

文章编号:1007-2993(2015)01-0017-05

# 刚-柔性桩复合地基在曹妃甸吹填土地地的应用

张文秀

(大地工程开发(集团)有限公司,北京 100102)

**【摘要】**曹妃甸数字化煤炭储配基地工程的建设场地是围海造地形成的,上部为软弱且具有中等液化的吹填土地层,而拟建构筑物对地基强度和变形均要求很高,地基承载力要求达到 320 kPa,变形控制要求严格。针对此种地层情况和构筑物特征,设计方案提出采用刚-柔性桩复合地基方案,结合两种工法的优势,柔性桩有效加固桩间土,消除负摩阻力和液化;而刚性桩则大幅提高承载力、控制沉降。着重介绍了该工法的设计理念、复合地基承载力和沉降计算模式,通过具体工程实例、设计方案和试验性施工情况的介绍,阐述了该工法的优点和应用。实践证明,该工法具有良好的经济和社会效益,值得在类似地区类似工程场地大规模应用。

**【关键词】**刚-柔性桩复合地基;砂石桩;素混凝土桩;试验性施工;静载荷试验;有粘结强度桩;散体材料桩

**【中图分类号】** TU 472

**【文献标识码】** B

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2015.01.005

## The Application of Rigid-Flexible Pile Composite Foundation in Caofeidian Dredger Fill Venues

Zhang Wenxiu

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

**【Abstract】**Caofeidian coal storage and distribution of digital base project construction site is formed by land reclamation, the upper part is weak and has a moderate layer of liquefied land reclamation, and the proposed structure of the foundation of strength and deformation are demanding, the foundation bearing capacity required to achieve 320 kPa, deformation control demanding. Stratigraphy and structures for such characteristics, the design made using rigid-flexible piles composite foundation program, combining the advantages of both method, the flexible pile reinforced soil between piles effectively, eliminated negative friction resistance and liquefaction; rather rigid pile provided a substantial increase in bearing capacity and sedimentation control. This paper describes the design concept of the rigid-flexible piles composite foundation, the calculation patterns of bearing capacity and settlement, through specific examples of projects, introduce design program and experimental construction, described the advantages and applications of the method. Practice has proved that the rigid-flexible piles composite foundation has good economic and social benefits, similar projects in similar areas worthy of large-scale application.

**【Key words】**rigid-flexible piles composite foundation; sand-gravel piles; concrete pile; experimental construction; static loading test; bond strength pile; granular media piles

### 0 引言

工程建设规模的扩大和土地条件的制约对地基基础的设计和施工均提出了更高的要求。为了使复合地基满足日益苛刻的承载力和变形的需要,在复合地基的设计中可根据地层特点将各种地基处理形式联合应用于一个场地,发挥各自的优势。刚-柔性桩复合地基就是将能够大幅提高承载力、控制变形的刚性桩和造价较低、可有效改善上部土层承载性能的柔性桩组合在一起进行地基处理,从而达到优

化设计的目的。

曹妃甸数字化煤炭储配基地工程场地地层上部 5~15 m 为吹填土地层,主要是粉砂、粉质粘土及淤泥质粉质粘土层,粉砂呈松散状,为中等液化地层,粉质粘土和淤泥质粉质粘土(局部含水量高为淤泥)呈流塑或软塑状。吹填土整体强度非常低,压缩性高,土中有机质含量高,是比较难进行地基处理的土层之一。本文将从刚-柔性复合地基的设计思想和设计计算出发,结合工程实例,对刚-柔性复合地基

**作者简介:**张文秀,1978年生,男,汉族,山西阳泉人,注册土木工程师(岩土),主要从事岩土工程勘察设计。

E-mai:zwx9610@163.com

在吹填土地基中的应用进行分析和研究。

### 1 刚-柔性桩复合地基的设计思想

由刚性桩和柔性桩组成的复合地基称为刚-柔性桩复合地基。在刚-柔性桩复合地基中,刚性桩较长,柔性桩较短,是一种长短桩复合地基。这种复合地基结合了两种工法的优势,较长的刚性桩可把荷载传递给深处较好的土层,有利于大幅提高承载力和控制沉降。而较短的柔性桩可有效改善浅层土的承载性能,承担部分荷载,并协同控制沉降,同时也具有较好的经济性。刚-柔性桩复合地基通过较长的刚性桩和较短的柔性桩优化组合,形成空间变刚度复合地基,不仅承载性能好,而且具有较好的经济性<sup>[1]</sup>。

处理吹填土地层时对刚性桩的选择一般采用施工工艺比较成熟、应用广泛的压灌素混凝土桩。该工法采用长螺旋钻机成孔或旋挖成孔,然后用混凝土输送泵以高压将流动性很好的混凝土通过钻具中心管送至钻孔内成桩,其特点是钻孔成桩一次完成,处理深度大,能在水下作业,施工速度快,工期短,质量易控制,单桩承载力高,低噪声、无泥浆污染。桩顶铺设褥垫层,由桩、桩间土和褥垫层一起构成复合地基<sup>[2]</sup>。

处理吹填土时,柔性桩可选用水泥土搅拌桩、高压旋喷桩、砂石桩。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<sup>[1,3]</sup>。

### 2 刚-柔性桩复合地基的设计计算

#### 2.1 刚-柔性桩复合地基的承载力计算

根据刚性桩和柔性桩在复合地基中的作用,将刚性桩作为主桩,柔性桩作为辅桩。主桩和辅桩对应的单桩承载力分别为  $R_{a1}$  和  $R_{a2}$ , 面积置换率分为  $m_1$  和  $m_2$ , 根据《刚-柔性桩复合地基技术规程》JGJ/T 210 及其他资料<sup>[4-6]</sup>, 复合地基承载力特征值  $f_{spk}$  计算公式为:

$$f_{spk} = \eta_1 m_1 R_{a1} / A_{p1} + \eta_2 m_2 R_{a2} / A_{p2} + \eta_3 (1 - m_1 - m_2) f_{sk} \quad (1)$$

式中:  $f_{sk}$  为处理后桩间土的承载力特征值;  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$  分别为刚性桩、柔性桩和桩间土的承载力发挥系数。

#### 2.2 刚-柔性桩复合地基的沉降计算

根据目前的研究成果,沉降计算一般采用基于土体的计算方法,即以土体为分析对象,复合地基的

沉降  $s$  包括三部分,分别是刚性桩、柔性桩与土构成的复合土层压缩量  $s_1$ ; 柔性桩桩端以下、刚性桩与土构成的复合土层压缩量  $s_2$ ; 刚性桩桩端以下天然土层压缩量  $s_3$ <sup>[1,4]</sup>。

其中下卧区压缩量  $s_3$  采用分层总和法计算,计算公式为:

$$s = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_s} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (2)$$

式中:  $\psi_s$  为沉降计算经验系数;  $p_0$  为对应于荷载效应准永久组合下的基础底面处的附加压力;  $E_s$  为压缩模量;  $z_i$ 、 $z_{i-1}$  为基础底面至第  $i$  层、 $i-1$  层土的距离;  $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}_{i-1}$  分别为基础底面计算点至第  $i$ 、 $i-1$  层土底面范围内的平均附加应力系数。

加固区压缩量  $s_1$  和  $s_2$  采用复合模量法计算,其原理同分层总和法相同。只需将其中的压缩模量换算为复合土层的压缩模量,换算方法参见《刚-柔性桩复合地基技术规程》(JGJ/T 210), 此处不再赘述<sup>[1]</sup>。

### 3 工程实例

#### 3.1 工程概况

曹妃甸数字化煤炭储配基地工程场地为吹填土形成的建设场地, 拟建 2 号堆场为直径 120 m, 最大堆煤高度 34 m 的圆形堆场, 要求地基承载力特征值 320 kPa。

场地前期经过预处理, 场地地层条件很差, 上部约 5~15 m 为吹填土地层, 场地地层情况简述如下:

①-1 粉砂 ( $Q^{ml}$ ): 黄褐、灰褐色, 有腥臭味, 松散—密实, 以中密为主, 层厚 0.90~9.20 m。

①-2 粉砂 ( $Q^{ml}$ ): 灰褐色, 有腥臭味, 松散—中密, 以松散为主, 层厚 0.50~10.30 m。

①-3 粉质粘土 ( $Q^{ml}$ ): 以粉质粘土为主, 灰褐色, 具有腥臭味, 软塑, 层厚 0.30~9.60 m。

①-4 淤泥质粉质粘土 ( $Q^{ml}$ ): 以淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土为主, 局部地段含水量高为淤泥, 灰褐色, 流塑, 层厚 0.30~12.30 m。

②-1 粉砂 ( $Q_i^{sl}$ ): 灰褐色, 具有腥臭味, 松散—密实, 以稍密为主, 层厚 0.80~8.20 m。

②-2 粉细砂 ( $Q_i^{sl}$ ): 灰褐色, 具有腥臭味, 中密—密实, 层厚 2.70~18.80 m。

③ 粉质粘土 ( $Q_i^{sl}$ ): 灰褐、灰黑色, 具有腥臭味, 软—可塑, 层厚 0.30~9.40 m。

④ 粉土 ( $Q_i^{sl}$ ): 灰褐、灰黄色, 具有腥臭味, 密实, 层厚 0.40~6.90 m。

⑤粉质粘土( $Q_3^{al}$ ):以粉质粘土为主,局部夹多层粉土、粘土薄层。灰褐、黄褐色呈韵律状,夹灰绿色条纹,可塑—硬塑,层厚 0.20~19.30 m。

⑤-1 粉砂( $Q_3^{al}$ ):灰黄色,密实。层厚 0.20~6.80 m。

⑥粉细砂( $Q_3^{al}$ ):灰黄色,密实。层厚 0.10~16.80 m。

⑦粉质粘土( $Q_3^{al}$ ):黄褐色,硬塑,最大揭露厚度 6.00 m。

层①为吹填土地层,除了预处理形成的层①-1粉砂硬壳外,其下整体强度低,压缩性高,属欠固结土,有机质含量高;中部层②粉细砂、③粉质粘土和④粉土为第四系全新统( $Q_4$ )海相沉积地层,整体强度和压缩性中等;下部层⑤粉质粘土、⑥粉细砂和⑦粉质粘土为第四系更新统( $Q_3$ )河流相地层,整体强度高,压缩性较低。

层①-1粉砂、①-2粉砂和②-1粉砂为液化地层,平均厚度 9.20 m,场地属中等液化场地。

场地地下水稳定水位埋深 0.06~1.65 m,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。

### 3.2 设计方案

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,地基强度要提高到 320 kPa,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桩——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。但上部软弱和液化地层制约了素混凝土桩复合地基承载力的提高,且不符合复合地基的“竖向增强体和基体共同承担荷载”的设计理念。需对上部软弱的桩间土进行处理,提高其强度,消除液化。形成以素混凝土桩为主桩,其他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。

与主桩素混凝土桩组合的辅桩有:水泥土搅拌桩、高压旋喷桩、砂石桩。

根据场地的地层条件,从提高地基强度、控制变形、消除液化三个方面分析上述方案的可行性。由于场地上部的粉砂层为中等液化土,要消除其液化,水泥土搅拌桩和高压旋喷桩不具有可行性。同时地下水中高含量的  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  对水泥具有腐蚀性,吹填土有机质含量高的特性,都制约了水泥土搅拌桩处理的效果。从施工质量方面考虑,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。

因此,综合考虑上述几种方案的适宜性,设计方案采用砂石桩+素混凝土桩组合型复合地基,素混凝土桩采用旋挖钻机成孔,砂石桩采用振动沉管成孔,桩顶铺设 700 mm 加筋砂石垫层。砂石桩和素混凝土桩正方形布置,桩间距取 3 倍桩径,在砂石桩正方形中心布置素混凝土桩。复合地基先施工砂石桩,再施工混凝土桩。

素混凝土桩设计桩径 600 mm,有效桩长 27.0 m,桩间距 1.8 m,面积置换率  $m_1=8.7\%$ ,桩端持力层为⑤粉质粘土,单桩竖向承载力特征值

$$R_{a1} = u_p \sum q_{si} l_{pi} + \alpha_p q_{pk} A_p = 1180 \text{ kN} \quad (3)$$

砂石桩设计桩径 600 mm,桩间距 1.8 m,以层②-2粉细砂为桩端持力层,有效桩长 15 m,单桩竖向承载力特征值  $R_{a2}$  取 280 kN,面积置换率取  $m_2=8.7\%$ 。

桩间土承载力特征值  $f_{sk}=80$  kPa,素混凝土桩承载力发挥系数  $\eta_1$  取 0.8,砂石桩承载力发挥系数  $\eta_2$  取 0.7,桩间土承载力发挥系数  $\eta_3$  取 0.55。

复合地基承载力特征值

$$f_{spk} = \eta_1 m_1 R_{a1} / A_{p1} + \eta_2 m_2 R_{a2} / A_{p2} + \eta_3 (1 - m_1 - m_2) f_{sk} = 387 \text{ kPa} \quad (4)$$

沉降计算结果,堆场总沉降量  $s=61.5$  mm。承载力和变形验算均满足设计要求。

### 3.3 复合地基检测

#### 3.3.1 复合地基检测方案

本工程选定了三处工程地质条件具有代表性的场地进行试验性施工,以进一步确定设计参数和检验处理效果。

本文取其中的 II 区进行分析研究。考虑到桩间距在 3~4 倍桩径之间选择,故测试方案桩间距取 3.5 倍桩径,桩径分别取  $d=600$  mm 和  $d=800$  mm 两种进行试验性施工。本文取桩径  $d=600$  mm 方案的试验数据进行分析研究,平面布置见图 1。

砂石桩+素混凝土桩复合地基的检测包括如下项目:

1) 桩体密实度检测,采用重型圆锥动力触探,连续测试。

2) 对桩间土密实度检测,评价砂土液化。采用标准贯入试验,测试间距 1.0 m,检测点位于砂石桩正方形布置的中心,并取样进行室内粘粒含量试验。

3) 砂石桩单桩承载力载荷试验。

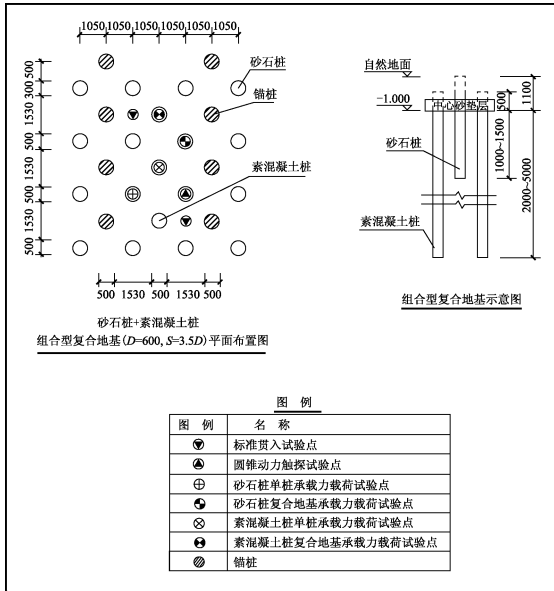


图1 桩位布置平面图(单位:mm)

4)砂石桩复合地基承载力载荷试验,并检测桩土应力比。

5)混凝土桩单桩承载力载荷试验。

6)素混凝土桩复合地基承载力载荷试验,并检测桩土应力比。

7)层②-2粉细砂以下各层土桩侧阻力、桩端土端阻力。

3.3.2 检测结果

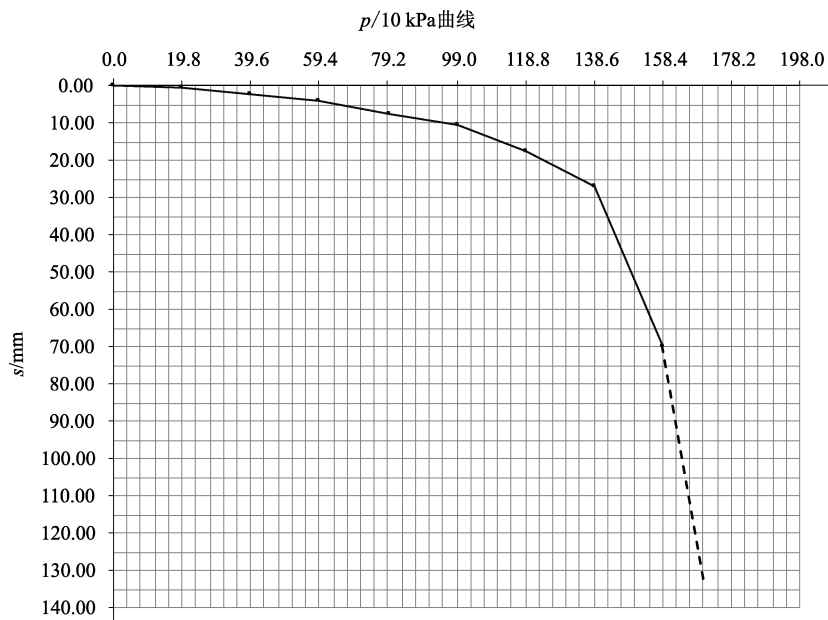
单桩静载荷试验结果见表1,单桩复合地基载荷试验结果见表2,载荷试验曲线见图2。从检测结果可以看出,在桩距采用3.5倍桩径的情况下,无论从单桩承载力还是复合地基承载力来看,都超过了设计方案所采用的数值。可以认为,在桩距采用3倍桩径时,复合地基承载力可以满足要求。

表1 单桩静载试验结果表

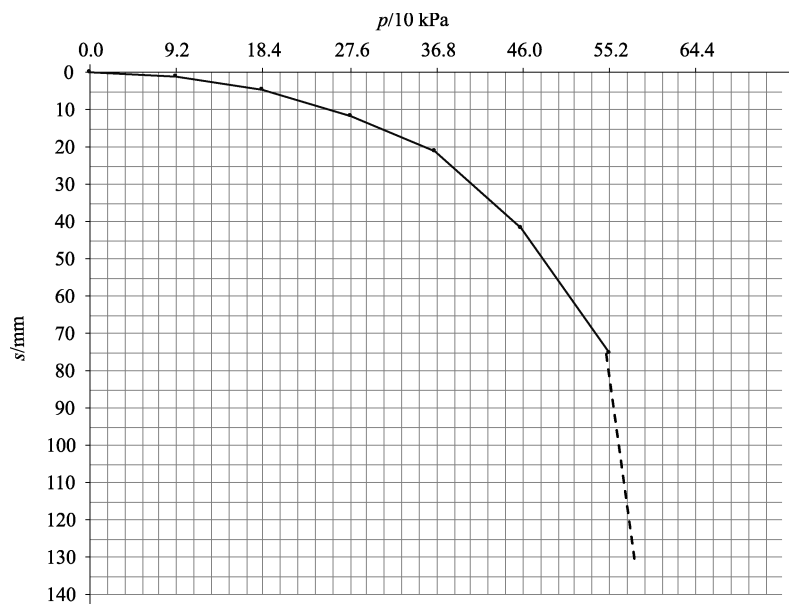
试验编号	桩径/m	桩长/m	桩型	极限承载力/kN	极限承载力对应沉降/mm
65#	0.6	27.6	素混凝土桩	4900	23.23
8#	0.6	16.0	砂石桩	562	21.28

表2 单桩复合地基载荷试验结果表

试验点号	桩径/m	桩长/m	桩型	压板边长/m	极限承载力/kN	极限承载力对应沉降/mm	复合地基承载力特征值/kPa
68#	0.6	27.5	素混凝土桩	2.1	7000	69.98	792
41#	0.6	15.8	砂石桩	2.1	2430	75.57	276



(a) II区68# 试验点



(b) II区 41# 试验点

图2 单桩复合地基静载荷试验  $p-s$  曲线

通过桩土应力比检测,确定该试验区素混凝土复合地基桩土应力比为 67.8,砂石桩复合地基桩土应力比 6.7。

低应变检测桩的完整性,被检测的 5 根桩皆为 I 类桩。

砂石桩桩体密实度:除桩体顶部松散外,中部至底部中密—密实。

标贯试验结果表明:桩间土液化基本消除。

各层土桩侧阻力、桩端土端阻力实测值均高于设计采用值。

通过试验性施工,证明设计方案是可行的。

#### 4 结论

1)刚-柔性桩复合地基最大限度地结合刚性桩和柔性桩各自的优势,较长的刚性桩可把荷载传递给深处较好的土层,有利于大幅提高承载力和控制沉降。而较短的柔性桩可有效改善浅层土的承载性能,承担部分荷载,并协同控制沉降,同时也具有较好的经济性。刚-柔性桩复合地基不仅承载性能好,而且具有较好的经济性。

2)用刚-柔性桩复合地基处理吹填土地层,是一

种较好的方法,具有较好的经济和社会效益。

3)目前《刚-柔性桩复合地基技术规程》(JTJ/T 210—2010)所介绍的柔性桩主要为水泥土搅拌桩、旋喷桩,均为有粘结强度桩,而本工程设计方案采用的砂石桩为散体材料桩。通过本工程试验性施工证明,作为散体材料桩的砂石桩也可以和刚性桩相组合,形成刚-柔性桩复合地基,并取得较好的处理效果。

#### 参考文献

- [1] JGJ 210—2010 刚-柔性桩复合地基技术规程[S].
- [2] JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S].
- [3] 朱奎,徐日庆. 刚-柔性桩复合地基[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [4] 闫明礼,张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [5] 闫明礼,王明山,闫雪峰,等. 多桩型复合地基设计计算方法探讨. 岩土工程学报,2003,25(3):352-355.
- [6] 何广谏,孙国维,梁东升. 关于“多桩型复合地基设计计算方法探讨”的讨论. 岩土工程学报,2003,25(6):769.

收稿日期:2014-04-17