

DOI: 10.11779/CJGE2020S1042

适用于显微 CT 扫描的微型动三轴仪研制与试验验证

蒋明镜^{1, 2, 3, 4}, 吕 雷^{1, 2}, 石安宁^{1, 2}, 曹 培³, 吴晓峰³

(1. 天津大学建筑工程学院土木系, 天津 300072; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点试验室, 天津 300072; 3. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 4. 中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室(天津大学), 天津 300350)

摘 要: 土体的微观结构对其宏观力学性质有着很大的影响, 为了能更深入研究土体在循环荷载作用下的微观结构演化与其宏观力学特性之间的联系, 研制了一种适用于工业显微 CT (computerized tomography) 扫描的微型动三轴仪。该仪器主要由控制采集箱系统、主机系统、气水转换器组成。其具有体积较小、试样小型化(直径 \times 高=10 mm \times 20 mm)、便于操作、兼容性强等优点, 可在无需改装已有 CT 设备前提下对试样进行旋转扫描。以丰浦砂干砂样为材料, 采用微型和常规动三轴仪进行了不同围压(50, 100, 200, 300 kPa)和循环荷载作用下的不固结不排水试验, 并对测得的初始动弹性模量 E_0 , 动剪切模量 G_d , 阻尼比 λ 进行了对比分析。结果表明: 微型动三轴仪测得的初始动弹性模量 E_0 , 动剪切模量 G_d , 阻尼比 λ 与常规动三轴仪测得的结果基本相近。试验结果误差较小, 验证了该仪器的可靠性。

关键词: 微型动三轴仪; 显微 CT; 无损检测; 循环荷载; 微观力学特性

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2020)S1-0214-05

作者简介: 蒋明镜(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事天然结构性黏土、砂土、非饱和土、太空土和深海能源土宏微观试验、本构模型和数值分析研究。E-mail: mingjing.jiang@tju.edu.cn。

Development of miniature dynamic triaxial apparatus for micro CT scanning and its experimental verification

JIANG Ming-jing^{1, 2, 3, 4}, LÜ Lei^{1, 2}, SHI An-ning^{1, 2}, CAO Pei³, WU Xiao-feng³

(1. Department of Civil Engineering, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience of China Earthquake Administration (Tianjin University), Tianjin 300350, China)

Abstract: The microstructure of soil has a great influence on the macroscopic mechanical properties. Therefore, to study the relationship between the macroscopic mechanical properties and the microstructure evolution of soil under the cyclic loading, a miniature dynamic triaxial apparatus is developed, which is suitable for industrial micro CT (computerized tomography) scanning. The apparatus is mainly composed of the acquisition control system, loading device system, and air-liquid converter. It has the advantages of small volume, miniaturization of the specimen (diameter \times height=10 mm \times 20 mm), convenient to operate, strong compatibility, and the specimen can be rotating-scanned without refitting the existing CT equipment. By using the miniature dynamic triaxial apparatus and conventional dynamic triaxial apparatus, a series of unconsolidated-undrained triaxial tests on Toyoura sand under cyclic loading and different confining pressures (50, 100, 200 and 300 kPa) are carried out, and the initial dynamic elastic modulus (E_0), dynamic shear modulus (G_d) and damping ratio (λ) are comparatively analyzed. The results show that the experimental curves of the initial dynamic elastic modulus (E_0), dynamic shear modulus (G_d) and damping ratio (λ) exhibit a similar evolution. The difference of experimental data is small, thus, the reliability of the miniature dynamic triaxial apparatus is verified.

Key words: miniature dynamic triaxial apparatus; micro CT; non-destructive detection; cyclic loading; micro mechanical behavior

0 引 言

随着岩土工程领域的不断拓展, 需要面对更加复杂的岩土材料, 而完全基于宏观现象而建立的土体本

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51890911); 国家自然科学基金重点项目(51639008); 国家重点研发计划项目(2019YFC0312304)
收稿日期: 2020-06-01

构关系大多是从宏观或唯象角度出发, 缺乏对微观结构的了解。笔者在第 22 讲黄文熙讲座中^[1]总结了宏微观力学概念, 力图从本质上探究岩土材料复杂宏观特性背后的微细观机理, 如土体微观结构^[2], 颗粒转动^[3], 颗粒破碎^[4], 粒间接触影响^[5]等, 用以建立基于微观机制的宏观本构模型, 为更好的解决实际工程问题服务。因此, 为了能准确高效的获取土体微观力学信息, 需要研发一种能适用于 CT(computerized tomography) 扫描的微型动三轴仪, 便于更深入研究土体宏观力学特性背后的微观机理。

目前, 众多学者在利用 CT 技术观测土体的初始结构与微观结构演化方面开展了大量的研究, 取得了相应的成果。王艳丽等^[6]总结了目前 CT 扫描技术在复杂土体土工试验中的应用, 指出 CT 扫描技术为土体微观结构定量描述提供了有效手段。胡波等^[7]基于自主研发的单向冻结冻融循环三轴仪, 结合医用卧式 CT 扫描设备, 再现了单向冻结过程中冻结锋面迁移过程。郑剑锋等^[8]对原有常规三轴加载压力仓进行了改造, 研制了适用于冻土且可置于医用 CT 中进行扫描的可控温度加载装置。以上医用卧式扫描法虽能完成土体的 CT 扫描, 研究微观结构演化规律, 但其仍存在成本高、效率低、穿透力弱、分辨率较低等缺点。程状等^[9]研发了适用于工业显微 CT (microCT) 扫描的微型三轴试验仪, 该仪器将加载装置 (高 520 mm, 重约 20 kg) 及试样 (直径 8 mm×高 16 mm) 小型化, 便于使用分辨率精度可达微米级别的显微 CT 进行扫描, 实现对干砂试样在三轴剪切条件下微观特性的无损检测, 但该仪器为微型静三轴仪, 尚不能对土体进行微观动力学特性的相关研究。

基于上述原因, 在常规动三轴仪理论上设计并研发了适用于高分辨率工业显微 CT 扫描设备的微型动三轴仪, 该仪器具有体积较小、操作方便、无需改装现有 CT 设备等优点。在仪器主体设备完成后, 为验证其仪器的可靠性, 采用日本丰浦砂干砂样, 使用微型和常规动三轴仪在 0.2 Hz 的全波模式及不同围压 (50, 100, 200, 300 kPa) 下进行不固结不排水试验, 并将动剪切模量 G_d , 初始弹性模量 E_0 和阻尼比 λ 等结果进行对比验证。

1 微型动三轴仪研制原则及结构

1.1 微型动三轴仪研制原则

基于常规动三轴仪试验原理, 设计研发了适用于工业显微 CT 扫描的微型动三轴仪。其研制原则如下:

(1) 适用于目前工业显微 CT 扫描设备内部空间大小, 方便操作, 且采用加强材料及高透光率压力室, 在满足一定的围压条件下, 保证 CT 扫描清晰度。

(2) 满足常规动三轴仪试验的基本要求外, 仪器主机具有结构紧凑、体积小、重量轻、操作方便、数据可靠等优点。

(3) 满足设备可在脱离电脑情况下自动完成试验数据记录, 内置 SD 卡 (secure digital memory card)。

(4) 价格合理, 适用于广大中青年研究人员对土体宏微观力学特性开展研究。

1.2 微型动三轴仪主体结构

微型动三轴仪主要包括控制采集箱系统、主机系统、以及气水转换容器三部分, 如图 1 所示。

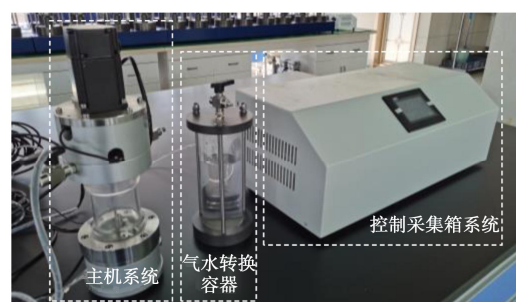
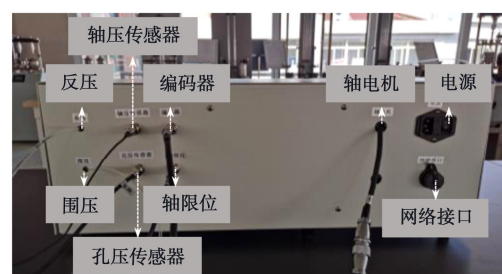


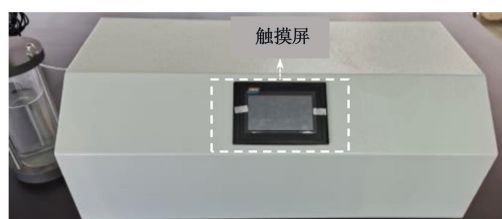
图 1 微型动三轴仪主体结构

Fig. 1 Main components of miniature dynamic triaxial apparatus

控制采集箱系统主要包括: 围压加载装置、反压加载装置及反压传感器、轴压传感器、轴电机、网络接口、以及彩色触摸显示屏等, 如图 2 所示。



(a) 数据线采集接口



(b) 触摸屏

图 2 控制采集箱系统

Fig. 2 Acquisition control system

主机系统主要包括: 仪器底座、压力室底座、试样底座、加强材料及高透光率的压力室外壳 (厚 5 mm)、试样帽、活塞、轴向循环加载装置及内置轴压传感器等。整个主机系统高度为 400 mm, 底座直径为 120 mm, 重量约为 10 kg, 试样尺寸为高为 20 mm, 直径为 10 mm, 体积 $V=1.571 \text{ cm}^3$, 如图 3 所示。该装置整体尺寸较小, 且试样小型化, 压力室透明外壳较薄, 方便借助工业显微 CT 扫描设备测得较清晰的

土颗粒相对运动图像。该仪器主机系统尺寸与本团队研发的微型静三轴仪相近，且与微型静三轴仪具有同样方便工业显微 CT 扫描设备进行扫描的功能，试样 CT 扫描图像清晰度较高^[10]。

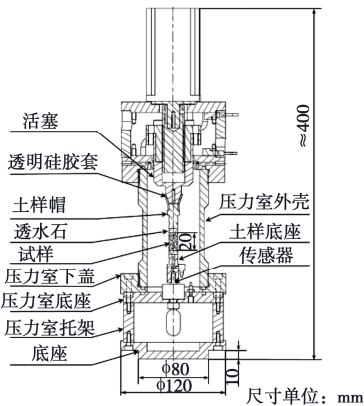


图 3 微型动三轴主机示意图

Fig. 3 Schematic of miniature dynamic triaxial apparatus

(1) 轴压控制系统

轴向加压采用伺服电机加载，选用试样顶部加载设计，该设计不同于常规动三轴底部加载方式，可有效避免底部加压普遍存在的无法解决在大压力情况下，传压杆与密封圈之间摩擦阻力较大的问题，从而提高了试验结果的准确性。加载方式分为应力控制和应变控制（不等幅值循环荷载时程曲线图，见图 4）两种方式，其加载频率为 0.01~2 Hz；轴压传感器量程为 0~1000 N，精度为 0.3%FS；轴向加载上下限位范围为 0~18 mm。激振装置采用机械传动式，由试样顶部进行循环加载，可模拟全波和半波两种循环模式。活塞与试样顶部采用锥形透明硅胶套联接，活塞内部设有通道与外部大气相通，在施加围压前将此通道的阀门关闭，围压施加完成后将活塞与试样顶部接触，打开阀门，此时压力室内的压力远大于外部气压，通过围压的压力使得锥形透明硅胶套紧贴合于活塞，清零数据后方可进行循环加载试验。

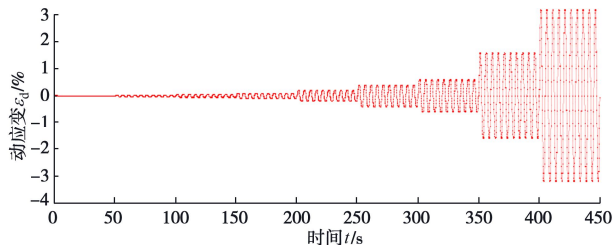


图 4 轴向动应变时程曲线示例图

Fig. 4 Curves of dynamic strain vs. time

(2) 围压控制系统

围压加载控制系统采用气压控制气水压力传递方式，加载范围 0~800 kPa。加载围压过程中，通过管路将气水转换容器的进气口与控制采集箱内围压加载装置连接，出气口与主机系统压力室连接，通过围压

加载装置将气水转换容器里的水压到压力室中，从而达到设定的围压数值。

(3) 反压控制系统

反压加载控制系统采用液压控制方式，控制采集系统内的反压调压仓通过管路与试样底部排水管路相连接，采用下排水方式，加载范围为 0~1000 kPa。试样在排水过程中，根据反压调压仓内的体积变化，测得试样在试验中的排水量。

(4) 数据采集处理系统

数据采集处理系统包括数据采集和数据处理两个子系统。试验过程中数据采集子系统通过网线接口传输并记录下数据，实时显示在电脑端屏幕上，并利用已编好的程序即时计算出数据结果，生成相应曲线。该曲线显示界面分为 4 个小窗口，每个窗口可根据需要调整坐标轴显示的变量，实时观察各变量之间的关系。数据处理子系统则是在数据采集完成后对数据进行微处理，可分段查看不同试验状态下的数据结果。

2 微型与常规动三轴仪对比试验

2.1 试验材料

本次对比试验使用材料为国际上广泛使用的日本丰浦砂（Toyoura sand），颗粒粒径为 0.1~1 mm，其具体物理性能参数见表 1 所示。

表 1 日本丰浦砂物理性能参数

Table 1 Physical parameters of Toyoura sand					
试样	土粒相对密度 G_s	平均粒径 D_{50}/mm	不均匀系数 C_u	最大孔隙比 e_{max}	最小孔隙比 e_{min}
丰浦砂	2.65	0.2	1.32	0.977	0.597

本次试验的丰浦砂干砂样在相对密度 $D_r=50\%$ 的条件下进行，根据不同动三轴试样的大小（微型动三轴试样尺寸：直径×高=10 mm×20 mm；常规动三轴尺寸：直径×高=39.1 mm×80 mm），配置相同干密度（1.483 g/cm³）的试样，如图 5 所示。

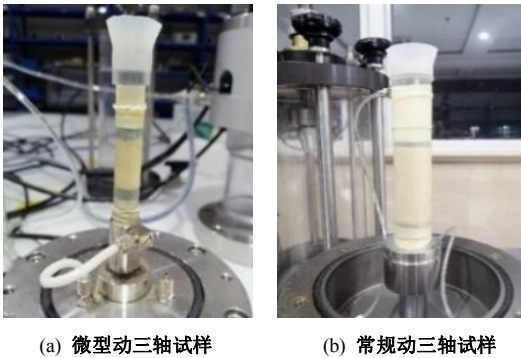


图 5 微型与常规动三轴仪试样

Fig. 5 Miniature and conventional dynamic triaxial specimens

2.2 试验方案

按照上述制样及其他操作步骤后，分别使用微型

和常规动三轴仪进行频率 0.2 Hz 的全波模式及不同围压 (50, 100, 200, 300 kPa) 条件下的不固结不排水试验, 两次试验方案一致, 每次试验分 4 组均采用应变式控制, 动应变幅值由小逐级增大, 每级动应变循环荷载次数共 10 次, 取每级最后一次循环荷载试验测得的最大动应力和与之对应的最大动应变进行计算, 具体试验方案见表 2。

表 2 试验方案

Table 2 Experimental schemes

序号	试验仪器	试样	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	频率 f/Hz	围压 σ_3/kPa
1	微型	丰浦砂	1.483	0.2	50, 100, 200, 300
2	常规	丰浦砂	1.483	0.2	50, 100, 200, 300

3 试验结果对比分析

3.1 动剪切模量 G_d 与动剪应变 γ_d 的关系

以围压 100 kPa 试验为例, 微型动三轴和常规动三轴测得的动剪切模量与动剪应变关系曲线如图 6 所示。

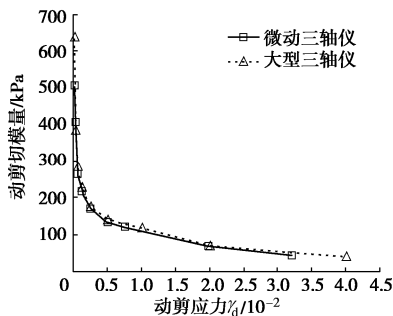


图 6 Relationship between dynamic shear modulus and dynamic shear strains

由图 6 可知, 动剪切模量随动应变的增加而降低, 曲线大致呈反比趋势。理论上, 模量是表征土体自身变形特性的物理量, 只与土体种类和性质有关, 因此当动剪应变相同时, 曲线趋势基本相近, 符合经验规律。

由表 3 可知, 两台仪器测得数据经计算发现动剪切模量值基本接近, 且在循环荷载过程中微型动三轴仪最大误差为 7.5% (微型动三轴和常规动三轴试验结果的差值与常规动三轴试验结果的比值)。基于结果对比分析, 微型动三轴仪在测量动剪切模量时具有较高的可靠性。

3.2 $1/E_d$ 与动应变 ε_d 的关系

绘制 $1/E_d - \varepsilon_d$ 关系曲线图, 分析不同围压对初始动弹性模量 E_0 的影响, 由图 7 可知, 当达到同一应变时, 不同围压对试样测得的初始动模量有一定影响, 具体表现在初始动弹性模量 E_0 随着围压的增加而增加, 其中在小围压下尤其明显。图 7 (a), (b) 在四组围压下的拟合直线趋势大体相同。

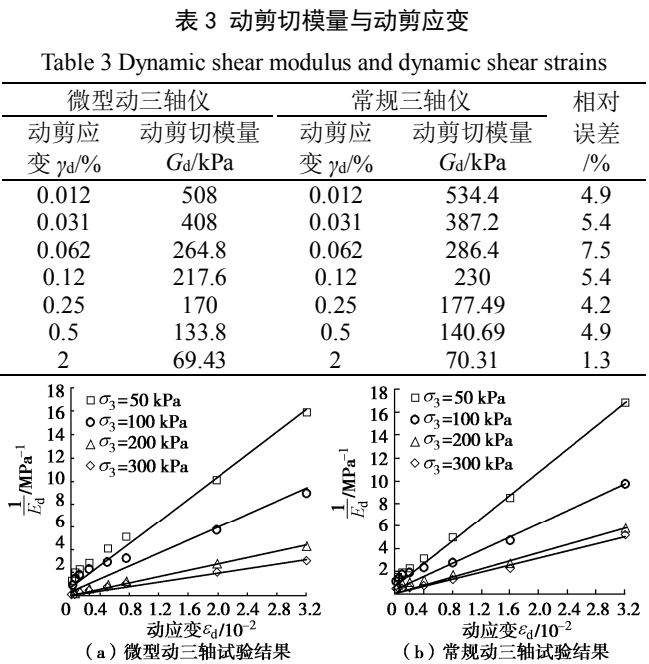


图 7 $1/E_d$ 与 ε_d 关系曲线

Fig. 7 Relationship between $1/E_d$ and ε_d

两台仪器测得的初始动模量 E_0 较接近, 如表 4 所示, 误差最大为 4.8%, 表明微型动三轴仪测得的试验结果具有较好的可靠性。

表 4 初始动弹性模量

Table 4 Initial dynamic elastic moduli

围压	初始动弹性模量 E_0/MPa		相对误差
	微型动三轴仪	常规三轴仪	/%
50	1.43	1.37	4.2
100	2.50	2.38	4.8
200	14.29	13.70	4.1
300	17.86	17.83	0.2

3.3 阻尼比 λ 与围压 σ_3 的关系

以相同动应变条件下循环荷载试验为例, 循环周期数为 10 周, 取最后一次循环周数进行分析, 比较微型与常规动三轴在不同围压情况下滞回圈的变化趋势。由图 8 可知, 在全波循环模式下卸载时, 砂样并无黏结力, 且所用试样为干砂样, 因此理论上动应力并不会出现负值, 所以滞回圈曲线呈现半幅形态。图 8 (a), (b) 中动应力出现负值可能是橡皮膜拉力导致, 两图中曲线趋势大体相同。

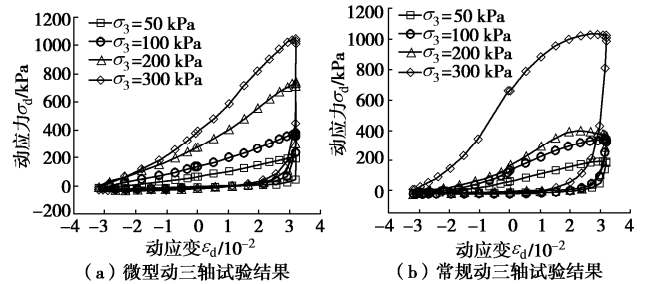


图 8 滞回圈曲线

Fig. 8 Curves of hysteresis loop

滞回圈曲线通过计算求得阻尼比结果见表 5。对

比两组计算出的阻尼比可知，相同动应变条件下两者的结果较为接近，误差最大为 6.3%，对于阻尼比的确定，仪器具有较高的可靠性。

表 5 不同围压条件下阻尼比

Table 5 Damping ratios under different confining pressures			
围压	阻尼比 λ		相对误差 /%
	微型动三轴仪	常规动三轴仪	
50	0.2366	0.2349	0.6
100	0.2429	0.2527	3.8
200	0.2572	0.2745	6.3
300	0.2717	0.2831	4.0

4 结论及展望

本文对自行研发的微型动三轴仪进行了详细介绍，并与常规动三轴仪在多级动应变及不同围压条件下的试验结果进行初步对比验证，主要结论如下：

(1) 该微型动三轴仪具有主机结构紧凑、体积较小、试样小型化（直径×高=10 mm×20 mm）、便于操作、兼容性强等优点，以及方便用于工业显微 CT 扫描设备。

(2) 通过多级动应变循环荷载试验，测得丰满砂的初始动弹性模量 E_0 ，动剪切模量 G_d ，阻尼比 λ 与常规动三轴试验结果接近，且各数据曲线整体变化趋势基本相同，符合经验规律，验证了多功能微型动三轴仪可以很好的测得相关动力学特性指标，可靠性较高。

另外，本文只针对干砂试样进行对比验证，由于岩土材料种类繁多，因此还需对饱和砂土进行更进一步的适用性验证，为“三深”工程（深地、深海、深空工程）中的土体宏微观力学特性等相关研究提供可靠数据支撑。

致 谢：感谢张家港晟泰克智能仪器有限公司对微型动三轴仪的加工制作，及负责人蒋敏华，软件研发部门黄兴、邵斌斌，机械设计制作部门盛文佳、李志宏等对工作的协助和配合。感谢天津大学沈振义、庞红星、尹福顺和张仕伟硕士在论文修改中提出的宝贵意见。

参考文献：

[1] 蒋明镜. 现代土力学研究的新视野——宏微观土力学[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 195 - 254. (JIANG Ming-jing. New paradigm for modern soil mechanics: Geomechanics from micro to macro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 195 - 254. (in Chinese))

[2] AMOROSI A, RAMPELLO S. An experimental investigation into the mechanical behaviour of a structured

stiff clay[J]. Géotechnique, 2007, 57(2): 153 - 166.

[3] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(5): 340 - 357.

[4] COOP M R, SORENSEN K K, FREITAS T B, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. Géotechnique, 2004, 54(3): 157 - 163.

[5] JIANG M J, SUN Y G, LI L Q, et al. Contact behavior of idealized granules bonded in two different interparticle distances: an experimental investigation[J]. Mechanics of Materials, 2012, 55(14): 1 - 15.

[6] 王艳丽, 程展林. CT 扫描技术在我国土工试验中的应用研究进展[J]. 地震工程学报, 2015, 37(增刊 1): 35 - 39. (WANG Yan-li, CHENG Zhan-lin. Progress in the application of CT scanning technology in Chinese soil tests[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(S1): 35 - 39. (in Chinese))

[7] 胡 波, 龚壁卫, 童 军, 等. 单向冻结冻融循环三轴仪的研制及其应用[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 128 - 132. (HU Bo, GONG Bi-wei, TONG Jun, et al. Development and application of unilateral freezing triaxial apparatus for freeze-thaw cycle[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(2): 128 - 132. (in Chinese))

[8] 郑剑锋, 马 巍, 赵淑萍, 等. 与 CT 机配套的便携式控温压力舱的研制与应用[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 928 - 933. (ZHENG Jian-feng, MA Wei, ZHAO Shu-ping, et al. The portable three-terminal controlling temperature apparatus matched to computerized tomography: development and application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 928 - 933. (in Chinese))

[9] 程 壮, 王剑锋. 用于颗粒土微观力学行为试验的微型三轴试验仪[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1123 - 1129. (CHENG Zhuang, WANG Jian-feng. A mini-triaxial apparatus for testing of micro-scale mechanical behavior of granular soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 1123 - 1129. (in Chinese))

[10] 蒋明镜, 李光帅, 曹 培, 等. 用于土体宏微观力学特性测试的微型三轴仪研制[C]// 第 29 届全国土工测试学术研讨会, 2020, 呼和浩特. (JIANG Ming-jing, LI Guang-shuai, CAO Pei, et al. Development of the miniature triaxial apparatus for testing of macro and micromechanical behavior of soils[C]// The 29th National Conference on Geotechnical Testing, 2020, Huhhot. (in Chinese))

(编校：黄贤沙)