

盐田港东作业区软土特性及 地基处理方案比选*

赵树光, 杨秋芳

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对大型填海造地项目软土成因、分布复杂, 其物理力学性质对地基处理方案影响重大的难点。以盐田港东作业区为例, 对项目大量地基处理前后的原位测试、土工试验资料、深圳地区经验进行研究和 technical 分析, 总结该区域的软土层的物理力学和分布特征。结果表明: 堆载预压处理后淤泥质软土层分布很少, 前期的淤泥质土已变为粉质黏土, 力学性质明显改善。针对部分软土缺乏剪切指标的问题, 提出参考地区经验和原位测试值等建议值。根据不同地基处理方案的比选, 提出吹填淤泥预压加固中应注意断带等问题, 得出预压处理后可采用强夯法或强夯置换法等处理方案, 地基加固效果良好。可为类似填海造地工程物理力学参数的确定和地基处理方案的选择提供指导意见。

关键词: 软土; 淤泥; 物理力学特征; 地基处理

中图分类号: U655.54+4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0145-07

Soft soil characteristics and comparison of foundation treatment schemes in east operation area of Yantian Port

ZHAO Shuguang, YANG Qiufang

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The complex formation and distribution of soft soil in large-scale land reclamation projects pose significant challenges in terms of its physical and mechanical properties, which have a significant impact on the foundation treatment plan. Taking the east operation area of Yantian Port as an example, a large amount of in-situ testing, geotechnical test data before and after foundation treatment, as well as experience in the Shenzhen area, are studied and technically analyzed. The physical mechanics and distribution characteristics of the soft soil layer in the area are summarized. The results show that after preloading treatment, the distribution of the silty soft soil layer is very small, and the early silty soil has become silty clay, with significantly improved mechanical properties. In response to the lack of shear indicators in some soft soils, recommendations are proposed based on regional experience and in-situ test values. Based on the comparative analysis of different foundation treatment schemes, it is proposed that attention should be paid to issues such as broken zones in the preloading reinforcement of hydraulic fill silt. It is concluded that after preloading treatment, dynamic compaction method or dynamic compaction replacement method can be used as treatment schemes, and the foundation reinforcement effect is good. It can provide guidance for determining the physical and mechanical parameters of similar land reclamation projects and selecting foundation treatment plans.

Keywords: soft soil; silt; physical and mechanical characteristics; foundation treatment

收稿日期: 2024-09-27

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB2604200)

作者简介: 赵树光 (1982—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事岩土工程勘察设计工作。

深圳港盐田港东作业区位于已建盐田港东作业区规划的中段岸线，东作业区一期工程岸线中作业区三期扩建工程东侧岸线平行。中、东作业区间通过拟建的中东大桥连接贯通。本区海底地貌呈港湾内堆积平原，具有滩槽相间的特点，槽与滩高差不大，水下岸坡平缓，低潮时滩地干出，属潮间带范围。陆地地貌类型为海积台地，其上覆土层为第四系全新统至晚更新统松散堆积层，主要为淤泥质土、砂性土和黏性土，其中淤泥质土具有含水率高、压缩性高、孔隙比大、灵敏度高、稳定性极差等特点，地基承载力低，为拟建工程的主要特殊性地基土层，有必要对其物理力学特征进行研究，为后续地基处理提供可靠依据。通过分析该区域大量地基处理前后的原位测试、土工试验资料并结合深圳地区经验，总结该区域软土层的物理力学和分布特征，提出部分重要力学指标的选取建议，对地基处理方案进行比选，推荐合理的处理方案，旨在为类似填海造地工程物理力学参数的选取和地基处理方案的选

择提供指导意见。

1 区域地质及软土地质时代

根据深圳地貌区划^[1]，从构造地貌而言，深圳市可分为3个地貌带，南带为半岛海湾、中带为海岸山脉、北带为丘陵谷地，后两者以深圳断裂为界。深圳断裂对本区地质、地貌的演变过程起着支配作用，本区属于海岸山脉地貌带的东部沿海山地区域。

项目位于大鹏湾的西北侧。大鹏湾是晚第三纪夷平面抬升过程中断裂沉降所成，为断陷海湾，其底部东高西低，东岸平直、西岸曲折多湾。大鹏湾湾口宽约10 km，湾中有湾，大鹏湾内有大梅沙湾、小梅沙湾、沙头角湾等；湾外有岛，如大鹏半岛外侧的大、小三门岛、喜洲岛、中央列岛等，大鹏湾内有平洲岛等。大鹏湾水下岸坡的坡度为2°~3°，呈山地海岸特征，属于港湾山地海岸，其地貌特点是湾口有岬角拱卫，海湾掩护条件良好，既是防台避风的良好港湾，又为建港提供了良好的地貌条件。场地位置见图1。



图1 盐田港东作业区地理位置

Fig. 1 Geographical location in east operation area of Yantian Port

全新世初期大鹏湾海面回升，本区沿海堆积了一套厚粗粒碎屑沉积物，至大西洋期，海面迅速上升，沿海地区堆积比较旺盛，堆积了较厚含海生贝壳类残骸的细粒碎屑物质，形成了本区沿

海的滨海平原，塑造了大鹏湾的海崖山地海岸及港湾山地海岸。由于受来自陆域沉积物及海动力的共同作用，使得本区海陆相沉积层呈互层状或透镜体状。

拟建场地原始地貌单元属海积平原及浅滩地貌, 陆上已完成地基处理区域, 地面较平坦, 高程在 3.5~4.2 m, 未卸载区域地面高程在 8.2~11.3 m, 地基未处理区域由于弃土堆存, 高程起

伏较大。地形地貌的变化使软土层性质发生了变化。对深圳地区第四系地质及软土层按照成因、地质年龄等进行系统研究, 形成详细的分类, 并纳入当地规范中, 见表 1。

表 1 深圳地区软土地质时代
Tab. 1 Geology age of soft soil in Shenzhen area

地质时代		成因类型	地层序号	土层名称	土层特征	地质年龄/a	地貌单元
统	组						
-	-	Q ^{ml}	① ₁	人工填土	多数由黏土组成, 含石英角砾和风化岩块; 水力吹填土分吹砂或吹泥, 略有分选性; 个别地段为建筑垃圾或生活垃圾	近几十年	人工回填
-	-		① ₂	淤泥、黏性土、砂土	鱼塘围埂、砂坝, 旧居民建筑填土, 已完成自重固结		-
全新统	沙井组	海陆交互沉积 Q ₄ ^{mc}	③ ₁	淤泥	灰-灰黑色, 含淤泥及海洋生物遗骸; 饱和, 松散	(640±70) ~ (2 150±90)	河流出口、海积平原
			③ ₃	淤泥质黏性土	灰-深灰色, 含海洋生物遗骸和腐木		海积平原、冲积平原
	赤湾组	Q ₄ ²	海积 Q ₄ ^m	④ ₁	淤泥质黏性土或含淤泥粉细砂	浅黄-黄白色, 含蚝壳、贝壳碎片, 饱和, 松散-稍密	(2 350±90) ~ (3 860±110)

2 软土层的分布规律

2.1 堆载预压处理前软土层分布情况

工程陆域形成、地基处理总面积约 142 万 m², 根据各区域成陆的不同原因分成了 I~VII 号塘七大区域, 全部为规划的东港区集装箱码头后方陆域堆场区的一部分, 建成后将作为集装箱码头重箱堆场使用。V 号塘为吹填港池航道疏浚土形成陆域。VI、VII 号塘(面积约 29.6 万 m²)为海域, 需形成陆域和地基处理。从 2011 年开始场地地勘工作, 历经十余年回填、吹填、堆载预压等处理, 发生了多次演变。

以 V 号塘为例, 场地堆载预压前软土层分布情况为: 1) 吹填淤泥①₄: 灰黑色, 含有机质, 可见贝壳及蚝壳, 具腥臭味, 饱和, 流塑状, 上部有流泥, 由造陆吹填而成; 2) 流泥层③₁: 灰黑-灰色, 含大量有机质, 不均匀含少量粉砂及贝壳, 饱和, 流态, 呈粥状或似粥状, 具流动性, 手感黏糊, 干强度高, 韧性中等; 3) 淤泥层③₂: 浅灰-青灰色, 含少量贝壳及生物遗骸, 不均匀含

少量砂, 饱和, 流塑, 具有光泽, 摇振反应无, 干强度高, 韧性高; 4) 淤泥质中砂层③₃: 深灰、灰黑色, 含淤泥及大量贝壳, 饱和, 松散, 级配良好, 分选性差。

上述吹填淤泥、流泥、淤泥层及淤泥质砂层为场地软弱地层, 两者合计厚度变化情况和等厚度分布见表 2 和图 2。

软土层特征包括: 1) 场地被切割成不同的小区, 各区软土厚度、性质不均匀。如吹填淤泥仅见于 V 号塘区。吹填淤泥内夹杂大量贝壳, 土的抗剪强度差值较大, 淤泥中含贝壳, 十字板抗剪强度值偏大, 见图 3, 该层为中等灵敏-灵敏土层, 是重点关注的土层。2) 填海造陆区由于堆填成分复杂, 多无规律, 填筑历史不同, 使得人工填土(石、淤泥)层厚度不一, 局部抛石挤淤导致软土厚度变化大。3) 叠加厚度大, 最大超过 24 m, 存在较大的沉降风险。吹填淤泥、流泥土质极软采取原状土样难度大。土质极软, 施工过程中机械设备易沉陷。

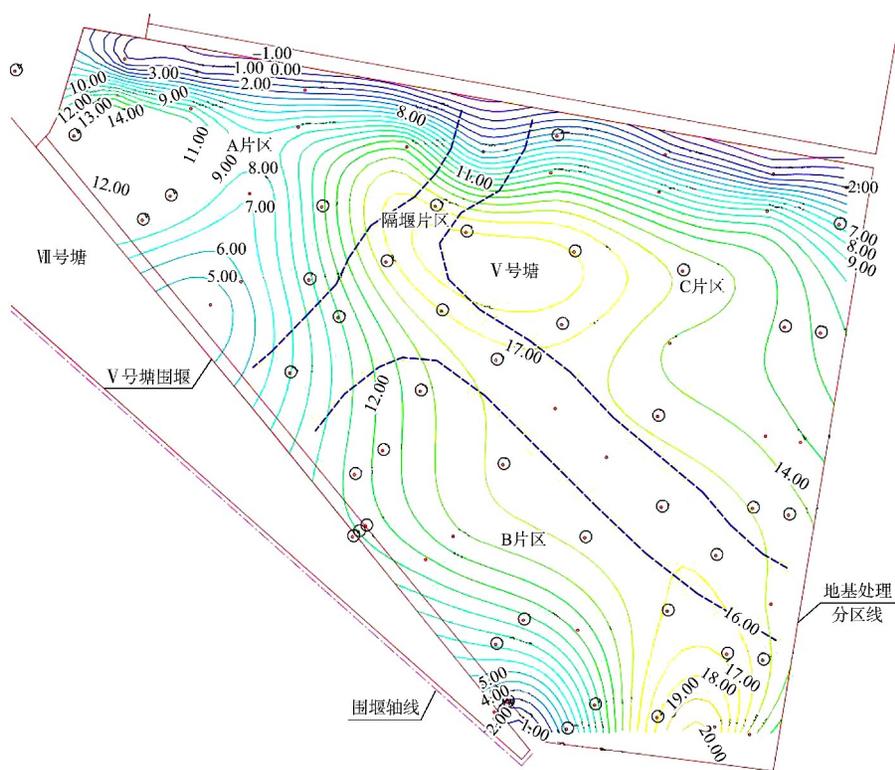


图 2 堆载预压前 V 号塘软土层等厚度分布 (单位: m)

Fig. 2 Equal thickness distribution of soft soil layer in pond No. 5 before preloading (unit: m)

表 2 V 号塘区软土分布规律

Tab. 2 Distribution law of soft soil in pond No. 5 area

分区	埋藏深度/m	层厚/m	顶板高程/m	底板高程/m
V 号塘区	A 片区	0.0~18.7	-8.53~3.42	-14.59~-7.19
	B 片区	0.0~21.8	-0.44~-0.14	-22.14~-15.14
	C 片区	0.0~20.0	3.2~17.8	-11.83~1.46
	隔堰片区	0.0~24.8	7.8~24.8	-0.54~2.21
V 号塘围堰区	19.5~28.0	1.9~3.5	-20.83~-15.44	-24.33~-18.66

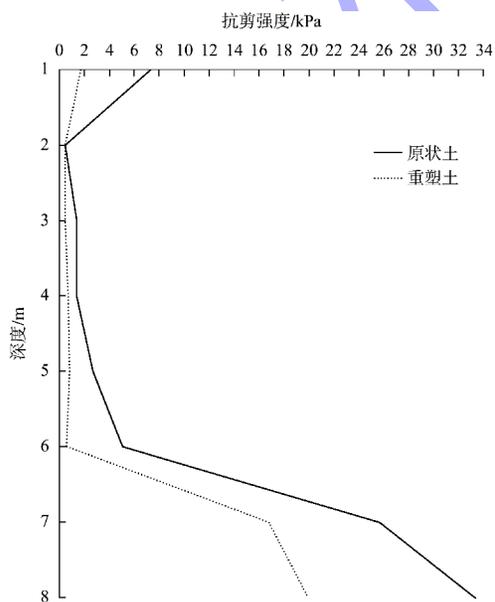


图 3 吹填淤泥典型十字板剪切试验成果

Fig. 3 Typical vane shear test results of dredged slurry

2.2 堆载预压处理后场地软土层情况

场地原为海域浅滩, 通过开山回填、吹填等方式逐渐成陆, 经过堆载预压处理后, 地层发生变化, 详勘阶段揭露的场地软土层分为 4 个单元体。

1) ①₀ 灰色流泥: 饱和, 流塑。土质不均匀, 切面光滑, 局部夹少量粉细砂、有机质及贝壳碎片。该层主要在海域钻孔揭露, 一般直接出露于海域表部, 层厚较薄, 一般为 0.3~8.4 m。标准贯入试验击数一般小于 1 击。

2) ①₅ 灰色粉质黏土: 饱和, 软塑。主要为前期陆域形成吹填, 后经地基处理形成。土质较均匀, 切面较光滑, 夹少量薄层或团块状粉砂, 局部切面光滑, 为淤泥质黏土或淤泥质粉质黏土;

局部混较多贝壳碎片, 高压缩性, 力学性质差。该层厚为 1.6~11.5 m。标准贯入试验击数为 4~9 击, 平均值为 6 击。

3) ②₁ 灰色淤泥: 饱和, 流塑。土质较均匀, 切面光滑, 局部夹少量粉细砂、有机质及贝壳碎片。该层在拟建码头区分布较广泛, 直接出露于海域表部, 层厚较薄, 一般为 1.4~7.1 m。标准贯入试验击数 ≤ 1 击。

4) ③₁ 灰色淤泥质粉质黏土: 饱和, 流塑。土质较均匀, 切面较光滑, 夹少量薄层或团块状粉砂, 局部切面光滑, 为淤泥质黏土; 局部混较多贝壳碎片, 高压缩性, 力学性质差。该层仅水

工码头有分布, 标准贯入试验击数一般为 2 击。

2.3 软土层力学性质对比

根据上述地层情况可知, 堆载预压处理后堆场范围内淤泥质软土层分布较少, 除少数海域分布淤泥质软土外, 前期的淤泥质土已变为粉质黏土, 物理力学性质明显改善。

为便于比较分析, 对场地地基处理前后的指标进行统计分析^[2-3], 场地预压处理后采取大量原状样, 共采取了超过 1 500 件原状样, 其中软土原状样超过 400 件, 获得的指标具有代表性。对于高含水量的流泥, 通过改进取样设备, 采取部分原状样品, 获得了一些常规的指标, 结果见表 3、4。

表 3 软土层物理力学指标 (预压处理前)

Tab. 3 Physical and mechanical indicators of soft soil layer (before pretreatment)

分层	固快		快剪		三轴 UU		三轴 CU		静探端阻力 q_c / MPa	小型十字板 c_u / kPa		
	黏聚力 c / kPa	摩擦角 φ / (°)	黏聚力 c / kPa	摩擦角 φ / (°)	黏聚力 c_u / kPa	摩擦角 φ_u / (°)	黏聚力 c_u / kPa	摩擦角 φ_u / (°)			黏聚力 c'_u / kPa	摩擦角 φ'_u / (°)
① ₄	5.3	0.2(2.5)	32.8(4.5)	2.1(1.5)	4.30	0.10	8.985	15.400	18.675	24.845	0.18	2.67
③ ₁	3.0	(2.0)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
③ ₂	13.8	12.7	4.5	0.4	27.00	2.30	13.280	19.670	13.290	29.590	-	4.67
③ ₃	-	-	-	-	8.76	0.72	-	-	-	-	-	-

分层	含水率 W / %	密度 ρ / (g·cm ⁻³)	孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	压缩模量 E_s / MPa	十字板 c_u / kPa	前期固结压力 P_c / kPa	压缩指数 C_c	回弹指数 C_s	无侧限抗压强度		
											原状 q_u / kPa	扰动 q'_u / kPa	灵敏度 S_t
① ₄	66.9	1.59	1.82	19.4	2.037	2.57	2.79	43.8	0.43	0.056	5.90	4.3	1.370
③ ₁	76.4	1.53	2.08	22.0	2.210	2.40	-	-	-	-	-	-	-
③ ₂	63.1	1.61	1.70	20.9	1.788	2.20	8.42	57.8	0.31	0.038	61.65	20.1	1.935
③ ₃	31.2	1.88	0.86	13.7	0.610	3.18	-	93.3	0.19	0.029	-	-	-

表 4 软土层物理力学指标 (预压处理后)

Tab. 4 Physical and mechanical indicators of soft soil layer (after pretreatment)

分层	含水率 W / %	密度 ρ / (g·cm ⁻³)	孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	压缩模量 E_s / MPa	十字板 C_u / kPa	前期固结压力 P_c / kPa	压缩指数 C_c	回弹指数 C_s	标贯 / 击
① ₀	95.1	1.480	2.470	22.70	2.72	-	5.5	-	-	-	<1
① ₅	37.0	1.832	1.069	17.72	0.81	3.43	-	133.8	0.319	-	4~6
② ₁	69.6	1.540	1.955	18.10	2.25	1.80	8.4	-	-	-	2~3
③ ₁	44.1	1.710	1.252	15.30	1.45	2.50	0	-	-	-	1~4

分层	固快		快剪		三轴 UU		三轴 CU	
	黏聚力 c / kPa	摩擦角 φ / (°)	黏聚力 c / kPa	摩擦角 φ / (°)	黏聚力 c_u / kPa	摩擦角 φ_u / (°)	黏聚力 c_u / kPa	摩擦角 φ_u / (°)
① ₀	4.50	4.0	3.5	2.5	-	-	-	-
① ₅	20.50	11.8	22.4	2.6	-	-	-	-
② ₁	4.60	4.8	-	-	11.5	0.0	18.1	15.4
③ ₁	12.10	12.1	13.1	4.6	24.7	0.0	-	-

由表 3、4 可知：堆载处理后场地吹填淤泥含水率从 66.9% 降为 37.0%，压缩模量从 2.56 MPa 上升为 3.4 MPa，标贯击数从小于 1 击上升为 4~6 击，可以看出吹填淤泥层性质明显改善。堆载预压处理前由于土层不均匀，土层取样较少，缺少代表性，部分快剪指标明显不合理，对于该层指标可参考地区经验和原位测试值等给出建议值。对深圳地区多个项目的资料进行分析整理归纳为深圳地区第四系地层物理力学性质指标经验值，并作为《深圳地区地基处理技术规范》的附件内容，本次获得的数据也可以作为补充。

3 软土特性

1) 该区域软土呈流塑状，具有含水率高、压缩性高、孔隙比大，灵敏度高、稳定性极差等特点，地基承载力低，可能产生负摩阻力和软土震陷作用。局部流泥含水量高达 75% 以上，由于土质极软，难以采取原状土样，未能获得其抗剪强度指标，为满足设计要求，结合深圳地区经验、原位测试数据、土层特征等提供了推荐值。

2) 深厚软土层极易导致工后沉降和次固结沉降，施工过程中要及时加强变形监测，避免加载速度过快。

3) 软土的分布极不均匀，易引起不均匀沉降。

4 地基处理方案比选

深圳分布着广泛的海相或海陆交互相沉积的软土层^[4-5]，通过前海湾填海区、已建盐田二期、三期、宝安国际机场等项目，积累了丰富的地基处理经验。深圳地区较常用的方法^[6-8]包括：预压法、抛石挤淤或爆破排淤填石法、强夯法、水泥土搅拌法。各类方法均有其优缺点。

预压法适合处理深厚淤泥质软土层，适用性广，适合大面积地基处理，有利于控制工后沉降，且成本相对较低，但其工期较长，对于吹填淤泥往往不含砂土夹层，不利于排水，需施打砂桩或塑料排水板作为排水通道，真空预压对密封要求高，且预压处理深度有限。

抛石挤淤或爆破排淤填石法施工相对较快，适合分区围堰或围堤的施工，但往往原材料受限制。

强夯法适用于碎石土或填土，施工速度较快，但对工艺要求相对较高，且处理深度有限^[9]。

水泥土搅拌桩适用于各类土层，工后沉降小，工期可控，但其成本相对较高，当有机质或黏粒含量过高时，其成桩效果较差。

根据各地基处理方法的特点，结合盐田港东作业区的地层特征和三期经验^[10]，主要对预压法和深层搅拌法进行对比，见表 5。

表 5 软土地基处理方案比选

Tab. 5 Comparison and selection of soft soil foundation treatment schemes

处理方案	适用性	优点	缺点	案例
预压法	饱和黏土	费用较低,适应性强,大面积处理有优势,土石料充足,盐田三期具有丰富处理经验,工后沉降小于 10 cm	工后沉降较大,工期较长,需要 1 a 以上,堆载预压填料工程量较大;超深吹填淤泥设备下沉、回带、断带	深圳机场一期道路和停机坪、福田保税区、皇岗口岸片区、深圳河堤加固、深港西部通道口岸区、大铲湾码头一期、宝安中心区填海深圳前海/前海、盐田港三期
深层搅拌法	各类软土及松散砂土,有机质含量高和高塑性黏土应通过试验确定适用性	质量有保证,工后沉降小,施工工期较短	费用高,局部含有机质高,无法采用,对施工工艺要求高,深孔易断桩	益田村多层住宅、西部田园风光地基加固、沙河西路出口路段路基、新洲河、皇岗河河堤加固工程、宝安中心区新湖路

最终采用的地基处理方案为：在成陆后对于深厚软土层区域采用插板和堆载预压。吹填淤泥或浮泥土质极软，需要考虑插板机械设备或试验区下沉等问题，也要注意软硬互层产生回带、断带的问题。可采取铺设刚性支撑结构、改装插板

机械的振动锤等措施。

待软土处理后对场地的效果做进一步检验，再选择合理的地基加固方案。

堆载预压处理后基底及回填土以下附加应力影响深度范围内的土层主要为回填土，包括素填

土、填砂、填土混碎石、①₄ 碎石混填土、①₅ 粉质黏土。回填时间固结程度低,孔隙大、压缩性高、均匀性差,如不经过处理,直接作为地基土体,极易引起不均匀沉降。且①₅ 粉质黏土成软塑状,分布范围广,局部发育厚度大,埋深浅,是主要的软弱下卧层,对基础稳定性的影响较大。因此在场地回填以前宜对上部填土进行加固处理,可采用强夯法或强夯置换法进行加固,以提高表层承载力;上部回填土应在控制填料的基础上,分层填筑、碾压。当上述处理方式不满足工期要求或场地承载能力、变形等要求时,也可采用振冲碎石桩、灰土挤密桩或高压旋喷桩等复合方法。②₁ 淤泥层含水率高、固结程度低、压缩性高,可能产生负摩阻力及震陷作用。其地面高程位于基础底面以下,未经处理直接作为地基土层,是典型的软弱下卧层,工后极易产生不均匀沉降及剪切破坏。依据目前的工程手段,可采用爆破清淤或抛石挤淤。局部为强夯区与护岸间安全过渡区,宜采用冲击碾压进行处理。主要的技术标准为:1) 50 a 使用期工后残余沉降量 ≤ 30 cm; 2) 差异沉降 ≤ 10 cm(20 m 范围内); 3) 交工面地基承载力 ≥ 180 kPa。

根据现场载荷板试验结果(图4),场地承载力可达到180 kPa以上且变形稳定,可以满足要求,地基处理方案可靠。

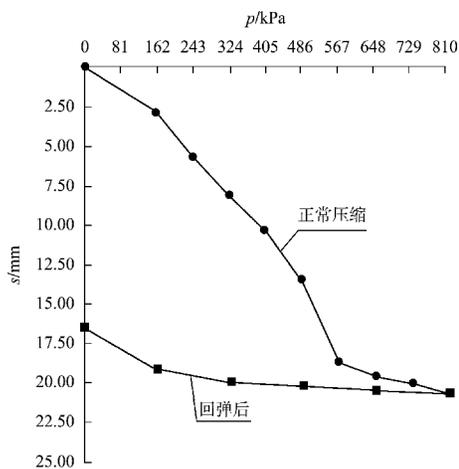


图4 平板载荷试验 $p-s$ 曲线

Fig. 4 $p-s$ curve of plate load test

5 结论

1) 盐田港东作业区属于海岸山脉地貌带的东部沿海山地区。原始地貌单元属海积平原及浅滩地貌,从首次进行地勘至今已十余年,场地的地质分布及性质受开山回填、吹填、堆载预压等影响呈现动态变化,从原始的海积地层逐渐过渡到人工地层。

2) 场地软土层分布复杂,被切割成多个分区,原始淤泥与吹填淤泥叠加,局部填土层中分布淤泥包,给地基处理带来风险。深厚吹填淤泥层经过插板堆载预压处理效果明显,土的物理力学性质显著改善,大部分淤泥已变为粉质黏土。

3) 各阶段采用了合理的勘察手段查明地层的情况,对各阶段地基处理方案进行比选分析,结合目前现状,堆场及浅基础区选择强夯或冲击碾压等处理方式,根据现场载荷板试验和监测数据结果,地基处理取得了较好的加固效果。

4) 大面积海域陆域形成需要根据各阶段的特点采用合理的勘察手段,特别注意项目前后地质性质的变化,注意取样质量,如试验指标不合理,需结合地区经验和土层性质合理推荐。

参考文献:

- [1] 卢演铸,孙建中. 广东深圳断裂带活动性的第四纪地质和地貌研究[J]. 地震地质, 1991, 13(2): 138-146.
LU Y C, SUN J Z. An investigation on geomorphology and quaternary depositions for activity of the Shenzhen fault zone, Guangdong province [J]. Seismology and geology, 1991, 13(2): 138-146.
- [2] 黄峰,覃志毅,聂云华. 深圳市盐田港东港区一期集装箱码头陆域形成及地基处理工程详细阶段岩土工程勘察报告[R]. 深圳: 深圳市勘察测绘院有限公司, 2012.
HUANG F, QIN Z Y, NIE Y H. Detailed stage geotechnical investigation report for land formation and foundation treatment project of first phase container terminal in Donggang area, Yantian Port, Shenzhen [R]. Shenzhen: Shenzhen Geotechnical Investigation & Surveying Institute Co., Ltd., 2012.

(下转第181页)