.5
1-2-1	10	18.7	31.1	48.0	65.0	83.5
1-2-2	6	15.8	23.8	32.0	49.0	60.8

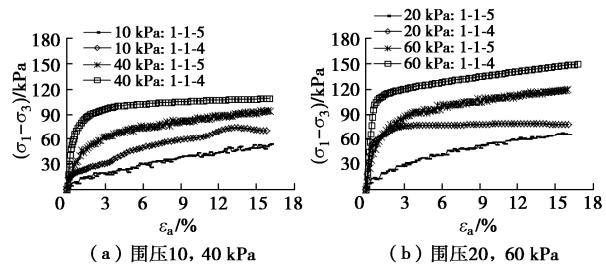


图 4 试样 1-1-4 和 1-1-5 的应力应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves of samples 1-1-4 and 1-1-5

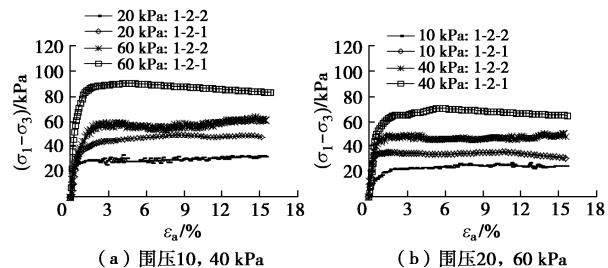


图 5 试样 1-2-1 和 1-2-2 的应力应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves of samples 1-2-1 and 1-2-2

由表 3 发现, 每级围压下试样 1-1-4 的破坏点强度及总应力强度指标均大于试样 1-1-5, 1-2-1 的破坏点强度及总应力强度指标均大于试样 1-2-2。试样 1-1-4, 1-2-1 在国产三轴仪上测试、试样 1-1-5, 1-2-2 在 GDS 三轴仪上测试, 二者的主要区别在于轴向力的测

试方法上, 通过对 4 组三轴试验结果, 对小于 100 kPa 低围压条件下的破坏点强度, 国产三轴仪相对 GDS 三轴仪增长 19.5%~50.0%。总应力强度指标中, 土样 1-1, 1-2 的黏聚力分别增大 23.1%, 66.7%, 内摩擦角分别增大 13.2%, 18.4%。上述误差除了仪器本身的系统误差外, 活塞传力杆的摩擦阻力对其破坏点强度、总应力强度指标具有较大贡献。由于试验围压较小, 试样的破坏强度较低, 活塞摩阻的影响不可忽视, 如何较为准确的测试低围压条件下的抗剪强度尚存在诸多困难。

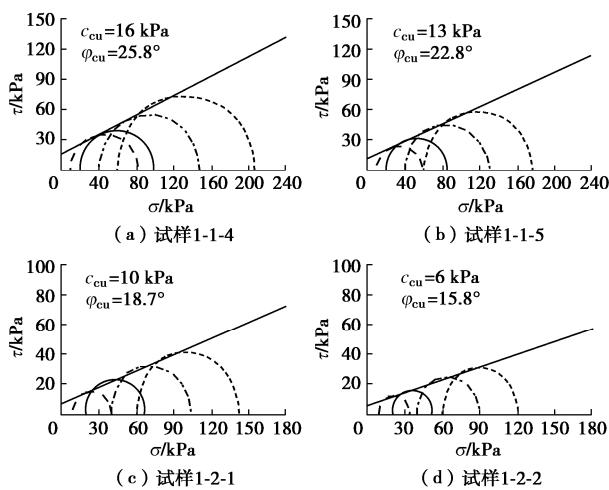


图 6 总应力强度包络线

Fig. 6 Envelopes of total stress intensity

从应力应变曲线发现, 试样 1-1-4, 1-2-1 的抗剪强度在开始剪切阶段较试样 1-1-5, 1-2-2 增长速度快, 主要由于试样开始剪切时需要克服活塞摩阻, 而且在 10, 20 kPa 围压作用下的整个剪切过程中应力应变曲线存在起伏较大, 这是由于活塞摩阻不均导致。试样 1-1-5, 1-2-2 的应力应变曲线存在波动主要因为 GDS 力传感器精度及敏感性高, 而且采集数据过于密集。由于试样 1-1-4, 1-2-1 较 1-1-5, 1-2-2 的破坏强度高, 导致其莫尔圆较大, 总应力强度包络线的截距及斜率也较大, 高估了土样的总应力强度指标。

综上, 三轴试验中活塞摩阻的影响导致破坏点强度增大, 高估了总应力强度指标, 对工程设计、数值分析偏于危险, 直接使用试验结果存在较大安全隐患, 显然克服或改善活塞摩阻是较为准确测试低围压 (小于 100 kPa) 下土体强度的一个值得关注的重要方面。

3 低围压条件下三轴试验的技术难题

通过前文试验研究发现, 国产三轴设备尚存在如下技术难题:

(1) 压力室活塞传力杆在机械制造上存在诸多不

足, 比如材质、粗糙度、圆度、均匀性等方面有待提升, 制造精度及标准的提高是减小摩阻的关键所在。

(2) 活塞传力杆的密封问题也是影响摩擦阻力的一个重要因素, 目前大多采用橡皮圈密封, 在紧固件拧紧时, 橡皮圈受压变形与传力杆结合起到密封效果, 但二者接触部位的松紧程度直接决定摩阻的大小。

(3) 外置传感器的存在无法避免活塞传力杆摩擦阻力的影响, 可以考虑借鉴 GDS 三轴仪内置力传感器的构造对国产三轴仪进行升级改造, 这样就可以有效避免或改善活塞摩阻的影响, 提高测试准确度。

(4) 三轴试验橡皮膜的径向约束可以考虑借鉴文献 [7~10] 中的方法进行适当修正, 建议尽可能选择尺寸合适、厚薄适中, 橡皮膜的厚度不至于试验未结束膜破导致试验失败即可。

(5) 传感器及控制器的量程也是重要的影响因素, 开展试验需配备量程适中的传感器及控制器方能保证测试准确度, 建议测试结果在量程 (10~80)% 范围内。

4 结论及建议

通过开展不同试验条件下的无侧限抗压试验及不同设备的三轴 CU 试验, 分析探讨了活塞传力杆摩阻及橡皮膜的径向约束对试验结果的影响, 得出 4 点结论并提出了一些合理化建议。

(1) 传力杆的活塞摩阻使得无侧限抗压强度增加了 30.5%, 低围压条件下, 活塞传力杆的摩阻使得试样的抗剪强度增大, 高估了总应力强度指标, 黏聚力增大 23.1%~66.7%, 内摩擦角增大 13.2%~18.4%。由于每台三轴仪活塞传力杆的摩阻大小不一, 试验前应检查压力室活塞传力杆的工作状态, 若能满足自由滑落是较好的状态。

(2) 橡皮膜的厚度及尺寸是影响试验结果的直接外在因素, 建议橡皮膜内周长为 120~123 mm, 橡皮膜的厚度根据试样的粒径大小确定, 试样含较多粗粒则选用 1 mm 厚的橡皮膜, 试样的细颗粒越多则可选用 0.3 mm 厚的橡皮膜; 由于橡皮膜的径向约束在低围压 (小于 100 kPa) 条件下对试样破坏强度的影响较大, 建议开展橡皮膜修正。

(3) 开展低围压条件下的三轴试验时, 建议配置量程合适的传感器及控制器, 测试结果在量程的 (10~80)% 内。

(4) 期望国产三轴仪在机械制造上有新突破, 研发国产内置力传感器, 克服外置力传感器传力杆活塞摩阻的影响, 实现较为精确地测试土体抗剪强度。

参考文献：

- [1] 宁祚良, 陈刚, 陈旭. 多轴试验测试技术的发展与应用[J]. 机械工程学报, 2021, **57**(16): 16-36. (NING Zuoliang, CHEN Gang, CHEN Xu. Development and application of multiaxial testing technique[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, **57**(16): 16-36. (in Chinese))
- [2] 蔡正银, 周宏磊, 蔡国军, 等. 土工测试与勘察技术研究进展[J]. 土木工程学报, 2020, **53**(5): 100-117. (CAI Zhengyin, ZHOU Honglei, CAI Guojun, et al. Review of the geotechnical testing and exploration techniques[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, **53**(5): 100-117. (in Chinese))
- [3] 郭万里, 朱俊高, 王俊杰, 等. 粗粒土静力特性及室内测试技术研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(增刊 2): 3570-3585. (GUO Wanli, ZHU Jungao, WANG Junjie, et al. Research progress on static properties and laboratory testing technology of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(S2): 3570-3585. (in Chinese))
- [4] 肖晓, 冯秀丽, 林霖, 等. 低围压下埕北海域重塑粉土振动孔压模型试验研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, **40**(4): 214-222. (XIAO Xiao, FENG Xiuli, LIN Lin, et al. An experimental research of vibration pore water pressure of remolded silt under low confining pressure: a case from Chengbei Sea area[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, **40**(4): 214-222. (in Chinese))
- [5] GU L L, WANG Z, HOSOYA A H, et al. Dilatancy and liquefaction behaviour of clean sand at wide range of confining stresses[J]. Journal of Central South University, 2020, **27**(8): 2394-2407.
- [6] 聂如松, 董俊利, 程龙虎, 等. 重载铁路基床填料低围压静三轴试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, **16**(11): 2707-2715. (NIE RongSong, DONG Junli, CHENG Longhu, et al. The study on static triaxial test of heavy haul railway filler of subgrade roadbed under low confining pressure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, **16**(11): 2707-2715. (in Chinese))
- [7] 方涤华, 夏怀祖. 三轴压缩试验中活塞摩擦和橡皮膜的影响[J]. 大坝观测与土工测试, 1989(5): 27-32, 36. (FANG Dihua, XIA Huaizu. Influence of piston friction and rubber membrane in triaxial tests[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 1989(5): 27-32, 36. (in Chinese))
- [8] 郭爱国, 茜平一. 三轴压缩试验中橡皮膜约束影响的校正[J]. 岩土力学, 2002, **23**(4): 442-445. (GUO Aiguo, QIAN Pingyi. Corrections for influence of membrane restraint in triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(4): 442-445. (in Chinese))
- [9] 肖杰, 杨和平, 林京松, 等. 模拟干湿循环及含低围压条件的膨胀土三轴试验[J]. 中国公路学报, 2019, **32**(1): 21-28. (XIAO Jie, YANG Heping, LIN Jingsong, et al. Simulating wet-dry cycles and low confining pressures triaxial test on expansive soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, **32**(1): 21-28. (in Chinese))
- [10] FUKUSHIMA S, TATSUOKA F. Strength and deformation characteristics of saturated sand at extremely low pressures[J]. Soils and Foundations, 1984, **24**(4): 30-48.
- [11] 邹维列, 陈轮, 张俊峰, 等. 低围压水平下 QH-E 模拟月壤三轴试验技术与力学特性[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(8): 1418-1425. (ZOU Weilie, CHEN Lun, ZHANG Junfeng, et al. Techniques for triaxial compression tests on simulant lunar soil QH-E and its mechanical behaviors under low confining stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(8): 1418-1425. (in Chinese))
- [12] 王鹏鹏. 土工三轴试验系统非线性补偿控制与变形场测量[D]. 大连: 大连理工大学, 2020. (WANG Pengpeng. Nonlinear Compensation Control and Deformation Field Measurement in Geotechnical Triaxial Experiment System[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [13] 刘潇. 三轴试验土样全表面变形测量方法及其应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2012. (LIU Xiao. Method of Whole Surface Deformation Measurement for Soil Specimen In Triaxial Tests and its Application[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)