

DOI: 10.11779/CJGE2020S1037

# 原状软黏土空心圆柱试样制备技术改进及应用

丁智<sup>1,2</sup>, 虞健刚<sup>1</sup>, 孙苗苗<sup>\*1</sup>, 叶科<sup>1</sup>, 陆钊<sup>2</sup>

(1. 浙大城市学院土木工程系, 浙江 杭州 310015; 2. 澳门大学土木工程系, 澳门 999078)

**摘要:** 原状土空心试样的制备给土力学特性试验研究带来一系列棘手的问题, 受取芯扰动的影响, 目前在复杂应力条件下开展原状软黏土力学特性试验研究的可靠性有待进一步的提高。基于传统机械法设计了制备软黏土试样的新型装置及方法, 具有台式水钻机、可拆卸更换钻头、制样桶等部件, 操作便捷, 制样质量良好, 且对土样扰动较小, 可快速制备大量空心圆柱试样。采用空心扭剪仪(HCA)开展了原状土圆柱试样在主应力轴偏转路径下的不排水剪切试验, 得到了软黏土的孔压开展曲线和累积应变发展规律曲线。研究结果表明: 复杂应力条件下所制试样土样力学性态演变规律较为可靠, 满足试验要求。

**关键词:** 原状软黏土; 复杂应力路径; 空心圆柱试样; 传统机械法; 主应力轴偏转

**中图分类号:** TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2020)S1-0188-05

**作者简介:** 丁智(1983—), 男, 安徽铜陵人, 副教授, 主要从事地铁施工及运营对周边环境影响方面的研究与教学工作。E-mail: dingz@zucc.edu.cn。

## Improvement and application of preparing technique for hollow cylinder samples of undisturbed soft clay

DING Zhi<sup>1,2</sup>, YU Jian-gang<sup>1</sup>, SUN Miao-miao<sup>1</sup>, YE Ke<sup>1</sup>, LU Zhao<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Zhejiang Hangzhou 310015, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Macau, Macau 999078, China)

**Abstract:** Preparation of undisturbed soil hollow samples brings a series of difficult problems to the experimental researches on mechanical properties of soil. Due to the influences of coring operation disturbance, the reliability of experimental research on mechanical properties of undisturbed soft clay under complex stress path need to be further improved. A new device and method for preparing soft clay sample are designed based on the traditional mechanical method. It has a desktop water drill, a detachable drill bit, and a sample barrel. It is easy to operate, has good quality, and has less disturbance to soil samples. It can quickly prepare a large number of hollow cylindrical samples. An undrained shear test on the cylindrical specimen of undisturbed soil under the deflection path of the principal stress axis is carried out using the hollow torsional shear apparatus (HCA). The changing curve of pore pressure and cumulative strain through dynamic test can be plotted. The study shows that the mechanical properties of the soil samples produced under complex stress conditions are more reliable and meet the test requirements.

**Key words:** undisturbed soft clay; complex stress path; hollow cylindrical specimen; traditional mechanical method; principal stress rotation

## 0 引言

重塑土是在经过压密或者压实作用后形成的具有一定重度、含水率的人工制备的土样, 与原状土的各向异性相比, 其性质较为均一。目前已有许多学者对重塑土的制备进行了深入研究<sup>[1-6]</sup>, 但由于重塑土的结构性较弱, 在实践工程中会出现计算结果与实际值存在较大误差的现象。在岩土工程技术领域中, 随着交通流量的增加, 荷载的多样性和复杂性对高速公路、铁路的地基在受到波浪、交通循环荷载等作用下的承

载能力及稳定性的要求与日俱增, 开展各种与实际情况更相近的主应力轴偏转试验研究成了新的突破口。

一方面, 王杏杏等<sup>[7]</sup>指出土的应力状态是由其结构决定的, 而前期应力状态是由结构性来体现的。

**基金项目:** 浙江省自然科学基金项目(LY18E080024, LHZ20E080001)  
浙江省重点研发计划项目(2020C01102); 杭州市科技计划项目(20191203B44)

**收稿日期:** 2020-06-03

**\*通信作者:** (E-mail: sunmm@zucc.edu.cn)

Lerouei 等<sup>[8]</sup>认为各地土的结构性对其力学性质的影响存在显著差异。因此, 迫切需要对原状土进行相关室内试验研究。

另一方面, 土工试验成果的质量取决于试样的扰动程度, 试样的扰动主要由取样扰动和制样扰动两部分组成, 试样在采取过程中产生扰动是不可避免的。根据试验方案及土质情况, 采用水压式取土器对软土进行取样, 采用该装置进行采样, 不仅采样效率高, 取土质量也较好<sup>[8]</sup>, 一定程度上解决了取样过程中扰动的问题, 因此, 如何解决制样扰动问题就成了关注重点。

目前, 原状土空心试样制备方法主要有两种方法: 一种是以英国帝国理工大学为代表, 通过渐进式修正的方法成功制备了伦敦超固结黏土空心试样, 采用机械式进行制样, 利用 7 种不同直径的钻杆依次进行钻孔取芯; 另一种是以 Talesnick 等<sup>[10]</sup>为代表, 他们成功制备出了天然含水率高达 80%~100%的高灵敏性软土空心试样, 采用电渗式方法进行制样, 利用一根穿通试样的电线切割试样内壁, 从而使得内壁变得光滑, 并且孔壁与内芯较易分离, 对试样的扰动也较小。

综上所述, 现有的制样方式仍存在一些缺陷, 如传统机械制样方式, 由于在钻孔的过程中需要更换不同直径的钻杆, 故不可避免地会对土样产生扰动; 而电渗法则需要利用电势降使试样中的水从正极流向负极, 很大程度的影响了试样含水情况, 且操作较为繁琐。因此, 鉴于现有装置和技术的尚可改进之处, 本文基于传统机械法提出了一种改进的空心圆柱试样的制备方法。

## 1 新型原状软黏土空心圆柱试样制备装置开发

### 1.1 试样制备用土

试样用土取自杭州市紫金港, 选择土质均匀、无杂质的处进行取土。测定土体基本物理特性指标, 见表 1。对现场取得的土样进行切削、钻芯等步骤后获得空心圆柱样, 操作过程严格按照《土工试验规程》的规定进行。

表 1 试样的物理特征指标

Table 1 Physical characteristics of samples							
土样 类型	含水 率 $w/\%$	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	颗粒相 对密度 $G_s$	孔隙 比 $e$	饱和 度 $S_r/\%$	液限 $w_l/\%$	塑性 指数 $I_p$
淤泥质 黏土	47.00	11.60	2.74	1.34	96.50	37.60	17.56

### 1.2 试样制备装置设计

试样制备装置主要由台式水钻机部分、可更换钻头部分、制样桶三部分组成(结构如图 1(a)所示); 其中台式水钻机包括水钻机、升降支架及调节手柄等

部件; 升降支架设置在水钻机的下部; 可更换钻头部分由转换接头及若干刀头组成, 转换接头是用来将刀头安装在水钻机上的连接部件, 通过调节手柄可以控制更换钻头部分的竖向移动; 刀头包括直杆旋转式刀头(见图 1(b))、螺旋杆刀头(见图 1(c))以及长筒型环刀, 其中长筒型环刀又分为侧向单开口式环刀(见图 1(d))和侧向双开口式环刀(见图 1(e))两种, 其皆为可拆卸式; 其中直杆旋转式刀头用于圆柱试样内孔的粗削, 螺旋杆刀头用于圆柱试样圆形孔的粗削成型及掏土加工, 而长筒型环刀用来对圆柱试样圆形孔进行精削; 侧向单开口式环刀或侧向双开口式环刀为无缝不锈钢管, 其外径略小于钻孔直径; 侧向单开口式环刀的开口处位于刀体的中部, 其开口弧度为环刀圆周长的 1/3; 侧向双开口式环刀的开口处位于刀体的中部, 开口方式为对向开口, 开口弧度为环刀圆周长的 1/8。制样桶设置在制样桶支架上, 而制样桶支架则固定在底部转盘上, 制样桶的正下方是废土筒, 转盘电机与底部转盘连接。

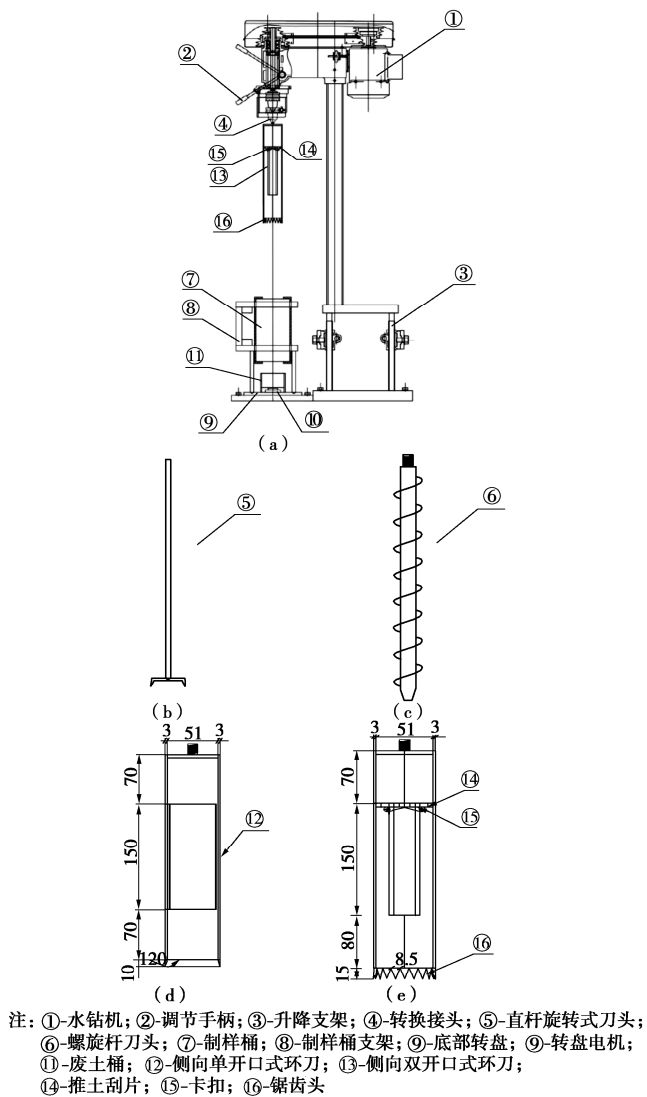


图 1 制样装置结构示意图

Fig. 1 Sketch of new sample preparation device

2 试样制备过程

为了减少土样扰动，本次采用不锈钢薄壁取土法进行取土制样。先将薄壁管内外壁均匀涂抹硅油，而后再将直径 200 mm、高度 750 mm 的薄壁管压入土层中切取土样，土样切取完毕后，在土样筒的两端均匀的涂上黄油，并用塑料盖盖在土样筒上裹紧密封，随后蜡封保存，在标签上记录取样信息附于土样筒上，再用胶带密封。

下面结合图 2 具体介绍原状软黏土空心圆柱试样的制备流程：①将取样筒内土体按照原状实心圆柱土样削切方法成型，置于制样桶中，并采用推土器将所取土样缓慢进行推出，见图 2（a）。②用钢丝锯将试样四周多余部分进行切除并修补土样外壁，为了防止在内壁钻孔过程中对土样产生扰动，采用三瓣膜将已修补完成后的外壁箍紧，如图 2（b）所示。③采用 3 种不同的规格的钻孔器对内壁进行钻孔，钻孔器见图 2（c）。④箍紧三瓣膜并固定上下盖板，然后将试样与三瓣膜放入固定架上，如图 2（d）所示，安装完毕后见图（e）。⑤调整水钻机的升降支架，直至达到合适高度停止，在钻机头上安装转换接头，首先接上直杆旋转式刀头，手动调整调节手柄，直至制样桶上部距 400 mm 以上停止调整，并按下水钻机开关，控制转速在 100~200 rad/m，下降速度 100 mm/min，逐渐下降进行实心圆柱土样的钻芯加工。⑥关闭水钻机，换下水钻机上的直杆旋转式刀头，安装上螺旋杆刀头，再次手动调整调节手柄手动调，直至制样桶上部距 400 mm 以上停止，开启水钻机，将转速控制在 60 rad/m，下降速度 100 mm/min，逐渐下降进行实心圆柱土样的圆形孔加工。⑦关闭水钻机，再次将水钻机转接头上的直杆旋转式刀头换下，装上长筒型环刀，并均匀的涂抹少许机油在长筒型环刀内外上，将调节手柄手动调整至制样桶上部距离 400 mm 以上，开启转盘电机，控制转速在 20~30 rad/m，同时开启水钻机，并控制转速低于 50 rad/m，以 50 mm 为每次的下降量，逐渐下降长筒型环刀，上升至试样外部，采用下拉推土刮片排出桶内的土体。⑧最后关闭水钻机和转盘电机，将制样桶和削切完成的土样从底部转盘上取下，这样就成功地完成了试样制备。通过上述制备流程所制试样内外表面光滑，对试样土体扰动较小，能够满足试验需求。图 2（f）为所制试样与橡胶样的对比图。⑨将土样置于饱和器中进行真空饱和。

相较于之前的试样制备装置，该新型制样装置具有结构简单，操作便捷，脱模容易，可快速实现机械化制样等一系列优点，有效保证了制样的质量，为空心圆柱扭剪试验奠定了基础。

心圆柱扭剪试验奠定了基础。



图 2 试样制备流程图

Fig. 2 Flowchart of sample preparation

3 原状试样力学性能均衡性验证

对上述所制试样采用空心圆柱扭剪仪来进行试验验证，通过测试同一条件下的一组平行试样来检验土体性状是否能够满足循环荷载下试验要求。

3.1 试验方案

空心圆柱扭剪仪（GCTS HCA）是目前公认的最符合实际受力情况的土动力学试验设备，能够很好地模拟循环荷载下的土样受荷复杂应力路径<sup>[9]</sup>。开展不排水循环剪切试验，在试验过程中施加大小相同的内外围压，为了能够更加准确的模拟实际荷载状况，加载时保持循环扭矩 MT 和循环轴力的相位差，本次试验中有效围压均为 50 kPa，采用 K<sub>0</sub> 固结，具体的试验方案见表 2。

表 2 不同频率下的空心扭剪试验方案

Table 2 Hollow torsion shear test programs under different frequencies

试样编号	有效围压/kPa	竖向循环应力幅值/%	循环剪应力幅值/%	竖向-扭转循环应力耦合比	应力路径	频率	振次 N
A-1	50	15	6	0.4	圆形	0.1	2500
A-2	50	15	6	0.4	圆形	0.1	2500
B-1	50	15	6	0.4	圆形	0.5	2500
B-2	50	15	6	0.4	圆形	0.5	2500

3.2 试验结果分析对比

图 3,4 分别为不同频率下试样累积轴向应变与时间的关系曲线图。从图中可以看出，在频率 0.1, 0.5 Hz 下试样轴向累积变形随振次的增加而逐渐增大，应变增长速率随振次的增大而逐渐减小，一定振次后，应变逐渐趋于稳定，同一频率相同加载条件下，不同试样间的应变规律相同，试验结果较为一致。

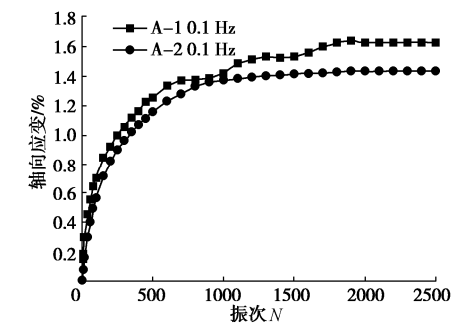


图 3 0.1 Hz 下试样 A-1, A-2 累积轴向应变发展曲线

Fig. 3 Variation curves of cumulative axial strain of samples under 0.1 Hz

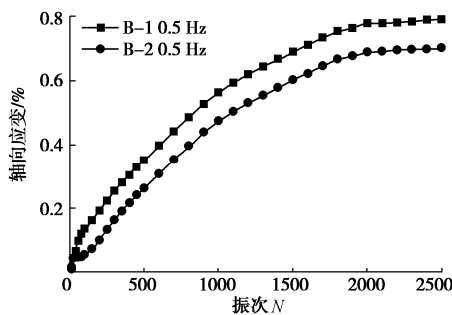


图 4 0.5 Hz 下试样 B-1, B-2 累积轴向应变发展曲线

Fig. 4 Variation curve of cumulative axial strain of samples under 0.5 Hz

图 5, 6 分别为不同频率下试样孔压比与时间的关系曲线图。从图中可以看出, 其发展趋势大致与轴向累积变形发展规律类似, 在初始阶段时, 孔压比曲线增长速率较高, 随着振次的增加而逐渐降低, 在一定振次之后, 最终基本趋于稳定, 同一频率相同加载条件下, 不同试样间孔压累积发展曲线基本重合, 试验结果较为一致。

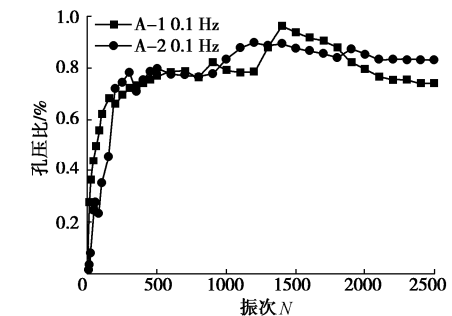


图 5 0.1 Hz 下试样 A-1, A-2 孔压发展规律

Fig. 5 Variation rules of pore pressure of samples under 0.1 Hz

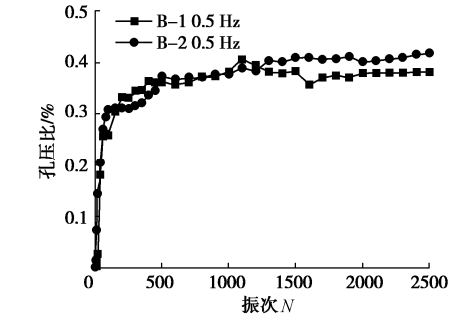


图 6 0.5 Hz 下试样 B-1, B-2 孔压发展规律

Fig. 6 Variation rules of pore pressure of samples under 0.5 Hz

图 7, 8 分别为不同频率下试样软化指数与时间的关系曲线图, 其中软化指数采用王军等<sup>[11]</sup>定义的公式:

$$\frac{G_{SN}}{G_{SI}} = \frac{\frac{q_{\max} - q_{\min}}{\varepsilon_{l,\max} - \varepsilon_{l,\min}}}{\frac{\varepsilon_{N,\max} - \varepsilon_{N,\min}}{\varepsilon_{l,\max} - \varepsilon_{l,\min}}} = \frac{\frac{2\sigma_d}{\varepsilon_{N,\max} - \varepsilon_{N,\min}}}{\frac{2\sigma_d}{\varepsilon_{l,\max} - \varepsilon_{l,\min}}} = \frac{\varepsilon_{l,\max} - \varepsilon_{l,\min}}{\varepsilon_{N,\max} - \varepsilon_{N,\min}} \quad (1)$$

式中  $q_{\max}$  为每次循环中的最大偏应力,  $q_{\min}$  为每次循环中的最小偏应力;  $\varepsilon_{l,\max}$  为第一次循环中最大轴向应变,  $\varepsilon_{l,\min}$  为第一次循环中最小轴向应变;  $\varepsilon_{N,\max}$  为第  $N$  次循环中最大轴应变,  $\varepsilon_{N,\min}$  为第  $N$  次循环中最小轴应变。

从图 7, 8 中可以看出, 总体上软化指数是随着振次的增加而减小, 其中频率 0.5 Hz 时土样软化指数衰减的速度是最快的, 0.5 Hz 下的最小软化指数为 0.55, 而当频率为 0.1 Hz 时, 试样的软化系数衰减速度较慢, 可以理解为土样在 0.1 Hz 时轴向应变较小。由此可知, 在同样的加载条件和频率下, 不同试样间的软化指数变化曲线基本重合, 试验结果较为一致。

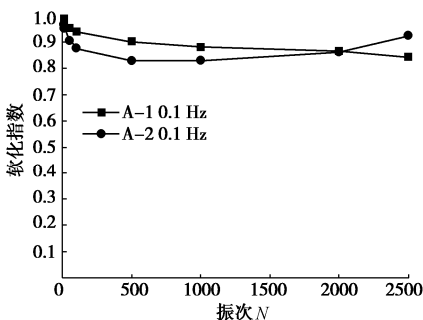


图 7 0.1 Hz 下试样 A-1, A-2 软化指数图

Fig. 7 Softening indices of dynamic stress ratio under 0.1 H

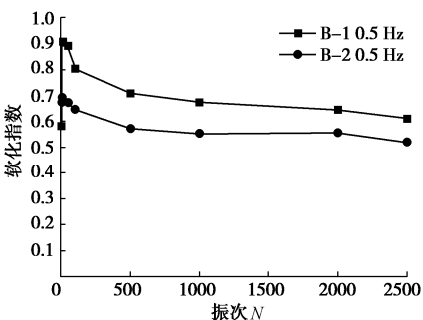


图 8 0.5 Hz 下试样 B-1, B-2 软化指数图

Fig. 8 Softening indices of dynamic stress ratio under 0.5 Hz

根据上述分析可知, 采用本技术所制备的试样即保证了试样的结构性, 也保证了试样内外壁光滑, 能够满足室内试验要求, 并且所得试验数据规律性良好, 为今后分析原状软黏土的试验结果提供了保障。

## 4 结 论

(1) 在对空心样进行掏孔时, 该装置采用 4 种不同的削切环刀, 先用直杆旋转式刀头进行粗削, 再用小于内孔径的螺旋杆刀头进行掏土, 可有效减小制样过程中对软黏土原状样的扰动。

(2) 在精细削土加工过程中采用长筒型薄壁环刀, 侧壁开口释放了削切附土内压, 开刃侧可用于最后手动刮壁, 使孔内壁光滑, 确保不坍塌。

(3) 采用转盘电机驱动的底部转盘上的制样桶, 形成一整套制样仪, 使得制样与成样过程统一, 相较传统的手动削土速度大幅提高, 成样内外径圆心一致。

(4) 从土体力学性能的方面验证了该试样制备技术在复杂应力下研究土体性态演变规律的可行性, 为复杂应力路径下研究原状软黏土基本性状提供了保障, 具有很高的实用价值。

### 参考文献:

- [1] 丁 智, 魏新江, 庄家煌, 等. 地铁列车荷载下冻融土刚度软化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(4): 987 - 995. (DING Zhi, WEI Xin-jiang, ZHUANG Jia-huang, et al. Experimental study on stiffness softening of frozen-thawed soil under subway loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(4): 987 - 995. (in Chinese))
- [2] 丁 智, 张孟雅, 魏新江, 等. 地铁循环荷载下冻融软土孔压发展及微观结构研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(11): 2328 - 2336. (DING Zhi, ZHANG Meng-ya, WEI Xin-jiang, et al. Study on pore pressure and microstructure of frozen and thawed soft soil under subway cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(11): 2328 - 2336. (in Chinese))
- [3] 魏新江, 张 涛, 丁 智, 等. 地铁荷载下不同固结度软黏土的孔压试验模型[J]. 岩土力学, 2014, **35**(10): 2761 - 2768, 2874. (WEI Xin-jiang, ZHANG Tao, DING Zhi, et al. Experimental study of pore pressure model of soft clay with different consolidation degrees under subway loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(10): 2761 - 2768, 2874. (in Chinese))
- [4] 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]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S1): 697 - 701. (in Chinese))
- [5] 沈 扬, 周 建, 张金良, 等. 考虑主应力方向变化的原状黏土强度及超静孔压特性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(6): 843 - 847. (SHEN Yang, ZHOU Jian, ZHANG Jin-liang, et al. Research on strength and pore pressure of intact clay considering variation of principal stress direction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(6): 843 - 847. (in Chinese))
- [6] SHEAHAN T, LADD C, GERMAINE J. Rate-dependent undrained shear behavior of saturated clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, **122**(2): 99 - 108.
- [7] 王杏杏, 尚 军, 夏锦红. 重塑土和原状土的应力状态和屈服准则[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, **41**(1): 196 - 202. (WANG Xing-xing, SHANG Jun, XIA Jin-hong. Stress state and yield criterion of remolded soil and undisturbed soil[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, **41**(1): 196 - 202. (in Chinese))
- [8] LEROUËI S, SAMSON L, BOZOUK M. Laboratory and field determination of preconsolidation pressures at gloucester[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, **20**(3): 19 - 23.
- [9] 刘海刚. 薄壁取土器的结构及取样过程分析[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(6): 76 - 83. (LIU Hai-gang, Analysis of the structure and sampling process of the thin-walled soil extractor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(6): 19 - 23. (in Chinese))
- [10] TALESNICK M, FRYDMAN S. The preparation of hollow cylinder specimens from undisturbed tube samples of soft clay[J]. Geotechnical Testing Journal, 1990, **13**(3): 7.
- [11] 王 军, 蔡袁强. 循环荷载作用下饱和软黏土应变累积模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(2): 331 - 338. (WANG Jun, CAI Yuan-qiang. Study on accumulative plastic strain model of soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(2): 331 - 338. (in Chinese))

(编校: 孙振远)