

# 劲性复合桩的工程应用与试验分析

钱于军<sup>1</sup>, 许智伟<sup>2</sup>, 邓亚光<sup>3</sup>, 孙鸽梅<sup>4</sup>

(1. 江苏科信岩土工程勘察有限公司, 江苏 南通 226300; 2. 上海缘合建设工程检测有限公司, 上海 201108;  
3. 江苏省如东县水利电力建筑工程有限责任公司, 江苏 南通 226400; 4. 上海同济建设工程质量检测站, 上海 200092)

**摘要:** 劲性复合桩是在水泥土搅拌桩初凝前将芯桩插入其中, 形成共同受力的一种新的复合桩型。在前人研究的基础上, 以某工程项目为背景, 进行了大量试桩试验, 包括一般管桩与水泥土-管桩复合桩, 并量测了复合桩中桩身轴力的传递, 为其他类似工程项目提供参考。试验采用慢速维持荷载法检测试桩的承载力, 试验结果表明水泥土-管桩复合桩的承载力相对于一般管桩有较大提高, 能够满足工程提出的承载力要求, 较大幅度地减少了工程造价, 具有较高的经济效益。

**关键词:** 劲性复合桩; 管桩; 承载力; 桩身轴力

**中图分类号:** TU473.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2013)S2-0998-04

**作者简介:** 钱于军(1964-), 男, 注册土木工程师(岩土), 国家注册监理工程师, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察设计咨询工作。E-mail: 13817683357@163.com。

## Engineering application and test analysis of strength composite piles

QIAN Yu-jun<sup>1</sup>, XU Zhi-wei<sup>2</sup>, DENG Ya-guang<sup>3</sup>, SUN Ge-mei<sup>4</sup>

(1. Jiangsu Kexin Geotechnical Engineering Investigation Co., Ltd., Nantong 266000, China; 2. Shanghai Yuanhe Construction Engineering Testing Co., Ltd., Shanghai 201108, China; 3. Jiangsu Rudong Water Conservancy & Electric Power Construction Engineering Co., Ltd., Nantong 266000, China; 4. Shanghai Tongji Construction Quality Inspection Station, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The strength composite pile is a new type of composite pile that a core pile is inserted into a deep cement mixing pile before the initial set. Based on the previous studies and a project case, load tests are conducted on a great number of test piles including pipe piles and composite piles, and the axial force of composite piles is measured. It will provide a beneficial reference for other similar projects. The slow maintenance loading method is adopted. The test results show that the bearing capacity of the strength composite pile increases obviously compared with that of the pipe pile, and it meets the requirements of engineering construction. Besides, the cost of the composite pile decreases significantly.

**Key words:** strength composite pile; pipe pile; bearing capacity; axial force

## 0 引言

我国东部沿海地区广泛分布着较为深厚的软弱土层。通常情况下, 天然地基很难满足工程建设的要求, 因此有必要采取一定的措施进行地基加固或采用桩基础。

水泥土搅拌桩是一种较为经济常用的地基处理手段, 但当承载力或沉降要求较高时往往很难采用。而采用管桩、钻孔桩等刚性桩, 其竖向承载力及沉降能够满足要求, 但在软土地区桩身材料强度不能得到充分发挥, 水平承载力较低, 且成本较高。劲性复合桩是一种在水泥土桩的基础上发展而来的地基加固技术, 其是在水泥土桩成桩后, 再沉入混凝土芯桩, 形成一种混凝土芯与水泥土共同工作、承受荷载的新桩型, 按芯桩与水泥土桩的长度关系可分为短芯桩、等

长桩和长芯桩, 其中短芯桩较为常用。加芯水泥土桩同时具备水泥土桩及混凝土桩的优点, 具有较高承载力, 能够有效控制沉降, 是一种较为理想的地基加固方法。

自20世纪90年代在国内首次应用以来, 不少学者对其进行了研究分析。邹宗煊等(2000)<sup>[1]</sup>和吴迈等(2004)<sup>[2]</sup>分别通过室内试验发现水泥土与混凝土芯之间的黏结强度与水泥土强度呈近似的线性关系。凌光容等(2001)<sup>[3]</sup>根据载荷试验 $p-s$ 曲线将其破坏模式分为急进破坏与渐进破坏。董平等(2003)<sup>[4]</sup>分析了混凝土芯水泥土试桩的承载力和荷载传递分布, 发现混凝土芯水泥土桩工作方式接近摩擦桩, 桩端只

承担 7%左右的总荷载, 而且水泥土桩与桩周土界面的平均极限摩阻力远高于一般水泥土搅拌桩。丁永军等 (2006)<sup>[5]</sup>试验结果表明芯桩端部以下水泥土对桩的整体承载力贡献不大, 但可有效地减小沉降变形。丁永军 (2010)<sup>[6]</sup>通过试验认为芯桩的置入提高了水泥土搅拌桩的桩身刚度和截面承载力, 能够使水泥土的侧摩阻力与桩身材料强度得到充分发挥。除此之外, 仍有不少学者进行了相关方面的研究<sup>[7-9]</sup>。

本文在上述研究的基础上以实际工程为背景, 采用管桩-大直径搅拌桩复合的形式, 并进行了大量试桩, 可供同类工程参考。

1 工程概况

江苏某项目拟建 2 幢 26+1F、2 幢 17+1F、12 幢 18+1F 住宅楼, 地下一层连片贯通, 设计有民防工程、非机动车位、汽车泊位, 其基础采用桩基础, 要求单桩承载力特征值为 1300~2000 kN。

拟建场地地貌类型属长江下游冲积平原区滨海平原, 成陆时间较晚, 主要覆盖第四纪松散沉积物, 以粉土、粉砂、粉质黏土为主。根据勘察资料, 采用一般管桩, 以⑥3 粉砂层为桩端持力层时, 承载力不满足要求, 因此需要选择较深持力层, 但管桩长度也随之增长, 建设成本增大, 施工工期也大大延长。基于上述情况, 本工程拟采用水泥土-管桩劲性复合桩代替一般管桩, 并进行现场试验。

2 试验方案

在分析拟建的地质资料的基础上, 分别于 12 栋拟建建筑物场地选择一个点做一根一般性管桩的试桩 (即不打水泥土桩), 在这些指定点周边 6 倍管桩直径间距外选定试验点提出不同水泥土桩加固深度、不同桩径及不同管桩桩径、不同桩长组合的 27 根桩, 部分试桩参数如表 1 所示。在后期工程桩承载力检测时, 选取若干工程桩 (水泥土桩直径 800 mm, 桩长 14 m, 管桩采用 PHC500AB-(125)-11 m), 采用光纤布拉格光栅技术量测复合桩中管桩桩身应变从而获得其桩身应力分布。

水泥土-管桩复合桩施工工艺: 先施工大直径水泥土搅拌桩桩径为 800~900 mm, 在水泥土初凝前压入单节管桩, 充分利用大体积水泥土搅拌桩产生的较高的桩周摩阻力和桩端阻力, 获得较高的单桩承载力, 解决浅层天然地基土层中没有适合的刚性桩持力层的难题。施工机械采用大直径搅拌机、双水泥罐及大功率空压机。

试验现场布点按如下顺序进行: 先在管桩桩身表

面沿着设计线路开槽, 将光纤放入槽内设计位置点固定。光纤点布好后采用环氧树脂和固化剂按一定比例混合对凹槽进行封口和防水处理, 待环氧树脂凝固成型后即可将管桩压入水泥土桩。本次试验中, 沿着桩顶向下布置 6 个剖面, 每个剖面对称布置 2 个光纤光栅传感器, 共 12 个测点, 如图 1 所示。

表 1 试桩方案及结果

| Table 1 Test piles and results |       |        |       |        |           |
|--------------------------------|-------|--------|-------|--------|-----------|
| 序号                             | 管桩    |        | 水泥土桩  |        | 极限承载力 /kN |
|                                | 桩长 /m | 桩径 /mm | 桩长 /m | 桩径 /mm |           |
| 1                              | 28    | 500    |       |        | 3240      |
| 2                              | 33    | 500    |       |        | 4800      |
| 3                              | 34    | 500    |       |        | 4680      |
| 4                              | 36    | 500    |       |        | 4440      |
| 5                              | 37    | 500    |       |        | 5720      |
| 6                              | 38    | 500    |       |        | 5720      |
| 7                              | 12    | 400    | 16.45 | 800    | 4950      |
| 8                              | 13    | 400    | 16.95 | 800    | 4960      |
| 9                              | 13    | 400    | 16.45 | 800    | 4050      |
| 10                             | 13    | 500    | 17.95 | 800    | 4950      |
| 11                             | 14    | 400    | 17.95 | 800    | 5157      |
| 12                             | 14    | 400    | 17.45 | 800    | 4950      |
| 13                             | 14    | 400    | 17.95 | 800    | 5400      |
| 14                             | 14    | 400    | 17.45 | 800    | 4845      |

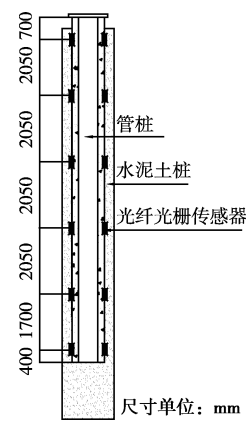


图 1 测点布置示意图

Fig. 1 Sketch map of testing points

试验采用慢速维持荷载法检测管桩单独承担竖向承载力、管桩与部分水泥土共同作用的竖向承载力, 考虑全部水泥土与管桩共同受力的总承载力。

3 试验结果分析

由于试桩数量较多, 仅按试桩参数的不同选择部分试桩载荷试验结果列于表 1, 下文分析时考虑了完整的试验结果。

3.1 一般管桩承载力

4 根 28 m 长、以⑧2 土层为持力层的管桩极限承载力为 2880, 2880, 3240, 3520 kN, 承载力较小, 不能够满足单桩承载力特征值 2000 kN 的要求。

4 根 33~34 m 长、以⑩土层为持力层的管桩极限

承载力分别为 4800, 4680, 5040, 4400 kN, 承载力均较高。

4 根长度为 36~38 m, 以⑩-1 土层为持力层的管桩中仅有 1 根达到设计标高, 承载力为 4840 kN; 其余 3 根未达到设计标高, 并有 1 根桩头压坏, 承载力分别为 5720, 5720, 4440 kN, 承载力较以⑩2 土层为持力层的管桩有所提高。

### 3.2 水泥土-管桩复合桩承载力

水泥土-管桩复合桩试桩中, 极限承载力最低的为 4050 kN, 能够满足单桩承载力特征值 2000 kN 的要求。另外, 有较大一部分试桩的极限承载力超过 5000 kN, 并有出现反力不足的情况而终止试验。

复合桩试桩中, 管桩长度为 12~15 m, 绝大部分直径 400 mm, 部分为 500 mm, 而承载力水平却超过了长度 28 m, 直径 500 mm 的一般管桩, 而与长度 33~38 m, 直径 500 mm 的一般管桩承载力水平相当, 说明水泥土桩的存在确实使管桩的承载力有了较大幅度的提升, 形成水泥土-管桩复合桩共同承担荷载。

对于复合桩承载力较高, 主要有以下几方面原因:

(1) 管桩与水泥土桩的接触面具有较大的黏结力, 使管桩所受到的荷载能够有效地传递给水泥土桩; 在试验中, 并未出现管桩与水泥土接触面的破坏, 保证水泥土与管桩能够协同承担荷载。

(2) 水泥土搅拌桩的直径较大, 普遍为 800 mm, 实际开挖后由于管桩插入, 直径可达到 890 mm 左右, 因此相对于直径 500 mm 的管桩能够提供较大的侧摩阻力。

(3) 由于管桩的插入使水泥土桩有向外挤扩的现象, 周围土体有一定的挤密从而侧摩阻力也有一定的提升。

### 3.3 水泥土-管桩复合桩桩身应力分布

如图 2 所示, 随着竖向荷载的增加, 管桩各位置桩身轴力随之增加, 管桩轴力沿深度急剧减小, 且随着桩顶荷载增加, 轴力沿深度衰减速率逐渐变小, 并趋于稳定, 即桩端阻力所承担的荷载比例逐渐增大且趋于一个稳定值。如图 3 所示, 各级荷载下管桩桩端承担的荷载为总荷载的 8.2%~14.8%, 且随着荷载增加而增大。管桩水泥土复合基桩表现出摩擦桩的工作特性。由于水泥土桩的弹性模量远远小于 PHC 管桩, 故可忽略水泥土桩承受轴向压力, 水泥土负责传递侧摩阻力, 主要由 PHC 管桩承担竖向荷载。

根据现场取芯得到的水泥土的无侧限抗压强度约为 1.5 MPa, 按照文献[2]相关结论, 芯桩与水泥土之间的极限侧摩阻力大于 0.194 倍的水泥土无侧限抗压强度, 得到本工程中, 芯桩与水泥土之间的极限侧摩阻力为 291 kPa, 能够提供 4022 kN 的侧阻力。在 4200

kN 荷载下, 管桩端阻力为 621 kN, 侧阻力为 3579 kN, 小于 4022 kN, 因此在此荷载下, 管桩与水泥土仍能协同工作, 而未出现界面破坏现象。

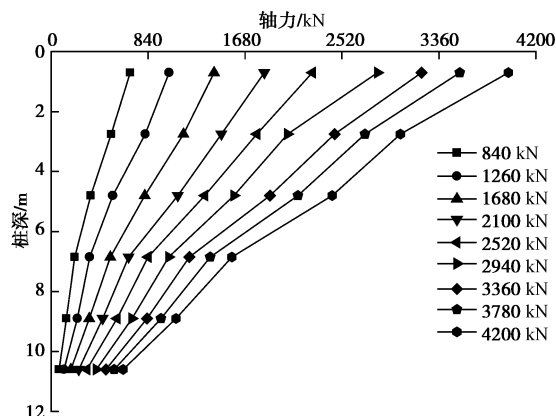


图 2 管桩桩身轴力

Fig. 2 Axial forces of pile shafts of pipe piles

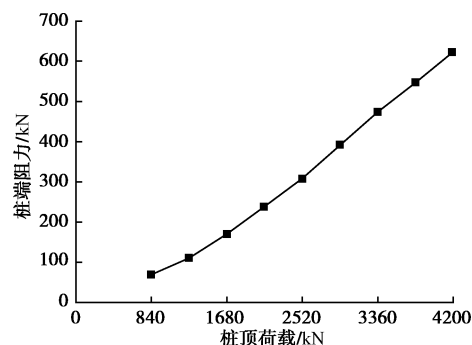


图 3 管桩桩端阻力

Fig. 3 Tip resistance of pipe piles

### 3.4 水泥土-管桩复合桩桩侧摩阻力

根据管桩的桩身轴力分布, 忽略水泥土承担的轴向力, 计算管桩在 4200 kN 荷载下复合桩桩侧摩阻力, 并将其与勘察报告提供的 PHC 管桩和钻孔灌注的侧摩阻力标准值进行比较, 如表 2 所示。实测水泥土复合基桩中管桩侧摩阻力值为 PHC 管桩的 3.74~8.62 倍, 为钻孔灌注桩的 4.15~9.17 倍。管桩水泥土复合基桩充分利用大直径水泥土桩提供侧摩阻力的能力。

## 4 经济技术分析

PHC400 管桩的造价约为 163 元/m, PHC500 管桩约为 218 元/m, 水泥土约为 180 元/m<sup>3</sup>。对于 28 m 长的 PHC500 管桩造价约为 6040 元, 33~38 m 长的 PHC500 管桩造价约 7194~8284 元。而水泥土-管桩复合桩以#10 试桩(管桩直径及长度较大, 水泥土桩长度亦较长)为例, 水泥土的造价约为 1624 元, 管桩造价约为 3270 元, 总造价约 4894 元, 相对于 33~38 m 长的 PHC500 管桩造价约减少 32%~41%; 对于其他复合桩如#7 试桩(管桩直径及长度较小), 造价约为

3607 元, 相对于 33~38 m 长的 PHC500 管桩造价约减少 50%~56%。从以上分析可以看出, 水泥土-管桩复合桩具有相当大的经济优势, 能较大幅度节省造价。

表 2 复合桩桩侧摩阻力  
Table 2 Skin frictions of composite piles

| 对应土层        | A<br>/kPa | B<br>/kPa | C<br>/kPa | A/B  | A/C  |
|-------------|-----------|-----------|-----------|------|------|
| ④粉砂夹粉土      | 290.72    | 33.71     | 31.71     | 8.62 | 9.17 |
| ⑤1 粉砂       | 213.55    | 46.00     | 44.00     | 4.64 | 4.85 |
| ⑥2 粉砂夹粉土    | 270.06    | 43.27     | 38.20     | 6.24 | 7.07 |
| ⑤3 粉砂       | 151.07    | 40.34     | 36.44     | 3.74 | 4.15 |
| ⑥1~⑥2 粉砂夹粉土 | 171.35    | 36.82     | 34.12     | 4.65 | 5.02 |

注: A 为 4200 kN 荷载下侧摩阻力, B、C 分别为原勘察报告提供的 PHC 管桩和钻孔灌注桩桩周土极限摩阻力标准值。

5 结 论

本文以实际工程为背景,进行了大量的试桩试验,包括一般管桩与水泥土-管桩复合桩,并量测了管桩桩身应变,分析试验结果得出如下结论:

- (1) 水泥土-管桩复合桩相对于一般管桩在承载力上有较大提高,主要来自于桩侧摩阻力的提高,其侧摩阻力较 PHC 管桩与钻孔灌注桩均有大幅度的提高。
- (2) 水泥土-管桩复合桩对施工设备的要求较低,不易出现沉桩困难的现象。
- (3) 水泥土与管桩的黏结力较高,在水泥土质量有保证的情况下不易出现水泥土与管桩接触面的破坏,能够保证水泥土与管桩协同工作。
- (4) 管桩是上部荷载的主要承担者,管桩复合基桩工作特性与刚性单桩相似,复合基桩表现出摩擦桩的工作特性,桩端阻力大约只占桩顶荷载的 8%~15%,且随着桩顶荷载的增加,桩端阻力传递荷载比例逐渐增大。
- (5) 水泥土-管桩复合桩的造价较低,很够有效节约成本,具有较高的经济效益。

参考文献:

[1] 邹宗煊, 林 锋. 钢筋砼劲芯水泥土复合桩的设计与施工原理——软土地基中使用的新桩型[C]// 第六届全国地基处理学术讨论会暨第二届全国基坑工程学术讨论会论文集. 温州, 2000: 43 - 46. (ZOU Zong-xuan, LIN Feng. Design and construction principles of reinforced concrete core deep cement mixing pile[C]// Proc of the 6th National Symposium on Foundation Treatment. Wenzhou, 2000: 43 - 46. (in Chinese))

[2] 吴 迈, 赵 欣, 窦远明, 等. 水泥土组合桩室内试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(11): 45 - 48. (WU Mai, ZHAO Xin, DOU Yuan-ming, et al. Experimental study on stiffened DCM pile in laboratory[J]. Industrial Construction, 2004, 34(11): 45 - 48. (in Chinese))

[3] 凌光容, 安海玉, 谢岱宗, 等. 劲性搅拌桩的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 92 - 96. (LING Guang-rong, AN Hai-yu, XIE Dai-zong, et al. Experimental study on concrete core mixing pile[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(2): 92 - 96. (in Chinese))

[4] 董 平, 秦然宙, 陈 征. 混凝土芯水泥土搅拌桩的有限元研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 344 - 348. (DONG Ping, QIN Ran-zhou, CHEN Zheng. FEM study of concrete-cored DCM pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 344 - 348. (in Chinese))

[5] 丁永军, 荣晓巍, 李进军. 关于劲性搅拌桩的若干问题[J]. 低温建筑技术, 2006(6): 97 - 99. (DING Yong-jun, RONG Xiao-wei, LI Jin-jun. Some problems about reinforced mixing pile[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2006(6): 97 - 99. (in Chinese))

[6] 丁永军, 李进军, 刘 峨, 等. 劲性搅拌桩的荷载传递规律[J]. 天津大学学报, 2010, 43(6): 530 - 536. (DING Yong-jun, LI Jin-jun, LIU E, et al. Load transfer mechanism of reinforced mixing pile[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(6): 530 - 536. (in Chinese))

[7] 陈颖辉, 许晶菁, 杨坤华, 等. 加芯搅拌桩单桩承载力的分析[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2006, 31(4): 58 - 64. (CHEN Ying-hui, XU Jing-jing, YANG Kun-hua, et al. Analysis on the load capacity of the concrete-cored DCM pile[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2006, 31(4): 58 - 64. (in Chinese))

[8] 吴 迈, 窦远明, 王恩远. 水泥土组合桩荷载传递试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 432 - 434. (WU Mai, DOU Yuan-ming, WANG En-yuan. A study on load transfer mechanism of stiffened DCM pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 432 - 434. (in Chinese))

[9] 顾士坦, 施建勇, 王春秋, 等. 劲性搅拌桩芯桩荷载传递规律理论研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2473 - 2478. (GU Shi-tan, SHI Jian-yong, WANG Chun-qiu, et al. Theoretical study of core pile load transfer regularity of reinforced mixing pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2473 - 2478. (in Chinese))