



剪切速率对饱和粉质黏土快剪指标影响分析

胡伟娜¹, 潘璇², 寇明珠³, 刘永胜¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 上海市城市建设设计研究总院, 上海 200125; 3. 大连九成测绘企业集团, 辽宁 大连 116400)

摘要: 直接剪切试验在国内应用广泛, 其试验指标除了与土样自身的性质有关外, 还与试验的参数条件有很大关联。以河北省曹妃甸地区的饱和低塑性粉质黏土为研究对象, 通过对不同试验手段取得的试验指标的统计分析, 说明剪切速率对快剪指标的影响, 认为对饱和低塑性粉质黏土进行快剪试验时采用较大的剪切速率(2.4mm/min)为宜。

关键词: 快剪; 速率; 固结; 低塑性; 饱和粉质黏土; 抗剪强度; 粘聚力; 摩擦角

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0173-05

On shear rate on saturated silty clay test results in direct shear test

HU Wei-na¹, PAN Xuan², KOU Ming-zhu³, LIU Yong-sheng¹

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China; 2. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute, Shanghai 200125, China; 3. Dalian Jiucheng Surveying & Mapping Enterprise Group, Dalian 116400, China)

Abstract: The direct shear test is widely used in China. Besides the soil samples' characteristics impact, the direct shear test is also greatly related to the parameter conditions. This paper studies the quick shear indicators of saturated silty clay with low plasticity from Caofeidian in Hebei province. Based on the statistical analysis of test indicators obtained by different test methods, we know the impact of the shear rate in the quick shear indicators and suggest the higher shear rate (2.4 mm/min) on saturated silty clay with low plasticity quick shear test.

Key words: quick shear; shear rate; consolidation; low plasticity; saturated silty clay; shear strength; cohesion; friction angle

土的抗剪强度是指土体抵抗剪切破坏的极限能力, 是土的重要的力学性质之一。在计算地基承载力和挡土墙的压力以及评价硐室、基坑、地基稳定性时, 都要用到土的抗剪强度指标。因此快速准确地测定土的抗剪强度在工程上具有重要意义。目前测试土的抗剪强度的方法有很多, 其中直接剪切试验以其操作简单、原理明确而得以在工程上广泛应用。

试验方法标准^[1]规定快剪试验适用于渗透系数小于 10^{-6} cm/s的细粒土。但在实际工程实践中, 不同试验室及同一试验室的不同人员, 在对饱和的低塑性粉质黏土进行快剪试验时会得出不同的

强度值, 并与三轴UU试验强度值差别很大。

在河北省曹妃甸地区的勘察项目中, 选取有代表性、较均质粉质黏土样品42件, 依据土样的层位和土性特征分为6组。依据试验方法标准, 对6组样品进行物理力学试验。在进行快剪试验时, 对6组样品都使用相同的垂直压力, 每组样品分别采用4种不同的剪切速率, 对6组试验数据进行统计分析, 并与三轴UU指标相比较, 确定剪切速率对该地区粉质黏土快剪试验指标影响的因素和程度。

1 粉质黏土的土性指标统计分析

试验样品为灰色-深灰色淤泥质粉质黏土夹粉

收稿日期: 2013-01-11

作者简介: 胡伟娜(1981—)女, 工程师, 主要从事岩土测试工作。

土斑或互层，具有较好的层理，属于河口三角洲冲积相沉积，属于高灵敏度饱和粉质黏土。为了解试验样品的其他特性，依据土工试验方法标准进行物性试验、渗透和标准固结试验。样品颗粒级配曲线见图1，其他试验指标统计见表1和表2。

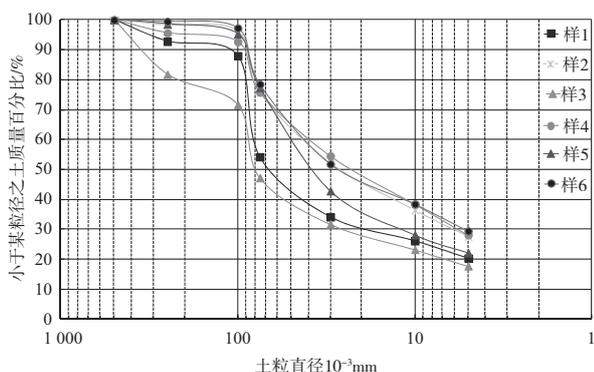


图1 颗粒级配曲线

由图1可以看出：试验所用样品颗粒分选较

差，颗粒级配一般，6组样品的颗粒级配曲线走势基本一致，级配曲线中部都有陡降段，说明土样颗粒粒径分布跨越较大。由表1和表2的统计数据可以看出：试验所用样品的物理力学指标，虽然具有离散性，但能够确定为土质为同一类型；试验所用样品垂直渗透系数 k_v 平均值为 0.454×10^{-6} cm/s，水平渗透系数 k_h 平均值为 0.905×10^{-6} cm/s，100~200 kPa标准固结的垂直 t_{90} 平均值为238 s，水平 t_{90} 平均值为146 s。可以看出，垂直向和水平向的渗透系数和固结系数差异很大，这主要是由于土样的水平层理和结构导致；土样的饱和度均值超过97%，液性指数平均值为1.28，塑性指数平均值为13.0，说明试验样品都是饱和和低塑性的软质粉质黏土；三轴UU统计指标中粘聚力平均值为18.8 kPa，摩擦角平均值为7.3°，无侧限灵敏度平均值为5.6，说明样品是流塑状^[2]的具有一定结构强度的灵敏度土^[3]。

表1 物理试验数据

试验指标	含水率/%	天然密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数	饱和度/%	压缩系数100~ 200kPa/MPa
最大值	40.77	1923.3	1.137	32.8	18.3	14.7	1.55	99.5	0.687
最小值	28.83	1758.5	0.788	26.3	15.6	10.7	1.07	94.1	0.294
平均值	33.32	1844.2	0.933	29.6	16.6	13.0	1.28	97.2	0.464
标准差	3.929	0.514	0.111	2.210	0.850	1.523	0.150	1.587	0.136
变异系数	0.118	0.028	0.119	0.075	0.051	0.117	0.117	0.016	0.292

表2 其它力学试验数据

试验指标	三轴 UU		固结系数/ $(10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$		t_{90}/s		渗透系数/ $(10^{-6} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$		无侧限强度/ kPa	灵敏度
	粘聚力/kPa	摩擦角/ (°)	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平		
最大值	20.0	11.0	5.737	6.912	348	198	0.656	1.217	55.8	7.26
最小值	17.0	3.0	1.848	3.608	132	108	0.267	0.673	31.0	4.08
平均值	18.8	7.3	3.500	5.130	238	146	0.454	0.905	39.83	5.56
标准差	1.067	2.765	1.501	1.070	90.443	28.705	0.134	0.193	8.767	1.169
变异系数	0.057	0.381	0.429	0.208	0.380	0.197	0.295	0.213	0.220	0.210

2 快剪试验方法

为分析剪切速率对饱和粉质黏土快剪指标影响因素和程度，使用同一台装配数采装置的四联电动直剪仪进行试验。对6组样品施加50，100，150，200 kPa相同的垂直压力，分别使用0.4，0.8，1.2，2.4 mm/min的剪切速率进行快剪试验。试验时每0.2 mm剪切位移量采集数据一次，采用位移量6 mm为结束标准，对应的4种剪切速率试验用时分别为：15，8，5，3 min，剪切强度依照规

范要求取值。

2.1 剪切前后含水率变化

由于直剪仪不能控制剪切过程中试样的排水固结，在剪切试验过程中试样上下使用隔板，试样的排水主要集中在上下剪力盒的接触面及土样与剪力盒接触的边缘上。因此，此次研究中采用在剪切试验前称量试样质量，剪切试验结束后立即移除垂直荷载，将上剪力盒垂直向上移开，用棉纱吸除剪力盒接触面的水分，小心将样品取出，再

吸除样品表面的浮水, 称质量后烘干, 从而计算出试样剪切前后的含水率。为消除样品的不均匀性影响, 利用式 (1) 求出试样剪切前后含水率的相对变化率^[4], 绘制相同垂直压力不同剪切速率的含水率相对变化率曲线 (图2); 绘制相同剪切速率不同垂直压力的含水率相对变化率曲线 (图3)。

$$\text{含水率相对变化率} = \frac{\text{原始含水率} - \text{剪切后含水率}}{\text{原始含水率}} \times 100\% \quad (1)$$

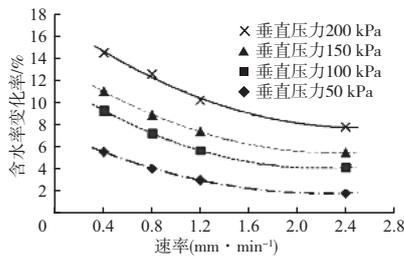


图2 含水率变化率与荷重关系

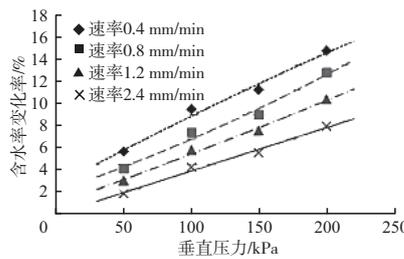


图3 含水率变化率与速率关系

2.1.1 含水率变化与剪切速率的关系

从图2中可以看出, 相同的垂直荷重下剪切后的含水率与剪切速率有明显的对应关系, 即: 剪切速率愈小, 剪切时间愈长, 土样排水固结愈充分, 土样含水率相对变化率愈大; 反之, 土样含水率相对变化率愈小。

2.1.2 含水率变化与垂直荷重的关系

从图3中可以看出, 相同的剪切速率下剪切后的含水率与垂直荷重有明显的对应关系, 即: 剪切速率相同, 垂直荷重愈大, 土样排水固结愈充分, 土样含水率相对变化率愈大; 反之, 土样含水率相对变化率愈小。

2.2 剪切指标

试验结果统计列表 (表3), 并取6组快剪强度的值绘制综合直剪试验成果曲线 (图4)。从表3和图4中可以看出: 对于试验研究土样, 在不同的剪切速率下得出的剪切指标不相同: 剪切速率越小, 所得摩擦角越大, 粘聚力越小; 0.4 mm/min的剪切速率得到的摩擦角是2.4 mm/min剪切速率下得到的摩擦角的3倍, 同时粘聚力也降低2 kPa; 剪切速率在2.4 mm/min时所得剪切强度最接近三轴UU试验的摩擦角和粘聚力值, 但摩擦角和粘聚力值

表3 粘聚力与摩擦角指标

试验方法	速率/ (mm·min ⁻¹)	指标	最大值	平均值	最小值	标准差	变异系数	土样Y1	土样Y2	土样Y3	土样Y4	土样Y5	土样Y6
直剪	0.4	c/kPa	8	7.33	7	0.471	0.064	8	8	7	7	7	7
		ϕ / (°)	30	26.92	22.5	2.699	0.100	28.0	25.5	30.0	22.5	30.0	25.5
	0.8	c/kPa	17	12.67	11	1.972	0.156	12	17	11	12	12	12
		ϕ / (°)	27.5	22.00	17.5	3.189	0.145	22.0	21.5	27.5	17.5	24.0	19.5
	1.2	c/kPa	18	16.50	15	1.118	0.068	18	16	15	16	16	18
		ϕ / (°)	20.0	15.90	9.5	4.467	0.281	19.5	17.0	19.5	10.0	20.0	9.5
2.4	c/kPa	24	21.17	17	2.115	0.100	21	22	17	21	24	22	
	ϕ / (°)	14.0	9.10	5.0	3.599	0.396	13.5	5.0	14.0	5.5	9.5	7.0	
三轴	0.8	c/kPa	20	18.83	17	1.067	0.057	18	19	19	17	20.8	20
		ϕ / (°)	11.0	7.25	3.0	2.765	0.381	10.0	3.0	11.0	5.0	8.0	6.5

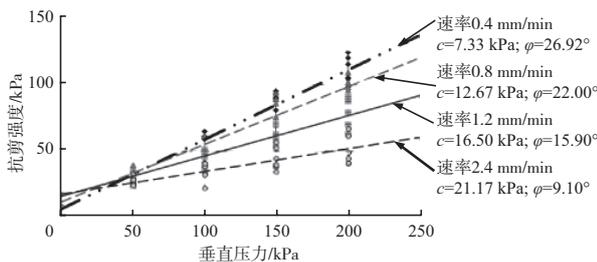


图4 综合直剪曲线图

还是有所提高。

2.2.1 与三轴UU试验对比

通过表3可以看出, 快剪试验分别以0.4, 0.8, 1.2, 2.4 mm/min速率剪切时得到的平均 ϕ 值与三轴UU试验的平均 ϕ 值相比较, 分别提高19.7°, 14.8°, 8.7°, 1.9°, 而c值则分别降低11.5, 6.2, 2.3, -2.3 kPa, 0.4 mm/min速率下的

强度值比三轴UU试验的强度值大，原因是试样在剪切时发生了固结。通过图5可以看出，剪切速率越大，快剪的 c 和 ϕ 值越接近三轴UU试验的 c 和 ϕ 值，快剪试验的 c 值多数小于三轴UU试验的平均 c 值，只有2.4 mm/min速率下的超过三轴UU试验的平均 c 值； ϕ 值均大于三轴UU试验的平均 ϕ 值。

2.2.2 不同剪切速率试验结果的变化规律

从图5也可以看出：剪切速率越小，直剪试验的 ϕ 值越大， c 值越小。在剪切速率小于1.2 mm/min时， ϕ 值近似呈直线增长，在剪切速率大于1.2 mm/min后 ϕ 值的生长趋势才逐渐变缓； c 值的增减变化规律与 ϕ 值相反。

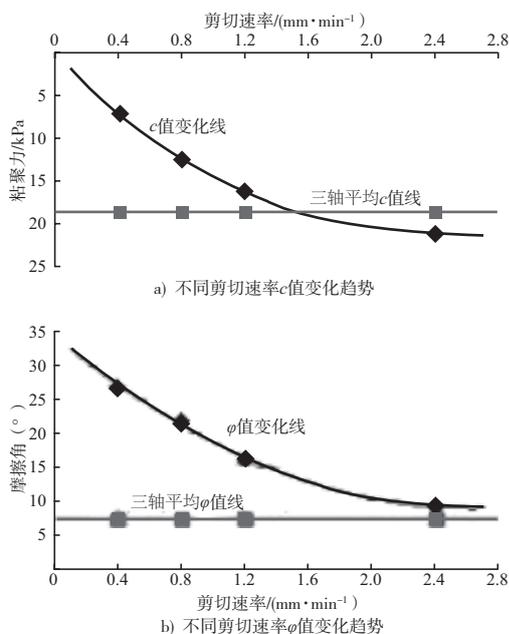


图5 不同速率直剪指标与三轴UU指标关系

3 原因与机理

从直剪试验结果可以看出，在不同的剪切速率下，同一土样却得出不同的快剪试验指标。主要原因是，在剪切过程中土样发生了排水固结，试验值是土样在剪切过程中不断发生排水固结后的抗剪强度值。

3.1 土样排水固结

由表1、表2和图3可知，用于研究试验的土样平均渗透系数值均适合试验方法标准要求。从剪切前后土样含水率的变化中可以看出：在直接剪

切试验中，土样确实发生了排水固结；并且，土样的排水固结程度与剪切时间和垂直荷重有直接联系。其主要原因是直剪仪的剪力盒不是一个密闭系统，剪切过程不是瞬间完成，土样在垂直荷重的作用下，产生垂直方向上的变形固结；在剪切过程中，土样在剪应力的作用下，沿上下剪力盒接触面方向产生水平方向的变形固结；两种方向上的排水固结随着时间的延长不断增长，同时，随剪切位移的增大，土样与剪力盒的接触面积会不断增大，也为土样加快排水固结创造了条件。

3.2 应力应变曲线状态分析

分别绘制土样的快剪、三轴UU和无侧限试验的应力应变曲线图(图6)。从图6可以看出，三轴UU和无侧限试验的应力应变曲线在剪切应变4%~6%以后基本趋于平缓，应力值增长不明显，无侧限强度曲线出现峰值。可见，三轴UU和无侧限试验中，土样出现了塑性变形破坏或剪切破坏，试验值反映了土样自身的抗剪特征。快剪的应力应变曲线显示出剪切强度一直随应变的增加而增加，不同荷重下的应力应变曲线呈喇叭口状，曲线在剪切位移达4 mm后也没有出现平缓现象，说明试验测得的值并非土样自身性质的剪切强度值，而是土样在剪切过程中不断排水固结，性质发生变化后的抗剪强度值。原因是剪切时间较长时，土样产生了较好的排水固结，土体中自由水被排出，孔隙水压力不断消散，土颗粒角膜水的润滑作用不断减弱，在垂直荷重和水平剪应力的作用下土颗粒不断重新排列，并且土颗粒间的有效接触点不断增多。因此，土样的强度不断增大。

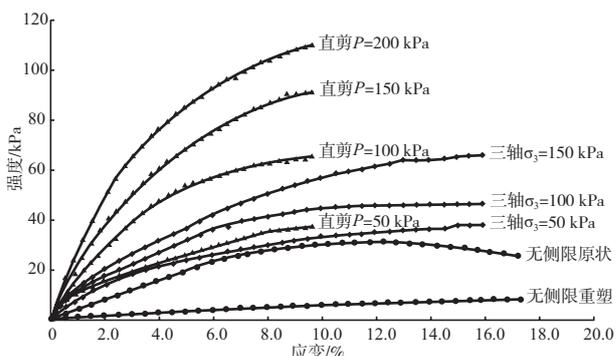


图6 试样Y4直剪、三轴UU和无侧限试验应力应变曲线

4 结语

1) 对饱和低塑性粉质黏土使用快剪试验方法进行试验时, 剪切速率越小, 所得 ϕ 值越大, c 值越小, 试验结果失真越大。

2) 对饱和低塑性粉质黏土不适宜使用快剪试验方法进行试验, 如要进行快剪试验时应该采用 2.4 mm/min 及以上的较大剪切速率。

3) 上述结论是针对研究土样地区的饱和低塑性粉质黏土研究得出的结论。因此, 针对不同地区的饱和低塑性粉质黏土使用快剪试验方法进行试验时, 应同步进行三轴UU试验, 以分析快剪试

验方法对该地区饱和低塑性粉质黏土的适用性和确定直剪指标的失真程度。

参考文献:

[1] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准 [S].

[2] GB/T 50021—2001 岩土工程勘察规范: 2009年版[S].

[3] 工程地质手册编委会. 工程地质手册 [M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[4] 阚卫明, 刘爱民. 剪切速率对粉质黏土抗剪强度的影响 [J]. 中国港湾建设, 2008(2): 23-26.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第 159 页)

表4 苏北灌溉总渠泄水时引航道水力特征值

工况	人字门处最大反向水头/m		辅导航墙前端最大横流/ (m·s ⁻¹)		系船墩处最大横流/ (m·s ⁻¹)
	二线	扩容	二线	扩容	扩容
二线单独泄水	0.16	0.16	0.08	0.05	0.18
扩容单独泄水	0.16	0.16	0.04	0.05	0.17
二线、扩容同时泄水	0.18	0.18	0.03	0.02	0.22

合及运行方式下的下游引航道的水流条件。通过计算结果分析表明, 二线船闸和扩容船闸下游引航道口门区水域比较窄, 但在下游较短范围内引航道与苏北灌溉总渠交汇, 河道变宽, 船闸泄水时的非恒定流产生的反射波不是很强。但由于高良涧二线船闸、扩容船闸共用下游引航道, 辅导航墙长度仅 25 m, 在两个船闸单独泄水时, 均会在辅导航墙前端产生环流, 影响辅导航墙前端引航道的流态平顺, 因此提出增设格栅式分隔堤调顺水流。本文同时考虑了苏北灌溉总渠的泄流影响。由计算结果可知, 苏北灌溉总渠泄洪对船闸下游引航道非恒定流, 特别是对系船墩处横流有

一定影响, 在百年一遇的极端工况下, 系船墩前沿线最大横流超出“规范”限值。

参考文献:

[1] 韦德鉴, 宣国祥, 李君, 等. 长江四线并列船闸运行方式对下游引航道水流条件的影响[J]. 水运工程, 2012(8): 119-124.

[2] 朱志夏, 尤薇, 曲红玲. 江苏刘老涧船闸下游引航道非恒定流及改善措施研究报告[R]. 南京: 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 2012.

[3] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].

[4] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)