

文章编号: 1001-1986(2010)01-0037-04

重塑上海淤泥质粘土直剪试验

高彦斌^{1,2}, 王江锋^{1,2,3}, 叶观宝^{1,2}, 孟 静^{1,2}

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 直剪试验是测定土体抗剪强度常用的方法。通过对重塑上海第 4 层淤泥质粘土分别进行固结快剪和慢剪试验, 对慢剪和快剪的剪应力和剪切位移曲线以及慢剪和快剪的抗剪强度曲线进行分析, 并对其剪应力与剪切位移关系曲线进行归一化分析, 拟合得到各竖向压力下 $\tau \cdot S - S$ 的归一化方程, 进而统一了各竖向压力下 $\tau/P \cdot S - S$ 的归一化方程, 并通过抗剪强度曲线图可得到抗剪强度参数粘聚力(c)和内摩擦角(ϕ); 抗剪强度和剪切破坏时与剪切面上的含水率有较好的线性关系。

关键词: 重塑土; 直剪试验; 抗剪强度; 归一化

中图分类号: TU41 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.01.009

Direct shear experiment research on remolded Shanghai silt clay

GAO Yanbin^{1,2}, WANG Jiangfeng^{1,2,3}, YE Guanbao^{1,2}, MENG Jing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Tongji University, Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: In this paper, fourth silt clay in Shanghai was remolded to carry out experiment of direct shear, namely consolidation quick shear and slow shear, the curves of shear stress and shear strength were analyzed in summary. The normalized curves of its shearing stress and shear displacement were also analyzed, and the normalization equation was obtained, the relations between shear strength and water content of the shearing failure were discussed.

Key words: remolded clay; direct shear; shear strength; normalization

直接剪切试验是目前测定土体抗剪强度的一种常用方法^[1]。通常是地基中某个位置取出土样, 制成几个试样, 用几个不同的垂直压力作用于试样上, 然后再施加剪切力, 测得剪应力与剪切位移的关系曲线, 并从曲线上找出试样的极限剪应力作为该垂直压力下的抗剪强度^[2]。通过几个试样的抗剪强度确定强度包线, 求出抗剪强度参数粘聚力(c)和内摩擦角(ϕ)。但是, 在做理论研究的时候, 又需要制作重塑土样进行直剪试验。重塑土的制作是费时又费力的, 这是因为粉土、配土到制成一个土样, 至少需要 3 d 时间, 还有固结与剪切过程中的时间; 再加上土样制的越多, 受到各方面的影响也越大, 不免会对研究的结果造成一定的影响。为此, 本文通过对上海重塑第 4 层软粘土进行直剪试验研究, 得到一定的规律, 以期对今后的实验研究与工程实践有一定的指导意义。

1 制样及试验^[2-3]

1.1 制样

试验土样取自上海地区第 4 层淤泥质粘土, 按规范规定在自然状态下风干后, 粉碎, 过 2 mm 的筛, 测其风干含水率, 目标含水率为 $w=1.5 w_L$ 制备土样。所用水为蒸馏水。将制备好的土样搅拌均匀, 放置于保湿缸中密封浸泡 24 h, 确保土颗粒与水充分溶合。在加水配置土样时, 要防止气泡产生, 要充分搅拌避免产生小土团粒; 将密封静置 24 h 后的土样装入直剪仪中, 装样前需均匀搅拌, 并从剩余的土样中取代表性试样测定含水率, 评价其失水率, 使其小于 1%。装样后固结过程中为防止水分蒸发, 在周遭用湿棉线围绕。本次试验共制作 4 组试样, 分为两个平行试验, 编号为 4-1 和 4-2; 编号为 4-1-1、4-2-1 代表慢剪试验样, 编号为 4-1-2、4-2-2 代表快剪试样。相关参数如表 1。

收稿日期: 2009-05-21

基金项目: 上海市重点学科建设项目(B308); 国家自然科学基金项目(40702051)

作者简介: 高彦斌(1973—), 男, 山西阳泉人, 副教授, 从事岩土加固与测试及数值模拟研究。

表 1 重塑土样的物理性质指标

Table 1 Physical parameters of remolded sample

土样名称	风干含水率/%	配土含水率/%	密度/g·cm ⁻³	相对体积质量	液限/%	塑限/%	塑性指数
淤泥质粘土	6.09	64.32	1.63	2.75	42.88	22.63	20.25

1.2 试验

由于土样含水率较高，为避免土挤出，采用分级加载固结方式，前 6 h 采用小荷载加压，每隔 2 h 依次加至 10 kPa、20 kPa、30 kPa，6 h 后 4 个试样分别加至 50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa，固结时间大于 16 h。为防水分蒸发，固结时在剪切盒周边储水槽中加水饱和。固结稳定后，以 0.02 mm/min(慢剪)和 0.8 mm/min(快剪)的剪切速率进行剪切。每隔 0.1 mm 剪切位移测记一次钢环测力计读数，直至剪切位移达 6 mm 时停止。

2 试验结果

从图 1、图 2 中可以看到，重塑土试验无论是慢剪还是快剪，抗剪强度在剪切位移为 6 mm 时无明显峰值，慢剪的强度增加较慢，而快剪在剪切位移为 1 mm 左右迅速增加，此后随着剪切位移的增大，抗剪强度增加的速率逐渐变缓。

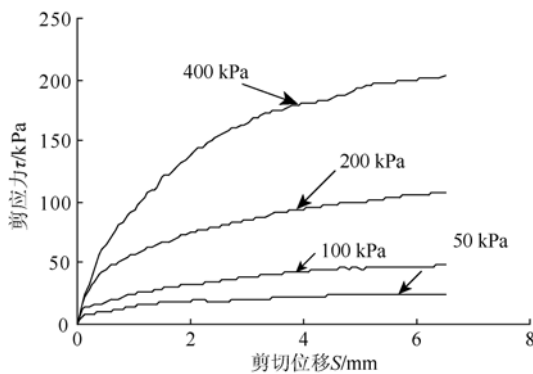


图 1 4-1-1 样慢剪剪应力-剪切位移曲线

Fig. 1 The shearing stress-shearing displacement curves for slow shear

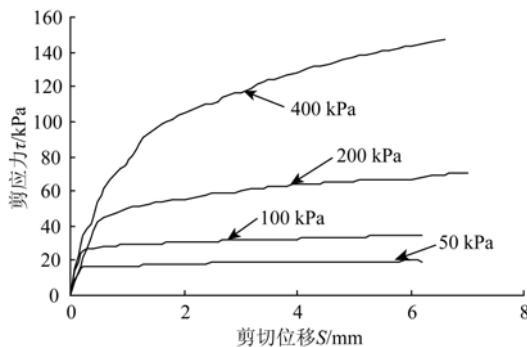


图 2 4-1-2 样固结快剪剪应力-剪切位移曲线

Fig. 2 The shearing stress-shearing displacement curves for fast shear

从图 3、图 4 上可以看到，4-1、4-2 的慢剪强度基本上是一致的，而其快剪强度相差略大，这可能与其固结时间长短有关。慢剪相当于排水剪切，快剪相当于不排水剪切，从抗剪强度曲线上也可以看出，慢剪的抗剪强度和内摩擦角比快剪的抗剪强度和内摩擦角大，证明慢剪比快剪排水要充分得多。

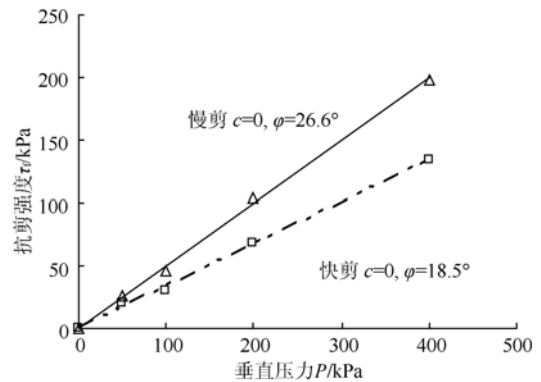


图 3 4-1 抗剪强度与垂直压力关系曲线

Fig. 3 Relation curves of shear strength-vertical pressure on sample 4-1

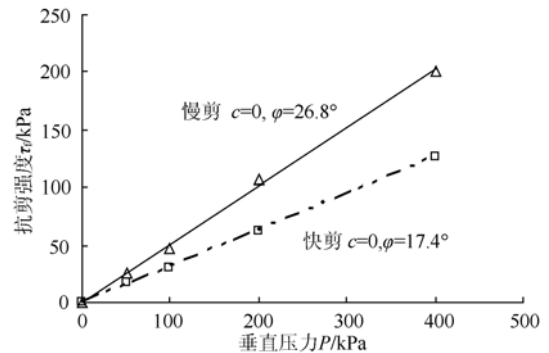


图 4 4-2 抗剪强度与垂直压力关系曲线

Fig. 4 Relation curves of shear strength-vertical pressure on sample 4-2

3 归一化分析^[4-5]

3.1 剪应力和剪切位移之积与剪切位移归一化分析

固结剪切试验是比较费时费力的，在此笔者探讨剪应力、竖向压力和剪切位移之间的关系，来进一步对重塑上海第 4 层粘土的归一化情况进行研究，以期得到其归一化曲线。

从图 5、图 6 可以看到，慢剪在剪切位移为 1 mm 左右之前为非线性，之后表现为很强的线性关系；

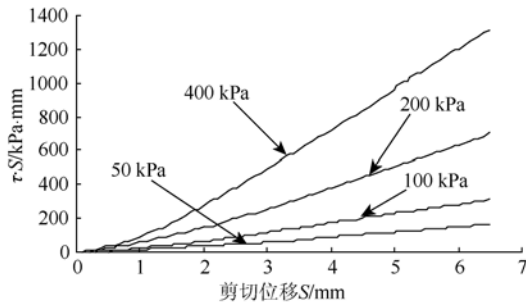


图 5 4-1-1 样慢剪 $\tau \cdot S-S$ 归一化曲线

Fig. 5 The normalized $\tau \cdot S-S$ curves on slow shear for sample 4-1-1

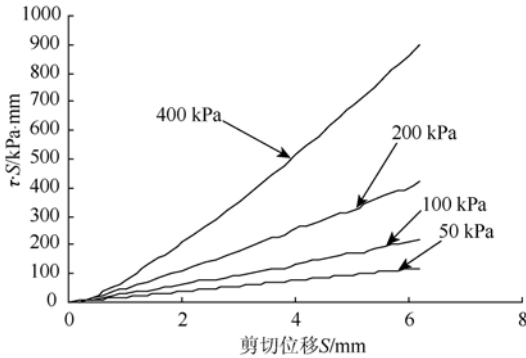


图 6 4-1-2 样快剪 $\tau \cdot S-S$ 归一化曲线

Fig. 6 The normalized $\tau \cdot S-S$ curves on quick shear for sample 4-1-2

快剪在剪切位移为 0.5 mm 左右之前为非线性, 之后为线性。在此, 可以建立在各竖向压力下的归一化方程, 归一化方程见表 2。

表 2 快、慢剪各竖向压力下归一化方程

Table 2 Normalization equations of quick and slow shear under vertical pressures

剪切方式	竖向压力/kPa	归一化方程	相关系数	备注
固结慢剪	50	$\tau \cdot S = 26.307S - 12.805$	$R^2 = 0.991$	在 $S > 1$ mm 左右后为线性
	100	$\tau \cdot S = 50.565S - 26.929$	$R^2 = 0.992$	
	200	$\tau \cdot S = 112S - 58.711$	$R^2 = 0.9914$	
	400	$\tau \cdot S = 214.88S - 118.2$	$R^2 = 0.9928$	
固结快剪	50	$\tau \cdot S = 19.728S - 2.2315$	$R^2 = 0.9989$	在 $S > 0.5$ mm 左右后为线性
	100	$\tau \cdot S = 35.192S - 7.2284$	$R^2 = 0.9968$	
	200	$\tau \cdot S = 70.229S - 22.001$	$R^2 = 0.9961$	
	400	$\tau \cdot S = 149.54S - 70.324$	$R^2 = 0.9922$	

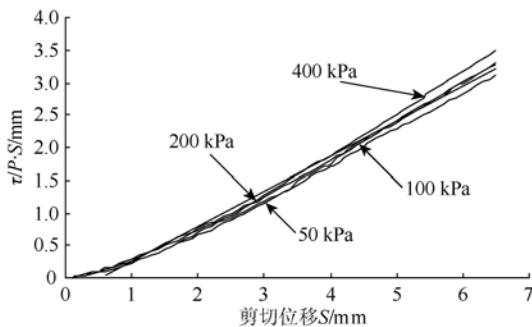


图 7 慢剪 $\tau/P \cdot S-S$ 归一化曲线

Fig. 7 The normalized $\tau/P \cdot S-S$ curves on slow shear

通过以上的归一化方程了解到, 各竖向压力下有很强的线性相关性, 由此, 可以进一步归一化以上曲线, 得到慢剪和快剪的各竖向压力下统一的归一化方程, 即绘制 $\tau/P \cdot S-S$ 曲线, 如图 7、图 8。

以上曲线拟合出的线性方程分别为:

固结慢剪

$$\tau/P \cdot S = 0.5372S - 0.2955 \quad (R^2 = 0.9928); \quad (1)$$

固结快剪

$$\tau/P \cdot S = 0.3946S - 0.0446 \quad (R^2 = 0.9989). \quad (2)$$

由以上方程, 通过某一压力下的试验得到 $\tau/P \cdot S-S$ 曲线。参照以上方程便可知其他竖向压力下的曲线, 由此可以得到其他竖向压力下的抗剪强度, 并按规范取剪切位移为 4 mm 时的抗剪强度, 绘制抗剪强度曲线图, 得到其抗剪强度参数 c (粘聚力) 和 φ (内摩擦角)。

4 重塑粘性土抗剪强度与剪切破坏时含水率的关系

John Atkinson^[6]指出, 饱和土体的孔隙比只和含水率有关, 即 $S_r = G_s w/e$ (S_r 为饱和度, G_s 为土粒相对体积质量, w 为含水率, e 为孔隙比), 且含水率与极限状态下的抗剪强度有着一定的关系^[7]。这里取剪切破坏时破坏面上土样进行含水率测量。通过固结快、慢剪试验得出的重塑粘性土在剪切破坏时的含水率与抗剪强度之间的半对数关系曲线如图 9 所示。

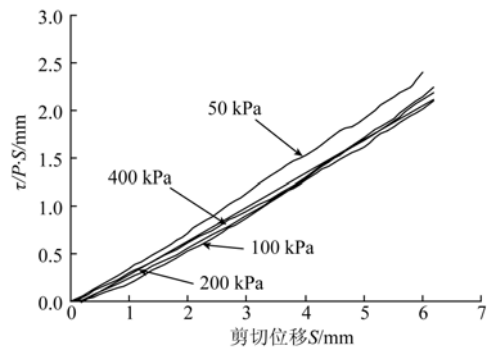


图 8 快剪 $\tau/P \cdot S-S$ 归一化曲线

Fig. 8 The normalized $\tau/P \cdot S-S$ curves on quick shear

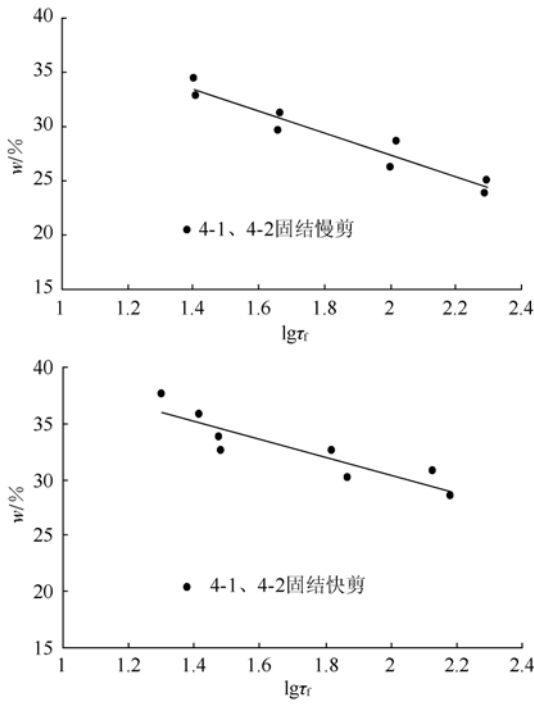


图 9 固结快、慢剪抗剪强度的对数与破坏面含水率曲线
Fig. 9 The logarithm of shear strength and water content curves on the failure surface

从图 9 可以看到，两组重塑样的固结慢剪试验得到的抗剪强度与破坏面含水率曲线的线性关系是比较好的($R^2 > 0.9$)，这说明在慢速剪切过程中排水是较充分的，剪切过程中其应力状态基本上是一致的，在饱和状态下，破坏时剪切面上的含水率与抗剪强度的对数曲线是呈线性关系的；对于固结快剪，其线性关系较好，但与慢剪线性关系相比稍差，这可能与剪切过程中无法严格控制排水，也即试样在剪切过程中实际产生了一定的排水量有关。

5 结论

通过对重塑上海第 4 层淤泥质粘土进行直剪试

验，并对其相关实验曲线进行分析，得到以下结论：

a. 重塑上海第 4 层淤泥质粘土无论是快剪还是慢剪的抗剪强度均无明显峰值，慢剪的强度增加较慢，而快剪在剪切位移为 1 mm 左右迅速增加，此后随着剪切位移的增大，抗剪强度增加的速率逐渐变缓。

b. 慢剪在剪切位移为 1 mm 左右之前为非线性，之后为线性关系；快剪在剪切位移为 0.5 mm 左右之前为非线性，之后为线性。建立了在各竖向压力下统一的归一化方程，由此可以通过某一压力下试验得到的 $\tau / S \cdot P - S$ 归一化曲线，在抗剪强度曲线图上得到其抗剪强度参数 c 、 ϕ 。

c. 固结慢剪试验得到的抗剪强度与破坏面含水率曲线的线性关系是比较好的($R^2 > 0.9$)，破坏时剪切面上的含水率与抗剪强度呈线性关系；快剪稍差。

参考文献

- [1] 卢肇钧. 粘性土抗剪强度研究的现状与展望[J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 3-4.
- [2] 南京水利科学研究所土工研究所. 土工技术试验手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [3] 南京水利科学研究所. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [4] 李作勤. 黏土归一化性状的分析[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(5): 67-75.
- [5] 张勇, 孔令伟, 孟庆山, 等. 武汉软土固结不排水应力-应变归一化特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1510-1518.
- [6] ATKINSON J. An introduction to the mechanics of soils and foundations[M]. London: McGRAW-HILL Book Company, 1993.
- [7] 胡世华, 王侠民. 上海地区粘性土有效内摩擦角与塑性指数关系[J]. 大坝观测与土工测试, 1996, 21(2): 39-40.

《煤田地质与勘探》杂志网站开通公告

为了能够快速高效地处理稿件，缩短出版周期，《煤田地质与勘探》编辑部开通了自已的网站，并安装了编辑部远程稿件处理系统。从 2010 年 2 月开始，作者投稿、专家审稿、编辑办公及读者阅览均在网站在线进行。作者投稿请登录 <http://mtdz.jour serv.com/> 网站注册后进行在线投稿(注：请记好自己的用户名和密码，便于查询稿件编辑录用情况)。稿件附件可以是 rar、zip 压缩文件

或 word 格式，图件(最好为 Coreldraw 或 Potoshop 格式)以附件的形式上传，具体操作请按提示进行。

《煤田地质与勘探》编辑部稿件管理系统现为试用阶段，如您在使用过程中遇到问题，无法完成网上投稿时，可选择电子邮件方式投稿(E-mail: ccrimtdzykt@vip.163.com)，并将所遇问题及时反馈给编辑部。对本刊有什么意见和建议，欢迎批评指正。