

置换碎石桩联合强夯在 北部湾填海复杂型软弱地基处理中的应用

胡纯龙

(广西地质工程勘察(设计)院,广西 南宁 530023)

摘要:从广西北部湾大量填海(塘)造陆工业基地所遇到的复杂型软弱与夹层地基处理工程实例中,结合建(构)筑物具体特点,扩展应用置换(挤密加固,纵横排水)碎石桩联合强夯的地基处理方法,在解决大面积地基不均匀沉降,软弱夹层纵横排水与挤密固结、综合夯实提高总体地基持力层承载力方面取得了“安全、经济、高效”的良好效果,并具有推广前景和意义。

关键词:填海工业基地;软弱与夹层地基处理;置换(挤密加固、排水)碎石桩联合强夯;北部湾

中图分类号:TU472 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)02-0029-03

Application of Replacement Detritus Pile with Dynamic Compaction in Treatment of Complex Sea-filling Soft Ground in Beibu Gulf/HU Chun-long (Guangxi Institute of Geo-engineering Investigation, Nanning Guangxi 530023, China)

Abstract: With the engineering case of ground treatment for complex soft interlayer of industrial base in land accretion of Beibu Gulf of Guangxi, and according to the specific characteristics of building structures, replacement detritus pile with dynamic compaction method was further applied with good effects in overcoming the large scale of differential settlement of the ground, crossbar drainage, compacting consolidation and improving the bearing capacity of bearing layer.

Key words: soft interlayer ground; ground treatment; replacement detritus pile; dynamic compaction; sea-filling area of Beibu Gulf

广西北部湾位于中国东盟重点发展区,并被中央批准为西部大开发的重点规划经济发展区,其独特的地理及政策优势,吸引了许多大财团、大工业及交通、能源、石化工业与基础设施项目座落于此。北部湾呈现出风生水起的景象,而北部湾的重大工业基地、基础设施地域形成基本以开山填海或吹砂填海并围护、平整而成,所以绝大部分建(构)筑场地的地基都遇到和需要解决大面积(未完成自重固结)新填土地基欠密实和不均匀沉降与总体承载力偏低等问题,且大部分原地面基底的海湾、海沟、水塘等地形分布有淤泥、淤泥混砂、淤泥质土等高压缩性软弱土需要特殊处理并提高其复合地基承载力以满足各类建(物)筑物地基的需要。

对于上述普遍存在的新(吹)填欠密实(松)土、下部软弱土的(“上松、下软”)区域,在总结和研究多种类型地基处理工程基础上,我们扩展应用了置换(挤密加固、纵横排水)碎石桩联合强夯的综合地基处理方法来解决大方向填海工程“上松、下软”的

地基问题。达到“安全、经济、高效”的良好效果。下面以北部湾“广西东油码头油库”、“广西天盛港务码头油库”等不同结构的油气罐基处理工程为例进行论述。

1 工程概况与地基处理要求

广西东油、天盛港务码头油库工程位于广西北部湾钦州港,建设油罐由 5000 m^3 ($d21\text{ m}$)、 $10000\sim 20000\text{ m}^3$ ($d30\sim 42\text{ m}$)、 40000 m^3 ($d52\text{ m}$)等16座不同结构类型及配套工程组成,地基处理面积 48605 m^2 。

地基处理(后)要求:

- (1)软弱地基处理后复合地基承载力设计值 $f \geq 250\text{ kPa}$;
- (2)地基变形满足相关国标规范要求。

2 场地工程地质与水文地质条件

建筑场地位于钦州港,原为海湾区,后为建设油

作者简介:2008-11-20

作者简介:胡纯龙(1958-),男(汉族),广西人,广西地质工程勘察(设计)院副院长(原总工程师)、水文工程与环境地质高级工程师、建筑工程高级工程师,地基基础与上部建筑结构研究生,从事岩土工程、建筑工程、交通土建工程施工与技术管理工作,广西南宁市建政路34号, gxkey@163.com。

气库需要,采用人工填海造陆,填筑成建筑用地。其岩土层工程地质特征由上至下为:

①吹填土,为新近人工吹砂堆积土,松散,未完成自重固结,主要由中细砂组成,顶部有1~2 m 碎石土分布,该层厚度一般为5~6 m,承载力标准值 $f_k = 120$ kPa;

②淤泥与淤泥混砂,灰黑色,流~软塑状,含有中细砂、贝壳、砂砾等,属高压缩性土,厚度一般为4.7~5.5 m,承载力标准值 $f_k = 60$ kPa;

③全风化泥岩,为中等~低压缩性,地基承载力较高,为良好的地基土层,厚度1.23~2.45 m,承载力标准 $f_k = 180$ kPa;

④强~中风化泥岩、砂岩,属软质岩石,为良好的地基土层,承载力标准值 $f_k = 450 \sim 1100$ kPa。

场地地下水主要为孔隙潜水,含水层主要为吹填砂层,该层透水性能好,地下水与海水成互补关系,地下水埋深2.0~3.0 m,低潮时地下水埋深4.5~5.5 m,地下水与海水潮汐成同步变化关系。

由松散吹填土①和淤泥及淤泥混砂②组成了软土地基系统,无法满足建(构)筑物基础承载力与变形要求,因此需要作地基处理。

3 施工方案设计

根据油罐设计的地基承载力与规范变形要求,及油罐区特定的地质结构情况,从“安全、经济、高效”的原则出发及我们在相邻的相似地基结构、相同类工程“深能油气库工程”——现改为“中石化油气库”的地基处理成功经验,我们设计该工程软土地基处理采用“置换(挤密加固、纵横排水)碎石桩联合强夯”结合的综合处理方案。

3.1 方案设计思路与理念

先在油罐基础主要影响范围内,采用全穿越淤泥和淤泥混砂层的碎石桩置换(挤密加固、纵横排水)桩($\varnothing 500$ mm)进行施工,改善淤泥和淤泥混砂层的结构、形成置换、挤密加固的粗骨料框架结构,提高地基土的力学性质和承载力,同时形成强的快速导排水系统与上层强透水的砂层相连构成纵横排水网络扩散系统,碎石桩进入砂层 ≥ 1.0 m,并在强大外力强夯的作用下,加速淤泥砂层的排水、固结、挤密,提高地基承载力,同时使孔隙水压力快速扩散与释放。

然后在其上进行强夯,迫使碎石填土和吹填土砂层与淤泥及淤泥混砂层综合软基系统快速排水、固结、挤密,提高地基承载力,同时使综合软基系统

结构层力学性质趋向均匀及变形趋向稳定,消除地基液化和不均匀沉降问题。

3.2 设计参数

3.2.1 碎(砾)石桩

(1)桩距:在油罐地基处理范围内按行 \times 列=3.0 \times 3.0 m 间距、等边三角形布置碎(砾)石桩。

(2)桩径:500 mm。

(3)桩深与灌注段长度:桩深打至淤泥质土层底部以下并入良好土层 ≥ 1.0 m;灌注段长度,底部穿越至淤泥质土层底部 ≥ 1.0 m,顶部进入上层砂层 ≥ 1.0 m。

3.2.2 强夯

(1)夯点布置:正方形组合布设。

(2)夯击遍数:5遍,其中第一、二、三、四遍为正方形布设,第五遍为满夯叠打。

(3)夯点排列间距:第一至第四遍的行 \times 点距=4 m \times 4 m,第五遍行 \times 点距=1.8 m \times 1.8 m。

(4)每夯点击数:第一、二、三、四遍每夯点为7~10击;第五遍每夯点2击。并满足最后两击均夯沉量 ≤ 10 cm,以夯点压缩量最大,夯坑周围隆起量最小和不影响拔锤为原则。

(5)夯击能: > 2000 kN \cdot m。

(6)强夯处理面积:每罐基础强夯范围为基础外扩5 m;处理面积共48605 m²。

(7)地基处理有效深度 > 8 m。

(8)地基处理后承载力设计值 $f \geq 250$ kPa。

通过现场试夯与地基质量检验优选强夯施工参数。

4 复合地基的验算

本次采用置换(挤密加固、纵横排水)碎石桩联合强夯综合处理方法,主要增强吹填砂(砾)与碎石土及下卧层——淤泥质土的力学强度,为此对处理的目的层有关主要参数进行设计验算,通过验算进一步证明本方法的可行性。

4.1 吹填砂(砾)土主要强夯后的力学强度

经强夯后,松散的碎石土与砂(砾)土的密实度可达到中密~密实状态。 $N_{63.5}$ 触探击数将可达到10~20击,甚至超过20击, $f_{ak} \geq 250$ kPa,这是以往钦州港同类土实际强夯施工经验所证明的。

当碎石土与砂(砾)土达到中密状态,其天然重度可达到19 kN/m³,内摩擦角可达到42°,承载力特征值 $f_{ak} \geq 250$ kPa,这些参数值在有关规范及手册中也是可以查到的。

4.2 淤泥质土经碎石桩加强夯处理后的力学强度

(1) 淤泥质土在钦州港原深能码头油气库地基的强夯处理时未进行碎石桩(排水)施工,强夯后经检验承载力特征值 $f_{ak} = 105 \text{ kPa}$ 。本次处理在淤泥质土中先施工了碎石桩挤密排水后强夯,使淤泥质土的排水固结作用明显地比不施工碎石桩要好许多,但在本设计时仍取以往未施工碎石桩经强夯后的 $f_{ak} = 105 \text{ kPa}$ 作为碎石桩排水强夯处理后淤泥质土的 f_{ak} 值。

(2) 淤泥质土经碎石桩排水强夯处理后淤泥质土成为复合地基土,该层的复合地基承载力 f_{spk} 值为:

$$f_{spk} = mf_{pk} + (1 - m)f_{sk}$$

式中: f_{spk} ——复合地基承载力, kPa; m ——置换率,取 0.0252; f_{pk} ——碎石桩承载力特征值,取 257 kPa; f_{sk} ——处理后桩间土承载力特征值,取 105 kPa。

计算得: $f_{spk} = 108.83 \text{ kPa}$ 。

(3) 淤泥质土上部的吹填砂(砾)土,相当于加了一层中密~密实的垫层,因此,碎石桩排水强夯处理后经深度修正的淤泥质土的承载力特征值为:

$$f_{az} = f_{spk} + n_d \gamma_m (d - 0.5)$$

式中: f_{az} ——修正后淤泥质土承载力特征值, kPa; n_d ——承载力修正系数,取 1.0; γ_m ——砂(砾)土的天然重度,取 19 kN/m^3 ; d ——基础垫层深度,取 6.0 m。

计算得: $f_{az} = 213.33 \text{ kPa}$ 。

当 $f_{az} > P_z$ 时则可满足要求(P_z 为淤泥质土顶面附加压力)。

$$P_z = P_0 r^2 / (r + z \tan \theta)^2$$

$$P_0 = P - \gamma_m d$$

式中: P_z ——淤泥质土顶面附加压力, kPa; P_0 ——基础底面处的附加应力, kPa; r ——基础半径,取 26 m; z ——深度垫层深度,取 6.0 m; θ ——土的摩擦角,取 11.6° ; P ——基础底面处的平均压力, kPa。

计算得: $P_z = 191.40 \text{ kPa}$ 。

计算结果: $f_{az} > P_z$ 。所以经碎石桩排水并强夯处理后的淤泥质土可以满足要求,同时也说明排水碎石桩的设计布置是合理的。

4.3 碎石桩单桩承载力计算

碎石桩极限承载力计算:

$$\sigma_{pa} = \text{tg}^2(45^\circ + \varphi_p/2) \sigma_m$$

$$\sigma_m = \gamma z \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \text{tg}(45^\circ + \varphi/2)$$

式中: σ_{pa} ——碎石桩的单桩极限承载力, kPa;

φ_p ——碎石桩的内摩擦角,取 42° ; γ ——土的重度,地下水位以下取 8.2 kN/m^3 ; σ_m ——土的径向极限应力; z ——基础垫层深度,取 6.0 m; φ ——土的内摩擦角,取 8° 。

计算得: $\sigma_{pa} = 514.5 \text{ kPa}$ 。

5 沉降量验算

5.1 处理前沉降量

$$S_c = \psi_c \sum_{i=1}^n \frac{\rho c (z_i a_i - z_{i-1} a_{i-1})}{E_{si}}$$

吹填土的 E_s 取 17 MPa,淤泥质土 E_s 取 3 MPa。

(1) 吹填砂(砾)土沉降 $S_1 = (220/17) (11.5 \times 0.974 - 6.00 \times 0.998) = 67.46 \text{ mm}$;

(2) 淤泥质土沉降 $S_2 = (220/3) (11.5 \times 0.974) = 798.90 \text{ mm}$ 。

压缩模量当量值 $\bar{E} = 4.0$,所以, $\psi_c = 1$ 。

总沉降量 $S_c = \psi_c (S_1 + S_2) = 866.36 \text{ mm}$ 。

5.2 处理后沉降量(剩余沉降量)

公式同上,吹填砂(砾)土 $E_s = 32 \text{ MPa}$,淤泥质土 $E_s = 5.5 \text{ MPa}$ 。

$$S_1 = (220/32) \times 5.213 = 35.39 \text{ mm}$$

$$S_2 = (220/5.5) \times 11.20 = 448 \text{ mm}$$

压缩模量值 $\bar{E}_s = 7.6$,所以, $\psi_c = 0.7$ 。

总沉降量(剩余沉降量) $S = \psi_c (S_1 + S_2) = 0.7 \times 483.39 = 338.37 \text{ mm}$ 。

即处理后可消除沉降量 $866.36 - 338.37 = 527.99 \text{ mm}$ 。

由此可以看出强夯加碎石桩挤密与排水处置的效果十分明显,无论是改善软弱土层—淤泥质土的力学强度,还是减少沉降都是显而易见的。

6 地基处理质量效果检验与结论

(1) 通过上述联合地基处理和检测,场地整体地基夯实固结(消除)沉降值 730 mm,比设计预算值 528 mm 提高了 28%,实际运行了 5 年,工后沉降 6~10 cm。

(2) 地基承载力特征值 f_{ak} :(吹)填土 $f_{ak} = 360 \text{ kPa}$,提高了 3 倍;淤泥与淤泥混砂 $f_{ka} = 246 \text{ kPa}$,提高了 4 倍。

(3) 载荷(充水预压)试验结果:最大不均匀沉降值 26 mm,为国标(油罐)规定允许不均匀沉降值($d/167 = 180 \sim 251 \text{ mm}$, $d_{30 \sim 42 \text{ m}}$)的 10%~15%。极为安全。

(下转第 34 页)

m,漏失后的孔内水位一般与江水齐平,为5~6 m,根据气举反循环的工作原理,计算出相应的参数:风管下入深度 H 为12~15 m,选择的风管长度尽可能长些,下到距离钻头底部约2 m处,以确保沉没比满足要求;启动空气压力为1.3 MPa左右,需要最大风量约 4 m^3 。因此,选用W-2.8/5型空压机,其压力为5 MPa,风量为 2.8 m^3 。现场试验时,为了确保风量,采用了2台W-2.8/5型空压机并联使用。

6.4.3 试验情况

首先采用一根长约2 m的1 in($\varnothing 25.4\text{ mm}$)铁管作混合器,其四周钻成小眼(小眼直径约6 mm),底部封闭。然后将混合器的另一端与1 in高压胶管连接,并依次从钻杆中心穿过,一直穿过钻机主动钻杆的水龙头部分,从排渣管出口处引出,然后连接到压风机排风口。混合器一直下到钻头心管部位,距离钻头底部2~3 m。

下钻和安装完毕,开启空压机,待风压达到5 MPa后,开始慢慢送风,并逐渐加大风量,启动气举反循环。几分钟后,泥浆水从水龙头的排渣管出口处往外喷射,待水量正常且有岩渣排出后,便可正常回转钻进。

当主动钻杆上余钻完以后,可在排渣管的出口处将1 in胶管(风管)抽出,直到混合器上升到主动钻杆处,然后增加钻杆,再把风管送回钻头位置距离孔底2~3 m处,连接主动钻杆,继续开启空压机,启动反循环钻进。

6.4.4 试验结果

经过反复试验,通过以上办法进行的气举反循环效果非常理想,施工简单、方便,投入成本低,容易推广实施。钻进施工效率大大提高,原单机月成桩不到2根,改进后月成桩数达到5~6根。由于成孔

效率大大提高,特别是保证了反循环施工,清孔干净彻底,该施工方法得到了项目部充分肯定,并下令在全工地进行推广。

6.4.5 其它保证措施

(1)开孔钻进时,必须配合使用正循环或其它施工工艺,到一定深度即满足沉没比要求后,才能下入混合器,实施气举反循环工艺。

(2)混合器必须有一定的重力,确保混合器能沉入一定深度,以满足沉没比要求,从而启动气举反循环。

(3)作风管的胶管既要有一定强度又要有一定的柔软度,能够自由地从钻杆中间来回抽动,同时不会轻易破损断裂。

(4)钻机的钻杆内径应在146 mm以上,确保大颗粒的岩屑或卵砾石有足够的空间排出。

7 结语

气举反循环是成熟的施工工艺,主要应用于桩径大、桩孔深的基础施工中。本工地利用的气举反循环方法,避免了传统气举反循环施工的缺点,不存在原来的风管密封问题,操作灵活方便,同时可以和其它施工工艺结合使用,互为补充。由于该工艺效果良好,使整个工程进度得到了保证,桩基础施工按照原计划顺利完成,为业主节省了造浆堵漏费用,取得了很好的经济效益。

参考文献:

- [1] 常世臣,芦文阁.水文水井及工程钻探[Z].长春:长春地质学院,1984.
- [2] 刘瑞祺,张长舟.水文地质钻探钻井工程实用技术手册[Z].北京:中国工程勘察协会技术咨询部,1992.

(上接第31页)

(4)地基处理后的承载力和地基变形均匀完满达到设计与规范的要求。同时比别类地基处理与施工方法省时省费数倍以上。

(5)置换(挤密加固、纵横排水)碎石桩联合强夯的方法在广西北部湾大量填海工业基地复杂型软弱与夹层或“上松、下软”地基处理扩展应用中(通过工程实例可知),达到了“安全、经济、高效”的良好效果。

参考文献:

- [1] 江正荣.地基与基础施工手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [2] 编委会.岩土工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [3] 常士骠.工程地质手册(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [4] JGJ 79-200,建筑地基处理技术规范[S].
- [5] GBJ 7-89,建筑地基基础设计规[S].