

文章编号: 1007-2993(2024)01-0106-04

北京东部地区非饱和粉砂层 原位直剪试验成果分析

张向营^{1,2} 周玉凤^{1,2} 杨浩军^{1,2} 冯建洋^{1,2} 程秋实^{1,2}

(1. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101;

2. 城市轨道交通深基坑岩土工程北京市重点实验室, 北京 100101)

【摘要】 对北京东部地区典型非饱和粉砂层进行原位直接剪切试验, 采用最小二乘法拟合得到黏聚力和内摩擦角指标, 其内摩擦角指标相比于传统地区经验值和室内直接快剪试验值分别提高了 11.11%~24.4%、3.01%~17.40%; 室内直接快剪试验测得粉砂层的黏聚力为 4.8~7.5 kPa, 而原位直剪试验测得该值最高达 9.5 kPa。研究成果为该地区非饱和砂土层的剪切指标参数优化提供了试验支撑, 节约了基坑支护造价, 为实现工程建设全过程绿色建造提供了可能。

【关键词】 非饱和砂土; 原位直剪试验; 剪切强度指标

【中图分类号】 TU413

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.01.019

Analysis on In-situ Direct Shear Test Results of Unsaturated Silty Sand in the Eastern Part of Beijing

Zhang Xiangying^{1,2} Zhou Yufeng^{1,2} Yang Haojun^{1,2} Feng Jianyang^{1,2} Cheng Qiushi^{1,2}

(1. Beijing Urban Construction Exploration and Surveying Design Research Institute Limited Liability Company, Beijing 100101, China; 2. Beijing Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Deep Excavation of Urban Rail Transit, Beijing 100101, China)

【Abstract】 For the typical unsaturated silty sand layer in the eastern part of Beijing, in-situ direct shear tests were conducted, and the cohesion and internal friction angle were obtained by the least squares method. The internal friction angle values are increased by 11.11%~24.4% compared to traditional regional empirical values, and by 3.01%~17.4% compared to the values from the indoor direct shear test. The cohesive force of the silty sand layer measured by the indoor direct shear test is 4.8~7.5 kPa, while the value measured by the in-situ direct shear test is up to 9.5 kPa. The research results provide experimental support for the optimization of the shear index parameters of the unsaturated sand layer in this area, save the cost of foundation pit support, and provide the possibility for realizing green construction in the whole process of engineering construction.

【Key words】 unsaturated sand; in-situ direct shear test; shear strength index

0 引言

北京地区的岩土勘察设计通常忽略砂层黏聚力, 对其内摩擦角值一般根据标准贯入试验结合地区经验赋值, 砂层的剪切强度指标缺乏详尽的数据支撑。北京地区经验是基于 20 世纪 60—70 年代对三环以内砂层的研究得出的, 北京三环以外地区鲜有研究。对于大规模开发的北京东部富砂地区, 砂层的剪切指标对岩土工程造价影响较大, 因此有必要开展相关研究工作。

粉细砂剪切强度指标影响因素的确定, 已有不同方向的研究。雷胜友^[1] 从毛细水提供附加小主应

力的角度出发, 计算了在不同含水量下潮湿粉细砂土破坏时的大主应力; 林鸿州^[2] 则通过对比非饱和和无黏性土“土-水特征曲线”与抗剪强度的关系曲线, 发现黏聚力在饱和度为 40%~60% 时达到峰值, 内摩擦角值与饱和度整体呈负相关关系; 赵延林等^[3] 通过直剪试验, 研究了颗粒级配、含水率、参土量等因素对非饱和砂土似黏聚力的影响。

作为获取岩土体物理力学参数最可靠的试验方法之一, 原位直接剪切试验目前已经广泛应用于各类岩土工程项目中, 不同的学者针对不同的岩土科学问题, 各自开展了原位直剪试验研究工作。刘伍^[4] 对

北京新近沉积砂卵石地层开展了现场直接剪切试验,验证了卵石地层具有显著的黏聚力数值;赵兵等^[5]通过现场砂卵石大剪试验及室内直剪试验,认为成都地区砂卵石的抗剪强度经验值还有提高空间,李静荣等^[6]对花岗岩残积土开展了原位剪切试验研究,得到了类似的研究结论;赵德安等^[7]对黄河二级阶地洪积碎石土开展了原位直剪试验,为当地的边坡支护设计提供了数据支撑;谭海晖等^[8]采取了南宁市轨道交通深基坑 92 组原状粉细砂样,现场试验得出的抗剪强度低于地区经验值。

为获取北京东部地区砂层的剪切强度指标,在北京城市副中心某典型场地进行原位直接剪切试验,采用最小二乘法拟合得到剪切强度指标,并采取原状砂样进行室内直剪试验,总结了该场地砂土不同试验尺度下剪切指标的变化规律。

1 研究区概况

1.1 地质概况

基坑整体呈长条状开挖,基坑平面尺寸为 4 m×110 m。根据钻探资料及室内土工试验结果,按地层沉积年代、成因类型,基底以上范围内的土层划分为人工堆积层、第四纪全新世新近沉积层、第四纪沉积层 3 大类。试验场地 0.0~1.1 m 为填土层,1.1~2.4 m 为粉质黏土层,2.4~5.0 m 为粉砂层。原位直剪试验在粉砂层中进行,试验深度范围内无地下水分布(见图 1)。

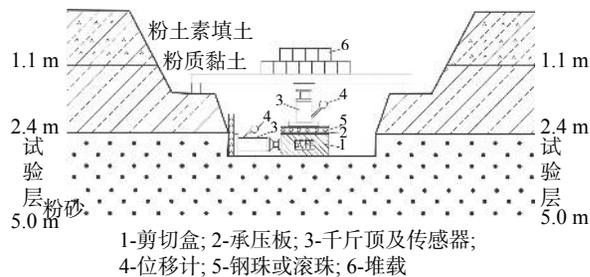


图 1 原位直剪试验布置及工程地质剖面示意图

根据勘察报告,粉砂层褐黄色,标准贯入试验 N 值为 16~25,中密状态,含水量为 4.5%~10.1%,黏粒含量在 1.5%~3.8%,为确保测试结果能够反映出粉砂地层的固有特性,同时考虑施工条件,最终确定试样样底深度为 3.00 m,样高为 120 mm。

1.2 试验布置

如图 1、图 2 所示,试验仪器由剪切盒、承压板、垂向及水平向液压千斤顶、传感器、位移计(精度 0.01 mm)等设备组成。仪器安装前对传感器、位移计、应变仪、千斤顶等仪器设备进行了校验、标定,确保试验过程中仪器性能稳定,运行正常。



图 2 原位直剪试验仪器布置图

为了保证试验数据的可统计性和可参照性,试样分为 3 个平行试验组,每组试验含 3 个试样。基槽开挖至 3 m 处,平行于基槽长边方向等间距布设 9 个原位直剪试样,试样尺寸为 0.31 m(长)×0.31 m(高)×0.12 m(宽),为减少对相邻试样的扰动影响,试样间距大于 1 m。试样制备见图 3。



图 3 试样制备

1.3 试验步骤

(1)于试样顶面均匀缓慢施加竖向荷载,缓慢加载至 100 kPa。施加竖向荷载后,记录下变形值。

(2)于试样剪切面中心施加切向剪切荷载,用千斤顶均匀地连续分级施加,每级加载 10 kPa,待水平变形基本稳定后,记录下变形值,再加下一级剪切荷载。当剪切变形急剧增长或剪切变形达到试体尺寸的 1/10 时,终止试验。在施加切向剪应力过程中,保持竖向荷载不变。

(3)取试验土样做含水率试验。

(4)将竖向荷载分别设置为 200 kPa、300 kPa,进行另外 2 级剪切试验。

2 试验结果整理

2.1 剪切面破坏形态

砂样剪切破坏面主要是由于试样中粗颗粒间胶结物达到剪切强度极限,胶结物发生拉伸、剪切破坏而形成,相比于黏性土、砂卵石层,其剪切破坏面表面形态起伏相对较小^[9]。本试验对试样分级施压破

坏后,可看到砂土试样剪切破坏面的基本形态也符合此规律(见图4)。



图4 试样剪切破坏面

2.2 原位剪切试验成果

根据1#—9#试样施加的竖向压力数值及试验测出的抗剪强度数值,绘制不同竖向压力下剪应力与剪切位移的关系图(见图5)。

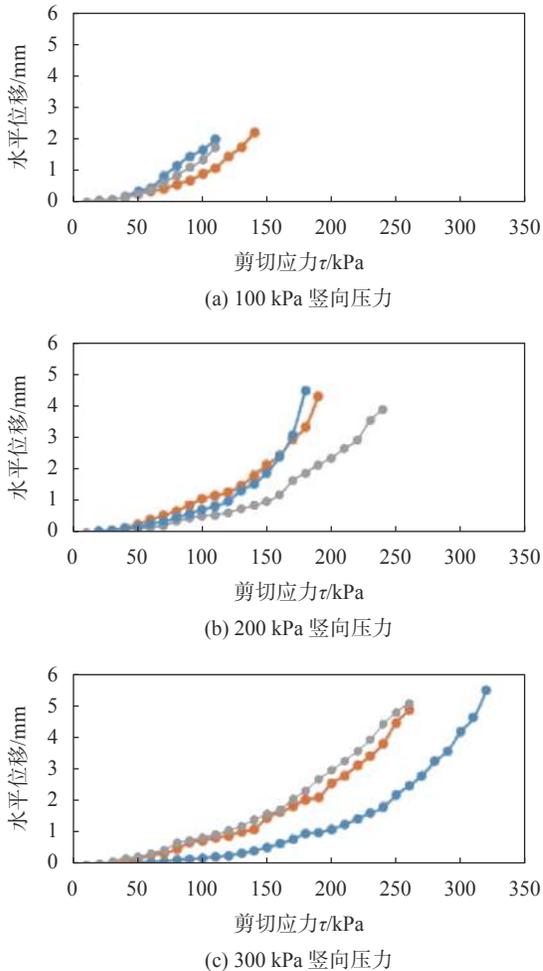


图5 不同竖向压力下剪应力与剪切位移的关系

由不同竖向压力下剪应力与剪切位移的关系可知,在本次砂土剪切试验中,各曲线并未有明显的剪切荷载峰值强度,因此本次研究选择将各曲线上的水平位移突变点作为剪切临界强度,将不同竖向压力下

的剪切应力与剪切位移进行分类统计(见图5),9个试样的原位直剪强度如表1所示。

表1 不同竖向压力下剪切临界强度

竖向压力/kPa	剪切临界强度/kPa		
	第一组	第二组	第三组
100	60	75	70
200	150	130	120
300	180	190	200

依据莫尔-库仑强度理论,采用最小二乘法对剪切临界强度和竖向压力等数据进行拟合处理,计算公式如下:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力, kPa; σ 为竖向应力, kPa; φ 为内摩擦角, ($^{\circ}$); c 为黏聚力, kPa。

由原位直剪试验剪应力与竖向压力拟合曲线得到本场地粉砂层莫尔-库仑强度公式 $\tau=0.6036\sigma+9.5$, 即黏聚力 $c=9.5$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=31.11^{\circ}$ (见图6)。

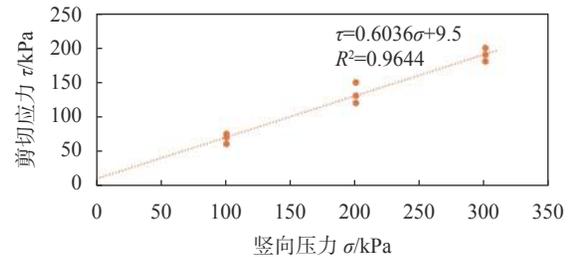


图6 原位直剪试验剪应力与竖向压力关系曲线

2.3 不同试验抗剪强度指标对比

为了更好地验证不同试验尺度下砂土剪切指标的差异性,在进行原位直剪试验的同时,使用YXTH50型内环刀取砂器(见图7)在该层粉砂中采取了8组原状砂样(见图8)进行室内直接快剪试验,试验采用AZJ-4型全自动四联直剪仪进行快剪。为消除剪力仪的系统误差,所有试样均在同一台剪力仪上进行。



图7 YXTH50型内环刀取砂器



图8 原状砂样采取

将该粉砂层剪切强度指标地区经验值、室内剪切试验指标与原位剪切试验指标进行对比,其结果如表2所示。

表2 不同试验剪切强度指标对比表

指标来源	平均值	
	内摩擦角 $\phi/(\circ)$	黏聚力 c/kPa
原位直剪试验	31.11	9.5
室内直接快剪试验	26.50 ~ 30.20	4.8 ~ 7.5
地区经验值	25 ~ 28	0

注:北京地区经验值综合参考研究区附近的勘察成果得出。

由表2可知,研究区粉砂层原位直剪试验所得内摩擦角最高,相比于地区经验值和室内直接快剪试验指标分别提高了11.11%~24.4%、3.01%~17.40%;在传统经验中,一般黏聚力直接赋“0”值,但原位直剪试验和室内直接快剪试验均测出了非零黏聚力,且原位试验值(9.5 kPa)高于室内试验指标(4.8~7.5 kPa)。

2.4 试验结果分析

关于砂土产生黏聚力的原因,有研究认为黏聚力与黏粒含量、干密度、含水率等物理参数相关,并通过公式拟合了黏聚力与上述参数的相关性^[10-11]。从微观角度,黏聚力与组成颗粒之间的各种物理化学力有关,如双电层排斥力、范德华力、库仑力等。

现场剪切试验与室内剪切试验结果产生差值的原因,主要可以归结于试样结构性扰动和尺寸效应。室内试验的样品在钻探→取样→包装→运输→保管→制样→试验的过程中,试样结构会受到扰动,一定程度上造成了强度的降低;另外,室内试样尺寸较小,一定程度上影响了试验结果。

3 结论

(1)研究区粉砂层在含水量为4.5%~10.1%、黏粒含量为1.5%~3.8%的情况下,现场原位剪切试验获得内摩擦角为31.11°,黏聚力为9.5 kPa,均高于传统地区经验值和室内直接快剪试验指标。

(2)在北京富砂地区开展勘察工作时,可进行一定数量的砂层原位直剪试验,以试验数据做支撑开展设计工作,节约工程造价,推动绿色建筑。

(3)本文研究对象为非饱和粉砂层,研究结果也仅代表非饱和粉砂层,细砂、中砂、粗砂等地层还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 雷胜友. 毛细水对潮湿粉细砂强度影响的理论分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(5): 1-6.
- [2] 林鸿州, 李广信, 于玉贞, 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1931-1938.
- [3] 赵延林, 吴 昊, 丁志刚. 非饱和砂土似黏聚力影响因素的实验研究[J]. 黑龙江科技学院学报, 2021, 31(3): 384-388.
- [4] 刘 伍. 某地新近沉积砂卵石地层现场直接剪切试验成果分析及探讨[J]. 土木工程, 2014, 3(4): 128-139.
- [5] 赵 兵, 黄 荣. 成都地区砂卵石的抗剪强度探讨[J]. 价值工程, 2011, (18): 60-61.
- [6] 李静荣, 赵占仓, 曾令浓, 等. 花岗岩残积土抗剪强度指标取值影响的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(2): 484-492.
- [7] 赵德安, 王 旭, 陈志敏, 等. 黄河二级阶地洪积碎石土原位直剪试验[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(4): 22-26.
- [8] 谭海晖, 杨 涟, 米德才, 等. 南宁市粉细砂层抗剪强度参数取值研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(5): 140-143, 234.
- [9] 丁自伟, 钱 坤. 基于原位直剪试验的岩土体力学特性研究[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(1): 32-37.
- [10] 张向营, 周玉凤, 杨浩军, 等. 某场地砂土标贯试验N值与剪切指标相关性分析[J]. 土工基础, 2022, 36(2): 265-268.
- [11] 沈 振, 屈鹏飞, 孟轲荆, 等. 旁压试验和标准贯入试验与砂土变形模量的相关性[J]. 岩土工程技术, 2021, 35(6): 416-419.

收稿日期: 2023-01-13