

贾鹏,王兰民,杨燕,等.大规模群桩基础水平承载力效应系数计算研究[J].地震工程学报,2020,42(5):1202-1207.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1202

JIA Peng, WANG Lanmin, YANG Yan, et al. Effect Coefficient Calculation of Horizontal Bearing Capacity of Large-scale Pile Group Foundation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5): 1202-1207. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1202

大规模群桩基础水平承载力效应系数计算研究

贾 鹏^{1,2}, 王兰民³, 杨 燕^{1,2}, 刘上春^{1,2}

(1. 中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都 611731;

2. 中铁成都轨道交通健康管理技术有限公司, 四川 成都 611731;

3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 桩基础在水平荷载或地震作用下的承载力计算一直是工程界的一个研究难点,近年来随着建筑、桥梁桩基础的规模大幅增加,基于小规模、小比例尺群桩基础水平承载力试验得出来的结论和计算方法可能会不适应新的计算要求,相关的认识和计算方法需要重新论证和更新。本文针对大规模群桩基础水平承载力效应系数的计算问题,首先对国内外研究进展进行调研,发现现有的规范计算方法可能会高估群桩基础的水平承载力。针对这些问题,对大规模群桩基础的水平承载力效应系数进行有限元数值计算分析,探讨水平承载力效应系数的规律,给出相应的计算方法,并与规范计算方法结果进行对比。本文的研究结果可为相应的工程设计问题提供依据,结果的适用性需要今后进一步的检验。

关键词: 水平承载力; 水平承载力效应系数; 群桩基础; 大规模; 有限元法; 规范

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)05-1202-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1202

Effect Coefficient Calculation of Horizontal Bearing Capacity of Large-scale Pile Group Foundation

JIA Peng^{1,2}, WANG Lanmin³, YANG Yan^{1,2}, LIU Shangchun^{1,2}

(1. China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd., Chengdu 611731, Sichuan, China;

2. China Railway Chengdu Rail Transit Health Management Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, Sichuan, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The bearing capacity of pile foundation under horizontal loading or earthquakes has always been a difficult point in the engineering field. In recent years, the conclusions and calculation methods based on the horizontal bearing capacity test of small-scale pile foundation may no longer meet new requirements given the considerable increase in the scale of building and bridge pile foundation. Related knowledge and calculation methods need to be updated. Thus, this paper investigated the research progress at home and abroad and found that the calculation method of

收稿日期: 2019-10-01

基金项目: 成都地铁科技项目(DCKY-01-LHT)

第一作者简介: 贾 鹏(1992-),男,硕士研究生,工程师,主要从事岩土工程方面的工作。E-mail: pyybxgjip@126.com。

the current code may overestimate the horizontal bearing capacity of pile group foundation. Then, the effect coefficient of horizontal bearing capacity of large-scale pile group foundations was analyzed by using the finite element method. The law of the effect coefficient was obtained, and the corresponding calculation method was given. Finally, the result is compared with that of the calculation method of the code. The findings can provide a basis for corresponding engineering design problems. The applicability of the results needs to be further examined in the future.

Keywords: horizontal bearing capacity; effect coefficient of horizontal bearing capacity; pile-group foundation; large scale; finite element method; code

0 引言

群桩基础在水平受荷状态下的承载力效应系数是一个非常重要的指标,由于群桩中,桩与桩之间的相互影响,会在土中产生应力重叠现象,从而引起群桩在水平受荷状态下的群桩效应。国内外很多研究均表明:受水平荷载的群桩基础产生的群桩效应,会使群桩基础的水平位移增大,水平承载力降低,因此群桩的水平承载力并不等于单桩水平承载力与群桩桩数得的乘积。

国内外很多学者针对这一问题做了探索研究。刘金砺等^[1-2]在天坛、黄河洛口等地开展了几组灌注桩群桩水平静载试验(最大规模为 4×4),试验相关研究成果以及计算方法录入了《建筑桩基技术规范》。1971 年日本学者玉置等^[3]对群桩效应系数做了小比例尺寸的模型试验,采用外径 4.3 cm,壁厚 0.3 cm,桩长为 2 m 的钢管桩,群桩规模为 1×2 、 2×1 、 2×2 、 3×1 、 1×3 、 2×3 、 3×2 、 3×3 几种,并采用不同桩间距进行对比实验并提出了计算公式,但是该公式在桩数较多的情况下会产生不切实际的结果。1967 年 Prakash 和 Saran^[4]以及 1972 年 Oteo^[5]也做了类似的实验。我国的韩理安^[6-7]在资料分析和模型试验基础上提出了一个群桩水平承载力效应系数计算式,发现与实测比较接近。

从上述分析发现很多结论都是基于小规模群桩或者单桩的试验得出的,且试验场地单一,无法反应不同软硬土体的影响,究其原因还是现场群桩基础的水平荷载试验费用高昂且试验难度较大所致。王雷^[8]以一个 4×15 群桩基础为例,分别用我国建筑桩基规范和美国 IBC 规范计算群桩水平承载力效应系数,发现我国建筑桩基规范计算出的群桩基础水平承载力效应系数偏大,在设计中可能会产生水平承载力不足的情况。龚健、陈仁朋等^[9]开展了群桩基础水平承载力的现场试验,该试验不考虑桩侧土压力和承台底摩擦力,桩间距为 3.6 d,试验结

果为 4×4 群桩基础水平承载力效应系数为 0.69,小于规范计算值。因此基于小规模群桩基础的相关研究是否适应于大规模群桩基础还有待探讨。

近些年来建筑、桥梁桩基础的规模也在大幅增加,例如上海中心大厦主楼桩基础达到了 955 根^[10],苏通大桥主墩群桩基础也达到了 131 根^[11],但是桩基础水平承载力效应系数的研究成果却不多,相关设计理念和方法也急需更新。针对上述问题,本文对大规模群桩基础的水平承载力效应系数做了有限元数值计算分析,探讨了水平承载力效应系数的规律,给出了相应的计算方法。

1 有限元模型介绍

有限元模型采用 PLAXIS^{3d} 建立,本文研究的主要是弹性长桩的水平受荷性状,因此桩基采用软件中的 Embedded 嵌入桩单元来模拟,Embedded 桩单元由梁单元及特殊界面单元(代表桩土相互作用)组成。对于桩基数量较多的群桩基础,用 Embedded 桩单元是一种比较合理的选择。其他元素采用二阶 10 节点四面体的实体单元划分。在计算中将桩、承台的弹性模量固定为 30 000 MPa,桩长固定为 15 m,桩径定为 0.5 m,承台厚 0.4 m,埋深 $h_n = 0$ m。(不考虑承台侧土体压力的影响,且不考虑承台底与土体的摩擦)

有限元计算对群桩和排桩、不同场地土进行对比分析,单排桩桩数取 $1 \times m$ (行数 n 取 4~10),群桩桩数取 $n \times n$ (行数 m 取 4~10),此外还补充计算了 15×15 的群桩基础。将土根据强度简单划分为软土、较软土以及硬土三种类别进行分析,软土的压缩模量取为 4.1 MPa,较软土的压缩模量取为 11.6 MPa,硬土的压缩模量取为 26.6 MPa。

首先对单桩基础进行计算,将水平荷载 H 作用于桩顶位置处,将单桩桩顶水平位移为 10 mm 时对应的水平荷载定义为其承载力特征值 H_{cr1} ,如图 1

所示。然后对排桩、群桩基础进行计算,计算时水平荷载 H 设置于承台侧中心处,排桩作用水平荷载方向与排桩布置方向一致。将群桩桩顶水平位移为 10 mm 时对应的水平荷载定义为其承载力特征值 H_{cr1} ,下图 2 为群桩基础($n=8$)有限元模型及桩基平面布置图。

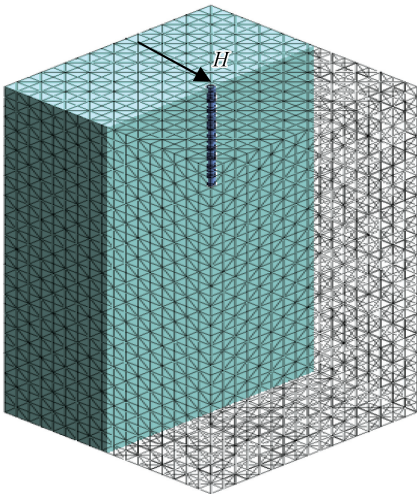
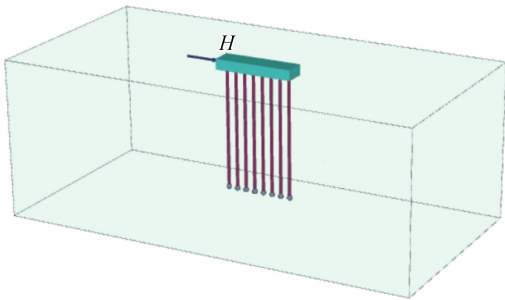
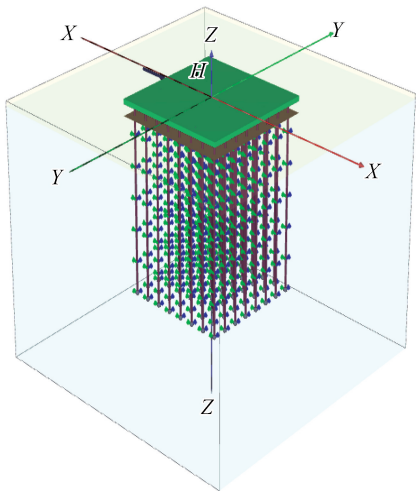


图 1 单桩基础有限元模型

Fig.1 Finite element model of single pile foundation



(a) 1×8群桩基础有限元模型



(b) 8×8群桩基础有限元模型

图 2 群桩基础有限元模型及桩基平面布置图

Fig.2 Finite element model and plan of pile-group foundation

2 有限元计算分析

根据刘金砺的定义^[1],群桩水平承载力效应系数 η 可以表示如式(1)所示,式中 m 为群桩中基桩的总数。

$$\eta = \frac{H_{cr}}{m \cdot H_{cr1}} \tag{1}$$

计算得到三种场地土对应单桩基础的水平承载力 H_{cr1} 分别为:59 kN、128 kN、230 kN。

对计算得到的群桩基础的水平承载力效应系数进行拟合,得到表达式如下式(2)所示,式中: n_1 为荷载作用方向的桩数, n_2 为垂直荷载方向的桩数, s_a/d 为桩间距, A 、 B 为与场地有关的系数。令 $C = \frac{n_2 - 1}{n_1 - 1}$,下表 1 列出了三种场地的 A 、 B 值,在计算时可根据这些数据插值计算。

$$\eta_{群} = \left[(A + 0.11C) \times \frac{s_a}{d} + B - 0.2C \right] n_1^{-0.38-0.47C} \tag{2}$$

表 1 水平承载力效应系数计算参数 A 、 B 值
Table 1 Calculation parameters A and B of horizontal bearing capacity effect coefficient

场地类型	压缩模量/MPa	A	B
软土	4.1	0.13	1.42
偏软土	11.6	0.2	1.54
硬土	26.6	0.24	1.7

通过上述拟合公式对软土、较软土、硬土地排桩、群桩基础水平承载力效应系数绘图如图 3~8 所示。

对群桩与排桩的水平承载力效应系数进行分析,得出:

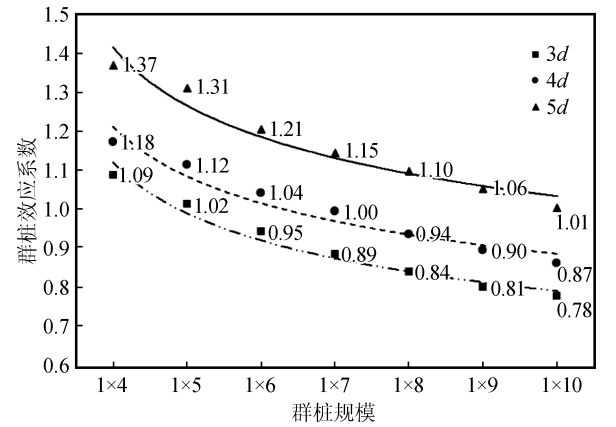


图 3 软土地排桩水平承载力效应系数图

Fig.3 Horizontal bearing capacity effect coefficient diagram of row piles in soft soil site

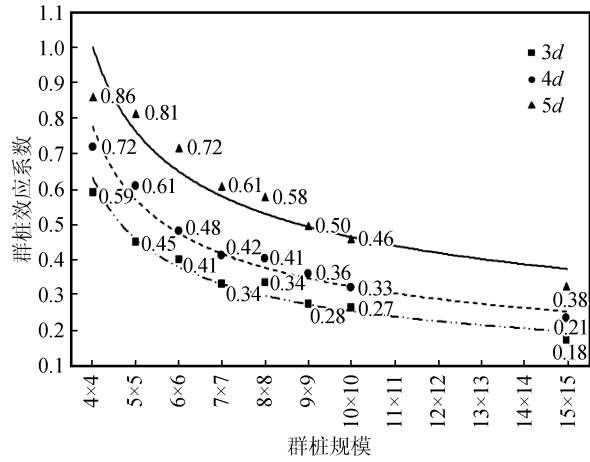


图 4 软土地地群桩水平承载力效应系数图

Fig.4 Horizontal bearing capacity effect coefficient diagram of pile group in soft soil site

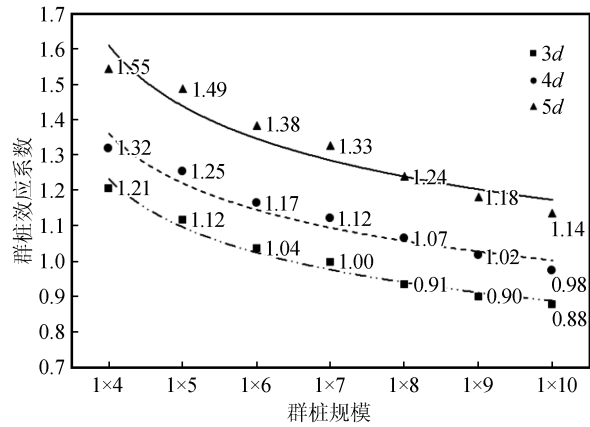


图 5 偏软土地地排桩水平承载力效应系数图

Fig.5 Horizontal bearing capacity effect coefficient diagram of row piles in relative soft soil site

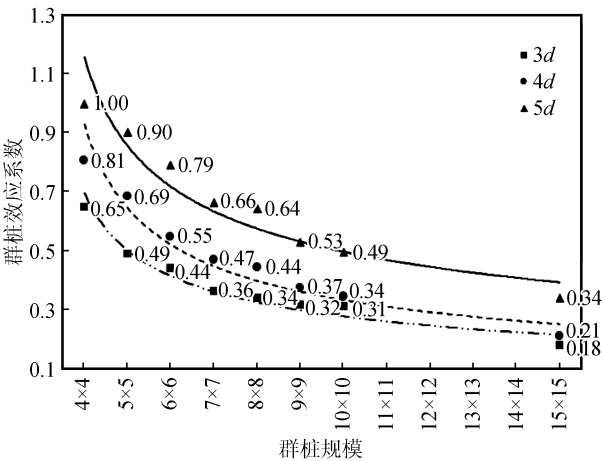


图 6 偏软土地地群桩水平承载力效应系数图

Fig.6 Horizontal bearing capacity effect coefficient diagram of pile group in relative soft soil site

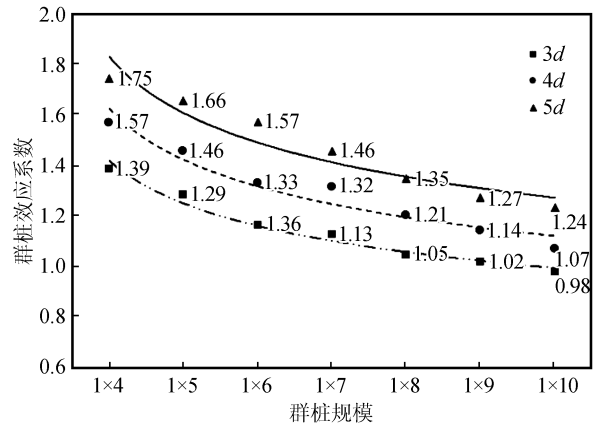


图 7 硬土地地排桩水平承载力效应系数图

Fig.7 Horizontal bearing capacity effect coefficient diagram of row piles in hard soil site

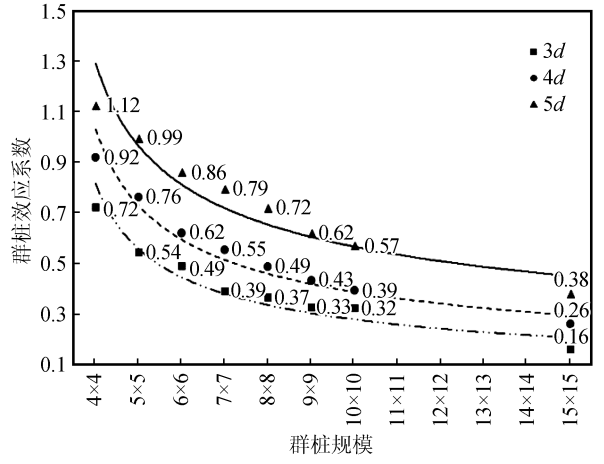


图 8 硬土地地群桩水平承载力效应系数图

Fig.8 Horizontal bearing capacity effect coefficient diagram of pile group in hard soil site

(1) 群桩水平承载力效应系数随着土的刚度的提高而逐渐提高。以 3 d 桩间距情况下的 10×10 群桩基础为例,软土、较软土、硬土地地的群桩基础水平承载力效应系数分别为 0.46、0.49、0.57。

(2) 桩数的增多会使群桩水平承载力效应系数显著降低。以 6 d 桩间距偏硬土地地中的排桩基础为例,1×4 排桩基础的效应系数为 1.75,1×10 排桩基础的效应系数为 1.24。

(3) 群桩水平承载力效应系数随着桩间距的增大而逐渐增大,这主要是因为随着桩间距的增大,前后桩之间相互影响减小所致。

(4) 随着群桩规模的逐渐增加,水平承载力效应系数的衰减逐渐放缓,最后趋于一个常量,说明群桩水平承载力效应系数并不会随着桩数的增多而减小为 0。

3 与规范值对比

我国建筑桩基技术规范^[2]对于水平荷载作用下的群桩效应,引入群桩效应综合系数 η_h 的概念,根据建筑桩基技术规范第 5.7.3 条的相关规定,当考虑地震作用且 $s_a/d \leq 6$ 时的计算公式如式(3)所示:

$$\eta_h = \eta_i \eta_r + \eta_i \tag{3}$$

式中: η_i 为桩的相互影响系数:

$$\eta_i = \frac{\left(\frac{s_a}{d}\right)^{0.015n_2+0.45}}{0.15n_1 + 0.10n_2 + 1.9};$$

对于细长桩,桩顶约束效应系数 η_r 取 2.05; η_i 为承台侧向土水平抗力效应系数:

$$\eta_i = \frac{m\chi_{0a}B'Ch_c^2}{2n_1n_2R_{ha}};$$

n_1 、 n_2 为分别为沿荷载方向与垂直水平荷载方向每排桩中的桩数; h_c 为承台高度(m); B'_c 为承台受侧向土抗力一边的计算宽度(m);承台的水平位移允许值—— χ_{0a} (一般取 10 mm); s_a/d 为沿水平方向的距径比。

由于本文计算不考虑承台侧土抗力与承台底摩擦力,此时群桩效应综合系数 $\eta_h = 2.05 \times \eta_i$;

为了将根据规范的计算方法和上述硬土地提出的计算方法进行对比分析,将两种方法计算得到的各个规模群桩的绘图如 9~10 所示。从图中可以看到两种方法对于排桩的水平承载力发挥效率计算差别不大,但是对于群桩基础则相差很大,这表明规范法可能对于垂直于作用力方向的桩与桩之间的应力叠加效应问题可能考虑不足,在设计时可能会高估群桩基础的水平承载力。

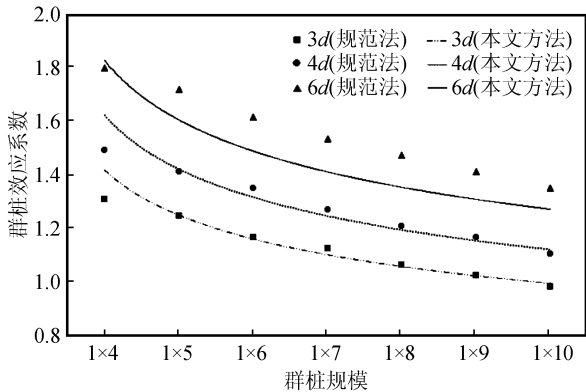


图 9 规范法与本文公式计算排桩水平承载力效应系数图

Fig.9 Comparison of the effect coefficient of horizontal bearing capacity of row piles between the code method and the formula in this paper

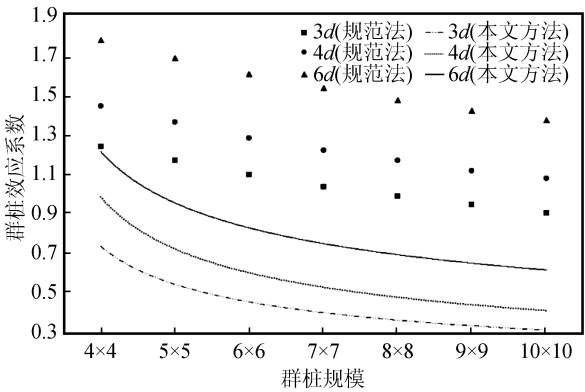


图 10 规范法与本文公式计算群桩水平承载力效应系数图

Fig.10 Comparison of the effect coefficient of horizontal bearing capacity of pile group between the code method and the formula in this paper

4 结论

本文对大规模群桩水平承载力效应系数进行有限元数值计算,主要得出如下结论:

- (1) 群桩水平承载力效应系数随着土的刚度的提高而逐渐提高。
- (2) 桩数的增多会使群桩水平承载力效应系数显著降低。但是随着群桩规模的逐渐增加,水平承载力效应系数的衰减逐渐放缓,最后趋于一个常量。
- (3) 群桩水平承载力效应系数随着桩间距的增大而逐渐增大。
- (4) 对于排桩基础,数值计算与规范法计算的结果较为一致,但是对于群桩基础,规范法计算得到的水平承载力效应系数则偏大,可能会高估群桩基础的水平承载力。

参考文献(References)

[1] 刘金砺.群桩横向承载力的分项综合效应系数算法[J].岩土工程学报,1992,14(3):9-19.
LIU Jinli.Calculation Method of Comprehensive Effect Coefficient for Lateral Bearing Capacity of Pile Group[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1992,14(3):9-19.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑桩基技术规范:JGJ94-2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
Technical Code for Building Pile Foundation:JGJ94-2008[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2008.

[3] TAMAOKI,MITSUHASHI.Research on Lateral Bearing Capacity[J].Civil Engineering Society Proceedings,1971, No.192 p.79-89.

[4] PRAKASH,S.& SARAN,D.Behaviour of Laterally Loaded Piles

in Cohesive Scils.Proc.3nd Asian Conf.S.M.1967.,235-238.

[5] OTEO,C.S.Displacement of a vertical pile group subjected to lateral loads.Proc.5th Eur.Conf.S.M.&F.E.,Madrid,vol.1972, 1:397-405.

[6] 韩理安.桩基水平承载力的群桩效率[J].岩土工程学报,1984, 6(3):66-74.

HAN Li'an.The Group Efficiency of the Horizontal Bearing Capacity on Pile Foundation[J].Chinese Journal of Geotechni- cal Engineering,1984,6(3):66-74.

[7] 韩理安.群桩水平承载力的实用计算[J].岩土工程学报,1986, 8(3):27-36.

HAN Li'an.Horizontal Bearing Capacity Calculation of Pile Groups[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1986, 8(3):27-36.

[8] 王雷.比较中国国标和国际建筑规范(IBC)在单桩和群桩水平 承载力设计区别[C]//第六届全国青年岩土力学与工程会议 暨岩土工程系列学术研讨会论文集.2007:297-302.

WANG Lei.Comparison of the Design Differences Between Chinese National Standard and International Building Code (IBC) in Horizontal Bearing Capacity of Single Pile and Group Pile[C]//Proceedings of the 6th National Youth Conference on Geomechanics and Engineering and a Series of Symposium on Geotechnical Engineering.2007:297-302.

[9] 龚健,陈仁朋,陈云敏,等.微型桩原型水平荷载试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(20):3541-3546.

GONG Jian,CHEN Renpeng,CHEN Yunmin,et al.Prototype Testing Study on Micropiles under Lateral Loading[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(20): 3541-3546.

[10] 吴洁妹.上海中心大厦超深钻孔灌注桩施工技术[J].建筑施 工,2010,32(4):311-312,318.

WU Jiemei.Construction Technology of Ultra Deep Bored Pile for Shanghai Center Tower[J].Building Construction,2010, 32(4):311-312,318.

[11] 李镇,张雄文.苏通大桥主塔群桩基础的设计与施工[J].公路 交通科技(应用技术版),2008(8):120-122.

LI Zhen,ZHANG Xiongwen.Pile Group Foundation Design and Construction of Sutong Bridge Main Tower[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008(8):120-122.