

文章编号: 1673-9469(2017)04-0019-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.04.005

## 不排水强度随固结度增长特性试验研究

徐可<sup>1,2</sup>, 高翔<sup>1,2</sup>, 郑泽宇<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏南京 210098)

**摘要:** 土体的固结程度对土的强度影响很大, 采用等应变速率的直剪仪研究了饱和高岭土在各级固结压力作用下的直剪强度随固结度的变化规律, 研究表明: 各级固结压力下的直剪强度均随固结度的增长呈近似线性增长。利用微型十字板剪切仪研究了各级固结压力作用下的微型十字板强度随固结度的变化规律, 同时考虑到尺寸效应的影响, 研制了配合微型十字板剪切仪使用的小直径固结仪, 研究表明: 微型十字板强度同样随固结度的增长而呈线性增长; 将以上两种试验结果进行比较分析, 发现具有很好的一致性, 验证了用微型十字板剪切仪来研究饱和软粘土抗剪强度变化规律是可行的。

**关键词:** 直剪实验; 微型十字板实验; 固结度; 抗剪强度

**中图分类号:** TU411.7

**文献标识码:** A

## Experimental research of undrained strength with the increasing of consolidation degree

XU Ke<sup>1,2</sup>, GAO Xiang<sup>1,2</sup>, ZHENG Zeyu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of the Ministry of Education, Hohai University, Jiang su Nanjing, 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, jiangsu Nanjing, 210098, China)

**Abstract:** Degree of consolidation of soil has a great influence on the strength of the soil. Direct shear apparatus with constant strain rate is applied to investigate direct shear strength change law with the increase of consolidation degree by saturated kaolin at all levels of consolidation pressure. Results show that direct shear strength increases linearly with the increase of degree of consolidation at all levels of consolidation pressure. Then, miniature vane shear apparatus is performed to study the micro vane strength changing rules. At the same time, considering the size effect, a small diameter consolidation apparatus cooperated with miniature vane shear apparatus is developed. Studies show that miniature vane shear strength grows linearly with the increase of consolidation degrees. Comparing the above two kinds of test results, it is found that they have good consistency. It confirms that miniature vane shear apparatus studying the shear strength change law of saturated soft clay is feasible.

**Key words:** direct shear test; micro vane test; degree of consolidation; soil strength.

在土堤堆填和软土地基处理过程中需要考虑抗剪强度随土的固结过程而增长的问题<sup>[1-3]</sup>, 土的固结过程即是土体内部孔隙水排出, 总应力逐渐转化为有效应力的过程。为了评价在不同时刻不同固结过程中土体强度的变化情况, 室内实验中通常用直剪

仪或三轴仪设计不同的初始固结状态进行剪切实验获得不同固结度下的抗剪强度<sup>[4-8]</sup>, 现场实验中常用十字板剪切试验评价原位土不同时期的抗剪强度增长状况<sup>[9-11]</sup>。室内直剪试验剪切面被固定在一个特定的水平面上, 并非真实的剪切破坏面, 十字板试

收稿日期: 2017-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578213)

作者简介: 徐可(1992-), 男, 安徽濉溪人, 硕士研究生, 主要从事地基处理研究。

验虽然直接对现场土进行剪切,减小了取样扰动,其实际的剪切面为竖直面,土的固结多为水平成层固结,水平面相对于竖直面为小主应力方向,得到的结果与土体的实际强度相比相对偏小<sup>[12]</sup>,两类试验方法虽然各有偏差,但对工程取值计算而言均是安全可靠的,相关的工程应用和实验研究也有很多<sup>[13-18]</sup>。本文采用均质重塑高岭土分别用直剪仪和室内十字板仪开展不同固结度下的土的抗剪强度实验,并比较两种实验测得的结果大小,对室内十字板剪切仪测试结果的合理性和可靠性进行验证。

### 1 试验土样及试验方案

实验用土为研磨而成的粉末状高岭土,杂质少,纯度高,其主要的物理参数指标如表1所示:

配置含水率为60%的土样,充分搅拌、振捣均匀,保证每次用土为饱和土,在10 kPa压力下预固结成型。为得到不同固结度下的土体强度,需获得不同固结程度的土样,相关的制取方案很多,本实验将通过某一固结压力下达达到某一固结度等于该级压力某一时间的沉降量与最终沉降量的比值来定义固结度,所设计的固结度为20%、40%、60%、80%、100%,实验荷载大小为20、30、40 kPa,试验前记录下通过一维固结实验得到的两组实验达到对应固结度所用的时间,如表2所示,直剪试验为保证和十字板剪切的排水条件一致,采用快剪方式,试验方法参照试验标准进行<sup>[19]</sup>,十字板试验为达到某一固结度时将板头垂直压入土体内同一深度进行剪切,同一试验做两组取均值,共24组试样,在得到两种土的抗剪强度测量结果后,用以分析比较。

表1 实验土样物理性质指标  
Tab.1 Physical properties of tested soil

比重	塑限 /%	液限 /%	塑性指数 /%	风干含水率 /%
2.71	22.1	43.7	21.5	2.3

### 2 不同固结度下的直剪试验

根据一维固结压缩试验中所测得的试样在各级固结压力作用下对应固结度的时间,当后续试样固结达到这一时间时进行直剪试验,记录下直剪强度,所得结果如图1所示。从图1可以看出,在各级固结压力作用下,直剪强度基本是随着固结度呈线性增长的,且随着固结压力的增大,直剪强度值也会随之增大,这一结果与刘红军<sup>[20]</sup>等人的研究成果相符。同时在相同固结度下,直剪强度随固结压力的增大而增大且基本呈线性增长,固结度越大时,直剪强度随固结压力增大的幅度也越大。在三种不同固结压力作用下,固结初始阶段的直剪强度基本近似,约为4.2 kPa。这是由于各组试验所用试样是由统一的60%含水率饱和高岭土试样配置而成,所以在初始10 kPa预压荷载作用下固结完成后,试样所达到的初始强度基本一致。但随着固结过程的发展,当固结压力为20 kPa时,试样抗剪强度最大能达到约9.14 kPa;当固结压力为30 kPa时,试样抗剪强度最大能达到约13.51 kPa;当固结压力为40 kPa时,试样抗剪强度最大能达到约17.36 kPa。

图2 为各级固结压力下直剪强度增量与固结压

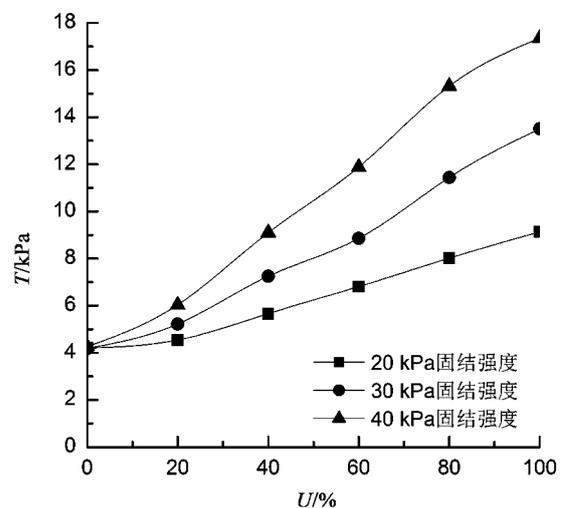


图1 直剪强度随固结度变化

Fig.1 Relationship between direct shear strength and consolidation degree

表2 直剪和微型十字板实验达到相应固结度的时间

Tab.2 Time relationship for Direct shear and miniature vane experiment in corresponding consolidation degree

实验类型	直剪实验					微型十字板剪切实验				
	固结度 U/%	20	40	60	80	100	20	40	60	80
20 kPa 固结时间 /min	1.1	24.8	58.3	115.5	742.5	1.1	24.8	58.3	115.5	742.5
30 kPa 固结时间 /min	1.4	31.4	73.7	145.9	938.9	1.4	31.4	73.7	145.9	938.9
40 kPa 固结时间 /min	2.29	52.6	123.5	244.8	1574	2.29	52.6	123.5	244.8	1574

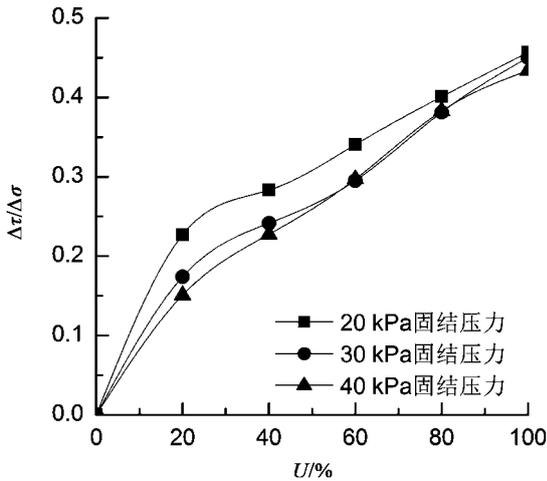


图2 直剪强度增量与固结压力增量的比值随固结度变化  
Fig.2 Relationship between ratio of the increment of direct shear strength to the increment of consolidation pressure and the consolidation degree

力增量的比值随固结度的增长基本是呈非线性增长的，初始增长速率较快，然后逐渐减慢，整体在 0~0.45 左右变化，20、30 kPa 时各固结度下的归一化强度增量值一致性较好，40 kPa 相对较高，总体上各级固结压力下的强度归一化曲线比较接近。

### 3 不同固结度下的微型十字板剪切试验

十字板试验采用武汉盘索公司生产的 PS-VST-M 微型十字板剪切仪，考虑到常规固结仪的尺寸比较小，用微型十字板对试样进行剪切会受到尺寸效应的影响，因此特别设计了配合微型十字板剪切仪使用的直径 100 mm，高度 80 mm 的小型固结试验装置，同样根据一维固结压缩试验中所测得的试样在各级固结压力作用下达到各级固结度时所消耗的时间，当固结达到这一时间即进行微型十字板剪切试验，记录下微型十字板剪切试验结果，所得结果如图 3 所示。在相同固结度下，微型十字板剪切强度随固结压力的增大而增大且呈线性增长，固

结度越大时，微型十字板剪切强度随固结压力增大的幅度也越大。在不同固结压力作用下，固结初始阶段的微型十字板剪切强度相似，约为 5.7 kPa。随着固结过程的发展，当固结压力为 20 kPa 时，试样抗剪强度最大能达到约 12.04 kPa；当固结压力为 30 kPa 时，试样抗剪强度最大能达到约 18.7 kPa；当固结压力为 40 kPa 时，试样抗剪强度最大能达到约 24.30 kPa。微型十字板强度增量与固结压力增量的比值随固结度的变化规律如图 4 所示，图中各级固

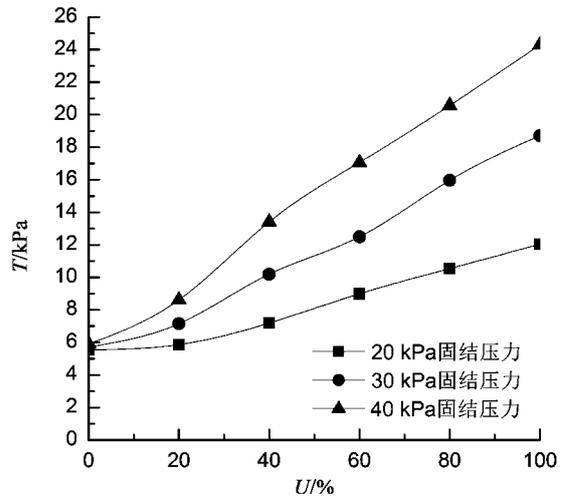


图3 微型十字板强度随固结度变化  
Fig.3 Relationship between miniature vane strength and consolidation degree

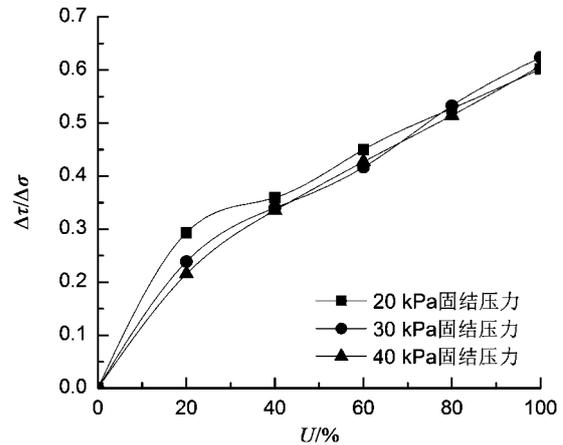


图4 十字板强度增量与固结压力增量的比值随固结度变化  
Fig.4 Relationship between ratio of the increment of vane strength to the increment of consolidation pressure and the consolidation degree

结压力下微型十字板强度增量与固结压力增量的比值随固结度的增长基本是呈非线性增长。初始增长速率较快，然后逐渐减慢，整体在 0~0.6 左右变化。各级压力下的压力归一化强度聚集在同一条曲线上，整体上各级固结压力下的变化曲线具有较高一致性。

### 4 直剪强度与微型十字板剪切强度的对比

将微型十字板剪切试验结果与直剪试验结果进行比较，结果如图 5 所示。从图 5(a)、(b) 可知，在各级固结压力作用下微型十字板剪切强度及固结压力的归一化比值整体都大于直剪强度，且在一定的固结压力作用下呈现出一定的比例关系，随着固结压力的增大，微型十字板剪切强度与直剪强度之间

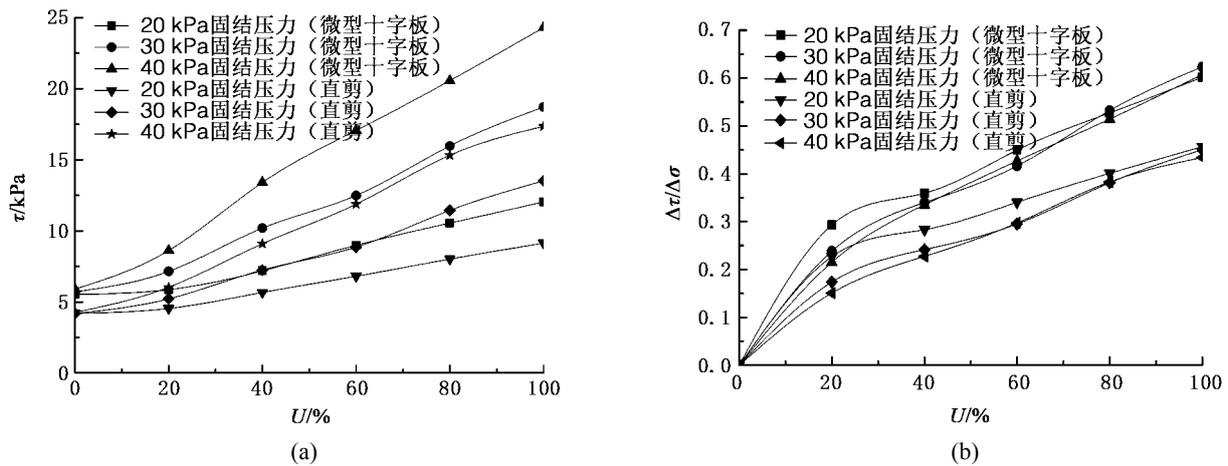


图5 各级固结压力下直剪试验与微型十字板剪切试验比较结果

Fig.5 Comparison results of direct shear test and micro cross plate shear test at all levels of consolidation pressure

的比例也呈现缓慢的上升趋势,当固结压力为20 kPa时,微型十字板剪切强度约为直剪强度的1.3倍;当固结压力为30 kPa时,微型十字板剪切强度约为直剪强度的1.39倍;固结压力为40 kPa时,微型十字板剪切强度约为直剪强度的1.41倍。整体上在1.27~1.47之间变化。在固结度为零的初始阶段这种差异就已经存在的原因与之前的10 kPa预压过程有关,预压结束时,这种由于试样不同位置固结速率不同而产生的强度差异已经存在了。

微型十字板剪切强度大于直剪强度的原因可能与试验手段造成的系统误差或与剪切面距离自由排水边界的距离有关。直剪试验中的试样上下表面均自由排水,相对于试样的中间位置,上下表面排水固结的速率要更快,强度增长自然也会更快,而进行直剪试验时,剪切面在试样的中间位置,这里的强度增长速率相对是比较低的。而微型十字板剪切试验中的试样上表面为自由排水边界,下表面则看成是完全不排水的,上表面排水固结的速率要更快,强度增长自然也会更快,进行微型十字板剪切试验时,由于剪切面在试样的上表面,这里的强度增长速率相对是比较快的,因此微型十字板剪切仪的测试结果会在整体上都大于直剪试验的测试结果。也就是说这种强度的整体差异,是由于试样不同位置处的固结速率不同造成的,除了十字板剪切位置排水条件好造成的强度较高外,也可能与直剪试验结果处理方法有关,有研究指出按照现行土工规范对直剪试验的数据处理结果比实际值土的强度要小<sup>[21]</sup>,因此导致直剪强度低于微型十字板强度。文献[15]中采用原状土的十字板试验结果和不同剪切方

式下的直剪结果进行比较,得出十字板强度介于快剪强度和固结快剪强度两者之间,除去一些影响因素,本文重塑土的快剪强度和室内十字板强度的比较结论与原状土的试验结论具有一致性。

## 5 结论

1) 饱和高岭土试样在20、30、40 kPa固结压力作用下的直剪强度及微型十字板剪切强度都随固结度的增长而呈现明显的线性增长的变化规律。

2) 室内微型十字板强度整体稍大于直剪快剪强度,整体上在1.27~1.47倍之间变化。

3) 将直剪强度增量随固结压力增量的变化规律与微型十字板强度增量随固结压力增量的变化规律进行比较,发现具有很好的一致性,从而验证了用十字板剪切试验来进行软黏土抗剪强度特性研究的合理性,对软土而言,当实际工期紧迫时可以考虑采用室内十字板试验结果修正后来代替直剪试验强度。

## 参考文献:

- [1] 沈珠江. 基于有效固结应力理论的黏土土压力公式[J]. 岩土工程学报, 2000(22): 353-356.
- [2] 徐宏, 邓学均, 齐永正, 等. 真空预压排水固结软土强度增长规律性研究[J]. 岩土工程学报, 2010(2): 285-290.
- [3] 宗国庆, 蒋慧. 真空(堆载)预压法在高速公路软土地基处理中的应用[J]. 水利水电科技发展, 2002(6): 41-43.
- [4] 何群, 冷伍明, 魏丽敏. 软土抗剪强度与固结度关系的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报(下转第36页)

- [2] 杨幸福. 高层建筑桩基础对既有地铁隧道的影响研究[J]. 铁道勘测与设计, 2014(2): 45-49.
- [3] 唐健. 建筑物施工对下部高铁隧道结构变形影响分析[J]. 交通科技, 2013(3): 109-112.
- [4] POTTS D M, DAY R A. Use of sheet pile retaining walls for deep excavations in stiff clay[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part Design&Construction, 1990, 88(6): 899-927.
- [5] MORGAN H D, BARTLETT J V. The Victoria Line: tunnel design[C]//Proc.Instn Civ.Engrs, Supplement, Paper 72703, 1969: 377-395.
- [6] SCHROEDER F C. The influence of pile group loading on existing tunnels[J]. Geotechnique, 2004, 54(54): 351-362.
- [7] 李镜培, 王昆. 超深群桩对邻近已有隧道的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(Z2): 128-134.
- [8] 刘力英, 莫海鸿, 周汉香, 等. 桩对隧道影响的分析模型比较[J]. 广东土木与建筑, 2004(2): 18-20.
- [9] 闫静雅, 张子新, 黄宏伟, 等. 桩基础荷载对邻近已有隧道影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2508-2514.
- [10] 黄晓阳. 桩基础荷载对既有地铁隧道的受力和变形的影响分析[D]. 广州: 中南大学, 2010.
- [11] 路平, 郑刚. 立交桥桩基础施工及运营期对既有隧道影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(Z2): 923-927.
- [12] 邱陈瑜, 郑颖人, 宋雅坤, 等. 桩基荷载作用下隧洞破坏模式研究与安全分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 3132-3144.
- [13] 陈育民, 徐鼎平. FLAC\FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [14] 张昊, 王法, 韩焯, 等. 不同本构模型下建筑荷载对近邻地铁的沉降影响分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2016, 33(4): 33-38.
- [15] 徐云飞, 张强勇, 张功实. 深基坑支护中微型桩桩土耦合作用的数值模拟[J]. 人民长江, 2012, 43(19): 60-63.
- (上接第 22 页)报, 2005(2): 51-55.
- [5] 包伟力, 周小文. 地基强度随固结度增长规律的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2001(4): 29-31.
- [6] 汪洪星, 杨春和, 陈锋, 等. 软土抗剪强度指标随固结度变化规律分析[J]. 岩土力学, 2014(Z1): 106-112.
- [7] 李佐良, 杨爱武, 许再良, 等. 不同固结度对软土强度及变形的影响[J]. 中国港湾建设, 2012(2): 47-50.
- [8] 张银屏, 宫全美, 董月英. 软土抗剪强度随固结度变化的试验研究[J]. 岩土工程界, 2005(2): 37-40.
- [9] 闫澍旺, 封晓伟, 侯晋芳, 等. 用十字板强度推算软黏土抗剪强度指标的方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1805-1810.
- [10] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 329-378.
- [11] 陈艺南, 潘华良, 刘松玉, 等. 连云港软土工程特性初探[J]. 路基工程, 2002(6): 1-5.
- [12] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [13] 任惠芳. 对软土抗剪强度试验的探讨[J]. 四川地质学报, 1996(3): 263-266.
- [14] 刘永胜, 肖海, 祁丽华. 室内十字板与原土十字板差异浅析[J]. 工程地球物理学报, 2010(2): 265-268.
- [15] 王晓峰. 十字板抗剪强度的影响因素分析[J]. 勘察科学技术, 2014(5): 5-7.
- [16] 孟令福. 微型十字板的应用实践[J]. 水文地质工程地质, 2004(5): 112-114.
- [17] 倪小东, 尹学谦, 蔡钟. 基于 PFC-COMSOL 联合开展软土团结构细观机理研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2017, 34(2): 30-36.
- [18] 刘润, 闫澍旺. 软黏土边坡稳定性分析中十字板强度取值的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(8): 1422-1426.
- [19] GB/T50123—1999, 土工试验方法标[S].
- [20] 刘红军. 寒区湿地软土地基固结沉降与稳定性研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2007.
- [21] 詹金林, 雷国辉, 施建勇, 等. 有效剪切面积对直剪试验结果的影响分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007(2): 213-216.