

# 砂土地区深基坑稳定性评价及力学效应分析

陈阳, 赵文, 贾鹏蛟, 韩健勇

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

**摘 要:** 结合某地铁站基坑开挖工程, 基于基坑支护结构的现场实测数据, 对排桩内支撑基坑支护体系桩顶水平位移, 桩体侧向位移及基坑周边土体沉降量进行分析, 得出基坑围护结构各项位移和周边土体沉降随时间及开挖深度的变化规律. 建立研究区二维有限元模型, 并将实测数据与模拟值进行对比, 研究支护结构内力变化及桩后土体应力状态. 研究结果表明: 基坑长边桩顶水平位移约为短边桩顶水平位移的3倍, 桩体最大侧向变形量位于  $1/2H$  ( $H$  为基坑开挖深度) 处; 基坑开挖及降水引起地面沉降范围约  $3H$ , 基坑周边各监测断面最大沉降量出现在距基坑边 22 m 处 (约  $0.82H \sim 0.96H$ ), 内支撑架设有利于增大基坑整体稳定性.

**关键词:** 砂土; 深基坑; 稳定性; 评价; 力学效应

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)09-1353-05

## Stability Assessment and Mechanical Effects Analysis on Deep Foundation Pit in Sandy Soil

CHEN Yang, ZHAO Wen, JIA Peng-jiao, HAN Jian-yong

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHAO Wen, E-mail: wenneu@163.com)

**Abstract:** The horizontal and lateral displacements of pile-cap and the ground settlement of the surrounding soils of a foundation pit of a subway station in sandy soil were investigated based on the in-situ monitoring data. The changing rules of the displacement of the inner supporting system and the deformation of the surrounding soils with excavation time and excavation depth were obtained. A two-dimensional finite element model was built to analyze the internal forces of the supporting structures as well as the stress redistribution in soils behind those piles. Numerical results agree well with the in-situ monitoring data. Results indicate that the horizontal displacement of the pile-cap in the long side direction of the foundation pit is three times than that in the short side direction; the maximum lateral displacement of the piles occurs at  $1/2H$  ( $H$  is the depth of the foundation pit). The range of the ground settlement induced by excavation and drainage is  $3H$ . The largest deformation in the surrounding soil is located 22 m away from the excavation edge ( $0.82H \sim 0.96H$ ). It is found that the inner supporting system can effectively improve the stability of the foundation pit.

**Key words:** sandy soil; deep foundation pit; stability; evaluation; mechanical effects

随着城市建设的发展, 地铁站基坑开挖和支护方法得到了广泛的应用和推广. 由于地铁站大多位于城市中心位置, 严格控制车站基坑开挖变形及地下施工产生的地表沉降量对保证基坑周边施工环境安全至关重要<sup>[1]</sup>. 基坑开挖过程中土体应力释放导致基坑坑底产生隆起, 基坑壁发

生向内倾斜, 引起周围地层损失产生地表沉降<sup>[2-3]</sup>. Finno 等<sup>[4]</sup>, 李佳宇等<sup>[5]</sup>分别研究了黏土和砂土地层中基坑开挖支护三维特性, 并指出坑角效应对建筑物的沉降形态有显著的影响. Clough 等<sup>[6]</sup>对深基坑开挖进行有限元模拟, 分析基坑变形与地表位移的关系, 提出预测地表位移

变化的方法. 众多深基坑支护方法中,排桩加内支撑支护体系由于具有可靠性高、便于与逆作法相结合等优点而得到越来越广泛的应用,目前排桩及内支撑协同工作时基坑稳定性评价及力学效应尚未完全清楚.

本文以沈阳某地铁车站明挖基坑排桩加钢支撑支护体系为背景,通过分析该深基坑开挖施工过程中的监测数据进行基坑稳定性评价,建立该基坑数值模型,综合进行砂土地区深基坑稳定性评价及力学效应分析.

# 1 工程概况

沈阳某地铁车站位于二环路南侧、浑河森林公园内,车站呈南北向设置,为三层三跨矩形钢筋混凝土框架结构岛式站台车站. 车站最大宽度 25.3 m,主体结构总长 148.4 m,采用明挖法施工,开挖深度 23.3 m,局部深度 26.6 m,工期 18 个月.

根据场地水文地质、工程地质条件,充分考虑周围环境因素,支护结构采用钻孔灌注桩(桩长 33 m,桩径  $\phi=1\,000\text{ mm}$ ,中心距 1 400 mm),沿基坑深度加设四层内支撑(第一、二层支撑  $\phi=609\text{ mm}$ ,壁厚 12, 16 mm;第三、四层支撑  $\phi=800\text{ mm}$ ,壁厚 16, 12 mm;第五层为倒撑,  $\phi=609\text{ mm}$ ,壁厚 12 mm),分别位于冠梁顶下 7, 13.5, 18, 22.35 m 外. 由于场地内含水层渗透性较大(82 m/d),设计基坑外管井降水,沿基坑轮廓线每隔 10 m 设一降水井,共设 39 眼(井径  $\phi=429\text{ mm}$ ),基坑支护剖面及地层分布见图 1.

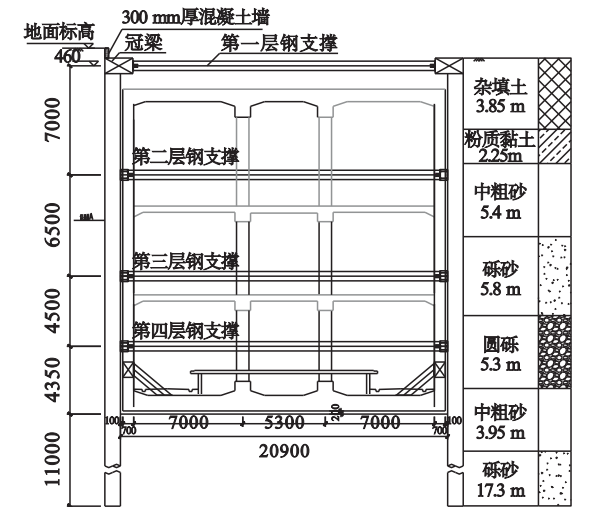


图 1 基坑支护剖面图(mm)

Fig. 1 Profile of the supporting system

根据勘察资料可得场地土体物理力学参数见

表 1.

表 1 土体物理力学参数  
Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

土层名称	土层厚度 m	天然重度 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	黏聚力 kPa	内摩擦角 ( $^{\circ}$ )
杂填土	3.85	18.5	10	5.0
粉质黏土	2.25	18.5	12	6.5
中粗砂	5.4	17.5	3	29.6
砾砂	5.8	20.3	2	33.0
圆砾	5.3	20.5	2	34.0
中粗砂	3.95	19.5	3	30.0
砾砂	8.05	20.1	2	33.0

## 1.1 基坑监测内容及目的

为确保基坑开挖及主体结构施工期间基坑变形及周边地质环境处在可控范围内,出现异常情况时能及时加以处理,确保基坑及周边建筑物的安全性,根据该基坑开挖规模、支护结构特点、周边环境及相应基坑支护规范,主要设置以下监测内容:①桩顶水平位移;②桩体侧向位移;③周围地表沉降;④地下水位;⑤支撑轴力. 基坑平面监测点布置情况见图 2.

本文选取围护桩顶水平位移(WY),围护桩桩体侧向位移(CX)及周围地表沉降(A~E及周围沉降长期观测点)数据分析基坑支护结构及土体的变形规律.

## 1.2 围护桩桩顶水平位移

选取基坑监测点 WY3, WY4, WY8, WY10, WY14, WY15 为例,分析该基坑围护桩顶水平位移规律. 为保证监测数据的一致性,基坑北侧测点 WY3, WY4, WY8 桩体水平位移正值表示向基坑外倾斜,负值表示向基坑内倾斜,基坑南侧测点 WY10, WY14, WY15 反之.

图 3 为基坑开挖过程中桩顶水平位移监测图,由图看出,基坑开挖引起桩顶水平位移整体向坑内倾斜,桩顶水平位移曲线随基坑开挖时间有较大的波动,但整体呈增大趋势,原因是基坑周围材料堆放和卸荷以及施工车辆经过扰动使得桩顶水平位移有小范围的波动;随着基坑深度的增大,桩顶土体卸荷,坑外主动土压力使得围护桩桩顶有向坑内较明显的位移. 基坑北部测点 WY3, WY4, WY14, WY15 位于基坑坑壁较长边,易发生较大水平位移,向坑内最大水平位移达 11.60 mm;由于测点 WY8, WY10 位于基坑坑角,受横撑及斜撑共同作用桩顶水平位移整体较 WY3, WY4 小,向坑外最大水平位移为 4.95 mm.

该基坑围护桩桩顶水平位移均小于一级基坑桩顶 水平位移控制值 30 mm.

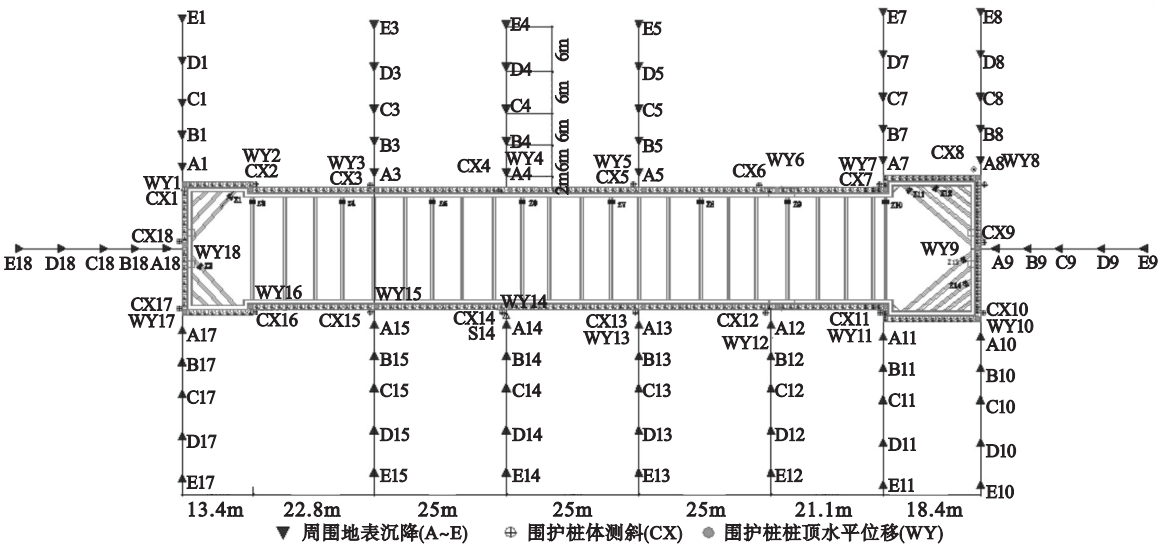


图 2 基坑监测点平面布置图  
Fig. 2 Layout of the monitoring points around the foundation pit

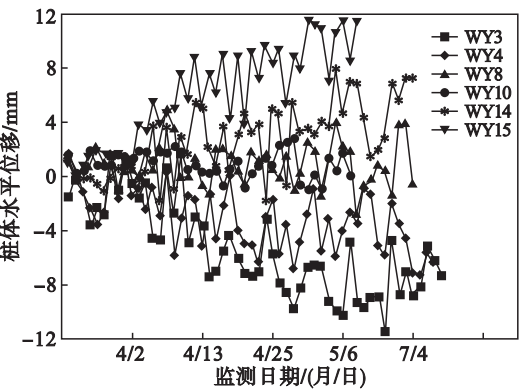


图 3 围护桩桩顶水平位移

Fig. 3 Horizontal displacements of the pile-cap

1.3 地表沉降的空间效应

基坑开挖荷载释放导致坑底隆起,坑周墙体发生侧向位移,周边土体向开挖空间移动,侧向土体补偿从而使基坑周边土体产生地层损失造成地面沉降.地面的沉降与支撑模式、支护材料及周边土质等因素有关,可采用土体损失理论来计算周边建筑物的沉降.该基坑侧向位移呈拟抛物线变形,根据经验数据得出基坑最大沉降量与最大侧向位移呈线性关系,如式(1)所示:

$$\delta_{vmax} = 1.18\delta_{hmax} \tag{1}$$

基坑外侧某一点沉降量与基坑最大沉降量关系如下:

$$\delta_v = \delta_{vmax} \exp[-0.25(x - 0.93)^2] \tag{2}$$

式中: $\delta_v$ 是基坑外侧某一点沉降量; $\delta_{vmax}$ 是基坑最大沉降量; $\delta_{hmax}$ 是最大侧向位移; $x$ 是观测点距基坑垂直距离.

沉降量与土层物理力学特性、水文地质特征和降水过程密切相关.对于单位厚度地层来说,假定不考虑土体侧向变形,土体垂直压缩量等于有效应力增量与土的体积压缩系数的乘积<sup>[7]</sup>.因此,地面沉降量  $S$  为

$$S = \sum_{i=1}^n s_i = s_1 + s_2 + \cdots + s_n \tag{3}$$

式中, $s_i$ 是不同地层单层沉降量,基坑开挖过程中,绕基坑四周按一定距离设置 A1 ~ A18, ..., E1 ~ E18,以监测基坑周边地表沉降量.图 4a 为插值法得到的基坑开挖结束总沉降量平面分布图.由图可知基坑开挖结束后,沉降量由西南至东北向呈递增趋势,基坑周边最大沉降量为 14 mm,位于距基坑长边垂直距离约 25 m 处.由基坑开挖最终状态沉降量等值线图可以看出:以基坑东北向长边为例,两侧坑角沉降量约 5 mm,沿基坑长边地面沉降量达 8 mm,可见基坑附近地面沉降量呈现明显的坑角效应,距基坑坑角越近,地面沉降量越小.

图 4b 为地表沉降监测结果换算所得沉降量速率图,本文选取文献[5]计算所得辽宁盘锦地表沉降曲线,Finno 等<sup>[4]</sup>与《基坑工程技术规范》给出的沉降槽形态<sup>[8-9]</sup>作对比.本文研究区与文献[5]研究区相同,地层及地下水位埋深情况较为相似,计算所得曲线沉降规律较为吻合.沉降主要影响范围位于 1.74  $H$  内,略小于其他经验结果 (2  $H$ ).

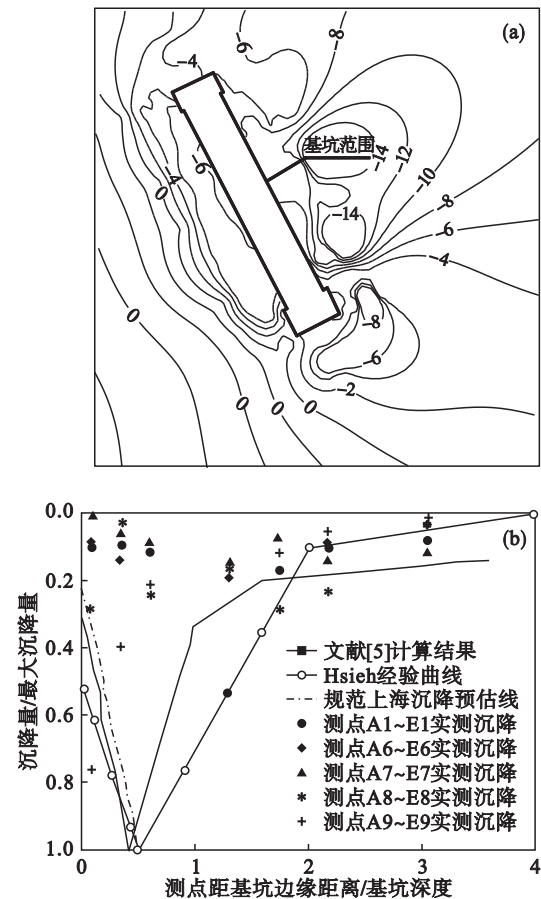


图 4 基坑开挖地表沉降的空间效应  
Fig. 4 Spatial effect of ground settlement during excavation  
(a)—基坑开挖结束总沉降量平面图(单位:m);  
(b)—不同测点地表沉降.

2 计算模型

2.1 模型建立及网格划分<sup>[10-13]</sup>

为减小尺寸效应对模拟结果的影响,模型沿基坑宽度方向取 10 倍基坑宽度 250 m,土体深度取 5 倍基坑开挖深度 125 m,除地表为自由面外,土体其他方向均取法向约束,初始地应力仅考虑自重应力.

网格采用德劳内三角形加四边形网格(见图 5),为提高计算效率,采取过渡加密中间密两边

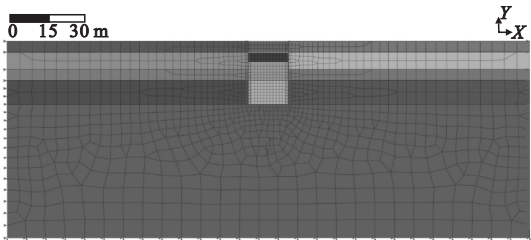


图 5 有限元网格划分  
Fig. 5 Mesh of finite element model

粗的方式进行网格划分;模型共有 1 576 个单元,1 481 个节点.基坑开挖深度取均值 25 m,分 7,7,4,7 m 四步开挖,基坑开挖 1 m 深度后激活钢支撑,钢支撑采用桁架单元模拟.

2.2 模型验证

由图 6 可知随着基坑开挖天数的增加,总沉降量增大,最大沉降量为 13.67 mm,与实测最大沉降量 12.14 mm 较为接近;沉降槽出现的位置约在  $0.76 H$ ,与实测沉降槽  $0.8 H$  较为相似,取基坑长边测线 3 不同开挖时期沉降监测数据与模拟数据对比,沉降数据较为吻合,可见模拟较为准确.

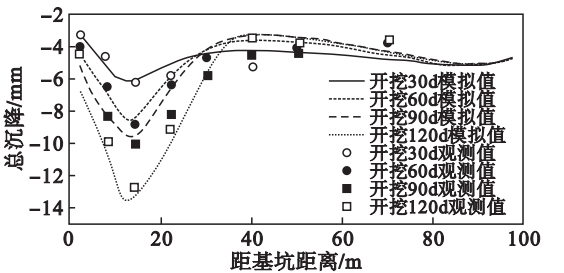


图 6 土体沉降量随开挖时间及坑边距变化曲线  
Fig. 6 Ground settlements at different excavation time vs. distance away from excavation edge

2.3 有限元结果分析

2.3.1 支护结构内力分析

图 7 为支护结构内力图, $Y$  坐标方向代表基坑埋深,桩身沿基坑埋深方向布设,基坑开挖结束后桩体最大剪力和弯矩分别为 1 750 kN 和 1 040 kN·m,最大剪力出现在基坑底部第四道撑附近,弯矩随着内支撑的设置逐渐变化,最大弯矩出现在坑底,由于内支撑的轴向力使得桩体内力出现连续梁变化模式,大大增强了桩体的受力能力.

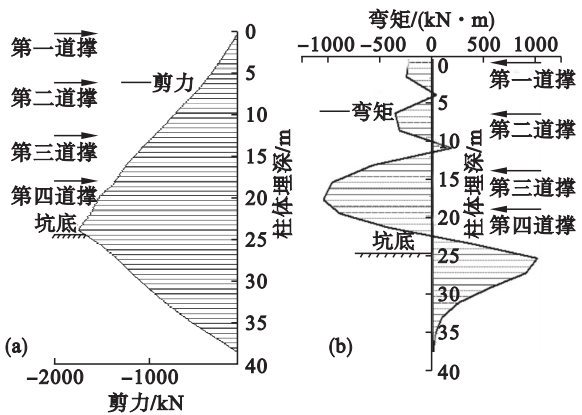


图 7 桩体剪力及弯矩分布规律  
Fig. 7 Shear stress and bending moment of piles  
(a)—桩体剪力;(b)—桩体弯矩.



2.3.2 坑外土体土压力计算

整体看来,基坑开挖时,坑外土体土压力 $p_e$ 处于主动土压力 $p_a$ 和静止土压力 $p_0$ 包络线内,基坑处于安全状态(图8). 基坑开挖前期和中期,由于桩体和内支撑的约束作用抵抗了基坑外土体向坑内变形,附近土体均未达到塑性,坑周土体土压力远小于朗肯土压力理论计算值;坑底开挖面附近,土压力系数接近朗肯主动土压力系数,该范围内主动区土体大部分进入塑性状态,适合应用朗肯土压力理论.

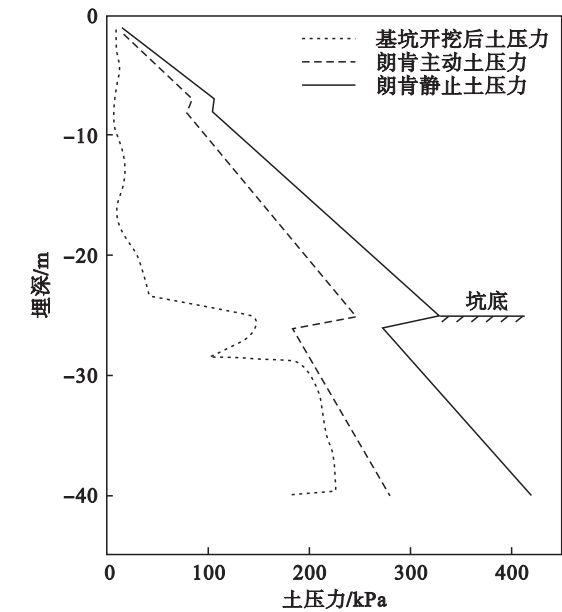


图8 坑外土压力分布规律

Fig. 8 Distribution of external soil pressure

3 结 论

- 1) 由监测数据可知,基坑开挖过程中,围护桩桩顶水平最大位移位于 $0.75 H$ 处(由南至北);坑角受双向约束的作用,水平位移最小;基坑长宽比 $>5$ ,长边较短边桩顶水平位移大,基坑边中心点桩顶水平位移较大.
- 2) 开挖中期桩体侧向位移变化率最大,最大桩体侧向变形量位于约 $1/2 \sim 4/5 H$ 处.随着开挖深度和开挖时间的增加,基坑周边土体产生变形,具有明显的时空效应.
- 3) 该基坑周边最大沉降量约 $14.00\text{ mm}$ ,距基坑垂直距离 $0.82 \sim 0.96 H$ 处,基坑开挖引起的沉降槽范围约为 $2.30 H$ .
- 4) 内支撑有助于增大基坑侧向被动土压力,随着内支撑从上往下架设,主动土压力逐渐减小.

参考文献:

[1] Boscardin M D, Cording E J. Buliding resopnse to excavation-induced settlement [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(1): 1-21.

[2] Bjerrum L, Eide O. Stability of strutted excavations in clay [J]. *Geotechnique*, 1956, 6(1): 32-47.

[3] Han J, Gabr M A. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(1): 44-53.

[4] Finno R J, Blackburn J T, Roboski J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(1): 30-36.

[5] 李佳宇,陈晨. 坑角效应对基坑周围建筑物沉降变形影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2238-2246. (Li Jia-yu, Chen Chen. Response of settlement and displacement of adjacent buildings of excavations to corner effect [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(12): 2238-2246. )

[6] Clough G W, Smith E M, Sweeney B P. Movement control of excavation support systems by iterative design [C]// *Foundation Engineering: Current Principles and Practices*. Virginia: ASCE, 1989: 869-884.

[7] 周志芳,朱宏高,陈静,等. 深基坑降水与沉降的非线性耦合计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1984-1988. (Zhou Zhi-fang, Zhu Hong-gao, Chen Jing, et al. Nonlinear coupling calculation between dewatering and settlement of deep foundation pits [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(12): 1984-1988. )

[8] 王超,朱勇,张强勇,等. 深基坑桩锚支护体系的监测分析与稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33( sup1 ): 2918-2923. (Wang Chao, Zhu Yong, Zhang Qiang-yong, et al. Monitoring analysis and stability evaluation of plie-bolt support system in deep pit [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33( sup1 ): 2918-2923. )

[9] Ou C Y, Liao J T, Lin H D. Performance of diaphragm wall construction using top-down method [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(9): 798-808.

[10] 应宏伟,初振环. 深基坑带撑双排桩支护结构有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26( sup2 ): 4325-4331. (Ying Hong-wei, Chu Zhen-huan. Finite element analysis of deep excavation with braced retaining structure of double-row piles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26( sup2 ): 4325-4331. )

[11] Khoiri M, Ou C Y. Evaluation of deformation parameter for deep excavation in sand through case histories [J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 47: 57-67.

[12] Benson H B C, Yang K H. Three-dimensional effects of a deep excavation on wall deflections in loose to medium dense sands [J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 80: 138-151.

[13] Suched L, Chanaton S. Finite element analysis of a deep excavation: a case study from the Bangkok MRT [J]. *Soils and Foundations*, 2013, 53(5): 756-773.