

DOI: 10.11779/CJGE2019S2056

穿越软土层嵌岩桩筏基础沉降特征与计算方法

胡敏云¹, 陆雨珂¹, 陈小雨¹, 张庆山², 徐晓兵¹, 张勇^{*1}

(1. 浙江工业大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310014, 2. 浙江工业大学工程设计集团有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要: 结合某双塔高层建筑核心区桩筏基础和核心区外独立承台桩基础沉降变形监测资料, 分析了嵌岩桩筏基础的沉降特征。结果表明, 双塔核心区嵌岩桩筏基础沉降变形的整体性较好, 沉降随施工加载过程增长较为稳定, 而核心区外嵌岩桩基础的沉降对主楼施工和环境条件(如地下水)较为敏感, 施工中出现了桩体上浮现象。根据桩顶荷载计算的嵌岩桩桩身压缩量与实测沉降相比, 实测值远大于计算值。考虑嵌岩桩施工和桩筏基础工作特点, 提出了穿越软土层的嵌岩桩筏基础沉降的两个主要影响因素: 沉渣效应和桩侧负摩阻。在此基础上, 提出了考虑沉渣和桩侧阻影响的桩筏基础沉降估算方法, 并通过本工程及文献中的工程实测对提出公式的适用性进行了检验。

关键词: 桩筏基础; 软土; 嵌岩桩; 沉渣效应; 桩侧负摩阻; 沉降计算

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S2-0221-05

作者简介: 胡敏云(1970—), 女, 教授, 主要从事土力学与环境岩土工程方面的科研与教学工作。E-mail: huminyun@zjut.edu.cn。

Settlement of piled raft foundation embedded in rock and its calculation method

HU Min-yun¹, LU Yu-ke¹, CHEN Xiao-yu¹, ZHANG Qing-shan², XU Xiao-bing¹, ZHANG Yong¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Zhejiang University of

Technology Engineering Design Group Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: Based on the settlement monitoring data of two piled rafts under a twin-tower building, the settlement characteristics of piled raft foundation is examined. It is shown that the piled raft settles as a whole under loading, while the settlement of piles under individual plate, which is located outside the tower areas, is sensitive to changing of the adjacent loading and ground water level. By comparing the measurement with the calculated settlement, it is found that the measured settlements are much greater than the calculated values. Then, two influential factors are proposed, bottom sediment in pile and negative skin friction on pile, to revise the settlement calculation equation for piled raft foundation penetrating thick soft soil layers. Finally, the proposed method and the suggested parameters are checked through two real cases.

Key words: piled raft foundation; soft soil; rock socketed pile; bottom sediment; negative skin friction; settlement calculation

0 引言

桩筏基础适用于荷载大、地基承载力不高或对地基沉降控制比较严格的情况, 多见于我国山区和部分沿海地区。目前对这类桩筏基础的变形特征和计算方法还有待研究。

现有的桩筏基础沉降研究大多是针对桩端落入土层的情况^[1-3], 计算方法包括: 经验公式法、简化理论法和半理论半经验法等。Chaudhary 采用有限元模拟分析了一个桩端嵌入软岩的圆形桩筏基础的变形与承载能力^[4]。张忠苗^[5]结合工程实例对穿越软土层的嵌岩桩筏基础进行现场实测分析, 这些研究表明嵌岩桩筏基础与嵌入土层的桩筏基础承载变形特性是有区别的, 现有的计算理论对嵌岩桩筏基础不适用。

本文结合某双塔式高层建筑工程实例对嵌岩桩筏

基础进行了沉降监测, 分析了嵌岩桩筏基础沉降发展特征及影响因素, 并通过理论分析提出了嵌岩桩筏基础沉降估算方法。

1 工程概况与监测方案

绍兴市环球纽约国际中心位于绍兴市区, 是包含南北双塔的高层建筑, 上部结构高度 161.10 m, 裙房 5 层, 地下室 3 层, 裙房采用独立承台嵌岩桩基础。双塔核心筒建筑基础采用平板式桩筏基础, 筏板厚 3.0 m, 筏板埋深 14.9~16.0 m, 每个筏板下各布置 286

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878616)

收稿日期: 2019-04-30

*通讯作者(E-mail: zhangyong@zjut.edu.cn)

根桩。南北双塔同期施工。

场地原始地貌属于冲海积,地表为厚填土层,上部由冲海积黏土、淤泥质组成,下部为坡积粉质黏土层,基岩为熔结凝灰岩。地基土可分为7个工程地质层。地下水位埋深为1.0~2.4 m,年变化幅度为1.0~1.5 m。

工程桩采用钻孔灌注桩,桩长25~40 m,桩径 $d=800$ mm,桩身混凝土等级C40,桩端持力层均为中风化凝灰岩,桩端嵌岩深度大于1 m,桩间距 $S=3d$ 。

为了监测该建筑基础施工过程中的沉降发展,本工程共布置了30个测点(M1~M30),如图1所示。从上层结构施工开始进行监测,主体结构每施工一层监测一次。本研究选取的监测数据为主体结构每施工增加7层时数据及封顶后的两次监测数据(共9组)。

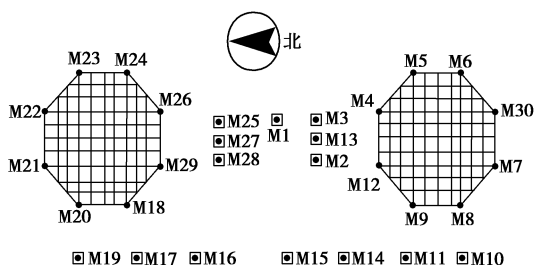


图1 沉降测点平面布置图

Fig. 1 Layout of settlement monitoring points

2 沉降监测结果与分析

2.1 双塔核心区基础沉降

图2给出了北侧和南侧核心塔区桩筏基础各测点沉降随时间发展规律。由图2可见,各测点沉降基本上随施工荷载增加而增大,沉降发展规律相似,总体表现为筏基东部测点沉降略大于西部的,且南塔基测点总体沉降略大于北塔基的。

各测点沉降随时间发展规律相似,说明桩筏基础具有整体性变形特征,但是各测点沉降不均匀,主要应是受裙房区荷载及下伏基岩埋深不同的影响。

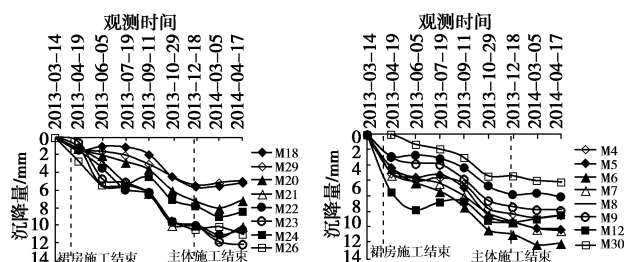


图2 南、北侧塔基施工沉降曲线

Fig. 2 Evolution of settlement under south and north towers

2.2 裙房基础沉降

图3给出了裙房区两塔基之间及西侧各测点的沉

降曲线。由图3可知,双塔核心区以外各测点的沉降开始时随施工荷载的增加而增加,当裙房施工基本完成后(2013年4月),沉降仍随着主塔楼的施工持续发展,直到主塔楼施工结束后才趋于稳定。这说明主塔核心区的施工沉降对裙房桩基础有“促沉作用”。另外,在2013年6月15日—7月19日期间裙房基础各测点沉降曲线都出现了累计沉降量减小,即桩项上浮现象,这大概是受施工期间降雨引起的地下水位上升的影响。

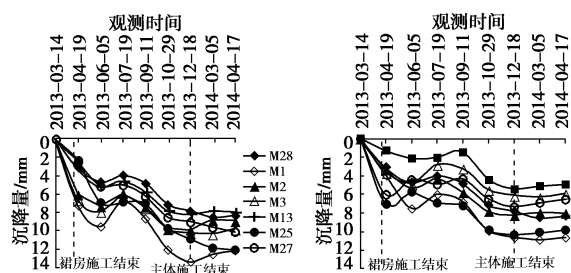


图3 塔基中间侧、西侧测点施工沉降曲线

Fig. 3 Evolution of settlement under middle and west towers

2.3 塔基与裙房基础沉降对比

本工程实测沉降最大值发生于测点M6($s_6=14.1$ mm),其次是M7($s_7=12.4$ mm)和M1($s_1=12.1$ mm),其中M6、M7位于南侧塔基上,M1位于两塔基之间的裙房独立承台桩基上。M6、M7和M1的施工过程沉降曲线如图4所示。由图4可知,三个测点的最终沉降量相差不大,但是,沉降过程却有些不同。塔基下M7与M6的沉降量随施工荷载的增加而增长,变化过程比较平稳;但裙房区测点M1的沉降变化有波动,在6月15日—7月19日受降雨影响期间出现累计沉降量减小,即桩项上浮现象。这说明桩筏基础的整体性较好,其沉降主要受施工期间荷载持续增加的影响,而受水位波动的影响较小;而裙房区独立承台下的基桩则对地下环境变化的反应更敏感,而且会受到两侧桩筏基础沉降的“促沉”作用。

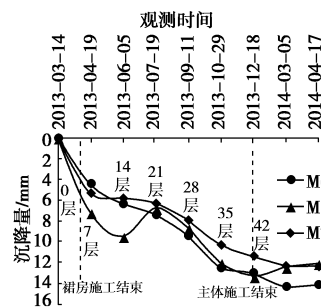


图4 施工沉降曲线(M1, M6, M7)

Fig. 4 Construction settlement curves (M1, M6, M7)

2.4 建筑场地整体沉降特征

从图2~4可以看出,本工程的基础沉降大体可分

为 3 个阶段：①初始沉降阶段：主楼和裙房整体施工阶段，沉降速率较大。②沉降发展阶段：裙房施工已完成，主楼逐层施工加载。期间沉降较为复杂，主楼塔基部分的沉降持续发展，而裙房基础的沉降受主楼施工的影响，且受降雨引起的地下水位变化影响，部分桩体出现上浮现象。③沉降稳定阶段：主体结构施工完成，期间各个测点沉降相对稳定，但存在部分测点沉降量减小，即桩体轻微回弹的现象。

图 5 为各测点的平面位置和最终沉降量拟合得到的基础整体沉降云图。区域内基础沉降分布不均匀，呈现明显的“马鞍形”，即双塔中心区的沉降明显较大。

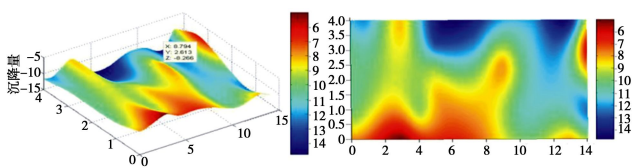


图 5 建筑基础整体最终沉降
Fig. 5 Overall final settlements of foundation

3 嵌岩桩筏基础沉降计算方法

3.1 嵌岩单桩沉降计算

对于嵌岩桩，桩顶沉降主要是由桩身压缩引起的。而桩身压缩与桩顶荷载和桩身的轴力分布有关，可以采用刘金砺等^[6]给出的桩身压缩量的统一计算公式表

示如下：

$$S_e = \zeta_e \frac{Q_0 L}{A_p E_p} \quad , \quad (1)$$

式中， S_e 为桩身压缩量， Q_0 为桩顶荷载， L 为桩长， A_p 为桩横截面积， E_p 为桩弹性模量， ζ_e 为桩身压缩系数，与桩身轴力分布有关。关于桩顶荷载 Q_0 取值：对裙房区域的独立承台基础，桩顶荷载为竖向荷载设计值除以承台下总桩数；对核心筒区的桩筏基础，桩顶荷载为核心区总竖向荷载设计值除以筏板下的总桩数。

本工程嵌岩桩筏基础， $A_p=0.5\text{ m}^2$ ， $E_p=31.5\times10^3\text{ MPa}$ 。本工程地下水位较高，但筏板埋深范围内主要是低渗透性饱和黏性土，因而在计算施工期桩顶荷载时可忽略浮力影响。采用公式（1）进行计算，结果见表 1，计算时不考虑桩侧阻对桩身轴力的影响，即 $\zeta_e=1.0$ 。

由表 1 可见各测点的实测沉降值均大于计算值。双塔核心区的 16 个测点沉降实测值与计算值之比在 1.2~2.6 之间，双塔核心区以外的 14 个测点沉降比在 1.1~3.5 之间。这说明本工程的嵌岩桩筏基础实际发生的沉降远大于按桩顶荷载计算的桩身压缩量。这与张忠苗等^[5]实测得到的超长（ $L/d>80$ ）嵌岩桩筏基础基桩沉降大于同样荷载下单桩沉降的情况是一致的。

3.2 嵌岩桩筏基础沉降计算方法

由公式（1），对于桩身截面刚度一定的嵌岩钻孔

表 1 测点沉降计算与实测值对比

Table 1 Comparison between measured and calculated settlements								
非核心区								
测点	M10	M11	M14	M15	M16	M17	M19	
实测值/mm	8.5	10.9	7.8	6.3	10.3	7.3	5.4	
计算值/mm	3.0	3.1	5.9	5.5	4.8	2.7	2.4	
实测值/计算值	2.8	3.5	1.3	1.14*	2.1	2.7	2.3	
双塔间区								
测点	M1	M2	M3	M13	M25	M27	M28	
实测值/mm	13.3	9.9	10.3	8.2	13.0	10.1	8.4	
计算值/mm	6.0	5.1	5.1	5.2	4.6	4.6	4.5	
实测值/计算值	2.2	1.9	2.0	1.6	2.8	2.2	1.9	
北塔区								
测点	M18	M20	M21	M22	M23	M24	M26	M29
实测值/mm	5.6	8.4	11.4	11.9	12.1	9	11	9.7
计算值/mm	4.7	4.4	4.5	5.0	4.7	5.4	5.4	5.1
实测值/计算值	1.2	1.9	2.5	2.4	2.6	1.7	2.0	1.9
ζ	1.05	1.67	2.22	2.09	2.26	1.46	1.79	1.67
南塔区								
测点	M5	M6	M9	M12	M4	M7	M8	M30
实测值/mm	12.3	14.3	9.8	11.5	10.8	12.4	8.1	6.2
计算值/mm	5.7	6.1	5.3	5.5	5.7	5.7	5.5	6.4
实测值/计算值	2.2	2.3	1.8	2.1	1.9	2.2	1.5	1.0
ζ	1.89	2.06	1.62	1.83	1.66	1.91	1.29	—

注： ζ 为桩侧负摩阻影响系数，见公式（2）， ζ =实测值/（ $\eta\times$ 计算值（II））

灌注桩，影响桩身压缩量的三个主要因素是：桩顶荷载（ Q ）、桩长（ L ）和桩侧摩阻力的发挥（ ζ_e ）。

在计算桩筏基础的沉降时，因为整体性较好，可按各单桩沉降的平均值进行估算。单桩沉降应考虑筏板对桩顶的联结作用和对下部土体变形的约束作用，则上述三个因素作如下考虑：①不计入筏基下桩间土的荷载分担作用，认为上部结构荷载全部由桩承担；②因为土体的压缩模量小于桩体的，土体沉降大于桩体沉降，则桩侧阻为负摩阻；③考虑沉渣效应对桩顶沉降的增加，适当修正桩长。为此，在估算嵌岩桩筏基础的单桩沉降时，可对公式（1）修正如下：

$$S_s = \zeta \frac{QL'}{EA_p} = \zeta \frac{Q\eta L}{EA_p} \quad (2)$$

式中 S_s 为筏基下单桩沉降量； Q 为桩顶荷载，按桩顶平均荷载计算； L' （ $L' = \eta L$ ）为考虑沉渣影响修正后的桩长，沉渣修正系数 η 与桩长和桩型有关，可按经验取值，对无沉渣影响的短桩和完全摩擦桩， $\eta = 1.0$ ，其它情况， $\eta > 1.0$ ； ζ 为桩身压缩系数，考虑桩侧摩阻力对桩身轴力分布的影响，可按经验取值，也可通过理论计算得出。

3.3 计算公式参数分析

沉渣修正系数 η 可按工程经验取值，根据本工程沉降反分析（表 1 中 M15 测点），取 $\eta = 1.14$ 。

桩身压缩系数 ζ 反映的是负摩阻引起的桩顶沉降放大效应，是桩顶荷载引起的沉降 S_e 及桩侧负摩阻力引起的沉降 S_f 之和与 S_e 之比：

$$\zeta = \frac{S_e + S_f}{S_e} \quad (3)$$

S_e 可由公式（1）计算，取 $\zeta_e = 1.0$ 。 S_f 与负摩阻的分布有关。桩侧负摩阻力分布值可采用 Braja M. Das^[7] 提出的计算公式计算：

$$f_n = K' \sigma'_z \tan \delta \quad (4)$$

式中 K' 为土压力系数，取 $K' = K_0 = 1 - \sin \phi'$ ； σ'_z 为任意深度 z 处的垂直有效应力，取 $\sigma'_z = \gamma' z$ ； δ 为桩土之间的摩擦角，取 $\delta \approx 0.6\phi$ 。则由桩侧负摩阻引起的桩顶沉降为

$$S_f = \frac{\int_0^H p f_n dz \cdot z}{EA_p} = \frac{\int_0^H (p K' \gamma' \tan \delta) z^2 dz}{EA_p} \quad (5)$$

其中， H 为中性点的埋深， $p = \pi d$ ，为桩截面周长。

本工程根据沉降实测值经反分析获得桩身压缩系数 ζ ，见表 1。 $\zeta = 1.05 \sim 2.28$ ，均值为 1.77。

3.4 公式及参数检验

以 M6、M7、M1 三根桩为例按公式（2）计算桩顶沉降量。各测点土层分布由勘察报告得到，例如

M6 桩长范围内土层参数见表 2。三个测点的沉降计算见表 3。

表 2 M6 测点土层基本信息
Table 2 Basic information of stratum at M6

序号	土层名称	厚度 /m	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
①	杂填土	3.0	19.8	20.0
③	淤泥质黏土	4.0	17.0	2.6
④	粉质黏土	13.6	18.5	9.0
⑤	黏土	14.2	17.6	3.1
⑥-2	粉质黏土角砾	4.2	18.8	7.0

表 3 同时给出了 M6、M7、M1 三个测点及南京某大厦^[8]的沉降计算值与实测值对比。由表 3 可见：考虑沉渣效应和桩侧负摩阻力的影响可以更好地预估桩筏基础的沉降。

表 3 桩筏基础沉降计算值与实测值对比

Table 3 Calculated and measured values of piled raft settlement

测点	计算值/mm		实测值/mm	$\frac{S_I}{S_{测}}$	$\frac{S_{II}}{S_{测}}$
	S_I	S_{II}	$S_{测}$		
M6	11.1	12.3	14.3	0.8	0.9
M7	11.1	11.5	12.4	0.9	0.9
M1	9.3	12.1	13.3	0.7	0.9
南京某大厦 ^[8]	14.9	7.9	11.6	1.3	0.7

注：计算 I 中， ζ 采用 Braja M. Das 的计算公式；计算 II 中， $\zeta = 1.77$ ；沉渣修正系数 η 统一取为 1.14。

4 结 论

通过对绍兴市纽约环球中心双塔高层建筑的嵌岩桩基础沉降实测与计算分析，可以得出以下结论：

（1）建筑场区内基础沉降大体呈马鞍形分布；双塔核心区嵌岩桩筏基础沉降的整体性较好，非核心区桩基础沉降受桩筏基础的促沉影响，且非核心区桩基沉降对地下水位变化较为敏感。

（2）通过计算与实测对比发现，嵌岩桩筏基础实际发生的沉降远大于按桩顶荷载计算的嵌岩桩沉降量。分析表明，穿越深厚软弱土层的嵌岩桩筏基础沉降计算可不考虑筏板下地基土的荷载分担作用，但应考虑桩底沉渣效应和桩侧负摩阻力的影响。

（3）建议采用公式（2）估算桩筏基础各基桩沉降。桩筏基础的整体沉降可取为各基桩沉降量平均值。公式中包含的沉渣修正系数可按经验取值，而桩身压缩系数可按公式（3）计算或按经验取值。建议结合嵌岩桩筏工程实测对沉渣修正系数和桩身压缩系数取值方法进行研究。

参考文献：

[1] LEE J H, PARK D J. Analysis of load sharing behavior for piled rafts using normalized load response model[J].

- Computers and Geotechnics, 2014, **57**(1): 65 - 74.
- [2] 赵锡宏. 上海高层建筑桩筏与桩箱基础设计理论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989. (ZHAO Xi-hong. Shanghai high-rise building piled raft and piled box foundation design theory[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1989. (in Chinese))
- [3] BASILE F. Non-linear analysis of vertically loaded piled rafts. Computers and Geotechnics, 2015, **63**(2): 73 - 82.
- [4] TARIQ M, CHAUDHARY A. FEM modelling of a large piled raft for settlement control in weak rock[J]. Engineering Structures, 2007, **29**(3): 2901 - 2907.
- [5] 张忠苗. 浙江财富金融中心超长单桩与群桩实测沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 1): 3199 - 3207. (ZHANG Zhong-miao. Analysis of measured settlement of super-long piles and pile groups in Zhejiang Fortune Finance Center[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S1): 3199 - 3207. (in Chinese))
- [6] 刘金砺, 邱明兵. 单桩、单排桩、疏桩基础及其复合桩基的沉降计算[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(增刊): 152 - 158. (LIU Jin-li, QIU Ming-bing. Settlement calculation for pile foundation and composite piled foundation with single pile and sparse piles[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(S0): 152 - 158. (in Chinese))
- [7] Braja M Das. Principles of foundation engineering[M]. 8th ed. United States of America: Timothy L Anderson, 2016: 481 - 485.
- [8] 钟闻华, 刘松玉, 张克恭. 群桩基础特性研究与实例分析[J]. 建筑结构, 2003, **33**(11): 9 - 12. (ZHONG Wen-hua, LIU Song-yu, ZHANG Ke-gong. Characteristics of pile group foundation and case study[J]. Building Structure, 2003, **33**(11): 9 - 12. (in Chinese))

(责编: 明经平)

(上接第 220 页)

- [3] 刘 勇, 万利民, 袁光辉, 等. 广州白云国际机场 T2 航站楼隧道基坑支护设计技术[J]. 施工技术, 2017, **46**(14): 7 - 9. (LIU Yong, WAN Li-min, YUAN Guang-hui, et al. Design technology of foundation excavation support for Guangzhou Baiyun International Airport Terminal No.2 tunnel[J]. Construction Technology, 2017, **46**(14): 7 - 9. (in Chinese))
- [4] 金云飞, 刘 郁, 朱蓉蓉. 火车站站前广场综合改造工程支护技术[J]. 施工技术, 2018, **47**(13): 17 - 20. (JIN Yun-fei, LIU Yu, ZHU Rong-rong. Comprehensive supporting techniques for the renewal project of railway station square[J]. Construction Technology, 2018, **47**(13): 17 - 20. (in Chinese))
- [5] 邢 军, 沈俊杰, 吴才德, 等. 宁波国际金融中心南区深基坑方案比选研究[J]. 建筑结构, 2017, **47**(9): 98 - 103. (XING Jun, SHEN Jun-jie, WU Cai-de, et al. Selection study of deep foundation pit schemes of southern district of Ningbo International Financial Services Centre[J]. Building Structure, 2017, **47**(9): 98 - 103. (in Chinese))
- [6] 周秋来. 深基坑纵横樨井字形钢管内支撑设计及应用[J]. 铁道工程学报, 2018, **35**(3): 1 - 7. (ZHOU Qiu-lai. The design and application of internal bracing for longitudinal and transverse steel pipes in deep foundation pit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, **35**(3): 1 - 7. (in Chinese))
- [7] ZHANG W, ZHANG M, WANG Y. Application and investigation of a new-style GFRP middle beam in foundation pit support[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **20**(7): 1727 - 1738.
- [8] 杨生彬, 王晓义, 朱艳艳. 北京市某深基坑支护工程实录[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊 2): 4471 - 4476. (YANG Sheng-bin, WANG Xiao-yi, ZHU Yan-yan. Engineering case of a deep foundation pit supporting in Beijing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S2): 4471 - 4476. (in Chinese))

(责编: 明经平)