

砼芯水泥土搅拌桩在软土地基中的应用

Use of concrete-cored DCM pile in soft ground

董平¹, 陈征宙², 秦然¹

(1. 南京大学基础工程中心, 江苏南京 210093; 2. 南京大学地球科学系, 江苏南京 210093)

摘要:介绍了适用于软土地基的一种新型复合桩——砼芯水泥土搅拌桩的设计和施工工艺,并在上海、江阴两地试桩和实际工程应用的基础上,分析了该桩竖向承载力的发挥机理、破坏模式和极限承载力。研究表明:砼芯水泥土搅拌桩施工方便、单桩承载力高、沉降量小、造价低廉,且施工对周围环境影响小,在软土地基工程中具有广泛的应用价值。

关键词: 砼芯水泥土搅拌桩; 软土; 复合桩

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)02-0204-04

作者简介: 董平(1963-),男,江苏无锡人,副教授,南京大学基础工程中心主任,主要从事地基基础理论和岩土工程监测研究。

DONG Ping¹, CHEN Zheng-zhou², QIN Ran¹

(1. Foundation Engineering Center, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: A new kind of composite pile, named concrete-cored DCM pile is used in soft ground engineering. This paper describes its design and construction technology, and analyzes its load-transfer mechanism, failure mode and ultimate bearing capacity based on the static load test in Shanghai and Jiangyin cities. It is proved that concrete-cored DCM pile has many advantages such as simple construction method, little environmental disturbance, high bearing capacity, small settlement, low costs, and extensive adaptability in soft ground engineering. This research is also valuable as a reference to the design of other kinds of composite piles.

Key words: concrete-cored DCM pile; soft ground; composite pile

1 引言*

我国沿海地区广泛发育着软土,低强度、高可压缩性和低渗透性是软土已知的工程特性。基础工程中一般采用地基加固和深基础措施来改善软土,以达到设计所需的沉降和承载力要求。深层水泥土搅拌桩(deep cement mixing(DCM) pile)、石灰桩、土工合成织物等一般的软基处理技术对软土层强度提高有限,而对混凝土预制桩和广泛使用的灌注桩^[1],若将其作为软土层上的摩擦桩使用,当桩身材料强度的很大部分尚未发挥时,桩周土层对桩的承载力已达极限,桩基沉降过大而无法继续承担荷载,造成桩身材料的浪费,很不经济。软土地基上基础工程的理想效果是在较小沉降时能提供足够高的承载力,同时又能充分发挥基础材料的强度,即用经济有效的处理方法满足设计对沉降和承载力要求。

复合材料桩利用大的比表面积来提供摩阻力,同时用高强度的桩芯来承担荷载,理论上是一种经济有效的地基处理方法。国内外复合桩的使用并不鲜见,典型的复合桩有 Pin Pile^[2]和日本的 SMW 工法^[3]。Pin Pile 是近年在欧美等地区广泛使用的桩型,由钻孔灌注桩中插入钢管或钢棒制成,桩径一般为 100~200 mm,一般用作砂砾岩石地基上的桩基础。SMW 工法起源于日本,是在水泥土搅拌桩中插入 H 型钢制成,广泛用于软土基坑支护中。上述两类复合桩不适于目前也未见于软土

地区的基础工程中。但是基于这类复合桩承载理论所发展的砼芯水泥土搅拌桩,已被试验证实为软土地基处理中经济有效、施工便利的一种新型桩型。

砼芯水泥土搅拌桩是在水泥土搅拌桩中即时用静压法插入小直径预制混凝土桩而成。这是我国目前较广泛使用的一种软基处理法,经济、施工方便,对软黏土、淤泥质土和泥炭土都有十分明显的加固效果,但其桩身材料强度低,达到承载力极限时一般在桩身上部发生破坏,沉降量也可观^[4]。若在搅拌桩中心处插入高强度的预制混凝土桩,可大幅度提高强度,减少沉降量,上海和江苏两地的试桩和工程应用证明了上述特性。

2 桩型构造和施工工艺

2.1 桩型构造

砼芯水泥土搅拌桩由水泥土搅拌桩外芯和小直径混凝土预制桩内芯两部分构成,结构如图 1 所示。

(1) 混凝土预制桩内芯

混凝土预制桩标号一般为 C30,为变截面方型桩,在工厂集中制作。采用混凝土预制桩作为桩芯,是利用其高强度、低压缩量的特性,与钢管或钢棒作为内芯相比,混凝土预制桩要便宜得多,设计中预制桩内芯一般比外部搅拌桩短 1~2 m。

* 收稿日期: 2001-07-16

表 1 原位试桩的有关参数
Table 1 Parameters in irrsitu tests

| 桩号 | 砼内芯(方截面) | | | | 水泥土搅拌桩外芯(圆截面) | | | 加载方法 | 试桩场地 |
|--|----------|----------------|------|------|---------------|-------|---------|---------|----------|
| | 桩长/m | 直径/mm | 强度等级 | 钢筋参数 | 桩长/m | 直径/mm | 水泥设计掺入量 | | |
| E ₁ ~ E ₆ | 10.2 | 桩顶 220, 桩端 150 | C30 | 4Φ12 | 11 | 600 | 18% | 慢速维持荷载法 | 江阴东方明珠小区 |
| W ₁ , W ₂ , W ₃ | 17 | 桩顶 220, 桩端 150 | C30 | 4Φ14 | 18 | 700 | 20% | 快速加载法 | 上海万里小区 |
| W ₄ , W ₅ , W ₆ | 23 | 桩顶 250, 桩端 150 | C30 | 4Φ14 | 24 | 700 | 20% | 快速加载法 | 上海万里小区 |

- E₁, E₂, E₃ 三试桩中, 砼内芯 5 个不同深度截面上安装了 10 个钢筋应力计, 每截面 2 个, 3 试桩砼芯侧面上还加刻了 3~ 5 道凹槽。
- 江阴市东方明珠小区场地土层由上到下划为 4 层: ①杂填土, 灰褐色, 厚 1.3~ 1.7 m; ②粉土, 灰黄色, 稍密, 厚 1.5 m; ③淤泥质粉土, 灰色, 软塑, 稍密, 厚 2.1 m; ④粉土, 灰黄-青灰, 稍密, 含少量粉砂等, 厚 6 m。
- 上海市万里小区场地土层由上到下划为 6 层: ①填土, 厚 1.5 m; ②褐黄色粉质黏土, 厚 1.7 m; ③灰色砂质粉土, 厚 1.8 m; ④灰色淤泥质黏土, 厚 10.3 m; ⑤灰色黏土, 粉质黏土, 厚 6.9 m; ⑥暗绿色、草黄色粉质黏土, 厚 4.6 m。

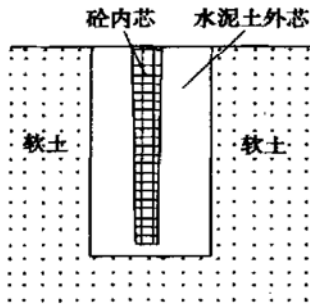


图 1 砼芯水泥土复合桩桩身结构示意图

Fig. 1 Pile structure of concrete cored DCM pile

(2) 水泥土搅拌桩外芯

水泥土搅拌桩法加固场地限于陆上, 加固深度可达 30 m, 典型的水泥掺入量为 15% ~ 20%, 水灰比为 0.8~ 1.2, 桩径一般为 500~ 800 mm。

2.2 施工工艺

砼芯水泥土搅拌桩采用国内 SMW 工法的施工设备进行施工, 砼芯水泥土复合桩利用了水泥土搅拌桩的施工机械和施工方法, 只要在原来的搅拌桩机上加一套静压设备, 即可完成成桩过程, 施工流程简要介绍如下:



3 竖向荷载作用下单桩工作机理

根据上海、江苏两地原位试桩资料(见表 1), 结合弹塑性有限元分析^[5], 对砼芯水泥土搅拌桩在竖向荷载下的工作机理进行了研究。

3.1 桩土及桩内外芯的荷载分担情况

砼芯水泥土搅拌桩以高弹模的混凝土预制桩做桩芯, 大大提高了复合桩的轴向压缩模量, 约为一般水泥土搅拌桩弹性模量的 100~ 200 倍。若假设桩土应力比与桩土模量比成线性关系, 砼芯水泥土搅拌桩的桩土应力比 n_p 理论上应在 50~ 100 之间^[6]。同理, 可算得桩内外芯的荷载分配比在 20~ 100 之间, 这一点也被有限元分析与试验结果所证明。这样可以认为上部

荷载基本上由桩内芯承担, 桩间土和水泥土外芯所分担的荷载较小或可忽略不记。

3.2 荷载沿深度的传递和扩散

桩土体系的相互作用使上部荷载沿深度传递时递减。原位试桩结果发现桩砼内芯的轴力沿深度迅速递减(见图 2), 不超过 10% 的上部荷载能传递到砼芯端面。有限元结果发现能通过砼芯端面传递到水泥土外芯下端面的荷载比例更小, 不超过 7%, 因此可以将复合桩看做纯摩擦桩。

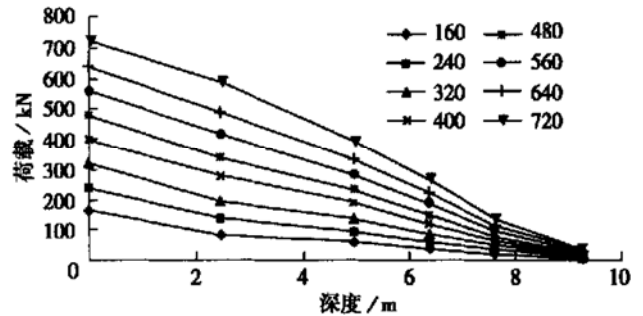


图 2 砼内芯轴力沿深度递减(试桩 E₃)

Fig. 2 Decreases of axial force in concrete core with depth(pile E₃)

上部荷载主要由砼内芯承担, 该荷载向下传递的同时, 也逐步向外扩散, 通过水泥土外芯扩散到整个基础持力层中, 最终形成了荷载扩散的双层模式: 即从桩内芯向桩外芯的扩散(内层)和从桩外芯向桩周土体的扩散(外层)两层。这种双层的荷载传递体系使上部荷载有效地扩散到比一般水泥土搅拌桩影响范围大得多的土体中, 保证该种复合桩能承受高荷载而不致压破低强度的软土持力层。

3.3 砼芯水泥土桩承载力来源

水泥土的固化效应是水泥土搅拌桩承载力的基本来源, 深层搅拌法成桩时, 水泥浆和粉黏土在一定比例下混合, 发生复杂的物理化学反应而固化形成水泥土。所成的水泥土桩柱的强度远高于原地基土; 而且加压喷浆时也会在水泥土桩和土层间形成一个过渡带, 该过渡带的存在能有效提高桩土界面的剪切强度。复合桩现场试验发现, 与相当桩径的水泥土搅拌桩相比, 在

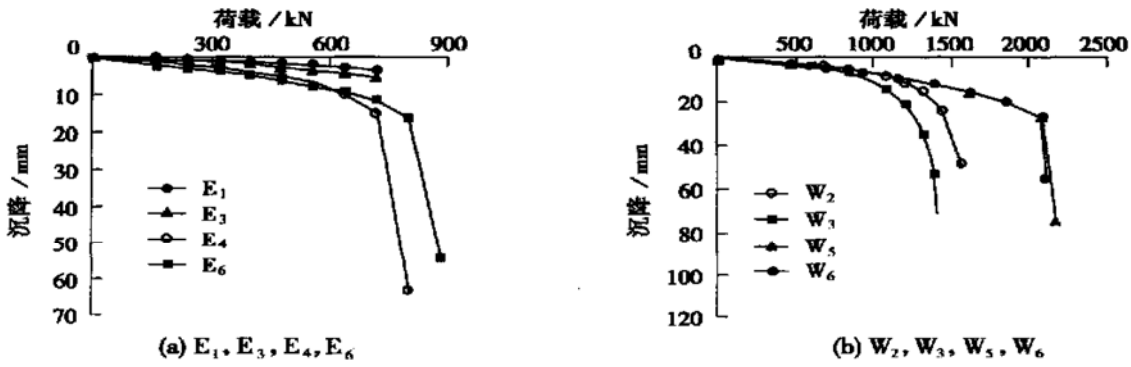


图3 8根试桩的荷载沉降曲线(E_1, E_3 未加荷到破坏)

Fig. 3 Load-settlement curves of 8 piles(E_1, E_3 were not loaded to failure)

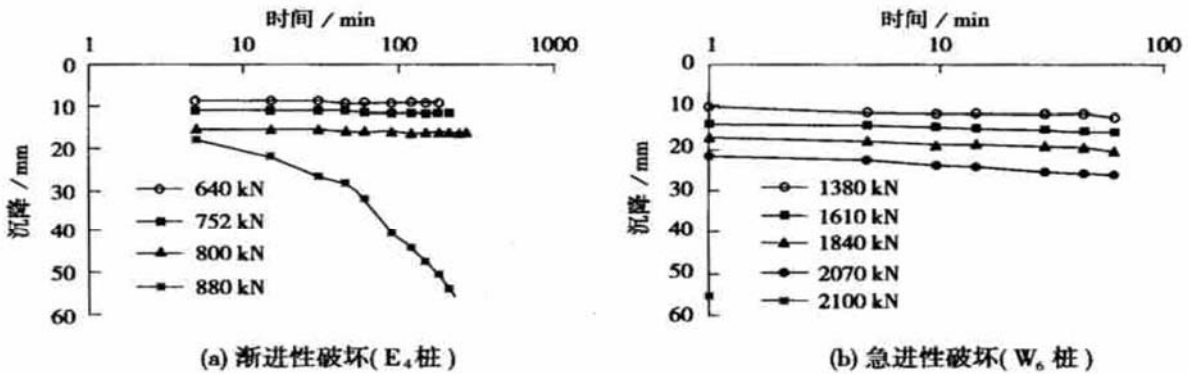


图4 两种破坏模式的 $s - \log t$ 曲线

Fig. 4 $s - \log t$ curves for two types of failure mode

相当的沉降量下, 桩芯水泥土搅拌桩桩土界面的极限侧摩阻有很大的提高, 反算结果可达水泥土搅拌桩的2~3倍(见表2)。因此水泥土的固化效应只是形成桩芯水泥土搅拌桩承载力的因素之一, 复合桩的高承载力至少还受以下两种因素影响:

表2 单桩极限承载力及破坏形态

Table 2 Bearing capacity and failure mode of piles

| 试桩编号 | 试验 Q_u /kN | 标准 Q_{cu} /kN | 反算 Q_{su} /kN | 反算 f_{sk} /kPa | 桩基破坏形态 |
|-------|--------------|-----------------|-----------------|------------------|--------|
| E_4 | 720 | 1602 | 720 | 34.6 | 地基土破坏 |
| E_6 | 800 | 1602 | 800 | 38.6 | 地基土破坏 |
| W_2 | 1320 | 1660 | 1320 | 33.3 | 地基土破坏 |
| W_3 | 1220 | 1660 | 1220 | 30.8 | 地基土破坏 |
| W_5 | 2070 | 2081 | > 2070 | > 39.2 | 桩芯压裂 |
| W_6 | 2070 | 2081 | > 2070 | > 39.2 | 桩芯压裂 |

地基土破坏指桩土界面剪破坏或持力层塑性破坏。

(1) 挤土效应

试验中所采用的预制混凝土桩的体积占搅拌桩体积的1/7~1/9。在成桩过程中, 预制混凝土桩芯的插入会向外挤扩水泥土搅拌桩外芯, 并随之排开桩侧和桩端土体, 使其强度增加, 这种强度的增加会显著提高复合桩侧摩阻。

(2) 桩内芯的高弹模

桩芯水泥土搅拌桩的桩身轴向复合模量由预制混

凝土桩芯控制, 预制混凝土桩芯与水泥土搅拌桩的杨氏模量比一般在100~200间, 因而桩芯水泥土搅拌桩的压缩模量远大于一般的水泥土搅拌桩, 而桩身压缩模量越大, 桩身压缩量越小, 桩侧摩阻发挥值也越高。

3.4 桩的破坏模式

如图3所示, 各试桩 $p - s$ 曲线都存在明显陡降直线拐点, 按规范 JGJ 94-94 所确定的单桩极限承载力值见表2, 但反映在 $s - \log t$ 曲线(见图4)上时, 最后一级加荷(破坏荷载)所对应的曲线特征却有很大区别, 分别对应着两种破坏形态: 渐进型破坏(图4(a))和急进型破坏(图4(b))。对于渐进型破坏形态, 在破坏荷载下, 沉降随时间逐渐增大, 反映在 $s - \log t$ 曲线越来越陡, 且趋于不稳定, 如图4(a)所示, 有限元分析发现这种破坏与桩周土体塑性变形有关。但对于急进型破坏形态, 破坏荷载刚加载时, 桩顶沉降就急剧增大, 甚至桩顶发生倾斜, 此时该级荷载下的 $s - \log t$ 曲线不能绘出, 在图4(b)中以近似一个点代替, 浅部桩体开挖发现, 这种破坏是由于桩芯压裂所致。

3.5 单桩极限承载力计算公式

既然复合桩的承载力由桩身和土层共同控制, 存在两种破坏模式, 则可将桩芯水泥土桩的单桩极限承载力表达为

$$Q_u = \min(Q_{cu}, Q_{su}) \quad (1)$$

式中 Q_u 为砗芯水泥土桩单桩极限承载力; Q_{cu} 为对应砗芯压裂的桩身极限承载力; Q_{su} 为对应于桩周土体破坏的土层极限承载力。

Q_{cu}, Q_{su} 可进一步表达为

$$\begin{aligned} Q_{cu} &= A_1 f_{ck} \\ Q_{su} &= A_2 f_{sc} + \pi D_2 \sum L_i f_{ski} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 A_1, A_2 分别为复合桩内外芯的截面积; f_{ck} 为钢筋混凝土立方体无侧限抗压强度; f_{sc} 为复合桩桩端持力土层的极限承载力; D_2 为复合桩直径; L_i 为桩身范围内的各土层厚度; f_{ski} 为相应土层极限侧摩阻, 定义 $f_{sk} = \sum L_i f_{ski} / L_2$ 为整个桩侧极限摩阻的平均值。

由于试验和有限元分析所得的 $A_2 f_{sc}$ 不超过 Q_{su} 的 7% 或更小, 因此在单桩极限承载力计算中, 桩端阻力可忽略或作为安全储备, 从而可利用式(2)将式(1)简化为

$$Q_u = \min(A_1 f_{ck}, \pi D_2 \sum L_i f_{ski}) \quad (3)$$

若设桩身极限承载力和土层极限承载力的安全系数分别为 K_1 和 K_2 , 则复合桩的竖向承载力设计值 Q_k

$$= \min\left(\frac{A_1 f_{ck}}{K_1}, \frac{\pi D_2 \sum L_i f_{ski}}{K_2}\right), K_1, K_2 \text{ 取 } 1.75 \sim 2.00.$$

据公式(3)反算所得的桩土界面的平均极限摩阻力 f_{sk} 在 31~40 kPa 之间(见表 2), 远高于一般水泥土搅拌桩的平均极限侧摩阻值 9~15 kPa^[7]。

3.6 砗芯水泥土搅拌桩沉降

若取复合桩承载力设计值为极限荷载的 1/2, 则上海的 $W_1 \sim W_3$ 系列桩承载力设计值为 700 kN, $W_4 \sim W_6$ 系列桩承载力设计值为 1000 kN, 此时相应的桩顶沉降仅为 5~7 mm。江阴的 $E_4 \sim E_6$ 系列桩在 320 kN 下的沉降 2~4 mm, 而 $E_1 \sim E_3$ 系列桩在 320 kN 下的沉降不超过 1 mm, 这可能与该三试桩的砗芯侧面加刻横向凹槽有关。可见, 由于高弹模砗芯的存在, 桩身的压缩量远小于水泥土搅拌桩, 由桩身应变测量数据推算所得 $E_1 \sim E_3$ 系列桩的桩身压缩量在 320 kN 下为 0.5 mm 左右, 说明砗芯水泥土搅拌桩能有效控制软基沉降。

3.7 砗芯水泥土搅拌桩适用范围

水泥土搅拌桩的加固机理决定了砗芯水泥土搅拌桩的适用范围: 中等含水率的软粘土、沼泽相泥炭土、粉土和淤泥质土。很显然, 砗芯水泥土搅拌桩适用于深厚软土地区的多层建筑和小高层建筑, 亦可用作基坑支护。由于砗芯水泥土搅拌桩具有低噪音, 无振动, 无挤土破坏和造价低等优势, 该桩型特别适用于处于居民密集区的建筑物。

4 结 论

(1) 砗芯水泥土搅拌桩是一种适用于软土地基处理的经济有效的复合桩。它综合了水泥土搅拌桩和预制混凝土桩的优点, 既利用预制混凝土桩芯的低压缩量高强度的特点来承担荷载, 又利用大直径廉价水泥土桩的凝结力和大表面积来提供摩阻力, 其内外芯的分工尽可能地发挥桩身材料的强度, 并能达到一定级别的设计荷载, 经济实用。上海和江阴地区的使用证明, 砗芯水泥土复合桩的费用较预制桩和钻孔灌注桩低得多, 有可观的社会经济效益。不仅如此, 复合桩还克服了打入桩的噪音和挤土问题。

(2) 砗芯水泥土搅拌桩工作特性与单桩相似, 而有别于复合地基。竖向荷载首先由砗内芯承担, 然后通过砗内外芯界面和桩土界面的侧摩阻, 形成荷载从砗内芯 → 水泥土外芯 → 桩周土体的双层扩散模式, 传递到复合桩端的荷载不超过总荷载的 7%, 其工作方式为纯摩擦桩。

(3) 砗芯水泥土搅拌桩基础存在两种破坏模式: ① 急进型破坏, 对应的是砗芯的压裂; ② 渐进型破坏, 对应的是桩土界面和桩端持力土层的塑性破坏。这两种破坏模式可由单桩原位静载试验的 $s - \log t$ 曲线加以判别。由单桩破坏模式所确定的极限承载力公式可表示为 $Q_u = \min(A_1 f_{ck}, \pi D_2 \sum L_i f_{ski})$ 。

(4) 砗芯水泥土复合桩能有效控制沉降, 一般情况下桩身沉降很小, 设计荷载下的单桩沉降小于桩径的 1%。

参考文献:

- [1] 韩选江, 徐炳峰. 复杂古冲沟场地人工挖孔桩的承载性状[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 77-82.
- [2] 王健, 夏明耀, 傅德鸣. H型钢与水泥土搅拌桩围护结构的设计与计算[J]. 同济大学学报, 1998, 26(6): 636-639.
- [3] Petros P Xanthakos, Lee W Abramson, Donald A Bruce. Ground Contro Land Improvement[M]. New York: John Wiley & Sons INC, 1994.
- [4] 段继伟, 等. 水泥搅拌桩的荷载传递规律[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 1-8.
- [5] 秦然. 砗芯水泥土搅拌桩单桩竖向承载力和位移分析[D]. 南京: 南京大学, 2001.
- [6] 秦然, 陈征宙, 董平. 水泥土桩复合地基桩土应力比的一种解析算法[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 96-98.
- [7] Lin K Q, Wong I H. Use of deep cement mixing to reduce settlements at bridge approaches [J]. J Geotech & Geoenvm Engrg, ASCE, 1999, 125(4): 309-320.