

# 土样的不同制备方法对其性质的影响分析

邹洪宝

(中铁十六局集团北京轨道交通工程建设有限公司,北京市 101100)

**摘要:**岩土材料具有典型的结构性,土工试验是研究土体各种性质的一个重要手段。该文以从广州南沙地区钻取的原状软土和采用击样法以及预压固结法制备的重塑软土为研究对象,分别进行了压汞试验、渗透试验以及直剪快剪试验。试验结果表明:原状土的小孔数量占比较大、渗透系数最小、抗剪强度最大;击样法制得土样中大孔占比较大、渗透系数最大、抗剪强度最小;而采用预压固结法制得的土体试样的以上性质介于原状土和击样法制得土样之间。这是由于不同的制样方法制得土样的结构性不同所引起的。

**关键词:**土工试验;结构性;重塑土;孔隙分布;渗透性

土工试验是土力学中的基本内容,试验土力学是土力学的一个重要分支。广义的土工试验包括室内试验、原位试验、模型试验和原型监测等。由于土体具有结构性,因此土体的原位取样和测试极其重要,如何在原位测试以及取样运输过程中尽可能地保持原状土的结构性是岩土界的一个难题,也是国内外学者们不懈的追求目标。原状土的取样和运输过程需要人力物力

多方面的保证,对于需要大量土样的试验,完全使用原状土是不经济的。而制备重塑土样能重复使用土体,因此能够满足大量土样需求,并且简单经济,所以目前很多研究都是在试验室的重塑土上进行的。

土体材料与其他材料不同,它由固体、液体和气体三相物质组成,具有明显的结构性。因此试验室制备重塑土样时需要尽量还原原状土的结构形式,以获得

- \*\*\*\*\*
- [6] X. Shi, L. Cai, W. Xu, et al. Effects of Nano-Silica and Rock Asphalt on Rheological Properties of Modified Bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2018, 161: 705-714.
- [7] A. Behnood, M. Modiri Gharehveran, Morphology, Rheology, and Physical Properties of Polymer-Modified Asphalt Binders[J]. European Polymer Journal, 2019, 112: 766-791.
- [8] R. Li, P. Karki, P. Hao, et al. Rheological and Low Temperature Properties of Asphalt Composites Containing Rock Asphalts[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 47-54.
- [9] R. Li, P. Wang, B. Xue, et al. Experimental Study on aging Properties and Modification Mechanism of Trinidad Lake Asphalt Modified Bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 878-883.
- [10] S. Liu, W. Cao, X. Li, Z. Li, C. Sun, Principle Analysis of Mix Design and Performance Evaluation on Superpave Mixture Modified with Buton Rock Asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 549-555.
- [11] S. Ren, M. Liang, W. Fan, et al. Investigating the Effects of SBR on the Properties of Gilsonite Modified Asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2018, 190: 1103-1116.
- [12] L. Y. Ming, C. P. Feng, E. A. A. Siddig. Effect of Phenolic Resin on the Performance of the Styrene-Butadiene Rubber Modified Asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2018, 181: 465-473.
- [13] P. Liang, M. Liang, W. Fan, et al. Improving Thermo-Rheological Behavior and Compatibility of SBR Modified Asphalt by Addition of Polyphosphoric Acid (PPA)[J]. Construction and Building Materials, 2017, 139: 183-192.
- [14] M. Pszczola, M. Jacewski, C. Szydlowski, J. Judyci, B. Dozycki. Evaluation of Low Temperature Properties of Rubberized Asphalt Mixtures[J]. Procedia Engineering, 2017, 172: 897-904.

更为科学的试验结果。目前试验室内制备重塑土样的方法主要为击样法(压样法),但是这种方法制备的土样结构性方面失真较严重,近些年有部分学者提出了预压固结的方法制备试样,并取得了一定的效果。但是这种制样方法制得的土样与原状土以及击样法制得试样具体在哪些方面存在差异,并没有系统的分析。该文以具有典型软土结构的广州南沙软土为基材,分别采用现场取样法、击样法和预压固结法制备不同的试样,然后分别对这些试样进行压汞试验,测试其孔隙分布、渗流试验验证其孔隙结构性、直剪快剪试验测试其结构性和抗剪强度。希望通过这些试验结果分析得到一些有益的结论。

### 1 3 种制样方法介绍

岩土工程中经常需要获取岩土试样的基本物理力学参数如:比重、空隙率、 $c$ 、 $\varphi$  值以及渗透系数等。而这些参数往往需要制成特定的试样通过室内试验进行测试获取。目前试样的制备方法主要有原状土取样法以及室内重塑法两种方法。其中原状土试样制备时首先需要通过钻机用取土器从现场取得土样然后运输到试验场所。现场钻取土样以及土样的保存和运输都会对原状土有所扰动。如何尽可能地减少取样以及运输过程中对土样的扰动一直是一个难题,同时,当试验需要大量土样时,原状土制样无法满足试验量需求。相比之下试验室内制备的重塑土样能制备控制单一变量,能够提供大量土样,同时能循环使用土体,因此目前很多研究都是在室内重塑土样上开展的。

试验室内重塑土制样方法主要有两种:① 击样法;② 预压固结重塑法。其中击样法是将土样风干或者烘干后碾散过筛。过筛后的土样按照一定的含水量喷水湿润,搅拌均匀后密封过夜,使土样能充分均匀地湿润。湿润后的土样按照设定的质量分层以一定的击实功压入环刀中,最后经饱和后供试验测试。预压固结重塑法为泥浆预压固结法,这种方法较为新颖,是一些学者最近提出的新方法。此方法首先将天然土风干碾散加水调成泥浆,然后装入特定容器内加载使其排水固结,当固结程度达到要求后,卸载取出土样然后制备成环刀样或者三轴样。该方法目前没有统一的规范,只是部分学者在研究时为了尽可能地还原土体的原状结构采用的一种方法,因此根据不同的研究目的,这种土样制备方法的控制参数有所不同。

## 2 试验方案及试验方法

### 2.1 试验方案及试验仪器

试验所取土样为广州南沙地区的软土,土体中黏土矿物含量较多(表 1),为典型的软黏土,具有明显的结构性。

表 1 广州南沙地区软土矿物含量

样品 编号	石英/ %	长石/ %	伊利石/ %	绿泥石/ %	高岭石/ %	其他/ %
1 <sup>#</sup>	19.9	0	25.7	23.8	30.6	
2 <sup>#</sup>	24.8	0	23.4	26.3	23.3	2.2
3 <sup>#</sup>	21.4	0	16.9	30.0	31.8	
4 <sup>#</sup>	22.5	0	26.3	24.4	26.9	
5 <sup>#</sup>	24.0	0	24.9	19.9	29.3	1.9
6 <sup>#</sup>	22.2	0	27.4	25.9	24.5	
7 <sup>#</sup>	19.7	0	19.0	30.0	31.3	

该文分别采用原状土、击样重塑法以及预压固结重塑法制备多组试样然后通过压汞试验、直剪试验以及渗透试验来测试 3 种不同方法制备的土样在内部孔隙结构、物理力学特性以及水理特性方面的差异,具体的试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案

方法	组数	编号		
		原状土	预压固结法	击样法
渗透试验	11	YS	GS	JS
直剪试验	3	YZ	GZ	JZ
压汞试验	3	YY	GY	JY

该地区土体的比重为 2.67,液限为 62.81%,塑限为 34.73%。

每种制样方法制取的试样随机选 3 个做压汞试验,压汞试验仪器为 Micromeritics 公司生产的 AU-TOPORE 9510,孔隙测试范围为 3 nm~350  $\mu$ m。压汞试验在亚热带国家重点试验室试验平台进行。渗透试验时每种制样方法取 11 组进行渗透试验,渗透试验采用变水头法进行。试验仪器为独立设计制作的渗透仪,仪器共有 12 组,各组之间相互独立。直剪快剪试验共 3 组 12 个试样,试验仪器为应变控制式直剪仪。

### 2.2 试验方法

该研究开展时首先在广州南沙指定地区钻取天然土样,密封后运输到试验室。试样室及时将原状土开封按照试验方案制备试样。其中压汞试验试样的制备

方法较为特殊,该试样必须提前经过干燥处理,根据其他学者的研究,不同的干燥方法会影响试样的孔隙分布状况,其中风干法和烘干法对试样的影响最大,因此该文采用冷冻干燥法。该方法将原状土土样切块后迅速在液氮中冷冻,使土样中的土体迅速凝结成冰,然后将冷冻后的土样放在冷冻干燥仪中抽真空使水直接升华直至干燥,其他 3 种制样方法制得土样的干燥方式都采用冷冻干燥法。

击样法和预压固结法制样时采用质量控制法:取多个环刀原状土样,烘干后测试单环刀的土样干质量  $m_d$ ,然后以  $m_d$  为控制量来制备重塑土样。击样法较为简单,按照上一节介绍的方法制备后进行抽真空饱和,以供后续试验使用。而预压固结法较为复杂,首先将设定质量的碾散土体加水调成泥浆,浸润过夜。然后称总质量,再将泥浆平均分配到自制的预压固结容器中,最后加载预压,使泥浆在容器中排水固结。预压荷载采用分层预压法(按表 3 加载),由于初始条件下淤泥的强度很低,所以起始预压压力值较小为 10.15 kPa,然后依次加载到第 5 级,每级加载时间间隔 2 d,最后一级加载后等到沉降达到设计刻度线时卸载。

表 3 预压固结法荷载加载情况

等级	荷载/kN	等级	荷载/kN
第 1 级	10.15	第 4 级	40.60
第 2 级	20.30	第 5 级	50.75
第 3 级	30.45		

为了使预压结束后单个环刀切取的试样质量为  $m_d$ ,该试验严格控制加载时试样的沉降量,将预压容器外表面刻上刻度,通过计算使得预压固结沉降量达到一定值,此时预压试样单个环刀切除的土样中包含的土颗粒质量刚好为  $m_d$ 。

预压固结达到目标值后卸载、开样,按照原状土制样的方法制备环刀样,以备后续试验使用。

3 试验结果及分析

3.1 压汞试验结果

将上节制备完成的试样进行压汞试验,压汞试验能够较为准确地获取土样的内部孔隙分布情况。该试验能够通过压力与进汞量之间的关系求取试样中孔隙直径、孔隙占比及比表面积等。将压汞试验数据整理后得到 3 种不同制样方法制备的试样内部孔隙大小分

布情况如图 1 所示。

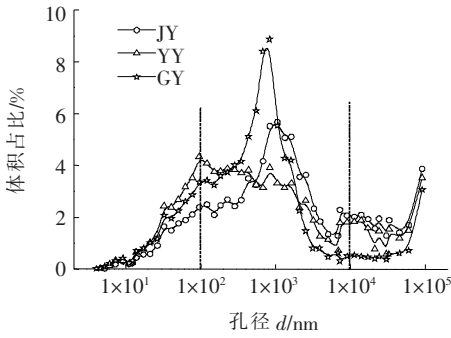


图 1 3 种土样的孔隙分布情况

由图 1 可见:3 种不同的制样方法得到的试样的孔隙大小分布有所差别。其中天然原状土的孔隙主要集中在 20~3 000 nm 之间,大于 10 000 nm 的孔隙体积占比约为 15%。而对于预压固结法制得的土样,其孔隙的直径主要集中在 50~2 500 nm 之间,约占总量的 80%,而且主要集中在 500~1 000 nm 之间。击样法制得的土样其孔隙主要集中在 100~2 000 nm 之间约占 50%,大于 10 000 nm 的孔隙体积约占 20%。从整体上看,原状土孔隙主要集中在中孔和小孔范围,预压固结法主要集中在中孔范围,击样法主要集中在中孔范围内的稍大中孔,同时在大孔范围内分布的数量也较其他两种要多。

天然原状土大多是在平缓的水环境中沉积形成的,而沉积时间较长,土颗粒在各种微观力的相互作用下能够形成较为稳定的结构,因此孔隙在大、中小范围内都有所分布,且在小孔和中孔分布的范围较多。对于预压固结法,由于在预压荷载的作用下土体中较难形成较大的孔隙结构,同时由于沉积时间较短,也较难形成细小的孔,因此该类土样的孔径主要集中在中孔。而对于击样法,击样时土体的含水量在塑限附近,击实功作用下的土样结构是不稳定的。试样制备完成后,环刀样中除了土颗粒和水外还有很多孔隙,在抽气饱和时,土颗粒继续移动,因此会形成较多的大孔隙。

3.2 渗透试验

渗透试验采用的是变水头法,渗透试样高 4 cm、直径 6.18 cm,水头控制在 30~45 cm 之间。由于渗透土样为黏土,该类土的饱和度很难保证,所以在该试验中又增加了渗透饱和法:先将玻璃管的水上升到一定的水头,然后等到渗透仪的出水口有相当量的水流后,才开始正式读数记录,以确保整个试验中土样是饱和的。3 种不同制样方法制取试样的渗透试验结果整理如图 2 所示。

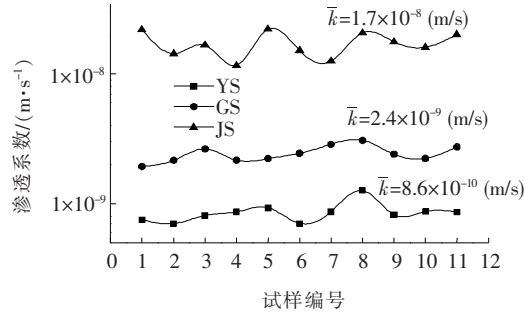


图 2 3 种制样方法制备土样的渗透系数

由图 2 可见:3 种制样方法渗透系数有数量级上的差别,其中原状土的渗透系数较小,预压固结法制得的土样渗透系数次之,而击样法制得的土样渗透系数最大,并且与原状土样的渗透系数呈 2 个数量级的差别。土体的渗流本质上是水体在土体内部的孔隙中流过,因此土体内部的孔隙结构对土体的渗透特性影响最为明显。孔隙结构包括孔隙的连通性、曲折性以及大小分布等。由以上压汞试验得到的 3 种试样孔隙的大小分布情况可知,原状土的孔隙主要集中在中孔和小孔,而预压固结法的孔隙主要集中在中孔,击样法会产生很多的大孔。不同孔径的孔隙其有效过流量不同,其中大孔的过流流量最大。同时由于黏土颗粒表面的双电层效应以及吸附结合水的效应,会对孔隙内流体流动产生负作用,相对于大孔,这种效应对小孔的渗流会产生更大的负影响。因此 3 种土样的渗透效应会产生较大区别。

3.3 直剪试验

由于原状土的强度较低,为了防止试验时竖向压力过大出现试样被压毁坏,因此在直剪试验时试样的竖向压力只取 50、100 和 150 kPa。为保证试验剪切荷载施加时 3 种试样保持原有的结构特征,因此该试验采用直剪快剪试验。试验结果如图 3 所示。

由图 3 可见:在不同的竖向压力下,3 种土样的直剪抗剪强度都是以原状土的最大,预压固结法的次之,击样法的最小。3 种土样的抗剪强度指标如图 4 所示。相关的文献表明:土体的结构性对土体的强度有一定的影响,尤其是结构性黄土、软土等最为明显。以广州南沙地区的软土为例,受海陆相水环境的共同作用,黏土颗粒沉积的环境较为复杂,电场力、范德华力以及重力之间的共同作用使得黏土颗粒沉积时相互排斥、吸引而形成蜂窝团聚等典型的软黏土结构,这种结构骨架具有一定的强度。对于击样法,实际上是先由击样锤和击样功决定了土体的结构,然后在抽气饱和

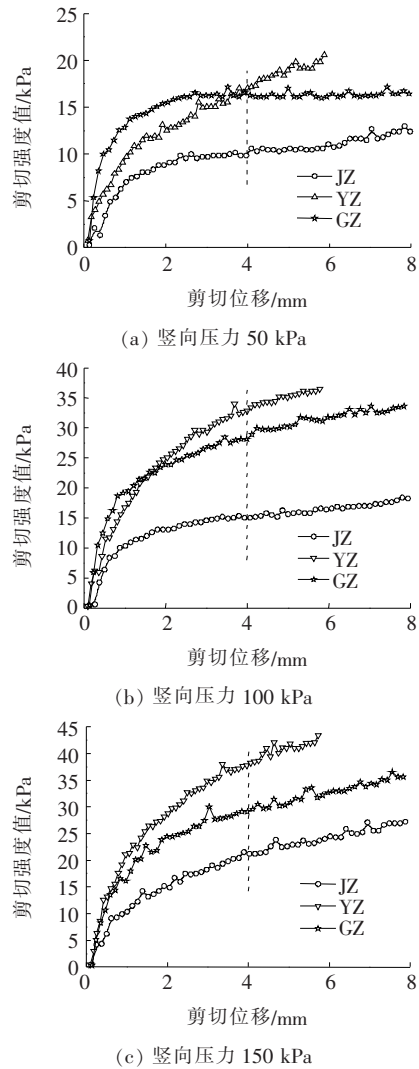


图 3 3 种试样直剪快剪试验结果

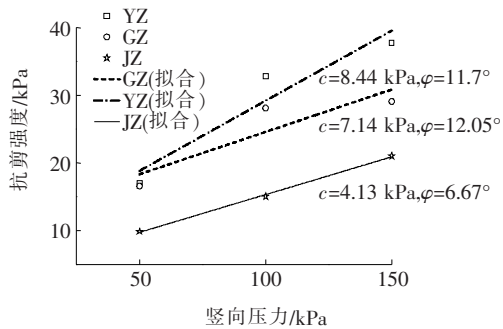


图 4 3 种土样的 c、φ 值

时这种结构还会有一定的变化,故这种结构是不稳定的。而对于预压固结法,荷载是分级加载且加载时间较长,因此在荷载作用下土样固结排水时泥浆中的土颗粒能够移动形成特殊的结构。相比自然的原状土沉积过程,预压固结法的沉积过程较迅速,因此可以认为预压固结法是自然沉积法的加速版,所以预压固结法



制得的土样与原状土土样的结构性较为相近,其土样强度与原状土的强度更为相近。

## 4 结论

该文通在广州南沙现场制取了原状土样,同时又在试验室通过击样法和自制的预压容器等方法制备了重塑土样,然后对这3种试样分别进行了压汞试验、渗透试验以及直剪试验,通过试验,得到以下主要结论:

(1) 压汞试验结果说明击样法制备的土样中大孔和中孔占的比例较多,而天然原状土中小孔和中孔占比较多,预压固结法制备的土样中中孔占的比例较多。

(2) 渗透试验表明:3种土样的渗透系数有着明显的差别,其中原状土的渗透系数最小,预压固结法制备的试样渗透系数次之,而击样法制备的土样渗透系数最大,与原状土渗透系数之间约有两个数量级的差别。这是由于不同大小的孔隙对渗透的贡献值不同,大孔对土体渗流量的贡献值更大,中孔次之而小孔最小。

(3) 直剪试验表明:原状土的抗剪强度最大,预压固结制样法次之,而击样法最小。由于原状土是经过长时间的沉积形成,因此具有稳定的内部结构,而预压固结法虽缩小短这种自然沉积的过程,但也能形成较为稳定的内部结构,对于击样法产生的土样由于没有土颗粒沉积的过程,因此形成的结构最不稳定,所以在抵抗外力作用时,3种结构具有不同的力学表现。

## 参考文献:

[1] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004.  
[2] 朱定华. 原状土样封装新方法[J]. 水文地质工程地质, 1993(1).  
[3] 周建,张金良,沈扬,等. 原状软黏土空心圆柱试样制备研究[J]. 岩土工程学报,2007(4).  
[4] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报,1999(1).  
[5] 潘明,全飞. 基于不同含水率下重塑黄土强度特性试验研究[J]. 中外公路,2019(3).

[6] 曾军军,卢廷浩. 考虑土体结构性的弹塑性软化模型[J]. 岩土力学,2007(6).  
[7] 张彤炜,徐海波,邓永锋. 结构性软黏土损伤变量与扰动度的相关性研究[J]. 岩土力学,2015(4).  
[8] 李晓军,张登良. CT技术在土体结构性分析中的应用初探[J]. 岩土力学,1999(2).  
[9] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].  
[10] 郭凯玥. 土工击实试验方法中几个常见问题分析[J]. 甘肃科技,2010(6).  
[11] 高游,孙德安. 制样方法对非饱和土力学特性的影响[J]. 岩土工程学报,2015(8).  
[12] 孙德安,高游. 不同制样方法非饱和土的持水特性研究[J]. 岩土工程学报,2015(1).  
[13] Y W S, R L, W S R. A New Slurry-Based Method of Preparation of Specimen of Sand Containing Fines[J]. Geotechnical Testing Journal, 2008,31(1):1—11.  
[14] O T E, H C J A. A New Slurry Based Method of Preparation of Hollow Cylinder Specimens of Clean and Silty Sand[J]. Geotechnical Testing Journal, 2013,36(6):811—822.  
[15] 刘江波. 海南滨海滨塘区软土固结特性分析[J]. 中外公路,2018(1).  
[16] 骆俊晖,米德才,刘先林,等. 软土工程特性研究与评价[J]. 中外公路,2017(6).  
[17] 张平,房营光,闫小庆,等. 不同干燥方法对重塑膨润土压汞试验用土样的影响试验研究[J]. 岩土力学,2011(S1).  
[18] Mitchell J K, Soga K. Fundamentals of Soil Behavior, 3rd Edition[M]. New York: John Wiley & Sons. Inc, 2005.  
[19] Singh P N, Wallender W W, Asce M. Effects of Adsorbed Water Layer in Predicting Saturated Hydraulic Conductivity for Clays with Kozeny—Carman Equation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008,134(6):829—836.  
[20] 卫振海. 岩土材料结构性问题研究[D]. 北京交通大学博士学位论文,2012.  
[21] 高越. 咸阳黄土结构性影响因素研究[D]. 吉林大学硕士学位论文,2016.  
[22] 刘文生,吴作启,梁怀杰. 南票矿区松散层土体结构性参数试验研究[J]. 岩土力学,2017(6).