

· 地基与基础 ·



超厚淤泥层地表持力层形成技术的 试验研究

叶 军

(上海港务工程公司, 上海200438)

摘要: 采用大面积吹填砂进行围海造地过程中, 会产生淤泥集中区, 对大面积超厚淤泥层的地基处理, 尤其是地表持力层形成是一项亟待解决的工程难题。通过对洋山深水港西Ⅲ区大面积超厚淤泥区地表持力层形成关键技术的探索、研究、运用, 为类似工程中对超厚淤泥层进行地基处理、尤其是地表持力层形成提供了借鉴作用。

关键词: 吹填成陆; 淤泥区; 地表持力层; 试验方案; 试验检测; 典型施工

中图分类号: TU 472

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0164-06

Experimental study on formation of ultra-thick silt stratification and bearing stratum of earth's surface

YE Jun

(Shanghai Harbor Engineering Corporation, Shanghai 200438, China)

Abstract: A sludge concentration area will come into shape as a result of using the sand source with high soil content in large area of reclamation operation. In this regard it is an engineering task to be solved to conduct foundation reinforcement of ultra-thick silt stratification, especially exploration of the bearing stratum of earth's surface. This article provides a reference for similar projects as the foundation reinforcement of extra-thick silt stratification, especially on the formation of the bearing stratum of earth's surface through learning the key technologies of exploration of the bearing stratum of earth's surface of the Yangshan deepwater port west III ultra-thick sludge area.

Key words: land reclamation; sludge area; the bearing stratum of earth's surface; test scheme; test; typical construction

1 工程概况

1.1 洋山深水港区吹填成陆特点

上海国际航运中心洋山深水港港区是目前中国乃至全世界最大、最为现代化的集装箱港区之一, 有着规模极其庞大的港区, 港区主要为开山形成与围海造地形成, 其中已经建成并投入使用的一期、二期、三期工程总吹填造地面积就达到560.5万 m²之巨。

1) 根据原始地质条件, 吹填成统一高程, 吹

填粉细砂层厚度大而且变化也大, 最大厚度超过40 m, 平均厚度约20 m。

2) 吹填砂质为粉细砂土, 局部为粉砂, 直径大于0.075 mm颗粒含量大于85%的砂样占总抽检砂样数的75.71%, 其中大于0.075 mm的颗粒中绝大部分颗粒直径介于0.10~0.075 mm, 粉粒和颗粒含量高。

3) 由于场地的原始高程不一、吹填、回填结束后砂层固结的时间长短不一, 造成地下水位分布

收稿日期: 2012-04-01

作者简介: 叶军(1978—), 男, 工程师, 一级建造师, 从事港口航道与地基处理工程。

不均, 为地表下0.5~3.0 m。既存在上部硬壳层, 也存在水位较高、砂层含水比较饱和等情况。

4) 陆域形成总体时间较短, 回填砂结束后的砂层固结时间有限, 回填粉细砂层呈饱和、疏松状态, 在动力荷载作用下容易发生液化。

5) 出砂管口向外随距离的增加, 吹填砂质具有明显的分选性和不均匀性, 且局部区域和深度有夹泥现象, 不同深度夹泥现象不一样, 夹泥位置、厚度有很大随意性, 夹泥集中区域往往形成淤泥包, 更有甚者, 淤泥包扩展为大面积淤泥区。

不同的吹填区域因地质成因、吹填层质的复杂性, 制约着地基处理的方案选择、技术确定、实施把控, 其综合难度在全世界港口建设上, 可谓数一数二, 其中洋山港区西Ⅲ区大面积超厚淤泥区的地基处理难度, 是极其罕见的。

1.2 西Ⅲ区工程简况

西Ⅲ区工程位于洋山深水港区一期道路堆场以北、老鸭嘴以东、将军帽以西的区域, 总面积49.5万 m^2 。因高架桥地面道路穿过该区, 将西Ⅲ区分为南北两块, 其中高架桥南侧总面积161万 m^2 (淤泥区面积10.5万 m^2), 北侧总面积33.5万 m^2 (淤泥区面积12万 m^2)。设计要求采用塑料排水板联合堆载预压进行地基处理, 而且塑排施工深度不小于32 m, 但如何确保塑排设备能在淤泥上施工是地表持力层形成的关键。

1.3 淤泥区地质勘察

西Ⅲ区的淤泥区含水量极高、地基承载力极低, 并且存有大量表面积水, 施工人员和勘探设备无法入场区内, 否则立即陷污其内, 无法救援和处置, 后果可想而知。因此大面积勘察不可能, 只能在淤泥区周边区域选择勘察位置, 通过对场地进行人工排水、晾晒并铺设竹篱笆后, 人工加载进行试验, 确保达到勘探设备的最基本的地基承载力要求, 以策整个勘察作业的安全。勘察成果揭示出淤泥区的层理结构、特性如下:

1) I_0 灰黄色淤泥: 饱和, 流塑。切面光滑, 土质较均匀, 无层理, 含砂眼、砂团、贝壳碎片, 局部近淤泥质黏性土。在拟建场地分布较广泛, 顶板高程为7.02 (X41孔)~6.3 m (X21孔),

厚度为2.5 (X61孔)~22.1 m (X40孔), 实测标贯击数一般为小于1击, 静力触探比贯入阻力 P_s 平均值为0.57 MPa。

2) I_1 灰黄色淤泥质粉质黏土 (Q_R): 饱和, 流塑。土质较均匀, 切面较光滑, 夹粉细砂薄层, 局部近淤泥质黏土, 摇晃见反应, 干强度较高, 韧性中等。该层在拟建场地分布较广泛, 顶板高程为-5.59 (X34孔)~-22.8 m (X21孔), 厚度为1.1 (X33孔)~11.8 m (X51孔)。实测标贯击数一般为1~3击。

3) I_{1-3j} 灰黄色淤泥混冲填土 (K_C): 饱和, 流塑。切面粗糙, 土质不均匀, 含贝壳碎片, 混团状吹填砂, 夹吹填砂薄层, 单层厚度约0.3~2.0 m, 冲填土含量在15%~25%, 局部含量较少, 近淤泥。该层以夹层和透镜体状分布在 I_{1-3} 层中, 顶板高程为3.61 (X34孔)~-20.66 m (X41孔), 厚度一般为9.0~13.0 m, 实测标贯击数一般为1~3击, 静力触探比贯入阻力 P_s 平均值为0.93 MPa。

4) I_{1-3i} 灰黄色冲填土混淤泥 (K_C): 饱和, 松散。土质不均匀, 砂质不纯, 混较多淤泥, 含量约10%~25%, 局部含量多, 近淤泥混砂, 含云母、贝壳碎屑。该层以透镜体状分布在 I_{1-3} 层中, 顶板高程为-1.22 (X54孔)~-15.28 m (X42孔), 厚度为2.3 (X32孔)~13.4 m (X21孔), 实测标贯击数一般为4~6击。

5) II_3 灰黄-灰色粉细砂 (Q_4): 饱和, 稍密-中密。砂质较纯, 颗粒均匀, 含云母、贝壳碎片, 夹腐植物微薄层与黏性土薄层, 单层厚约0.2~1.2 m。该层主要分布在拟建场地中部, 顶板高程为-7.88 (X24孔)~-15.33 m (X43孔), 厚度为3.9 (X45孔)~14.4 m (X34孔)。实测标贯击数一般为10~18击, 静力触探比贯入阻力 P_s 平均值为4.66 MPa。

6) III_2 灰黄-灰色淤泥质粉质黏土 (Q_4): 饱和, 流塑-软塑。土质不均匀, 切面较光滑, 含黑色有机质和腐植物、云母、贝壳碎片, 夹粉砂薄层, 单层厚约0.2~0.6 m, 摇晃见反应, 干强度中等, 韧性中等。顶板高程为-15.0~-28.0 m, 厚度

为14.0 (X42孔)~21.85 m (X52孔)。实测标贯击数一般为1~4击,静力触探比贯入阻力 P_s 平均值为1.45 MPa。该层局部受吹填土影响,强度有所提高。

其中 I_0 灰黄色淤泥层天然含水率平均高达70.4%,而天然密度平均仅为 1.58 t/m^3 ,渗透系数仅为垂直向 $2.27 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,水平向 $5.33 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。

I_1 灰黄色淤泥质粉质黏土(Q_R)层至 III_2 灰黄-灰色淤泥质粉质黏土(Q_4)层,天然含水率亦达到27.5%~43.7%,天然密度为 $1.79 \sim 1.92 \text{ t/m}^3$,渗透性能略好。

通过分析、推断勘察资料,可以得出淤泥区最主要的几个特点:面积大、厚度厚、含水率极高、流塑性大、压缩性大、渗透系数极小、承载力极小。因此要在如此特性的淤泥区上进行超长塑料排水板打设和堆载预压,几乎是不可能,笔者研究的课题就是要将不可能化为可能,并且要安全可靠、方便实施。

2 淤泥区表面持力层形成理论探索

淤泥区表面持力层,指在淤泥区表层形成的硬壳层^[1],这样硬壳层强度较其下淤泥高出很多,通过硬壳层的应力扩散效应(图1),足以承载上部施工人员和适当自重的施工设备;利用硬壳层的连片整体效应,不致人员和施工设备下沉、下陷,造成机毁人亡。

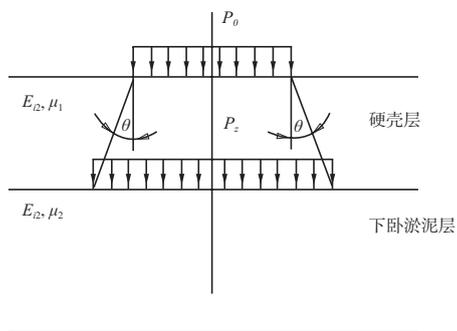


图1 硬壳层的应力扩散

在淤泥区表层形成硬壳层却非易事,获得途径不外乎两类:1)通过长时间日晒,上部覆盖积水自然蒸发、淤泥表层含水缓慢渗出蒸发,淤泥表层土体缓慢固结,形成硬壳层。但获得所需时

间很长,如有降雨,将恢复原貌,这样的硬壳层不足以承载上部人员和小型设备的自重,稍有振动,随即软化。2)尽可能快地排出淤泥区表面积水,人为铺设能够浮搁在淤泥上的具有隔离、排水功能的土工材料,其上载一定厚度、且能快速排水、甚至硬化的材料,共同形成硬壳层。这样的硬壳层作用在于给上部人员、设备的后续施工提供淤泥表面的持力层。硬壳层可为单一层间结构或叠合层间结构,但叠合层间结构较单一层间结构提供的承载力更强、适应变形能力更强。

虽然超厚淤泥层的地基处理方式多种多样,诸如:真空预压、深层塑料排水板排水固结、电渗、水泥搅拌桩、化学处理以及联合处理等^[2],但前提必须在淤泥层表面形成持力层,持力层形成技术则是所有超厚淤泥层地基处理首先面临的关键技术。

3 试验方案的确定

根据淤泥区地质条件,初步明确试验方案为:先期进行施工排水、晾晒场地,具备人员进场条件后开始铺设竹篱笆、土工布,并铺设一定厚度吹填砂,在满足设备要求的承载力后开始塑排施工,其中竹篱笆除了具有轻质、有强度、价格低廉外,还有可漂浮、整体性好、抗变形能力强、便于搬运、便于连接等优点,而土工布则又具有较高的强度、良好的透水性和隔离性、易于搬运和铺展,两者组合,将是理想的硬壳层基底材料与中间材料。同时竹篱笆与土工布均能适应塑料排水板插管的穿透,不会影响后续施工。而吹填干砂,具有一定的吸水性、较大的内摩擦角,便于吹填或人工摊铺等优点。

基于叠合地基理论,采取竹篱笆、土工布及吹填砂等材料形成叠合持力层,叠合层次越多、厚度越大,则持力层的总承载能力越强。为此持力层形成采用4种方案进行比对试验,以寻求满足上部后续塑排施工设备的承载力要求条件下的最为经济的方案。

在经历了6月份的梅雨季节、7月份的高温晾晒后,现场排水晾晒的效果比较好,为确保方案

的可行并尽可能节省费用,因而在施工现场选择了有代表性的一个试验区进行了4种方案试验,每种试验面积约1 000 m²,总面积4 000 m²。方案分别为:方案1:0.5 m干砂+0.5 m干砂;方案2:1层土工布+0.5 m干砂+0.5 m干砂;方案3:1层竹篱笆+1层土工布+0.5 m干砂+0.5 m干砂;方案4:1层竹篱笆+1层土工布+0.5 m干砂+1层竹篱笆+0.5 m干砂。

4 试验方案实施

4.1 淤泥区施工排水

淤泥区总体吹填于2008年1月中旬结束,2月14日开始进场排水,总体施工排水分两部分进行:1)围绕淤泥区外围形成大的排水明沟,通过发电机和水泵将明沟内的水排出场地。2)在淤泥区内铺设部分竹篱笆,人工进行开挖小的明沟将淤泥区地表面水引入明沟,东西向共开挖13条明沟、南北向开挖18条明沟(图2);由于淤泥承载力较差,含水率较高,同时因天气原因,经常下雨造成明沟塌落,故明沟难以一次成型,结合现场实际情况,小明沟的开挖分层进行,逐步加深。自开始挖沟排水以来,现场排水效果比较明显,表层的自由水已基本排尽,在经过7月份的高温晾晒后,表层已基本固结,人员可直接在淤泥表面行走,而且具备了一定强度(图3)。



图2 排水前的淤泥区



图3 排水后的淤泥区

4.2 持力层形成方案实施

试验区的铺砂工作从8月8日开始,至9月14日完成全部铺设及相关检测,共计38 d。

1) 方案1: 0.5 m干砂+0.5 m干砂。

1 m干砂分两层铺设,每层50 cm,主要利用人工和劳动车将砂驳运至试验区。在铺设干砂时,发现第1层砂铺设完成后,干砂沉降明显,基本与淤泥融为一体,同时砂面开裂,回填砂的强度较低,载荷板试验也无法进行。结合现场实际情况,考虑到施工人员安全,该方案放弃。

2) 方案2: 1层土工布+0.5 m干砂+0.5 m干砂。

先在淤泥表层铺设1层编织土工布(规格300 g/m²),土工布的搭接不小于15 cm,并缝合成整体,避免覆盖干砂时淤泥上涌,然后分层驳砂。在第1层干砂铺设后,轻型设备如翻斗车不具备施工条件,沉陷明显,只好继续利用人工铺设第2层干砂。在第2层干砂覆盖后,轻型设备仍不具备施工条件。

3) 方案3: 1层竹篱笆+1层土工布+0.5 m干砂+0.5 m干砂。

在淤泥表层先铺设1层竹篱笆增强地基的稳定性,竹篱笆间的搭接不小于20 cm,然后人工铺设1层编织土工布(规格300 g/m²),土工布的搭接不小于15 cm,并缝合成整体,然后分层覆盖1 m厚干砂。在第1层干砂覆盖后,利用小型推机覆盖第2层干砂时,造成表层开裂,推机位置砂层沉陷明显,推机前方淤泥隆起,干砂覆盖的厚度也难以控制在1 m范围内。为确保试验的准确性,第2层干砂仍采用人工铺设。干砂铺设完成后,小型推机基本可以在砂面行走,但沉陷明显,危险性较大;

4) 方案4: 1层竹篱笆+1层土工布+0.5 m干砂+1层竹篱笆+0.5 m干砂。

在淤泥表层先铺设1层竹篱笆增强地基的稳定性,竹篱笆间的搭接不小于20 cm。然后人工铺设1层编织土工布(规格300 g/m²),土工布的搭接不小于15 cm,并缝合成整体,接着回填50 cm干砂。回填结束后,再铺设1层竹篱笆,然后利用小型翻斗车再回填50 cm干砂,施工能正常进行。

4.3 试验检测及分析

在持力层形成阶段的排水及干砂铺设过程中进行了相关监测和检测工作,主要包括含水率检测、静力触探 P_s 值检测、表层沉降观测、载荷板试验等4方面^[3]。

1) 含水率。

通过检测,除排水沟两侧区域含水率有明显降低外,大面积区域基本没有变化。

2) 静力触探 P_s 值。

在1 m干砂覆盖结束后,进行静力触探测试,检验地下承载力情况,每试验小区布置2个测点,测点深度为至硬土层。由于干砂覆盖后,地表强度仍较低,检测车辆只能依靠铺设木板才能进场测试。测试结果见图4。

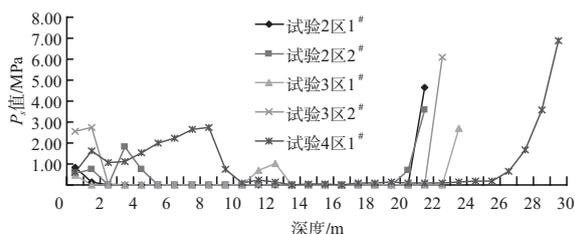


图4 试验区静力触探测试结果

测试过程中,由于静探车沉陷过大,难以进入试验4区,后安排在试验4区靠西侧区域进行试验,因西侧区域表层有一定的含砂量,故静探值有一定强度,但也小于3 MPa。

在淤泥上覆盖1 m厚度干砂后,除表层淤泥在干砂覆盖过程中压实有一定强度外,整个淤泥层几乎没有强度,测试数据也反映出基本小于1 MPa。在测试点的最深处, P_s 值突然上升,主要是由于淤泥下有山体或抛石。

3) 表层沉降观测。

试验前,在每个小区埋设1块表层沉降板,进行沉降观测,试验过程中每3 d观察一次。自8月5日—9月14日,整个干砂覆盖试验过程中,累计沉降如下:试验1区累计沉降33.4 cm,试验2区累计沉降69.8 cm,试验3区累计沉降80.2 cm,试验4区累计沉降6.9 cm。

由此可见试验1区、2区、3区在第1层回填砂铺设过程中沉降明显,试验2区、3区在第2层回填砂铺设过程中再次出现明显沉降,而试验1区由于

取消了第2层回填砂的铺设,此后仅有一定的自然沉降。试验4区在整个回填砂铺设过程中无明显沉降,结合该区域内静力触探的检测结果分析,可能是该沉降板埋设的位置含一定的吹填砂,地基有一定承载力,导致在铺砂过程中无明显沉降。

综合分析认为,回填砂铺设对淤泥沉降影响明显,由于淤泥承载力极低,1 m干砂铺设完成后,淤泥沉降一般在70~80 cm,且铺砂厚度和沉降值成线性正比关系;但在未铺砂的区域,相应会造成淤泥的隆起。

4) 载荷板试验。

为了能准确掌握铺砂后地基承载力,在保证塑排设备安全施工的前提下,尽可能节约回填砂的量,在每个小区每一层干砂铺设后进行了载荷板试验(试验1区方案取消除外),检测结果见表2。

试验区	第1层(0.5 m)干砂铺设后	第2层(1 m)干砂铺设后
试验2区	26	36
试验3区	24	52
试验4区	28	84

由载荷试验数据可以看出:①第1层回填砂铺设后,极限承载力为24~28 kPa,且各方案检测结果相差不大,均不具备塑排施工条件;②第2层回填砂铺设后,各小区承载力均显著提高,且4区提升最为明显,极限承载力达到84 kPa。

5) 试验结论。

根据交通部JTJ 250—1998《港口工程地基规范》^[4]第4.2.2.1条规定:地基承载力 $V_d \leq$ 极限承载力 F_k/γ_R ,其中 γ_R 的取值范围是2.0~3.0,按照砂土取2.0计算,方案2地基承载力为18 kPa,方案3地基承载力为26 kPa,方案4地基承载力为42 kPa。

根据上海市DGJ 08-11-1999《地基基础设计规范》^[5]第4.2.2条规定:地基承载力 $f_d \leq$ 极限承载力 f_k/γ_R ,其中 γ_R 的取值为1.6,按照此公式计算,方案2地基承载力为22.5 kPa,方案3地基承载力为32.5 kPa,方案4地基承载力为52.5 kPa。

为了能组织好淤泥区的塑排施打,采用门架式塑排机进场施工,该设备自质量约25 t,需要的地基容许承载力不小于40 kPa。根据上述两规范计

算所得, 方案4均可满足塑排施工。因此建议在塑排4区进行塑排的典型施工。

5 塑排典型施工

针对本次塑排施工地质条件差、施工深度深(大于32 m)的特点, 对于淤泥区主要采用门架式设备进行施工。同时对常规的门架式设备进行必要的改进, 不仅加大了设备的底面积、加高了门架的高度、改变了门架的支撑位置, 而且增加了门架设备的动力系统, 将门架设备的行走系统和塑排施打系统分开, 提高了塑排施工的效率。

塑排典型施工选择在试验4区进行, 施工前先安排小型推机在场地上进行了平整、碾压, 以确保试验的顺利进行。塑排设备进场后地基有一定的沉陷, 但总体能满足塑排的施工要求, 在塑排施工过程中, 竹篱笆的边缘有地下水渗出, 见图5a); 塑排打设后场地明显均匀下降, 见图5b), 符合塑排的施工。



a)



b)

图5 塑排典型施工

鉴于试验3区的地基极限承载力也大于40 kPa, 同时结合以前塑排的施工经验, 在塑排4区塑排试验成功的基础上, 也在试验3区进行塑排的试打。

虽然也可以进行塑排施工, 但相比较4区, 3区稳定性较差, 设备行走时沉降明显, 容易倾斜, 塑排施工风险较大, 最终确定采用试验4区的方案进行大面积施工。

6 大面积推广运用

根据试验区的4种方案的经济技术比选, 确定在整个西Ⅲ区工程淤泥区采用1层竹篱笆+1层土工布+0.5 m干砂+1层竹篱笆+0.5 m干砂+塑排+分层堆载的地表持力层形成技术方案。保证了在较短时间内, 在超厚淤泥层地表形成了具有足够承载塑料排水板施工的机械设备和施工人员必须的地基承载力要求, 确保地表持力层形成阶段和塑料排水板施工阶段的安全, 使得超厚淤泥层能够变废为宝, 直接提高了工程整体效益。

7 结论

1) 通过在深厚淤泥区表层进行竹篱笆、土工布、干砂的铺设, 形成了具有一定承载力的持力层, 满足了后续工艺施工的要求, 该工艺技术在超厚淤泥层地基中可以进行借鉴和推广。

2) 淤泥区持力层形成技术的成本较低, 主要包括排水费用、土工布及铺设费用、筋管及铺设费用和干砂及驳运费用; 施工透明度高, 质量容易控制, 便于大规模场地同时作业。

参考文献:

- [1] 王宁伟, 卢淑雯, 董艳霞. 薄板理论在人造硬壳层应力计算中的适用性[J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2010(3): 327-329.
- [2] 黄高峰, 陈合爱. 浅谈深厚淤泥和淤泥质土层基础地基处理设计方案比选[J]. 江西水利科技, 2007, 33(2): 99-101.
- [3] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S].
- [4] JTJ 250—1998 港口工程地基规范[S].
- [5] DGJ 08-11—1999 地基基础设计规范[S].

(本文编辑 武亚庆)