

文章编号: 1673-9469 (2019) 02-0005-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.02.002

饱和软黏土不同固结程度下的抗剪强度特性研究

郑泽宇^{1, 2}, 徐可^{1, 2}

(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: 为了研究饱和软黏土在不同固结度下的抗剪强度特性, 利用应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪开展饱和软黏土不同固结程度下的三轴剪切试验研究, 对不同围压下不同固结度对土体孔压增量和抗剪强度的影响进行了分析。结果表明: 在部分固结不排水剪切试验中, 试样的剪前固结程度越低、剪前孔压越大, 则剪切引起的孔压增量越小, 但总孔压却是越大, 不排水强度低。通过归一化, 得到了孔压增量和固结度之间的相关关系。

关键词: 不同固结度; 抗剪强度; 体变; 孔压

中图分类号: TU447

文献标识码: A

Experimental Study on Shear Strength Properties of Saturated Soft Clay with Different Degrees of Consolidation

ZHENG Zeyu^{1, 2}, XU Ke^{1, 2}

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

Abstract: In order to study the shear strength characteristics of saturated soft clay under different degree of consolidation, the stress-strain controlled triaxial shear permeability tester was used to carry out triaxial shear tests of saturated soft clay under different degree of consolidation. The effects of different degree of consolidation under different confining pressures on pore pressure increment and shear strength of soil were analyzed. The results show that in partial undrained shear tests, the lower the pre-shear consolidation degree and the larger the pre-shear hole pressure, the smaller the pore pressure increment caused by shear, but the larger the total hole pressure and the lower the undrained strength. By normalization, the correlation between pore pressure increment and consolidation degree is obtained.

Key words: different degree of consolidation; shear strength; volume change; pore pressure

在快速加荷施工时, 土体在外荷载作用下会发生完全不排水剪切破坏, 在做稳定性分析时, 只有了解施工过程中的抗剪强度变化, 才能对各施工阶段土体稳定进行安全性评价。部分学者研究指出土的强度指标与固结度有关, 其在固结过程中是时刻变化的, 这与传统认为强度指标基本不随排水条件和固结程度而变化的观点不一致。秦植海^[1]推求任意固结度不排水剪强度指标的理论解答, 但是公式相当繁琐。杨嵘昌^[2]的公式得到任意固结度下的不

排水抗剪强度指标与周围压力增量 $\Delta\sigma_3$ 的大小无关, 仅与 $\Delta\sigma_3$ 的固结程度 U 有关。汪洪星^[3]从孔隙水压力的角度, 对抗剪强度指标随固结度的变化规律进行了分析, 通过理论推导, 认为抗剪强度指标可以用有效强度指标、破坏孔压系数来表示, 内摩擦角随固结度的增大而单调增大, 而黏聚力随着固结度的增长而单调减小。根据以往软黏土地基失稳破坏的工程案例表明, 排水固结引起的变形和孔压的发展对于软黏土抗剪强度的动态变化有着极其

收稿日期: 2018-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51578213)

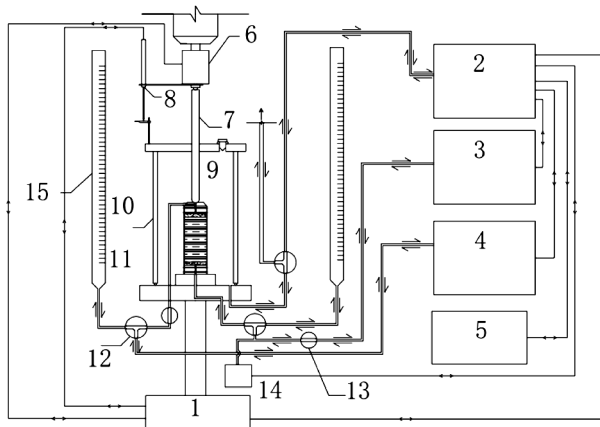
作者简介: 郑泽宇 (1994-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要研究方向为软基处理。

重要的影响。为此本文进行不同固结程度下的不排水抗剪强度试验对快速加载工况进行实际模拟,研究不排水强度在不同固结过程中的变化规律,从孔压变化和变形两个角度进行抗剪强度的分析,得到不同固结程度剪切时的孔压和变形发展对抗剪强度变化的影响规律。

1 实验

1.1 三轴试验仪器简介

试验所用三轴仪器为南京中之岩测控技术有限公司生产的SLB-1型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪,该仪器功能强大,除了能进行常规三轴试验外,还可以进行不等向固结剪切试验及渗透试验,实验数据可自动采集、处理、存储,软件中数据处理严格按照现行土工规范进行处理,方便可靠。仪器控制方面可以手动采用压力控制器键盘操作也可以在电脑界面上操作,既可以按照试验程序进行,也可以在实验过程中随时进行控制器的开闭,使用上比较灵活。



- 1、加载主机; 2、围压及孔压测量控制器; 3、反压力2及体变测量控制器; 4、反压力1及体变测量控制器;
- 5、电脑采集控制器; 6、轴力传感器; 7、轴力传递杆;
- 8、位移传感器; 9、周围压力室; 10、压力室罩;
- 11、压力室底座; 12、三通阀; 13、二通阀;
- 14、孔压传感器; 15、50 mL 滴定管

图1 应变控制式三轴固结剪切试验仪器

Fig.1 Strain controlled triaxial shear test instrument

1.2 试验方案

饱和软黏土不同固结程度下的抗剪强度试验,以设置不同固结度为主,研究不同固结程度下的抗剪强度变化特性,固结度设置方式以固结过程中的排水体积和固结完成时的排水体积的比值进行定

义,进行三组压力值 50 kPa、100 kPa、200 kPa 的试验。剪切速率设为 0.3 mm/min,考虑固结过程中体变和强度的关系,与有效应力对抗剪强度的增长进行比较,找到两种研究方法结论的差异。每一个围压下设置五组固结度,20%、40%、60%、80%、100%,研究不同固结度下的不排水抗剪强度变化。

1.3 材料

本文进行的三轴试验为小三轴试验,试样尺寸直径 39.1 mm、高 80 mm。采用机械研磨粉末状烘干高岭土为试验用土,通过颗粒分析试验,所用高岭土材料的黏土粒直径低于 0.005 mm 的含量占总质量的百分比大于 80%,比重 2.71,塑限和液限分别为 22.2% 和 43.7%,塑性指数 21.5,风干含水率 2.1%。配料按照 15% 含水率的土进行装样击实,然后以 160 g 湿土来制样饱和。最后,将预制好的试样放在真空缸进行抽气饱和。

1.4 试验方法

试验前,土样成型过程经历干土,湿土,饱和土三个阶段。将机械研磨粉末状高岭土和水按照 15% 的含水率进行配置,充分搅拌均匀、磨碎,过 1 mm 筛,过滤下的土颗粒密封在保鲜罐中静置一昼夜,使土样内部的水充分侵入均匀。然后配好过筛的散土,分五层装入击实仪进行击实。每击实一层后对土层表面进行刮毛处理,目的是保证上下两层能很好的连接。装土完毕后盖上滤纸和透水石拧紧饱和器,放置在饱和桶中进行抽真空。

在进行了一系列的辅助试验操作后,可以施加围压和轴压进行固结剪切试验。首先要确定固结过程的设置方式。本试验采用固结某一时刻的体积与固结总体积比值来确定固结程度。将不同固结度下的固结排水量列于表 1。当固结排水体积达到该围压下设置的排水量时,立即关闭排水阀门,结束固结,进行不排水剪切试验。

表 1 不同压力不同固结度排水体积划分

Tab.1 Volume of drainage under different pressure and different degree of consolidation (ml)

| 围压 | 固结度 | | | | |
|---------|------|------|------|-------|-------|
| | 20% | 40% | 60% | 80% | 100% |
| 50 kPa | 1.67 | 3.34 | 5.02 | 6.69 | 8.36 |
| 100 kPa | 2.34 | 4.68 | 7.02 | 9.36 | 11.70 |
| 200 kPa | 3.05 | 6.10 | 9.14 | 12.19 | 15.24 |

2 结果及分析

不同固结压力下剪切前后孔压值如图2所示。从固结结束到剪切结束的孔压增量来看，相同围压下，固结度越大，孔压增量值越大，围压越大，相同固结度下的孔压增量也越大。结合实际土堤堆填时，当上覆土体堆填来不及固结就进行下一级堆填，意味着连续快速的土体堆填，孔压在很小的增量下就会发生破坏，如果以孔压量测作为安全监测依据，进行土体稳定性分析，由于孔压上升量很小，很难及时准确的进行安全论证或者及时采取补救措施，土体失稳风险会大大增加，但如果相邻两级堆填间隔时间延长，使上一级土体加载后地基土有足够时间固结，再进行下一级加载时破坏孔压增量比较大，当孔压增长时可以及时对土体堆填速率进行控制或采取相应的补救措施，降低堆填破坏风险。

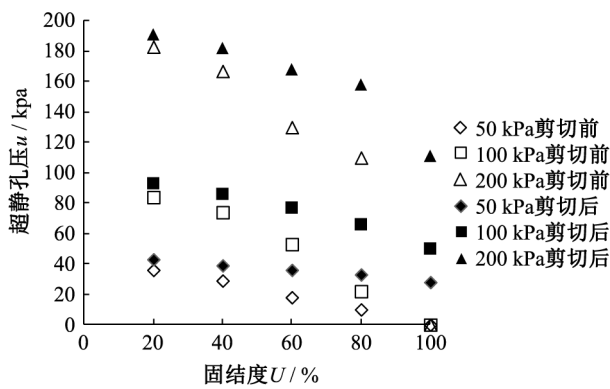
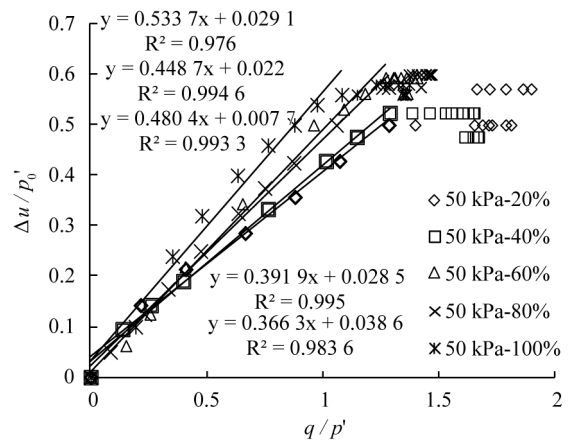


图2 不同固结度剪切前后孔压对比

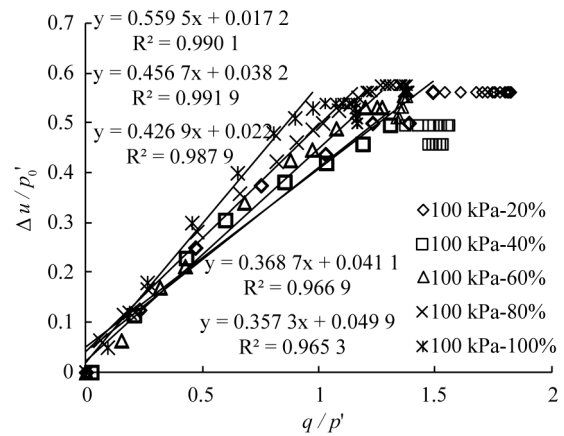
Fig.2 Contrast of pore pressure before and after shear with different degree of consolidation

Balasubramaniam 等^[3]在研究三轴剪切试验的孔压特征时，发现剪切过程中的有效应力比 q/p' 与剪切孔隙水压力 Δu 近似呈线性关系，如式(1)，卞夏^[4]进行不同含水率下的三轴试验时也得到相同的规律，而且发现剪前初始含水率越大斜率值越大。上述试验结果得到的结论是在固结完成后进行剪切得到的，固结过程中的不排水剪切试验数据能否得到相同的结论尚未有人研究。图3为不同压力不同固结度下的 $\Delta u/p_0'-q/p'$ 曲线，这里的 Δu 为仅考虑剪切过程中的孔压增量值，去除固结过程残留的孔压， p_0' 为任一固结度下固结完成后的压力值。研究发现，不同固结度下的三轴不排水剪切试验结果也能够用式(1)表示，且固结程度越高，斜率值 C 越大。图3中试验曲线均由两部分组成，前期随着剪切的

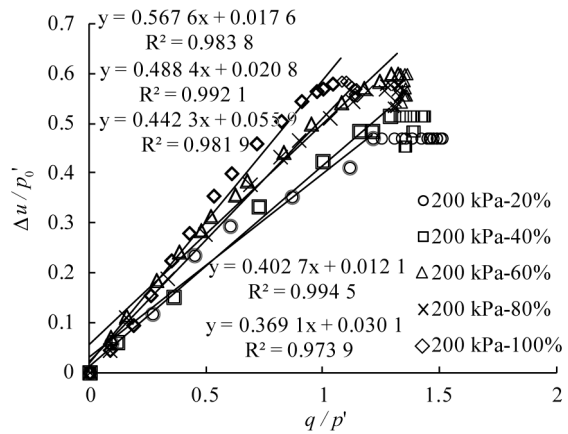
进行均为直线，后期曲线变为水平线，这是因为孔压前期逐渐增长，后期孔压逐渐保持一个恒定值，一些曲线后期水平线下降可以从孔压曲线得到结论，这是因为孔压后期有微小的降低造成。将不同固结度下的 $\Delta u/p_0'-q/p'$ 进行线性拟合，得到固结过程中不同的 C 值。由于采用了有效应力，固结度用孔压



(a) 50 kPa



(b) 100 kPa



(c) 200 kPa

图3 不同围压不同固结度下的 $\Delta u/p_0'-q/p'$ 关系
Fig.3 Different confining pressure under different degree

表示 $U=(\sigma_3-u)/\sigma_3$ 。将不同围压不同固结度下的 C 值绘于图 4, 不同围压下的固结度和 C 值呈线性关系, 各数据点虽有离散, 但是整体上可以得到随固结度的增大而增大, 取三条拟合线的平均斜率和截距, 得到 C 随固结度的变化关系式, 如式 (2), 代入式 (1) 得到不同固结度下剪切过程中的孔压增量与应力比之间的关系式, 如式 (3), 将 q 移到方程左边可得孔压系数 A 随固结度 U 和 p' 的变化规律。

$$\frac{\Delta u}{p_0} = C \frac{q}{p'} \tag{1}$$

$$C = 0.2167 U + 0.3271 \tag{2}$$

$$\Delta u = (0.2167 U + 0.3271) p_0' q / p' \tag{3}$$

$$s_u = \frac{\cos\varphi_{cu}}{1 - \sin\varphi_{cu}} c_{cu} + \frac{\sin\varphi_{cu}}{1 - \sin\varphi_{cu}} \sigma_c' \tag{4}$$

利用固结完成时得到的不排水强度参数 c_{cu} 、 φ_{cu} 代入到曹宇春^[5] 推导的等向三轴不排水强度公式 (4) 中, 将计算结果和实测结果相比较如图 5。从图

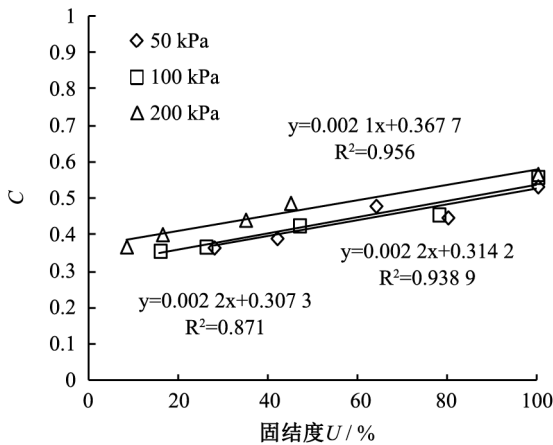


图 4 不同围压下 C-U 关系

Fig.4 C-U relation under different confining pressures

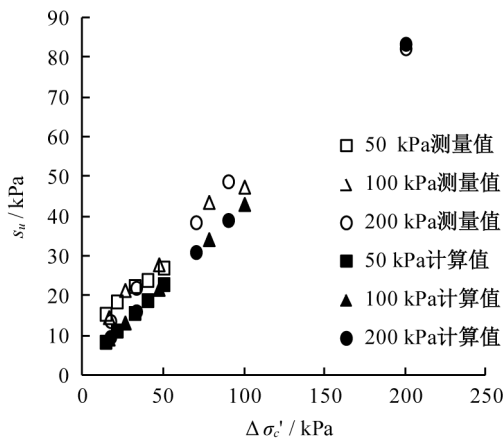


图 5 不排水强度的计算和测量对照图

Fig.5 Comparison of calculation and measurement of undrained strength

中可知, 计算值均偏小于测量结果, 而固结过程中的实测和理论强度结果偏差要大于固结完成时的理论和实测结果的偏差, 固结完成时的不排水强度计算值更接近于实际测量结果, 这与高翔^[6] 的模型试验结果一致, 如图 6 所示。

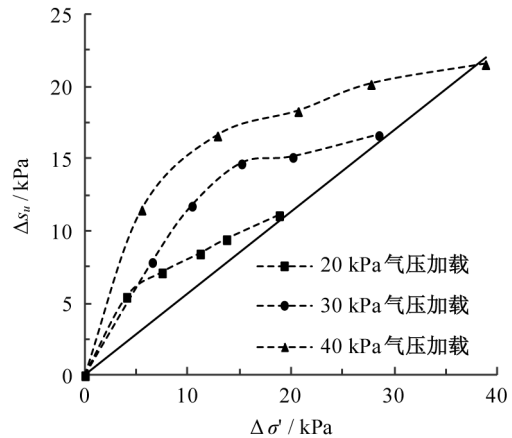


图 6 固结过程中不排水抗剪强度增量与有效应力增量的关系^[6]
Fig.6 The relationship between the increment of shear strength and the increment of effective stress during consolidation

从孔压角度和体变角度来定义固结度, 得出的强度随固结度的增长曲线如图 7、8 所示, 从体变角度出发得到抗剪强度如图 7 随固结度的增长呈非线性增长, 而从孔压角度设置固结度换算成剪前有效围压作为横坐标如图 8, 得到抗剪强度随固结度的增长呈线性关系, 目前不少学者对固结度的定义有不同的认识, 经典土力学教材中^[8] 用变形量和孔压变化作为固结度设置的标准, 其他一些学者研究强度随固结度变化时采用剪切前后压力比或采用离心机旋转时间来设置固结度, 不同的表示方法得到的强度变化规律并不一致。固结引起的抗剪强度增长可以从两个方面解释, 一是由于固结排水量增加,

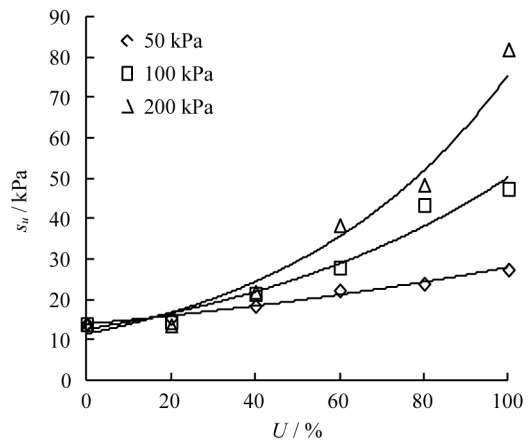


图 7 不同固结度下的不排水强度

Fig.7 Undrained strength at different degrees of consolidation

土体孔隙颗粒间的孔隙减小使土颗粒间的摩擦增强, 剪切时的抗剪强度会随着固结排水体积的增加而增加。二是固结初期超孔压很高, 随着水的排出超孔压会逐渐减小, 依据有效应力原理可知土体受到的有效应力逐渐增大, 土颗粒间的受力引起颗粒间加速致密排列, 由松散状态变为逐渐致密状态, 抗剪能力会随着有效围压的增大而增大。

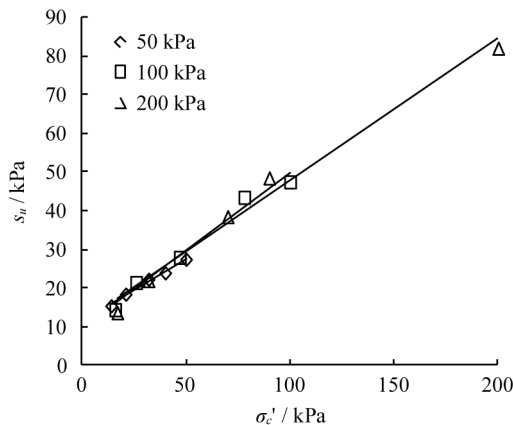


图8 不排水强度与剪切有效应力关系

Fig.8 The relation between undrained strength and effective shear stress

3 结论

1) 由于固结度越低, 固结后孔压残余越高, 不排水试验剪切破坏孔压也越高, 孔压增量也越高。利用 $\Delta u/p_0'-q/p'$ 归一化公式得到了固结过程中剪切孔压增量和固结度及应力比之间的关系式, 不同的固结度下斜率值 C 不同, 固结度越高, C 值越大。

2) 将不同固结度下的三轴不排水剪切试验结果进行线性拟合, 得到不同固结度下剪切过程中的孔压增量与应力比之间的关系式, 从而得到孔压系数

A 随固结度 U 和 p' 的变化规律。

3) 利用固结完成时得到的不排水强度参数 c_{cu} 、 φ_{cu} 代入到曹宇春推导的等向三轴不排水强度公式(4)中, 通过计算得到的固结完成时的结果和实测值比较一致, 而固结过程中的实测结果略大于计算结果。从体变角度出发得到抗剪强度随固结度的增长呈非线性增长, 而从孔压角度出发得到抗剪强度随固结度的增长呈线性关系。

参考文献:

- [1] 秦植海. 饱和黏性土任意固结度的不排水剪强度指标推求方法 [J]. 工程勘察, 1996, (5): 19-21.
- [2] 杨嵘昌. 饱和黏性土任意固结度的不排水抗剪强度 [J]. 南京建筑工程学院学报: 自然科学版, 2001, (4): 20-24.
- [3] 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(增刊1): 106-112.
- [4] BALASUBRAMANIAM A S, HANDALI S, WOOD D. Pore pressure: stress ratio relationship for soft Bangkok clay [J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 117-131.
- [5] 卞夏, 洪振舜, 曾玲玲. 初始含水率对重塑黏土孔压特性影响试验研究 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(4): 749-754.
- [6] 曹宇春. 固结后软黏土不排水抗剪强度简化计算方法比较 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(10): 115-124.
- [7] 高翔. 饱和软黏土不同固结程度下的抗剪强度特性试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2017.
- [8] 卢廷浩. 土力学 (第二版) [M]. 南京: 河海大学出版社, 2005.

(责任编辑 李新)