

不同取样直径下软土物理力学特性室内对比试验分析

潘永坚, 李高山, 何 强, 周朱凤

(浙江省工程勘察院, 浙江 宁波 315012)

摘要:以宁波市轨道交通 4 号线岩土工程勘察项目为依托,采用软土地区目前普遍使用的敞口薄壁取土器,对两种不同直径取土器(75、100 mm)下采取的软土开展了室内对比试验。基于室内对比试验结果,分析了两种取样直径下软土物理力学性质指标取值的差异性及其产生机理;采用附加体积应变法对两种直径下土样的扰动程度进行了分析评价。结果表明:与直径 100 mm 的取土器相比,直径 75 mm 取土器获得的土样含水量、孔隙比有一定程度降低,降低幅度均为 9%;密度、压缩模量及抗剪强度指标有一定幅度的增加,增加幅度 2%~21%;土样的体积应变均值分别为 6.4%、6.6%,扰动程度评价均为很大;大直径取土器获得的土样较小直径土样更接近于软土实际性

关键词:软土;取样直径;物理力学指标;机理分析;扰动程度

中图分类号:TU411 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)01-0067-06

Comparative lab-testing of physical and mechanical properties of soft soil at different sampling diameter

PAN Yongjian, LI Gaoshan, HE Qiang, ZHOU Zhufeng

(Zhejiang Engineering Prospecting Institute, Ningbo Zhejiang 315012, China)

Abstract: Based on Ningbo rail transit Line 4 geotechnical investigation project, comparative lab-testing was conducted on soft soil taken at two different diameters ($D = 75\text{mm}$, $D = 100\text{mm}$) with the open thin wall samplers commonly used in soft soil areas. Based the test results, the differences of indexes of physical and mechanical properties of soft soil at two sampling diameters and their mechanism were analyzed; the additional volumetric strain method was used to analyze and evaluate the disturbance of soil samples at two different diameters. The results show that the water content and void ratio of the soil sample with the diameter of 75mm reduced to a certain extent with the reduction range of 9% compared with the soil sampler with the diameter of 100mm; the density, compressive modulus and shear strength index increased to a certain extent with the increasing of 2% to 21%; the average volumetric strain of soil samples was 6.4% and 6.6% respectively, and the degree of disturbance was very large; the soil samples which were obtained by the large diameter soil sampler was closer to the actual properties of soft soil than the small diameter soil sampler.

Key words: soft soil; sampling diameter; physical and mechanical indicators; mechanism analysis; degree of disturbance

0 引言

取样是岩土工程勘察中经常性的工作,是定量评价岩土工程问题必不可少的工作。软土作为一种特殊性土,具有天然含水量高、天然孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低、固结系数小、固结时间长、灵敏度高、扰动性大、透水性差等特点^[1]。软土的特殊性状

使得土体在取样过程中及取样后的封样、运输、储存以及试样制备过程中对土样造成扰动,引起土样的应力状态、内部结构、化学成分及组成成分等方面发生变化,从而表现出土样的物理力学性状的改变,导致室内试验测定的土样参数不能正确的反映地基土的真实性状^[2-5]。

收稿日期:2018-07-15; **修回日期:**2018-11-01 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2019.01.012

基金项目:宁波市自然科学基金(编号:2017A610318)

作者简介:潘永坚,男,汉族,1963年生,教授级高级工程师,岩土工程专业,主要从事岩土工程勘察、试验工作,浙江省宁波市海曙区丽园南路501号。

引用格式:潘永坚,李高山,何强,等.不同取样直径下软土物理力学特性室内对比试验分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):67-72.
PAN Yongjian, LI Gaoshan, HE Qiang, et al. Comparative lab-testing of physical and mechanical properties of soft soil at different sampling diameter[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(1):67-72.

对于软土,固定活塞薄壁取土器是目前国际公认的高质量取土器,但在实际的岩土工程勘察实践中,原状土样的采用较多的是敞口薄壁取土器,目前普遍采用的是 $D=75、100$ mm 两种不同直径的取土器,对于两种不同直径的薄壁取土器,哪一种获得的土样最接近于土体真实性状,不同直径之间得到的软土指标数值之间的变化规律及其机理、扰动程度等是岩土工程师始终关注的问题^[6-7],近年来也很少看到这方面的研究成果发表。笔者以宁波市轨道交通4号线岩土工程勘察项目为依托,开展了室内对比试验。

1 试验场地岩土工程条件及取样方案设计

1.1 地形地貌

宁波市轨道交通4号线取样场地地形地貌单一类型属于滨海淤积和冲湖积平原,地势开阔较平坦,沉积类型为第四系海相软土层为主。

1.2 地基土的构成及其特征

根据勘察钻探采取的岩心、地质成因及年代,取样试验场地第四系地基土可划分为9个工程地质层组,见表1。

表1 地基土构成

Table 1 Foundation's formations

层号	名称	地质成因	厚度/m
①	粘土、淤泥质粘土	al-IQ ₁ ³ 、mQ ₁ ³	1.2、2.2
②	粘土、淤泥、淤泥质粉质粘土	mQ ₁ ² 、mQ ₁ ³ 、mQ ₁ ⁴	1.2、7.2、7.2
③	粉质粘土	al-mQ ₁	3.4
④	淤泥质粉质粘土、粘土、粘质粉土	mQ ₁ ¹ 、mQ ₁ ² 、al-mQ ₁	6.1、14.7、2.9
⑤	粉质粘土、粉砂、圆砾、粉质粘土	mQ ₂ ² 、alQ ₂ ² 、alQ ₂ ³ 、al-IQ ₂ ³	3.2、1.5、4.5、1.9
⑥	粉质粘土	al-IQ ₂ ³	2.0
⑦	粉砂、砾砂、粉质粘土	alQ ₃ ¹ 、alQ ₃ ² 、alQ ₃ ³	3.4、4.3、3.4
⑧	粉质粘土、粉砂、圆砾、粉质粘土	al-IQ ₂ ² 、al-IQ ₂ ³ 、alQ ₂ ² 、alQ ₂ ³	3.4、3.3、5.0、2.2
⑨	含砾砂粉质粘土	al-plQ ₁ ²	6.0

1.3 取样方案

采用对比试验,对场地上部②、④层淤泥、淤泥质土进行现场钻探取样,敞口薄壁取土器直径分别为75、100 mm。

为保证土样数量满足课题分析需要,现场共布置2个钻探孔(BY1、BY2)进行现场取样,同时为满足对比试验分析需要,两取样孔取样深度保持一致,钻孔间距5 m,取样间距0.5、1.0 m,取样方法、数

量及相关要求见表2。

表2 取样方法及数量要求

Table 2 Method and required amount of sampling

孔号	取样方法	取样管尺寸 ($D \times L$)/mm	设计孔深/m	取样数量/个	土体类型	备注
BY1	敞口薄壁取土器	75×500	25	21	软土	取样深度保持一致
BY2	敞口薄壁取土器	100×300	25	21		

2 室内试验方案设计

2.1 试验项目及数量

对采用不同直径薄壁取土器获得的软土土样,分别开展常规(含水量、密度、孔隙比、标准固结)、剪切(固结快剪、三轴CU)等室内试验^[8],常规试验21个,直剪固结快剪21个,三轴CU6个。

2.2 薄壁开样和试样制作

薄壁土样推出方向应与钻孔内取土时土样进入取土管方向一致,且连续匀速推出,试样制备选择土样中心位置土体。薄壁土样(75 mm×500 mm)及部分环刀试样见图1。



图1 薄壁土样及环刀试样

Fig.1 Thin wall soil samples and test samples of cutting ring

3 试验结果分析

3.1 物理性质指标对比分析

不同直径下软土薄壁土样含水量、密度、孔隙比试验结果及其比值见图2~4及表3。

从图2及表3可以看出:对同一深度土体,直径 $D=75$ mm 土样含水量稍小于直径 $D=100$ mm 土样含水量,两者比值范围73%~107%,均值91%;含水量统计均值分别为50%($D=75$ mm)、54.9%($D=100$ mm)。试验数据及其对比分析表明:对于敞口薄壁取土器,小直径取土器获得的土样含水量小于大直径,其比值均值为91%。

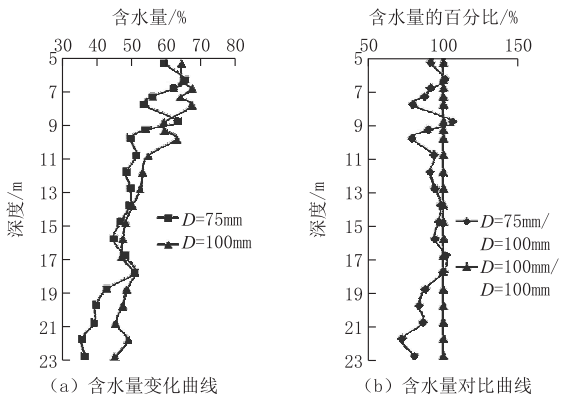


图 2 不同直径下土样含水量试验结果

Fig.2 Test results of water content of soil samples at different diameters

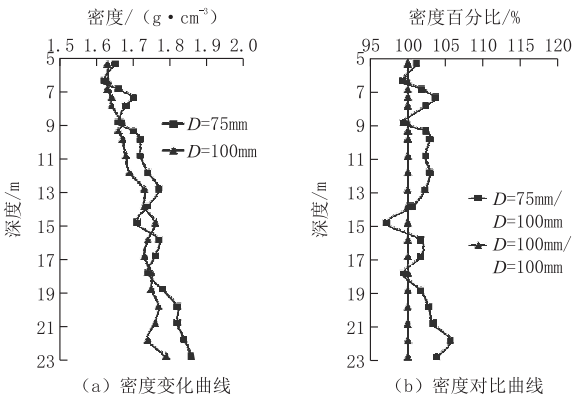


图 3 不同直径下土样密度试验结果

Fig.3 Test results of density of soil samples at different diameters

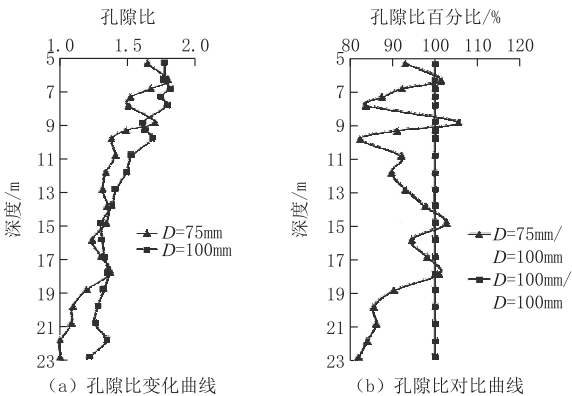


图 4 不同直径下土样孔隙比试验结果

Fig.4 Test results of void ratio of soil samples at different diameters

表 3 不同直径下土样物理性能

Table 3 Physical properties of soil samples at different diameters

取样直径	物理性能		
	含水量/%	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比
D=75 mm 均值	50.0	1.74	1.374
D=100 mm 均值	54.9	1.71	1.499
(D=75 mm/D=100 mm) 比值范围	73~107	97~106	102
=100 mm)/% 比值均值	91	82~106	92

从图 3 及表 3 可以看出:采用不同直径的薄壁取土器获得的同一深度土样密度大小及其比值关系曲线显示,直径 $D=75\text{ mm}$ 下测得的密度稍大于直径 $D=100\text{ mm}$ 下土样的密度,两者的比值范围 $97\% \sim 106\%$,均值 102% ,试验深度内两种直径下软土的密度均值分别为 $1.74、1.71\text{ g/cm}^3$ 。密度试验分析表明,直径 $D=75\text{ mm}$ 的土样密度是直径 $D=100\text{ mm}$ 的土样密度 1.02 倍,即对于敞口薄壁取土器,取样直径对其影响程度较小。

从图 4 及表 3 可以看出:试验深度范围内,直径 $D=100\text{ mm}$ 下土样的孔隙比呈现大于直径 $D=75\text{ mm}$ 试样孔隙比的变化趋势,两者的比值范围 $82\% \sim 106\%$,均值 92% 。两种土样直径下,软土孔隙比分别为 $1.374(D=75\text{ mm})、1.499(D=100\text{ mm})$ 。试验数据分析表明:直径 $D=75\text{ mm}$ 的土样孔隙比是直径 $D=100\text{ mm}$ 的土样孔隙比的 92% ,薄壁取样管直径对软土孔隙比影响较为显著。

3.2 力学性质指标对比分析

3.2.1 压缩模量

不同直径下($D=75\text{ mm}、D=100\text{ mm}$),采用薄壁取土器取样测定的土样压缩模量及其对比关系见图 5。

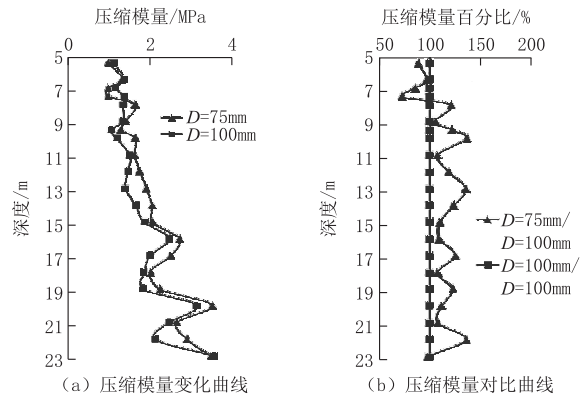


图 5 不同直径下土样压缩模量试验结果

Fig.5 Test results of compressive modulus of soil samples at different diameters

图 5 曲线显示:对于同一深度土样,直径 $D=75\text{ mm}$ 的压缩模量大于直径 $D=100\text{ mm}$ 的压缩模量,两者的比值范围 $73\% \sim 137\%$,均值 112% ,压缩模量统计均值分别为 $2.0、1.8\text{ MPa}$ 。即直径 $D=75\text{ mm}$ 的土样压缩模量是直径 $D=100\text{ mm}$ 的土样压缩模量的 1.12 倍,土样直径对压缩模量的影响较大。数值对比分析见表 4。

表4 不同直径下土样压缩模量对比

Table 4 Comparison of compressive modulus of soil samples at different diameters

$D=75$ mm 均值/MPa	$D=100$ mm 均值/MPa	$D=75$ mm/ $D=100$ mm/% 比值范围	比值均值
2.0	1.8	73~137	112

3.2.2 抗剪强度(直剪固结快剪)

不同直径下($D=75$ mm、 $D=100$ mm)土样抗剪强度指标及其比值关系见图6、图7。

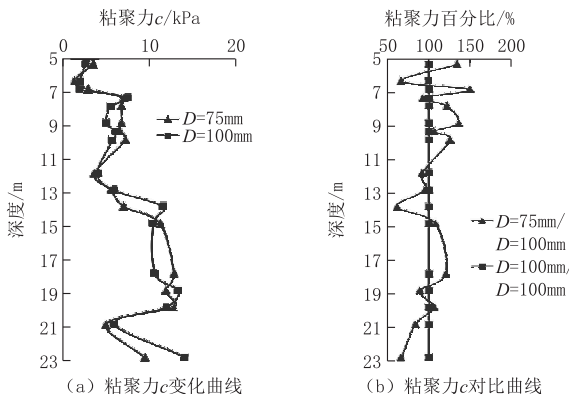
图6 不同直径下土样粘聚力 c 试验结果

Fig.6 Test results of cohesion of soil samples at different diameters

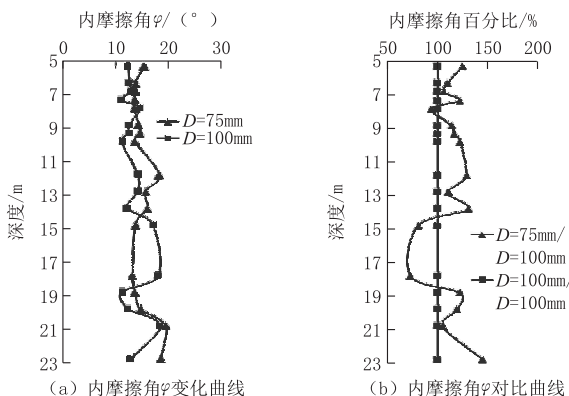
图7 不同直径下土样内摩擦角 φ 试验结果

Fig.7 Test results of internal friction angle of soil samples at different diameters

图6、图7对比分析显示:对同一深度土样,测定的粘聚力比值范围为62%~150%,均值104%,粘聚力均值分别为7.3、7.1 kPa;内摩擦角比值区间73%~145%,均值113%,取值分别为15.1°、13.6°。但在试验深度范围内,不同直径取土器获得的土样抗剪强度数值离散性及差异性均较大,指标统计见表5。

不同直径薄壁器取样方式下土样抗剪强度指标关系分析表明:取样器直径大小对软土的粘聚力影响

表5 不同直径下土样抗剪强度(直剪固结快剪)指标对比

Table 5 Comparison of shear strength (consolidated quick shear test) of soil samples at different diameters

取样直径	物理性能	
	粘聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /°
$D=75$ mm 均值	7.3	15.1
$D=100$ mm 均值	7.1	13.6
$(D=75$ mm/ $D=100$ mm)/% 比值范围	62~150	72.7~145
比值均值	104	113

较小,对内摩擦角影响较大。数据表明:取土器直径越小,其抗剪强度指标取值越大。

3.2.3 三轴(CU)抗剪强度

不同直径下($D=75$ mm、 $D=100$ mm)薄壁土样室内三轴(CU)抗剪强度指标及其对比关系统计见表6。

表6 不同直径下土样抗剪强度(CU)指标对比

Table 6 Comparison of shear strength (CU) of soil samples at different diameters

序号	深度/ m	土 性	c /kPa		φ /°	
			$D=75$ mm	$D=100$ mm	$D=75$ mm	$D=100$ mm
1	-5.3		1	0	18.5	16.9
2	-6.3		22	8	11.9	11.7
3	-6.8	淤 泥	26	11	11.7	15.9
4	-7.3		13	10	15.0	9.7
5	-7.8		8	10	12.0	9.8
6	-8.8		8	34	12.4	4.9
均值			13	12.2	13.6	11.5
比值($D=75$ mm/ $D=100$ mm)			1.07		1.18	

从表6淤泥土样室内三轴(CU)试验成果可以看出:采用 $D=75$ mm取土器时,淤泥的粘聚力、内摩擦角整体上大于 $D=100$ mm薄壁取土器测得的数值。两种不同直径下淤泥的粘聚力均值分别为13.0、12.2 kPa,比值1.07;内摩擦角均值分别为13.6°、11.5°,比值1.18。数据分析表明,对于薄壁取土器,其直径越小,土样室内三轴(CU)抗剪强度指标越大。

3.3 试验结果综合对比分析

不同取样直径下软土物理性质指标见表7。从表7可见,软土的含水量、密度和孔隙比均受土样的直径影响,室内试验成果分析表明,取样管直径 $D=75$ mm土样含水量和孔隙比均比直径 $D=100$ mm的土样降低了9%,而密度则提高了2%。

表 7 不同直径下软土物理性质指标综合对比

Table 7 Comprehensive comparison of physical indicators of soft soil at different diameters

取样直径	含水量/%	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比
D=75 mm	50.0	1.74	1.37
D=100 mm	54.9	1.71	1.50
提高幅度(D=75 mm/ D=100 mm)/%	-9	2	-9

采用不同直径取土器下得到的软土的力学性质指标(压缩模量、抗剪强度)见表 8,对比显示:直径 D=75 mm 下软土的力学性质相对与 D=100 mm 土样均有不同程度的提高,提高幅度为 3%~21%。

表 8 不同直径下软土力学性质指标综合对比

Table 8 Comprehensive comparison of mechanical indicators of soft soil at different diameters

取样直径	压缩		固结快剪		三轴 CU	
	模量/ MPa	粘聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	粘聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	
D=75 mm	2.0	7.3	15.1	13.0	12.6	
D=100 mm	1.8	7.1	13.6	12.2	10.4	
提高幅度(D=75 mm/ D=100 mm)/%	11	3	11	7	21	

对两种不同直径下薄壁土样室内试样获得的物理力学性质指标综合分析表明:相对比大直径薄壁取土器,小直径敞口薄壁取土器获得土样的含水量、孔隙比有所降低;密度、压缩模量及抗剪强度指标均有一定程度的提高。

3.4 指标差异性机理分析

饱和软土为固、液两相体,土体结构如图 8 所示。在室内试验中,对于固定体积的饱和软土,当含水量较低时,其土颗粒的体积必然会相应增大,由于土颗粒密度比水大,因此含水量小的饱和软土室内试验测定的土样密度相对较大;同样,由于饱和和土体

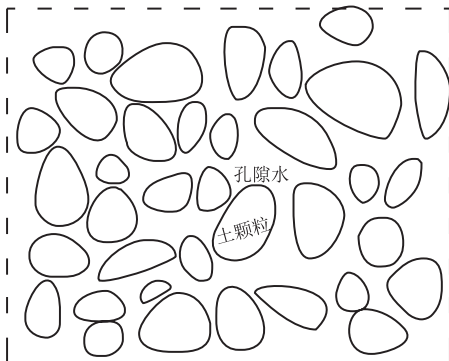


图 8 饱和软土结构示意图

Fig.8 Structure of saturated soft soil

内孔隙水的排出,孔隙比随之降低,土颗粒数量增多,颗粒之间的接触面增大,最终导致土体力学性状提高。

结合不同直径下敞口薄壁取土器获取的饱和软土土样室内试验结果进行分析:直径 D=75 mm 的薄壁取土器由于土样直径较小,在钻孔内取样及室内推土过程中软土更易遭受挤压,产生渗透固结变形,最终相对于直径较大(D=100 mm)的软土土样,其含水量、孔隙比均出现不同程度的减小,相应的密度及力学性状得到改善。

4 扰动程度评价分析

4.1 附加体积应变法

软土一般是在静水或缓慢水流的沉积环境中形成的,故上覆荷载往往增长缓慢,使颗粒接触点间产生固化作用,接触点的强度增加以抵抗荷载的增加,而取样时的扰动将破坏这种作用,致使室内试验再加荷到上覆压力时产生附加的体积压缩,因此根据土样在原位压力下再固结时附加体积应变就可以评价取土质量。

在上覆压力作用下,附加体积应变为:

$$\epsilon_v = \Delta v/v = \Delta e_0/(1+e_0) \quad (1)$$

式中: e_0 ——土样的初始孔隙比; Δe_0 ——加荷至自重应力时孔隙比的减量。

评价土样扰动程度参考指标见表 9^[9]。

表 9 评价土试样扰动程度的参考标准

Table 9 Reference standard for appraise the disturbance degree of soil sample

扰动程度评价指标	ϵ_v /%	扰动程度评价指标	ϵ_v /%
几乎未扰动	<1	很大扰动	4~10
少量扰动	1~2	严重扰动	>10
中等扰动	2~4		

4.2 评价结果分析

分别取自重压力为 50、100、150 kPa 时不同取样方法获得的土样,经式(1)计算得到土样附加体积应变见表 10。

计算得到两种不同取样直径下的体积应变均值分别为 6.4%、6.6%,按表 9 判断均为扰动程度很大。附加应力体积应变法分析表明,敞口薄壁取土器对软土的取样效果不太乐观。

表 10 附加体积应变法评价土样质量结果

Table 10 Appraised results of soil sample's quality by the method of added volumetric strain

取样直径 D / mm	样号	自重 压力/ kPa	初始 孔隙 比 e_0	自重压力 作用下孔 隙比 e_1	ε_v / %	扰动 程度	综合扰 动程度
75	BY1-2	50	1.804	1.583	7.9	很大	很大 (6.4)
	BY1-12	100	1.357	1.230	5.4	很大	
	BY1-18	150	1.097	0.973	5.9	很大	
100	BY2-2	50	1.780	1.597	6.6	很大	很大 (6.6)
	BY2-12	100	1.389	1.236	6.4	很大	
	BY2-18	150	1.283	0.082	6.8	很大	

5 结论

(1)直径 $D=75$ mm 土样含水量、孔隙比均比直径 $D=100$ mm 土样降低 9%，而密度则提高了 2%。

(2)直径 $D=75$ mm 软土的力学性质相对于 $D=100$ mm 土样均有不同程度的提高，提高幅度为 3%~21%。

(3)对于敞口薄壁取土器，小直径取土器土样更易受到外界荷载影响而产生渗透固结，导致含水量及孔隙比降低，力学性状得到改善。相对而言， $D=100$ mm 敞口薄壁取土器得到软土物理力学性质指标更接近于土体真实性状

(4)两种不同直径下土样的体积应变均值分别为 6.4%、6.6%，扰动程度评价均为很大，敞口薄壁取土器对饱和软土的取样效果不太乐观。

参考文献(References):

- [1] 李广信,等.土力学(第2版)[M].北京:清华大学出版社,2013.
LI Guangxin, et al. Soil Mechanics (Second Edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [2] 高大钊,张少钦,姜安龙,等.取样扰动对土的工程性质指标影

响的试验研究[J].工程勘察,2006,(3):6-10.

GAO Dazhao, ZHANG Shaoqin, JIANG Anlong, et al. Test study of the influence of sampling disturbing on soil engineering properties[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006,(3):6-10.

- [3] 刘华清,赵春风,高大钊.取样扰动对土天然强度指标的影响和处理方法[J].岩土工程技术,2002,(3):158-162.
LIU Huaqing, ZHAO Chunfeng, GAO Dazhao. Influence of disturbed samples on soil natural strength parameter and its treatment [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2002,(3):158-162.
- [4] 姜安龙,高大钊.取土器直径对取样扰动的影响分析[J].工程勘察,2002,(4):13-14,18.
JIANG Anlong, GAO Dazhao. Impact analysis of the disturbance of soil sample at the varies diameter of sampler[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2002,(4):13-14,18.
- [5] 王年香,魏汝龙.沿海软粘土取土质量的对比分析[J].工程地质学报,1994,2(2),66-75.
WANG Nianxiang, WEI Rulong. Comparative analysis of sampling quantity for coastal soft clay[J]. Journal of Engineering Geology, 1994,2(2),66-75.
- [6] 吕海波,宁世朝,龚宪伟,等.两种浅海软土的取样质量评价[J].土工基础,2006,20(5),75-77.
LU Haibo, NING Shichao, GONG Xianwei, et al. Sampling quality evaluation of two soft soils under shallow sea[J]. Soil Engineering and Foundation, 2006,20(5),75-77.
- [7] 邓永锋,刘松玉.扰动对软土强度影响规律研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(9),1940-1944.
DENG Yongfeng, LIU Songyu. Effect of sample disturbance on soft soil strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(9),1940-1944.
- [8] GB/T 50123-1999,土工试验方法标准[S].
GB/T 50123-1999, Standard for soil test method[S].
- [9] GB 50021-2001,岩土工程勘察规范(2009年版)[S].
GB 50021-2001, Code for investigation of geotechnical engineering (2009)[S].

(编辑 周红军)