

文章编号: 1000-7598-(2008) 07-1965-06

深基坑开挖对坑内基桩受力特性的影响分析

胡 琦¹, 凌道盛¹, 陈云敏¹, 程泽海², 冉 龙³

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310027; 2. 浙江科技学院 土木系, 杭州 310012; 3. 杭州地铁集团, 杭州 310003)

摘 要: 基坑开挖对基桩产生一定的侧摩阻力, 如果处理不当, 将危及地下结构与基桩的安全使用, 同时也给基桩承载力与刚度的确定带来困难。根据应力路径与应力水平对土体刚度的影响, 建立了受深基坑开挖影响的桩土界面荷载传递模型, 通过应力路径试验确定了界面摩擦特性参数。对不同开挖深度的影响分析, 得出了基坑开挖对桩周侧摩阻力的分布、基桩刚度与承载力的影响。分析结果表明, 采用覆土条件下的基桩承载力与刚度值是偏于不安全的。

关 键 词: 侧摩阻力; 深基坑; 荷载传递法; 有限元法; 剪切刚度

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Study of loading characters of pile foundation due to unloading of deep foundation pit excavation

HU Qi¹, LING Dao-sheng¹, CHEN Yun-min¹, CHENG Ze-hai², RAN Long³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310027, China; 3. Hangzhou Metro Group, Hangzhou 310003, China)

Abstract: Due to unloading of deep foundation pit excavation, piles of underground structure will be applied skin friction in advance. This friction will endanger the underground structure and pile foundation if not be managed properly, and it will be more difficult to calculate the capacity and rigidity of pile due to this friction. According to the effect of stress path and stress level to the rigidity of soil, a new interface model considering the influence of deep foundation pit excavation is established. The friction parameters of interface model is confirmed by stress path test. Compared the results of different excavation depths, the influence of excavation on the skin friction, capacity and rigidity of pile is gained. The results show that it is unsafe to use the capacity and rigidity of pile under the conditions of earth covering.

Key words: skin friction; deep foundation pit; load transfer method; finite element method; shearing rigidity

1 前 言

坑内基桩在基坑开挖前施工完成, 受现场条件的限制, 基桩静载荷试验一般也在基坑开挖之前进行, 这种方法不能反映基坑开挖对基桩力学性能的影响。与路堤堆载^[1-3]以及打桩挤土效应^[4]一样, 基坑开挖卸荷对基桩力学性能也有重要影响。上海某基坑开挖深度为 13 m, 基桩检测资料表明, 开挖完成后 30 %工程桩在钢筋笼底部断裂^[5]。广东地区某基坑开挖深度 5 m, 高应变检测资料表明, 40 %的基桩承载力达不到要求^[6]。事实表明, 基坑开挖对基桩的影响不容忽视, 定量评价这种影响对实际工程具有重要指导意义。

基坑开挖对基桩的影响分析包含两个方面:

(1) 受回弹影响的基桩受力分析

不考虑桩上部外荷载的作用, 桩“浮”在土中。基坑开挖后, 坑内土体应力释放、回弹, 带动桩上移, 桩身上部承受向上的正摩阻力作用, 即上拔荷载, 桩被抬升; 桩身下部阻止桩的上移, 对桩产生向下的负摩阻力。桩在正、负摩阻力的作用下承受拉伸轴力 (如图 1 所示)。

(2) 基桩在上部结构荷载作用下的受力分析

基坑开挖完成后, 上覆土体的移去使得桩周中的土体有效应力减小, 桩侧摩阻力减小, 导致立柱桩的承载力降低。同时由于回弹的作用, 桩周存在侧摩阻力, 虽然侧摩阻力的正负和相等, 不会影响

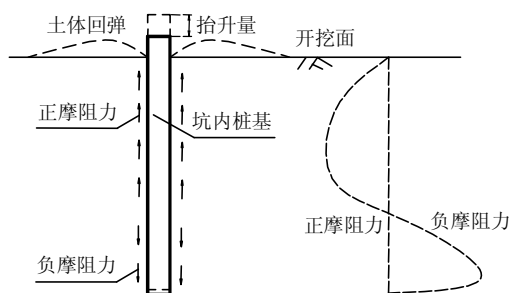


图1 受回弹影响的桩基受力情况

Fig.1 The influence of rebounding to the force of piles

桩的承载力,但会影响桩周侧摩阻力的发展趋势,从而影响桩的刚度。

目前基坑开挖对桩基性能的影响研究主要集中在开挖后土体侧移引起桩身弯矩研究上^[7, 8](图2),而基坑开挖对坑内桩基竖向受力特性的影响分析尚未见报道。本文从应力路径对桩土界面摩擦特性的影响机制研究着手,提出了一种可以考虑开挖卸荷对桩基性能影响的分析方法。最后通过对工程实测资料的反分析,验证了本文方法的实用性,在此基础上分析了基坑开挖对桩基受力特征、承载力以及刚度的影响,其结果对类似工程具有指导意义。

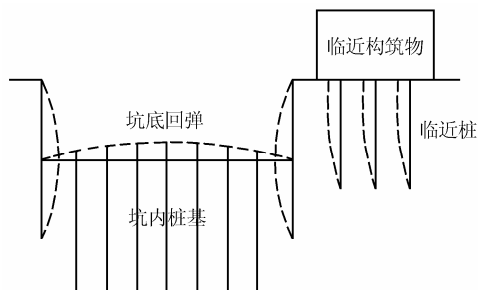


图2 基坑开挖对桩基的影响

Fig.2 The influence of excavation to piles

2 考虑卸荷影响的分析方法

根据 SSI 室内试验和现场试验研究揭示的桩土界面特性可知:极限摩擦力的大小与法向应力成正比;摩擦界面的剪切刚度随土的强度增加而增加。对于基坑工程中的桩土相互作用问题,需要考虑卸荷再加载过程中桩土之间接触面往返剪切的力学特性。根据 SSI 试验结果^[9, 10]:卸荷过程中卸荷刚度与初始刚度接近,土与结构接触面之间存在残余相对位移,往返剪切抗剪强度降低,即极限摩擦力不变(如图3所示)。可以看出,与土体刚度、强度的确定类似,桩土界面的摩擦特性与应力路径和应力水平也是息息相关的。应力路径与应力水平对土体变形模量的影响可统一表示为^[11, 12]:

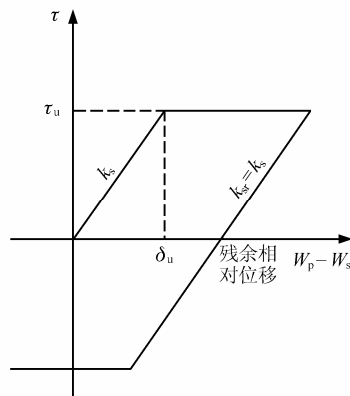


图3 考虑应力路径影响的弹塑性模型

Fig.3 Elastic-plastic model considering the influence of stress path

$$E_s = \lambda \sigma'_z \quad (1)$$

式中: λ 为应力路径系数,开挖过程中坑底土属于竖向卸荷问题; σ'_z 为竖向有效应力。考虑卸荷对应力的影响, $\sigma'_z = \gamma'_s(z - \Delta h)$, z 为土层深度; Δh 为开挖深度。这里不考虑残余应力的影响。

从式(1)可以看出,土体变形模量与竖向有效应力呈线性变化,这点可以从基坑开挖现场静力触探与标贯试验结果中得到体现^[13]。

相应的土体初始剪切模量与界面剪切刚度可表示为

$$k_s = G_s = \lambda \sigma'_z / 2(1 + \nu_s) \quad (2)$$

式中: ν_s 为土体泊松比。

应力路径与应力水平对土体强度指标的影响不大^[14, 15]。

$$\tau_u = c' + \sigma'_n \tan(\varphi') \quad (3)$$

式中: c' 为土体黏聚力; φ' 为土体内摩擦角; σ'_n 为法向应力。

应力路径试验土样取自杭州市地铁一号线试验段秋涛路车站基坑工程,土样为砂质粉土,取自地下9 m深处,土体含水率约为44%,属于可塑土。黏聚力 $c' = 5 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi' = 30^\circ$ 。试验仪器为 GDS 自动三轴试验系统,竖向固结应力分别为: 188, 529, 715, 893 kPa, 侧压力系数 $K_0 = 0.5$ 。限于篇幅问题,在此不对试验过程做详细介绍,只给出应力路径系数的试验结果。

(1) 竖向加载应力路径系数 $\lambda = 158$, 文[11]中杭州地区软土的应力路径试验结果为120~125, 文[12]中上海地区软土的应力路径试验结果为120左右。

(2) 竖向卸荷应力路径系数 $\lambda = 211$, 文[11]中杭州地区软土的应力路径试验结果为 225~250, 文[12]中上海地区软土的应力路径试验结果为 170 左右。

综合三种土质的应力路径试验结果, 取竖向加载应力路径系数 $\lambda = 130$, 竖向卸荷应力路径系数 $\lambda = 200$ 。土体泊松比取 $\nu_s = 0.3$, 可以得到界面剪切特性为

$$\begin{cases} k_s = G_s = 50\sigma'_z & (\text{不考虑卸荷}) \\ k_s = G_s = 77\sigma'_z & (\text{考虑卸荷}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau_u = c' + \sigma'_n \tan(\varphi') = 5 + 0.58\sigma'_n \quad (5)$$

3 开挖卸荷影响分析

分析算例基桩采用 $\phi 800$ mm 的钻孔灌注桩, 桩长 40 m, 基桩受力形式分受压桩与抗拔桩两种, 基坑深度分为 10, 20, 30 m 3 种情况。

土体有效重度取 $\gamma' = 8.0$ kN/m³, 模型采用摩尔-库仑模型。桩体材料采用线弹性模型, 弹性模量 $E_p = 30$ GPa、泊松比取 $\nu_p = 0.2$ 。计算模型采用轴对称模型, 水平影响范围按照 Randolph & Wroth^[3] 理论确定 $r_m = 2.5 \times 40 \times (1 - 0.3) = 70$ m, 下卧层厚度取 10 m。计算模型如图 4 所示。

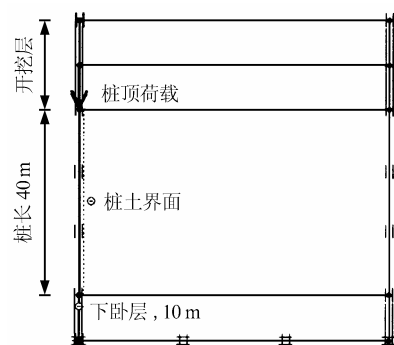


图4 计算模型
Fig.4 Analysis model

3.1 基坑深 10 m 的情况

基坑开挖深度 10 m 对基桩影响的计算结果如图 5、图 6 及表 1 所示。从图 5、表 1 可以看出:

(1) 4 种条件下的基桩刚度之间的关系为: 开挖后受拉约等于开挖后受压 < 覆土受拉趋于覆土受压。

(2) 极限承载力之间的关系为: 开挖后受拉 < 开挖后受压 < 覆土受拉 < 覆土受压。

图 6 反映的是桩身侧摩阻力的分布情况, 从图中可以对上述两条结论进行解释:

(1) 在达到极限侧摩阻力之前, 桩主要受到侧摩阻力的作用, 受压与受拉条件下桩土界面之间的剪切刚度相同、极限侧摩阻力差异不大 ($\tau_{\max \text{拉}} \approx 95\% \tau_{\max \text{压}}$), 因此, 两者的刚度比较接近; 进入极限侧摩阻力状态之后, 受压桩继续发挥桩端阻力, 其承载力将大于受拉桩。

(2) 比较考虑开挖影响与不考虑开挖影响的分析结果可以看出, 虽然卸荷应力路径系数要大于竖向压缩应力路径系数, 但开挖前的竖向应力水平要大于开挖后的竖向应力水平, 根据式 (2) 可知, 总的界面剪切刚度更大, 同时开挖前的极限侧摩阻力也要大于开挖之后的侧摩阻力, 因此, 基桩刚度与极限承载力均要大于开挖以后的值。

(3) 从图 6 中还可以看出, 虽然基坑开挖会对基桩施加一定的侧摩阻力, 但正负摩阻力的和为 0, 不影响桩的极限承载力。

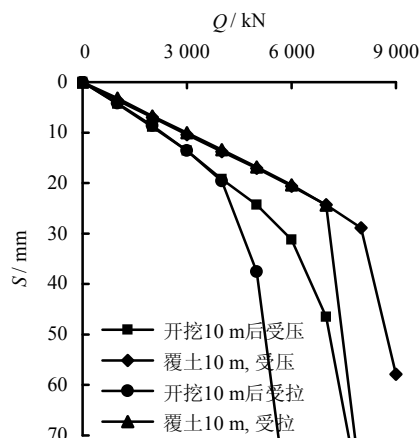


图5 基坑深 10 m 时的基桩 $Q-S$ 曲线
Fig.5 Pile $Q-S$ curve of foundation pit 10 m deep

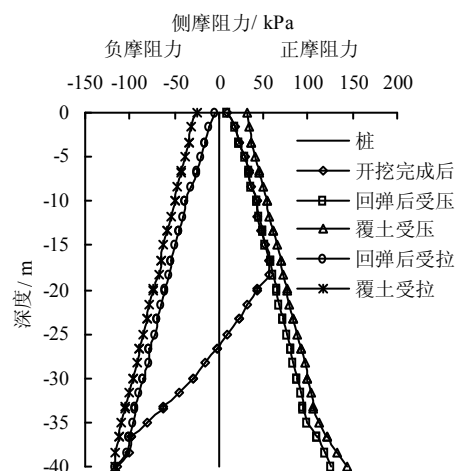


图6 不同受力条件下的极限侧摩阻力
Fig.6 Ultimate friction under different loadings

表 1 基坑开挖深度 10 m
Table 1 Foundation pit 10 m deep

受力形式	开挖后受压	覆土受压	开挖后受拉	覆土受拉
正常使用条件下 的刚度/ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	220	300	220	290
极限承载力 /kN	6 000	8 000	5 000	7 000

3.2 基坑深 20, 30 m 的情况

基坑开挖深度 20, 30 m 对基桩影响的计算结果如图 7~图 9 以及表 2 所示。

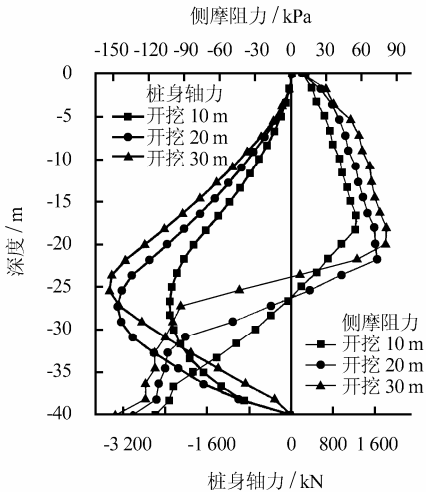


图 7 开挖深度对桩身轴力与桩侧预加侧摩阻力的影响
Fig.7 The influence of excavation depths to axis force and pre-friction of pile

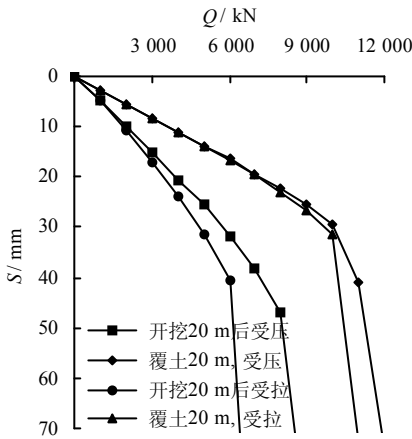


图 8 基坑深 20 m 时的基桩 Q-S 曲线
Fig.8 Pile Q-S curves of foundation pit 20 m deep

表 2 基坑开挖深度对基桩的影响
Table 2 The influence of excavation depth to piles

开挖深度 / m	抗压刚度/ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$		抗拔刚度/ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$		抗压极限承载力	抗拔极限承载力	桩身拉力最大值
	开挖前	开挖后	开挖前	开挖后	/kN	/kN	/kN
10	300	220	290	220	6 000	5 000	2 300
20	370	200	360	180	8 000	6 000	3 270
30	425	190	395	160	10 000	7 000	3 500

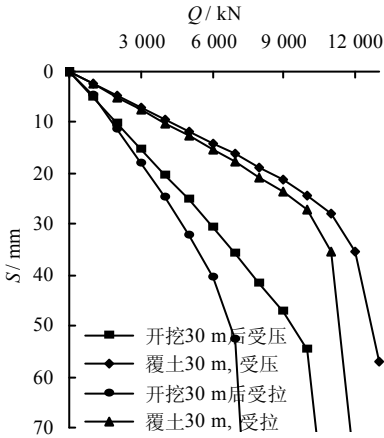


图 9 基坑深 30 m 时的基桩 Q-S 曲线
Fig.9 Pile Q-S curve of foundation pit 30 m deep

比较三种情况的计算结果可知：

- (1) 对于不考虑开挖影响的情况，随着桩的埋深增大，极限侧摩阻力增大，基桩承载力增大。
- (2) 随着基坑深度的增加，基桩刚度逐渐减小，同时与覆土条件下的差异也越来越大。

根据上海地区桩长为 30~40 m、桩径为 600~800 mm 的基桩实测资料统计结果，其抗压刚度在 300~500 kN/mm 之间^[16]，与本文不考虑开挖影响的计算结果比较接近。

从图 7、表 2 中还可以看出：

- (1) 随着开挖深度的加大，受开挖回弹影响进入塑性状态的桩土界面范围逐渐增大，这部分界面在后期加载过程中侧摩阻力不再增长，剪切刚度为 0，导致基桩刚度减小。
- (2) 对于抗压桩，已经进入正摩擦力极限值的桩土界面（上部分）不发挥作用；对于抗拔桩，已经进入负摩擦力极限值的桩土界面（下部分）不发挥作用。
- (3) 与路堤桩的负摩擦问题相反的是，开挖回弹会导致桩身上部承受正摩擦阻力，下部承受负摩擦阻力，桩身轴力为拉力。随着开挖深度的增加，桩身拉力也逐渐增大，如果桩身拉力超过原设计抗拉承载力则会导致桩身断裂。

4 工程实例验证

上海海洋大厦基坑开挖深度为 12.5~14.0 m, 地下室面积约为 3 000 m², 采用逆作法施工, 立柱桩采用 $\phi 800$ mm 的钻孔灌注桩。土体有效重度取 $\gamma' = 8.0$ kN/m³, 其余资料详见文[17]。由于文[17]中未给出桩的具体长度, 参考上海地区类似工程, 桩长在 40~70 m 之间, 下面分 40 m 与 70 m 两种桩长进行分析, 桩端以下土层取 10 m 厚。

表 3 不同开挖深度的计算结果
Table 3 Analysis results of deferent excavation depths

开挖深度 / m	抗压刚度/ kN · mm ⁻¹		桩顶回弹量/ mm	
	40 m	70 m	40 m	70 m
开挖前	230	231		
3.8	217	217	7.08	7.67
7.3	205	205	15.10	16.28
10.3	188	198	22.09	23.06
13.6	177	185	27.50	27.32

每次开挖完成后立柱桩的抗压刚度与桩顶回弹量计算结果如表 3 所示。表中给出的桩顶回弹量不考虑立柱的下压作用, 从表可以看出:

(1) 随着开挖深度的加深, 立柱桩的抗压刚度逐步减小。

(2) 两种桩长的抗压刚度非常接近, 这符合文[18]的有效桩长理论。文[18]认为, 当桩土刚度比为 500、有效桩长为 40 m, 本文考虑了固结应力与应力路径的影响, 土体的模量平均值为 50 MPa, 桩土刚度比为 600, 有效桩长接近 40 m。

根据上述计算得到的桩顶回弹量、抗压桩刚度以及实测的立柱桩桩顶轴力, 就可以计算每次开挖完成后立柱的隆起量, 如表 4 所示。

表 4 立柱的隆起量
Table 4 Upheavals of standing poles

开挖深度 / m	立柱桩轴力 / kN	实测值 / mm	计算值/ mm	
			桩长 40 m	桩长 70 m
3.8	95	5	6.62	7.21
7.3	160	10	14.32	15.50
10.3	800	18	17.84	19.02
13.6	1 200	23	20.73	20.99

从表可以看出, 按本文方法得到立柱隆起量与实测值较为接近, 开挖至最后一步的桩顶回弹量略小于实测值, 这是由于基坑开挖坑内土体的水平变

形也会导致一定的回弹量。原设计不考虑回弹的影响, 其计算得到的立柱位移为下压值 -6 mm, 按实测的立柱桩轴力反分析, 原设计的立柱桩抗压刚度为 1 200 kN/6 mm = 200 kN/mm (小于开挖前的计算结果; 大于开挖至坑底的计算结果)。

5 结 论

(1) 根据应力路径与应力水平对土体刚度的影响, 建立了受深基坑开挖影响的桩土界面荷载传递模型, 该模型可以考虑桩土界面剪切刚度 k_s 和极限摩擦力 τ_u 与土层埋深 z 、卸荷量 $\gamma'_s \Delta h$ 以及应力路径之间的关系, 在应力路径试验的基础上确定了界面摩擦特性参数。

(2) 通过算例分析, 揭示了基坑开挖对基桩受力特性影响的机制, 分析结果表明, 不同受力条件下基桩刚度与承载力之间的关系为: 开挖后受拉 < 开挖后受压 < 覆土受拉 < 覆土受压。

(3) 基坑开挖以后的基桩承载力随着基坑深度的增加而增大, 基桩刚度则减小, 同时与覆土条件下的差异也越来越大。

(4) 随着基坑开挖深度的增加, 桩身拉力也逐渐增大, 如果桩身拉力超过原设计抗拉承载力则有可能导致桩身断裂。

从上述结论中可以看出, 采用覆土条件下的基桩承载力与刚度值是偏于不安全的。根据覆土条件下的静载试验结果来确定基桩承载力, 不仅要扣除开挖土层的侧摩阻力, 同时也要考虑基坑开挖卸荷对桩侧摩阻力的影响。

参 考 文 献

- [1] 许峰. 桩承式路堤的工作机制研究[硕士学位论文D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
 - [2] 贾宁. 软土地基高速公路拓宽的沉降性状及处理研究[博士学位论文D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
 - [3] 周万欢. 堆载固结过程中单桩负摩擦力性状研究[硕士学位论文D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
 - [4] 周健, 徐建平, 许朝阳. 群桩挤土效应的数值模拟[J]. 同济大学学报, 2000, 28(6): 721—725.
- ZHOU Jian, XU Jian-ping, XU Zhao-yang. Numerical analysis of heave and lateral movement due to pile driving[J]. *Journal of Tongji University*, 2000, 28(6):

- 721—725.
- [5] 朱火根, 孙加平. 上海地区深基坑开挖坑底土体回弹对工程桩的影响[J]. 岩土工程界, 2005, 8(3): 43—46.
- [6] 徐情根, 徐醒华, 梁朝晖, 等. 深基坑开挖对坑底桩基的影响[J]. 广东土木与建筑, 2006, 1: 33—34.
- XU Qing-Geng, SUN Jia-Ping, LIANG Zhao-Hui. Study on pile foundation due to unloading of deep foundation pit excavation[J]. **Guandong Architecture and Civil Engineering**, 2006, 1: 33—34.
- [7] 常银生, 王旭东, 宰金珉, 等. 开挖对周边建筑物基础影响的有限元分析[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2006, 19(1): 9—13.
- CHANG Yin-sheng, WANG Xu-dong, ZAI Jing-ming. Study on the effect of pit excavation upon adjacent building foundation[J]. **Journal of University of Science and Technology of Suzhou(Engineering and Technology)**, 2006, 19(1): 9—13.
- [8] 扬敏, 周洪波, 杨桦. 基坑开挖与临近桩基相互作用分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(4): 91—96.
- YANG Ming, ZHOU Hong-bo, YANG Hua. Numerical analysis of pile response due to unsupported excavation induced lateral soil movement[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(4): 91—96.
- [9] ALONSO E E, JOSA A, LEDESMA A. Negative skin friction on piles: A simplified analysis and prediction procedure[J]. **Geotechnique**, 1984, 34(3): 341—357.
- [10] 张嘎. 粗粒土与结构接触面静动力特性及弹塑性损伤理论研究[博士学位论文D]. 北京: 清华大学, 2002.
- [11] 袁静, 刘兴旺, 益德清. 基坑开挖过程中m参数的选取分析[J]. 工业建筑, 2000, 30(9): 46—51.
- YUAN Jing, LIU Xing-wang, YI De-qing. Determination of m coefficient during excavation[J]. **Journal of Industry Construction**, 2000, 30(9): 46—51.
- [12] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 18—23.
- LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading modulus of the Shanghai soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(6): 18—23.
- [13] 刘国彬, 刘金元, 徐全庆. 基坑开挖引起的土体力学特性变化的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 112—116.
- LIU Guo-bing, LIU Jing-yuan, XU Quan-qing. Testing study of variation of mechanical characteristics of soil due to excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(1): 112—116.
- [14] 吴宏伟, 施群. 深基坑开挖中的应力路径[J]. 土木工程学报, 1999, 32(6): 53—58.
- WU Hong-wei, SHI Qun. Changes of stress path caused by stress relief during excavations[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1999, 32(6): 53—58.
- [15] 张文慧, 王保田, 张福海. 应力路径对基坑工程变形的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 964—966.
- ZHANG Wen-hui, WANG Bao-tian, ZHANG Fu-hai. Influence of stress paths and consolidation stress ratios on soil's deformation characteristics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 32(6): 53—58.
- [16] 徐至均, 赵锡宏. 逆作法设计与施工[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002, 230—231.
- [17] 俞国风, 丁洁民. 海洋大厦逆作法深基坑支护技术[J]. 结构工程师, 2001, (2): 20—25.
- YU Guo-fen, DIN Jie-ming. Supporting technique for deep foundation pit of Haiyang mansion using inverse operation method[J]. **Structural Engineers**, 2001(2): 20—25.
- [18] 章友金, 章为民, 王年香, 等. 按桩的割线刚度确定深厚覆盖土层中普通桩的有效桩长[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 723—728.
- ZENG You-jin, ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, et al. Determination of effective length of a common pile in deep overlay soil layers with secant rigidity of pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 723—728.