

DOI: 10.11779/CJGE2017S1009

饱和重塑黏土空心圆柱试样的压制技术及应用

董 彤¹, 郑颖人^{1, 2}, 孔 亮³, 柘 美⁴

(1. 岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室, 后勤工程学院, 重庆 401311; 2. 重庆市地质灾害防治工程技术研究中心, 重庆 400041;
3. 青岛理工大学理学院, 山东 青岛 266033; 4. 重庆交通大学土木建筑学院, 重庆 400074)

摘要: 由于黏土黏性大、受扰动易产生裂隙, 采用常规的击实法和固结法所制备的空心圆柱试样存在整体不均匀、饱和度较低、切削面裂隙丰富等问题。在重塑试样击实器的基础上, 研制了一种能制备实心与空心圆柱重塑试样的压样装置, 可以很好地模拟天然状态下土体形成过程。依据改进的分层欠压法, 试验选取最优初始欠压系数, 在每层试样高度相同的条件下, 严格控制每层试样的质量, 而后采用抽气饱和法将所压制的试样进行饱和。通过应力路径三轴试验和纯主应力轴旋转试验, 从可重复性和力学特性两个方面验证了所制备的饱和重塑黏土试样用于研究复杂应力路径下土体变形特性与本构关系的可靠性, 为后续重塑土的理论与试验研究提供了重要的保证。

关键词: 饱和重塑黏土; 空心圆柱试样; 分层欠压法; 主应力轴旋转

中图分类号: TU414 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0043-05

作者简介: 董 彤(1990-), 男, 山东新泰人, 博士研究生, 主要从事岩土本构关系方面的研究。E-mail: dt0706@126.com。

Compression method for hollow cylinder specimens of saturated remolded clay and its application

DONG Tong^{1,2}, ZHENG Ying-Ren^{1,2}, KONG Liang³, ZHE Mei⁴

(1. Chongqing Key Laboratory of Geomechanics Geoenvironmental Protection, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China; 2. Chongqing Engineering and Technology Research Center of Geological Hazard Prevention and Treatment, Chongqing 400041, China; 3. School of Sciences, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 4. Institute of Civil Engineering and Construction, Chongqing Jiao Tong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Due to the viscosity and easy-cracked characteristics of clay, series problems, such as non-homogeneity, low-saturation and microcracks, exist in the hollow cylinder specimens generally made by using the compaction method and the consolidation method. Based on the traditional compacting instrument, a newly designed specimen presser can be employed to prepare the remolded solid and hollow cylindrical specimens by simulating the forming process of natural soils. According to the improved undercompaction method and the optimal initial undercompaction coefficient obtained by tests, the quality of each layer is controlled strictly with the same height. After being saturated by the pumping saturation method, the reliability of remolded specimens is proved considering the repeatability and mechanical properties when the specimens are used to study the deformation characteristics and the constitutive relation of soils under complex stress paths. All those may provide the assurance of long-term studies on saturated remolded clay.

Key words: saturated remolded clay; hollow cylinder specimen; layered under compaction method; principal stress rotation

0 引言

动态空心圆柱扭剪仪(Hollow Cylinder Apparatus简记为HCA)是目前国内外最为复杂、最为尖端的土动力学试验设备之一。HCA通过独立地控制试样内外压力、扭矩以及轴向力, 可以模拟波浪、交通、地震等复杂应力路径。对于塑性和强度较大的黏土而言, 现有原状黏土试样制备方法对土体扰动明显、易产生裂隙。考虑到扰动土在重塑以后较原状土更为均匀、离散性更小, 具有良好的可塑性和代表性, 可以为

方便地研究土体的物理力学特性、建立广泛适用的本构模型, 因此针对此类土, 室内试验通常选取重塑土作为研究对象^[1-2]。

重塑薄壁空心圆柱试样的制备是室内土工试验的一大难点, 主要体现在: ①击实法^[3]在层高控制和击实做功时依靠人工控制, 且击实作用会对土体产生不

可忽视的二次扰动，使得试样内部出现裂隙，极大地降低了后续试验的可信度。考虑到空心圆柱试样特殊的薄壁结构，能否保证重塑试样不受击实作用的扰动，从而制成干密度分布均匀的饱和试样是试验成功与否的重要前提。②固结法制样，即通过高压固结^[1,4-5]或真空抽吸^[6-7]将含水率大于液限的土样加速固结成空心圆柱样。由于黏土渗透系数很低、排水固结极慢、遇水胀缩性较大，排水通道附近易超固结而远端固结不充分，因而，很难保证试样各部位的孔隙比和干密度相同。此外，固结后的试样仍需进行二次切削才可成型，不可避免地对土体产生二次扰动，使得该方法仅适用于粒径较小、强度较低的重塑软黏土试样的制备^[8]。上述问题的存在导致HCA在该领域的研究仍为空白，亟需探索一套科学可靠的制样方法。此外，各类室内土工试验的制样工具繁多、重复配置现象严重，在一定程度上造成了资源浪费。

本文设计了一种能制备多功能重塑黏土空心圆柱试样的压样机和饱和器，通过试验得到了最优初始欠压系数，采用质量控制的分层次压法和抽气饱和法，可以有效地制备出干密度分布均匀的饱和空心圆柱试样。在此基础上，对重塑试样进行了一系列纯主应力轴旋转的排水试验，证明了该方法所制备的试样具有较好的物理均匀性和力学均衡性。

1 饱和重塑黏土试样制备

1.1 多功能土工试验压样机

多功能土工试验压样机，包括支架系统、动力与控制系统、成模与压样系统^[9]，参见图1。支架系统包括基座、侧柱和顶板。

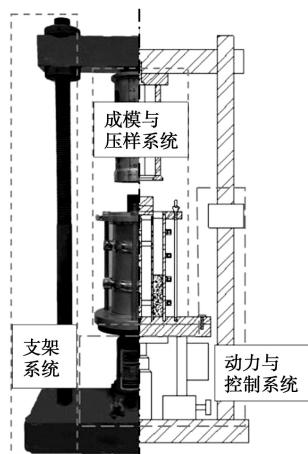


图1 多功能土工试验压样机

Fig. 1 Multi-function specimen presser

动力与控制系统包括油箱、电机、液压泵、液压缸、控制机构和移动压样平台。制样时通过液压系统加载，该系统具有压力大、稳定性好、易于控制等特

点，使得该压样机在制备大颗粒、高强度的重塑试样时具有独特的优势。控制机构和位移计可以实时控制和反馈移动压样平台的位置，继而严格地控制每层试样的高度，不仅实现了试样制备的半自动化，而且最大可能地提高了试样的均匀程度。

成模与压样系统可根据试验需要进行定制，比较具有代表性的有实心圆柱试样（直径×高/39.1×80 mm或100×200 mm）和空心圆柱试样（内径×外径×高/160×200×400 mm或60×100×200 mm）。其中，空心圆柱试样的成模与压样系统包括外成模筒和内成模筒，基于整体性与拆卸的便捷性的考虑，成模筒均采用瓣膜设计，并分别通过外箍环和内支撑杆进行固定。继而将空心圆柱试样一次制成，避免了取芯时对试样的二次扰动，提高了该压样机的适用性。

压样系统改进了传统击样法的设计^[3]，包括压样顶盖、压样杆和环状压样锤，压样顶盖下方连接有三根压样杆，压样杆下端设有压样锤。改进了传统的击实制样的方法，采用分层压样法，消除了击实对土体的二次扰动，减小了人工操作的误差。在两层间接触面采用长柄调土刀对下层土表面抛毛，以增加试样的整体性，最大程度地模拟了天然土体的沉积过程。

土工试验压样机采用了半自动控制设计、液压动力设计、可更换模具设计以及试样一次成型设计，最大可能地模拟了原状土沉积与压实的过程，为制备各种类型的试样提供了有效的保证。该压样机的自动化程度较高，在实际操作过程中，操作便捷、制样效率高，且避免了室内土工试验制样工具的重复配置，有效地节省了资源，为空心圆柱扭剪试验、应力路径三轴试验、真三轴试验等提供了极大的帮助。

1.2 质量控制的分层欠压法

试验所研究的红黏土样取自重庆市潼南县，按试验规程^[10]将土样取回后，风干，碾细，过2 mm筛，烘干，加蒸馏水，按土水质量比625：100配制成含水率为16%的颗粒状土，保湿，密封贮存12 h以上使得所配土的水分分布均匀。

在进行分层压样时，由于抛洒过程中颗粒所受重力及压实作用的影响，很难保证每层试样之间的均匀性。为减小空心圆柱试样的不均匀性对试验结果的影响，采用分层次压原理^[11]对分层击实法加以改良。其基本思想是：制样时将试样分成若干层，逐层制备，采用欠压准则控制孔隙比逐层减小，使最终所制得的试样平均孔隙比达到目标值 e ^[12]。

定义初始欠压系数为

$$U_0 = e_1/e \quad , \quad (1)$$

式中， e_1 为试样第一层（底层）的初始孔隙比。

第一层的欠压系数 U_1 ：

$$U_1 = (e_1 - e) / (1 + e) \quad . \quad (2)$$

第 n 层的欠压系数 U_n 采用的计算如下:

$$\frac{U_n}{U_1} = 1 - \left(\frac{n-1}{N+1} \right)^2, \quad (3)$$

式中, N 为所制备试样总层数。添加第 n 层后, 前 n 层试样的平均空隙比 \bar{e}_n 与平均欠压系数:

$$\bar{e}_n = e + (e+1)\bar{U}_n \quad . \quad (4)$$

分层欠压法可以确定试样每层的欠压系数、层重以及层高, 继而衍生出两种制样方法。①等质量欠压: 控制每层质量一致而高度不同^[12]。对于孔隙比较小的土体, 特别是黏土, 采用分层欠压法计算得到的试样每层的层高 h_n 与常规方法相差无几, 对于人工制样, 这种高度上的差别难以控制。②等高度欠压: 控制每层高度一致而质量不同, 即试样制样每层高度 h_n 与传统方法相同, 通过控制每层土体的质量 m_n 以控制其孔隙比(参见表 1)。与等质量压法相比, 土体层重可以很好地通过电子天平来控制, 制样精度较高且便于操作, 此外, 对于制备不同的试样, 由于层高均相同, 制样仪器在高度限位方面不需要进行单独设置, 使得仪器具有良好的通用性。

表 1 分层欠压法 ($U_0 = 1.05$)

Table 1 Layered undercompaction methods

层数	$U_0 = 1.05$		等质量欠压 ^[12]		等高度欠压	
	$U_n / \%$	\bar{e}_n	m_n / g	h_n / cm	m_n / g	h_n / cm
1	1.91	0.648		2.02	192.31	
2	1.88	0.647		2.02	192.33	
3	1.81	0.646		2.02	192.57	
4	1.70	0.644		2.02	192.97	
5	1.53	0.642	194.63	2.01	193.54	2.00
6	1.32	0.638		2.00	194.28	
7	1.06	0.634		1.99	195.20	
8	0.75	0.629		1.98	196.30	
9	0.40	0.623		1.97	197.59	
10	0.00	0.617		1.95	199.08	

1.3 最优初始欠压系数

采用分层欠压法制样时, 不同的初始欠压系数 U_0 所制备的试样沿轴向的均匀程度不同, 必然存在某一“最优初始欠压系数”使所制备的试样均匀程度最优。对于不同的土体, 由于其物理力学性质不同, 最优初始欠压系数必然存在差异, 须通过试验确定。

表 2 初始欠压系数与孔隙比 ($e = 0.617$)

Table 2 Initial undercompaction coefficients and void ratios

U_0	1.00	1.05	1.07	1.09	1.10
e_1	0.617	0.648	0.660	0.673	0.679

对制备的重塑试样, 采用环刀法测定试样不同位

置处孔隙比, 以研究其均匀程度。为了便于环刀法取样, 采用如表 2 所示的初始欠压系数分 10 层压制直径 100 mm, 高度 200 mm 的实心圆柱试样共 5 个。将试样每两层为一组分成 5 段以取环刀样, 试样第 1~2 层孔隙比记为 e_{12} , 利用每个试样不同位置的相对孔隙比 e_n/e_{12} 来衡量试样的均匀程度, 结果见图 2。

由图 2 可知, 初始欠压系数 U_0 对试样不均匀程度的影响显著。试验表明: ①当 U_0 较小时 ($U_0 < 1.07$), 试样孔隙比随试样高度增加而增大, 试样底部呈现出明显的超压现象; ②当 U_0 较大时 ($U_0 > 1.09$), 试样强度及试样与成模筒间的摩擦力使得上部压力难以向下传递, 分层欠压法所制备的试样底部并没有明显地被压实; ③当 $U_0 = 1.10$ 时, 试样底部欠压过度而上部过于密实, 以至于压制上层试样过程中所受阻力明显, 制备第 5、6 层时尚可将压力传递到 1~4 层进行二次压实, 但制备第 9~10 层时, 压力仅能传递到第 7~8 层, 试样孔隙比出现分节现象; ④当 U_0 位于最优初始欠压系数附近时 ($1.07 \leq U_0 \leq 1.09$), 相对孔隙比最大差值为 $\pm 2\%$, 此时所制备的试样均匀程度较好。

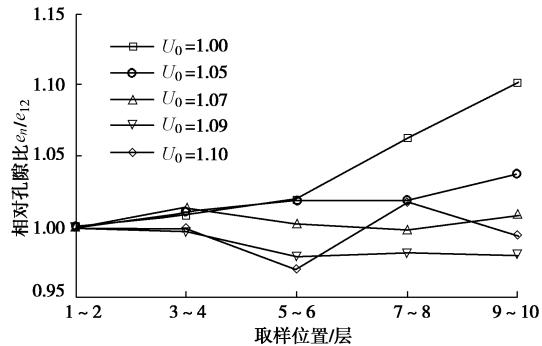


图 2 相对孔隙比测定结果

Fig. 2 Determination results of relative void ratio

1.4 空心圆柱试样饱和方法

由于黏性土渗透性较差, 因此一般的反压饱和很难使试样的饱和度达到试验要求。本文通过空心圆柱试样饱和器^[13], 采用压样完成后的抽气饱和与试样安装完成后的反压饱和相结合的方法进行饱和。如图 3

(a) 所示, 饱和器内筒和上下顶盖均存在渗水通道, 实际渗透距离仅为试样壁厚的一半, 即 1 cm。因此, 采用三轴试样饱和方式^[10]就可以使空心圆柱试样达到饱和状态, 饱和后试样见图 3 (b), 其物理力学参数如表 3 所示。

表 3 试样的物理力学特性

Table 3 Physical and mechanical properties of specimens

比重	密度	饱和度	渗透系数
G_s	$\rho / (g \cdot cm^{-3})$	$S_r / \%$	$k / (m \cdot s^{-1})$
2.70	1850	93~97	6.99×10^{-8}

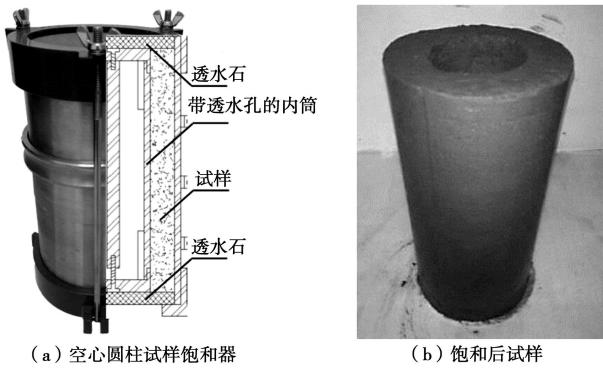


图 3 空心圆柱试样饱和器与饱和试样

Fig. 3 Hollow cylinder specimen and its saturator

2 试样力学均衡性验证

三轴试验(T系列)是最具代表性的室内土工试验。将9个饱和后的试样平分为三组,每组分别在孔压为100 kPa,有效围压为80, 200, 270 kPa下进行等压固结。而后,保持孔压和围压不变,在排水条件下仅增大偏应力 q 直至试样发生破坏。继而,每种应力路径均重复三次,以验证所重塑试样制备的可重复性。

应力路径三轴试验所测剪应变见图4。三组试验的组内对比表明,试验的可重复性较好,测得应力应变曲线基本重合。三组试验组间对比表明,不同围压下试样的应力-应变关系为典型的硬化型曲线,且围压越大硬化现象越明显,剪切强度越高。

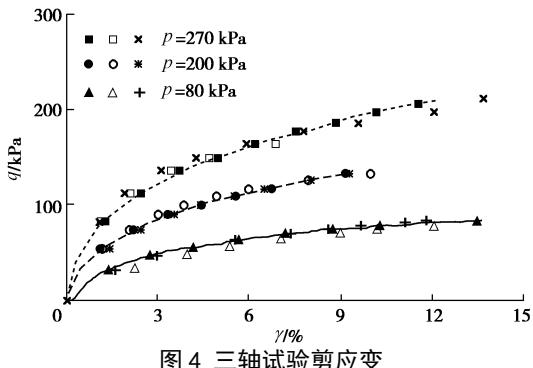


图 4 三轴试验剪应变

Fig. 4 Shear strains of specimen during triaxial tests

纯主应力轴旋转试验(R系列)是最为典型的扭剪试验之一,可以用于分析主应力轴旋转角连续变化对土体变形特性的影响。本文采用GDS公司生产的TJ-5Hz HCA动态空心圆柱扭剪仪对所制得饱和重塑空心圆柱试样的力学均衡性进行验证,通过不同试样之间的力学特性试验,检验重塑试样能否满足复杂应力条件下的试验要求。

饱和后的R系列试样首先在初始有效围压 $p_0=100$ kPa、初始剪应力 $q=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ 、中主应力系数 $b=0.5$ 条件下充分地偏压固结,随后,在 p_0 、 q 、

b 恒定的条件下控制主应力轴方向连续旋转,进行排水扭剪试验,具体试验方案见表4。

表 4 纯主应力轴旋转试验方案

Table 4 Schemes of PSR tests

试验编号	p /kPa	q /kPa	b	$\alpha_\sigma / (^\circ)$
R31	100	30	0.5	
R41	100	40	0.5	由 0° 增大
R51	100	50	0.5	到 90°
R52	100	50	0.5	

图5(a)为主应力轴方向角连续变化时剪应变 $\gamma_{z\theta}$ 的积累规律。在同一应力路径下,不同试样剪应变 $\gamma_{z\theta}$ 的变化规律较为一致,累积应变差别较小。对于不同应力路径下的试样,剪应变 $\gamma_{z\theta}$ 累积曲线的增长率起初随主应力轴方向角逐渐增大,在 $\alpha=30^\circ$ 后逐渐减小,当 $\alpha=55^\circ \sim 60^\circ$ 时,剪应变 $\gamma_{z\theta}$ 取到极大值,之后,曲线增长率为负值,剪应变 $\gamma_{z\theta}$ 开始逐渐减小,在 $\alpha=90^\circ$ 处剪应变 $\gamma_{z\theta}$ 均未完全恢复。

图5(b)为主应力轴方向角连续变化时体应变 ε_v 的积累规律,其变化趋势大致呈线性变化,在试验应力水平下,偏应力不同导致的体应变 ε_v 的差异可忽略不计,即纯主应力轴旋转条件下同一类试样的体应变变化规律相近^[14],验证了各试样间力学特性的一致性。

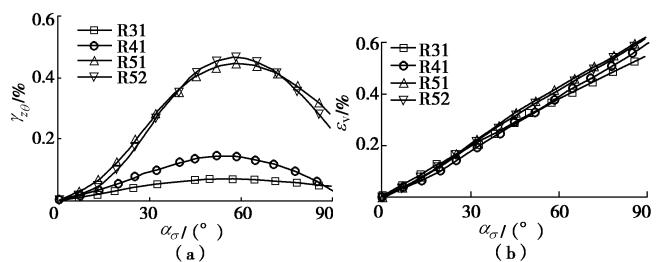


图 5 剪应变和体应变与大主应力轴方向角关系曲线

Fig. 5 Relationship among $\gamma_{z\theta}$, ε_v and α_σ

上述试验结果表明,材料不规则颗粒以及制备过程中不可避免的因素为试样制备的可重复性造成了一定的困难,使得试验所得力学特性存在不可避免的细微差异。就整体效果而言,本文所制备的饱和重塑黏土空心圆柱试样可重复性较好,试验结果规律性强,可以很好地满足复杂应力路径下相关的室内试验要求,为今后的试验与理论研究提供了可靠的依据。

此外,考虑到主应力方向对土体变形及强度的影响的根本原因在于土体存在各向异性,因而,在后续的试验研究过程中,可以采用本文所提供的方法,人为地制备均匀性不同的试样,以研究不同各向异性水平下重塑土的力学性质。

3 结 论

(1) 针对现有重塑黏土空心圆柱试样制备方法的弊端, 本文研制了一种多功能土工试验压样机, 采用压样法制样最大可能地模拟了天然土体的形成过程, 可以将室内土工试验常用的实心与空心圆柱试样一次成型, 避免了二次切削产生的微裂隙, 减小了传统击样法扰动大、击实功难以控制的弊端。

(2) 压制大尺寸试样时, 上层压力对下层土体有明显的压实作用, 为提高试样沿高度方向的均匀程度, 给出了最优初始欠压系数的试验确定方法, 在此基础上, 采用质量控制的分层次压法以精确地控制试样每层的孔隙比, 提高了制样的精度。

(3) 通过设置具有透水通道的四瓣膜内筒和上下顶盖, 将饱和透水通道转变为径向, 使得空心圆柱试样饱和时的实际渗透距离仅为常规三轴试样的一半, 采用抽气饱和与反压饱和相结合的方法, 所制得试样的饱和度可以很好地满足试验要求。

(4) 通过相对孔隙比试验和纯主应力轴旋转试验验证了本文所制备的重塑黏土试样有较好的物理均匀性和力学均衡性, 为研究土体的基本力学特性提供了前提保障。

致 谢: 衷心感谢同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室在试验中给予的帮助!

参考文献:

- [1] LIN H, PENUMADU D. Experimental investigation on principal stress rotation in Kao line lay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 2005, **131**(5): 633 - 642.
- [2] YASUHARA K, YAMANOUCHI T, HIRAO K. Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay[J]. Soils and Foundations, 1982, **22**(3): 77 - 91.
- [3] 张泉芳, 赵 宇, 黄 博, 等. 空心圆柱扭剪仪重塑样击实器的研制[J]. 实验室研究与探索, 2008, 27(5): 42 - 44, 84. (ZHANG Quan-fang, ZHAO Yu, HUANG Bo, et al. Development of a compacting instrument for reconstituted samples in hollow cylinder apparatus[J]. Research and Exploration in Library, 2008, 27(5): 42 - 44, 84. (in Chinese))
- [4] YASUHARA K, MURAKAMI S, SONG B, et al. Post cyclic degradation of strength and stiffness for low plasticity silt[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 2003, **129**(8): 756 - 769.
- [5] HYDE A, WARD S. A pore pressure and stability model for a silty clay under repeated loading[J]. Géotechnique, 1985, **35**(2): 113 - 125.
- [6] 聂 影. 复杂应力条件下饱和重塑黏土动力特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. (NIE Ying. Experimental study on dynamic behavior of saturated clay under complex stress condition[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [7] 齐剑峰. 饱和黏土循环剪切特性与软化变形的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. (QI Jian-feng. A study on cyclic shear behavior and softening deformation of saturated clay[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [8] 沈 扬, 王保光, 陶明安, 等. 重塑黏土空心圆柱试样制备技术改进及应用[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊 1): 697 - 701. (SHEN Yang, WANG Bao-guang, TAO Ming-an, et al. Improvement of preparing technique for hollow cylinder specimen of remolded clay and its application[J]. Soil and Rock Mechanics, 2015, **36**(S1): 697 - 701. (in Chinese))
- [9] 中国人民解放军后勤工程学院. 一种半自动多功能土工试验压样机: 中国, 2014207036669[P]. 2015-01-26. (Logistical Engineering University of PLA. A semi-automatic multi-function specimen presser: China, 2014207036669[P]. 2015-01-26. (in Chinese))
- [10] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (PRC Minister of Water Resources. GB/T 50123—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))
- [11] CHAUDHRY S K, KAWANO J, HASHIMOTO S, et al. Effects of initial fabric and shearing direction on cyclic deformation characteristics of sands[J]. Soils and Foundations, 2002, **42**(1): 147 - 157.
- [12] 李立青, 蒋明镜, 苏佳兴, 等. 制备 TJ-1 模拟月壤空心圆柱试样的新方法[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(4): 927 - 932. (LI Li-qing, JIANG Ming-jing, SU Jia-xing, et al. A new preparation method of hollow cylinder specimen for TJ-1 Lunar soil simulant[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(4): 927 - 932. (in Chinese))
- [13] 中国人民解放军后勤工程学院. 一种空心圆柱试样饱和器: 中国, 2015103905378[P]. 2015-10-21. (Logistical Engineering University of PLA. A hollow cylinder specimen saturator: China, 2015103905378[P]. 2015-10-21. (in Chinese))
- [14] SYMES M J, GENS A, HIGHT D W. Drained principal stress rotation in saturated sand[J]. Géotechnique, 1988, **38**(1): 58 - 81.

(本文责编 明经平)