

桩-土-承台共同作用的模型试验研究

王浩^{1,3}, 周健¹, 邓志辉²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海市民防地基勘察院, 上海 200232; 3. 上海市市政工程设计研究总院地下空间院, 上海 200092)

摘要: 通过带承台单桩及双桩基础的模型试验, 对低承台桩基桩间土变形发展及其与承台板底应力、桩侧摩阻力及桩端阻力间的相互影响进行较为细致的研究。试验表明: 在相同基础荷载作用下, 桩数的增加使桩端刺入变形量占基础沉降的比例降低。双桩基础桩体的存在对板底应力体现出增强作用, 在相同桩间土变形量下, 双桩基础板底应力大于带承台单桩基础。桩土相对位移的发展从桩端部位开始, 逐步向承台板扩展, 同一部位基础外侧的桩土相对位移要大于基础内侧。靠基础内外, 桩的不同侧面表现出不同的侧阻发挥过程及极限值。同样桩间土变形量下, 带承台双桩基础在桩端平面上土体的竖向应力要大于带承台单桩基础, 从而发挥出较大的桩端阻力。

关键词: 桩基础; 桩-土-承台共同作用; 模型试验

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)10-1253-06

作者简介: 王浩(1976-), 男, 陕西大荔人, 博士, 岩土工程专业, 目前从事桩基工程研究。

Model tests on pile-soil-cap interaction

WANG Hao^{1,3}, ZHOU Jian¹, DENG Zhi-hui²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Civil Defence Institute of Geotechnical Investigation, Shanghai 200232, China; 3. Underground Space Design Institute, SMEDI, Shanghai 200092, China)

Abstract: The results of model tests on pile-soil-cap interaction were presented. The soil displacement among the piles, contact pressure on the base of the cap, pile shaft and toe resistance were studied. It was observed that the ratio of pile toe penetration to foundation settlement decreased with the increase of pile number under the same foundation loading. With the same soil displacement among the piles, the contact pressure on the base of pile cap was larger for the foundation with two piles than that with single pile because of the enhancing function of the two piles on the soil capacity beneath the pile cap. The relative displacement between pile and soils around pile shaft was developed from the pile toe and gradually spread to near the pile cap. The relative displacement between pile and soils around pile shaft outside the foundation was larger than inside the foundation at the same depth. The mobilization of shaft resistance and its ultimate value of the shaft inside the foundation were different with those outside the foundation. With the same soil displacement among the piles, the vertical soil stress at the depth of pile toe was larger for the foundation with two piles than that with single pile, which resulted in larger toe resistance for the foundation with two piles.

Key words: pile foundation; pile-soil-cap interaction; model test

0 引言

低承台桩基承台下地基土分担荷载的可能性已为大量的工程实践及试验所证实。发挥承台下地基土的承载能力, 通过设置相对少量的桩满足基础的荷载及变形条件, 节约工程造价, 这一设计思想也日益为人们所接受(如 Poulos & Davis 1980^[1], Cooke 1986^[2], Poulos 2001^[3], 宰金珉 2001^[4])。

桩-土-承台共同作用需要发挥承台下桩间土的承载力, 而桩间土承载力的发挥与桩间土的变形性状密切相关, 进而可能影响到桩侧摩阻力的发挥。这使得低承台桩基的共同作用问题变得复杂。国内外大量

的共同作用试验及实测研究集中于桩顶及承台(筏板)下土体的荷载分担比以及基础总沉降之间的关系(如陈强华等 1992^[5], Horikoshi & Randolph 1996^[6], 王幼青等 1998^[7]), 而对桩间土的工作性状及其对共同作用影响的研究很少。

陈惠康(1990)^[8]报道了低承台桩基桩间土竖向位移随深度的变化情况。宰金珉(1995)^[9]对佟世祥 1981 年粉土中的模型试验结果进行重新整理后得到桩间土压缩与荷载水平、桩距、桩数等因素的相互关

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578122)

收稿日期: 2005-08-09

系。指出常规桩距小桩群(桩数小于 9)主要表现为桩间土压缩,随荷载水平及桩距增大桩间土压缩所占的份额增加。他们的研究限于桩间土变形的观测。汲取前人工作的经验,本文通过砂土中的模型试验,对低承台桩基桩间土变形的发展过程及其与承台板底应力、桩侧摩阻力及桩端阻力间的相互影响进行较为细致的研究,以期在一定程度上揭示桩-土-承台共同作用的内在机理。

1 试验概述

1.1 试验装置及土样

模型槽尺寸为 $50\text{ cm}(h) \times 50\text{ cm} \times 80\text{ cm}$ 。底板及周边三边为木板,另外一边为玻璃。模型槽骨架采用角钢。模型桩采用木制方桩,边长 4 cm ,桩长为 40 cm 。承台板选用 $32\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 的钢板,厚 10 mm 。

试验加荷采用千斤顶及反力架。反力架由型钢焊制。力的量测采用微型压力盒。数据由 YE2539 高速静态应变仪自动采集。桩顶位移量测采用百分表,桩端位移及模型中的位移跟踪点量测采用数码照相结合图像分析技术。

试验土样采用福建平潭标准砂,为中粗砂。颗粒级配为颗粒直径大于 0.65 mm 的占 3% , $0.45 \sim 0.65\text{ mm}$ 的占 $40\% \pm 5\%$, $0.25 \sim 0.4\text{ mm}$ 的占 $51\% \pm 5\%$,小于 0.25 mm 的占 6% 。试验时分层摊铺,控制每层重量,使土样孔隙比控制在 0.8 左右。

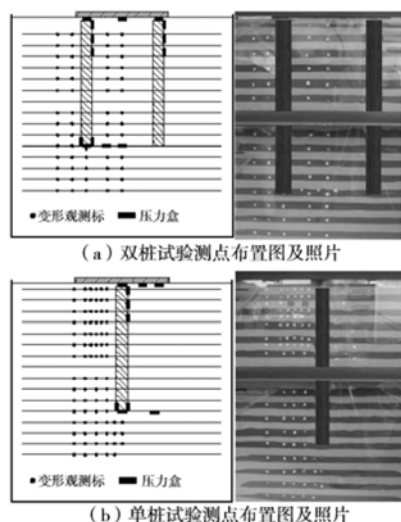


图 1 试验测点布置图及照片

Fig. 1 Layout of instrumentation

1.2 试验内容及测点设置

进行了低承台单桩及双桩两组试验。单桩设在承台板中间部位,双桩桩距 $6d$ 。

试验时将土样分层装入模型槽,夯至限定高度以保证孔隙率,设置变形观测点。在桩端、桩侧及土中

一定部位放入压力盒,当土样装置一定高度后,贴模型槽玻璃一侧埋入试桩。试桩顶部用丝线固定在模型槽边,以保证填土过程中桩不偏位。继续填土,设置变形测点及压力盒。填至桩顶后,放置承台板下的压力盒,在桩顶涂一层白胶,填少许砂土,使砂土面略高于桩顶。放置承台板,左右平推,使承台板与桩顶胶接并与其下砂土紧密接触。静置模型 12 h 后进行试验。测点布置及照片如图 1 所示。

2 试验结果分析

2.1 基础的沉降与变形特性

图 2 给出了基础试验荷载与沉降间的关系曲线。由图可见,在相同基础荷载的情况下,增加桩数,带承台双桩基础的沉降要小于单桩基础的沉降。

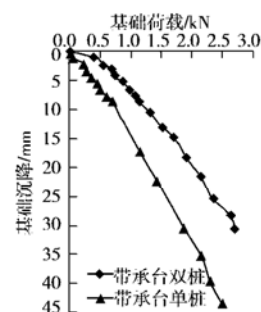


图 2 基础荷载与沉降的关系

Fig. 2 Foundation loading versus foundation settlement

陈竹昌(1990)^[10]的研究表明,带承台桩基的沉降可分为桩间土的变形量以及桩端下土体的整体压缩量两部分,在承台与其下土面保持接触分担荷载的情况下,当忽略桩身压缩量的时候,可认为桩端刺入变形量等于桩间土压缩量。引入桩端刺入变形的概念旨在将其与基础总沉降量区别开来。图 3 给出了基础荷载与桩端刺入变形量(桩间土压缩量)及桩端下土体的整体压缩量之间的关系曲线。由图可见,对带承台双桩及单桩基础而言,在相同的基础荷载作用下,桩端下土体的整体压缩变形量几乎没有差别。基础的沉降差别主要取决于桩端刺入变形量。

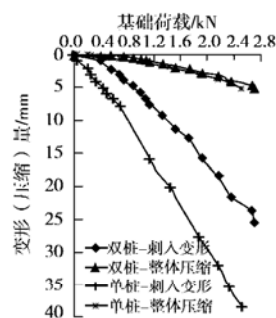


图 3 基础荷载与变形的关系

Fig. 3 Foundation loading versus pile penetration and soil compression beneath pile toe

图 4 给出桩端刺入变形（桩间土压缩量）占基础沉降量的比例随基础荷载的变化曲线。由图可见，在加载初期，基础的沉降几乎全部为桩端刺入变形，此后，随着基础荷载的增加，刺入变形所占的比例逐渐减小。对比单桩及双桩基础可见，桩数的增加，使相同基础荷载下的桩端刺入变形量所占的比例降低。

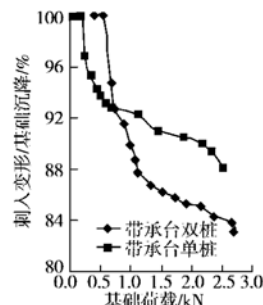


图 4 桩端刺入变形占基础沉降比例随基础荷载的变化
Fig. 4 Variation of the ratio of toe penetration to foundation settlement with foundation loading

2.2 桩间土位移随桩端刺入变形的发展

图 5 和 6 分别给出了单桩及双桩基础桩间土位移随桩端刺入变形的发展情况。由图可见，在桩端刺入变形较小的情况下，基础中部的桩间土所受到的影响很小。此后，随着桩端刺入变形的不断发展，桩间土变形的范围逐渐扩大，板的影响逐渐扩展到桩端平面以下的土体。

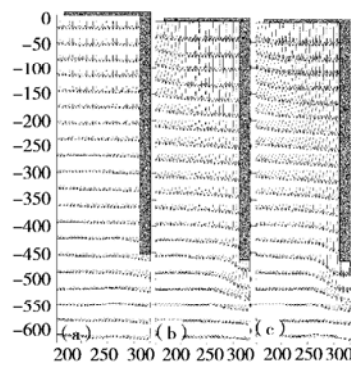


图 5 带承台单桩基础桩间土位移随刺入变形的发展
Fig. 5 Development of soil displacement among the piles for capped pile foundation with single pile

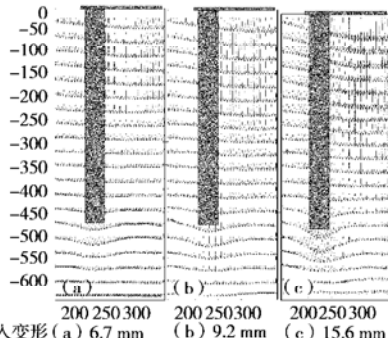


图 6 带承台双桩基础桩间土位移随刺入变形的发展
Fig. 6 Development of soil displacement among the piles for capped pile foundation with two piles

2.3 桩土相对位移随桩端刺入变形的发展

图 7 和 8 分别给出了由试验位移场测试得到的单桩及双桩基础桩土相对位移随刺入变形的发展情况。由图可见，桩土相对位移的发展从桩端部位开始，逐步向承台板扩展。从图 8 双桩基础的表现可以清楚看出，同一部位基础外侧的桩土相对位移要大于基础内侧。

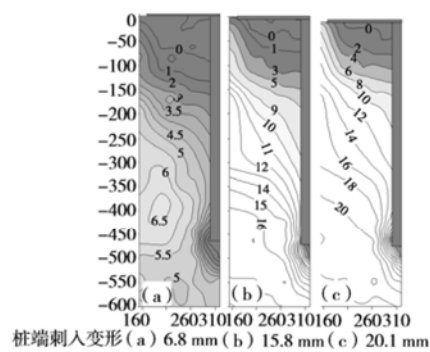


图 7 带承台单桩随刺入变形发展的桩土相对位移变化
Fig. 7 Development of relative displacement between soil and pile for capped pile foundation with single pile

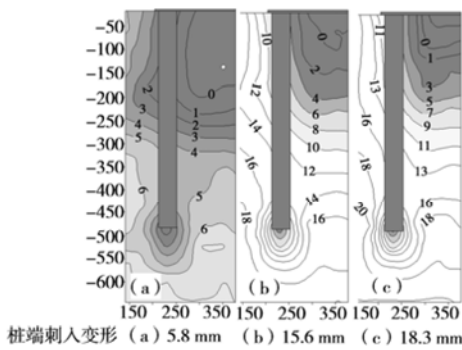


图 8 带承台双桩随刺入变形发展的桩土相对位移变化
Fig. 8 Development of relative displacement between soil and pile for capped pile foundation with two piles

2.4 承台板底应力随刺入变形的发展

图 9 给出承台板底应力随桩端刺入变形的发展曲线。由图可见，板底应力随桩端刺入变形（桩间土压缩量）的增大而增大。在桩端刺入变形发展的起始阶段，带承台单桩与双桩的板底应力差别不大，此后，随着刺入变形的发展，带承台双桩基础桩体的存在对板底应力的增强作用开始体现。在相同刺入变形下，带承台双桩基础的板底应力大于带承台单桩基础。这一增强效应可以从图 10 的靠近承台板部分桩侧正应力（垂直于桩侧的压应力）与板底应力的关系曲线得到解释。由图 10 可见，与图 9 相对应，在板底应力达到约 40 kPa 以前，相同板底应力下桩侧正应力两个带桩承台几乎相同，而在板底应力超过 40 kPa 后，相同板底应力下，带承台单桩基础桩侧正应力要大于双桩基础。这表明，以板底应力 40 kPa 为界，此后双桩基

础由于桩间土侧向变形受到限制,土体的密实度增大,泊松比较单桩基础小,相同板底应力下,桩侧受到的正压力减小。相应的在同样刺入变形量下,双桩基础桩的侧限效应使得板底所能发挥出的应力增大。

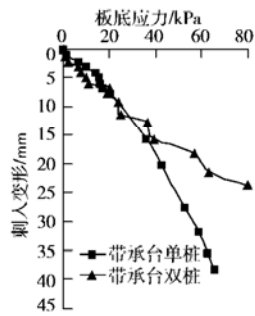


图 9 承台板底应力随刺入变形发展比较

Fig. 9 Development of contact pressure on the base of the cap with pile penetration

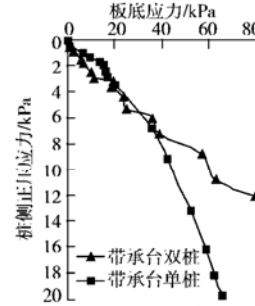


图 10 桩侧正应力随板底应力的变化

Fig. 10 Development of horizontal stress on pile shaft with contact pressure on the base of the cap

2.5 桩的受力随刺入变形的发展

(1) 桩端阻力随刺入变形的发展

图 11 与图 12 分别给出了桩端刺入变形与桩端阻力及桩端平面土体竖向应力的关系曲线。比较两图可见,在刺入变形相同的情况下,带承台双桩基础的端阻力要大于带承台单桩基础的桩端阻力。而与之相应的是同样刺入变形下带承台双桩基础在桩端平面上土体的竖向应力要大于带承台单桩基础。由此可见,桩端阻力的发挥不仅与刺入变形密切相关,而且与桩端平面土体的上覆压力成正比例关系。在相同刺入变形下,随着桩端平面土体的竖向应力提高,桩端阻力提高。

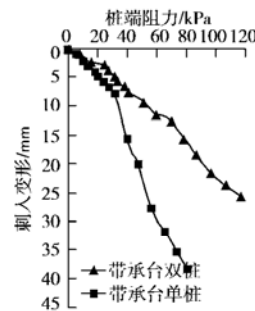


图 11 桩端阻力随刺入变形的发展

Fig. 11 Development of toe resistance with penetration

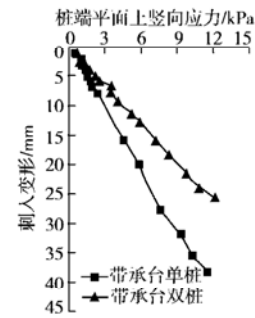


图 12 桩端平面土竖向应力比较

Fig. 12 Comparisons of vertical stress of pile toe

(2) 桩侧摩阻力随刺入变形的发展

图 13 给出在基础中桩侧面的位置。桩侧 D 及 H 面贴着玻璃板,假定其桩侧摩阻力为 0。 ABF 面均靠近承台板外侧, CEG 面均在承台板内侧。

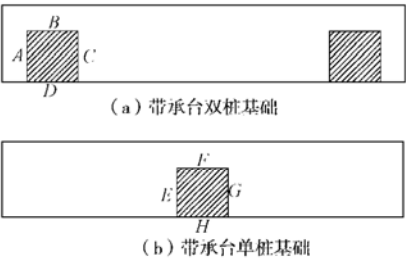


图 13 桩侧面位置示意

Fig. 13 Location of pile shaft

图 14 给出桩侧平均摩阻力随刺入变形的变化曲线。

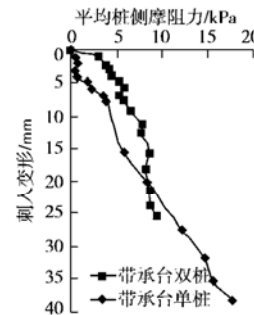


图 14 桩侧平均摩阻力随刺入变形的变化

Fig. 14 Variation of unit shaft resistance with toe penetration

图 15 给出桩侧正应力随刺入变形的发展曲线。由图可见,在相同刺入变形下,承台板内侧 CEG 受到的正应力单桩与双桩基础几乎相同,而承台板外侧的正应力小于内侧。由于 ABF 侧距承台板边缘位置相等且都很小 (2 cm), 假定这几侧的正应力相同。

当采用 β 法分析桩侧极限摩阻力时有 $q_{su} = \sigma'_v k_0 \tan \delta^{[11]}$, 由此公式可见,桩侧极限摩阻力与桩侧受到的正应力成正比例关系 (文献[12]亦揭示了这一规律)。因此,处于承台板内侧的桩侧极限侧摩阻力要大于处于承台板外侧的桩侧极限摩阻力。

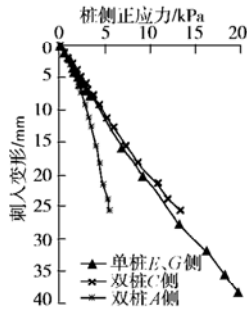


图 15 桩侧正应力随刺入变形的变化

Fig. 15 Variation of horizontal stress on pile shaft with toe penetration

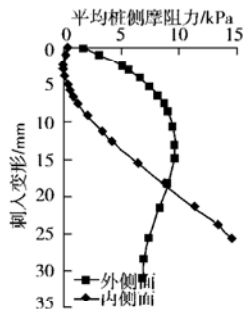


图 16 桩内外侧面平均侧摩阻力随刺入变形的发展

Fig. 16 Development of average shaft resistance of internal and external side of pile shaft with toe penetration

对于双桩基础, 桩的 AB 两侧面均处于承台外侧, 因此桩的平均侧摩阻力表现主要受外侧两面控制; 而对于单桩基础, 桩的 EG 两面均处于承台内侧, 桩的平均侧摩阻力表现主要受内侧两面控制。因此, 从图 14 可见, 在刺入变形为 15 mm 左右时, 双桩基础的平均桩侧摩阻力就已经表现出极限摩阻力的态势, 而单桩基础的桩侧摩阻力则随着刺入变形的发挥不断增长。

此外, 在起始阶段, 由于承台外侧面的桩土相对位移大于承台内侧面的桩土相对位移, 承台外侧面的侧阻首先得到发挥, 表现为双桩基础的桩侧平均阻力大于单桩基础。而随着刺入变形的发展, 承台外侧面的侧阻进入极限状态, 内侧面的侧阻占主导地位, 表现为单桩基础的平均侧阻大于双桩基础。

在假定图 13 中 CEG 侧的侧摩阻力相等, ABF 侧的侧摩阻力相等, DH 侧的侧摩阻力为 0 的情况下, 对图 14 的数据进行处理后可得到承台外侧面与内侧面桩侧摩阻力随刺入变形的发展曲线如图 16 所示。由图可见, 在起始阶段, 外侧面的摩阻力发挥值要大于内侧面, 此后随着刺入变形的发展, 外侧面在经过一个峰值后进入极限状态, 而内侧面的侧摩阻力依然呈不断发展态势。

(3) 桩的荷载随刺入变形的发展

在讨论完桩端阻力和桩侧摩阻力随刺入变形的发展后, 给出带承台单桩及双桩基础中单桩分担荷载随刺入变形的发展比较如图 17 所示。由图可见, 在相同的刺入变形下, 起始阶段带承台双桩基础的单桩分担荷载要大于带承台单桩基础, 此后, 随着刺入变形的发展, 二者逐渐趋同。从图 16 对侧摩阻力的分析来看, 在桩的受荷中当侧摩阻力占主导地位时, 可以预计, 此后随着刺入变形的发展, 在相同刺入变形下, 带承台单桩基础中桩的荷载将可能大于双桩基础。

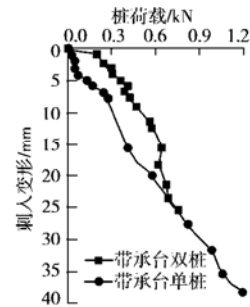


图 17 桩的荷载随刺入变形的发展

Fig. 17 Development of pile loading with toe penetration

这一结果在一定程度上揭示了带承台桩基边桩与中心桩受荷不同的原因。在基础位移较小的情况下, 边桩的桩土相对位移较中心桩大, 从而分担出较大的荷载。对于短桩基础, 当板底应力的影响范围较大时, 在基础位移较大从而允许产生大的桩端刺入变形 (桩间土压缩量) 的情况下, 边桩与中心桩的承载能力则可能趋同; 而对于长桩基础, 当板底应力的影响范围有限时, 则可能始终体现出边桩分担荷载大于中心桩。

3 结 语

模型试验较为系统地研究了桩间土变形的发展过程以及承台板底应力、桩端阻力、桩侧摩阻力随桩端刺入变形 (桩间土压缩) 的变化情况。试验研究结果表明:

(1) 在相同的基础荷载作用下, 单桩与双桩基础桩端下土体的整体压缩变形量几乎没有差别。基础的沉降差别主要取决于桩端刺入变形量。桩数的增加, 使相同基础荷载下的桩端刺入变形量所占的比例降低。

(2) 在桩端刺入变形发展的起始阶段, 带承台单桩与双桩的板底应力差别不大, 此后, 随着刺入变形的发展, 双桩基础桩体的存在对板底应力的增强作用开始体现, 在相同刺入变形下, 双桩基础板底应力大于带承台单桩基础。

(3) 桩土相对位移的发展从桩端部位开始, 逐步向承台板扩展, 同一部位基础外侧的桩土相对位移要

大于基础内侧。在起始阶段, 靠承台外侧面的桩土相对位移大于承台内侧面的桩土相对位移, 外侧面的侧阻首先得到发挥。随着桩端刺入变形的发展, 承台外侧面的侧阻进入极限状态, 而受板底应力的影响, 内侧面受到的正应力逐渐增大, 内侧侧阻逐渐占主导地位。内外侧阻表现出不同的发挥过程及极限值。

(4) 同样刺入变形下带承台双桩基础在桩端平面上土体的竖向应力要大于带承台单桩基础。桩端阻力的发挥不仅与刺入变形密切相关, 而且与桩端平面土体的上覆压力成正比例关系。

参考文献:

- [1] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design [M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [2] COOKE R W. Piled raft foundation on stiff clays-a contribution to design philosophy[J]. Geotechnique, 1986, 36(2): 169 - 203.
- [3] POULOS H G. Piled raft foundations: design and application[J]. Geotechnique, 2001, 51(2): 95 - 113.
- [4] 宰金珉. 塑性支承桩 - 卸荷减沉桩得概念及其工程应用[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.)
- [5] 陈强华, 等. 承台与短桩共同作用的试验研究[J]. 建筑科学, 1992(2): 30 - 36. (CHEN Qiang-hua, et al. Experimental research on the interaction between cap and short pile [J]. Building Science, 1992(2): 30 - 36.)
- [6] HORIKOSHI K, RANDOLPH M F. Centrifuge modeling of piled raft foundations on clay[J]. Geotechnique, 1996, 46(4): 741 - 752.
- [7] 王幼青, 等. 桩 - 承台 - 地基土相互作用试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1998, 31(2): 31 - 37. (WANG You-qing, et al. The test research on the interaction in pile-cap-foundation soil[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering & Architecture, 1998, 31(2): 31 - 37.)
- [8] 陈惠康. 桩基沉降分析[J]. 上海地质, 1990(1): 1 - 18. (CHEN Hui-kang. An analysis of the settlement of pile foundation [J]. Shanghai Geology, 1990(1): 1 - 18.)
- [9] 宰金珉. 桩土明确荷载分担的复合桩基及其设计方法[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(4): 66 - 74. (ZAI Jin-min. Composite pile foundation with distinct load distribution in piles and soils and its design method [J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(4): 66 - 74.)
- [10] 陈竹昌. 桩与承台下地基土共同受力的设计[J]. 岩土工程师, 1990, 2(1): 11 - 17. (CHEN Zhu-chang. Design method of pile-cap-soil interaction[J]. Geotechnical Engineer, 1990, 2(1): 11 - 17)
- [11] 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995, 9(1): 41. (Pile foundation handbook [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1995, 9(1): 41.)
- [12] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431 - 435. (HU Li-ming, PU Jia-liu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 431 - 435.)