

# 软土地区超长单桩承载特性的现场试验研究

张 麦<sup>1</sup>, 李术才<sup>1</sup>, 张乾青<sup>1, 2\*</sup>, 李利平<sup>1</sup>, 周宗青<sup>1</sup>

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 软土地区超长钻孔灌注桩现场静载试验表明, 浆液上返作用对桩侧泥皮的固化作用和桩端浆液对桩端沉渣和持力层的压密固化作用使得后注浆桩的承载能力得以提高。使用荷载下, 桩身压缩占桩顶沉降的 90%以上, 最大试验荷载时桩顶沉降的 70%来自桩身压缩。在对超长桩进行设计时, 不能忽视桩身压缩对桩顶沉降的影响。超长桩侧上部土层摩阻力具有不同程度的软化现象, 而中下部土层侧摩阻力未完全发挥。传统的超长桩承载力计算方法和其实际承载能力会有一定误差。

**关键词:** 钻孔灌注桩; 注浆; 桩身轴力; 桩土相对位移; 桩侧摩阻力

**中图分类号:** TU473.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-4548(2013)S2-1066-05

**作者简介:** 张 麦(1986-), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要从事基础工程和隧道工程的研究工作。E-mail: bowanghou1@sina.com。

## Bearing behaviors of super-long single pile in soft soil areas

ZHANG Qian<sup>1</sup>, LI Shu-cai<sup>1</sup>, ZHANG Qian-qing<sup>1, 2</sup>, LI Li-ping<sup>1</sup>, ZHOU Zong-qing<sup>1</sup>

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The static load test results of super-long bored piles in soft soil areas show that the curing effect of slurry on mud cake around pile shaft and the compaction and curing effect of slurry on the sediment and bearing layer can improve the bearing capacity of single pile. Under the working load, the compression of pile shaft accounts for more than 90% of pile top settlement, and the percentage of super-long pile top settlement caused by the compression of pile shaft is over 70% under the maximum load. Therefore, the influence of pile shaft compression on the pile head settlement should not be ignored in the design of super-long piles. Moreover, it can be concluded that the skin friction softening occurs in the upper soil layers of the super-long piles, whereas the skin friction in the deeper soil layers can not be fully mobilized. The traditional methods for the bearing capacity calculation of super-long piles will have a certain error in the actual bearing capacity.

**Key words:** bored pile; grouting; axial force; relative displacement of pile-soil; skin friction

## 0 引言

随着城市建设规模的日益扩大, 土地资源越来越有限, 加之施工、设计和建造水平的不断提高, 高层建筑和大型工业建筑物不断涌现。桩基础因具有整体性好、竖向承载力高、基础沉降小等优点而成为高层和超高层建筑的主要基础型式。超高层建筑的建设使得基底荷载越来越大, 往往要求桩基穿越深厚的土层进入相对较好的持力层以获得较高的承载力并控制变形, 大直径超长桩的应用成为一种趋势, 部分超高层建筑布置的桩长甚至超过 100 m, 如温州世贸中心采用桩长 80~120 m 不等的钻孔灌注桩<sup>[1]</sup>, 温州鹿场广场塔楼中钻孔灌注桩的最大施工桩长达到 110 m<sup>[2]</sup>, 上海中心大厦采用 88 m 的超长灌注桩<sup>[3]</sup>。由于超长桩的长径较大, 导致桩土相对刚度变小, 其受力性状与

中、短桩有较大区别<sup>[4-8]</sup>, 以往根据中、短桩形成的认识对超长桩已不再适用, 这给桩基受力性状研究的传统课题提出了新的挑战。同时, 钻孔灌注桩施工过程中存在桩端沉渣、桩端持力层扰动、桩身质量、桩侧泥皮以及钻孔应力松弛等导致同一场地钻孔灌注桩承载力离散的问题。针对上述问题, 人们有针对性地开发了桩端后注浆技术。桩端后注浆技术可显著改善桩侧受力性状, 并可大幅度地提高桩端的承载力。鉴于桩端后注浆技术存在着诸多优点, 桩端后注浆技术

**基金项目:** 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDEK1210); 中国博士后科学基金面上项目(2012M521339); 山东大学自主创新基金项目(2012GN012)

**收稿日期:** 2013-06-15

\*通讯作者

在钻孔灌注桩中应用越来越广泛, 有必要对钻孔灌注桩的受力性状进行深入研究。

本文选取软土地区 2 根非注浆桩和 4 根后注浆桩进行单桩静载试验, 分析超长后注浆单桩和非注浆单桩承载特性的异同, 并进一步研究超长后注浆单桩的受力机理, 为类似工程提供参考借鉴。

## 1 试验场地地质条件

试验场地位于浙江省宁波市, 场地地基土物理力学参数见表 1。试验采用钻孔灌注桩, 桩端持力层为 8 层粉砂层, 入持力层深度 8 m。本文分别对 2 根非注浆桩 TS5 和 TS6, 4 根注浆桩 TS1, TS2, TS3 和 TS4 进行了单桩静载试验。试桩参数见表 2。

表 1 各土层参数

Table 1 Parameters of soil layers

土层	岩土名称	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	侧阻特 征值 $q_{sk}/\text{kPa}$	端阻特 征值 $q_{pk}/\text{kPa}$
1	杂填土	2.36		
3-1	淤泥质粉质 黏土	9.20	5	
3-2	粉砂	2.62	16	
4	黏土	6.32	13	
5	粉质黏土	9.65	25	
6-1	砂质粉土	8.79	20	
6-2	砂质粉土	6.50	22	
7-1	粉质黏土	7.45	16	
7-2	粉质黏土	12.37	27	
8	粉砂	11.27	30	1500
9	粉质黏土	8.39	28	
10	黏质粉土	7.03	26	
11-1	粉质黏土	6.90	25	

表 2 试桩的参数

Table 2 Parameters of test piles

桩号	桩长 /m	桩径 /mm	桩龄 /d	混凝土 标号	配筋
TS1	56.6	1000	60	C45	24ф28
TS2	56.7	1000	75	C45	24ф28
TS3	56.5	900	88	C45	20ф28
TS4	56.9	900	86	C45	20ф28
TS5	56.6	900	85	C35	20ф28
TS6	57.0	900	72	C35	20ф28

## 2 试桩静荷载试验结果分析

本工程试桩采用水泥块堆载-反力架装置, 采用慢速维持荷载方法, 荷载加卸载方法依照相关规范。设置在桩顶的位移传感器可测得桩顶沉降。利用布置在后注浆桩身不同位置的钢筋应力计间接获得桩身轴力、桩侧阻力以及桩身不同位置的桩土相对位移量等。

### 2.1 单桩的荷载-沉降曲线

为节省篇幅, 本文给出注浆桩 TS3~TS4 与非注浆桩 TS5~TS6 桩顶和桩端的荷载-沉降曲线, 见图 1。

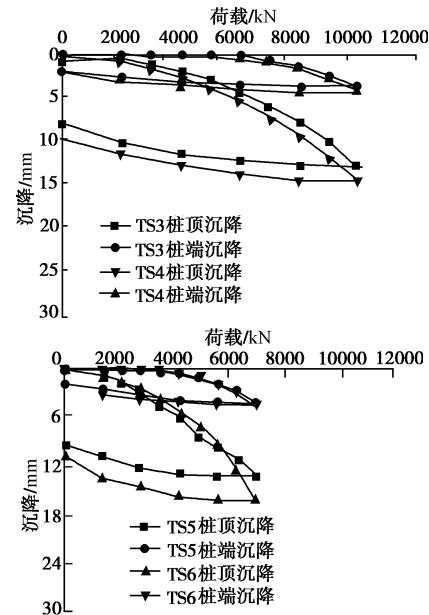


图 1 试桩实测荷载-沉降曲线

Fig.1 Measured load-settlement curves of test piles

由图 1 可知, 试桩 TS3~TS6 的荷载-沉降曲线均为缓降型。桩顶荷载水平较低时, 桩端沉降为零, 桩顶沉降主要来自桩身压缩。随荷载水平的增加, 桩端沉降逐渐出现。荷载水平为 5000 kN 时, 注浆桩 TS3~TS4 桩端沉降开始出现, 其值分别为 0.04 mm 和 0.07 mm。而未注浆桩 TS5~TS6 加载到 3500 kN 时, 桩端沉降就开始发展, 其值分别为 0.11 mm 和 0.09 mm。说明桩端后注浆技术改善了桩侧土的力学特性, 固化了桩侧的泥皮, 增强了侧摩阻力的作用。最大试验荷载 (10500 kN) 时, 注浆桩 TS3~TS4 的桩端沉降分别为 4.54 mm 和 3.71 mm, 桩顶沉降分别为 14.73 mm 和 13 mm; 荷载水平为 7350 kN 时, TS3~TS4 的桩端沉降分别为 0.99 mm 和 0.76 mm, 桩顶沉降分别为 7.22 mm 和 5.99 mm。非注浆桩 TS5~TS6 在最大试验荷载 (7000 kN) 时对应的桩端沉降分别为 4.29 mm 和 4.1 mm, 桩顶沉降分别为 16.04 mm 和 13.32 mm。对比可知, 后注浆桩的承载能力得以大幅度提高。浆液上返作用对桩侧泥皮的固化作用和桩端浆液对桩端沉渣和持力层的压密固化作用使得后注浆桩的承载能力得以提高。

### 2.2 桩身压缩量

利用桩端沉降和桩顶沉降可得桩身压缩量。最大试验荷载下, 试桩 TS1~TS6 的桩身压缩量如表 3 所示。

在使用荷载和最大试验荷载下, 试桩 TS1~TS6 的桩身压缩量分别占桩顶沉降的 90% 和 70%, 桩身质量及沉渣对超长桩的桩顶沉降有重要影响。所以在超长桩设计时, 除考虑桩侧摩阻力和桩端阻力提供的承载力外, 还要充分考虑桩身质量对沉降的影响。实际工程中可通过提高桩身混凝土标号及增加桩身配筋等措施提高桩身强度以达到减小桩顶沉降的目的。

表3 试桩桩身压缩量  
Table 3 Deformations of test piles

桩号	最大加载/kN	桩顶位移/mm	桩顶	桩端	桩身	桩身	压缩量百/mm		
			桩端位移/mm	残余变形/mm	残余变形/mm	压缩量/mm			
TS1	12500	12.95	3.12	7.20	1.77	9.83	44.4	43.3	75.9
TS2	12500	15.18	4.42	9.98	2.68	10.76	34.3	39.4	70.9
TS3	10500	14.73	4.27	9.86	2.12	10.46	33.1	53.3	71.0
TS4	10500	13.00	3.71	8.11	1.96	9.29	37.6	47.2	71.5
TS5	7000	13.32	3.97	9.16	1.61	9.35	31.2	57.6	70.2
TS6	7000	16.04	4.29	10.67	2.09	11.75	33.5	51.3	73.3

### 2.3 桩身轴力

利用埋设在桩身内的钢筋应力计, 通过下述步骤可获得试桩 TS1~TS4 在竖向荷载作用下的桩身轴力和桩侧摩阻力, 即: ①测试获得每级荷载下钢筋应力计的钢弦振动频率; ②根据所得频率值计算某一级荷载作用下  $i$  断面钢筋轴力, 假定钢筋和混凝土浇灌在一起, 假定二者变形一致, 可得桩身混凝土应变  $\varepsilon_i$ ; ③计算桩身混凝土应力  $\sigma_{ci}=E_c \varepsilon_i$ ; ④计算各断面轴力  $P_i=A_{si} \sigma_{si}+A_{ci} \sigma_{ci}$ , 其中  $A_{si}$  为钢筋横截面积,  $\sigma_{si}$  为钢筋应力,  $A_{ci}$  为混凝土横截面积,  $\sigma_{ci}$  为混凝土应力。试桩 TS1~TS4 在不同荷载水平下的桩身轴力见图 2。

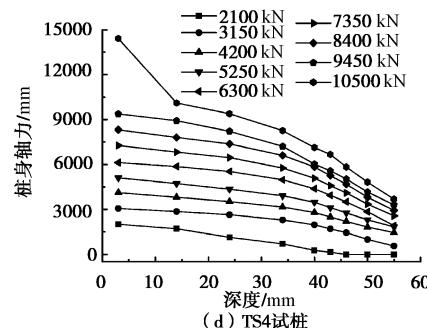
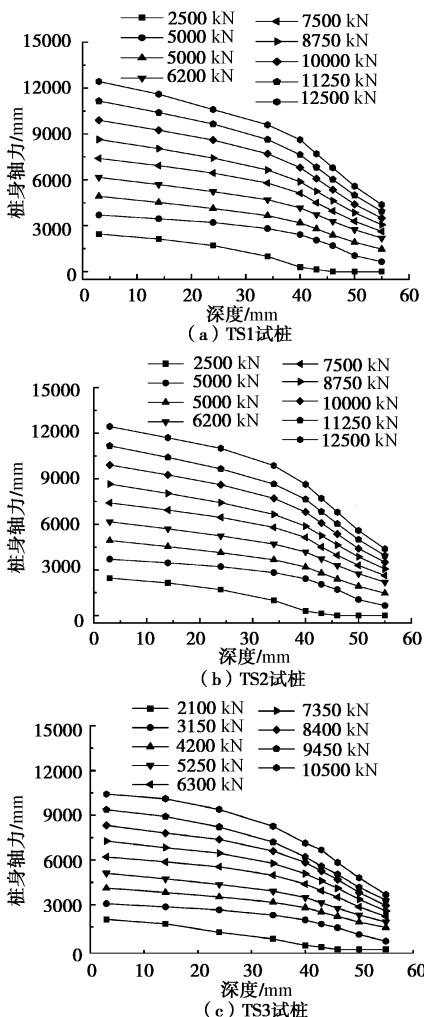


图2 各级荷载下桩身轴力

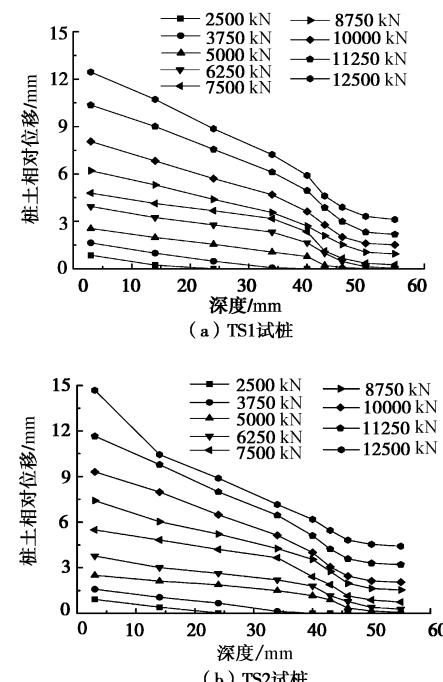
Fig. 2 Axial forces of test piles under different loads

由图 2 可知, 同一荷载水平下, 桩身轴力随深度的增加而减少。荷载较小时, 桩身下部轴力为零。随着荷载的增加, 桩身下部出现轴力, 桩端阻力逐渐开始发挥。桩端阻力占桩顶荷载的比例随荷载的增加而增大。最大试验荷载下, 桩端阻力占桩顶荷载比例约为 35%。

### 2.4 桩-土相对位移

荷载水平较低时, 桩身上部深度范围内混凝土受力压缩, 导致该范围内的桩土发生相对位移。随着荷载增加, 桩身压缩量不断增大, 使该桩土相对位移逐渐增加。当其超过桩土极限位移值后, 桩身上部土的侧摩阻力达到极限值, 此时桩身下部土的侧摩阻力才得到发挥。不同荷载水平下各断面桩-土相对位移如图 3 所示。

由图 3 可知, 桩土相对位移随深度的增加而减小, 其最大值出现在桩顶位置。同时, 桩土相对位移随荷载水平的增加而增加。荷载水平较低时(小于 5000 kN) 桩端处桩土相对位移为零。



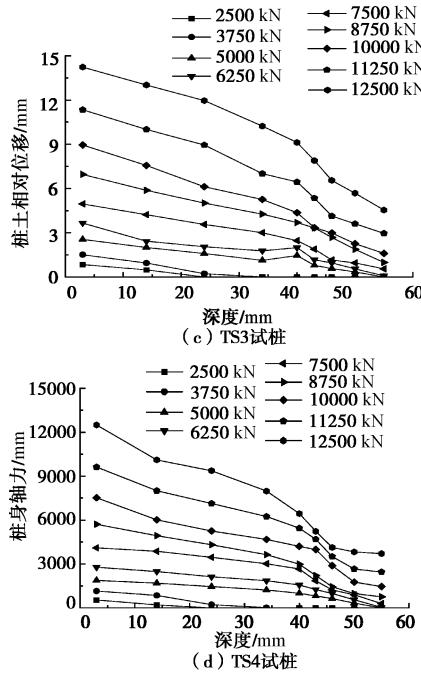


图 3 不同荷载水平下试桩各断面桩土相对位移

Fig. 3 Relative displacements between piles and soils of each section of test piles under different loading levels

## 2.5 桩侧摩阻力

各分层土体的桩侧平均摩阻力可认为是上下两断面间轴力之差除以两断面间的接触面。各试桩的桩身不同位置处桩侧平均摩阻力如图 4 所示。

由图 4 可知, 桩身上部的桩侧摩阻力先于桩身下部的桩侧摩阻力发挥。荷载较小时, 桩身下部桩侧摩阻力为零。随着荷载的增大, 桩身上部桩侧摩阻力逐渐完全发挥后趋于稳定, 但下部桩侧摩阻力并未完全发挥。同一土层中的侧摩阻力随荷载水平的增加而增加, 不同土层中其增幅有所区别。

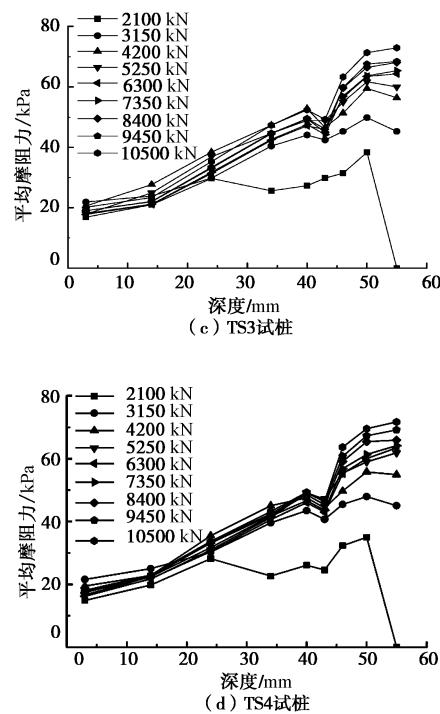
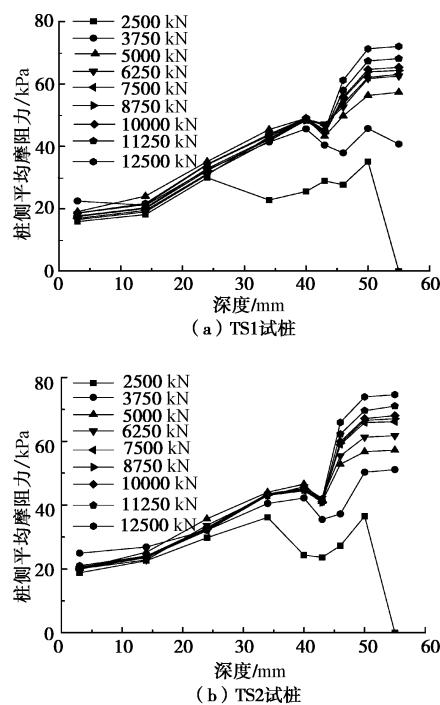


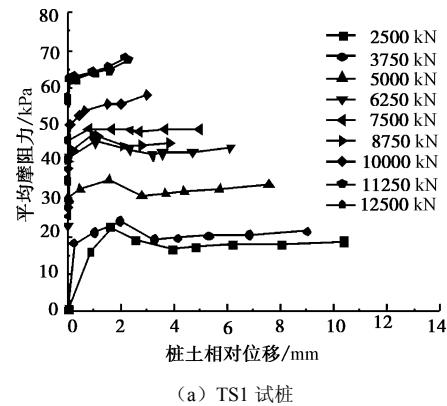
图 4 不同荷载水平下各断面桩侧平均摩阻力

Fig. 4 Average skin frictions of various sections of test piles under different loading levels

## 2.6 桩侧摩阻力与桩土相对位移的关系

由图 3, 4 可得到不同荷载水平下试桩同一断面的平均桩侧摩阻力与桩土相对位移间的关系, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 桩土相对位移较小时, 全桩长范围内桩侧摩阻力均随桩土相对位移的增加而增加直至峰值。当桩侧摩阻力完全发挥后, 桩顶荷载增加会导致桩侧摩阻力出现软化现象, 表现为逐渐减小并维持在残余强度, 而桩土相对位移一直随桩顶荷载的增加而增大。结合表 1 可知, 该工程中 5 层粉质黏土及 6 层砂质黏土中钻孔灌注桩发挥极限侧摩阻力所需位移为 1~1.6 mm。对超长桩来说, 即使在最大加载条件下, 桩身下部土层的侧摩阻力也并未完全发挥。传统超长桩承载力计算方法和其实际承载能力会有一定误差。



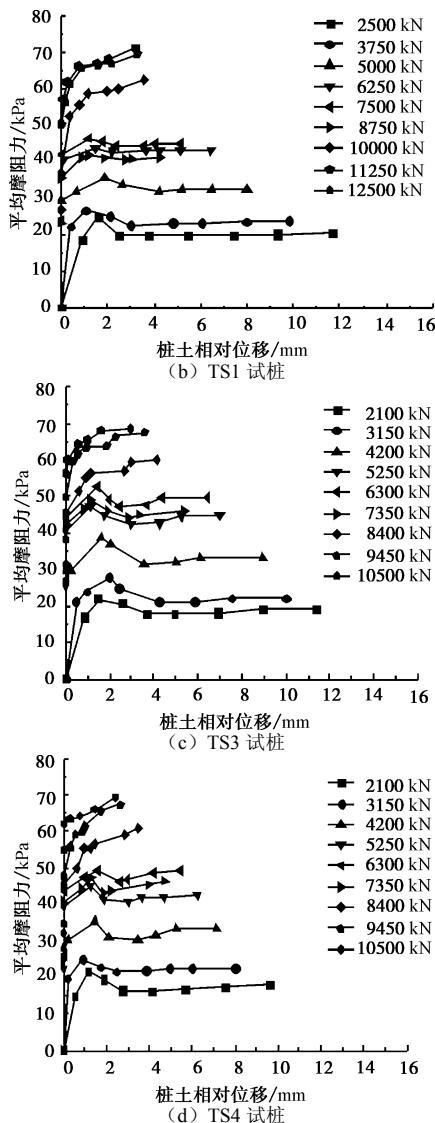


图 5 不同荷载水平下桩侧平均摩阻力与桩土相对位移间关系  
Fig. 5 Relationship between average skin friction and pile-soil relative displacement of test piles under different loading levels

### 3 结 论

本文对软土地区超长钻孔灌注桩进行了现场静载试验, 得到了如下研究结论:

(1) 桩身质量及沉渣对超长桩的桩顶沉降有重要影响, 在超长桩设计时, 除考虑桩侧摩阻力和桩端阻力提供的承载力外, 还要考虑桩身质量产生的影响。

(2) 桩身上部桩侧摩阻力先于桩身下部桩侧摩阻力发挥。荷载较小时, 桩身下部的桩侧摩阻力为零。随着荷载水平的增大, 桩身上部桩侧摩阻力逐渐完全发挥后而趋于稳定, 但下部桩侧摩阻力并未完全发挥。

(3) 桩侧摩阻力完全发挥后, 桩顶荷载增加会导致桩侧摩阻力出现软化现象, 表现为逐渐减小并维持在残余强度。对超长桩来说, 即使在最大加载条件下, 桩身下部土层的侧摩阻力也并未完全发挥。传统超长桩承载力计算方法和其实际承载能力会有一定误差。

### 参考文献:

- [1] ZHANG Q Q, ZHANG Z M, YU F, LIIU J W. Field performance of long bored piles within piled rafts[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 2010, **163**(6): 293 – 305.
- [2] 张忠苗, 张乾青, 张广兴, 等. 软土地区大吨位超长试桩试验设计与分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(4): 535 – 543. (ZHANG Zhong-miao, ZHANG Qian-qing, ZHANG Guang-xing, et al. Large tonnage tests on super-long piles in soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(4): 535 – 543. (in Chinese))
- [3] 王卫东, 李永辉, 吴江斌. 上海中心大厦大直径超长灌注桩现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1817 – 1826. (WANG Wei-dong, LI Yong-hui, WU Jiang-bin. Field loading tests on large-diameter and super-long bored piles of Shanghai Center Tower[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1817 – 1826. (in Chinese))
- [4] 赵春风, 鲁嘉, 孙其超, 等. 大直径深长钻孔灌注桩分层荷载传递特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(5): 1020 – 1026. (ZHAO Chun-feng, LU Jia, SUN Qi-chao, et al. Experimental study of load transmission property of large-diameter bored cast-in-situ deep and long pile in different soil layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(5): 1020 – 1026. (in Chinese))
- [5] 柯洪, 吴翔, 王继华, 等. 天津厚地层超长钻孔灌注桩单桩承载特性研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(9): 2821 – 2826. (KE Hong, WU Xiang, WANG Ji-hua, et al. Research on vertical bearing capacity of single super-long bored pile in thick stratum of Tianjin[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(9): 2821 – 2826. (in Chinese))
- [6] 聂如松, 冷伍明, 李箐, 等. 东江大桥嵌岩桩承载性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(9): 1410 – 1415. (NIE Ru-song, LENG Wu-ming, LI Qing, et al. Load transfer mechanism of rock-socketed piles of Dongjiang River Bridge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(9): 1410 – 1415. (in Chinese))
- [7] 辛公锋. 大直径超长桩侧阻软化试验与理论研究[D]. 浙江大学, 2006. (XIN Gong-feng. Test and theory study on shaft resistance softening of large diameter and super-long piles[D]. Zhejiang University, 2006. (in Chinese))
- [8] ZHANG Q Q, ZHANG Z M, LI S C. Investigation into skin friction of bored pile including influence of soil strength at pile base[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2013, **31**(1): 1 – 16.