



广州港南沙港区深厚层软土原位测试方法

刘自闯, 唐群艳

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 广州南沙港区作为广州市重点发展的深水港, 其港区内广泛分布深厚软土层, 局部软土深度超过 30 m。港区内软土层特征主要受两次大规模海侵、海退及珠江水系的影响。上层软土主要由淤泥组成, 厚度约 10~20 m, 夹粉细砂薄层或条带状砂层; 下层软土主要由淤泥质土组成, 含有机质及腐木碎, 厚度约 4~8 m。软土参数是影响南沙港区工程建设的重要指标, 采用原位测试不易受到影响, 可准确呈现软土的力学性质。通过对比分析各种常用的原位测试方法, 提出适用于南沙港区深厚软土层的原位测试方法。在工程实践中分别采用不同的原位测试方法获取工程参数, 尤其采用不同规格的十字板板头进行十字板剪切试验, 旨在为区域内同类软土勘察、设计及施工提供参考。

关键词: 南沙港区; 深厚层软土; 静力触探试验; 十字板剪切试验; 十字板头规格

中图分类号: TU192; U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0317-06

In-situ testing methods for deep soft clay in Nansha Port area of Guangzhou Port

LIU Zichuang, TANG Qunyan

(CCCC FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: As a key deep-water port for the development of Guangzhou, Nansha Port Area in Guangzhou has revealed the widespread distribution of deep soft clay in the area, with local soft soil depths exceeding 30 meters. The characteristics of soft clay in the area are mainly affected by two large-scale transgressions, regression and the Pearl River water system. The upper soft clay is mainly composed of silt, with a thickness of 10 to 20 meters, mixed with thin layers of fine sand or strip-shaped sandy layers. The lower soft soil is mainly composed of silty soil, containing organic matter and decomposed wood fragments, with a thickness of 4 to 8 meters. Soft clay parameters are important indicators that affect the construction of engineering in Nansha Port area. Using in situ test might be affected is less and can accurately present the mechanical properties of soft clay. By comparing and analyzing various commonly used in-situ test methods, suitable in-situ test methods for deep clay in Nansha Port area are proposed. In engineering practice, different in-situ test methods are used to obtain engineering parameters, especially for the vane shear test, aiming to provide reference for similar soft clay investigation, design, and construction in the region.

Keywords: Nansha Port area; deep soft clay; static penetration test; vane shear test; type of vane

广州港南沙港区地处珠江出海口和珠江三角洲地区中心地带^[1](图1), 位于珠江口伶仃洋喇叭湾湾顶、龙穴南水道以东。港区属河口三角洲地貌, 地形平坦, 软土分布广泛且厚度大。软土的天然孔隙比 ≥ 1.0 , 且天然含水率大于液限的细粒

土, 包括淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土等^[2-3], 具有触变性和流变性、压缩性高、强度低、透水性差及不均匀性等, 是地基承载力不足和地基沉降的原因, 导致构筑物变形、开裂、管道拉裂、增加造价等, 制约南沙港区的工程建设。

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 刘自闯 (1984—), 男, 高级工程师, 从事岩土工程勘察工作。



图1 广州港南沙港区位置

通过收集广州南沙港区近20年来大量深厚层软土的原位测试资料,与对应软土层的室内试验参数进行比较,对比各种原位测试方法结果,研究不同试验方法对软土参数的影响,以提高南沙港区深厚层软土勘察质量,积累和完善南沙港区勘察数据库资料,为南沙港区软土勘察方法、原位测试参数取值及工程数据提供参考。

1 南沙港区软土特性

1.1 软土成因

珠江三角洲软土的形成与沉积环境的演变,主要受制于海面的升降变化以及引起的海岸线变

迁,距今最近的2次大规模海侵(分别距今3.0万~2.2万a、1.2万~0.6万a)和期间1次大规模的海退,导致新、老两套三角洲沉积的形成^[4]。港区所在位置水系发达、河网密集、汉道繁多,沉积环境复杂,软土层沉积特征主要受2次大规模海侵、海退以及珠江水系的影响。

1.2 分布特征

南沙港区原属滨海浅滩,水深自西北向东南逐渐加深,水深为1~6m,港区通过围堤、疏浚回填形成陆域,主要由2层软土组成,表层为3~6m的人工回填层。距今最近的大规模海侵期间经沉积而成的10~20m厚的淤泥等上层软土分布在回填层下,含腐殖质及间夹粉细砂薄层,底部含有明显的贝壳及蚝壳碎;下层软土为前一次海侵的沉积物,一般为厚4~8m的淤泥质土层,局部含腐木碎;两层软土之间为陆相沉积影响而成的黏土-粉质黏土、砂层,含有较多的胶结碎块,黏土-粉质黏土呈花斑状。南沙港区典型地质剖面见图2。

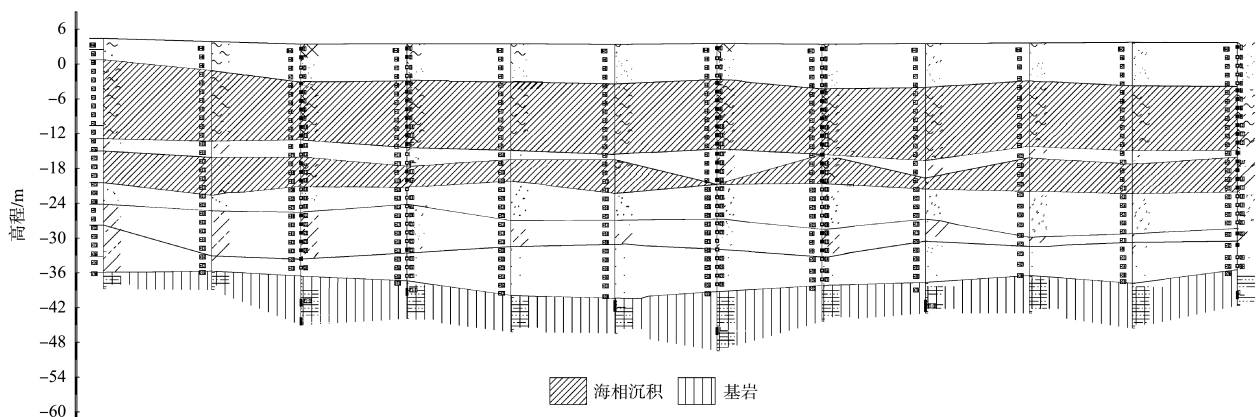


图2 典型地质剖面

1.3 工程特性

南沙港区域内软土普遍具有含水率高、孔隙比大、抗剪强度低、压缩性高、渗透性弱等特点^[5]。

上层软土主要由淤泥组成,局部为淤泥质土,含腐殖质,受到潮汐及水系等多重影响,其沉积

环境复杂,多次勘察揭示其夹杂透镜体或条带状砂层。软土层间夹杂薄层粉细砂,其中上层软土夹粉细砂剖切面见图3。

下层软土主要由淤泥质土组成,含有机质,局部含腐木碎。下层软土层间夹杂有机质及腐木碎,其中含腐木碎剖切面见图4。

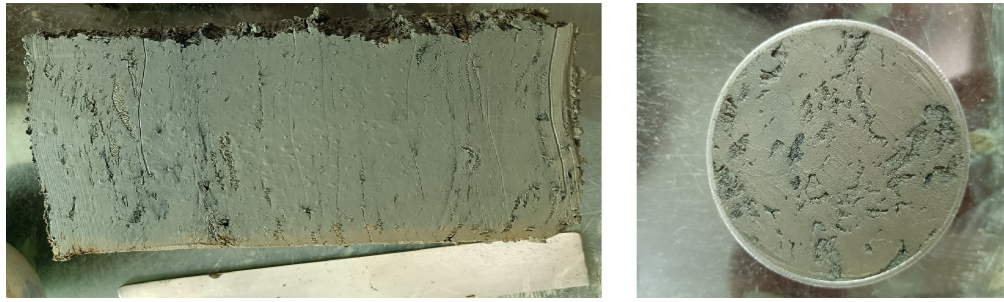


图3 上层软土夹粉细砂剖面



图4 下层软土含腐木碎剖面

2 软土原位测试方法

JTS 133—2013《水运工程岩土勘察规范》^[6]及 JGJ 83—2011《软土地区岩土工程勘察规程》^[7]规定了软土的原位测试方法,包括静力触探、标准贯入试验、十字板剪切试验、载荷试验、旁压试验、扁铲侧胀试验和波速测试等。

各种原位测试原理及方法有所差异,适用场景也不同,可获得不同的岩土参数。对于南沙港区内深厚层软土,应根据软土层分布特征及工程需要,选用适宜的原位测试方法。

2.1 静力触探

静力触探试验是用静力将探头以一定的速率压入土中,通过探头内的传感器测算软土的锥尖阻力(q_c)、侧壁摩阻力(f_s)以及孔隙水压力(u)的试验方法,可选用海床式、固定式、井下式或浮动式静力触探测试方式^[8]。

根据南沙港区水深(地形)、风、浪、流及海床(陆地)基底性质,一般选择海床式及固定式静力触探测试方法,试验过程需充分考虑穿透两层软土中间含胶结层的陆相沉积层,必要时需引孔作业。

利用静力触探经济便捷,地层分层连续可见,可以测得孔隙水压力等参数。试验需充分考虑穿

透硬夹层的难度,进入持力层深度有限,无法取得样品进行室内分析,应与钻探、取样、室内试验等勘察方法配合。

2.2 标准贯入试验

标准贯入试验适用于砂土、粉土和一般黏性土。对于港区内强度低的软土,试验精度降低,标准贯入试验更适合定性分析,在定量分析方面远差于静力触探和十字板等原位测试方法。

南沙港区某样本上层软土的标贯击数平均值为0.6,为夹粉细砂层,变异系数较大;下层软土的标贯击数平均值为4.7,局部含腐木碎,存在较大的异常值,变异系数相对较小(表1)。在软土层中进行标贯试验,可定性分析软土的类型,获取的参数精度不高。

表1 南沙港区上、下2层软土标准贯入试验数据

土层	样本/个	最大贯入 击数/击	最小贯入 击数/击	平均值/ 击	变异 系数	备注
上层软土	4 533	4	0	0.6	1.60	夹粉细砂
下层软土	632	8	2	4.7	0.34	含腐木碎

2.3 十字板剪切试验

十字板剪切试验是一种使用方便的原位测试方法,将插入土中的标准十字板探头以一定速率扭转,量测土破坏时的抵抗力矩,测定土的不排

水抗剪强度和残余抗剪强度,用于测定饱和软黏土的不排水抗剪强度和灵敏度。

南沙港区陆域常采用固定式试验方法,方便快捷。水上作业易受到波浪、潮汐、水流等因素的影响,对设备及工艺的要求高。十字板剪切试验特别适用于均匀的饱和软黏土,测得的强度往往高于室内试验强度。

2.4 波速测试

波速测试是根据测得的剪切波速进行土的类型划分及场地类别判定。采用波速测试可以丰富勘察手段,提高测试效率(可充分利用窗口期),减小室内测试误差,其测试成果为定性数据,需结合其他勘察资料综合分析。

2.5 其他原位测试

浅层平板载荷试验也适宜于软土层的原位测试,即测定浅层地基承压板下1.5~2.0倍承压板的宽度或直径深度的承载力和变形模量。在成孔良好的钻孔内进行旁压试验,可获得软土的旁压模量和静止侧压力系数。扁铲侧胀试验可准确反映小应变的应力-应变关系,测试的重复性较好,最适用于软弱、松散土,但配合其他测试方法相互验证^[9]。钻孔剪切试验操作简便、可重复性高。资料表明钻孔剪切试验的结果非常接近于固结不排水剪切参数。

3 工程实例

3.1 工程概况

广州南沙港区拟在勘探区域建设水工建筑物、围堰、陆域形成、建筑及港池航道,其中包括:4个泊位的集装箱泊位、8个内河驳船泊位及其堆场、附属构筑物等工程。

3.2 地层特性

探区位于珠江三角洲河口湾河海交汇处,其基底为下古生界中深变质区域的变质岩,局部揭示有第3纪的泥质粉砂岩-砂岩,其上覆盖着第4纪不同时期不同成因形成的地层。工程区域内地层复杂,由海进海退时交替沉积而成,下覆沉积岩及变质

岩。上部人工填土层下为上层软土,广泛连续分布,平均厚度17.05 m(2.00~27.40 m);下层软土连续分布,平均厚度4.47 m(0.30~17.20 m);陆相沉积层夹杂在上下两层软土之间,具有较好工程性质;底部为基岩风化层。

3.3 基础类型及地基处理

分布连续、厚度大且物理力学性质较好的地层埋藏较深,因此荷载较大的构筑物宜选用桩基础,需考虑上部大面积厚层软土对其结构的影响;围堰及陆域形成区适宜采用浅基础,对不满足工程要求的软土层进行地基处理,可以采用选换填、预压等处理方式。

3.4 深厚软土的影响

深厚层软土工程性质差,需进行工程处理,以满足功能需求,工程造价高,经济性差。软土具有流变性,超过其最大荷载后,强度急剧下降,甚至由固态转换为液态。桩基穿透深厚层软土时,高灵敏性软土可能沿桩身向上溢出,其孔隙水压力变化使地面产生裂缝,影响桩基的稳定性,产生桩周土侧向位移及地面隆起等危害。打桩时软土层抗剪强度减小,尤其是夹薄层粉细砂的厚层软土。高压缩性软土因填土或荷载增加,引起负摩阻力造成危害。后续使用过程中,因超载引起局部沉降,影响使用功能等。

3.5 深厚软土原位测试

3.5.1 标准贯入试验

标准贯入试验操作方便,对作业环境要求低,可以利用钻探设备在钻孔中同步进行,并有效结合取土试样进行室内土工试验,但其成果只能对软土定性分析。试验过程中操作不当,容易超深,破坏软土样品质量。通常可用于软土层空间分布规律的划分,并可快捷查明软土中夹的砂层或硬层等。

3.5.2 静力触探试验

采用固定式静力触探设备进行原位测试,采用带孔隙水压力量测的双桥探头进行试验,试验最大深度28 m。其操作便捷,经济可行,取得数

据量大, 分层连续可见, 精度高, 对于夹薄层砂层可直观显示以及定量测得孔隙水压力。试验过程中需要选择适当的反力, 对下层的软土进行清孔, 并对探头穿透硬层再进入软层进行工艺处理, 需结合其他勘察方法共同使用。软土静力触探试验指标见表 2。

表 2 软土静力触探试验指标

土层	样本位置/m	样本数/个	锥尖阻力 q_c		孔隙水压力 u	
			平均值/MPa	变异系数	平均值/kPa	变异系数
上层软土	0~<5	2 589	0.10	0.30	16.72	2.69
	5~<10	2 608	0.27	0.33	105.41	0.44
	10~<15	2 128	0.39	0.13	214.00	0.33
	15~20	1 391	0.50	0.12	321.92	0.27
	>20	763	0.68	0.10	374.89	0.36
下层软土	15~20	1 878	0.52	0.21	330.41	0.35
	>20	1 458	0.60	0.12	409.67	0.35

3.5.3 十字板试验

采用固定在套管上的电测十字板进行试验, 采用 I 型(高 100 mm、宽 50 mm、厚 2 mm)及 II 型(高 150 mm、宽 75 mm、厚 3 mm)十字板头进行试验。十字板剪切试验不仅可以获取饱和软土的不排水剪的抗剪强度, 还可以测残余抗剪强度, 定量评价其灵敏度, 定性分析和评价其触变性。不排水抗剪强度随深度逐渐增加, 大致呈线性关系, 见图 5。

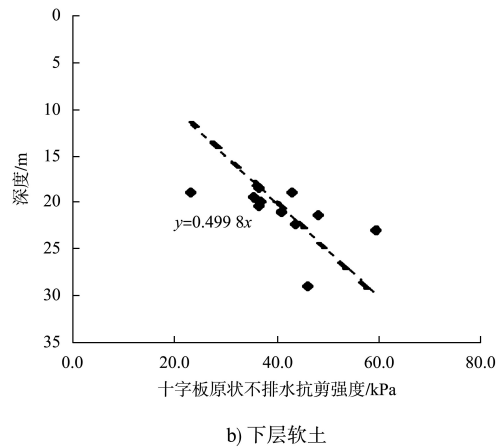
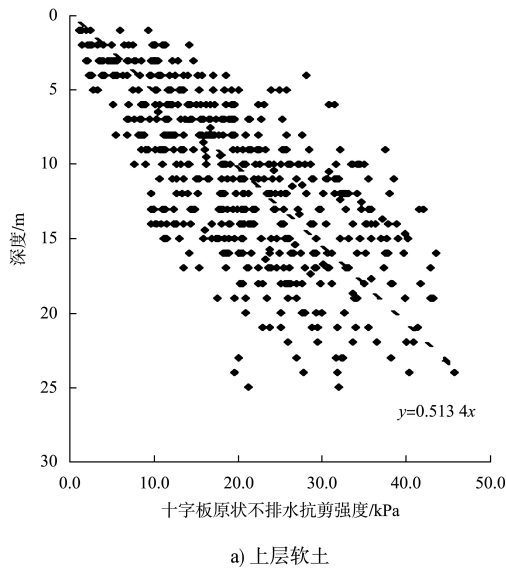


图 5 上下两层软土不排水抗剪强度-深度关系

南沙港区上层软土普遍夹薄层粉细砂, 利用 II 型十字板头进行试验, 极易超过现有十字板测试量程, 其适用范围一般不超过 15 m, 随着土层埋深的增加, 其试验效果变差。更换为 I 型十字板头试验, 适用性增加, 但其重塑强度有所提高, 软土的灵敏度指标降低。下层软土具有一定的强度, II 型十字板头适用性差, 只能用 I 型十字板头进行测试。

采用两种类型十字板板头试验的软土原状强度差别很小, 但重塑强度存在差异, I 型十字板头强度大于 II 型软土的灵敏度降低(表 3)。I 型十字板板头试验显示软土的重塑强度偏大、灵敏度偏小, 主要原因可能是由于上层软土夹薄层细砂影响了强度的恢复时间, 具体还应结合其他勘察手段综合分析。

表 3 软土十字板试验指标

土层	样本位置/m	样本/个	原状强度 C_u /kPa	重塑强度 C'_u /kPa	灵敏度
上层软土	0~<5	78	7.9	4.2	2.11
	5~<10	146	16.1	7.6	2.30
	10~<15 (I型十字板头)	164	22.0	9.6	2.44
	15~20	93	27.9	11.7	2.57
	>20	29	29.7	11.8	2.65
上层软土 (II型十字板头)	0~<5	16	7.9	2.9	3.08
	5~<10	17	15.7	5.0	3.62
	10~<15	10	21.1	6.1	3.86
	15~20	3	25.5	5.3	4.90*
下层软土 (I型十字板头)	全层	11	36.1	13.1	2.81

注：“*”为异常情况。

3.5.4 波速测试

在构筑物附近利用现有钻孔进行剪切波波速测试,用于划分软土的类型,为场地类别判定提供依据,提高划分软土震陷范围的精度等。波速测试可提供定性分析依据,但是深厚软土易埋孔,需考虑护壁措施,减少对试验的影响。

4 结语

1) 南沙港区位于珠江出海口和珠三角地区中心地带,软土层沉积特征主要受距今最近的2次大规模海侵、海退与珠江水系的影响,表现为厚度大、界限分明的上/下层软土以及上层软土受珠江水系的影响夹薄层粉细砂。勘察实践揭示上层软土与下层软土存在明显的工程性质差异。

2) 应用于南沙港区深厚层软土勘察的原位测试主要有静力触探、标准贯入试验、十字板剪切试验、波速测试等方法。

3) 十字板试验分为2种标准型板头,测得的原状强度差别很小。I型十字板头重塑强度大于II型,采用II型十字板头的重塑强度及灵敏度更接近室内试验。若采用I型十字板头的重塑强度及灵敏度时,应结合其他勘测手段综合。

4) 由于水域作业条件的影响,传统十字板剪切试验设备的测试结果受工艺影响较大,难以满足精细化、高效化的需要,改进工艺有助于优化软土参数,降低工程造价等,如采用海床式十字板剪切试验仪^[10]、搭设水上作业平台等方式。

5) 标准贯入试验定性判别软土性质,在钻孔周边约1~2 m进行十字板剪切试验,获取软土参数,对于上层软土应采用II型十字板头试验,下层软土宜利用I型十字板头试验。对于已查明软土参数的区域,宜采用静力触探试验结合钻探手段,提高效率。

6) 南沙港区深厚层软土原位测试方法简单有效,但钻孔剪切试验、旁压试验、载荷板试验应用较少,尤其是扁铲侧胀试验,可准确反映小应变的应力-应变关系,测试的重复性较好,最适宜在软弱、松散土中进行,后续应加强对其研究,积累经验,有效降低建设成本。

参考文献:

- [1] 广州港,竟然不全在广州?! [EB/OL]. 广东交通. (2023-05-23) [2023-05-24]. https://td.gd.gov.cn/dtxw_n/tpxw/content/post_4185819.html.
- [2] 建设综合勘察研究设计院. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001(2009年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [3] 化建新, 郑建国. 工程地质手册 [M]. 5版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [4] 周晖. 珠江三角洲软土分布特征及成因的地质与水文环境分析 [J]. 广东土木与建筑, 2014, 21(7): 35-38.
- [5] 刘伟, 陈凌伟, 张庆华, 等. 广州南沙区软土分布特征及工程性质 [J]. 长江科学院院报, 2022, 39(1): 94-99.
- [6] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 长江航道规划设计研究院. 水运工程岩土勘察规范: JTS 133—2013 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [7] 中国建筑科学研究院. 软土地区岩土工程勘察规程: JGJ 83—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [8] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 东南大学. 水运工程静力触探技术规程: JTS/T 242—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [9] 建设综合勘察研究设计院. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001(2009年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [10] 梁文成, 王兴乐, 祝刘文, 等. 海床式十字板剪切试验和静力触探试验两用仪的研制与验证 [J]. 地质装备, 2020, 21(4): 19-23.

(本文编辑 赵娟)