

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.07.066

上海地区饱和软黏土的直剪试验特性研究

田丽霞,周黎月,尹保国

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:上海地区饱和软黏土的剪切特性对建筑物地基的稳定性具有重要影响,在实际工程中,主要通过室内直剪试验来确定软黏土的剪切指标。试验方法普遍采用固结快剪,而快剪和慢剪试验方法较少采用,研究也不多。通过对上海典型④层软黏土分别进行快剪、固结快剪和慢剪试验,研究不同试验方法得到的软黏土的剪切指标,总结软黏土的剪切特性。

关键词:快剪试验;固结快剪试验;慢剪试验;抗剪强度;黏聚力;内摩擦角

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)07-0276-05

0 引言

上海位于长江三角洲东南前缘,广泛分布着滨海相沉积的饱和厚层软黏土层,工程性质差,具有高含水率,高灵敏度,高孔隙比,高压缩性,低透水性,低抗剪强度等特性。土的抗剪强度对于工程设计和施工至关重要,其直接关系到地基的稳定性、建筑物的安全性以及土体的整体稳定性,在设计和施工过程中需要充分考虑软黏土的剪切特性。土的抗剪强度是土体受到外力作用而产生抵抗剪切破坏的能力,它主要取决于土的内摩擦力和黏聚力。软黏土的抗剪强度受到多种因素的影响,主要包括土的组成、结构、密度、含水率、土体所受的应力状态以及测试方法等。针对软黏土抗剪强度的测试方法主要有现场和室内两大类。现场方法主要有原位十字板剪切试验,室内方法主要有直剪试验、无侧限抗压强度试验和三轴压缩试验等。其中,直剪试验因为操作简单,时间短,效率高,成本低,是工程建设中最常用的方法。直剪试验包括快剪试验,固结快剪试验以及慢剪试验,国内学者从影响直剪试验的因素方面做了大量研究,如剪切过程中剪切面的变化以及剪切速率的大小对抗剪强度的影响等^[1-3]。针对特有的滨海、沼泽沉积软黏土,从业人员从软黏土的微观角度^[4]及灵敏性^[5]方面进行了详细的研究探讨。针对剪切方法

从对饱和软黏土的重塑样进行了固结快剪和慢剪试验研究^[6]。张祥等通过对不同含水率下的软黏土进行直剪试验得到含水率对抗剪强度及参数的影响^[7]。郭鹏斐等通过三种剪切方法对轻量土开展试验研究,得出不同试验方法对于黏聚力与内摩擦角的敏感程度不同^[8]。

目前上海地区的工程实践中,普遍采用固结快剪试验方法,而且积累了大量的工程经验,但是对快剪试验和慢剪试验进行的较少,工程经验相对缺乏。另外对同一种土体采用不同直剪试验方法获得的抗剪强度缺少对比研究。

综上所述,本文选取上海最具代表性的第④层软黏土进行研究,采用快剪、固结快剪以及慢剪方法分别进行试验。从不同试验方法和不同荷重下得到的软黏土抗剪强度等方面进行分析研究,充分了解上海④层饱和软黏土抗剪强度的变化规律,为工程建设中合理选择试验方法,获取准确、可靠的抗剪强度指标提供依据。

1 上海地区软黏土情况

上海地区的软黏土层主要为③层灰色淤泥质黏性土和④层灰色淤泥质黏性土,主要分布在地面下3~20 m深度范围内,土质差,承载力低,是工程建设的不良地层。工程特征见表1。

本次研究选取土质均匀的④层灰色淤泥质黏土作为试样来源,取样深度在地面下10~15 m,土层物理性指标见表2。

收稿日期:2024-04-08

作者简介:田丽霞(1980—),女,硕士,高级工程师,主要从事岩土工程土工测试工作。

表1 上海地区软黏土工程特征表

土层序号	土层名称	成因	状态	压缩性	特征
③	淤泥质粉质黏土	滨海~浅海	流塑	高等	高灵敏度、正常固结,夹薄层状粉砂,土质不均匀
④	淤泥质黏土	滨海~浅海	流塑	高等	高灵敏度、正常固结,含有机质,土质均匀

表2 土层物理性指标表

分类	含水率 / %	密度 / (g·cm ⁻³)	孔隙比	液限 / %	塑限 / %	塑性指数	液性指数
平均值	49.9	1.71	1.382	43.3	24.5	18.8	1.37
最大值	53.0	1.66	1.575	49.5	27.6	25.3	1.75
最小值	47.5	1.75	1.304	40.5	20.8	17.5	1.01

2 试验方法

本次试验方法严格按照国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)第21章直接剪切试验相关规定进行。预压仪采用我单位自主研发的全自动气压式剪切预压仪,如图1所示;剪切仪采用全自动四联剪,型号AZJ-4,厂家为南京智龙科技开发有限公司,如图2所示。每组试验采用4块试样,试样尺寸:直径6.18 cm,高度2.0 cm。



图1 全自动气压式剪切预压仪



图2 全自动四联剪

2.1 试验方法选择

本次直剪试验方法分别采用快剪试验、固结快剪试验、慢剪试验。

(1)快剪试验

将制备好的原状试样直接推入剪切盒中,上下加不透水板,施加拟定的荷重序列,以1.2 mm/min的速率进行剪切,使试样在3~5 min内剪坏,剪切变形量不小于4 mm,最大至6 mm停止试验。

(2)固结快剪试验

制备好的原状试样先放入固结容器内进行预固结,上下加滤纸和透水板,施加拟定的荷重序列5 min后,再往容器内注满水,预固结24 h,后待试样固结变形稳定后,可进行下一步剪切试验。将预固结好的试样移入剪切盒中,然后施加拟定的荷重序列,待试样垂直变形量稳定后进行剪切。试验按照1.2 mm/min的速率进行剪切,使试样在3~5 min内剪坏,剪切变形量不小于4 mm,最大至6 mm停止试验。

(3)慢剪试验

将制备好的原状试样直接推入剪切盒中,上下加滤纸和透水板,盒中加水或用湿布包裹试样,分级施加拟定的荷重序列,预固结24 h,待试样固结变形稳定后,可进行下一步剪切试验。试验按照0.02 mm/min的速率进行剪切,剪切变形量不小于4 mm,最大至6 mm停止试验。

2.2 试验荷重设计

本次直剪试验每组试验取4块试样,分别施加不同的垂直压力。垂直压力根据土体自重应力综合确定,垂直压力的各级差值相等,共设计三种不同垂直荷重序列。试验采用的试样取自地面下深度约10~15 m的④层淤泥质黏土,自重应力约100 kPa。

(1)第一种荷重序列

起始荷重小于土体自重应力的垂直加荷序列,即50、100、150、200 kPa。

(2)第二种荷重序列

起始荷重接近于土体自重应力的垂直加荷序列,即100、150、200、250 kPa。

(3)第三种荷重序列

起始荷重大于土体自重应力的垂直加荷序列,即150、200、250、300 kPa。

2.3 试验数量确定

为使试验结果具有一定代表性,确定每种剪切方法及每种荷重序列条件下,剪切试验数量各不少于10组。

3 试验结果分析

3.1 抗剪强度指标的确定

根据国家标准《土工试验方法标准》(GB/T

50123—2019)中直剪试验规定,绘制剪应力与剪切位移关系曲线图,在曲线上选取剪应力峰值或稳定值作为抗剪强度,当曲线上难以选取峰值点时,按剪切位移为4 mm对应的剪应力作为抗剪强度。取得各级荷载下的抗剪强度 S 后,根据各级垂直压力 P ,绘制抗剪强度 S 与垂直压力 P 的关系曲线图。根据图上各点,采用最小二乘法绘制拟合直线。量取直线倾角作为土的内摩擦角 φ ,量取直线在抗剪强度 S 坐标轴上的截距作为土的黏聚力 c 。本次试验结果汇总见表3。

表3 直剪试验结果汇总表

垂直荷重序列	快剪试验抗剪强度平均值		固结快剪试验抗剪强度平均值		慢剪试验抗剪强度平均值	
	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	c /kPa	φ /($^{\circ}$)
第一种	7.4	4.6	9.3	14.6	1.6	24.7
第二中	9.6	5.3	10.5	13.5	2.3	23.6
第三种	10.2	4.8	11.1	13.9	2.7	23.9

3.2 不同剪切试验方法研究

根据本次试验结果,在不同序列垂直荷重压力作用下,分别汇总三种不同剪切试验方法的垂直压力 P 与抗剪强度 S 曲线如图3至图5所示。

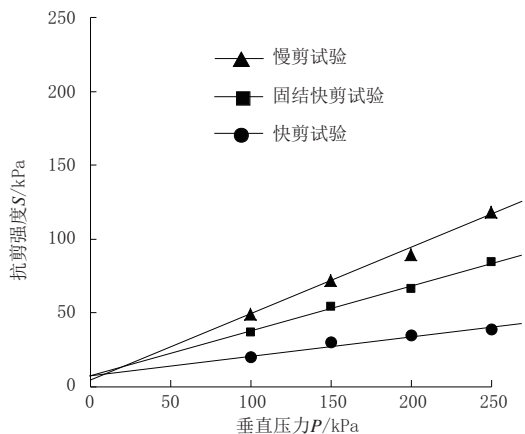


图3 起始荷重小于土体自重应力

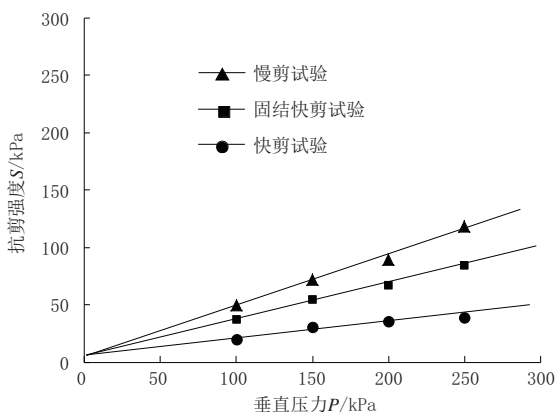


图4 起始荷重等于土体自重应力

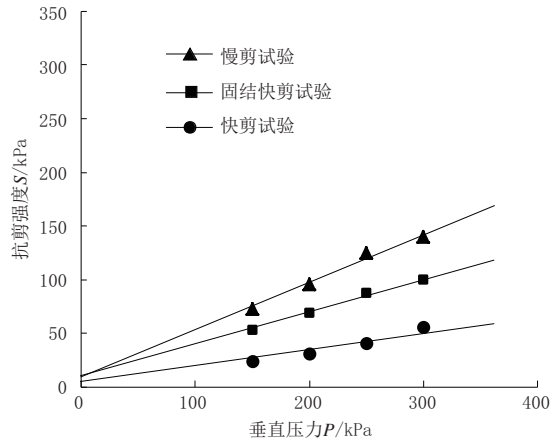


图5 起始荷重大于土体自重应力

由表3和图3至图5可以看出,不同试验方法得到的④层黏聚力和内摩擦角各不相同,但总体趋势相同,分析比较如下。

(1)黏聚力

比较黏聚力变化,慢剪试验最小,固结快剪试验最大,快剪试验居中。分析原因:土的黏聚力反映了土的胶接特性,是土颗粒之间由于胶接、水的吸附和相互作用力而产生的抵抗剪切破坏的能力。黏聚力越大,土的整体性就越强,抗剪强度也就越大。饱和黏土除了颗粒相互间存在作用力以及胶接作用产生黏聚力外,其土体结构孔隙中充满的水也会使颗粒之间产生黏聚力。饱和黏土所含的水在土颗粒之间形成水膜,水的表面张力对土颗粒形成吸附作用。当水膜均匀分布在所有土颗粒接触点上时,此时黏聚力达到最大。当含水率增大时,水膜的厚度也随之增大,导致土颗粒之间的距离增大,吸附作用和相互作用力便减弱,另外含水率的增大也减弱了土颗粒之间的胶接作用,致使黏聚力降低。快剪是在不排水状态下进行的试验,试验过程中含水率最大,因而得到的黏聚力比预固结的固结快剪试验要小。但慢剪试验得到的黏聚力最小,是因为在慢剪试验中,采用了较慢的剪切速率,促使试样的固结和排水得到充分发挥,这种长时间的排水和体积变化导致土颗粒之间的排列和接触形态发生改变,土颗粒有足够的时间进行重排和移动,致使颗粒间的接触点减少或变得不稳定,减弱了土颗粒间的相互作用力和孔隙中水膜的吸附力,进而减小了黏聚力。

(2)内摩擦角比较

比较内摩擦角变化,快剪试验最小,慢剪试验最大,固结快剪试验居中。分析原因,土的内摩擦角反映了土的摩擦特性,其包含两个部分:一是土颗粒之间发生相互摩擦运动时产生的摩擦力,二是颗粒与

颗粒间摆脱互嵌时产生的咬合力。内摩擦角越大,产生的摩阻力就越大,抵抗外力的能力就越大,土的抗剪强度就越大。内摩擦角大小与土的含水率、密实度、颗粒大小等因素有关。其中含水率及密实度对抗剪强度具有显著影响。当含水率增加时,水分起到润滑作用,致使土颗粒表面间的摩擦力减小,导致内摩擦角减小,从而降低了土的抗剪强度。当密实度增大时,土越密实,颗粒间接触越紧密,产生的摩擦力就越大,内摩擦角就越大。当饱和软黏土进行预压排水固结时,含水率减少,孔隙比减小,固结排水越充分,孔隙比减少越多,土就越密实,因而导致内摩擦角变大,从而提高了土的抗剪强度。快剪试验中土的孔隙比和含水率皆最大,土的密实度最小,因而得到的内摩擦角最小。慢剪试验过程中,土得到充分排水固结,孔隙比和含水率皆减小,土被压密实,土颗粒间有效接触点增加,导致摩擦力增大,因而得到的内摩擦角最大。

3.3 不同荷重序列研究

根据表3和图3至图5对每种试验方法在不同荷重序列下得到的结果分析如下。

(1)快剪试验

快剪试验得到的内摩擦角都比较小,抗剪强度也最小。当第一级荷重小于土的自重应力时,得到的内摩擦角最小;第一级荷重等于和大于土的自重应力时,得到的内摩擦角较接近,并且相对大。分析原因:土的抗剪强度与土的排水固结程度和应力条件关系密切。快剪试验过程中,土样不进行预固结和排水,导致土样的固结程度较低,剪切试验过程中又几乎不排水,导致孔隙水应力不能消散,土样的有效应力不能增加,因而得到的抗剪强度较低。当第一级荷重小于土的自重应力时,土样承受的应力状态小于实际的应力状况,因而产生的摩擦力最小,导致抗剪强度也最小。

(2)固结快剪试验

固结快剪试验得到的内摩擦角比快剪试验的内摩擦角明显提高,抗剪强度相应也提高了。当第一级荷重小于土的自重应力时,得到的内摩擦角最大;第一级荷重等于和大于土的自重应力时,得到的内摩擦角比较接近,并且相对小。分析原因:固结快剪试验中,土样预先进行固结排水,土样得到充分固结和排水,孔隙比减小,密实度增大,土中含水率减少,孔隙水应力得到消散,有效应力得到增加,因而提高了土样的抗剪强度。但当第一级荷重小于土的自重应

力时,未能达到土样的原始应力状态,土样固结排水不充分,在此条件下得到的第一级剪应力偏小,反映在抗剪强度 S 与垂直压力 P 的关系曲线上即第一点偏低,因而根据试验点所做的直线斜率增大,得到的内摩擦角偏大。

(3)慢剪试验

比较图3至图5可以看出,慢剪试验得到的内摩擦角都比较大,抗剪强度相比较也最大。当第一级荷重小于土的自重应力时,得到的内摩擦角最大;第一级荷重等于自重应力时最小,第一级荷重大于自重应力时居中,但相差并不明显。分析原因:土的抗剪强度与排水固结程度和有效应力状态有关外,还与剪切速率有关。慢剪试验过程中,土试样得到充分固结和排水,密实度增大,有效应力增大,因而提高了土样的抗剪强度。另外,由于剪切速率较慢,土样在剪切过程中可以一直进行排水,从而导致土样有效应力进一步增大,因此得到的抗剪强度最大。但当第一级荷重小于土的自重应力时,同固结快剪试验一样,得到的第一级剪应力偏小,因而导致根据试验点所做的直线斜率增大,得到的内摩擦角偏大。

(4)试验方法比较

综合表3和图3至图5可以看出,三种剪切试验方法得到的抗剪强度差别明显,快剪试验最小,固结快剪次之,慢剪试验最大。因此剪切试验方法对工程建设影响较大。另外,同一种剪切试验方法在不同荷重序列下得到的抗剪强度虽然有所不同,但差别不大,是因为试验除了荷重序列不同外,其余固结排水条件和剪切速率皆相同,影响因素一致,因而各方法得到的抗剪强度变化不明显。但需注意,第一级荷重大小对抗剪强度确定有一定影响,应尽量与土的自重应力相一致,以真实反映土的应力状态,得到准确的抗剪强度指标。

4 结 语

本文通过对上海地区④层饱和淤泥质黏土进行直剪试验,包括快剪、固结快剪和慢剪试验,以及三种荷重序列下的剪切试验,根据得到的抗剪强度结果进行对比分析研究,得到如下结论。

(1)土的黏聚力和内摩擦角与土的含水率、密实度、颗粒大小等因素有关,其中含水率及密实度具有显著影响。

(2)土的抗剪强度与土的排水固结程度和应力条件密切相关。固结程度越好,剪切速率越小,排水越

充分,土的有效应力增大越明显,得到的抗剪强度也越大。

(3)在不同荷重序列条件下,各剪切试验方法得到的抗剪强度有所不同,但差别并不大。但需注意第一级荷重对抗剪强度确定有一定影响,宜不小于土的自重应力。

(4)剪切试验方法对确定土的抗剪强度影响较大,慢剪试验得到的抗剪强度最大,固结快剪试验次之,快剪试验最小。不同试验方法得到的抗剪强度差别较大,应根据设计方案和施工工况选择相适应的剪切试验方法,以得到经济合理和安全的剪切指标。

(5)本次研究代表性有限,上述结论不一定适合所有的饱和软黏土,需要今后进一步进行试验验证和积累经验。

参考文献:

- [1] 潘永坚,楼希华.不同剪切速率下软土的直剪固结快剪抗剪强度[J].工程勘察,2005(2):37-39.
- [2] 阚卫明,刘爱民.剪切速率对粉质粘土抗剪强度的影响[J].中国港湾建设,2008(2):23-26.
- [3] 程平.剪切速率对直剪固结快剪试验指标的影响浅析[J].城市道桥与防洪,2019(10):37-39.
- [4] 龚士良.上海软粘土微观特性及在土体变形与地面沉降中的作用研究[J].工程地质学报,2002(4):378-384.
- [5] 高彦斌,鲍文鹏,楼康明.上海地区第4层淤泥质黏土灵敏性试验与分析[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(1):140-145.
- [6] 陈敏,管飞.上海重塑粘性土的直剪特性研究[J].上海国土资源,2012,33(1):79-82.
- [7] 张祥,王道金,侯蕊,等.淤泥质软黏土抗剪强度特性研究[J].中国水运(下半月),2020,20(1):265-266.
- [8] 郭鹏斐,侯天顺,刘茜,等.直剪试验方法对轻量土抗剪强度的影响规律研究[J].水利水电技术(中英文),2023,54(4):161-170.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿邮箱:cdq@smcdi.com 电话:021-55008850 联系网站:<http://www.csdqyfh.com>