

# 刚柔组合桩复合地基加固设计与应用

何亚萍

(浙江华展工程研究设计院, 浙江 宁波 315012)

**摘要:** 利用柔性桩减少刚性桩与土之间的刚度差, 使之与土结合良好, 达到提高复合地基承载力特征值和柔性桩软土地基加固的置换率、减少刚性桩复合地基变形及降低软地基处理造价等目的。将水泥石柔性短桩中心用沉管桩的工法施工低强度(C10)砼桩——“刚柔组合桩”的复合地基, 处理宁波北仑某仓库的软土地基, 经检测、计算验证和经济型比较, 表明刚柔组合桩复合地基法可应用于软土地基工程, 且能降低造价。

**关键词:** 刚柔组合桩; 复合地基; 置换率; 刚度差

**中图分类号:** TU473.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2011) 03-0063-04

宁波地区海积软土层分布十分广泛, 厚度不均, 物理力学性质差, 具有高压缩性、低渗透性和低强度特点, 地质环境十分敏感和脆弱。宁波平原第四系厚度在 60~120 m 之间, 最大厚度位于清水浦北侧; 大碶平原第四系厚度为 40~101 m, 最大厚度在大碶以北滨海地段。近年来, 随着填土荷载和使用荷载的增加, 工业厂房和公共建筑大面积地坪饱和和软土地基会产生持续固结沉降、不均匀沉降, 而且不能在短时间内稳定, 致使地坪开裂、高低起伏不平, 进而影响生产和使用。

对于宁波地区海积软土, 由于其渗透性极小、极细颗粒土之间结合水因电场作用不易析离, 而堆载或真空预压方案抽排的是泥水混体, 有可能出现堵塞排水通道, 从而影响软基处理的质量。单一桩型复合地基的桩、土垂直受力特性方面已取得一定的成绩<sup>[1-2]</sup>, 复合地基(水泥搅拌桩、石灰桩、碎石桩、低强度砼桩等)或桩基采用梁板架空的刚性堆场方案的工程价每平方米地坪在 250~350 元, 造价较高。随着工程实际和经济效益的需要, 复合地基技术出现了不同桩型的组合, 组合桩型复合地基作为一种超规范的新型地基基础型式, 相关研究开展较少<sup>[3-4]</sup>。刚柔性长短桩复合地基今年在杭州、温州等地得到尝试并取得很好效果, 然而由于承台、桩、土相互作用的复杂性, 使得这种桩

基形式尚未达到理论上的成熟和技术上的完善, 因而限制了其广泛推广<sup>[5-6]</sup>。

笔者结合北仑某物流加工中心单层中转仓库软土地基处理, 探求经济实用的复合地基方案, 研究在水泥搅拌桩的中心用沉管桩的工法施工低强度(C10)砼桩, 称为“刚柔组合桩”的复合地基, 以应用于软基地坪或堆场软地基处理, 对照水泥搅拌桩复合地基方案作技术与经济分析对比, 并对刚柔组合桩复合地基进行了载荷试验, 以验证单桩承载力。

## 1 工程概况及设计要求

北仑某物流加工中心单层中转仓库, 建筑长 240 m、宽 60 m, 柱网布置: 开间 12 m 和 30 m 二跨, 建筑高度 9~10 m, 采用钢筋砼柱与轻钢屋面结构, 主体结构基础采用 426 沉管灌注桩, 仓库堆载最大要求达到 7.5 t/m<sup>2</sup>。

地基土层参数见表 1, 从表 1 可见各地层承载力特征值较低。为满足堆载要求, 需要对软基进行处理。

软基处理的设计要求为: (1)软地基处理后的复合地基承载力特征值  $f_{ak} = 75 \text{ kPa}$ ; (2)软地基处理后地坪沉降量 < 200 mm; (3)软地基处理每平方米工程价小于等于 150 元。

表1 地层参数表

层号	土的名称	厚度/m	$f_{ak}/kPa$	$q_s/kPa$	$q_p/kPa$
1-2	粘土	0.8	65	12	-
2-1	淤泥质粘土	3.3	45	6	-
2-3	淤泥质粘土	16.9	48	7	-
4	淤泥质粘土	6.0	52	9	-
6-1	粘土或圆砾	-	90	18	1 200~2 300

## 2 刚柔组合桩与水泥搅拌桩复合地基方案比较

为达到软基处理的基本要求,笔者对水泥搅拌桩复合地基设计方案与刚柔组合桩复合地基设计方案进行设计和比选。

### 2.1 水泥搅拌桩复合地基设计方案

为降低复合地基的工程造价,采用长短桩结合的水泥搅拌桩的复合地基,长桩为14.0 m、短桩为10.0 m。布桩平面为1 800 mm×1 800 mm间隔长短桩的方格布桩。布桩平面图如图1所示,复合地基剖面如图2所示。

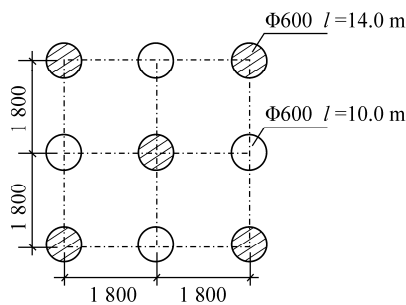


图1 布桩平面图

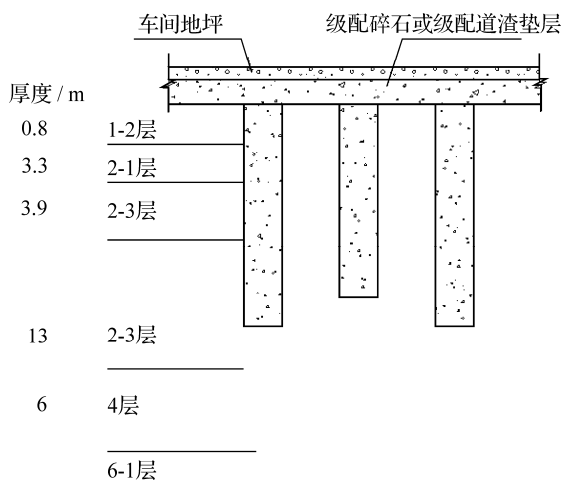


图2 复合地基剖面

根据建筑地基处理技术规范<sup>[7]</sup>和建筑地基基础设计规范<sup>[8]</sup>,长桩承载力特征值 $R_a=185$  kN,短

桩承载力特征值 $R_a=133.2$  kN,水泥搅拌桩平均承载力特征值 $R_a=159.1$  kN,复合地基承载力特征值 $f_{ak}=76.33$  kPa。

### 2.2 刚柔组合桩复合地基设计方案

刚柔组合桩复合地基是基于桩周土、柔性桩(水泥搅拌桩)、刚性桩(砼桩)的模量由小到大,通过柔性桩的过渡改善桩土协同工作性能;刚性桩进入良好持力层,阻止桩端刺入变形使桩的侧阻力达到最大发挥,使刚柔组合桩的承载力值提高的机理进行设计。在此基础上,笔者拟采用刚柔组合桩进行场地处理的设计和计算。

#### 2.2.1 布桩平面

刚柔组合桩布桩为2 500 mm×2 500 mm方格布桩,布桩平面如图3所示。 $\Phi 325$ 沉管灌注桩桩长27 m,桩端进入6-1土层,水泥搅拌桩直径600 mm,桩长8 m,刚柔组合桩进入土层剖面如图4所示。

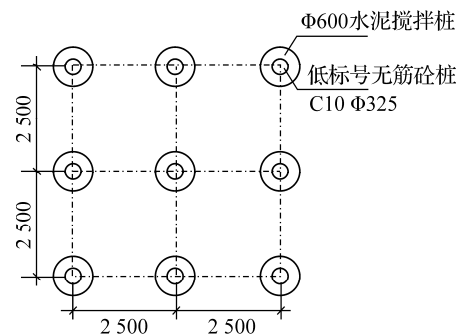


图3 刚柔组合桩平面布置

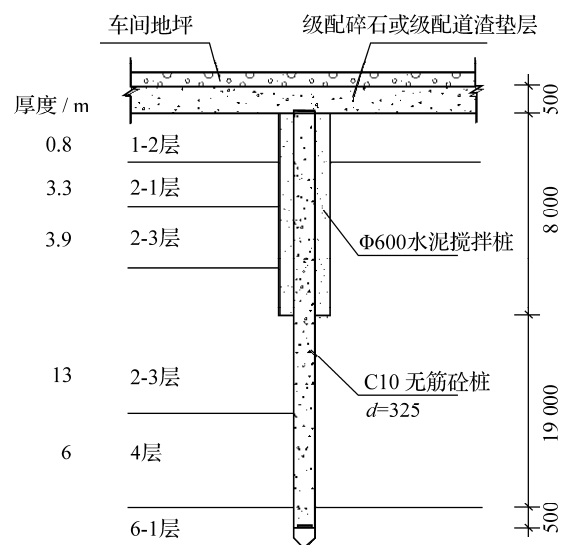


图4 刚柔组合桩剖面图

#### 2.2.2 刚柔组合桩承载力特征值计算

砼桩为刚性桩,水泥搅拌桩为柔性桩,水泥

搅拌桩中心插入砗桩(刚柔组合桩)。由于刚性桩与土的模量差过大,采用水泥搅拌桩过渡有利于桩土协同工作。刚性桩进入好的土层可阻止组合桩的刺入变形,从而使桩周土的侧阻力达到最大发挥,并使组合桩的承载力大幅度提高。 $\Phi 600$ 水泥搅拌桩的中心沉入 $\Phi 325$ 沉管灌注桩,水泥搅拌桩挤扩后的直径为 $\Phi 683$ ,刚柔组合桩承载力特征值:

$$R_a = U_1 \sum q_{si} \cdot l_i + U_2 \sum q_{si} \cdot l_i + A_2 q_p, \quad (1)$$

其中,  $U_1$  为水泥搅拌桩的截面周长, m;  $U_2$  为沉管灌注桩的截面周长, m;  $A_2$  为沉管灌注桩截面水平投影面积,  $m^2$ 。

将桩体参数和土层力学参数代入(1)式,可计算得到刚柔组合桩承载力特征值  $R_a = 368.27$  kN。

### 2.2.3 刚柔组合桩复合地基承载力特征值计算

根据布桩情况,可计算出刚柔组合桩复合地基的置换率  $m = 0.059$ ; 其余参数为  $A_1 = 0.366$   $m^2$ ,  $f_{ak} = 60$  kPa,  $\beta = 0.3$ 。将以上参数代入复合地基承载力特征值计算可得  $f_{ak} = 76.3$  kPa。由设计计算结果可知,刚柔组合桩复合地基承载力特征值  $> 75$  kPa, 满足地基处理的要求。

### 2.3 2种处理方法沉降计算

复合地基沉降计算主要发生在复合土层内即  $S_1$ , 按复合土层的计算压缩变形:

$$S_1 = (P_z + P_{zL})L / 2,$$

其中,  $P_z$  为搅拌桩复合土层顶面的平均附加压力值, kPa;  $P_{zL}$  为搅拌桩复合土层底面的平均附加压力值, kPa;  $L$  为桩长, m。  $E_{sp}$  为搅拌桩与土的复合压缩模量,  $E_{sp} = mE_p + (1-m)E_s$ ,  $E_s$  为桩周土的压缩模量为 2.1 MPa;  $E_p$  为桩身的压缩模量, MPa。

水泥搅拌桩复合地基为水泥搅拌桩身压缩模量,刚柔组合桩复合地基为水泥搅拌桩身与沉管灌注桩加权平均后的压缩模量。 $E_s$  为桩间土的压缩模量,先将水泥搅拌桩身与沉管灌注桩加权平均后的压缩模量再计算  $E_{sp}$  值。水泥搅拌桩身压缩模量为  $100 \sim 120 f_{cu}$ , 砗压缩模量为  $2 \times 10^6$  kPa, 计算结果:刚柔组合桩复合地基  $S_1 = 120$  mm, 水泥搅拌桩复合地基  $S_1 = 320$  mm。由此可见,在相同承载力特征值条件下,采用刚柔组合桩复合地基的沉降较水泥搅拌桩复合地基小。

### 2.4 地基处理费用计算对比

水泥搅拌桩加固费用为  $130$  元  $\cdot m^{-3}$ , C10 低标号

无筋砗费用为  $250$  元  $\cdot m^{-3}$ 。因此,刚柔组合桩复合地基费用为  $130.84$  元  $\cdot m^{-2}$ 。水泥搅拌桩复合地基费用为  $136.25$  元  $\cdot m^{-2}$ 。

至此,通过设计方案的对比,获得了刚柔组合桩复合地基和水泥搅拌桩复合地基 2 种方案处理造价的对比数据,汇总结果见表 2,其中工程价计算中列入施工企业的法定利润,管理成本和税金须另加 10%~15% 后为工程概算。由表 2 可知,2 种复合地基方案均能达到复合地基承载力特征值 75 kPa 的要求,刚柔组合复合地基沉降量小,仅占水泥搅拌桩复合地基方案沉降量的 37.5%。刚柔组合复合地基处理费用低,比水泥搅拌桩复合地基处理的费用可降低 4%。本工程桩端硬土层埋深达 27.5 m,如埋深在 15~20 m,则刚柔组合桩复合地基方案优势明显,可节省工程价 30%~35%。

表 2 2种处理方案对比结果

方案	承载力特征值/kPa	沉降计算值 $S_1$ /mm	单价/(元 $\cdot m^{-2}$ )
刚柔组合桩复合地基	76.30	120	130.84
水泥土搅拌桩复合地基	76.33	320	136.25

### 3 刚柔组合桩复合地基的施工与检测

刚柔组合桩复合地基设计中水泥搅拌桩的水泥用量为加固土体重量的 15%,可添加适量增强剂,并要求搅拌均匀。C10 砗的无筋沉管灌注桩可掺水泥重量的 30% 粉煤灰,以改善砗的和易性。

刚柔组合桩的施工要求如下:(1)按设计布桩施工水泥搅拌桩,每完成水泥搅拌桩后在桩的中心插上标杆留洞,妥然保护,或在中心预埋桩靴,便于沉管灌注桩正确定位。(2)严格控制沉管灌注桩施工的垂直度,确保沉管灌注桩置于在水泥搅拌桩的中心。施工时宜用流水施工,因水泥搅拌桩了掺入增强剂,施工间隔时间不宜超过 3 d。

复合地基垫层施工要求如下:复合地基的垫层采用级配道渣或级配碎石,要求回填密实,厚度不小于 800 mm,确保地面荷载均匀传递给刚柔组合桩和地面土。

复合地基的机理是个复杂的问题,计算分析似乎安全可靠,但必须通过实地检测验证,才能达

到工程要求的复合地基方案。为验证本设计方案的可靠性,按设计方案先在拟建工地施工小面积的复合地基试验,然后进行复合地基承载力值与变形检测,对照设计进行调整,提供工程要求的设计文件交付施工。在施工过程对桩和垫层施工按施工验收规范与设计文件对质量进行全面监控和检测。施工过程进行复合地基承载力值与变形检测,承压板面积  $6.25 \text{ m}^2$ ,最大加载  $200 \text{ kPa}$ ,各级加载条件下试桩的荷载沉降结果见表 3。表 3 中的 3 根试桩结果表明,采用刚柔组合桩进行软基处理达到了设计要求,控制了地基的沉降,且与计算值  $12 \text{ mm}$  接近,从而说明了刚柔组合桩的设计的合理性。按检测结果修正设计方案后方可大面积施工,建议试验面积  $6 \text{ m} \times 6 \text{ m} \sim 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 。

表 3 单桩复合地基静载试验汇总表

序号	荷载/ kPa	沉降/mm		
		试桩 1#	试桩 2#	试桩 3#
0	0	0.00	0.00	0.00
1	40	0.62	0.49	0.32
2	60	0.94	1.01	0.67
3	80	1.36	1.75	1.07
4	100	1.96	2.77	1.74
5	120	2.95	4.24	2.70
6	140	4.51	6.21	3.94
7	160	6.53	8.77	5.61
8	180	9.18	12.51	7.69
9	200	12.15	17.35	10.21

#### 4 结论

通过北仑某场水泥搅拌桩和刚柔组合桩软基处理的设计计算,并结合对 2 种加固方法的可行性、经济性进行了比较,结果表明:复合地基工程造价可大幅度降低,与水泥搅拌桩复合地基的造价相比可节省 4%,变形远小于水泥搅拌桩复合地基沉降量。此外,软土地基处理机械与工艺均为常规机械与工艺,不存在任何困难,而且效率高工期短,只要管理到位,质量可以保证。施工检测结果也表明,刚柔组合桩复合地基沉降较小,单桩的沉降与计算值相近,说明了刚柔组合桩复合地基处理方案是可靠的。

#### 参考文献:

- [1] 阎明礼,张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.
- [2] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [3] 周德泉,张可能,刘宏利. 组合桩型复合地基桩、土受力特性的试验对比与分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(5):872-879.
- [4] 唐明雄. 基桩弹性模量对组合桩复合地基桩土荷载分担比的影响[J]. 建筑结构,2010,40(3):62-64.
- [5] 杨军龙,龚晓南. 长短桩复合地基沉降计算方法探讨[J]. 建筑结构,2002,32(7):8-11.
- [6] 王立忠,李玲玲,丁利,等. 温州煤场软土结构性实验研究[J]. 土木工程学报,2002,35:101-106.
- [7] JGJ 79-2002. 建筑地基处理技术规范[S].
- [8] DB33/1001-2003. 建筑地基基础设计规范[S].

## Design and Application of Rigid-flexible Combined Pile Composite Foundation

HE Ya-ping

(Zhejiang Huazhan Engineering Design Institute; Ningbo 315012, China)

**Abstract:** Rigid pile composite foundation is constructed by sinking cement piling center into the rigid pile, through the reduction of flexible piles with rigid stiffness of pile, the rigid-and-flexible combination with a good mix of soil and a high bearing capacity of pile is formed. Composite foundation of stiffness of pile (C10) has done. Comparing detection, testing and verifying and economy, soft flexible pile replacement rate, less rigid pile composite foundation deformation, and low-cost soft ground treatment are all improved for a warehouse in Beilun Ningbo.

**Key words:** stiffness of pile; displacement; ratio of replacement rate; twin poor

(责任编辑 章践立)