

新型三轴制样方法及其适用性对比研究

李荣荣¹, 杨钢^{*1,2,3}, 张金利^{1,2,3}, 杨庆^{1,2,3}

(1. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3. 大连理工大学 土木水利实验教学中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 通过对传统制样技术的探讨, 提出应当根据实际情况, 针对性地发展相关制样技术, 并发明了一种新的制样方法及其相关制样设备. 该方法以干土为基础, 通过两级控制来保证试样干密度的精确性, 最终获得饱和试样, 这与要求土样具有一定初始含水率的传统方法明显不同. 相关试验表明该方法能够提高试样的均一性, 减少人为因素的影响, 可为今后土工制样技术的改进提供一定借鉴作用.

关键词: 土工试验; 制样技术; 均一性; 含水率

中图分类号: T19

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202302010

0 引言

由于原位试验受场地环境、经济状况和试验手段的限制, 室内试验往往是获取土体物理参数、了解土体力学性质的主要手段, 而室内试验首先面对的是制样问题. 一般而言, 未扰动的原状土是室内试验最好的选择, 这样可以保留研究土体的原始结构、应力历史等内容, 有利于工程实践和科研开展, 但是高质量未扰动的原状土难以获取, 目前室内试验中一般采用重塑试样^[1]. 因此针对不同情况的重塑试样制备技术也应运而生.

从土的类型来看, 制样技术可按无黏性土和黏性土进行划分. 对于无黏性土, 制样方法相对成熟, 试验中基本采用空中沉积法与水中沉积法. Carraro 等^[2]研究发现这两种制样方法可以得到最优制样效果, 重塑砂土试样均一. 因此, 无论是小尺寸试样(三轴试验)还是大尺寸试样(模型试验), 基本都是采用上述两种方法, 只是针对大体积无黏性土试样, 特别是离心机试验中, 一般需设计一套落砂装置来保证试样的均一性^[3-4].

对于黏性土, 目前应用最多、适应性最广的制

样方法是湿捣法, 我国规范中也采用这一方法. 但是不同黏性土的性质差异较大, 不同方法适用于不同尺寸试样, 因此研究人员不得不针对实际需求来设计相应的制样工具. 本文将对常用黏性土制样技术进行概述, 对比各方法优缺点, 总结前人经验, 提出一种新的三轴制样方法, 该方法以干土开始, 通过两级控制保证试样干密度的精确性, 然后通水饱和, 最终获得预定的饱和试样.

1 黏性土制样技术概述

湿捣法是最早在试验中应用的方法, 主要用来模拟碾土结构^[5]. 它是适用性最广的方法, 可应用于几乎所有土质的试样制作中. 但湿捣法也有明显的缺点: 分层制样, 各层均受到冲击荷载影响, 因此人为因素对试样影响大. 虽然 Ladd^[6]为了改进湿捣法提出了分层欠压概念, 但 Frost 等^[7]通过 X 射线扫描与光学成像技术对分层欠压法试样分析的结果表明: 层间相对密度的差异依然存在.

泥浆固结法是 Sheeran 等^[8]在 1971 年提出的一种用于黏性土制样的方法. 这种方法可以获

收稿日期: 2022-04-09; 修回日期: 2023-01-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(重大项目 51890912); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT21LAB118).

作者简介: 李荣荣(1998-), 女, 硕士生, E-mail: 786927573@qq.com; 杨钢*(1979-), 男, 博士, 工程师, E-mail: foreignsteel@dlut.edu.cn.

得均一性较好的试样,且能够制备大尺寸试样,但是缺点依然明显,过程烦琐,设备复杂,试样易因泥浆中夹杂气泡而出现不规则孔洞,此外模型尺寸增大将需要更大的固结压力,进而对设备提出更高要求,因而使用受限.纪玉诚等^[9]和齐剑峰^[10]采用真空固结的方法进行制样.该方法比传统泥浆固结法更简单,加载设备简单且泥浆中无气泡残留,但是试样的密度难以预先确定.

土工离心模型试验技术^[11]是岩土工程技术研究中最先进、最主要的物理模型试验手段之一,它可以使得模型尺寸缩小至 $1/N$ 的土工模型的土体应力与原型相似.根据比尺效应,其固结时间是 $1/N^2$,因此可在几天时间内实现数百年的固结过程,因此在离心模型试验中,直接在离心机内完成泥浆固结也成为一种制样手段^[12].但是离心机设备昂贵,使用一次耗费较大,因此难以广泛使用.

制样技术的不断发展最终是为了满足试验的需要,而试验研究则是基于同一情况进行反复对比研究,因此需要试样具有较好的均一性,否则难以获得土体真实的物理、力学模型参数.从上述内容可以看出,对于不同类型的土样,需选择适宜的制样方法;而为满足工程实际需要,尚需保证试样能满足指定的含水率和干密度,因此常规的湿捣法制样具有较大的局限性,需要研究人员针对具体问题不断进行改进.

2 低液限粉质土三轴制样器设计思路

三轴试验是获取土体参数的主要试验手段,本文针对三轴试样制样技术展开研究.通过分析发现制样相对均匀的泥浆固结法不适用于低液限粉质土:一方面泥浆固结法需要制作相应的加载设备,即便相对简单的真空固结方式也需要辅助一定密封设备以施加真空;一方面采用粉质土制备泥浆时易产生偏析,使得黏粒浮于表面.由于低液限粉质土具有较低黏性,通过空中沉积法可得到良好制样效果.但这种方法制作的试样密实度较低,即便施以振捣也无法达到较大的密实度,反而因空间狭小导致土粒跳脱,如能解决密实度问题,这将是一个可行方法.结合固结原理而考虑在试样饱和后,再加载固结,解决干密度问题.如果

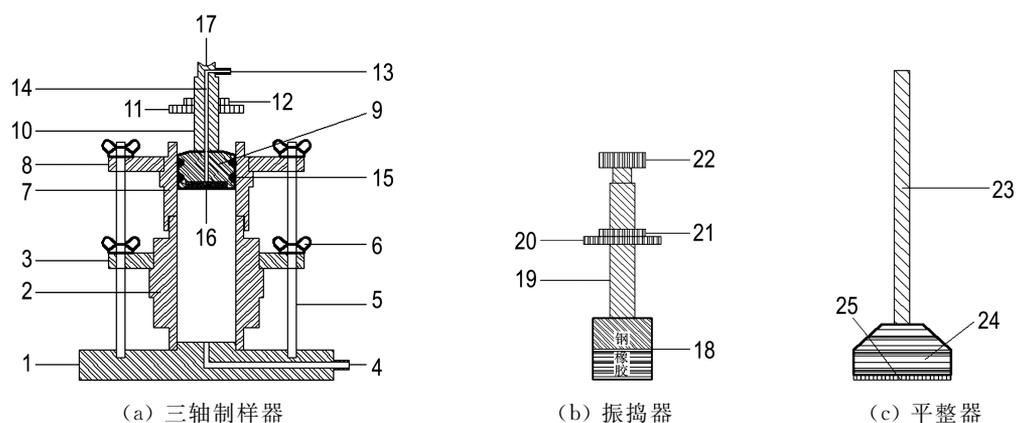
采用空中沉积法,一般都预先放置橡胶膜,因此套橡胶膜的影响也可以忽略.

通过上述分析,本文总结前人设计思路,改进不足之处,创新性地提出一种从干起、饱和止的新型三轴制样器及其使用方法,该设备可有效减少人为因素影响,并可配合传统三轴仪进行密度控制,在保证试样均一性的同时,降低经济成本,相应的制样方法可适用于各种黏性土,但考虑粉质土的特点以及制样过程需要固结控制干密度而导致制样时长增加,因此该方法对粉质土制样效果最佳.目前该设备已获得国家知识产权局授权(专利号 ZL 201210559105.1).

3 低液限粉质土三轴制样器结构及试验方法

如图1所示,制样设备由试样筒、加载器和辅助装置组成,其中辅助装置包括振捣器和平整器.试样筒作为设备主体包括底座、对开模、对开模固定板、增容筒、增容筒固定板5部分;底座下端设有圆槽与三轴仪相匹配,中心设有圆形凸台与对开模匹配,圆形凸台与底座侧边的中心垂直线处设有导气导水通道;对开模由两块半圆形金属片组成,在连接边缘一端设置凸槽,另一端设置凹槽,通过橡胶圆条密封;对开模内侧刻有若干宽1.5 mm、深1.5 mm的纵向和环向排气槽,以保证橡胶膜与对开模紧密贴合;对开模下端与底座的圆形凸台相匹配,对开模上端与增容筒下端相匹配;增容筒为钢制密闭圆环,用于固定制样初期超出对开模的土样;固定杆通过旋入螺纹圆槽固定在底座上,通过固定板将底座、对开模与增容筒固定在一起.加载器包括加载头、螺纹杆、定位板、紧固片、导气导水孔,该装置在二次固结时用来施加荷载.平整器包括一字凸头、端头、导杆,该装置可将初装土样表面平整.振捣器包括钢-橡胶联合振捣头、螺纹杆、定位板、紧固片、辅助定位片,该装置可将初装土样的高度设置在预定位置.

本制样器具有单独的底座与三轴仪配合使用,考虑试样制备完成后需再次放在三轴仪底座上进行后续试验,这一过程中可能对试样产生扰动,为将这一扰动降至最低,设计了相应的试验步骤,如图2所示.



1 底座；2 对开模；3 对开模固定板；4 第一导气导水孔；5 固定杆；6 螺母；7 增容筒；8 增容筒固定板；9 加载头；10 螺纹杆；11 定位板；12 紧固片；13 第二导气导水孔；14 导气导水通道；15 密封圈；16 透水石；17 弯凹槽；18 钢-橡胶联合振捣头；19 螺纹杆；20 定位板；21 紧固片；22 辅助定位片；23 导杆；24 端头；25 一字凸头

图1 三轴制样器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of triaxial sampler

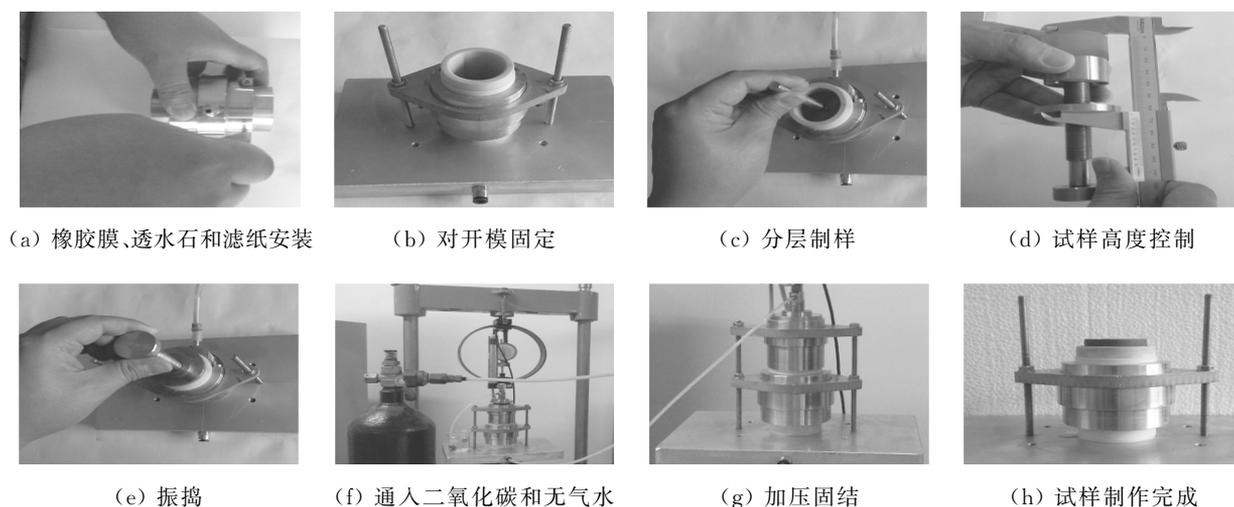


图2 制样流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sample preparation

根据初定干密度要求,计算并精确测量5份试验土样质量以及土样的控制高度;在对开模上套橡胶膜并用橡胶圈固定,将对开模放在底座上(见图2(a)、(b)).依次倒入风干粉质土,使用振捣器将土样控制在预定高度,完成初次干密度控制;通过增容筒保证土样高度不小于90 mm(可根据实际情况调整),并为后续固结保持高度余量.振捣器使用方法如下:通过千分尺确定定位板高度,并采用紧固片进行固定,待固定后,通过轻敲使定位板移至对开模处,使得风干粉质土

达到预定干密度(见图2(c)~(e)).将加载器放置在增容筒内,加载头下端与土样上表面接触,两者之间放置滤纸,上端与三轴仪的量力环相接触;先后通入二氧化碳和无气水,完成试样饱和,根据所需土样干密度得出试样控制高度(见图2(f)).如图2(g)所示,将定位板固定至相关高度后,启动三轴仪进行加压固结.如图2(h)所示,待固结完成后,取出土样,削去多余高度完成制样,并整理试验设备.与常规的湿捣法、泥浆固结法相比,本设备改进了对开模密封方式,同时将定位功能

融入其中,有效提高了试样精度,保证了抽真空效果,通过干、湿两级密度控制,精准实现试样密度;与三轴仪的协同工作体系,有效减少了设备投入;在制样过程中,试样始终处于对开模的保护中,而对开模紧密固定,因此人为因素无法影响试样本身,而预设橡胶膜也有效避免了其他因素的影响,使得整个制样过程中试样扰动降至最低,保障了试样的均一性。

4 制样效果的对比分析

规范中的制样方法要保证同一组试样的含水率和干密度与预定值的差值在一定范围内,因此在确定制样效果时,可通过对比试样含水率与干密度的均一性来检验^[13-14].为了检验试样的均一性,制作两个平行试样(试样 1、试样 2),并将试样五等分,采用烘干法测定含水率,用蜡封法测定干密度,烘干法两个平行试样含水率测定结果如表 1 所示。

表 1 烘干法两个平行试样含水率差值

Tab. 1 The difference in moisture content between the two parallel samples by the drying method

位置/cm	试样 1 含水率/%	试样 2 含水率/%	差值/%
0	22.95	23.01	0.06
20	22.82	22.81	0.01
40	22.71	22.68	0.03
60	22.58	22.52	0.06
80	22.40	22.31	0.09

文献[13]中针对整体击样法、分层击样法(即湿捣法)和分层压样法这 3 种方法进行了对比研究,将相关干密度通过预定干密度进行归一化处理,与本文方法结果进行对比分析.由于本文方法是由干土直接制成饱和试样,因此无法对不同制样方法获得的试样进行初始含水率的比较,后续仅对本次制作的两个试样的饱和含水率进行对比分析.试样含水率是将试样制作完成后,脱模并用可抽真空吸附的承模筒,将试样与橡胶膜分离,直接切成 5 段,各分段取中间部分以减少干扰,用烘干法测量含水率.由于本文方法为粉质土,重点采用了粉质黏土,加之上下端有滤纸、透水石和密封

圈等防护措施,可有效保证试样土颗粒稳固。

图 3 显示了不同制样方法归一化干密度分布曲线,其中虚线为基准线,即理想的试样干密度分布曲线应当与基准线重合.由图 3 可见,整体击样法分布曲线与基准线偏离较大,其他方法的分布曲线则呈现沿基准线附近波动的状态,表明整体击样法的制样效果相对较差。

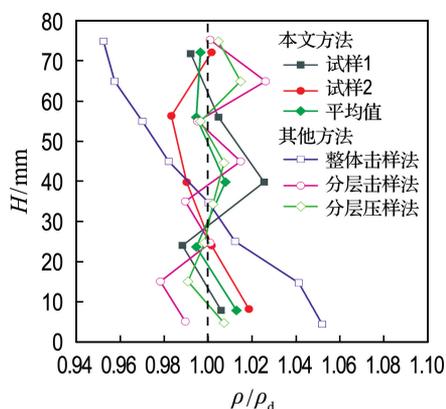


图 3 不同制样方法归一化干密度分布曲线

Fig. 3 Normalized dry density distribution curve of different sample preparation methods

由图 3 可见,本文方法、分层击样法和分层压样法相差较小,从波动的最大最小变化的差值来看,本文方法试样 1 为 0.038,试样 2 为 0.035,分层击样法约为 0.047,分层压样法约为 0.024,从这组数据可知,分层击样法的波动相对偏大,本文方法次之,分层压样法最小.根据文献[9]所述,由于切土过程中造成测得的数据离散性较大,故取多组数据的平均值绘制曲线,而本文方法则是单一试样的数据,为此也对两个试样的数据取平均值,并绘制曲线.根据本文方法平均值结果计算可知,最大最小变化的差值为 0.018,小于分层压样法.从图 3 的曲线来看,平均后的分布曲线也更贴近于基准线.因此采用本文方法所制作的试样,沿试样高度的干密度分布比较均匀,平行试样之间也有较好的均一性。

如图 4 所示为试样含水率随高度的变化,从图中可以看出,采用本文方法制作的试样含水率随高度呈线性变化,底部较大,顶部较小,但从最大最小含水率的差值来看,试样 1 为 0.55%,试样 2 为 0.7%,差异较小,可以接受.对比试样 1 与试样 2,可以看出两个试样之间的含水率差异

很小,这表明本文方法制作的试样饱和含水率比较均一。

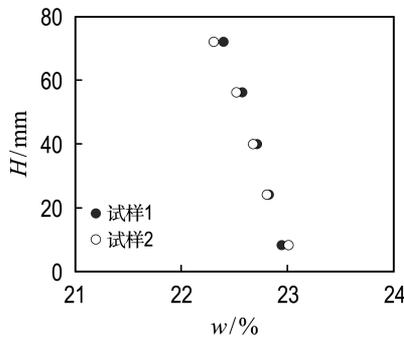
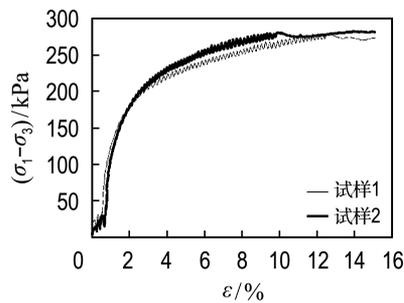


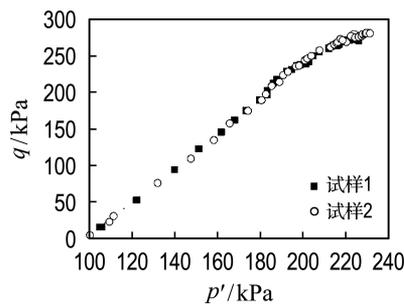
图4 试样含水率对比图

Fig. 4 Comparison diagram of sample moisture content

如图5所示,本文还对两个平行试样在固结压力100 kPa、剪切速度0.1 mm/s下进行了固结不排水剪切试验,试验结果表明两个试样的力学术性质基本一致。



(a) 偏差应力-应变关系曲线



(b) 有效应力路径

图5 三轴试验平行对比

Fig. 5 Parallel comparison of triaxial test

5 结语

面对日益复杂的实际问题,常规的制样技术越来越难于满足实际工程以及科研的需要,不断进行相关制样技术的研究是必不可少的。当然,普

适性的技术革新是比较困难的,因此针对性地结合土样的特点对现有技术进行改进是比较稳妥的途径。本文介绍的低液限粉质土三轴制样器由于干土入手,在制样器内饱和,通过两级控制,保证试样干密度的精确性,这一思路是将土力学试验中的反压饱和与侧限压缩试验相结合,和常规制样方法中需要土样保持一定初始含水率的基本条件明显不同,因此对后续土工制样技术的改进具有一定借鉴意义。

参考文献:

- [1] KHALILI A, WIJEWICKREME D. New slurry displacement method for reconstitution of highly gap-graded specimens for laboratory element testing [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2008, **31**(5): 424-432.
- [2] CARRARO J A H, PREZZI M. A new slurry-based method of preparation of specimens of sand containing fines [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2008, **31**(1): 1-11.
- [3] 马险峰, 孔令刚, 方 薇, 等. 砂雨法试样制备平行试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(10): 1791-1801.
MA Xianfeng, KONG Linggang, FANG Wei, *et al.* Study on parallel test of sample preparation by sand rain method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(10): 1791-1801. (in Chinese)
- [4] 赵守正, 栾茂田, 王忠涛, 等. 自动撒砂装置的研制与测试 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2013, **11**(5): 178-182.
ZHAO Shouzheng, LUAN Maotian, WANG Zhongtao, *et al.* Development and test of automatic sand-pour device [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2013, **11**(5): 178-182. (in Chinese)
- [5] KUERBIS R, VAID Y P. Sand sample preparation - the slurry deposition method [J]. *Soils and Foundations*, 1988, **28**(4): 107-118.
- [6] LADD R S. Preparing test specimens using undercompaction [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1978, **1**(1): 16-23.
- [7] FROST J D, PARK J Y. A critical assessment of the moist tamping technique [J]. *Geotechnical*

- Testing Journal*, 2003, **26**(1): 57-70.
- [8] SHEERAN D E, KRIZEK R J. Preparation of homogeneous soil samples by slurry consolidation [J]. *Journal of Materials*, 1971, **6**(2): 356-373.
- [9] 纪玉诚, 闫澍旺. 室内真空预压制备土样的技术及应用 [J]. 水运工程, 1997(12): 1-2.
JI Yucheng, YAN Shuwang. Technology and application of soil sample preparation by indoor vacuum pre-compaction [J]. *Port and Waterway Engineering*, 1997(12): 1-2. (in Chinese)
- [10] 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 Jianfeng. A study on cyclic shear behavior and softening deformation of saturated clay [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] 包承纲. 我国岩土离心模拟技术的应用与发展 [J]. 长江科学院院报, 2013, **30**(11): 55-66, 71.
BAO Chenggang. Application and development of centrifugal modeling technology for geotechnical engineering in China [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research*, 2013, **30**(11): 55-66, 71. (in Chinese)
- [12] HOSSAIN M S, KIM Y, GAUDIN C. Experimental investigation of installation and pullout of dynamically penetrating anchors in clay and silt [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, **140**(7): 04014026.
- [13] 袁雅贤, 冯怀平. 三轴重塑样均匀性研究及改进装置 [J]. 科学技术与工程, 2016, **16**(8): 261-265.
YUAN Yaxian, FENG Huaiping. Study on uniformity of triaxial remolded samples and introduction of an improved device [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, **16**(8): 261-265. (in Chinese)
- [14] 郑剑锋, 马巍, 赵淑萍, 等. 重塑土室内制样技术对比研究 [J]. 冰川冻土, 2008, **30**(3): 494-500.
ZHENG Jianfeng, MA Wei, ZHAO Shuping, et al. Development of the specimen-preparing technique for remoulded soil samples [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30**(3): 494-500. (in Chinese)

Comparative study of new triaxial sample preparation method and its applicability

LI Rongrong¹, YANG Gang^{*1,2,3}, ZHANG Jinli^{1,2,3}, YANG Qing^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Experimental Teaching Center of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Through the discussion of the traditional sample preparation technology, it is proposed that the relevant sample preparation technology should be developed according to the actual situation. A new sample preparation method and its related sample preparation equipment are invented. Based on the dry soil and through two-level control this method ensures the accuracy of the dry density of the sample, and the saturated sample is finally obtained, which is obviously different from the traditional method that requires the soil sample to have a certain initial moisture content. Relevant tests show that this method can improve the homogeneity of samples and reduce the influence of human factors, which can provide some reference for the improvement of geotechnical sample preparation technology in the future.

Key words: geotechnical test; sample preparation technology; uniformity; moisture content