

组合型复合地基在曹妃甸大型储煤场中的应用

孙晓东 孙宏 杨永玉

(大地工程开发(集团)有限公司,北京 100102)

摘要: 对于沿海吹填软土地基上大型圆形储煤场的地基处理,采用了砂石桩与素混凝土桩组合型复合地基,现场试桩及检测结果均满足设计要求。经过处理后砂石桩成桩质量良好,桩间砂土液化消除,地基承载力显著提高,经济效益明显。

关键词: 吹填软土;大型圆形储煤场;地基处理;组合型复合地基

中图分类号: TU 472

文献标识码: B

The application of combination composite foundation in large circular coal storage bunker in Caofeidian area

SUN Xiao - dong ,SUN Hong ,YANG Yong - yu

(Dadi Engineering Development Co. ,Ltd ,Beijing 100102 ,China)

Abstract: The sand - gravel pile and the plain concrete pile of combined composite foundation adapted to ground treatment of large circular coal storage bunker on soft dredger soil , the results of field test pile meet with the design requirements. After the foundation treatment , the quality of the sand - gravel pile was good , the liquefaction between pile and soil was eliminated , the bearing capacity of foundation was increased significantly , and the economic benefit was obvious.

Key words: soft dredger soil; large circular coal storage bunker; ground treatment; combined composite foundation

我国地域辽阔,各种地基土中,不少为软弱土和不良土,比如液化和湿陷,而我国新建大型储煤场工程越来越多地遇到不良地基,因此对地基处理的要求也越来越迫切^[1]。大型储煤场荷载大,对地基影响范围深,对不均匀沉降要求较严,遇到地质条件不良时,采用单一的地基处理工法往往不能满足要求,而组合型复合地基处理软弱地基往往能取得比较满意的效果^[2]。组合型复合地基结合单一桩体复合地基特长,达到强度和变形的协调、经济和技术的有机统一,发挥出巨大的优越性^[3]。目前吹填软土地区采用组合型复合地基处理的工程还不是很多,但其已经成为今后的一种发展趋势。本文就一例具体的组合型复合地基工程实例进行分析探讨,供类似工程参考。

1 工程概况

曹妃甸数字化煤炭储配基地项目位于国家级

经济技术开发区“唐山市曹妃甸工业区”内,设计年流量 25.0 Mt/a,占地面积 1 209.5 亩,分期建设。一期工程年设计年流量 16.7 Mt/a,主要建(构)筑物为 4 个 $\Phi 120$ m 圆形穹顶网壳堆场,堆场 360°环形储煤,煤堆高度 33.76 m,外侧环形挡煤墙处堆煤高度 18.0 m。设计要求地基承载力特征值不小于 330 kPa。

2 场地工程地质条件

拟建场地为吹填场地,由于距离海岸较近,地下水位较浅,地下水对混凝土结构和钢筋混凝土结构中的钢筋均具有中等腐蚀性。上部层①-1 粉砂、①-2 粉砂和②-1 粉砂为液化地层,厚度 4.70 ~ 16.30 m,液化指数 0.00 ~ 51.82,平均值为 7.25,属中等液化场地。场地经过预处理,预处理方式为高真空动力固结法,经过预处理后地基承载力特征值达到 120 kPa,基本可以满足建设场地

表 1 各土层及其物理力学指标
Tab. 1 Soil and its physical and mechanical index

层号	岩土名称	平均层厚 /m	重度 /kN·m ⁻³	含水量 w/%	孔隙比 e ₀	塑性指数 I _p	液性指数 I _L	压缩模量 E _s /MPa	承载力特征值 f _{ak} /kPa	摩擦力标准值 q _s /kPa	端承力标准值 q _p /kPa
①-1	粉砂	3.10						(13.0)	150	40	
①-2	粉砂	2.73						(7.0)	80	25	
①-3	粉质粘土	2.83	18.8	31.4	0.860	13.1	0.88	2.6	75	25	
①-4	淤泥质粉质粘土	3.44	17.6	44.3	1.195	17.3	1.26	1.8	55	20	
②-1	粉砂	2.45						(12.0)	140	35	
②-2	粉细砂	10.84						(20.0)	210	55	850
③	粉质粘土	3.89	19.1	31.7	0.837	13.7	0.82	4.2	130	40	
④	粉土	2.54	19.8	24.3	0.652	8.9	0.64	9.9	200	65	
⑤	粉质粘土	11.05	19.7	29.0	0.746	13.9	0.63	9.0	230	65	700
⑤-1	粉砂	1.85						(24.0)	260	60	
⑥	粉细砂	4.24						(33.0)	330	75	1 150
⑦	粉质粘土	2.57	20.0	20.4	0.608	12.9	0.13	11.9	280	85	1 600

注: 括号内数据为经验值。

需要, 具体内容详见文献 [4]。场地范围内自上而下各土层及其物理指标见表 1。

3 地基处理方案比选

根据场地工程地质条件、地层的工程特性、地下水的中等腐蚀性以及对地基承载力的要求, 综合考虑采用素混凝土桩复合地基较为适宜。素混凝土桩复合地基是在地基中植入高粘结强度刚性桩, 桩顶铺设褥垫层, 由桩、桩间土和褥垫层一起构成复合地基, 可大幅度提高地基承载力, 减小地基变形。

但上部软弱地层制约了素混凝土桩复合地基承载力的提高, 桩土应力比过大, 需对上部软弱的桩间土进行处理, 提高其强度。形成以素混凝土桩为主控桩, 其它桩型为辅桩的长短桩组合的多桩型复合地基, 以满足设计要求。

由表 2 可知, 几种组合型复合地基各有优势: 水泥土搅拌桩和高压旋喷桩利用水泥有效加固软土, 形成具有粘结强度的桩体; 砂石桩能挤密松散砂土消除液化, 同时在饱和软弱粘性土中植入密实的砂石桩体, 形成排水通道, 加速其固结; 振动沉管 CFG 桩能挤密松散砂土消除液化。

按照复合地基的设计要求, 根据场地工程地质条件及其工程特性, 论证各方案的适宜性: 首先消除松散砂土液化, 水泥土搅拌桩和高压旋喷桩不具有可行性; 其次地下水中高含量的 Cl⁻、SO₄²⁻对水泥的腐蚀性, 以及有机质含量高的吹填土, 流塑状态的层①-4 淤泥质粉质粘土土制

表 2 处理方案比选

Tab. 2 Comparison of treatment scheme

复合地基方案	优点	缺点	适宜性
水泥土搅拌桩	能形成 0.5 ~ 2 MPa 的高强度桩, 有效加固上部软弱土层; 素混凝土桩提高强度, 控制变形。	①不能消除液化; ②水泥土搅拌桩对有机质含量高的吹填土加固效果较差, 高含量 Cl ⁻ 和 SO ₄ ²⁻ 对水泥具有腐蚀性。	差
高压旋喷桩 + 素混凝土桩	刚性的高压旋喷桩, 与素混凝土桩结合能提高强度控制变形。	①不能消除液化; ②成桩质量受施工人为因素及其它不确定影响因素较多。	差
CFG 桩 + 素混凝土桩	振动沉管 CFG 桩消除液化, 素混凝土提高强度控制变形。	振动沉管 CFG 桩断桩率高。	差
振冲碎石 + 素混凝土桩	振冲碎石能同样具有消除液化和置换作用。	①振冲器长度有限, 软硬不均的吹填土导致桩径不均匀; ②厚层淤泥, 影响砂土振密效果; ③大量泥浆排放, 污染环境。	差
沉管砂石 + 素混凝土桩	砂石桩挤密砂土消除液化, 置换淤泥并形成排水通道, 加速其固结; 素混凝土桩提高强度并控制变形。	砂石桩对于提高层①-4 淤泥质粉质粘土强度的幅度较小。	适宜

约了水泥土搅拌桩处理的效果;再次水泥土搅拌桩和高压旋喷桩受施工人为因素的影响,桩体的均匀性不易定量控制,影响成桩质量的不确定因素较多。振动沉管 CFG 桩断桩率较高。

综合考虑上述几种方案,沉管砂石桩+素混凝土桩组合型复合地基较为适宜。

4 组合型复合地基的设计及施工

4.1 设计目的

一是消除桩间土液化;二是提高地基承载力;三是减小地基变形。

4.2 设计要求

素混凝土桩桩径 600 mm,正方形布置,桩间距 1.8 m,有效桩长 26.0 m,以层⑤粉质粘土为桩端持力层。砂石桩桩径 600 mm,正方形布置,桩间距 1.8 m,有效桩长 15.0 m,以层②-2 粉细砂为桩端持力层。桩顶和堆场地面之间设置 700 mm 砂石褥垫层,并设置两层土工筋带,铺设采用静力压实法,夯填度不得大于 0.90。组合型复合地基结构示意图见图 1。

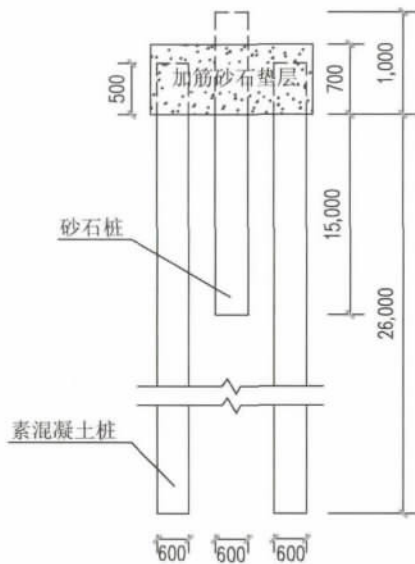


图1 组合型复合地基结构示意图(单位: mm)
Fig.1 The sketch of combined composite foundation (Unit: mm)

4.3 施工工艺

(1) 素混凝土桩混凝土强度等级 C35,采用矿渣水泥 P.S 与粉煤灰配比,矿渣水泥中铝酸三钙含量不应大于 3%,可掺入 15%~25% III 级或 III

级以上等级的粉煤灰,抗渗等级不应低于 S8。采用长螺旋钻孔、管内泵压混合料灌注成桩,施工时要严控拔管速度,防止断桩和缩径。施工时设不少于 0.5 m 的保护桩长。

(2) 砂石桩桩体材料采用硬质材料的级配砂石,含泥量不得大于 5%,最大粒径小于 50 mm。采用振动沉管成桩,重复压拔管法。施工时要严格控制留振时间、填料量、压拔管速度及施工顺序,保证成桩质量。施工时设不少于 1.0 m 的保护桩长。

5 质量检测结果及评价

试桩完成后,采用标准贯入试验、圆锥动力触探试验及静载荷试验对试桩区域进行了检测,试桩检测点布置图见图 2。

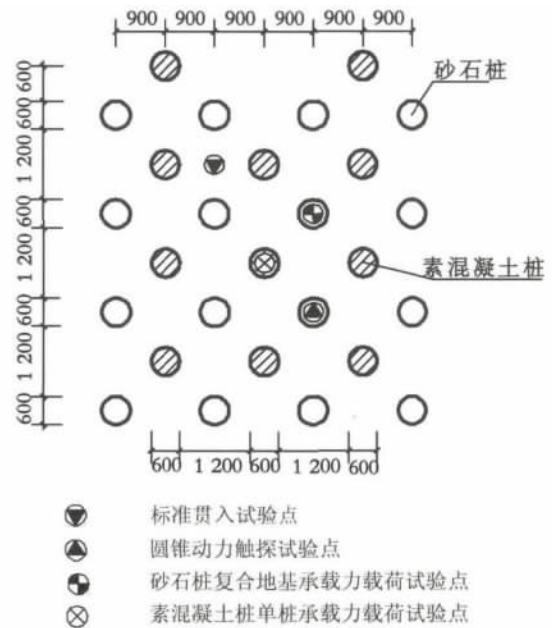


图2 试桩检测点布置图(单位: mm)
Fig.2 The plan of monitoring points (Unit: mm)

5.1 标准贯入试验

采用自动脱钩的自由落锤法进行标准贯入,钻进间距为 1.0~1.5 m,贯入器打入土中 15 cm 后,开始记录每打入 10 cm 的锤击数,累计打入 30 cm 的锤击数为标准贯入试验锤击数 N 值,测试深度 15.0 m。图 3 为标贯检测点处采用组合型复合地基前后土体不同深度处标贯击数变化曲线。

由图 3 分析可得,经组合型复合地基处理后,6.0 m 以上及 11.0 m 以下土体标贯击数均有较大幅度增加,2.0~5.0 m 增加幅度最大,标贯击数提高了 2~3 倍,但距层②-2 粉细砂附近标贯击数

增加幅度减小,甚至还有减小趋势,说明对于松散软土地段土体强度提高较大,对于硬土层此法处理效果不明显。由检测结果知,6.0~11.0 m 深度土体标贯击数提高幅度不大,约 2~3 击,分析认为此深度应为层①-4 淤泥质粉质粘土,砂石桩挤土效果不明显,由于检测间隔时间较短,超孔隙水压力还未消散完全,随着时间的增长土体强度仍会有一些的提高,这和文献[5]所分析的结果是一致的。

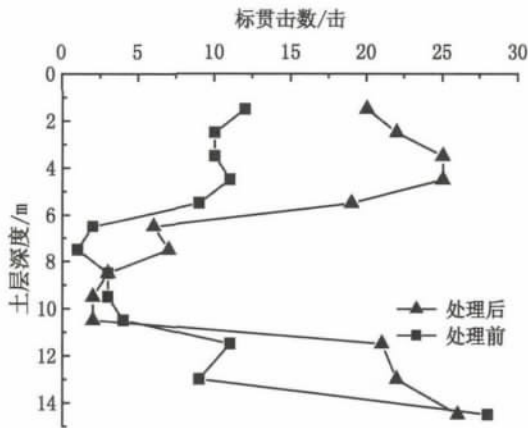


图3 标贯击数变化曲线

Fig. 3 The curves of standard penetration number

由规范[6]知,此地区抗震设防烈度为 7 度,地震分组为第 2 组,地震加速度为 0.15 g。取地下水水位为 2.0 m,标贯击数基准值为 $N_0 = 10$ 击,采用标贯法判断 15.0 m 深度内的砂土液化,结果见表 3、表 4。

由表 3、表 4 对比可得,采用组合型复合地基处理后,砂土液化消除,说明组合型复合地基中的砂石桩处理液化效果良好。

表 3 处理前砂土液化

Tab. 3 The form of the liquefaction before processing

地层	深度 /m	临界锤击数 N_{cri} /击	实际锤击数 N_i /击	N_i/N_{cri}	判断结果
1-1 粉砂	1.50	6.32	12	1.90	不液化
	2.50	8.57	10	1.17	不液化
	3.50	10.37	10	0.96	液化
	4.50	11.88	11	0.93	液化
	5.50	13.18	9	0.68	液化
2-1 粉砂	11.50	18.60	11	0.59	液化
	13.00	19.58	9	0.46	液化
2-2 粉砂	14.50	20.47	28	1.37	不液化

表 4 处理后砂土液化

Tab. 4 The form of the liquefaction after processing

地层	深度 /m	临界锤击数 N_{cri} /击	实际锤击数 N_i /击	N_i/N_{cri}	判断结果
1-1 粉砂	1.50	6.32	20	3.16	不液化
	2.50	8.57	22	2.57	不液化
	3.50	10.37	25	2.41	不液化
	4.50	11.88	25	2.10	不液化
	5.50	13.18	19	1.44	不液化
2-1 粉砂	11.50	18.60	21	2.59	不液化
	13.00	19.58	22	3.61	不液化
2-2 粉砂	14.50	20.47	26	1.27	不液化

5.2 动力触探试验

检测桩体密实度采用重型圆锥动力触探试验,利用自动脱钩的自由落锤式设备,连续贯入,记录贯入 10 cm 的锤击数为重型圆锥动力触探试验锤击数 $N_{63.5}$ 值,测试深度 15.0 m。为简单明了,只取每米的总锤击数来做定性分析。图 4 为动力触探击数随桩体深度变化曲线。

由图 4 可知,砂石桩上部 1.0 m 为松散-稍密状态,成桩质量较差。1.0~12.0 m 砂石桩基本为中密状态,12.0 m 以下至桩端桩为密实状态。总体而言,深度越深桩体强度越高。由图 4 可以看出,桩体深度 6.0~9.0 m 处,动力触探曲线发生突变,且桩体成密实状态,说明在淤泥质粉质粘土中砂石桩成桩质量良好。但根据现场检测,淤泥质粉质粘土中的桩径要显著大于其他土层,充盈系数约为 1.4~1.6,说明砂石桩在软土中扩径问题严重。

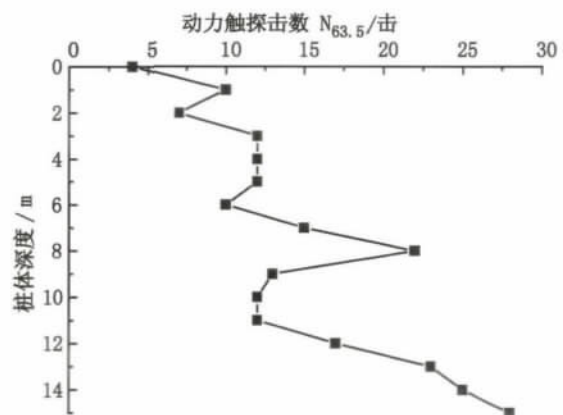


图4 动力触探击数变化曲线

Fig. 4 The curves of dynamic number

5.3 载荷试验

静载试验采用地锚反力梁装置,慢速维持荷载法,砂石桩复合地基承压板面积为 3.24 m^2 ,素混凝土单桩承载力承压板面积为 0.28 m^2 ,试验点最大加荷为设计承载力的 2 倍,砂石桩复合地基分 8 级加载,素混凝土单桩分 10 级加载。图 5、图 6 分别为砂石桩复合地基静载试验成果曲线和素混凝土单桩承载力静载试验成果曲线。

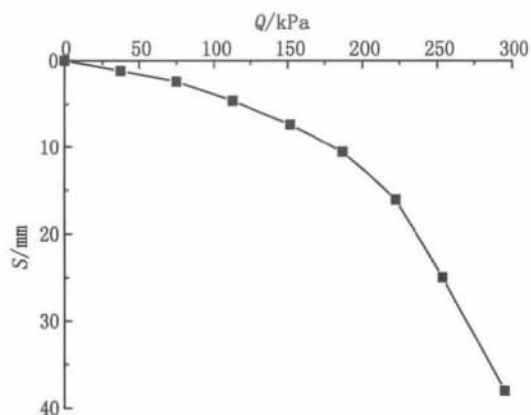


图5 砂石桩复合地基Q-S曲线

Fig.5 The Q-S curve of the bearing capacity of sand-gravel pile foundation

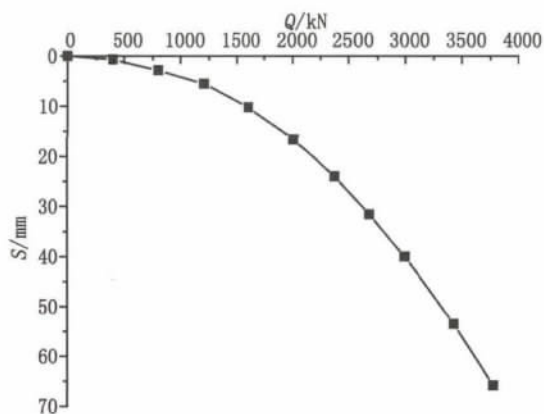


图6 素混凝土单桩承载力Q-S曲线

Fig.6 The Q-S curve of the bearing capacity of the plain concrete pile

由图 5 砂石桩复合地基静载试验 Q-S 曲线知,曲线为缓变型,极限承载力 $Q_u = 300 \text{ kPa}$,复合地基承载力特征值取极限承载力的一半,故 $f_{sk} = 150 \text{ kPa}$ 。

由图 6 素混凝土单桩承载力静载试验 Q-S 曲线知,曲线为缓变型,取 $s = 40 \text{ mm}$ 所对应的荷

载值为单桩极限承载力 $Q_u = 3000 \text{ kN}$,单桩承载力特征值取极限承载力的一半,故 $R_a = 1500 \text{ kN}$ 。

由于场地条件所限,静载试验采用小承压板,即先检测砂石桩复合地基承载力,再检测素混凝土桩单桩承载力,二者进行复核算。由上面分析知,素混凝土单桩承载力特征值 $R_a = 1500 \text{ kN}$,砂石桩与桩间土复合地基承载力 $f_{sk} = 150 \text{ kPa}$ 。置换率 $m = 0.087$,桩截面积 $A_p = 0.2826 \text{ m}^2$,桩间土承载力折减系数 β 取 0.75,据规范^[7]式 9.2.5:

$$f_{spk} = mR_a/A_p + \beta(1-m)f_{sk}$$

经计算 $f_{spk} = 564 \text{ kPa} > 330 \text{ kPa}$,满足设计要求。

6 结语

1) 组合型复合地基可有效消除砂土液化,提高桩间土强度,砂石桩在淤泥层中的挤土效果不明显,随着时间的增长,砂石桩强度仍会有一定程度的提高。

2) 采用组合型复合地基,砂石桩桩体质量可靠,除上部 1.0 m 左右桩体质量较差外,其余桩体均达到中密以上状态。砂石桩在淤泥质粉质粘土中的成桩质量良好,但充盈系数较大,扩径问题严重。

3) 组合型复合地基可显著提高地基承载力,能够很好的满足设计要求。建议在条件允许的情况下,静载试验尽量采用大承压板,结果会更真实、准确。

参考文献:

- [1] 吴军, 槐东升. 大型储罐组合型复合地基研究[J]. 科技风, 2008 (7): 15.
- [2] 王颖光. 组合型复合地基处理大型储罐软土地基的设计探讨[J]. 炼油技术与工程, 2004, 34(9): 56-59.
- [3] 王贵和, 季荣生, 马孝春. 碎石桩-CFG 桩组合型复合地基设计理论与工程实践[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(5): 248-251.
- [4] 孙晓东. 高真空动力固结法在曹妃甸工业区吹填土地基中的应用[J]. 工程勘察, 2013 (3): 31-36.
- [5] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [6] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S].
- [7] JGJ 79-2002 建筑地基处理技术规范[S].

(责任编辑 王利君)