

近接浅基础建筑物深基坑变形特性及关键参数

韩健勇¹, 赵文¹, 关永平², 贾鹏蛟¹

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 中国铁路设计集团有限公司市轨道交通设计研究院, 天津 300142)

摘 要: 基于现场实测数据和数值模拟对深基坑围护结构和既有建筑物的变形特性进行了研究. 采用有限元方法建立数值计算模型, 结合现场实测数据和已有文献对邻近既有建筑物深基坑开挖变形规律进行参数分析, 全面揭示了不同工况下围护结构变形与建筑物沉降的关系. 结果表明: 桩锚支护结构在锦州地区深基坑应用效果较好, 控制变形能力强; 矩形基坑的坑角效应显著, 坑角处平面应变比(PSR)值约为0.4~0.6; 建筑物基础埋深和基坑开挖深度对建筑物平均沉降(δ_{va})与围护结构最大侧移量(δ_{hm})的线性关系影响不大; 建筑物与围护结构距离 L 不同时, δ_{va} 与 δ_{hm} 数据离散性较大, 随着 L 的增加, δ_{va}/δ_{hm} 逐渐减小.

关 键 词: 桩锚支护; 变形特性; 建筑物沉降; 数值模拟; 深基坑

中图分类号: U 473 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)10-1463-06

Deformation Characteristics and Key Parameters of Deep Excavation Adjacent to Buildings with Shallow Foundations

HAN Jian-yong¹, ZHAO Wen¹, GUAN Yong-ping², JIA Peng-jiao¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Urban Rail Transit System Design and Research Institute, China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China. Corresponding author: ZHAO Wen, E-mail: zhaowen@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Based on the in situ observation and numerical simulation, the deformation characteristics of the retaining structure of a deep excavation and the existing building were investigated. According to the in situ observations and available literatures, parametric studies were conducted using FEM to investigate the deformational behaviors of the excavation adjacent to existing building. The relationships between the deformation of the retaining structures and the settlement of the adjacent building under various construction conditions were fully revealed. Results showed that the tieback anchored pile wall has a good deformation control capacity and can be applied effectively in Jinzhou area. The corner effect of the rectangular excavation is significant with a plain strain ration (PSR) of about 0.4~0.6. The linear relationship between the average building settlement (δ_{va}) and the maximum horizontal deformation of the retaining structure (δ_{hm}) is slightly influenced by the existing foundation depth and the excavation depth. The discreteness of δ_{va} and δ_{hm} appears when the distance between the building and the retaining structure (L) changes, however the δ_{va}/δ_{hm} decreases gradually with the increase of L .

Key words: tieback anchored pile wall; deformation characteristics; building settlement; numerical simulation; deep excavation

随着近年来城市地下空间的不断开发,越来越多的深基坑工程邻近既有敏感建构筑物,如既有建筑物、地下管线、地铁区间隧道等,对于基坑变形控制和周边环境提出更为严格的要

求^[1],有必要对近接既有建筑物的深基坑变形特性进行研究.

文献[2-4]对基坑及周边环境变形特性进行了深入研究,提出了不同的变形预测模型,并总

结了围护结构、地表沉降等与基坑开挖深度的关系. 以上研究均为天然地表的变形特性,考虑基坑后既有建筑物时,受到建筑物基础形式、基底荷载、基础埋置相对位置等的影响,基坑变形规律将更为复杂. Burland 等^[5]认为建筑物变形与基坑开挖引起的坑外土层位移直接相关,并基于所引发的建筑物变形程度,判定建筑物的破坏等级. 文献^[1,6]分别从数值模拟和实测数据分析角度,讨论了上海地区基坑施工对邻近建筑物变形影响的规律,得到了邻近建筑物变形与围护结构间的关系.《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB50911—2013)中描述了大量实测数据统计结果,将坑后地层划分为不同影响区,但本文认为对于桩锚结构基坑仍需进一步探讨.

鉴于此,本文结合锦州市某紧邻既有建筑物的深基坑工程,基于现场实测数据研究近接浅基础建筑物深基坑施工对围护结构和邻近建筑物变形的影响. 采用有限元数值方法分析了不同关键参数影响下的基坑和既有建筑物的变形关系,以期实际工程中控制围护结构变形及合理有效地保护周边环境提供理论依据.

1 工程背景

1.1 工程概况

某深基坑工程位于锦州市中央大街与广东街之间,场地紧邻城市主干道与既有建筑物. 基坑占地面积约为 4 010.9 m²,开挖深度约为 14~15 m,见图 1. 基坑周边布置桩体水平位移测点、桩顶水平位移测点和建筑物沉降测点,测点布置如图 1 所示.

场地地貌属于大凌河冲洪积平原,场地地形稍有起伏. 场地各层土主要物理力学参数见表 1. 场地内地下水类型主要为第四系孔隙水和基岩裂隙水,地下水稳定水位埋深为 6.2~6.5 m. 采取截水帷幕配合坑内管井井点降水方法进行人工降水.

1.2 支护方案设计

基坑支护结构采用混凝土排桩结合预应力锚索支护系统,坡面及桩间辅以喷射混凝土支护. 基坑支护结构剖面图见图 2. 基坑南侧围护桩采用直径 1 m 的钢筋混凝土灌注桩,桩间距 1.5 m,桩长 18.5 m. 基坑其余各边围护桩直径为 0.8 m,桩间距为 1.3 m,桩长为 18.5 m. 围护桩由 5 排预应力锚索锚固,锚索采用 3 根 7φ5 高强度低松弛钢

绞线构成筋体,锚孔直径为 0.15 m,与水平方向夹角为 15°.

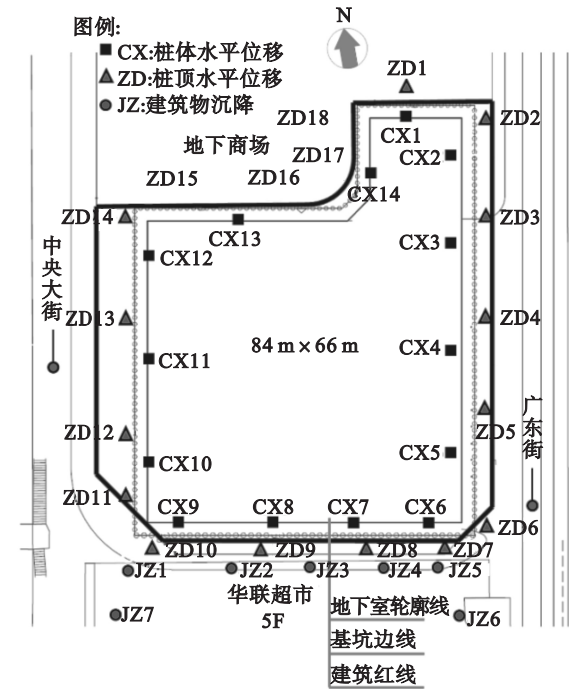


图 1 基坑平面图
Fig. 1 Plan view of excavation

表 1 各土层物理力学参数					
Table 1 Mechanical parameters of soil layers					
土层	容重 kN·m ⁻³	黏聚力 kPa	φ/(°)	E _s (E ₀) MPa	K m·d ⁻¹
杂填土	18.0	—	18	—	—
粉质黏土	19.3	30	12	5	0.05
圆砾	18.0	0	30	30	120
全风化砾岩	23.0	50	25	200	30
强风化砾岩	24.0	100	30	500	40

围护桩后采用直径 0.85 m 的旋喷桩咬合施工作为截水帷幕,旋喷桩间距为 0.65 m,咬合为 0.2 m. 每根桩上部含空钻 4 m,桩长 13 m.

2 主要监测结果及分析

2.1 围护桩体侧向位移

本文选取基坑靠近建筑物一侧的桩体深层水平位移测点 CX7,CX8 和 CX9 进行分析,测得的最大桩体侧移量分别为 10.0,12.6,6.0 mm. CX9 测点处围护结构距坑边较近(约 9 m),受到坑边土体约束产生坑角效应,围护结构水平变形量较基坑中部偏小.

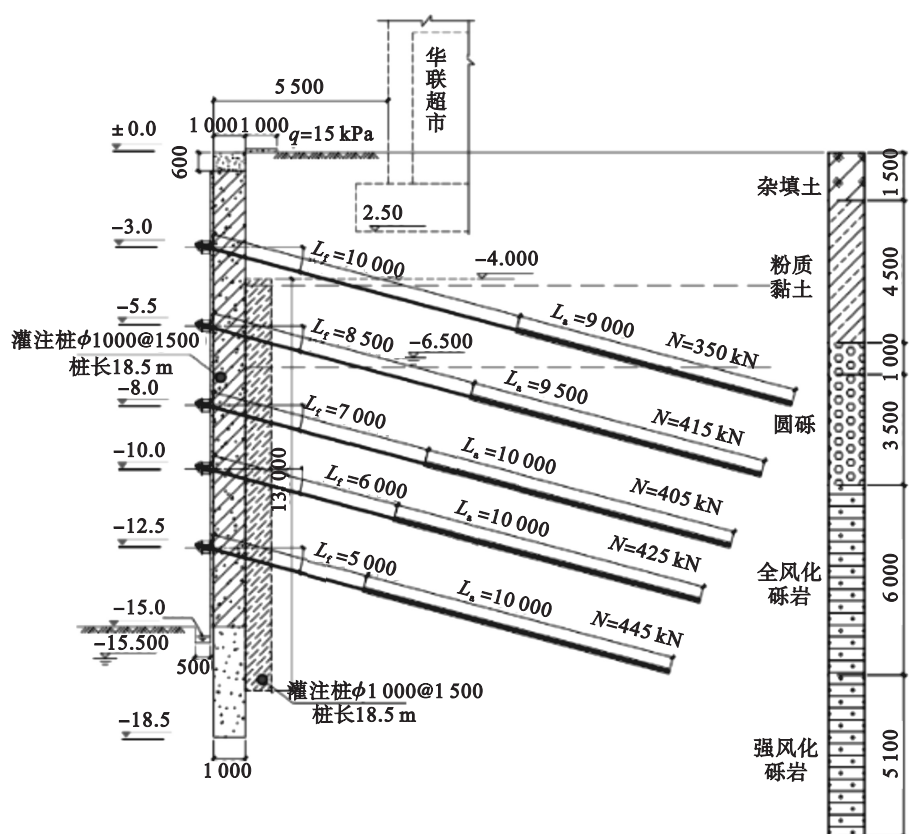


图 2 基坑支护结构剖面图 (mm)
Fig. 2 Profile of retaining structure of excavation

图 3 为围护桩最大侧移量(δ_{hm})和基坑开挖深度(H_e)的关系图。为讨论 δ_{hm} 与 H_e 之间的关系,将文献[7-8]收集的大量基坑实测数据进行统计,并根据围护桩(墙)的支撑形式划分为内支撑体系和拉锚体系。 δ_{hm} 大致为 $0.08\% H_e$, 支护结构控制变形能力强。文献[7-8]统计的基坑围护结构变形数据的变化范围较大,数据离散性显著, δ_{hm} 分别为 $(0.03\% \sim 0.5\%) H_e$ 和 $(0.13\% \sim 0.5\%) H_e$ 。其中文献[7]统计的基坑位于砂土(内

支撑体系)和硬黏土(拉锚体系);文献[8]统计的基坑大都位于台北,属于典型的黏土、砂土交替地层。基坑支护结构设计水平和施工工艺落后,造成围护结构变形较大。

文献[9]统计的变形数据变化范围有所减小, δ_{hm} 基本介于 $(0.06\% \sim 0.28\%) H_e$ 。文献[9]统计的基坑所在土层为上层硬黏土、砂土,下层风化岩石、软岩、硬岩等,与本工程地质条件相近。文献[10]采用桩锚支护结构较普遍,地层主要为中粗砂和圆砾。数据显示与本工程围护结构变形较一致, δ_{hm} 约 $0.1\% H_e$ 。

可以看出, δ_{hm} 随 H_e 的增加大致呈线性增长。并且,随着施工工艺的不断提升,基坑变形控制得到了明显改善。

2.2 围护桩顶水平位移

本工程共布置 18 个围护桩顶水平位移测点(见图 1),选取基坑南侧 3 个测点进行分析。将不同时间监测所得桩顶水平位移与距基坑坑角距离的关系进行统计,见图 4。基坑的坑角效应对角部区域围护结构的变形约束较为显著,主要集中在与坑角距离约 25 m 范围内。开挖不同阶段的桩顶水平位移基本位于图中阴影区域内,阴影区域边界满足指数函数形式。

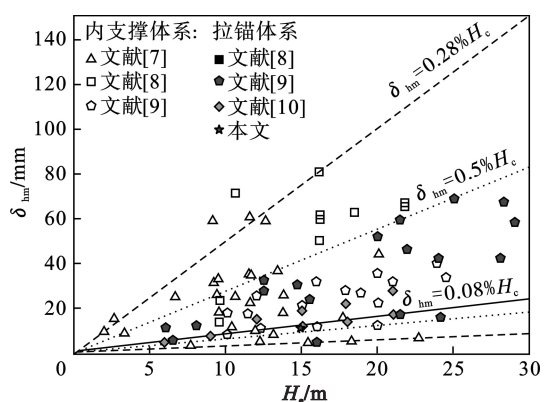


图 3 围护桩体最大水平位移与基坑深度的关系
Fig. 3 Relationship between maximum horizontal displacements of retaining piles and excavation depth

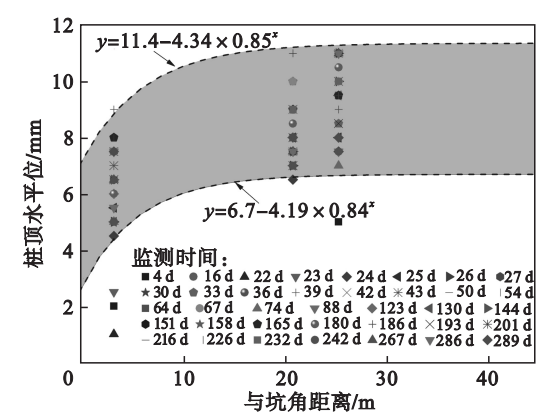


图 4 桩顶水平位移与坑角距离的关系
Fig. 4 Relationship between horizontal displacement of pile head and distance from excavation corner

为了探究基坑坑角效应,文献[8]提出了基坑平面应变比(plain strain ratio, PSR)的概念,即某一截面中围护结构侧移量与平面应变分析中的侧移量之比.选取文献[8]中尺寸与本工程相近的基坑(长×宽=80 m×60 m, $H_e=16$ m)进行对比(见图 5).由图可知,本工程坑角效应影响范围约 1.5 倍的 H_e ,比文献[8]研究的基坑要小.并且在基坑坑角位置,本工程中 PSR 值约为 0.4~0.6,而文献[8]所得 PSR 值则接近于 0.差异较大的原因主要在于围护结构的横向连接刚度.本文中排桩结合拉锚支护体系在横向连接方面较薄弱,文献[8]进行有限元分析时则采用地下连续墙结构,受邻边墙体和土体的约束作用更强.

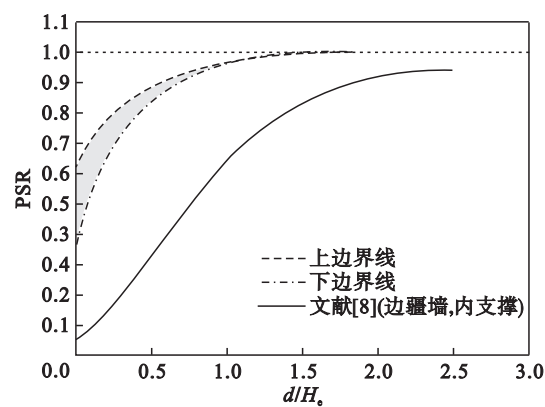


图 5 平面应变比与归一化距坑角距离的关系
Fig. 5 Relationship between PSR and normalized distance from excavation corner

3 数值模型

3.1 计算模型及参数

考虑基坑开挖对周围地层的扰动及降水引起的渗流作用,计算模型尺寸定为 110 m×30 m.考虑对称性,选取模型一半进行模拟.基本模型示意

图如图 6 所示.模型地表为自由面,底面施加双向位移约束,侧面施加法向位移约束.

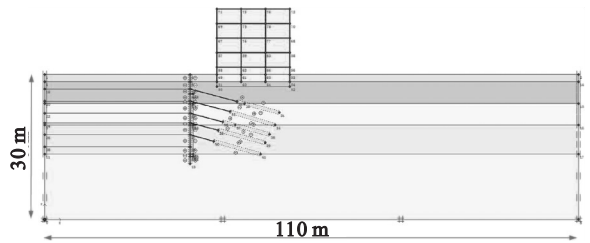


图 6 数值计算模型
Fig. 6 Numerical calculating model

模型中杂填土、粉质黏土和圆砾采用土体本构模型:Hardening – Soil 模型(HS 模型),本文圆砾取 $3 E_{\text{oad}}^{\text{ref}} = 3 E_{50}^{\text{ref}} = E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$,杂填土和粉质黏土取 $2 E_{\text{oad}}^{\text{ref}} = 2 E_{50}^{\text{ref}} = E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$. E_{50}^{ref} 则根据围护结构的位移反分析确定取值: $E_{50}^{\text{ref}} = 3 E_s (E_0)$.全风化砾岩和强风化砾岩采用 Mohr – Coulomb 模型,其参数见表 1.

围护桩采用线弹性板单元模拟.采用等效截面抗弯刚度法将围护桩等效为连续墙,等效截面厚度为 0.73 m.采用界面单元考虑围护结构与土体间的相互作用,界面强度折减因子 R_{inter} 设为 0.67.围护桩后设置咬合旋喷桩,采用实体单元模拟,根据旋喷桩的有效厚度简化为 0.6 m 厚的连续墙.

模型中建筑物每层活荷载按《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)取值,顶层活荷载取 0.5 kPa,其他层的活荷载取 2.25 kPa,考虑到传递到框架梁上墙体的重力,每层楼板所加荷载为 4.9 kPa(顶层除外).基坑围护结构和既有建筑结构材料弹性模量 E 和泊松比 ν 按照已有成果进行简化处理,见表 2.

表 2 围护结构与建筑结构物理力学参数
Table 2 Mechanical parameters of retaining structure and existing building

名称	E/MPa	ν
围护桩/建筑物楼板	30 000	0.2
旋喷桩	150	0.2
预应力锚索	210 000	0.3

模型施工过程共 13 个计算步,首先需进行初始地应力平衡,施作围护桩和截水帷幕后,基坑开挖、降水和锚索安装交替进行.

3.2 数值模型验证

为验证数值模型的准确性,根据实测数据对数值模型参数进行标定,如图 7 所示.可知,基坑开挖至底后,围护桩体水平位移计算值与 CX8 测

得数据吻合较好, δ_{hm} 分别为 12.9 和 12.6 mm, 且最大桩体侧移位置出现在深度 6 ~ 7 m. 经对比, 计算结果与实测数据基本一致, 模型的准确性可满足研究分析要求.

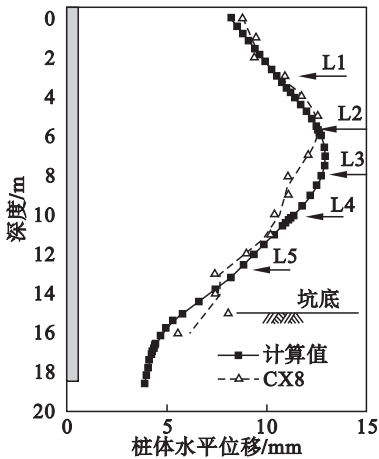


图 7 实测值与计算值对比曲线

Fig. 7 Curves of measured values and calculated values

4 数值模拟结果及分析

基于上述数值模型, 对建筑物变形与基坑围护结构变形间关系进行深入探究. 本文针对不同建筑物基础埋深 H_b 及建筑物与围护结构距离 L , 对 29 组工况下的 199 组建筑物平均沉降 δ_{va} 和围护结构最大侧移 δ_{hm} 数据进行整理.

4.1 建筑物基础埋深的影响

图 8 为 $L = 13.5$ m 时, 不同建筑物基础埋深工况下的建筑物平均沉降值 δ_{va} 与 δ_{hm} 的关系. 针对每个工况下 6 个不同开挖深度的计算变形结果进行整理发现, δ_{va} 约为 $0.84\delta_{hm} - 2$ mm. 建筑物基础埋深 H_b 和基坑开挖深度 H_e 对 δ_{va} 与 δ_{hm} 的线性关系影响较小. 本文监测结果及文献[6,11]统计的上海软土地区内支撑支护结构基坑结果显示, δ_{va}/δ_{hm} 的变化范围为 $0.84 \sim 0.4$, 小于数值计算结果, 上海地区具有显著的围护结构侧移变形.

4.2 建筑物与围护结构距离的影响

当考虑建筑物与围护结构距离 L 对 δ_{va} 与 δ_{hm} 的影响时, 数据显示离散性较大, 见图 9, δ_{va} 的范围为 $(0.84\delta_{hm} - 2 \text{ mm}) \sim (0.2\delta_{hm} - 0.5 \text{ mm})$. 随着 L 的增加, δ_{va}/δ_{hm} 逐渐减小. 当建筑物超出基坑主影响区域后, 即 $L > 37.5$ m 时, 建筑物沉降主要受降水固结影响, 受基坑开挖变形影响可忽略不计.

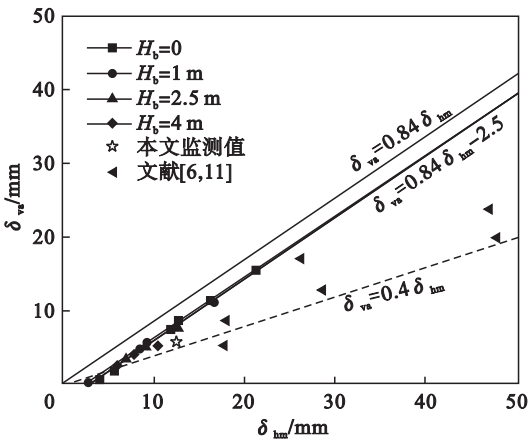


图 8 不同建筑物基础埋深下 δ_{va} 与 δ_{hm} 的关系
Fig. 8 Relationship between δ_{va} and δ_{hm} for different existing foundation depth

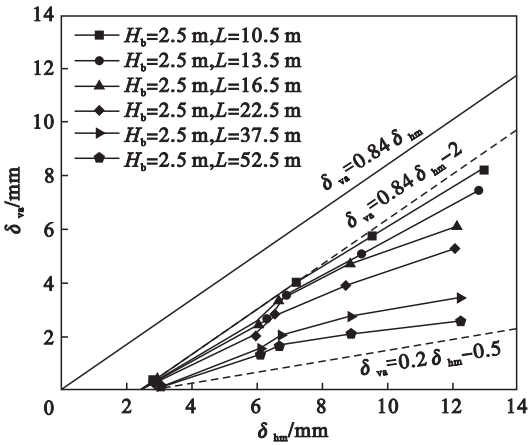


图 9 不同 L 下 δ_{va} 与 δ_{hm} 的关系
Fig. 9 Relationship between δ_{va} and δ_{hm} under different distances

5 结 论

- 1) 本工程桩锚支护结构矩形基坑最大侧移量 δ_{hm} 为 $0.08\% H_e$, 排桩结合预应力锚索支护系统有效控制了基坑自身变形及对既有建筑物的影响.
- 2) 桩锚支护结构矩形基坑的坑角效应显著, 桩顶水平位移随坑角距离的增大满足指数函数形式, 坑角效应影响范围约 1.5 倍 H_e , 坑角处桩顶水平位移 PSR 值约为 $0.4 \sim 0.6$.
- 3) 当建筑物与围护结构距离 L 较小时, 建筑物基础埋深 H_b 和基坑开挖深度 H_e 对 δ_{va} 与 δ_{hm} 的线性关系影响较小.
- 4) 建筑物与围护结构距离 L 不同时, δ_{va} 与 δ_{hm} 数据离散性较大, 随着 L 的增加, δ_{va}/δ_{hm} 逐渐减小.

参考文献:

[1] 丁勇春,程泽坤,王建华,等.深基坑施工对历史建筑的变形影响及控制研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(sup1): 644 – 648.
(Ding Yong-chun, Cheng Ze-kun, Wang Jian-hua, et al. Influence of deep excavation on deformation and control of adjacent historical building [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(sup1): 644 – 648.)

[2] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, 1969 : 225 – 290.

[3] Clough G W, Rourke T D. Construction induced movements of insitu walls [C]//Proceedings of the Design and Performance of Earth Retaining Structures. Atlanta, 1990 : 439 – 470.

[4] Hsieh P, Ou C. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(6) : 1004 – 1017.

[5] Burland J B, Wroth C P. Settlement of buildings and associated damage [C]// Proceedings of the Conference on Settlement of Structures. London, 1974 : 611 – 654.

[6] 钟铮,许亮,王祺国,等.紧邻保护建筑的深基坑逆作法设计与实践[J]. 岩土工程学报,2010,32(sup1): 249 – 255.
(Zhong Zheng, Xu Liang, Wang Qi-guo, et al. Design and

practice of top-down method in deep foundation pits very close to protected buildings [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(sup1): 249 – 255.)

[7] Masuda T. Behavior of deep excavation with diaphragm wall [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1993.

[8] Ou C, Hsieh P, Chiou D. Characteristics of ground surface settlement during excavation [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30(5) : 758 – 767.

[9] Yoo C. Behavior of braced and anchored walls in soils overlying rock [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(3) : 225 – 233.

[10] 赵文,韩健勇,李慎刚,等.砂土地层深基坑桩锚支护体系的受力与变形[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(4) : 576 – 580, 595.
(Zhao Wen, Han Jian-yong, Li Shen-gang, et al. Stresses and deformations in pile-anchor support system of deep foundation pit in sandy layers [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2015, 36(4) : 576 – 580, 595.)

[11] 李进军,王卫东,邸国恩,等.基坑工程对邻近建筑物附加变形影响的分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(sup1) : 623 – 629.
(Li Jin-jun, Wang Wei-dong, Di Guo-en, et al. Analysis of the influence of excavation engineering on additional deformation of adjacent buildings [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(sup1) : 623 – 629.)



(上接第 1437 页)

[5] 武小玲.硫酸高铈容量法测定草酸钠 [J]. 新疆医科大学学报, 1999, 22(2) : 148 – 149.
(Wu Xiao-ling. The method of measuring sodium oxalate by ceric sulfate [J]. *Journal of Xinjiang Medical University*, 1999, 22(2) : 148 – 149.)

[6] Salmi T, Tolvanen P, Warna J, et al. Mathematical modeling of starch oxidation by hydrogen peroxide in the presence of an iron catalyst comple [J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 146(2) : 19 – 25.

[7] 梁明华,苗健.一种咪唑啉缓蚀剂对油口用 P110 钢 CO₂ 腐蚀的缓蚀行为 [J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(5) : 396 – 398.
(Liang Ming-hua, Miao Jiang. Corrosion inhibition behavior

of an iimidazoline iihibitor for P110 steel CO₂ [J]. *Corrosion and Protection*, 2013, 34(5) : 396 – 398.)

[8] 韩冲,杨合,薛向欣.亚甲基蓝在 CaTiO₃ 上的吸附动力学 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(1) : 74 – 76.
(Han Chong, Yang He, Xue Xiang-xin. Adsorption kinetics of methylene blue on CaTiO₃ [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2015, 36(1) : 74 – 76.)

[9] Do D D. Adsorption analysis: equilibria and kinetics [M]. London: Imperial College Press, 1998 : 33 – 72.

[10] Elsherbiny A S. Adsorption kinetics and mechanism of acid dye onto montmorillonite from aqueous solutions: stopped-flow measurements [J]. *Applied Clay Science*, 2013, 83/84 : 56 – 62.