

湛江组结构性黏土中桩基竖向承载性状模型试验

汤 斌¹, 郭凡夫¹, 谢 亮², 沈建华³

(1. 武汉科技大学城市建设学院, 湖北 武汉 430065; 2. 建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京 100007;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要:利用原位模型试验研究湛江组结构性黏土中桩基在竖向荷载作用下的承载性状。选取材质和桩径相同、入土深度不同的 6 组模型桩, 采用慢速维持荷载法, 在湛江组结构性黏土中进行单桩原位竖向承载模型试验, 得到了单桩荷载-沉降曲线、单桩轴力沿桩身分布曲线、单桩侧摩阻力沿入土深度分布曲线。结果表明: 在竖向荷载作用下, 湛江组结构性黏土中模型单桩荷载-沉降曲线均存在显著陡降, 极限状态拐点明显, 竖向极限承载力随着长径比的增加而增大; 在相同荷载作用下, 随着长径比的增加, 桩顶沉降逐渐减小且减小趋势逐渐变缓, 在较大荷载作用下超长桩荷载-沉降曲线中桩顶沉降的减小速率几乎为零, 存在有效桩长; 在同级桩顶荷载作用下, 单桩桩端阻力占总桩顶荷载的比例随着长径比的增加而逐渐变小, 由最大 29.8% 减小为 0.8%; 不同入土深度的单桩在极限荷载作用下的桩侧极限摩阻力变化不大, 均稳定在 40 kPa 左右。

关键词:湛江组结构性黏土; 桩基; 竖向承载性状; 模型试验

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2016)05-0060-05

Model test study on vertical bearing capacity of pile foundation in Zhanjiang group structural clay//TANG Bin¹, GUO Fanfu¹, XIE Liang², SHEN Jianhua³ (1. College of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. CIGIS (China) Limited, Beijing 100007, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The bearing capacity of a pile foundation in Zhanjiang group structural clay under vertical loads was studied based on in situ model tests. In single pile in situ model tests, six groups of pile models with the same material and diameter but different depths in soil were selected, and the slow maintained load method was used. The load-settlement curve, axial force distribution along the pile shaft, and side friction varying with the depth in soil of single piles were obtained. Under vertical loads, the load-settlement curves of all six groups of single pile models in the Zhanjiang group structural clay show sharply declining trends, with yielding points occurring at the ultimate limit state, and the vertical ultimate bearing capacity increases with the length-diameter ratio of the single piles; under constant loads, with the increase of the length-diameter ratio, the settlement at the pile top gradually decreases at a slowly decreasing rate; under large loads, the decreasing rate of resettlement at the top of super-long piles, according to the load-settlement curve, is almost zero, and there exists an effective pile length; and under a constant level of loads at the pile top, the proportion of the pile end resistance to the total load at the pile top gradually decreases with the increase of the length-to-diameter ratio, with the maximum value decreasing from 29.8% to 0.8%, while the side frictions of single piles with different depths in soil under ultimate loads change little, with a stable value of about 40 kPa.

Key words: Zhanjiang group structural clay; pile foundation; vertical bearing capacity; model test

分布在我国湛江地区的湛江组结构性黏土, 以其特有的强结构性引起了学术界和工程界的广泛关注。湛江组结构性黏土的强结构性使之被赋予了独特的工程特性, 伴随而来的是工程实际中大量的土木 engineering 问题^[1-3]。因湛江地区上部黏土及上覆土层的土质偏软, 而且上部建筑荷载越来越大, 天然地基已经满足不了高层建筑的承载要求, 故而桩基础在

当地有着非常广泛的应用需求^[4]。桩基础作为一种重要的基础形式被广泛应用于土木工程中。国内外学者对桩基竖向承载特性做了大量的研究, 成果丰富。Briaud 等^[5]采用多种承载力预测方法及沉降计算方法对 98 根单桩竖向静载试验数据进行了对比分析, 并对计算方法提出了合理建议; 周宏磊等^[6]以北京地区典型第四纪冲洪积

交互地层条件下的钻孔灌注桩为研究对象,基于单桩竖向抗压静载试验结果,对长桩荷载传递特征、荷载-变形性状进行了分析;张瑞坤等^[7]基于无锡地铁高架桥试桩工程中4根大直径超长钻孔灌注桩的现场静荷载试验和桩身应力测试试验,结合同一地区12根同类型桩的试验成果,研究了无锡地区大直径超长钻孔灌注桩竖向荷载下的侧、端阻力发挥特点和荷载传递规律;郑刚等^[8]在对试桩实测资料进行分析的基础上,采用数值分析方法,研究了深厚软土地区单桩在竖向荷载作用下由短桩至超长桩随桩长增加时的荷载传递性状;冯世进等^[9]在西安地区进行了单桩静荷载试验,采用滑动测微计测试每米范围内桩身轴力的变化,研究了黄土地基中超长钻孔灌注桩的承载性能、桩身轴力传递规律、桩侧阻力和桩端阻力的发挥性状;宋兵等^[10]认为影响桩侧摩阻力的主要因素包括桩周土体的强度、应力状态以及桩土界面强度,侧摩阻力受界面强度控制,影响其变化的根本原因是土体的应力状态;彭劼等^[11]考虑了沉桩挤土效应引起的桩周土体的应力和孔隙比的变化及其对土体非线性性质的影响,修正了现有的荷载传递函数,并编制了计算程序。这些研究成果使得人们对桩基竖向承载性状有了较为深入的认识,对特定区域特定土质条件下的桩基工程设计和施工具有指导意义,但由于湛江组结构性黏土具有强结构性,以上成果应用于湛江组结构性黏土时在计算精度方面或多或少存在一定误差。本文采用现场单桩模型试验,对湛江组结构性黏土中桩基竖向承载性状进行研究。

1 现场单桩模型试验

1.1 试验场地及模型桩概况

试验场地位于广东省湛江市东海岛某钢铁基地,选择湛江组结构性黏土中的灰色黏土层作为试验土层,土层参数如下:含水率为44.29%,密度为1.66 g/cm³,孔隙比为1.37,压缩模量为7.00 MPa。模型桩由钢管制成,外径D=30 mm,内径d=24 mm;现场布置6组模型桩,入土深度分别为600 mm、900 mm、1 200 mm、1 500 mm、1 800 mm和2 100 mm。模型桩桩身的应力应变数据由贴在桩身内侧的电阻应变片采集,同一高度需对称布置2片电阻应变片,并在距离桩端50 mm处开始对称布置,之后以100 mm的间隔逐层贴至桩顶。

1.2 试验设备布置及加载方法

图1、图2分别为模型试验装置立面示意图及模型试验各仪器连接示意图(俯视)。试验采集应变计读数的装置为BZ2205C程控静态电阻应变仪,并

通过配套软件将数据导入电脑;桩顶位移采用量程为50 mm的百分表测量,百分表设置在桩顶荷载板上,通过磁性表座与钢管连接并固定,钢管由沙袋固定并悬空,以免受到桩基加载的影响;桩顶通过100 kN液压千斤顶加载,千斤顶反力由上面的荷载钢板提供,钢板通过4根锚桩固定,锚桩上有螺栓用于承载荷载钢板自重,若反力不够可在钢板上堆放沙袋或石块;为提高试验精度,桩顶荷载的测力系统设计为:将荷载传感器放置于千斤顶上,并连接BZ2216数字式测力仪来读取桩顶荷载。试验采用慢速维持荷载法加载,通过液压千斤顶进行竖向加载,荷载分级按预计最大试验承载力等分为10~12级逐级等量加载。

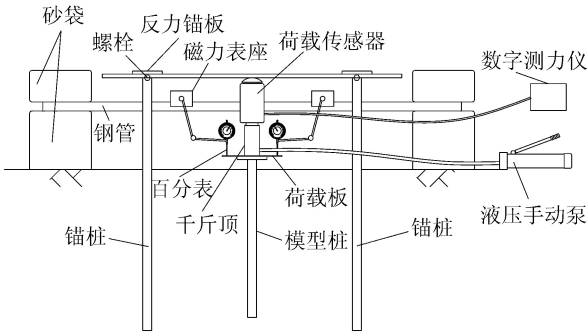


图1 模型试验装置立面示意图

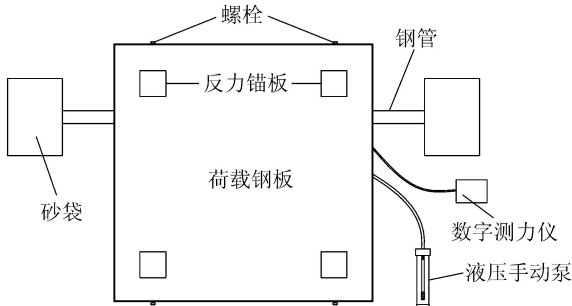


图2 模型试验各仪器连接示意图(俯视)

2 试验结果及分析

2.1 试验数据处理

2.1.1 桩顶沉降计算

第j级荷载加载稳定时桩顶的总沉降s_j为

$$s_j = a_0 - a_j \tag{1}$$

式中:a₀为百分表的初始读数;a_j为第j级荷载加载稳定时百分表的读数。

2.1.2 桩的受力计算

a. 桩身第i截面轴力N_i为

$$N_i = E_m A_m \varepsilon_i \tag{2}$$

其中

$$A_m = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2} (\varepsilon_{i1} + \varepsilon_{i2})$$

式中:E_m为模型单桩的桩身弹性模量;A_m为模型单

桩的桩身截面积; ε_i 为模型单桩的桩身截面应变值; ε_{i1} 、 ε_{i2} 为各截面上 2 个应变计测得的应变值。

b. 桩身第 i 段平均桩侧摩阻力 q_{si} 为

$$q_{si} = \frac{N_{i-1} - N_i}{\pi D \Delta L_i} \tag{3}$$

式中: N_{i-1} 、 N_i 分别为桩身第 $i-1$ 截面和第 i 截面的轴力; ΔL_i 为第 i 截面与第 $i-1$ 截面间的距离。

c. 第 j 级荷载下的桩端阻力 q_{pj} 为

$$q_{pj} = Q_j - \sum q_{si} \pi D \Delta L_i \tag{4}$$

式中: Q_i 为第 j 级荷载下的桩顶荷载; $\sum q_{si} \pi D \Delta L_i$ 为第 j 级荷载下的桩侧总摩阻力。

2.2 单桩荷载-沉降曲线及极限承载力

本试验中的主要变量为单桩的长径比 L/D , 以 $L/D \geq 50$ 为超长桩^[12], 将试验单桩分为两组: 第一组普通桩, 入土深度为 600 mm、900 mm 和 1 200 mm; 第二组超长桩, 入土深度为 1 500 mm、1 800 mm 和 2 100 mm。两组试验各单桩的荷载-沉降曲线 (Q - s 曲线) 如图 3 所示, 单桩竖向极限承载力 Q_u 及长径比 L/D 见表 1。

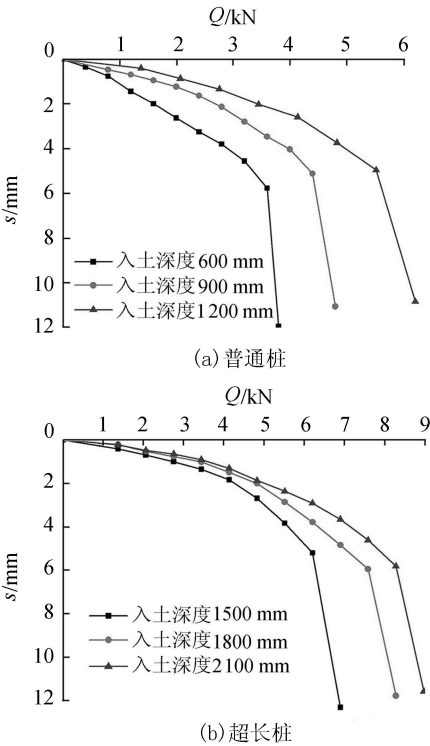


图 3 各单桩 Q - s 曲线

表 1 各单桩竖向极限承载力及长径比

入土深度/mm	竖向极限承载力 Q_u /kN	长径比 L/D
600	3. 60	20
900	4. 40	30
1 200	5. 52	40
1 500	6. 21	50
1 800	7. 59	60
2 100	8. 28	70

从图 3 可以看出各单桩 Q - s 曲线均存在显著陡

降现象, 极限状态拐点明显。在相同荷载作用下, 随着长径比的增加, 桩顶沉降逐渐减小且减小趋势逐渐变缓, 在较大荷载作用下超长桩 Q - s 曲线中桩顶沉降的减小速率几乎为零, 存在有效桩长。根据表 1 分析得出, 模型单桩的竖向极限承载力随着长径比的增加而增大。

2.3 单桩桩身轴力及桩端阻力发挥性状

图 4 是不同竖向荷载作用下各单桩桩身轴力, 可以看出, 随着荷载的增大, 轴力沿桩端方向减小的速率越来越大; 随着长径比的增加, 桩身轴力减小的程度也愈发明显, 桩端部轴力与桩顶部轴力相差很大。这是因为桩顶荷载大部分用以克服桩周土体向上的摩阻力, 即桩顶荷载在向下传递过程中转移给了桩周土体, 故而桩身轴力逐渐减小, 试验单桩表现出摩擦桩的力学特性。

表 2 为各单桩桩端阻力占总桩顶荷载比例。由于加载分级不同, 入土深度 1 200 ~ 2 100 mm 的单桩桩端阻力占总桩顶荷载比例最大为 29. 8%, 最小为 0. 8%; 在相同桩顶荷载下, 随着长径比的增加, 单桩桩端阻力占总桩顶荷载的比例逐渐变小, 表明随着长径比的增加, 单桩端部乃至单桩下部受到桩顶荷载影响的程度会越来越小。

表 2 单桩桩端阻力占总桩顶荷载比例

荷载/kN	不同入土深度单桩桩端阻力占总桩顶荷载比例/%			
	1 200 mm	1 500 mm	1 800 mm	2 100 mm
1. 38	8. 40	0. 90	1. 10	0. 80
2. 07	12. 60	4. 20	2. 80	2. 60
2. 76	14. 90	8. 90	7. 80	3. 30
3. 45	16. 30	9. 10	8. 40	5. 00
4. 14	17. 30	12. 80	9. 90	5. 10
4. 83	23. 30	16. 70	13. 80	7. 60
5. 52	29. 80	17. 90	15. 80	7. 30
6. 21		28. 80	19. 30	8. 70
6. 90			23. 90	8. 80
7. 59			27. 70	14. 30
8. 28				19. 60

2.4 单桩桩侧摩阻力分析

图 5 为不同竖向荷载作用下各单桩平均桩侧摩阻力。图 5 表明不同入土深度的单桩在极限荷载作用下的桩侧极限摩阻力变化不大, 均稳定在 40 kPa 左右。原因是试验所选场地土质相对均匀, 桩周土的侧压力变化较小。对桩侧极限摩阻力产生影响的两个力学因素(内摩擦角和桩侧表面与土之间的附着力) 均无明显变化, 故桩侧极限摩阻力的变化有限。

图 5(f) 中, 在入土深度 1 200 ~ 1 400 mm 处摩阻力有一个突变, 原因可能是应变片异常或土层在该处出现夹层。如果是应变片异常, 很可能会导致该组数据与相邻数据不在一个数量级, 但该组异常数据突变不大, 经分析可能是出现了一定厚度的夹层。

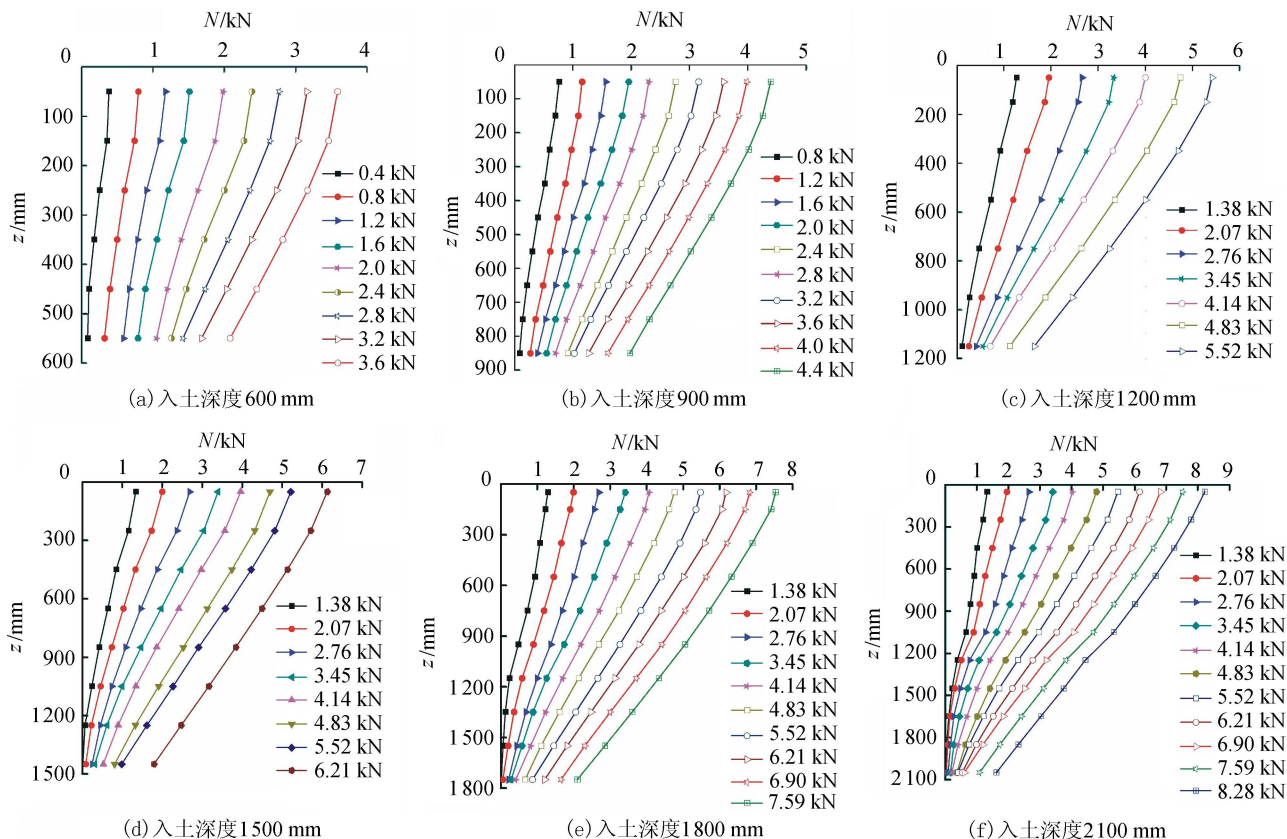


图 4 不同竖向荷载作用下各单桩桩身轴力

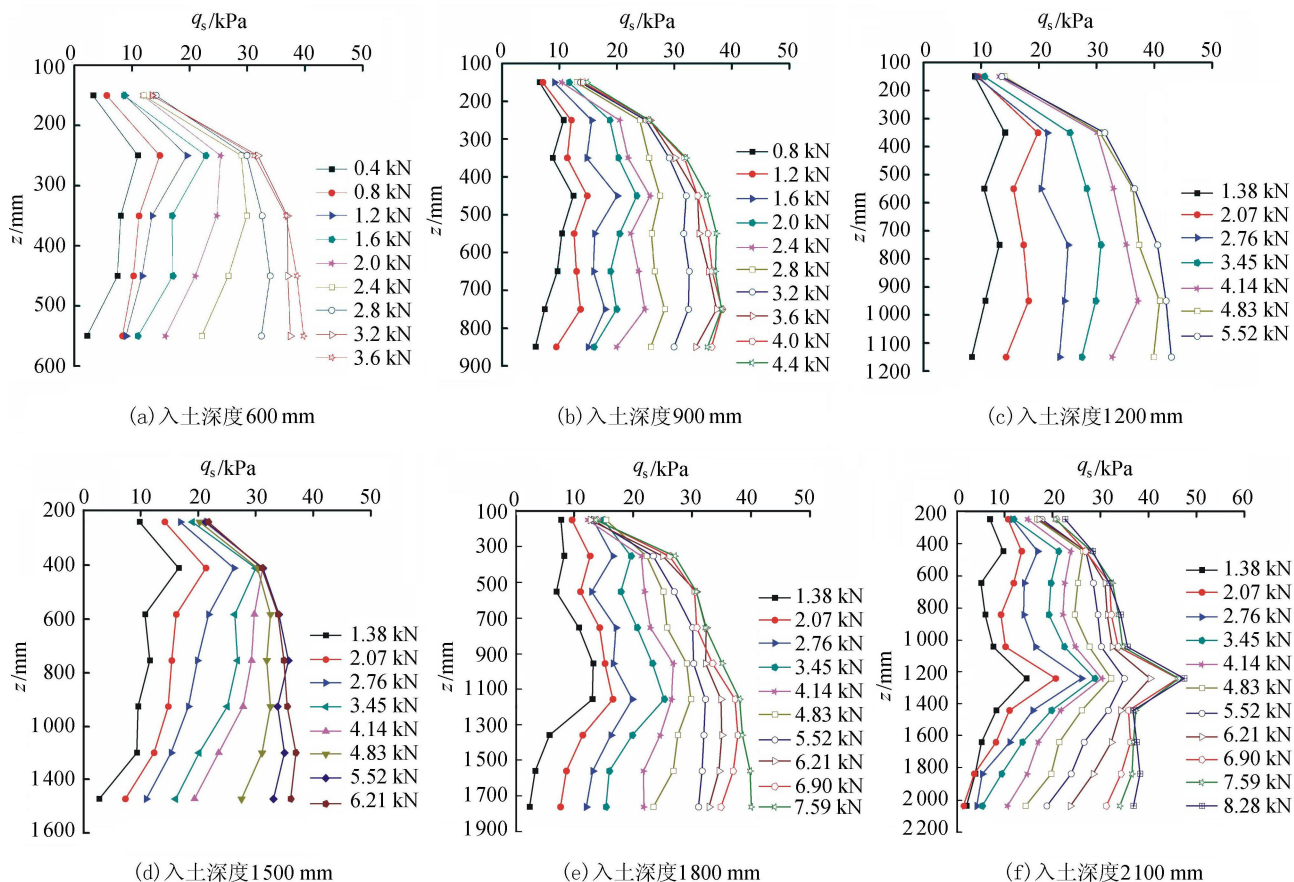


图 5 不同竖向荷载作用下各单桩平均桩侧摩阻力

由于未现场挖开该土层,故真正原因还有待分析,但对整体的侧摩阻力沿深度的分布趋势影响不大。

3 结 论

a. 在竖向荷载作用下,湛江组结构性黏土中模型单桩 $Q-s$ 曲线均存在显著陡降,极限状态拐点明显,竖向极限承载力随着长径比的增加而增大。

b. 在相同荷载作用下,随着长径比的增加,桩顶沉降逐渐减小且减小趋势逐渐变缓,在较大荷载作用下超长桩 $Q-s$ 曲线中桩顶沉降的减小速率几乎为零,存在有效桩长。

c. 单桩桩端阻力占总桩顶荷载比例最大为 29.8%,最小为 0.8%;在同级桩顶荷载下,随着长径比的增加,单桩桩端阻力占总桩顶荷载的比例逐渐变小,试验单桩表现出摩擦桩的力学特性。

d. 不同入土深度的单桩在极限荷载作用下的桩侧极限摩阻力变化不大,即模型单桩在该土层的桩侧极限摩阻力稳定在 40 kPa 左右。

参考文献:

[1] 沈建华,汪稔,朱长歧. 湛江组灰色黏土空间展布规律研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 331-336. (SHEN Jianhua, WANG Ren, ZHU Changqi. Research on spatial distribution law of gray clays of Zhanjiang formation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup1): 331-336. (in Chinese))

[2] 郑郎,汪稔,吕海波,等. 浅谈湛江组结构性黏土的区域特性研究[C]//2011年全国工程地质学术年会论文集. 西宁:青海省国土厅, 2011:304-307.

[3] 孔令伟,吕海波,汪稔,等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 2002, 33(9): 82-88. (KONG Lingwei, LÜ Haiibo, WANG Ren, et al. Engineering properties and micro-mechanism of structural marine soil in Zhanjiang sea area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(9): 82-88. (in Chinese))

[4] 张丽. 浅谈第四系湛江组黏土层工程特点[J]. 采矿技术, 2010, 10(1): 24-25. (ZHANG Li. Introduction to quaternary system in Zhanjiang clay layer engineering characteristics[J]. Mining Technology, 2010, 10(1): 24-25. (in Chinese))

[5] BRIAUD J L, TUCKER L M. Measured and predicted axial response of 98 piles [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(9): 1984-1001.

[6] 周宏磊,陶连金,王法. 非均质地基土条件下的钻孔灌注长桩竖向承载性状分析研究[J]. 工程勘察, 2009, 37(12): 26-30. (ZHOU Honglei, TAO Lianjin, WANG Fa. Study on bearing behaviors of long bored piles in the heterogeneous strata [J]. Journal of Geotechnical

Investigation & Surveying, 2009, 37(12): 26-30. (in Chinese))

[7] 张瑞坤,石名磊,倪富健,等. 无锡大直径超长钻孔灌注桩承载性状试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(6): 1194-1200. (ZHANG Ruikun, SHI Minglei, NI Fujian, et al. Experimental study of the bearing properties of large-diameter and super-long bored pile in Wuxi[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2012, 42(6): 1194-1200. (in Chinese))

[8] 郑刚,张立明,王琦. 超长桩荷载传递机理有限元分析[J]. 天津大学学报, 2012, 45(11): 945-952. (ZHENG Gang, ZHANG Liming, WANG Qi. Finite element analysis on load transfer mechanism of overlength piles[J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(11): 945-952. (in Chinese))

[9] 冯世进,柯瀚,陈云敏,等. 黄土地基中超长钻孔灌注桩承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 110-114. (FENG Shijin, KE Han, CHEN Yunmin, et al. Experimental study on super-long bored pile in loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 110-114. (in Chinese))

[10] 宋兵,蔡健. 预应力管桩侧摩阻力影响因素的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3863-3869. (SONG Bing, CAI Jian. Research on influence factors of side soil resistance of phc pipe pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup2): 3863-3869. (in Chinese))

[11] 彭劼,施建勇,黄刚. 考虑挤土效应的桩基承载力分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(2): 105-108. (PENG Jie, SHI Gangyong, HUANG Gang. Analysis of bearing capacity of pile foundation in consideration of compaction effect[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2002, 30(2): 105-108. (in Chinese))

[12] 俞亚南,冯世挺,宋连峰. 软土地区超长钻孔灌注桩承载性状试验研究[J]. 工业建筑, 2002, 32(11): 33-35. (YU Yanan, FENG Shiting, SONG Lianfeng. Test study on the super-long bored pile in soft ground[J]. Industrial Construction, 2002, 32(11): 33-35. (in Chinese))

(收稿日期:2015-09-30 编辑:熊水斌)

