

孔内深层强夯碎石桩复合地基在化工储罐基础的应用

Application of Deep Dynamic Compaction Crushed Stone Pile Composite Foundation in Chemical Storage Tank Foundation

付卫东

Weidong Fu

中海油惠州石化有限公司
中国·广东 惠州 516086
Cnoc Huizhou Petrochemical Co., Ltd.,
Huizhou, Guangdong, 516086, China

【摘要】孔内深层强夯碎石桩复合地基是一种比较经济的地基处理方法。文章通过举例分析确定桩体物料平衡分析和罐体倾斜的计算,确定充盈系数和桩端持力层的选择,工程得以取得经济效益。

【Abstract】The composite foundation of deep dynamic compaction crushed stone pile in the hole is a kind of economic foundation treatment method. This paper analyzes and determines the material balance analysis of pile body and the calculation of tank body tilt through an example, and determines the filling coefficient and the selection of pile end bearing layer.

【关键词】充盈系数;倾斜;桩端持力层

【Keywords】filling coefficient; tilt; pile end bearing layer

【DOI】10.36012/etr.v1i3.441

1 引言

孔内深层强夯碎石桩复合地基是一种比较经济的地基处理方法^[1]。某项目中间罐区位于惠州大亚湾石化区填海区域内,共建设乙苯罐、环氧丙烷罐、苯乙烯罐、丁烷罐、含磷废水罐等共 21 个大小不同的化学品罐,单罐容量 70~7729m³,总罐容量 66175m³,选择该复合地基方式进行场地处理,要求地

基处理后复合地基承载力特征值 f_k 达到 300kPa。

2 场地地质条件

2.1 工程地质情况

建设用地在 2006 年完成填海,并进行了 8000kN/m² 的强夯预处理,项目开工前重新进行了勘察,揭露地层情况如表 1 所示,地基土承载力特征值及压缩模量见表 2。

表 1 综合地质柱状地层分布情况表

层号	时代成因	岩土名称	层厚/m	层底高程/m	岩性特征	分布范围
			层底深度/m			
①	Q ₄ ^{ml}	素填土	1.1~9.6	-3.76~4.73	黄褐~红褐色,主要为风化砂砾岩碎块混黏性土,中密~密实,稍湿~很湿	场地均布
			1.1~9.6			
② ₁	Q ₄ ^{mc}	细砂	0.5~5.7	-5.11~1.89	浅灰~灰色,主要成分为石英、长石,分布较好,含少量贝壳,局部混少量黏性土、砾石,稍密~中密,很湿	局部分布
			4.0~10.8			
② ₃	Q ₄ ^{mc}	粉土	0.7~5.9	-6.27~1.80	灰~灰黄色,含少量贝壳,局部混砾石,无光泽,摇振反应中等,干强度及韧性低,局部砂性较强,稍密~中密,很湿	局部分布
			4.0~12.3			
③ ₁	Q ₄ ^{alpl}	粉质黏土	0.6~4.8	-6.98~-4.78	黄褐~灰黄色,黏性较强,局部夹粉细砂薄层,含小砾石,稍有光泽,无摇振反应,干强度及韧性中等,可塑	局部分布
			10.8~13.3			
③ ₃	Q ₄ ^{alpl}	卵砾石混砂	0.8~15.5	-15.22~0.28	黄褐~灰黄色,岩性成份为石英砂岩、石英岩,分选差,呈亚圆形,粒径 20~50mm,含量约 50%,充填物为中粗砂,密实	局部缺失
			5.5~21.2			
⑤	Q ^d	粉质黏土	0.5~5.6	-12.53~-0.97	灰白~褐红色,砂砾岩残积土,见灰白色条纹,含砾石,稍有光泽,无摇振反应,干强度及韧性中等,可塑~硬塑	局部分布
			6.2~18.5			
⑥ ₁	J ₁	全风化砂砾岩	0.5~13.8	-21.13~2.44	褐~褐红色,原岩结构基本破坏,风化为可塑~硬塑粉质黏土,含少量风化岩碎块,有残余结构强度,岩芯呈短柱、柱状或碎块状,岩芯采取率 30%~65%	局部缺失
			3.5~27.0			

表 2 地基土承载力特征值及压缩模量建议值

层号	①	② ₁	② ₃	③ ₁	③ ₃	⑤	⑥ ₁
岩土名称	素填土	细砂	粉土	粉质黏土	卵砾石混砂	粉质黏土	全风化砂砾岩
f_{ak} (kPa)	250	140	150	140	350	180	300
E_s (MPa)	15.0	8.0	7.5	5.0	38.0	6.0	55.0

2.2 地下水

场地地下水为孔隙潜水及基岩裂隙水,主要受大气降水及海洋潮汐的影响。勘察期间测得地下水埋深为 0.80~4.34m,水位高程-0.17~3.08m,地下水位年变化幅度为 1.0~1.5m。

3 充盈系数和桩端持力层的确定

3.1 充盈系数的含义

充盈系数的概念来源于混凝土灌注桩,系浇筑的混凝土体积与设计桩身体积的比值,用来初步判断桩身成型质量,要求比值不小于 1.0。目前,在孔内强夯碎石桩地基处理中,对于充盈系数的取值没有明确的规定,充盈系数是“碎石填料量 $V_{填}$ 与成桩体积 $V_{桩}$ 的比值”还是“碎石填料量 $V_{填}$ 与成孔体积 $V_{孔}$ 的比值”也没有明确的定义,文章建议将充盈系数 k 作为碎石填料量 $V_{填}$ 与成孔体积 $V_{孔}$ 的比值。

3.1.1 混凝土桩与强夯碎石桩成桩过程中物料的变化区别

由于材料特性和成桩施工工艺的区别,混凝土桩与强夯碎石桩成桩物料有一系列的区别:①混凝土凝固成型过程基本上不发生体积变化,而碎石在强夯过程中存在压缩的情况;②混凝土桩成桩时对土只产生自重侧压力,不会大于土体被动土压力导致土的变形,而碎石桩由于强夯作用会产生侧向挤压将碎石挤入土中;③混凝土桩成桩范围内只有混凝土和少量可以忽略不计的土,而强夯碎石桩的桩体是由回填的碎石和强夯塌孔的土方混合而成。

3.1.2 充盈系数的确定

根据 CECS 197—2006《孔内深层强夯法技术规程》第 4.1.7 条推算,冲击成孔时,桩径 $d_{桩}$ 与孔径 $d_{孔}$ 的比值为 1.2~1.5,基于物料平衡原理,为简化计算,偏于保守地进行下列假设:

假设一:桩径 $d_{桩}$ 与孔径 $d_{孔}$ 之间的土方体积为桩间土挤压需要的体积与桩体碎石间孔隙填充需要的土方体积之和;

假设二:由于强夯作用,在桩体内土方只能存在于碎石空隙内;

假设三:碎石料压实系数为 1.3。

基于以上假设,可知:

$$V_{填}=1.3V_{桩}=1.3V_{孔}(d_{桩}/d_{孔})^2 \quad (1)$$

$$\text{充盈系数 } k = V_{填}/V_{孔}=1.3(d_{桩}/d_{孔})^2 \quad (2)$$

本工程采用成桩直径为 1200mm、桩距 2000mm 的正三角形布置设计,施工采用成孔直径为 1000mm 的旋挖桩机。因此,充盈系数 k 为:

$$k=V_{填}/V_{孔}=1.3 \times (d_{桩}/d_{孔})^2=1.3 \times (1.2/1.0)^2=1.9 \quad (3)$$

3.2 桩端持力层确定

持力层确定需要考虑地基承载力验算包括桩端持力层的承载力和软弱下卧层的承载力验算、以及沉降量包括整体沉降和倾斜(不均匀沉降)验算^[4]。

上文表 1 中③₃卵砾石混砂层承载力加高、压缩模量也大,最下层即为⑥₁全风化砾砂岩层,而在③₃层与⑥₁层之间局部存在软弱夹层⑤粉质黏土层,夹层上的③₃层厚度最小为 5.2m。③₃层为第四系全新统冲洪积层,结构稳定,因此,初步选择③₃层为桩端持力层,并以最不利孔位和最大罐基础 T9312 的组合进行强度复核。

基本计算条件为 T9312 罐直径 D 为 28.18m,复合地基承载力 f_k 要求 300kPa,压缩模量不小于 25MPa;最不利孔地层厚度依次为①层 5.6m、②₃层 2.3m、③₃层 5.2m、⑤层 2.7m,然后为⑥₁层;最有利孔地层厚度依次为①层 5.6m、②₃层 2.3m、③₃层 7.9m,然后为⑥₁层;地下水埋深按 4.3m 计算;由于罐间距较大,不考虑应力叠加;变形模量在初步选择时先按 Es1-2 计算。

3.2.1 软弱下卧层承载力验算

①下卧层修正后的承载力特征值 f_{ac} 计算。

$$f_{ac}=f_{ak}+\eta_d\gamma_m(d-0.5) \quad (4)$$

式中, f_{ak} 为地基承载力特征值,根据地勘报告,为 180kPa; η_d 为地基承载力特征值深度修正系数,⑤层土的空隙比 e 为 0.755、液性指数 IL 为 0.64,根据 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》表 5.2.4, η_d 取 1.6, γ_m 为下卧层以上土的加权平均重度,地下水位以上取 18kN/m³,地下水位以下取浮容重 8kN/m³。

$$\gamma_m=[18 \times 4.3+(18-10) \times (5.6+2.3+5.2-4.3)]/(5.6+2.3+5.2)=11.28 \text{ kN/m}^3 \quad (5)$$

$$f_{ac}=180+1.6 \times 11.28 \times (5.6+2.3+5.2-0.5)=407.4 \text{ kPa} \quad (6)$$

②下卧层顶面压力 p_z 计算。标准组合时下卧层顶面附加应力 p_z ,对于罐基础下卧层,计算如下:

$$p_z=D^2 f_k / [D+2(d-0.5) \text{tg}\theta]^2 \quad (7)$$

式中, d 为下卧层顶面深度, $d=5.6+2.3+5.2=13.1\text{m}$; θ 为扩散角, $(z-0.5)/D=0.45$, ③₃层与⑤层土体压缩模量比值 38/6=6.3,因此, θ 为 24.1°。

$$p_z=28.18^2 \times 300 / [28.18+2 \times (13.1-0.5) \tan 24.1^\circ]^2=153.7 \text{ kPa} \quad (8)$$

土的自重应力 p_c 为:

$$p_{cz} = 18 \times 4.3 + (18 - 10) \times (5.6 + 2.3 + 5.2 - 4.3) = 147.8 \text{ kPa} \quad (9)$$

下卧层顶面压力 p :

$$p = p_z + p_{cz} = 153.7 + 147.8 = 301.5 \text{ kPa} < f_{wz} = 543 \text{ kPa} \quad (10)$$

③结论。因为下卧层顶面压力 p 小于下卧层修正后的承载力特征值 f_{wz} , 所以软弱下卧层承载力满足要求。

3.2.2 罐中心沉降变形计算

⑥₁层压缩模量为 55MPa > 50MPa, 因此, 根据 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》第 5.3.8 条, 沉降计算深度到⑥₁层顶面为止。当罐整体置于最不利孔时, 沉降计算地层为三层: 7.9m 厚复合地基、5.2m 厚③₃层、2.7m 厚⑤层, 按分层总和法计算罐体中心沉降。根据层顶埋深, 罐体中心和罐边各土层顶面平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$ 见表 3。

表 3 平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$

层号	土层	层底距基底深度 z/m	$(z-0.5)/r$	罐中心	罐边
1	复合地基	7.4	0.52	0.972	0.458
2	③ ₃ 层	12.6	0.71	0.941	0.442
3	⑤层	15.3	1.09	0.858	0.409

压缩模量当量值为:

$$\bar{E}_s = \sum A_i / \sum (A_i / E_{si}) = (0.86 \times 15.3) / [0.972 \times 7.4 / 25 + (0.941 \times 12.6 - 0.972 \times 7.4) / 38 + (0.858 \times 15.3 - 0.941 \times 12.6) / 6] = 21.2 \text{ MPa} \quad (11)$$

根据 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》表 5.3.5, 沉降计算经验系数 $\psi_s = 0.2$ 。

沉降最大计算值为:

$$s = \psi_s f_k \sum [(z_i \bar{a}_i - z_{i-1} \bar{a}_{i-1}) / E_{si}] = 0.2 \times 300 \times [(15.3 \times 0.858 - 12.6 \times 0.941) / 6 + (12.6 \times 0.941 - 7.4 \times 0.972) / 38 + 7.4 \times 0.972 / 25] = 37.33 \text{ mm} < 0.006 \times 2r = 169 \text{ mm} \quad (12)$$

罐体中心沉降满足规范要求。

3.2.3 倾斜计算

由于尚未确定罐体的具体位置, 因此, 按罐边线分别位于最不利孔处和最有利孔位处分别计算沉降, 同罐中心沉降计算方法相同。

①最不利孔。压缩模量当量值 $\bar{E}_s = 21.2 \text{ MPa}$, 沉降计算经验系数 $\psi_s = 0.2$, 沉降计算值为 $s = 18.46 \text{ mm}$ 。

②最有利孔。不存在⑤层, 即沉降计算地层分为两层, 7.9m 厚复合地基、7.9m 厚③₃层。压缩模量当量值 $\bar{E}_s = 29.7 \text{ MPa}$, 则沉降计算经验系数为 0.2, 沉降估算为 $s = 12.66 \text{ mm}$ 。

③倾斜分析。罐沿圆周方向最大沉降差 $\delta_s = 18.46 - 12.66 = 5.8 \text{ mm} < 0.006 \times 2r = 0.006 \times 28180 = 169.08 \text{ mm}$, 可以忽略不计。

3.3 结论

通过计算, 选择③₃层为桩端持力层可以满足承载力和沉降变形要求。

4 检测结果

对处理后地基进行了桩身超重型动力触探、桩间土超重型动力触探和单桩复合地基静载试验。检测单位对复合地基得出以下结论。

①处理后复合地基承载力特征值 $\geq 300 \text{ kPa}$, 满足设计要求;

②变形模量 25~30MPa, 满足设计要求;

③桩体和桩间土的超重型动探击数纵向和横向均存在一定离散性, 各土层深度内密实度为稍密~中密。

5 结语

通过对充盈系数的分析, 明确了孔内深层强夯碎石桩中充盈系数的概念及计算公式, 理顺了设计前期储罐沉降计算分析思路^[1]。本工程依据文章方法对设计进行优化, 桩长减少了 37.6%, 碎石用量减少了 59.5%, 中间罐区工程造价减少 1100 万元, 检测结果完全满足设计要求。在取得巨大经济效益的同时, 为今后类似工程的设计提供了可靠方法。

参考文献

- [1]孙晓骥, 赵玉慧, 唐琼. 孔内深层强夯法(DDC法)在湿陷性黄土地区原油储罐地基处理中的应用[J]. 价值工程, 2016, 35(34): 116-117.
- [2]邱存家, 胡勇生, 王双, 等. 孔内深层强夯桩处理软弱地基试验[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(12): 70-73.
- [3]程雪, 尚君辉, 许瑞虎, 等. 履带式强夯机在孔内深层超强夯法中的应用[J]. 建筑机械, 2016(4): 64-66+71+8.