

减沉桩的工程应用试验研究

方鹏飞¹, 朱向荣², 冯军洪³

(1. 浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027; 3. 杭州市建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310001)

摘要: 在浙江深厚软土地基中, 减沉桩在多层建筑基础中大量使用。为进一步分析浙江软土地基中减沉桩的工作机理, 对某工程中减沉桩的应用进行试验研究。通过桩、土应力测试和建筑物沉降观测, 分析减沉桩基中桩土应力分担比及荷载传递性状的规律, 为深入探讨桩土共同作用机理, 进一步完善减沉桩设计理论提供依据。试验结果表明, 各幢楼的基底反力大致呈中间小、边缘大的抛物线分布形式; 本工程3幢楼承台底土承担荷载的比例最终保持在14.6%~18.1%。分析结果表明, 减少沉降量桩基具有良好的经济效益和社会效益, 应用前景广阔。

关键词: 减沉桩; 桩土应力比; 沉降

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)01-0100-05

作者简介: 方鹏飞(1975-), 男, 浙江义乌人, 博士, 讲师, 主要从事桩基工程和环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: fpf@nit.net.cn。

Case study on settlement reducing piles

FANG Peng-fei¹, ZHU Xiang-rong², FENG Jun-hong³

(1. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China; 2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Hangzhou Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310001, China)

Abstract: In the soft clay ground of Zhejiang Province in China, the settlement reducing piles are often adopted in the foundation treatment of multi-storey buildings. To analyze the working mechanism of settlement reducing piles in soft soil ground, an engineering application case is studied. On the basis of the tests on stress and settlement, some laws on the stress ratio of pile to soil and load transfer characteristics are summarized. The test results show that the soil stress distribution under the pile cap is a parabolic curve, and the soil stress ratio varies from 14.6% to 18.1%. These results can offer theoretical reference and help to analyze the interaction of pile and soil. And it is concluded that the settlement reducing pile foundation has wide prospects and preferable benefits socially and economically.

Key words: settlement reducing pile; stress ratio of pile to soil; settlement

0 引言

在浙江深厚软土地区, 一些多层建筑采用桩基础的原因不是因为天然地基的强度不足, 而主要是用于控制沉降。近三十年来国内外学者对这一课题从理论分析、室内模型试验和工程实测等方面进行了较为深入的研究, 取得了一系列成果^[1-5]。由于问题的复杂性和模拟分析手段的局限性, 模型试验研究及理论分析均难以完全反映复杂的实际情况, 也不可能代替工程实例。虽然国内外也有一些工程实测资料, 但在数量上还远远不够。特别在浙江深厚软土地区, 这方面的工程经验比较缺乏, 还没有形成一整套实用的减沉桩设计方法, 一般工程设计人员的设计存在盲目性。一些工程中, 设计时采用减沉桩基础, 却仍然采用传统的桩基设计方法, 造

成极大的浪费; 即使考虑了桩土共同作用, 也只把桩与承台按一固定比例来分担荷载, 并非按减沉桩的承载机理进行设计。因此, 减沉桩虽然大量使用, 但对其工作机理还不甚清楚。所以对按减沉桩基理论设计的工程进行现场试验研究显得非常必要。

1 工程概况

在浙江软土地基中某小区工程由6幢多层住宅组成, 整个住宅小区总建筑面积达13075 m²。选择其中3幢住宅按减少沉降量桩基理论进行设计。3幢住宅上部结构都为砖混结构, 有6个标准层, 外加1个底层

车库和屋顶阁楼, 楼高 20.05 m, 平面尺寸 49.2 m×12.9 m。

便于比较, 3 幢住宅分别采用不同的沉降控制标准进行设计, #1, #2 楼各布桩 142 根, #3 楼布桩 162 根, 条形承台底标高为-1.45 m, 桩长约为 12 m。采用静压沉管灌注桩, 桩径 $\phi 426$ mm。勘探部门提供的地质资料见表 1。选用土层 2 粉质黏土作为承台持力层, 土层 7 粉土为桩基持力层。地下水位离地表约 0.45 m。

2 桩土应力测试及分析

2.1 测试仪器的布置

为掌握桩土应力分担比及荷载传递机理, 在桩顶和土上各埋设若干压力盒测试桩土应力。根据本次试验工程的要求和建筑物结构布置方案, 在#1, #2, #3 楼的 1, 16, 29 轴 3 条轴线下各选一根桩, 在其桩顶埋设压力盒, 同时在桩的两侧承台梁底埋设两个压力盒。本次试验共埋设压力盒 27 个, 各测点布置如图 1, 2 所示。

2.2 测试结果及分析

测试从压力盒埋设完成后开始。结构每完成一层, 观测一次; 竣工 1 a 内 1~2 个月观测一次; 1 a 后每

0.5 a 观测一次, 直至读数基本稳定。观测历时 5 a, 共读数 25 次。观测结果表明, 竣工 18 个月后的测试数据基本稳定。

(1) 桩顶反力

图 3 为桩顶反力随荷载增加的变化曲线。从图中可以看出, 桩顶反力随荷载的增加而增大。由实测的桩顶应力推算得到的桩顶荷载最大值只有 167 kN, 比设计值 303 kN 小得多, 陈义侃^[6]和赵锡宏等^[7]也得到同样的结果。其原因可能是压力盒埋在刚性桩桩顶, 产生穹拱效应, 桩顶荷载绝大部分由压力盒外围的桩体承担, 使得测到的桩顶荷载明显偏小, 说明用压力盒来测量桩顶荷载的效果不太理想。因此, 研究桩与承台的荷载分担问题需通过承台底压力盒数据和楼层荷载进行分析。

(2) 基底反力

图 4~6 分别为#1 楼, #2 楼, #3 楼相应的 1 轴上承台底土压力与时间关系。从图中可以发现, 在底层车库及第二层楼施工过程中, 基底反力随荷载增加而增大, 此时#1, #2 号楼各测点的基底反力达到 19.7~22.1 kPa 左右, #3 楼的基底反力达到 14.4 kPa。随着

表 1 各土层主要物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of soils

序号	土层名称	平均层厚/m	重度 γ /(kN·m ⁻³)	含水率 w /%	孔隙比 e	压缩模量 E_s /MPa	承载力标准值 f_k /kPa	桩侧摩阻力标准值 q_s /kPa	桩端承载力标准值 q_p /kPa
1	杂填土	1.07	—	—	—	—	—	—	—
2	粉质黏土	0.47	19.00	31.30	0.866	4.85	80	9	—
3	粉质黏土夹淤泥质粉质黏土	2.28	18.07	39.20	1.078	6.73	65	7	—
4	淤泥质黏土	4.22	16.96	54.92	1.467	1.52	60	6	—
5	黏土	0.88	20.05	25.75	0.689	7.30	140	17	—
6	黏土	2.20	20.46	23.56	0.627	8.16	235	29	v
7	粉土	6.85	19.28	31.90	0.893	7.85	130	16	700
8	黏土	未穿	18.57	38.49	1.009	6.12	115	10	—

注: E_s 为实际应力范围的压缩模量。

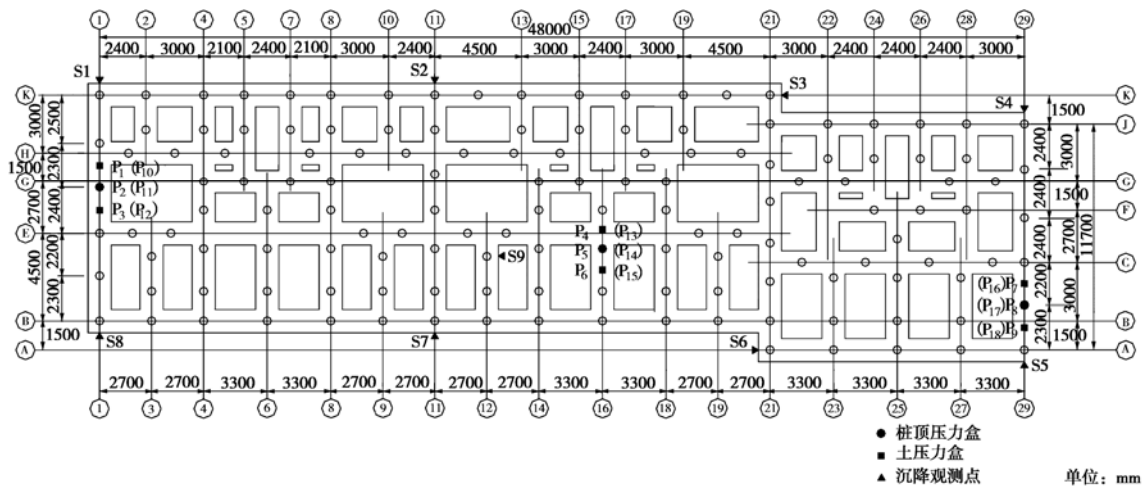


图 1 #1, #2 楼基础平面图和测点布置图

Fig. 1 Foundation plan and distribution of monitoring sensors in No. 1 and No. 2 buildings

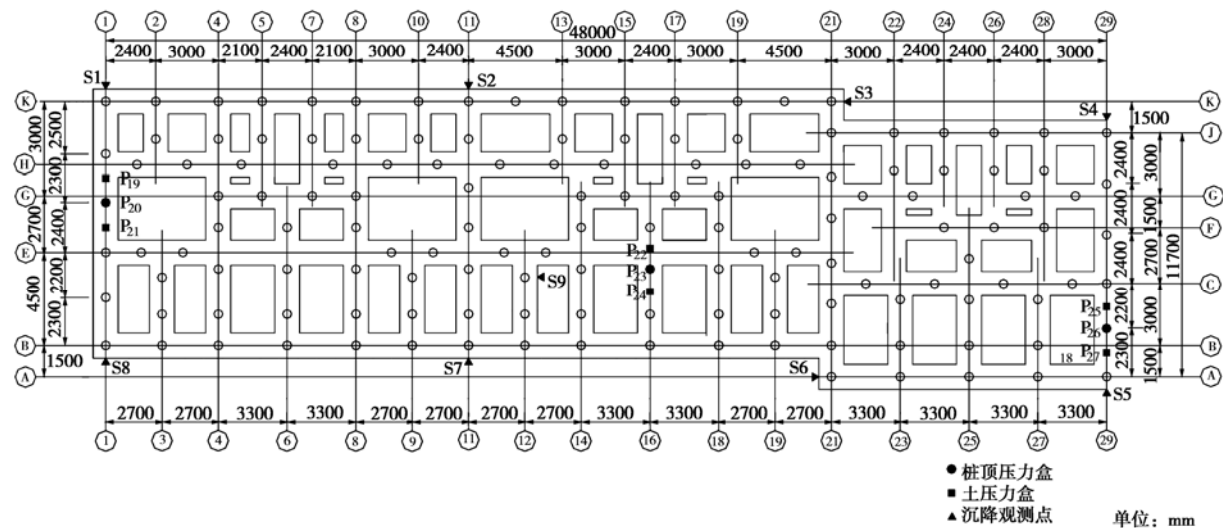


图 2 #3 楼基础平面图和测点布置图

Fig. 2 Foundation plan and distribution of monitoring sensors in No. 3 building

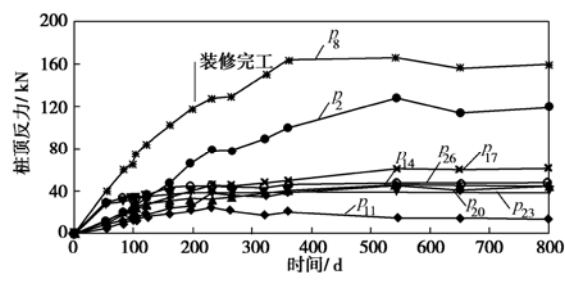


图 3 桩顶反力与时间关系

Fig. 3 Curves of reaction of pile head with time

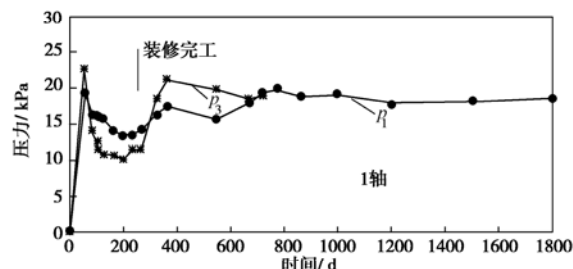


图 4 #1 楼承台底土压力与时间关系曲线

Fig. 4 Curves of reaction under pile cap in No. 1 building with time

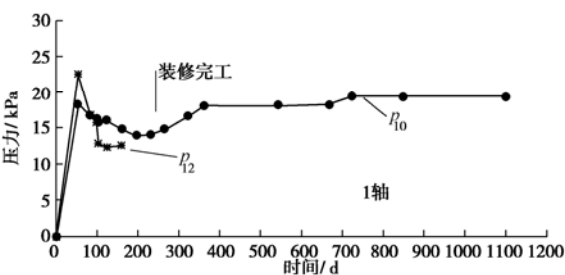


图 5 #2 楼承台底土压力与时间关系曲线

Fig. 5 Reaction under pile cap in No. 2 building with time

荷载的继续增加, 除其中几个测点的土压力变化不大外, 其它各测点的土压力值都有不同程度的减小, 在工程装修完工前后, 基底反力达到较小值。随着时间

的推移和使用荷载的施加, 基底反力又逐渐增大。

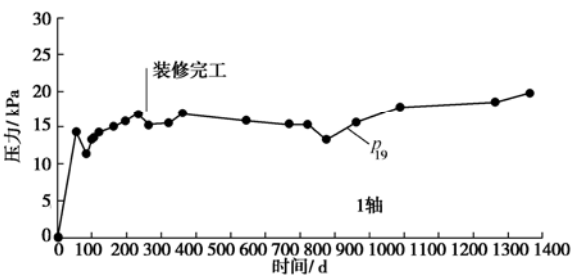


图 6 #3 楼承台底土压力与时间关系曲线

Fig. 6 Reaction under pile cap in No. 3 building with time

图 7 为不同层数时基底反力沿建筑物长度方向的分布图, 图中各轴线的基底反力取该轴线上两个压力盒的平均值。从图可知, 随着层数的增加, 基底反力逐渐减小, 荷载向桩顶转移, 到装修完工时, 基底反力达到较小值, 之后又逐渐增大。基底反力在工程完工后 18 个月后基本稳定。各幢楼的基底反力大致成中间小、边缘大的抛物线分布。

从图 4~7 分析可以得出, 在加荷初期, 承台下地基土和桩按各自的相对刚度分担外荷载, 地基土处于不排水状态, 有较大的相对刚度, 因此在加荷初期承台要承担较大一部分荷载。随着时间的延续, 打桩引起的孔隙水压力逐渐消散, 承台和桩承担的荷载均在土中扩散并产生附加应力, 引起桩间土的固结沉降, 该沉降大于桩基沉降, 使得承台与基底土有逐渐分开的趋势, 基底反力逐渐减小, 原来由承台承担的荷载逐渐转移到桩上。随着上部结构刚度的逐步形成, 各桩的桩顶反力明显增加, 桩的沉降速率比基底土的固结速率大, 基底反力又将增加。经过多次循环, 直至建筑物的沉降稳定为止。

表 2 为工程竣工后 1 a 时 3 幢楼基底反力和桩顶反力实测值和理论值比较结果。其中, 桩顶反力理论

值用二元联立方程组法得到^[8]; 桩顶反力实测推算值是根据上部结构荷载和基底反力实测值推算得到; #1, #2 楼桩顶反力理论值为 303.7 kN, #3 楼桩顶反力理论值为 274.1 kN, 基底反力理论值分别为 38.4 kPa、34.9 kPa。由表 2 可知, 基底反力的实测值和理论值差别较大, 而桩顶反力偏差较小。造成上述差异的原因可能是: ①此时该 3 幢住宅的居民只有少量入住, 活荷载尚未全部施加; ②住宅的沉降还没有达到稳定, 桩和桩间土之间的荷载调整还没有最终完成; ③沉管灌注桩施工的挤土效应造成孔隙水压力的增大和桩侧土体上抬, 随着时间的增长, 桩周土发生固结沉降, 基底反力随孔隙水压力的消散而变化。

表 2 基底反力、桩顶反力实测值和理论值比较

Table 2 Test and theoretical values of reaction of pile head and reaction under pile cap				
楼号	基底反力/kPa		桩顶反力/kN	
	实测值	理论值	实测推算值	理论值
#1 楼	15.6	38.4	339.2	303.7
#2 楼	15.4	38.4	339.7	303.7
#3 楼	15.5	34.9	297.5	274.1

(3) 桩土荷载分担比

图 8 表示桩与承台荷载分担比随时间变化关系。从图可知, 在施工开始 50 d 后 (2 层, 上部结构刚度还没有充分形成), 承台承担了 1/2 左右的荷载; 随着层数的增加, 上部结构刚度逐渐形成, 桩顶反力明显增加, 承台承担荷载的比例逐渐减少, 至工程竣工 18 个月后承台承担荷载的比例分别保持在 18.1%, 15.3% 和 14.6% 左右。因此, 桩与承台的荷载分担并非象上海地基基础规范^[9]中假定的情况: 桩先达到极限承载

力, 多余的荷载再由承台分担。按照二元联立方程组法理论分析^[8], 在建筑物沉降趋于稳定后, 承台最终将分担 20.8% 的荷载。理论与实测之间有一定的差距。值得注意的是, 此时实际作用荷载还未达到设计荷载, 随着使用荷载的增大和沉降趋于稳定, 承台承担荷载的比例将会增加, 两者差距将会减小。

桩与承台底土荷载分担比随时间而变化, 在设计承台时, 除应考虑桩基沉降趋向稳定时最终应力状态的桩土分担比外, 还需考虑加荷初期的应力状态, 此时承台底土荷载分担较大, 取两者中最不利的应力状态进行承台的设计。

3 沉降观测

为掌握按变形控制设计的建筑物在施工过程中和竣工后的沉降情况, 验证设计方法的合理性, 对该工程的 3 幢住宅进行沉降观测, 沉降观测点布置如图 1, 2 所示。观测结果显示, 工程竣工时 #1 楼最大沉降为 54 mm, 平均沉降为 28.1 mm; #2 楼最大沉降为 43 mm, 平均沉降为 31.8 mm; #3 楼最大沉降为 55 mm, 平均沉降为 48.1 mm。#1 楼有较大的不均匀沉降, #2, #3 楼差异沉降较小。图 9 为 #1 楼各测点的沉降变化情况, 其中 s 为 9 个测点的平均沉降量。

由于水准点遭到破坏, 沉降观测时间太短, 尚不足以推算最终沉降量。当地按常规桩基设计的同类建筑物, 其竣工沉降一般为 10~20 mm, 由于本工程中桩数较少, 其竣工沉降大于常规桩基础。从使用情况来看, 没有发现任何异常。根据类似桩基础的沉降特性, 竣工沉降大约为最终沉降的 40%~60%^[10], 由此

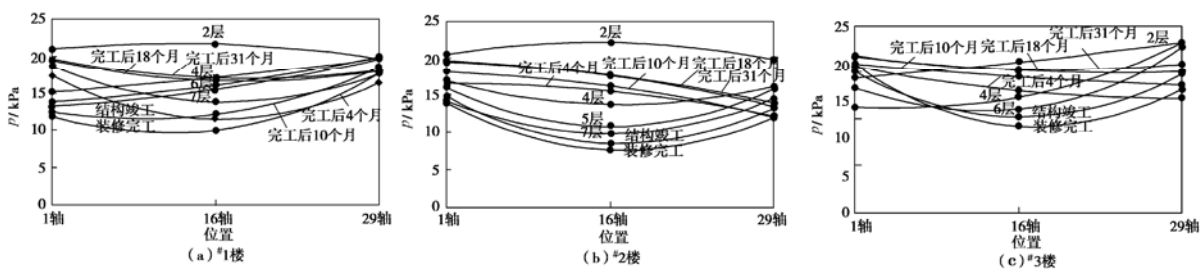


图 7 基底反力与位置关系曲线

Fig. 7 Reaction under pile cap in No. 1, No. 2 and No. 3 buildings

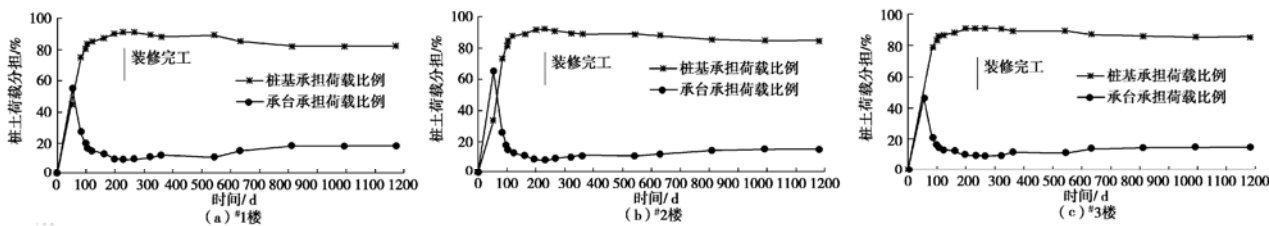


图 8 桩与承台之间荷载分担比例与时间关系曲线

Fig. 8 Load ratio of pile head to pile cap with time

推算,本工程3幢楼的最终沉降都不会超过150 mm,与预估值较为接近,达到工程设计要求。

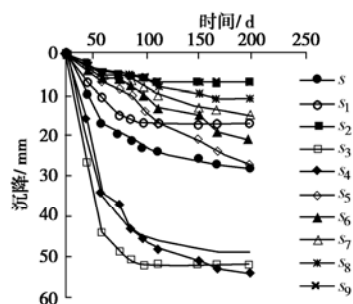


图9 #1楼各测点沉降随时间的变化

Fig. 9 Settlement in No. 1 building with time

4 效益分析

该工程如果采用浅基础,其承载力和沉降都不能满足要求。如果根据传统的桩基理论按承载力进行设计,则每幢住宅需布置253根桩(采用 $\phi 426$ 静压沉管灌注桩,桩长约12 m)。设计时考虑让土体承担部分上部荷载,桩数按变形控制理论确定,#1,#2楼各布桩142根,沉降计算值为176.6 mm,#3楼布桩162根,沉降计算值为165.5 mm。3幢楼共减少用桩313根,桩基混凝土单价按600元/ m^3 计算,桩基部分为建设单位节省资金约32万元,占桩基造价的41%,如果考虑综合经济效益,约可节省造价22万元,占基础造价的28%,折算到单位建筑面积上,每平方米可以节省16.8元。

假定浙江省每年竣工需要采用桩基础的七层住宅1500幢,每幢建筑面积按4000 m^2 估算,如果按变形控制的减少沉降量桩基理论能够得到推广应用,则每年可以节约资金1亿元,效益十分显著。

5 结 论

(1) 桩顶反力随荷载的增加而增大。由桩顶应力推算得到的桩顶荷载最大值比设计值要小。

(2) 桩与承台荷载分担比随时间而变化,受上部结构刚度影响较大。上部结构刚开始施工时,基底反力随荷载的增大而增大。随层数的增加,基底反力逐渐减小,荷载向桩顶转移,到工程完工时,基底反力达到较小值,之后又逐渐增大。各幢楼的基底反力大致成中间小、边缘大的抛物线分布。

(3) 本工程3幢楼承台底土承担荷载的比例最终保持在14.6%~18.1%。

(4) 实测结果表明,基底反力的实测值与理论值差距较大,桩顶反力的相对误差较小。

(5) 本工程采用减少沉降量设计思想进行设计,在沉降满足设计要求的前提下,比按传统桩基设计理

论进行设计节省造价约22万元,占基础造价的28%。减少沉降量桩基具有良好的经济效益、环境效益和社会效益,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] POLOUS H G. Pile behavior: theory and application[J]. Geotechnique, 1989, 39(3): 365 - 415.
- [2] RANDOLPH M F. Design methods for pile groups and piled rafts[R]. New Delhi: SOA Report.13 ICSMFE, 1994, 5: 61 - 82.
- [3] BURLAND J B, BROMS B B, DE MELLO V H B. Behaviour of foundations and structures[C]// Proc 9th ICSMFE, 1977, 2: 495 - 546.
- [4] 刘润,徐余,闫澍旺. 减沉桩基础作用特性的有限元分析[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 144 - 148. (LIU Run, XU Yu, YAN Shu-wang. FE analysis of behavior of settlement reducing pile[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 144 - 148. (in Chinese))
- [5] 宰金珉. 塑性支承桩——卸荷减沉桩的概念及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 273 - 278. (ZAI Jin-min. Concept of plastically bearing pile and its practical application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 273 - 278. (in Chinese))
- [6] 陈义侃. 桩土复合基础的设计与试验研究[J]. 建筑结构, 1996(7): 10 - 14. (CHEN Yi-kan. Testing study and design on composite pile foundation[J]. Building Structure, 1996(7): 10 - 14. (in Chinese))
- [7] 董建国,赵锡宏. 高层建筑地基基础——共同作用理论与实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. (DONG Jian-guo, ZHAO Xi-hong. Theory and practice on the interaction between soil and foundation in highrise building[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (in Chinese))
- [8] 林柏,朱向荣. 用二元联立方程组求解疏桩基础的沉降及其它[J]. 建筑科学, 1989(6): 49 - 53. (LIN Bo, ZHU Xiang-rong. Settlement calculation of sparse pile foundation by 2-dimensional system of equations method[J]. Building Science, 1989(6): 49 - 53. (in Chinese))
- [9] DGJ08—11—1999 地基基础设计规范[S]. 上海: 上海人民出版社, 1999. (DGJ08—11—1999 Foundation design code[S]. Shanghai: Shanghai People Press, 1999. (in Chinese))
- [10] 葛文浩,杨敏. 地下管道上住宅建筑物的基础设计实例[J]. 建筑结构, 1993, 23(10): 32 - 35. (GE Wen-hao, YANG Min. Design case of building on underground pipeline[J]. Building Structure, 1993, 23(10): 32 - 35. (in Chinese))