

组合桩在唐山沿海地区的试验应用

郑思光, 冯士广, 纪燕祥, 赵志杰, 何若梅, 刘建兵, 孙宇佳
(河北省地矿局第二地质大队, 河北唐山 063000)

摘要:唐山沿海地区由于自然历史原因造成土体结构与内陆地区相差甚远,土体结构多层,且上部以软弱粘性土、砂类土为主,使得单一桩型成本较高、效率低、施工难度大且易造成环境污染。针对这些问题并结合本地区地层,设计试验了一套粉喷桩和预应力混凝土管桩相结合的柔刚组合桩施工方法,降低了施工难度、提高了效率、降低了成本,实现桩基施工无泥浆排放的节能环保示范,为类似地区地基基础工程施工提供了借鉴和参考。

关键词:组合桩;柔刚组合桩;粉喷桩;预应力混凝土管桩;单桩承载力;沿海地区

中图分类号:TU473.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)11-0071-07

Experimental Application of Composite Pile in Tangshan Coastal Area/ZHENG Si-guang, FENG Shi-guang, JI Yan-xiang, ZHAO Zhi-jie, HE Ruo-mei, LIU Jian-bing, SUN Yu-jia (The Second Geological Team of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Tangshan Hebei 063000, China)

Abstract: Due to the natural and historical reasons, the soil structure is very different to that of inland area in Tangshan coastal area mainly with multi-layer soil structure and soft clay & sand soil in upper part, which leads to high cost of the single pile type with low efficiency, difficult construction and being easy to cause environmental pollution. According to this situation and considering the formation in this area, a set of construction method of flexible-rigid composite pile with cement rejection pile and pre-stressed concrete pipe pile is designed with construction difficulties and cost reduction, efficiency improvement and realization of energy saving and no mud recharge to be an environmental protection demonstration, which provides the reference for foundation engineering construction in this area.

Key words: compound pile; flexible and rigid composite pile; cement rejection pile; pre-stressed concrete pipe pile; bearing capacity of single pile; coastal area

0 引言

唐山沿海地区由于自然历史原因造成土体结构与内陆地区相差甚远,土体结构多层,第四系沉积环境复杂,以河流三角洲及河海相沉积为主,上部地层以软弱粘性土、砂土为主,地表多为人工吹填而成。使得单一桩型造价成本较高、效率低、施工难度大且易造成环境污染。

本次组合桩施工场地位于曹妃甸和京唐港区2个唐山沿海地区重要发展区域。曹妃甸区第四系全新统地层厚度20m左右,以软弱的粉质粘土为主,地表以冲填土为主。京唐港区第四系全新统地层厚度15m左右,上部以砂土、粉土为主,15m以深以中密—密实砂土为主。以往唐山沿海地区地基处理方法以单一的长螺旋钻孔压灌桩(CFG桩)、预应力混凝土管桩、钻孔灌注桩为主。

在岩土工程的实际应用中,单一桩型有一定的局限性:砂石桩等散体材料桩对软弱地基处理后承

载力提高幅度不大;水泥土类桩的桩身强度受土质、施工工艺影响较大;在软土中采用振动沉管灌注桩施工时,由于振动和挤土效应易造成缩径和断桩现象,遇密实砂土层沉桩困难;预应力管桩在软土中单桩承载力较低,且需进入密实土层,桩身材料得不到充分发挥;CFG桩由于当前设备所限(最大桩长25m左右,桩径500~600mm),单桩承载力有限;钻孔灌注桩:施工程序复杂、施工质量难控制且产生大量泥浆造成环境污染。因此,急需找到一种适合本地区的施工成本低、穿透上部硬土夹层能力强、场地适应性好、承载力高、施工工期短、节能环保的组合桩型。

组合桩利用天然周土加固桩、穿透硬土夹层或对桩端土进行加固,提高桩侧摩阻力和端阻力,芯桩具有足够的桩身截面强度,能满足上部承载要求使单桩承载力显著提高。通过散体、柔性、刚性桩有效组合,较好的解决了以上问题。

收稿日期:2017-10-25

作者简介:郑思光,男,汉族,1980年生,副队长,高级工程师,土木工程、水资源及其利用专业,从事水文工程环境地质、岩土工程勘察与施工、地质灾害防治工程、矿山环境治理和探矿工程工作,河北省唐山市路北区北新西道157号, siguang103@163.com。

1 组合桩概述

组合桩是将常用的散体材料桩、柔性水泥土类桩、刚性混凝土类桩3种单一桩型相互组合,后一种桩型在前一种桩体上进行再次施工,形成互补增强的组合桩型。可分为散体桩与柔性桩组合成的散柔组合桩、散体桩与刚性桩组合成的散刚组合桩、柔性桩与刚性桩组合成的柔刚组合桩,以及散柔组合桩和刚性桩组合成的三元组合桩。其中在散体桩、柔性桩或散柔组合桩桩体上再进行刚性桩施工后形成的桩又称为劲芯组合桩。劲芯组合桩由内芯和外芯两部分组成,根据内芯的长度可又分为长芯、等芯和短芯等。常用组合桩结构见图1(以柔刚组合桩为例)。

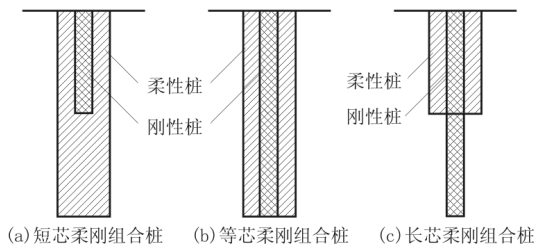


图1 柔刚组合桩结构示意图

组合桩适用于淤泥、淤泥质土、粘性土、粉土、粉砂以及人工填土等地基。它避免了单一桩法的缺点

而综合了各自桩法的优点,质量可靠、施工简便、造价低廉,强度、刚度、密度较高,桩身体积较大,因而具有较高的单桩承载力,同时大幅度改善了桩间土的软弱状态和承载力参与度。它可作为复合地基中的竖向增强体,也可作为单一刚性桩(抗剪、抗拔、抗压),还可用于基坑支护及防渗墙工程。真正实现了地基处理方法(物理、化学固化)和桩基有机结合,桩土共同作用,乃至桩土一体化。因此,组合桩对于土体松散,以粘性土与砂类土为主的沿海地区,是一个更好的选择。以下两个案例分别是组合桩中短芯桩和长芯桩在唐山沿海地区的应用。

2 短芯桩在曹妃甸的应用

2.1 工程概况

爱芭家具生产基地项目工程场地位于唐山市曹妃甸区中日合作园区,工程场地所属地貌单元属滨海平原。表层土为浅海人工吹填造地形成。

2.2 工程地质条件

根据本场地岩土工程勘察报告,场区多软弱的粉质粘土及液化砂土层。各土层情况如下所述,土层分布及相关参数见表1。

①杂填土(Q_4^{ml}):杂色,稍湿,松散。以粉土为主,

表1 爱芭家具项目土层分布及相关参数

层号	土层名称	平均厚度/m	组合桩参数				预应力管桩参数	
			侧阻力特征值 q_{sia}/kPa	端阻力特征值 q_{pa}/kPa	侧阻力调整系数 ξ_{si}	端阻力调整系数 ξ_p	侧阻力特征值 q_{sia}/kPa	端阻力特征值 q_{pa}/kPa
①	杂填土	1.35	0					
②	冲填土	3.49	13		1.5	0		
③	粉质粘土	0.95	20	80	1.7	40		
④	粉砂	5.76	15	110	2.0	15		
⑤	粉质粘土	4.39	20	85	1.7	2.1	40	
⑥	粉土	1.03	25	120	1.8	2.2	42	
⑦	粉质粘土	5.19	20	100	1.7	2.1	52	1900(16 < L ≤ 30)
⑧	粉土	2.26	25	140	1.8	2.2	44	2000(16 < L ≤ 30)
⑨	粉质粘土	3.13	25	120	1.6	2.2	58	2100(16 < L ≤ 30)
⑩	粉土		25	160	1.8	2.2		

含少量碎砖石等建筑垃圾。层厚1.20~1.80m,平均1.35m;层底埋深1.20~1.80m。

②冲填土(Q_4^{ml}):灰色,饱和,松散。采用吹填船方式吹填堆积,以粉土、粉细砂为主,含云母及贝壳碎片,局部含少量粉质粘土团块及淤泥质土。层厚2.80~4.30m,平均3.49m;层底埋深4.20~5.60m。 $f_{ak}=75kPa, q_{si}=13kPa$ 。

③粉质粘土(Q_4^{ml}):灰色,软塑。切面光滑,干强度及韧性中等,局部夹粉土薄层,含贝壳碎片。层厚0.70~1.20m,平均0.95m;层底埋深5.30~6.30m。 $f_{ak}=80kPa, q_{si}=20kPa$ 。

④粉砂(Q_4^{ml}):灰色,稍密,饱和。石英长石质,磨圆度中等,级配不良,含云母,局部含粉土薄层。层厚5.10~6.30m,平均5.76m;层底埋深10.70~11.70m。 $f_{ak}=110kPa, q_{si}=15kPa$ 。

⑤粉质粘土(Q_4^m):灰色,软塑。切面光滑,干强度及韧性中等,含贝壳碎片,局部夹粉土薄层。层厚3.50~5.20 m,平均4.39 m;层底埋深15.20~16.20 m。 $f_{ak}=85$ kPa, $q_{si}=20$ kPa。

⑥粉土(Q_4^m):灰色,稍密—中密,饱和。切面粗糙,干强度及韧性低,摇振反应中等,含云母。层厚0.70~1.30 m,平均1.03 m;层底埋深16.00~16.70 m。 $f_{ak}=120$ kPa, $q_{si}=25$ kPa。

⑦粉质粘土(Q_4^m):灰色,软塑—可塑。切面稍有光泽,干强度及韧性中等,含贝壳碎片,局部含粉土薄层。层厚4.20~6.10 m,平均5.19 m;层底埋深20.20~21.50 m。 $f_{ak}=110$ kPa, $q_{si}=20$ kPa。

⑧粉土(Q_4^m):灰色,稍密—中密,饱和。切面粗糙,干强度及韧性低,摇振反应中等,含云母。层厚1.80~3.30 m,平均2.26 m;层底埋深23.00~23.70 m。 $f_{ak}=140$ kPa, $q_{si}=25$ kPa。

⑨粉质粘土(Q_4^m):灰色,软塑—可塑。干切面稍有光泽,干强度及韧性中等,含贝壳碎片,局部含粉土薄层。层厚1.40~5.10 m,平均3.13 m;层底埋深25.00~28.40 m。 $f_{ak}=120$ kPa, $q_{si}=25$ kPa。

⑩粉土(Q_4^m):灰褐色,稍密—中密,饱和。切面粗糙,干强度及韧性低,摇振反应中等,含云母。该层为本次揭露的最深层,最大揭露厚度2.30 m。 $f_{ak}=160$ kPa, $q_{si}=25$ kPa。

2.3 组合桩设计

组合桩技术:粉喷桩桩径900 mm,桩长15.0 m;内插预应力管桩PHC-400AB-95-13。

单桩承载力计算如下。

2.3.1 组合桩桩侧破坏面位于内、外芯界面时

预应力管桩PHC-400AB-95-13,按下式计算:

$$\begin{aligned} R_a &= u^c q_{sa}^c l^c + q_{pa}^c A_p^c \\ &= 0.4 \times 3.14 \times 1500 \times 0.05 \times 13 + 2500 \times \\ &\quad (0.2^2 - 0.105^2) \times 3.14 \\ &= 1452 \text{ kN} \\ &> 1200 \text{ kN} \end{aligned}$$

式中: R_a ——组合桩单桩竖向抗压承载力特征值,kN; u^c ——组合桩内芯桩身周长,m; l^c ——组合桩复合段长度,m; A_p^c ——组合桩内芯桩身截面积, m^2 ; q_{sa}^c ——组合桩复合段内芯侧阻力特征值,kPa,宜按地区经验取值,无地区经验时,宜取室内相同配比水泥土试块在标准条件下90 d龄期的立方体(边长

70.7 mm)无侧限抗压强度的0.04~0.08倍,当内芯为预制混凝土类桩或外芯水泥土桩采用干法施工时宜取较高值,对散刚组合桩可取30~50 kPa; q_{pa}^c ——组合桩内芯桩端土的端阻力特征值,kPa,宜按地区经验取值,对长芯桩与等芯桩也可根据内芯桩型按现行行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)取值,对短芯散刚组合桩可取1200~1500 kPa,对短芯柔刚组合桩和短芯三元组合桩可取2000~3000 kPa。

2.3.2 组合桩桩侧破坏面位于外芯和桩周土的界面时

粉喷桩桩径900 mm,有效桩长15 m,按下式计算:

$$\begin{aligned} R_a &= u \sum \xi_{si} q_{sia} l_i + a \xi_p q_{pa} A_p \\ &= 0.9 \times 3.14 \times (3.49 \times 13 \times 1.5 + 0.95 \times 20 \times \\ &\quad 1.7 + 5.76 \times 15 \times 2 + 4.39 \times 20 \times 1.7 + 0.5 \times \\ &\quad 20 \times 1.7) + 0.45^2 \times 3.14 \times 100 \times 0.8 \\ &= 1290 \text{ kN} \\ &> 1200 \text{ kN} \end{aligned}$$

式中: u ——组合桩桩身周长,m; l_i ——组合桩复合段第*i*层土厚度,m; A_p ——组合桩桩身截面积, m^2 ,对散刚组合桩应取刚性桩桩身截面积,对柔刚组合桩和三元组合桩,当刚性桩桩长大于柔性桩或散柔复合桩桩长时,应当取刚性桩桩身截面积; q_{sia} ——组合桩复合段外芯第*i*层土侧阻力特征值,kPa,宜按地区经验取值,无经验时可按表1取值; q_{pa} ——组合桩端阻力特征值,kPa,宜按地区经验取值,也可取桩端地基土未经修正的承载力特征值; a ——组合桩桩端天然地基土承载力折减系数,对柔刚复合桩可取0.70~0.90,对三元组合桩可取0.80~1.00; ξ_{si} 、 ξ_p ——分别为组合桩复合段外芯第*i*层土侧阻力、端阻力调整系数,宜按地区经验取值,无经验时可按表1取值,非复合段均取1.0。

本实例为将管桩压入粉喷桩中大幅度提高了管桩的承载力,并使管桩的压入更加容易和方便。施工时,宜先采用大功率搅拌桩基施工柔性桩,再采用锤击式预制桩机施工刚性桩。刚性桩施工宜在柔性桩施工后6 h内进行。

2.4 经济分析

原设计采用预应力混凝土管桩PHC-500A-125-16.5,440根,单桩承载力特征值550 kN,工程造价130.7万元,经使用组合桩技术(粉喷桩桩长15.0

m,内插 PHC-400AB-95-13),220根,单桩承载力特征值 1200 kN,工程造价 108.5 万元,节省费用 20% 以上。施工现场见图 2,工程桩成桩见图 3。



图 2 施工现场



图 3 组合桩成桩

2.5 试桩及载荷试验结果

试桩 1:我们在该场地进行了两根大直径组合桩试验,采用直径 1200 mm、长 24 m 粉喷桩,内插长 22 m、直径 500 mm 预应力管桩;试桩 2:采用直径 1200 mm、长 24 m 粉喷桩,内插长 17 m、直径 600 mm 预应力管桩。试桩 1、试桩 2 在最大荷载 6000 kN 时,桩累计沉降量分别为 22.54、37.50 mm。试 1、试 2 桩的单桩竖向抗压承载力特征值均达到 3000 kN,满足设计要求,达到预期效果。试验桩成桩见图 4,静载试验曲线见图 5。



图 4 试验桩成桩

上述试验表明,组合桩的设计施工实现了沿海软弱粘性土地地区单桩承载力特征值 3000 kN 的突破,最大桩长不足 25 m,而预制桩、灌注桩要想达到

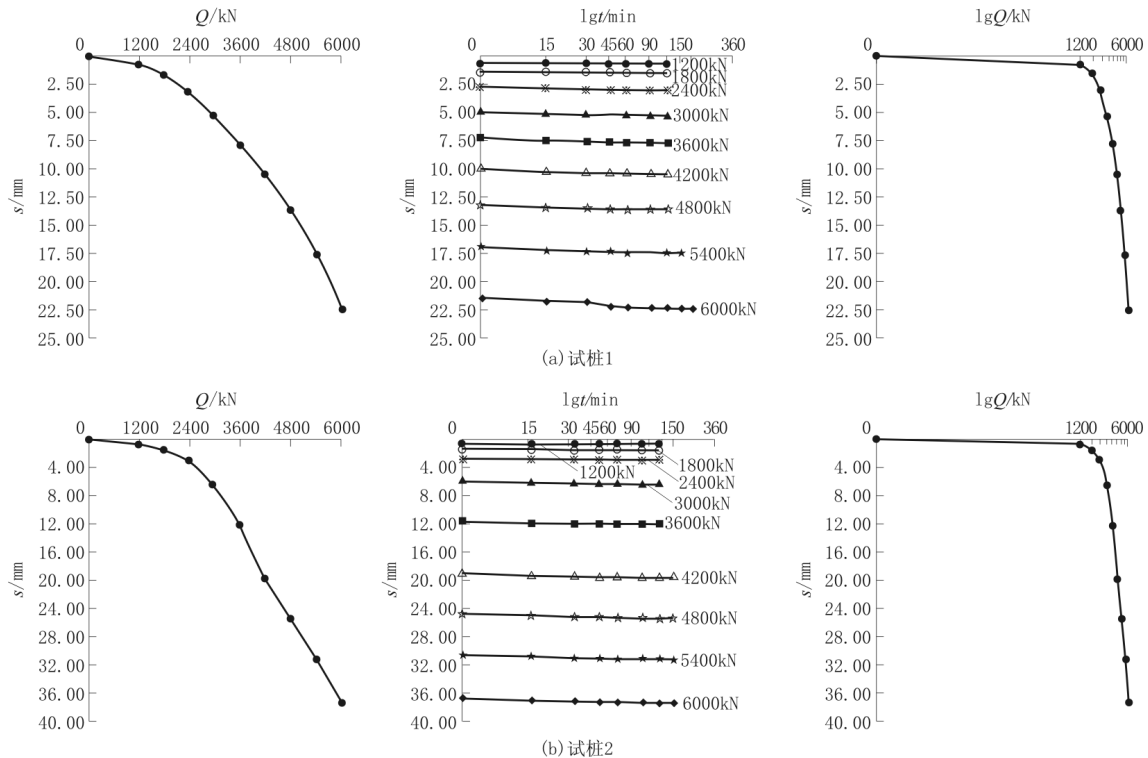


图 5 试桩静载试验曲线

如此高承载力桩长要达 50 m 以上。施工难度和费用会大大增加。

3 长芯桩在京唐港的应用

3.1 工程概况

海港旭达建材有限公司 2 × 180 万 t/年矿渣微粉工程场区位于唐山市京唐港海强路与港盛街交叉口西北侧。项目区交通便利,场地原始地貌单元为滨海河流冲洪积扇。原始地形平坦,地貌类型单一,地形简单。经近代人类生产活动,场地表层已被扰

动。

3.2 工程地质条件

场地地层上部除杂填土、素填土外,其余土层属第四系海陆交互沉积地层。根据地层的埋藏条件、岩性特征和物理力学性质指标,将场地地基土划分为 6 个工程地质主层,2 个工程地质亚层。从上至下分别为①₁杂填土、①素填土、②细砂、③粉质粘土、④₁细砂、④₂粉土、⑤粉质粘土、⑥细砂,各层土的工程地质分层及特征见表 2。

表 2 海港旭达项目地基土工程地质分层及特征

层号	土层名称	底板埋深/m	层厚/m	颜色	湿度	密实度(状态)	压缩性	土 层 描 述
① ₁	杂填土	2.30~2.70	1.20~3.30	杂	稍湿	松散		细砂为主,含粉土、杂物,夹有建筑垃圾、生活垃圾等
①	素填土	0.20~3.30	0.20~3.30	黄褐	稍湿	松散		细砂、粉土为主,局部夹粉土团块
②	细砂	9.20~10.80	5.50~7.60	灰	饱和	稍密—中密	中等—高	石英、长石为主,分选不均,级配良好,磨圆度中等。土质不均,局部夹粉质粘土薄层,偶见贝壳碎片
③	粉质粘土	13.30~14.80	3.00~5.10	灰		(可塑—软塑)	中等—高	切面稍有光泽,韧性及干强度中等,无摇振反应。土质不均,局部夹粉土、粘土薄层
④	细砂	20.00~39.00	0.20~16.40	灰—黄褐	饱和	中密—密实	中等—低	以石英、长石为主,分选不均,级配良好,磨圆度中等。砂质不纯,局部夹粉质粘土薄层
④ ₁	粉土	24.30~26.10	0.20~2.00	灰黄	稍湿—湿	密实	中等	切面粗糙无光泽,韧性及干强度低,摇振反应中等
⑤	粉质粘土	40.00~40.90	1.20~2.00	灰		(可塑)	中等—高	切面稍有光泽,韧性及干强度中等,无摇振反应。土质均匀,粘性大
⑥	细砂	>45.00	>4.50	灰	饱和	密实	中等—低	石英、长石为主,分选不均,级配良好,磨圆度中等。砂质不纯,局部夹粉质粘土薄层

该工程成品库车间原设计采用 PHC - 600AB - 110 - 30 预应力管桩,由于④层细砂呈中密—密实状,预应力管桩无法达到设计深度,虽经引孔,但施工效果不佳。改灌注桩费用大幅增加,产生大量泥浆无法处理。优化为组合桩后,该问题得到良好解决。

3.3 组合桩设计

设计采用内芯为预应力管桩 PHC - 500AB - 125 - 13,有效桩长 13 m;外桩为粉喷桩,桩径 900 mm,有效桩长 10 m;桩顶标高 - 2.9 m;桩端持力层④₁细砂。土层分布及相关参数见表 3。

表 3 海港旭达项目土层分布及相关参数

层号	土层名称	厚度/m	侧阻力特征值 q_{sia}/kPa	端阻力特征值 q_{pa}/kPa	侧阻力调整系数 ξ_{si}	端阻力调整系数 ξ_p
①	素填土	2.7	10			
②	细砂	6.7	26		2.0	2.7
③	粉质粘土	5.0	30		1.6	2.1
④	细砂	9.4	40	240	2.1	2.8

3.3.1 劲性复合桩桩侧破坏面位于内、外芯界面时

按下式计算:

$$\begin{aligned}
 R_a &= u^c q_{sa}^c l^c + u^c \sum q_{sja}^c l_j + q_{pa}^c A_p^c \\
 &= 0.5 \times 3.14 \times 2000 \times 0.05 \times 10 + 0.5 \times \\
 &\quad 3.14 \times (1.5 \times 20 + 1.5 \times 33) + 1800 \times \\
 &\quad 3.14 \times (0.25^2 - 0.125^2) \\
 &= 1959.75 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

式中: l_j ——组合桩非复合段第 j 层土厚度, m; q_{sja}^c ——组合桩非复合段内芯第 j 层土侧阻力特征值, kPa, 可按地区经验取值, 也可根据内芯桩型按现行行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008) 取值。

3.3.2 劲性复合桩桩侧破坏面位于外芯和桩周土的界面时

按下式计算:

$$\begin{aligned}
 R_a &= u \sum \xi_{si} q_{sia} l_i + u^c \sum q_{sja}^c l_j + q_{pa}^c A_p^c \\
 &= 0.9 \times 3.14 \times (6.5 \times 26 \times 2 + 3.5 \times 30 \times \\
 &\quad 1.6) + 0.5 \times 3.14 \times (1.5 \times 20 + 1.5 \times \\
 &\quad 33) + 1800 \times 3.14 \times (0.25^2 - 0.125^2) \\
 &= 1819.71 \text{ kN} \\
 &> 1800 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

式中: q_{sia} ——组合桩复合段外芯第*i*层土侧阻力特征值,kPa,宜按地区经验取值。无经验时可按表3取值; ξ_{si} 、 ξ_p ——分别为组合桩复合段外芯第*i*层土侧阻力、端阻力调整系数,宜按地区经验取值,无经验时可按表3取值,非复合段均取1.0。

综上:上述两者计算值取小值,则单桩承载力特征值为1800 kN。

3.4 设计优化分析

原设计采用预应力混凝土管桩PHC-600AB-110-30,单桩承载力特征值1750 kN,但由于地层较硬,桩端无法到达持力层,无法满足承载力要求。如设计灌注桩,则费用高、且产生大量泥浆。经使用组合桩技术(粉喷桩桩长10.0 m,内插PHC-500-125-13)优化,单桩承载力特征值1800 kN,可以节省费用20%以上。

4 作用机理分析

(1)管桩的压入会挤密水泥土体和桩周土体及桩端水泥土体,实测800 mm的水泥土桩在400 mm的劲芯压入后直径增大到860~870 mm,此桩周土体与水泥土体的界面粗糙紧密,粘结力较高,大幅度提高了桩身侧摩阻力(高于一般水泥土桩的7倍以上,也高于桩身平滑的管桩和方桩3倍)。干法水泥土体在受到劲芯挤密时会挤扩桩周土体,而湿喷浆体的挤扩效果较差。

(2)由于管桩与水泥土体粘结强度高,且当水泥土的无侧限抗压强度达到1.5 MPa以上时,其抗剪强度高达0.3 MPa,同时外芯水泥土也承担一定比例的荷载,内外芯之间不会发生相对移动。在上

部荷载作用下管桩会将荷载迅速传递到桩外芯和桩周土体,由于桩端下有较高强度的水泥土体,其端阻力也远远高于天然土体,同时提高了桩侧阻力,使管桩处于水泥土体的握裹侧限之中,其压屈条件较好,桩身抗压强度、抗水平力、抗拔力以及抗弯抗剪性能均达到大幅度提高。可用于高层建筑及深基坑支护工程。

(3)由于水泥土桩体积较大,造价低廉,其产生的较强粘结强度和侧摩阻力以及对劲芯的握裹作用,管桩水泥土复合桩及其它钢筋混凝土劲芯复合桩也具有较高的抗拔承载力。抗拔桩身要足够的抗拉强度,可采用以下方法:①预制时将钢绞线锚固在桩端并采用无粘结后张拉工艺;②已预制的普通管桩可在其桩端采用锚板固定钢绞线,从管桩内腔中引至桩顶并采用现浇混凝土填充,在强度达到70%时再采用后张拉工艺;③用现浇混凝土桩时在其桩身强度达到70%时采用后张拉工艺。桩顶施加的张拉荷载通过无粘结预应力筋施加于桩身下端,使内芯桩身混凝土受压,产生正泊松效应及桩身产生侧胀变形,同时挤扩外芯及桩周土体,大幅度提高侧阻力。

5 组合桩与传统桩型效能对比

通过曹妃甸爱芭家具生产基地项目(短芯桩)和京唐海港旭达项目(长芯桩)2个项目的现场试验检测,组合桩单桩承载力在原设计基础上提高2~3倍,同时预算造价比传统桩型可节省20%~30%的费用,并达到了无泥浆排放,造价低,工期短,施工简便。还可以节约资源、保护环境。组合桩与传统桩型效能对比见表4。

表4 组合桩与传统桩型效能对比

场 地	桩 型	单桩承载力特征值/kN	单桩费用/元	单位承载力/处理费用/(元·kN ⁻¹)	节省费用/%	备 注
爱芭家具	原设计	550	4300	7.82		
	组合桩	1200	6800	5.67	27.5	
	管桩 PHC-500A-125-16.5 外芯粉喷桩,桩径800 mm,桩长15.0 m 内芯管桩,PHC-400-95-13					
	预应力管桩	3000	18000	6.00		
	灌注桩	3000	22100	7.37		有泥浆排放,污染环境
试验桩	试桩1:外芯粉喷桩,桩径1200 mm,桩长24.0 m 内芯管桩,PHC-500AB-125-22	3000	13500	4.50	25.0~39.0	
	组合桩	3000	14000	4.67	22.0~37.0	
海港旭达	原设计	1750	10125	5.79		第④层细砂密实沉桩困难
	组合桩	1750	8000	4.57	21.1	
	外芯粉喷桩,桩径900 mm,桩长10.0 m 内芯管桩,PHC-500AB-125-13					

6 结语

组合桩的设计试验应用是在现有唐山沿海地区软基处理方法和桩基工程理论与实践的基础上进行的一次创新,改变了传统单一桩型和单一地基处理的概念,它综合了传统单一桩型和地基处理技术的优点,能根据土质情况、上部结构要求、加固目的有针对性、灵活地采取多种组合方式,调整各种桩的桩径、桩长、掺灰量、强度、颗粒级别、搅拌和复打次数等,使组合充分发挥出桩周软土摩阻力和桩底阻力又匹配材料强度而产生的足够高的单桩承载力,且能显著提高桩间土体强度和对承载的参与度,多种介质协调匹配,刚柔相济,相互补强,共同提高。还能有效地提高沿海地区软基强度及稳定性,快速降低地基压缩性,并保证整个地基的均匀性,满足设计要求。

组合桩的单桩承载力比原设计单一桩型提高了2~3倍,施工成本比传统单一桩型可节省20%~30%,无泥浆排放,节能环保,工期短,施工简便。还可以节约资源、保护环境。

通过项目实例试验应用,研究完善了一套组合桩的计算、设计、施工、检测技术方案和数据,实现了无泥浆排放、降费增效、绿色环保、工期短、承载力提高的设计试验初衷和效果,丰富了唐山沿海地区软基处理施工技术方法,推广应用前景非常广阔,可广泛应用于工业、建筑、港口、交通、水利等领域软弱地基处理,具有良好的社会效益、经济效益和生态效益。

参考文献:

- [1] JGJ 94—2008, 建筑桩基技术规范[S].
- [2] JGJ 79—2012, 建筑地基处理技术规范[S].
- [3] 张雁, 刘金波, 等. 桩基手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [4] DB 13(J)50—2005, 混凝土芯水泥土组合桩复合地基技术规范[S].
- [5] JGJ/T 327—2014, 劲性复合桩技术规范[S].
- [6] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 127-136.
- [7] 贺启鑫, 张智博, 季玉国, 等. 大连临海超大深基坑旋喷桩止水帷幕施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(12): 54-57.
- [8] 刘汉龙. 岩土工程技术创新方法与实践[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 34-58.
- [9] 张习上, 赵卫政, 张迎堂, 等. 高压旋喷桩内插预应力钢筋混凝土方桩围护体系的设计与施工[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(6): 61-64.
- [10] 常玉军, 刘毅, 张吉庆, 等. PRC管桩在基坑支护工程中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(6): 78-83.
- [11] 周永山, 余忠. 深层搅拌桩内插钢管新方法及其应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(8): 63-66.
- [12] 刘红军, 陈友媛, 孙涛, 等. 深层搅拌桩加筋施工技术及其工程应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, (S1): 1730-1733.
- [13] 王蕊. 旋喷桩内插型钢与搅拌桩内插型钢作围护墙的结合应用[J]. 地下工程与道, 2007, (3): 49-52, 61.
- [14] 秦雅飞, 胥勤勉, 姜洪涛, 等. 渤海湾北岸晚第四纪沉积物物理力学性质及其对地面沉降的影响[J]. 地质调查与研究, 2014, 37(2): 123-130.
- [15] 杨书遂, 盛立云. 渤海湾西岸滩海地区沉积相特征及其物理力学性质[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(3): 93-95.