



复杂吹填土地基分区处理的现场试验研究

朱文波¹, 田朋飞²

(1. 中国石化天然气分公司, 北京 100029;
2. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

摘要: 某大型 LNG 储罐区吹填地基土质软弱且液化严重。根据地质条件及前期试验, 提出动力排水固结法为主, 局部穿插或全搭接水泥搅拌桩等多种处理方案, 并进行大量现场试验。结果表明: 振动沉管碎石桩在桩长范围内均能有效提升桩间土强度, 并消除砂土液化; 基于有效夯击能的改进 Billam 方法, 能够较好地估算强夯对碎石桩复合地基的有效加固深度; 动力排水固结法适用于处理吹填砂土, 但处理后的地基刚度远低于水泥搅拌桩方案; 对于吹填软土较厚区, 动力排水固结法+穿插水泥搅拌短桩方案与全搭接水泥搅拌长桩方案均能大幅提高复合地基强度, 可按软土厚度情况分区使用; 吹填区的大型单体建筑物地基, 采用多方案组合进行分区处理的思路基本可行, 且有助于节省工程费用。

关键词: 吹填土; 动力排水固结; 水泥搅拌桩; 分区处理

中图分类号: U655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0176-08

Field experiment of zonal treatment scheme for complex dredger fill foundation

ZHU Wenbo¹, TIAN Pengfei²

(1. Sinopec Natural Gas Company, Beijing 100029, China;
2. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

Abstract: The foundation of a large LNG tank area is formed by dredger fill, which is soft and liquefied seriously. According to the geological conditions and preliminary tests, we propose a variety of treatment schemes such as dynamic drainage consolidation method and local interpenetration or full lap cement mixing piles and carry out a large number of field tests. The results show that the vibratory tube sinking gravel pile can effectively improve the strength of soil between piles and eliminate the liquefaction of sandy soil within the pile length. The improved Billam method based on the effective tamping energy can better estimate the effective reinforcement depth of the gravel pile composite foundation by dynamic compaction. The dynamic drainage consolidation method is suitable for processing sandy dredger fill, whereas the foundation stiffness after treatment is far lower than that of the cement mixing pile scheme. For areas with thick soft dredger fill, the dynamic drainage consolidation method and interpenetrating cement mixing short pile scheme, and full lap cement mixing long pile scheme can greatly improve the strength of the composite foundation, which can be used in different areas according to the thickness of soft soil. For the foundation of large single buildings in the dredger filling area, it is feasible to adopt the idea of a combination of multiple schemes for zonal treatment, which is helpful to save engineering costs.

Keywords: dredger fill; dynamic drainage consolidation; cement mixing pile; zonal treatment

收稿日期: 2022-10-24

作者简介: 朱文波 (1970—), 男, 高级工程师, 从事 LNG 接收站建设与运营管理。

沿海地区存在着丰富的海积泥沙, 吹填疏浚土是较为经济、快捷的围海造陆方案。但吹填土形成的地基成分复杂, 或为单一的粗、细粒土, 或为淤泥、砂石及黏性土的混合物, 往往具有高含水率、高压缩性、低渗透性、低抗剪强度、强触变性和流变性等特性, 容易产生地基软土沉陷及砂土液化等不良地质现象; 无法直接用于工程建设, 需要进行地基预处理^[1-3]。目前, 吹填疏浚土地基处理方法已较为丰富, 如吹填的可液化砂层主要采用振冲法^[4]、砂(碎)石桩挤密法^[5], 并结合强夯法^[6]进行处理; 吹填的欠固结疏浚淤泥主要通过预压法^[7]和电渗法^[8]处理, 加速其排水固结以控制工后沉降; 而对吹填地基强度要求较高的工程, 则多直接采用水泥搅拌桩加固^[9-10], 综合提升地基承载力和抗液化能力。

对于滨海吹填区上的大型单体建筑物, 地基土往往成分复杂且力学性质差异较大, 如采用单一处理方案, 或难以满足设计要求, 或因处理费用过高而无法实施。本文以广西某液化天然气(LNG)码头储罐区地基处理工程为例, 基于理论计算及现场试验成果, 提出吹填土地基分区处理方案, 并成功应用于工程实践, 相关成果可为类似工程提供参考。

表1 储罐区10 m深度内地层分布及特征

地层编号	地层名称	平均层厚/m	平均标贯击数/击	地层时代及特征
① ₁	中粗砂	3.64	5.0	Q ₄ ^{ml} , 灰黄色为主, 稍干-湿, 松散, 局部夹稍密状
① ₂	砂混淤泥	4.25	4.2	Q ₄ ^{ml} , 深灰色, 饱和, 结构松散, 淤泥含量10%~30%
① _{2a}	淤泥混砂	3.91	2.7	Q ₄ ^{ml} , 褐灰色, 饱和, 软塑-流塑为主, 淤泥含量大于30%
① _{2b}	淤泥质粉质黏土	4.30	1.4	Q ₄ ^{ml} , 褐灰色, 饱和, 软塑-流塑为主, 淤泥含量大于30%
②	中粗砂	1.76	9.7	Q ₄ , 褐黄色, 饱和, 松散-稍密状, 混砾砂等

场地10 m深度以下为上、中更新统地层, 由黏性土、中粗砂、粉细砂等组成, 物理力学性质相对较好。

1.3 不良地质作用

- 1) 吹填土成分和厚度不均匀, 欠固结, 极有可能产生不均匀沉降。
- 2) 拟建储罐区10 m深度范围内的①₁中粗砂、①₂砂混淤泥及局部②中粗砂, 在7度地震烈度下存在砂土液化的可能, 液化等级中等-严重,

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

拟建储罐区包括4台22万m³LNG储罐, 相对位置见图1。储罐均采用高承台桩基, 初步设计桩长65 m, 桩径1.4 m; 储罐及附属设施对承载力要求较高(桩基水平承载力特征值不低于1 MN, 桩基竖向承载力特征值不低于8.5 MN)。

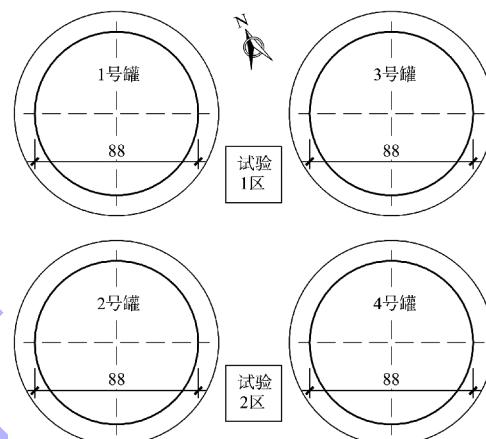


图1 LNG储罐相对位置(单位:m)

1.2 场地地层分布

储罐区场地由吹填疏浚土造陆形成, 两侧滨海, 地下水位埋深小于1 m。场地10 m深度内地层分布及主要特征见表1。

以严重液化为主。

2 地基处理要求及初步方案

2.1 地基处理要求

- 1) 地坪以下深度不小于9.5 m的砂土, 满足在抗震设防烈度为7度、设计基本地震加速度为0.10g时消除场地砂土液化的要求。
- 2) 浅层地基有效加固深度不小于4.5 m; 浅层地基承载力特征值不小于200 kPa, 压缩模量不小于13 MPa。

2.2 地基处理初步方案

拟建储罐区地基处理工期仅要求半年,且对处理后的地基强度要求较高,预压方案无法满足要求。场地下伏地层以吹填砂土和吹填软土(淤泥混砂等)为主,如单独采用强夯处理,土中形成的超强孔隙水压力难以及时消散;而通过设置竖向排水通道(碎石桩),则可改善排水条件,同时桩体与周围土体形成复合地基,可有效提升地基承载力,消除液化。

综合考虑后,选取“振动沉管碎石桩+高能级强夯”的动力排水固结方法作为储罐区地基处理的主要方案,并进行现场试验;处理范围确定为罐心外 110 m。当动力排水固结方案无法满足要求时,再考虑使用水泥搅拌桩方案。

2.3 现场试验参数确定

2.3.1 碎石桩布置间距

碎石桩的设计关键在于合理确定桩间距。场地碎石桩拟采用振动沉管方式,成桩直径 $d=0.5$ m,等边三角形布置,处理深度 $h=9.5$ m。对于吹填砂土(中粗砂及砂混淤泥),根据前期勘察成果,取初始孔隙比 $e_0=0.78$ 、最大孔隙比 $e_{\max}=0.85$ 、最小孔隙比 $e_{\min}=0.55$,地基挤密后砂土平均密实度应达到 $D_{rl}=0.85$,估算吹填砂土挤密后应达到的孔隙比 e_1 及碎石桩设计桩间距 s_1 ,公式为:

$$e_1 = e_{\max} - D_{rl}(e_{\max} - e_{\min}) \quad (1)$$

$$s_1 = 0.95\xi d \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \quad (2)$$

经计算, $e_1=0.61$,取修正系数 $\xi=1.0$,则桩间距 $s_1=1.54$ m。

对于吹填软土(淤泥混砂等),置换率先按 $m=0.15$ 考虑,估算碎石桩设计桩间距 s_2 ,公式为:

$$A_e = A_p/m \quad (3)$$

$$s_2 = 1.08 \sqrt{A_e} \quad (4)$$

式中: A_e 为碎石桩截面积, m^2 ; A_p 为单桩承担的处理面积, m^2 。经计算,桩间距 $s_2=1.24$ m。

由于储罐区吹填土成分及分布不均匀,为保证整体处理效果,初步设计取碎石桩桩间距 $s=1.2$ m,反算面积置换率 $m=0.157$ 。

2.3.2 强夯有效加固深度

按动力排水固结法工序,碎石桩完成并检测合格后才能进行强夯施工,不同能级强夯加固效果的现场试验周期很长、成本较高。因此,初步设计时必须合理估算强夯的有效加固深度,选择合适的夯击能,避免反复试验。

此外,与一般的地基强夯加固不同,碎石桩与桩间土刚度差异过大,夯击能的传递和分配很不均匀,且目前并无适用的计算公式。同时,根据以往工程经验,按总夯击能均匀作用,对碎石桩复合地基的强夯有效深度预估时,结果往往严重偏大,无实际指导意义。因此,此次储罐区强夯初步设计时,按照碎石桩复合地基受力特点,假定夯击能按桩土应力比方式分配,提出桩间土有效夯击能的概念:在复合地基上,强夯总夯击能为 Q ,碎石桩分担夯击能为 Q_p ,桩间土有效夯击能为 Q_s ;假定地基单元体受力面积不变,根据受力平衡有:

$$QA_e = Q_p A_p + Q_s (A_e - A_p) \quad (5)$$

$$n = Q_p / Q_s \quad (6)$$

$$Q_s = \frac{1}{1+m(n-1)} Q \quad (7)$$

$$\psi = \frac{1}{1+m(n-1)} \quad (8)$$

式中: n 为桩土应力比,一般取 2.0~4.0(吹填土较为松软,取 4.0); ψ 为桩间土有效夯击能修正系数。

根据上述定义,利用桩间土有效夯击能概念,分别改进工程中常用的 Menard 方法、Billam 方法以及张平仓方法^[11],估算桩间土的有效加固深度。

1) 基于有效夯击能的改进 Menard 方法为:

$$Q_s = \psi Q = \psi m' H \quad (9)$$

$$h = \alpha \sqrt{\psi m' H} \quad (10)$$

式中: h 为强夯有效加固深度, m; α 为经验修正系数,与土的种类有关,一般取 0.4~0.7; m' 为夯锤质量, t, 储罐区拟采用的夯锤质量为 37 t; H 为夯锤落距, m, 则夯锤落距应满足:

$$H = Q / (10m') \quad (11)$$

2) 基于有效夯击能的改进 Billam 方法为:

$$h = K\psi m' H/D^2 \quad (12)$$

式中: K 为经验修正系数, 一般取 $0.11 \sim 0.16$; D 为夯锤直径, m , 拟采用夯锤直径为 $2.6 m$ 。

3) 基于有效夯击能的改进张平仓方法为:

$$h = (1-\omega)^{-\beta} \sqrt{\frac{\psi WH}{A_t \rho_d g}} \quad (13)$$

式中: ω 为被加固土含水率, 吹填土平均取 28% ; β 为经验修正系数, 取 $0.25 \sim 0.50$; W 为夯锤重力, kN ; A_t 为夯锤底面积, m^2 ; ρ_d 为被加固土干密度, t/m^3 , 吹填土平均取 $1.55 t/m^3$ 。

储罐区吹填土较为松软, 计算时上述方法中的各经验系数均取最低值。按总夯击能方法及有效夯击能改进方法, 分别计算各能级下强夯对桩间土的有效加固深度, 如图 2 所示。

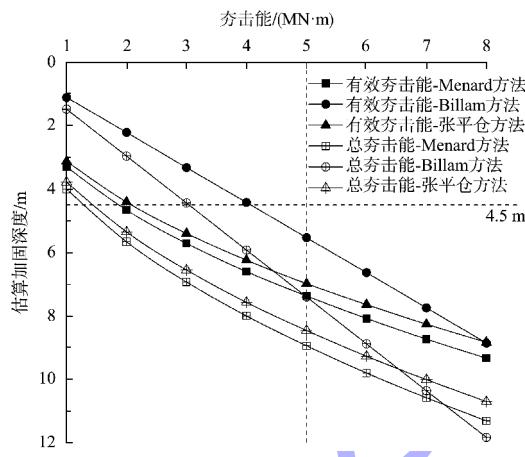


图 2 强夯有效加固深度估算结果

地基处理要求浅层地基有效加固深度不小于 $4.5 m$, 且要形成承载力较高的硬壳层。按图 2 中各方法估算的最小加固深度考虑, 应选取 $5 MN$ 及以上的夯击能。同时, 考虑到夯击时冲击能量随深度的衰减特性, 为保证地基硬壳层的整体加固效果, 最终选择 $6 MN \cdot m$ 的夯击能进行现场试验。

3 现场试验及地基处理分区

3.1 地基处理现场试验

3.1.1 试验 1 区

在 1、3 号储罐中部划定试验 1 区, 在 2、4 号

储罐中部划定试验 2 区(面积各 $900 m^2$), 用以验证动力排水固结法初步设计方案的适用性。

试验 1 区上覆吹填砂层相对较厚($3 \sim 6 m$), 先施工振动沉管碎石桩; 而后进行强夯加固处理, 采用夯击能 6 、 6 、 $3 MN \cdot m$ 共 3 遍点夯, 以及 $2 MN \cdot m$ 满夯(简称 A 方案)。

根据试验方案, 试验 1 区均匀布置桩间土强度标贯检测点 10 处, 分别在试验前、碎石桩处理后、强夯处理后检测; 碎石桩桩体质量抽检 2%, 采用超重型动力触探试验检测; 复合地基承载力检测点 4 处, 采用浅层平板荷载试验检测。根据现场检测结果, 碎石桩桩体标贯击数 $N_{120} \geq 4$ 击; 复合地基承载力特征值 $f_k \geq 225 kPa$, 满足要求。不同处理工序后, 桩间土标贯击数结果对比如图 3 所示。

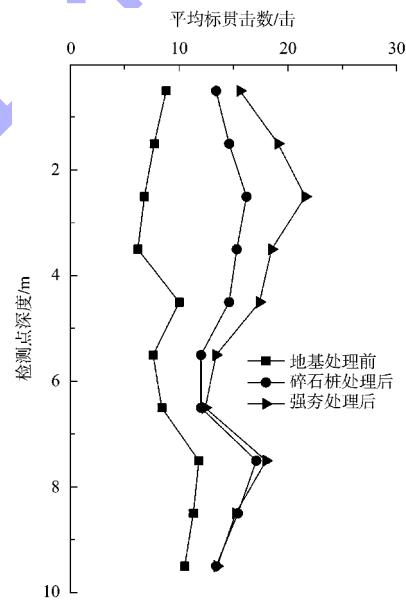


图 3 试验 1 区桩间土处理前后标贯击数对比

由各阶段标贯试验结果可知, 沉管碎石桩在桩长范围内能够显著提高地基土强度, 且对上层吹填砂土的振动挤密效果更好。在 $6 MN \cdot m$ 的高能级强夯作用下, 碎石桩复合地基的有效加固深度约为 $6.0 m$, 与基于有效夯击能的改进 Billam 方法及张平仓方法的预估结果较为接近, 而基于总夯击能的各估算方法结果均严重偏大。同时, 按强夯处理后各层地基土的平均标贯击数进行判别, 各吹填砂土层均不液化,

满足地基处理要求。

3.1.2 试验 2 区

试验 2 区选在 2、4 号罐中下侧，但施工中发现试验区南侧地表即为高含水率淤泥分布，物理力学性质极差且层厚较大，机械进场困难；试验区北侧有一定砂土硬壳层，但下伏吹填淤泥质土仍然较多，局部施工的沉管碎石桩裹挟较多淤泥，桩体密实度差且未能起到较好的挤密、振密和排水通道作用，导致高能级点夯时收锤困难。

根据上述试验情况，2、4 号储罐区吹填淤泥的分布极不均匀，采用初步的动力排水固结法处理方案几无可能。为满足设计方案调整的需求，对 2、4 号储罐区进行了静探为主的补充勘察，绘制了吹填砂土、软土(淤泥质土)厚度等值云图。并结合前期试夯情况，按上覆①₁ 中粗砂厚度及下部软土(淤泥质土)厚度将 2、4 号储罐区分为了南、北 2 个区域，如图 4 所示。北区块软土厚度一般小于 6 m，上覆①₁ 中粗砂厚度一般大于 2.0 m；南区块软土厚度一般大于 6.0 m，上覆①₁ 中粗砂厚度小于 2.0 m；南北区中间可设置一定宽度的工法过渡区。

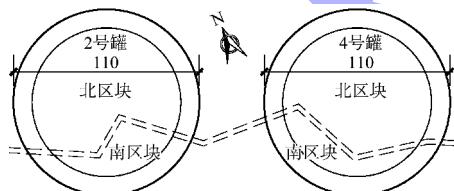


图 4 2、4 号储罐区地基处理工法分区 (单位: m)

北区块上覆吹填砂层较薄，拟采取以下处理方案：局部淤泥富集区先换填中粗砂 2 m，再施工沉管碎石桩；根据前期试夯情况，降低夯击能进行 4、4、3 MN·m 共 3 遍点夯，随后进行 2 MN·m 满夯。满夯完成后，在碎石桩之间穿插直径 0.5 m、长 5.0 m 的单轴水泥土搅拌短桩进行补强，形成复合地基(简称 B 方案)，穿插形式如图 5 所示。

南区块属淤泥质软土深厚区域，拟采用直径 0.85 m、间距 0.60 m 的三轴搅拌长桩进行加固，横向搭接 150 mm，搅拌深度 9.5 m(简称 C 方案)。

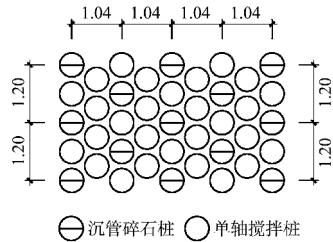


图 5 碎石桩+水泥搅拌短桩穿插形式 (单位: m)

同样，为验证地基分区处理方案的可行性，将 2 号试验区分为南侧、北侧两部分，其中南侧面积 420 m²、北侧面积 540 m²。经现场检测，北区碎石桩+强夯处理后，桩间土强度提升明显，标贯试验测试结果如图 6 所示。分析可知，沉管碎石桩能够增强桩间软土强度，但挤密效果不及吹填砂土；强夯对碎石桩桩间软土加固效果有限，但其动力压密作用有助于地基硬壳层的形成；4 MN·m 夯击能下，碎石桩复合地基有效加固深度仅为 4 m，与基于有效夯击能的改进 Billam 方法预估结果接近。

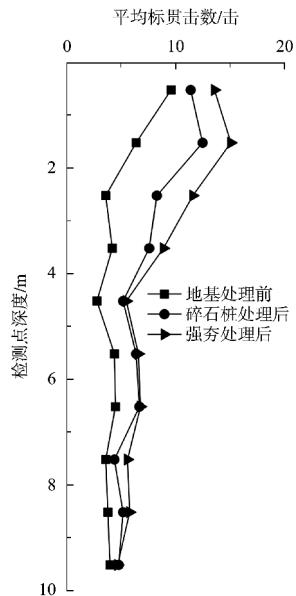


图 6 试验 2 区桩间土处理前后标贯击数对比

浅层平板载荷试验显示，低能级强夯处理后地基整体刚度相对较差，当荷载由 200 kPa 增加至 400 kPa 时，地基沉降量迅速增大且不稳定；而经穿插单轴水泥搅拌短桩进一步加固后，浅层复合地基的强度显著提升，地基承载力远大于 200 kPa；各处理方案后地基竖向刚度对比情况

见图7。此外, 荷载试验试坑开挖时发现, 强夯对碎石桩桩体(0.5 m深度内)有一定的扰动和破坏, 后续场地整平时可采用20 t的振动压路机进行补强。

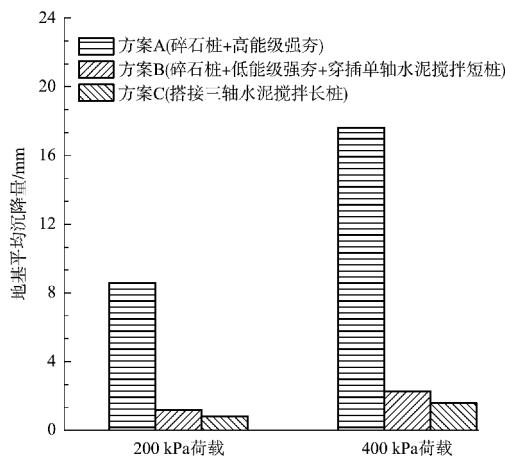


图7 不同方案处理后的地基竖向刚度测试情况

由图7可看出, 动力固结排水方案处理后的地基竖向刚度明显低于其他水泥搅拌桩处理方案, 且在荷载较大时差异更大; 对于吹填软土分布较厚区域, B、C两种处理方案的加固效果接近, 可在单体建筑场地分区组合使用, 以便合理控制工程造价。

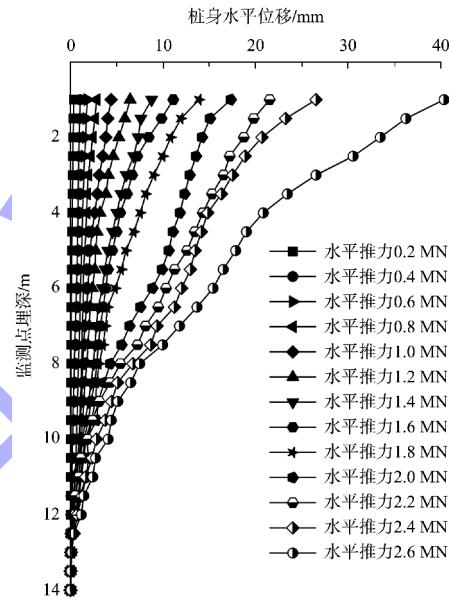
3.2 工程试桩现场试验

为直接验证地基处理方案适用性, 各试验区在处理完成28 d后, 均施工了工程桩试桩, 进行地基竖向和水平承载力检测, 结果见表2。测试结果表明, 所有试桩均满足了单桩竖向承载力特征值大于8.5 MN、水平承载力特征值大于1.0 MN的设计要求。但在不同的地基处理方案下, 地基的水平刚度具有一定差异, 检测结果见图8。由测试曲线对比可知, 在1.0 MN设计水平承载力下, A方案处理后试桩最大水平位移约5 mm, B与C方案处理后最大水平位移仅2.5 mm。而在较高的水平推力下(2.0 MN以上时), A与B方案处理区域试桩桩身最大水平位移迅速增大至20 mm以上, 而C方案处理后地基整体刚度更好, 水平位移基本随应力均匀增大。

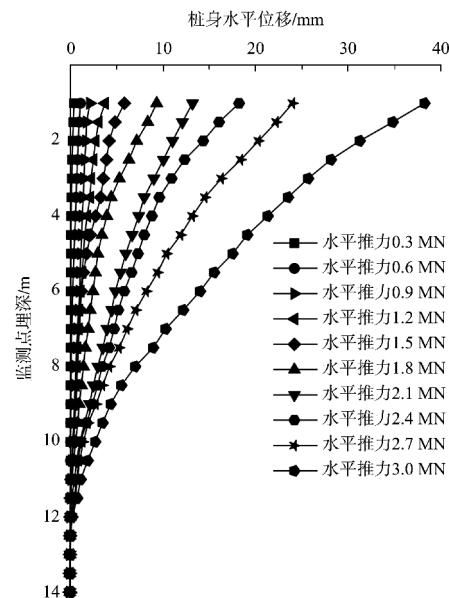
表2 不同方案处理后工程桩试桩检测结果

方案	竖向抗压极限承载力下沉量/mm	竖向抗压承载力特征值下沉量/mm	10 mm位移下水平承载力特征值/MN
A	28.7	12.0	1.13
B	30.9	13.1	1.46
C	15.6	6.2	1.71

注: 单桩竖向抗压极限承载力检测值为17.0 MN, 竖向承载力特征值检测值为8.5 MN; 表中数据为多个试桩检测结果平均值。



a) A方案



b) B方案

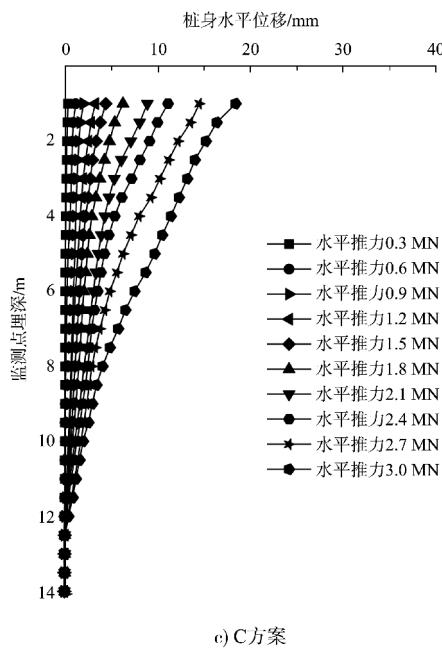


图 8 各方案处理区域水平推桩测试结果

结合不同方案处理后的地基竖向及水平刚度测试结果可看出, A 方案处理后的复合地基基本满足设计要求, 但整体强度(刚度)相对较低, 不宜与水泥搅拌桩方案用于同一建筑物地基。B、C 方案处理后的复合地基竖向刚度差别不大, 但在水平应力较大的极端工况下(如地震工况), C 方案处理后地基水平刚度及整体性仍优于 B 方案。因此, 对于吹填软土区的大型单体建筑物, 建议采用 B 及 C 方案进行精准化分区处理, 以节省工程费用; 同时为避免极端情况下不同工法处理边界的水平应力集中现象, 可设置一定宽度的过渡区。

3.3 地基处理分区方案

综合现场不同处理方案及工法试验结果, 形成了吹填土地基的分区处理方案, 见表 3。

表 3 储罐区吹填土地基分区处理方案

地基类型	区域位置	处理方法
①上覆砂土较厚区	1、3 号罐	A 方案: 碎石桩+高能级强夯
②上覆砂土较薄区	2、4 号罐北区块	B 方案: 碎石桩+低能级强夯+穿插单轴水泥搅拌短桩(5.0 m)
③淤泥质软土深厚区	2、4 号罐南区块	C 方案: 搭接三轴水泥搅拌长桩(9.5 m)
④不同工法过渡区	2、4 号罐过渡区	工法过渡方案: 穿插单轴水泥搅拌长桩(9.5 m)

4 工程应用及处理效果

4.1 工程实施情况

拟建储罐区地基以实际地质条件及大量现场试验结果为依据, 最终形成了一套探索性的吹填土地基分区处理方案, 并取得成功应用。其中 2、4 号储罐区的分区处理方案比单一水泥搅拌桩加固方案节省工程费用超 3 000 万元。储罐区总处理面积约 4 万 m^2 , 施工碎石桩总长度超过 250 km, 水泥土搅拌桩约 4.4 万根, 地基处理及检测工作在 6 个月计划工期内全部完成, 并顺利通过验收。

4.2 地基处理效果

根据第三方检测结果, 吹填土地基经处理后强度显著提升, 砂土液化情况完全消除; 储罐区各检测点承载力特征值均不小于 200 kPa, 极限荷载(400 kPa)压力下最大累计沉降量小于 20 mm, 地基处理效果满足要求。地基处理前后, 储罐区场地对比见图 9。



a) 处理前



b) 处理后

图 9 储罐区吹填土地基处理前后对比

此外, 根据不同方案处理后地基强度及均匀性的检测情况, 并综合工程试桩检测结果, 主体设计单位将储罐区桩基长度由地基未处理前的 65 m 优化调整至 51~54 m, 大幅降低了桩基造价, 也充分体现了吹填土地基分区处理方案的适用性及经济性。

5 结语

1) 沉管碎石桩的振动及挤密效果, 在桩长范围内均能起到增强桩间土强度及消除液化的作用, 且对吹填砂土的处理效果更好。

2) 强夯能加速浅层地基硬壳层的形成; 基于有效夯击能的改进 Billam 方法, 能够较好地估算强夯对碎石桩复合地基的有效加固深度。

3) 动力排水固结法适用于吹填砂土较厚区, 造价经济且施工便捷, 可作为首选方案; 但处理后的地基水平及竖向刚度远低于其他水泥搅拌桩方案。

4) 对于吹填软土较厚区, 可优先使用动力排水固结法+穿插水泥搅拌短桩方案, 局部淤泥深厚区则可采用全搭接水泥搅拌长桩方案; 两种搅拌桩方案均能起到较好的地基加固作用, 可根据软土厚度及分布情况, 在大型单体建筑物区域分区使用。

参考文献:

- [1] 石萍, 田海涛, 何桂芳, 等. 区域维护性疏浚土处置方案探讨: 以广州港为例[J]. 海洋通报, 2011, 30(5): 583-587.
- [2] 程海峰, 刘杰, 韩露, 等. 长江口深水航道疏浚土“十三五”造地利用研究Ⅱ: 疏浚吹填工艺和方案[J]. 水运工程, 2018(1): 100-105.
- [3] 郑鹏一, 邓龙照. 华南沿海地区围海造陆及地基处理[J]. 水运工程, 2012(5): 141-146.
- [4] 乜树强, 高洪斌. 振冲法在液化砂土地基处理中的应用[J]. 水运工程, 2010(11): 129-132.
- [5] 钟展兴. 挤密砂桩在地基抗液化中的应用[J]. 水运工程, 2016(8): 158-162.
- [6] 苏亮, 时伟, 水伟厚, 等. 高能级强夯法处理深厚吹填砂土地基现场试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1560-1569.
- [7] 胡继业, 余敏, 张鹏飞, 等. 港区超软吹填土层快速加固方案设计与优化[J]. 水运工程, 2019(1): 163-166, 202.
- [8] 刘飞禹, 汤家粼, 袁国辉, 等. 纤维加筋优化电渗法处理疏浚淤泥的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2545-2552.
- [9] 林楷祥, 么振东. 水泥搅拌桩在西闸站工程处理液化地基的应用[J]. 人民珠江, 2014, 35(4): 86-88.
- [10] 陈永辉, 王颖, 程潇, 等. 就地固化技术处理围海工程吹填土的试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 64-69.
- [11] 张平仓, 汪稔. 强夯法施工实践中加固深度问题浅析[J]. 岩土力学, 2000(1): 76-80.

(本文编辑 王璁)

(上接第 101 页)

- [6] 长江航道局. 航道工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [7] 文岑, 赵世强. 锁坝下游的冲深计算[J]. 水利学报, 2003(7): 70-73.
- [8] 付中敏, 李雨晨. 护底余排作用下潜坝下游局部冲刷深度计算研究[J]. 水道港口, 2015, 36(3): 229-233.
- [9] 仲伟斌. 长江航道整治建筑物坝体损毁原因及维修对策研究[J]. 交通科技, 2014(3): 196-199.
- [10] 马爱兴, 曹民雄, 王秀红, 等. 长江中下游航道整治护滩带损毁机理分析及应对措施[J]. 水利水运工程学报, 2011(2): 32-38.

- [11] 王建中, 范红霞, 朱立俊, 等. 和畅洲汊道深水航道整治右汊水动力改善措施分析[J]. 水运工程, 2014(9): 11-17.
- [12] 张细兵, 卢金友, 林木松. 和畅洲汊道演变与左汊口门控制工程效果分析[J]. 人民长江, 2009, 40(20): 1-3, 6.
- [13] 史常乐, 钱嘉伟, 王炎良. 长江下游镇扬河段和畅洲汊道阶段演变特性分析[J]. 水利水电快报, 2022, 43(4): 46-53.
- [14] 许慧, 李国斌, 尚倩倩, 等. 淹没丁坝群二维水流数值模拟新方法[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 407-413.

(本文编辑 赵娟)