

DOI: 10.11779/CJGE2021S2065

水泥土复合管桩竖向承载特性现场试验

梁善斋

(湖北交投高速公路公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 依托某水泥土复合管桩施工现场荷载试验, 分析了竖向荷载作用下水泥土复合管桩轴力、桩侧摩阻力和桩身压缩量沿桩身的分布特征。测试结果表明, 竖向荷载下水泥土复合管桩荷载-沉降曲线呈缓变性, 桩身轴力沿桩身近似呈线性递减, 桩端荷载约占总荷载的 15%~20%, 水泥土复合管桩桩侧摩阻力承担 80%~85% 的竖向荷载; 水泥土与管桩的界面摩阻力较天然土与管桩界面摩阻力提升 6~9 倍; 水泥土复合管桩桩身压缩量占总沉降量的为 20%~30%。研究成果可为水泥土复合管桩竖向承载设计计算提供依据。

关键词: 水泥土复合管桩; 轴力; 侧摩阻力; 压缩量

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0280-04

作者简介: 梁善斋(1964—), 男, 高级工程师, 主要从事高速公路建设技术与质量管理工作。E-mail: 1526640725@qq.com。

Field tests on vertical bearing capacity of pipe piles in cement-improved soil

LIANG Shan-zhai

(HBCI Expressway Development Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to study the load transfer of the pipe piles in cement-improved soil under vertical loads, the axial load tests are conducted to analyze the distribution characteristics of axial force, side friction and compression along the pile body. The results show that the load-settlement curves of the pipe piles in cement-improved soil change slowly and gradually. The axial force of the piles decreases linearly along the pile depth. The vertical loads at the bottom of the piles range from 15% to 20% of the vertical loads, and the side friction of the piles in cement-improved soil bears 80% ~ 85% of the vertical loads. The side friction of the piles in cement-improved soil is 6~9 times that of the piles in natural surrounding soil. The ratio of the pile compression to the total settlement is 20%~30%. The research results may provide technical support for the vertical bearing design practice of the piles in cement-improved soil.

Key words: cement-improved pipe pile ; axial force; side friction resistance; compression

0 引言

预制管桩具有桩身强度高、刚度大、施工速度快等技术优势, 但管桩复合地基通常因桩周土先破坏导致桩身强度未得到充分发挥。水泥土复合管桩是在水泥土搅拌桩中施打预制管桩而形成的新桩型, 它既可以发挥管桩的承担性能, 又可通过大直径的水泥土桩提供侧摩阻力, 提高地基承载性能, 因此, 近年来水泥土复合管桩技术得到快速发展^[1]。

水泥土复合管桩的荷载传递包括两部分: 一是荷载通过管桩与水泥土桩界面的侧摩阻力传递到水泥土, 然后通过水泥土桩传递至桩周土体^[2]。吴迈等^[3]、李立业^[4]、叶观宝等^[5]等通过室内直剪试验和模型试验研究了复合桩中水泥土桩与管桩界面特性, 研究表明, 界面极限侧摩阻力为水泥土强度的 0.16~0.19 倍, 水泥土桩与管桩具有较好的共同工作特性。Jamsawang 等^[6]、钱于军等^[7]通过现场试验和数值模拟

等方法研究了复合桩竖向承载破坏模式, 主要有桩身整体下沉、复合桩管桩刺入以及复合段横截面破坏, 并提出了基于不同破坏模式的竖向承载力计算公式。Voottipruex 等^[8]、Wonglert 等^[9]、Wang 等^[10]研究了水泥土强度、桩长、桩径等参数对复合桩竖向承载力的影响规律。Wang 等^[11]、王安辉等^[12]提出了水平荷载下水泥土复合管桩 $p-y$ 曲线计算方法。现有研究主要通过数值模拟和室内模型试验研究水泥土复合管桩破坏模式、竖向承载力计算方法以及水泥土桩与管桩界面极限侧摩阻力。水泥土复合管桩中管桩竖向受荷时其承载实测数据有待积累。为此, 本研究依托某水泥土复合管桩现场荷载试验, 分析各级荷载下水泥土复合管桩轴力、桩侧摩阻力和桩身压缩量沿桩身的分布特征, 探究水泥土复合管桩中管桩竖向承载特性,

收稿日期: 2021-08-16

为水泥土复合管桩竖向承载设计计算提供技术支撑。

1 工程地质条件与桩基设计

某项目拟建场地地貌类型属宁绍平原南端，地表浅部为第四系全新统中晚期河口海相和海相堆积，其下分布有第四系晚更新统河相、海相和湖相混合堆积以及第四系中更新统陆相沉积。土层以粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉砂、粉土为主。地基土物理力学参数见表 1。地基软土层厚度大、压缩性高、承载力低。

采用水泥土复合管桩基础，充分利用场地的中等压缩性粉土层为持力层，单桩竖向承载力特征值要求为 1100 kN。水泥土桩径为 1000 mm，桩长为 10 m，42.5 普通硅酸盐水泥掺入量为 18%，软土专用固化剂掺入量为水泥用量的 2%~3%，在标准养护条件下，水泥土 90 d 龄期的立方体抗压强度值≥1.6 MPa。管桩选用 PHC-AB 400(95)-C80-10 型高强混凝土管桩，管桩桩长为 10 m。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

地层名称	层厚 /m	含水率/%	重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量 /MPa
粉质黏土	2	29.7	19.03	29.6	16.6	5.10
淤泥质粉质黏土	2	37.2	18.28	14.2	10.4	3.72
粉土	7	28.2	18.88	10.9	20.6	8.86
粉质黏土	6	30.2	18.74	29.1	16.9	6.82
淤泥质粉质黏土	25	39.1	17.97	14.0	10.2	3.16
粉质黏土	6	30.6	18.92	33.9	15.9	6.76
粉土	2	25.1	19.57	10.2	21.1	11.05
粉砂	6	—	—	—	—	20
黏土	3	36.4	18.52	31.8	14.3	5.24

2 现场载荷试验方案

2.1 传感器的埋设

试验桩共3根，编号为V-I、V-II、V-III，试桩参数均与工程桩设计参数一致。在管桩预制时，将振弦式应变计固定于管桩钢筋笼主筋上，用于测定桩体在受荷载作用下桩身的应变。应变计沿桩身相对的两根主筋上交叉布置，根据场地土层分布，应变计布置深度为2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 m。如图1所示，3根试桩以次穿过粉质黏土（层厚 2 m）、淤泥质粉质黏土（层厚 2 m），以粉土层为持力层。2, 4 m深度处应变计分别处于粉质黏土与淤泥质粉质黏土、淤泥质粉质黏土与粉土土层交界处。

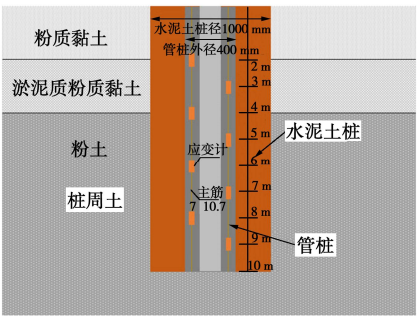


图 1 地层分布及应变计布设示意图

Fig. 1 Stratigraphic distribution and layout of strain gauges

应变计采用自锁式尼龙绑扎方式固定在钢筋笼预定位置，固定时确保应变计轴线与主筋平行；固定完成后浇筑混凝土、离心预制、75℃养护室养护成桩，养护完成后现场施打成桩。

2.2 加载方案

单桩静载试验采用慢速维持荷载法加载，依据《建筑基桩检测技术规范》（JGJ106）要求进行。荷载板直径为 400 mm，与管桩直径相同。每级荷载 220 kN，单桩连续加载 440~2200 kN，共 9 级荷载，其中第一级取分级荷载的 2 倍为 440 kN。

3 试验结果分析

以 V-I 号试桩为例，对试验数据进行分析，V-II 号与 V-III 号试桩结果与之类似，不再赘述。

3.1 单桩荷载-沉降特性

单桩 $Q-s$ 和 $s-lgt$ 曲线分别如图 2, 3 所示，随着荷载增加，水泥土复合管桩沉降量逐渐增大， $Q-s$ 曲线呈缓变型，累积沉降量均较小。V-I 号试桩累计沉降量 10.23 mm，最大回弹量 3.35 mm，回弹率 32.7%；V-II 号试桩累计沉降量 12.65 mm，最大回弹量 6.43 mm，回弹率 50.8%；V-III 号试桩累计沉降量 12.10 mm，最大回弹量 7.34 mm，回弹率 60.7%。

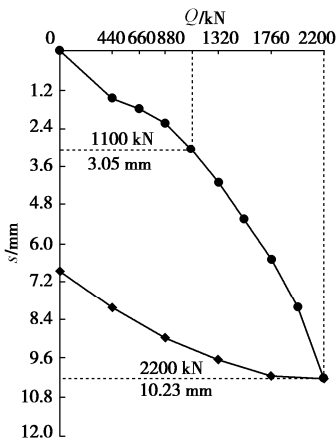


图 2 试桩 V-I 的 $Q-s$ 曲线

Fig. 2 $Q-s$ curves of pipe pile V-I

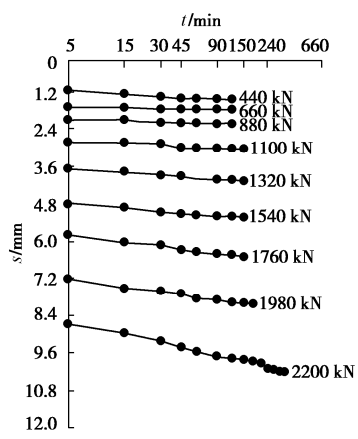


图3 试桩 V-I 的 $s-lgt$ 曲线

Fig. 3 $s-lgt$ curves of pipe pile V-I

3.2 桩身轴力分布规律

各级荷载下管桩桩身轴力分布如图 4 所示。管桩轴力在桩顶处最大，沿桩身向下递减，近似呈线性分布。随着竖向荷载的增加，试桩桩身轴力也随之增加，且桩身上部和中部承担荷载略大。

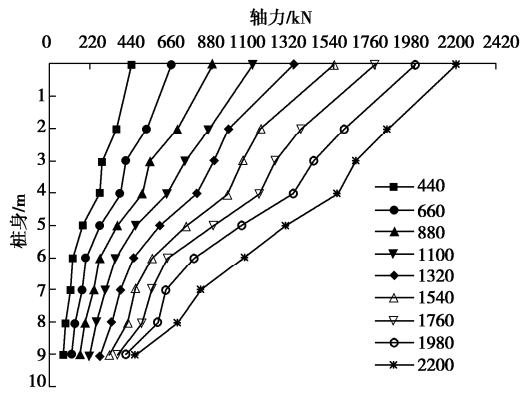


图4 试桩 V-I 的桩身轴力

Fig.4 Axial forces of pipe pile V-I

水泥土复合管桩管桩桩端阻力随着桩顶荷载的增大近似呈线性递增。管桩桩端荷载近似为总荷载的 15%~20%，桩侧摩阻力分担 80%~85%的竖向荷载，管桩表现出摩擦桩的工作特性。

3.3 桩侧摩阻力分布

每一级荷载作用下管桩桩身平均侧摩阻力如图 5 所示。桩侧摩阻力受桩侧有效法向应力和管桩水泥土相对位移等因素影响。随着荷载增加，侧摩阻力值逐渐增大。桩身上部（0~2 m）和下部（4~9 m）测得的侧摩阻力较大，而桩身中部（2~4 m）侧摩阻力较小。这主要是由于桩身中部为淤泥质粉质黏土，其强度较低缘故。

3 根试桩在 2200 kN 竖向荷载作用下，不同土层桩侧平均摩阻力发挥情况：粉质黏土层桩侧平均摩阻力达到 120~130 kPa，淤泥质粉质黏土层桩侧平均摩阻力在 60~70 kPa，粉土层桩侧平均摩阻力在 115~125 kPa。

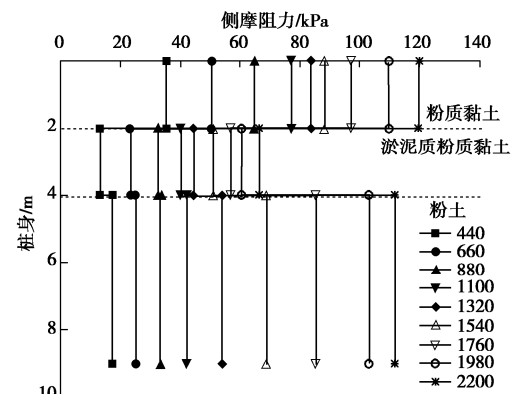


图5 试桩 V-I 桩侧摩阻力

Fig. 5 Side friction of pipe pile V-I

将试桩最大荷载下管桩侧摩阻力与勘察报告提供的传统管桩和钻孔灌注桩按土层深度加权平均的桩周土极限摩阻力标准值对比发现，实测水泥土复合管桩中管桩桩侧阻力值为传统管桩侧摩阻力的 6.20~8.63 倍；为钻孔灌注桩侧摩阻力的 6.96~10.08 倍。水泥土与管桩的界面摩阻力是原地基土与管桩界面摩阻力的 6 倍以上。

表 2 各桩型桩侧摩阻力

Table 2 Side frictions of various piles					
土层	复合桩 /kPa	管桩 /kPa	灌注桩 /kPa	复合桩 /管桩	复合桩/ 灌注桩
粉质黏土	125	16.00	14.00	7.48	8.55
淤泥质粉质黏土	65	7.00	6.00	8.63	10.08
粉土	120	18.00	16.00	6.20	6.96

3.4 桩身压缩变形量

计算得到不同位置处各级荷载下 3 根试桩各断面平均桩身压缩量如图 6 所示，各试桩在 2200 kN 作用下桩顶沉降量和桩身压缩量实测值见表 3。

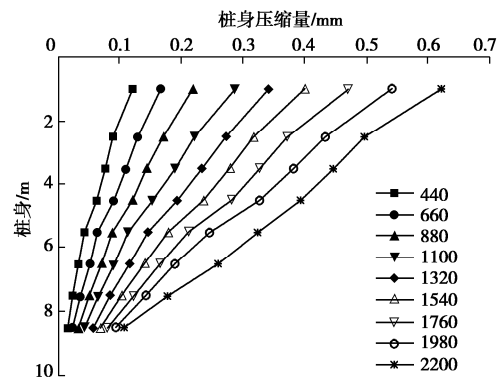


图6 试桩 V-I 桩身压缩量

Fig. 6 Compressions of pipe pile V-I

表 3 试桩极限荷载下沉降压缩量

Table 3 Settlement compressions of piles under load of 2200 kN					
试桩 编号	桩顶 荷载 /kN	桩顶沉 降量 /mm	桩身压 缩量 /mm	桩端 沉降 /mm	桩身压 缩沉降 比
V-I	2200	10.23	2.82	7.41	27.57%
V-II	2200	12.65	3.02	9.63	23.87%
V-III	2200	12.10	3.14	8.96	25.95%

桩身压缩量在桩顶处最大,沿桩身近似呈线性递减,且随着荷载的增大,桩身压缩量也随之增加。由桩顶沉降量与桩身压缩量求出桩端位移量,可见桩端阻力与桩端位移近似呈双曲线分布,如图 7。3 根试桩的桩身压缩量在 3 mm 左右,桩身压缩沉降比分别为 27.57%, 23.87% 及 25.95%。

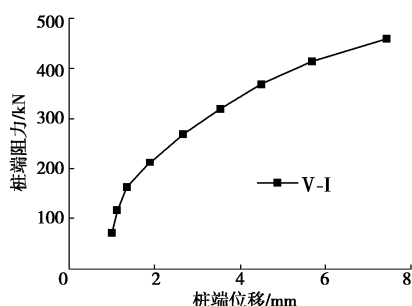


图 7 试桩 V-I 桩端阻力与位移关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between end resistance and displacement of pile V-I

4 结 论

(1) 水泥土复合管桩竖向受荷时,荷载与沉降量 $Q-s$ 曲线变化较缓,呈缓变形。桩身轴力沿桩身近似呈线性递减趋势。

(2) 竖向荷载下水泥土复合管桩中管桩桩端、桩侧摩阻力荷载承担比例分别为 15%~20%, 80%~85%, 表现出摩擦桩的工作特性。

(3) 水泥土复合管中水泥土与管桩的界面摩阻力是传统管桩与地基土界面摩阻力的 6~9 倍,为钻孔灌注桩桩侧摩阻力的 6~10 倍。

(4) 管桩桩顶受竖向荷载后,桩身压缩引起向下位移,但由于桩侧摩阻力的发挥,桩身轴力沿深度减小,使得桩身压缩量沿桩身近似呈线性递减趋势。桩身压缩量与沉降量比值为 20%~30%。

参考文献:

[1] 董平, 陈征宙, 秦然. 混凝土芯水泥土搅拌桩在软土地基中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 204 - 207. (DONG Ping, CHEN Zheng-zhou, QIN Ran. Use of concrete-cored DCM pile in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 204 - 207. (in Chinese))

[2] 李俊才, 张永刚, 邓亚光, 等. 管桩水泥土复合桩荷载传递规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 1): 3068 - 3076. (LI Jun-cai, ZHANG Yong-gang, DENG Ya-guang, et al. Load transfer mechanism of composite pile composed of jet-mixing cement and phc pile with core concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3068 - 3076. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 李立业. 水泥土复合管桩承载特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2016. (LI Li-ye. Study on the Bearing Capacity of Stiffened DCM Pile[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese))

[5] 叶观宝, 蔡永生, 张振. 加芯水泥土桩复合地基桩土应力比计算方法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 672 - 678. (YE Guan-bao, CAI Yong-sheng, ZHANG Zhen. Research on calculation of pile-soil stress ratio for composite foundation reinforced by stiffened deep mixed piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 672 - 678. (in Chinese))

[6] JAMSAWANG P, BERGADO D T, VOOTIPRUEX P. Field behaviour of stiffened deep cement mixing piles[J]. Proceedings of the ICE-Ground Improvement, 2010, 164(1): 33 - 49.

[7] 钱于军, 许智伟, 邓亚光等. 劲性复合管桩的工程应用与试验分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 998 - 1001. (QIAN Yu-jun, XU Zhi-wei, DENG Ya-guang, et al. Engineering application and test analysis of strength composite piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 998 - 1001. (in Chinese))

[8] VOOTIPRUEX P, SUKSAWAT T, BERGADO D T, et al. Numerical simulations and parametric study of SDCM and DCM piles under full scale axial and lateral loads[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(3): 318 - 329.

[9] WONGLERT A, JONGPRADIST P. Impact of reinforced core on performance and failure behavior of stiffened deep cement mixing piles[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 69: 93 - 104.

[10] WANG A H, ZHANG D W, DENG Y G. A simplified approach for axial response of single precast concrete piles in cement-treated soil[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(10): 1491 - 1501.

[11] WANG A H, ZHANG D W, DENG Y G. Lateral response of single piles in cement-improved soil: numerical and theoretical investigation[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 102: 164 - 178.

[12] 王安辉, 章定文, 谢京臣. 软黏土中劲性复合桩水平承载特性 $p-y$ 曲线研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 381 - 389. (WANG An-hui, ZHANG Ding-wen, XIE Jing-chen. $p-y$ curves for lateral bearing behavior of strength composite piles in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 381 - 389. (in Chinese))