

深基坑施工对历史建筑的变形影响及控制研究

丁勇春¹, 程泽坤¹, 王建华², 徐安军³, 李耀良³

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240;
3. 上海市基础工程有限公司, 上海 200002)

摘要: 城市建筑密集区内深基坑施工对邻近历史建筑的影响及其保护是城市地下空间开发过程中出现的典型技术难题。结合某紧邻历史保护建筑的地铁车站深基坑工程, 基于 FLAC3D 建立考虑土体与结构相互作用的三维整体计算模型, 采用三维数值模拟结合现场监测对复杂环境下深基坑施工对历史建筑的变形影响及相应变形控制措施进行研究, 探讨不同基坑支护方案及技术措施对基坑变形控制及历史建筑保护的有效性。结果表明: 计算模型能够较好地预测基坑围护墙变形及对邻近历史建筑沉降的影响, 隔断桩侧向变形及建筑基础沉降与基坑围护墙侧向变形具有较强的关联性, 是否设置单排隔断桩及隔断桩间距调整对土体侧向变形的影响较小。

关键词: 基坑; 历史建筑; 数值模拟; 逆作法; 地基加固; 隔断桩

中图分类号: TU473.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0644-05

作者简介: 丁勇春(1979-), 男, 江苏大丰人, 博士, 高级工程师, 主要从事基坑工程及港口岩土工程的设计与研究工作。E-mail: yeding@163.com。

Influence of deep excavation on deformation and control of adjacent historical building

丁勇春¹, 程泽坤¹, 王建华², 徐安军³, 李耀良³

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Foundation Engineering Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: The influence of deep excavation on deformation of nearby historical building and the corresponding protective measures have become typical technical difficulties with the development of underground space in congested municipal areas. A three-dimensional numerical simulation of a metro station excavation project was carried out to investigate the negative impact of deep excavation on the adjacent historical building and to verify the effectiveness of the protective measures, of which the numerical model was established by FLAC3D, and the staged construction as well as protective measures are taken into account. The results show that the numerical model can predict the lateral displacement of the retaining walls and the influence of the excavation on the adjacent building. The parametric study reveals that the lateral displacement of the single-row barrier piles and the settlement of the building foundation have a close relationship with the lateral displacement of the retaining walls, and the impact of the single-row barrier piles as well as the adjustment of pile spacing on lateral displacement of the outside soils can be neglected.

Key words: excavation; historical building; numerical simulation; top-down construction; ground improvement; barrier pile

0 引言

随着沿海软土地区城市地下空间的开发, 越来越多的深基坑常位于既有敏感建(构)筑物, 如历史保护建筑、地下市政管线、地铁车站与区间隧道等附近, 由此便涉及更加严格的基坑变形控制及环境保护要求, 基坑工程设计常常由强度控制转变为变形控制^[1-3]。复杂城市环境下深基坑工程在设计阶段就必须合理评估基坑施工对周边环境的影响, 进而采取适当的技术措施以确保周边环境的安全。国内现行基坑设计规范

所采用的竖向弹性地基梁法尚无法合理预测基坑施工对周边环境的变形影响^[4], 不能适应基坑变形控制设计与变形预测的需要。随着计算机硬件与仿真计算软件的发展, 数值模拟成为基坑工程变形预测的有效分析手段^[5-7], 通过选取合理本构模型, 考虑基坑与周边建(构)筑物的相互影响, 同时考虑土体与结构的相

基金项目: 国家自然科学基金项目(50679041); 上海市科学技术委员会资助项目(08201200903)

收稿日期: 2012-08-25

互接触作用、初始地应力场和基坑开挖工序等因素，并通过实测数据进行反分析确定合理土体参数，可预估复杂环境条件下基坑开挖产生周边建（构）筑物的附加变形，从而为基坑变形控制设计提供支持。

本文结合紧邻历史建筑的上海地铁 10 号线南京东路站深基坑工程，采用三维数值模拟研究城市建筑密集区内复杂环境条件下深基坑施工对邻近历史建筑的变形影响及变形控制措施的有效性，为相关工程的设计与施工提供参考。

1 工程概况

1.1 工程简介

上海地铁 10 号线南京东路站主体结构位于河南中路下，车站南邻南京东路步行街，与地铁 2 号线南京东路站换乘，两车站主体结构最近距离约 9 m。车站西北侧为历史建筑华东房产大楼，该建筑最高 9 层，上部为砖混结构，下部为木桩基础，南北向长约 60 m，在本车站基坑开挖影响范围之内。车站基坑平面及周边环境如图 1 所示。

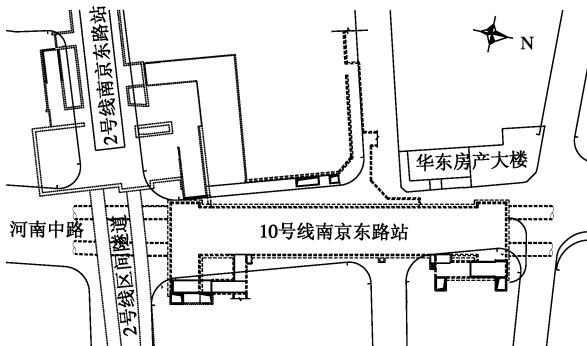


图 1 基坑平面布置及周边环境

Fig. 1 Layout of excavation and surroundings

车站主体结构为地下 3 层双柱三跨混凝土箱形结构，外包全长 153.2 m，宽 22.8 m，采用地下连续墙作为基坑围护结构，并兼作主体结构外墙。车站南北端头井开挖深度分别为 26.1 m 及 25.8 m，设 8 道支撑；标准段开挖深度为 24.2 m，设 7 道支撑。端头井及标准段地下一、二层梁板均采用逆作法施工。为保护基坑西北侧华东房产大楼，基坑北端头井西侧及北侧地下连续墙深度从 44 m 增加至 55 m，同时在车站基坑与建筑间采用“隔断桩+预留跟踪注浆管”进行保护，即在距建筑 5~6 m 处设置单排 $\phi 550 \text{ mm} @ 1000 \text{ mm}$ 钻孔灌注桩，桩深 31 m，地下连续墙成槽前施工且达设计强度。标准段基坑底部采用间隔 3 m 抽条旋喷加固，加固深度为坑底以下 3 m；南北端头井在第 3, 5 道支撑底 2.5 m 及坑底以下 3 m 范围内均采用旋喷加固。

1.2 地质条件

场地 75 m 深度范围内地基土均属第四纪河口—滨海、浅海相沉积层，主要由饱和软黏土、粉性土及砂土组成，一般具有成层分布的特点。自上而下主要划分为 8 个主要土层，受古河道影响，第⑥层缺失。场地潜水水位埋深约 1.2 m。各土层物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 主要土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil strata

编号	土层名称	γ /(kN·m ⁻³)	$E_{s0.1-0.2}$ /MPa	c /kPa	φ (°)
②1	粉质黏土	18.2	4.29	16.0	17.0
③	淤泥质粉质黏土	17.4	4.14	12	19.5
④	淤泥质黏土	16.7	1.11	13	12.0
⑤1	黏土	18.0	3.96	15	18.0
⑤3	粉质黏土	17.9	5.22	17	17.9
⑤4	粉质黏土	19.9	7.67	36	19.9
⑦	粉细砂	19.3	14.52	0	33.0
⑧1	黏土	17.9	5.31	/	/

2 基坑施工数值模拟

2.1 计算模型及参数

计算模型包括地铁 10 号线南京东路站基坑支护结构、南侧地铁 2 号线车站与区间隧道、西北侧保护建筑华东房产大楼、单排隔断桩、坑内及端头加固、基坑周边土体等。因华东房产大楼下部桩基础具体布置尚不能掌握，且木桩基础刚度有限，计算模型暂不考虑下部桩基础。

计算采用岩土工程有限差分程序 FLAC3D^[6]，考虑基坑开挖对周围土体的扰动，计算模型尺寸为 400 m×300 m×80 m，地表为自由面，底面全约束，各侧面限制法向位移。土体及加固体采用实体单元，2 号线车站主体结构与区间隧道、华东房产大楼、基坑内部逆作楼板采用壳单元，地下连续墙也采用壳单元以提高计算效率，水平支撑及基坑西北侧隔断桩采用梁单元。计算模型中实体单元数为 9.3 万，网格点为 9.6 万，结构单元为 11.4 万，单元节点为 9.8 万。三维整体计算模型如图 2 所示，支护结构及其空间关系如图 3 所示。

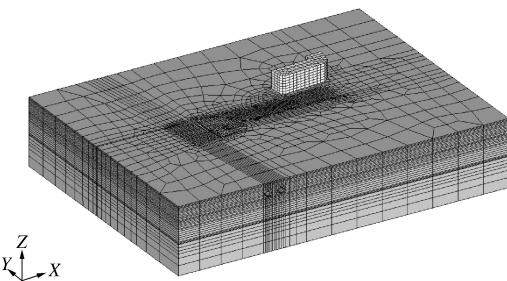


图 2 三维计算模型网格

Fig. 2 Mesh of numerical model

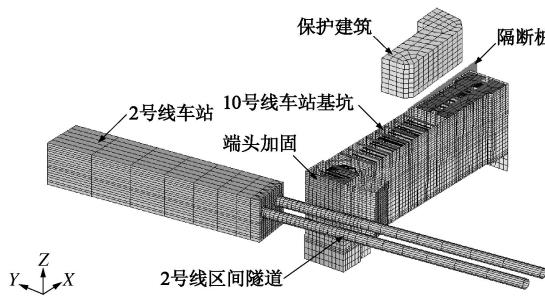


图 3 支护结构及既有结构空间关系

Fig. 3 Spatial relation between retaining and existing structures

基坑支护结构、2号线车站主体结构与区间隧道、保护建筑均采用线弹性本构模型，围护墙与混凝土支撑强度等级为C30，考虑地下连续墙分幅连接及施工质量对结构强度的影响，按经验关系进行混凝土刚度折减，弹性模量取为24 GPa，泊松比取为0.2，重度取为25 kN/m³。钢管支撑规格为φ609 mm×16 mm，Q235强度，弹性模量取为200 GPa，泊松比取为0.3，重度取为78 kN/m³。土体及地基加固体本构模型采用Mohr-Coulomb理想弹塑模型，土体模型参数根据表1取用，土体弹性模量根据上海地区经验关系确定。根据经验关系^[8]，加固体弹性模型取为200 MPa，泊松比取为0.25，重度取为20 kN/m³，黏聚力取为0.2 MPa，内摩擦角取为25°。

2.2 基坑施工分步计算

计算模型考虑了基坑的分区、分步开挖与支护，土体开挖采用“空单元”模拟，结构单元的分步支护采用“单元钝化及激活”模拟。模型计算遵循“先变位、后支撑”的原则，即每步在开挖至相应支撑底面时，基坑围护结构变位已经发生，每道支撑在下一步开挖前才被激活并发挥其支撑刚度。基坑分区开挖按南端头井→标准段→北端头井（北标准段）→南风井的顺序进行，南北端头井主要计算步如表2所示，其余分区计算步相似。

表 2 南北端头井主要计算步

Table 2 Main calculation steps of south and north shafts

计算步	施工内容
0	考虑既有结构、基坑围护墙及地基加固的初始地应力平衡(计算后位移清零)
1	开挖至第1道支撑底面，施工第1道混凝土支撑
2	开挖至第2道支撑底面，架设第2道钢支撑
3	开挖至第3道支撑底面，施工第3道混凝土支撑，逆作地下一层梁板
4	开挖至第4道支撑底面，架设第4道钢支撑
5	开挖至第5道支撑底面，施工第5道混凝土支撑，逆作地下二层梁板
6	开挖至第6道支撑底面，架设第6道钢支撑
7	开挖至第7道支撑底面，架设第7道钢支撑
8	开挖至第8道支撑底面，架设第8道钢支撑
9	开挖至坑底，浇筑底板

3 计算结果及讨论

3.1 围护墙侧向位移

基坑开挖至坑底后围护墙长边整体侧向位移如图4所示。基坑西侧围护墙最大侧向位移为69.7 mm，东侧围护墙最大侧向位移为68.4 mm。由计算模型中考虑了基坑分区施工的分隔墙作用，基坑长边围护墙的侧向位移具有明显的分区特性，标准段及北标准段围护墙变形明显大于其他分区。由于计算模型考虑了基坑西北侧保护建筑的重力及超载作用，基坑西侧围护墙变形稍大于东侧围护墙。

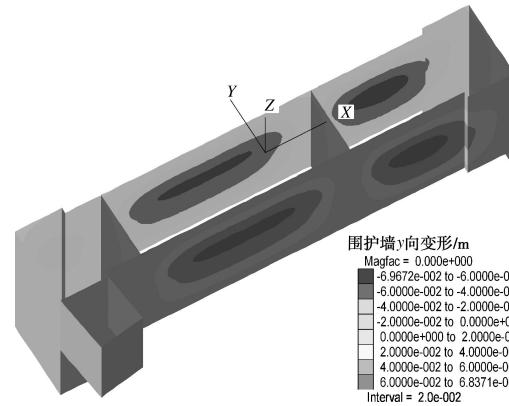


图 4 围护墙长边侧向位移

Fig. 4 Lateral displacement of long side retaining wall

基坑开挖至坑底后围护墙短边整体侧向位移如图5所示。北端墙最大侧向位移为53.9 mm，南端墙最大侧向位移为29.8 mm。针对2号线区间隧道的保护，南端头井南端墙厚度从1 m增加至1.2 m，深度从44 m增加至55 m，同时在南端头井与2号线区间隧道间设1.5 m厚、32 m深三轴搅拌桩加固（端头加固），另外南端头井平面尺寸也小于北端头井，这一系列措施综合作用使得南端墙最大侧向位移仅为北端墙的55%。基坑南风井开挖深度仅16.5 m，平面尺寸也明显小于

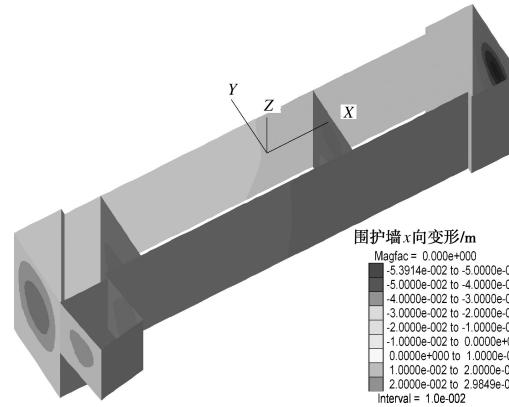


图 5 围护墙短边侧向位移

Fig. 5 Lateral displacement of short side retaining wall

其他分区且平面形状接近正方形, 使得南风井围护墙侧向变形明显小于其他分区。

不同计算步北标准段西侧围护墙长边中点Q14测点及北端头井北端墙中点Q20测点侧向位移曲线如图6所示。第一层土体为无支撑开挖, 围护墙侧向变形类似于悬臂梁, 但墙顶位移较小。后续阶段围护墙侧向位移随开挖深度的增加而增大, 同时围护墙最大侧向变形点深度也不断下移。开挖结束后围护墙侧向变形曲线均为深层凸鼓形, 两测点墙体最大侧向位移分别为60.8 mm及53.2 mm。为保护基坑西北侧历史建筑, 北端头井北端墙深度从44 m增加至55 m, 同时受基坑平面尺寸效应影响, Q20测点围护墙最大侧向位移小于Q14测点, 侧向位移曲线形态也优于Q14测点。

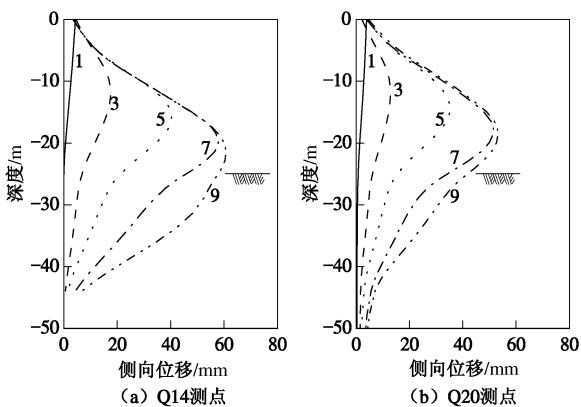


图6 不同计算步围护结构侧向位移

Fig. 6 Lateral displacement of retaining wall at different calculation steps

基坑开挖至坑底后Q14测点及Q20测点侧向位移计算值与实测值对比如图7所示。可以看出, 计算值与实测值较为吻合, 围护墙整体侧向位移曲线形态也基本一致, 验证了数值模拟计算方案的可行性和计算结果的可靠性, 表明三维计算模型能够合理反映基坑的整体变形性状, 此前提下进一步分析基坑开挖对保护建筑的变形影响是可行的。

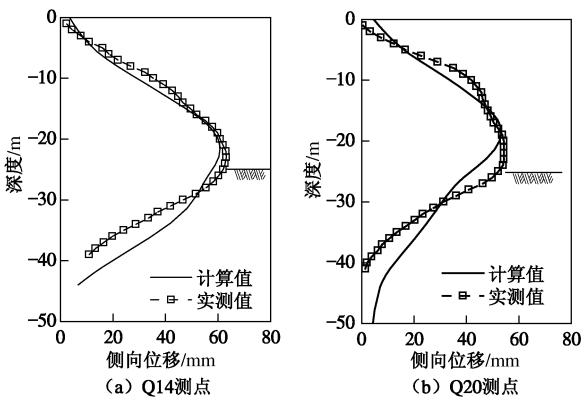


图7 围护墙侧向位移对比

Fig. 7 Comparison of lateral displacement of retaining wall

3.2 隔断桩变形

基坑开挖至坑底后西侧70根钻孔灌注桩整体变形如图8所示。钻孔灌注桩变形与基坑围护墙变形具有很强的关联性, 基坑北端头井北端墙及北标准段南分隔墙附近, 灌注桩的变形均较小; 基坑北标准段西侧长边中点附近, 灌注桩变形较大。隔断桩变形以侧向变形为主, 桩身最大侧向位移为61.6 mm, 桩身最大沉降仅0.25 mm。

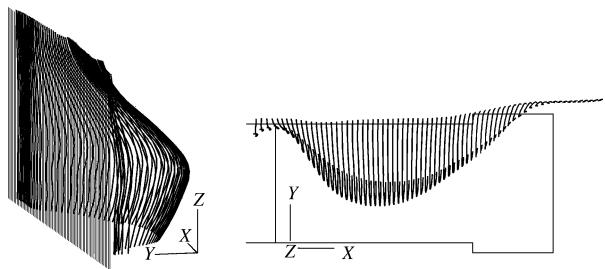


图8 钻孔灌注桩整体变形(放大300倍)

Fig. 8 Overwall deformation of bored piles

3.3 隔断桩变形控制效果

参数分析考虑了3种不同计算工况: 工况一为实际施工条件, 灌注桩布置为 $\phi 550 \text{ mm}@1000 \text{ mm}$; 工况二将灌注桩加密为 $\phi 550 \text{ mm}@600 \text{ mm}$; 工况三不考虑隔断桩, 即基坑与建筑基础间无灌注桩。基坑开挖至坑底后, 3种不同工况灌注桩位置前侧(基坑侧)土体最大侧向位移分别为65.0, 64.8, 65.3 mm, 差异几乎可以忽略。保护建筑基础与基坑间设置的单排隔断桩对桩前(基坑侧)土体侧向变形控制几乎不起作用, 对桩后(建筑侧)土体侧向变形隔断作用也不明显, 仅可使桩后土体最大侧向变形减小5.2%, 表明坑外单排隔断桩对土体侧向变形的控制效果不理想。

3.4 建筑基础沉降

基坑开挖至坑底后华东房产大楼基础沉降分布如图9所示, 基础沉降呈现南侧沉降大、北侧沉降小的特点。华东房产大楼北部约1/4范围位于基坑北端头井北端墙以北, 由于北端墙的架越作用, 使得该位置基坑沉降较小, 最小沉降仅0.7 mm; 而大楼南部约1/2范围刚好位于基坑北标准段西侧长边附近, 基坑变形的空间特性使得该范围基础沉降较大。基坑施工期华东房产大楼最大计算沉降为8.6 mm, 最大实测沉降为11.2 mm, 计算值与实测值基本吻合。由建筑基础沉降分布可以看出, 由于基坑北端墙的架越作用, 建筑沿纵向产生不均匀沉降(局部倾斜), 最大相对不均匀沉降约 8.6×10^{-4} , 小于规范控制要求^[9], 现场监测也未见建筑产生附加可见裂缝, 因而预留注浆管未进行跟踪注浆加固。

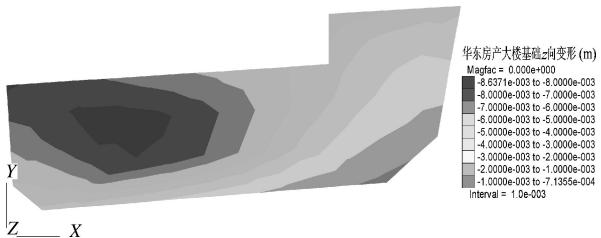


图 9 建筑基础沉降

Fig. 9 Settlement of building foundation

4 结 论

本文结合实际工程基于 FLAC3D 建立考虑保护对象在内的三维整体计算模型, 分析地铁车站深基坑施工的变形及其对邻近历史建筑的影响, 探讨变形控制措施的有效性。主要研究结论如下:

(1) 基坑围护墙侧向变形计算值与实测值基本吻合, 数值模拟计算方案的可行性和计算结果的可靠性得到验证。

(2) 基坑围护墙变形具有明显的分区特性, 基坑平面形状、地基加固措施等对基坑变形的影响较大, 宜积极利用分隔墙的刚度强化效应控制基坑长边变形。

(3) 坑外单排隔断桩侧向变形及建筑基础的沉降分布与基坑围护墙侧向变形具有较强的关联性, 基坑围护墙侧向变形最大点附近隔断桩侧向变形与建筑基础沉降也最大。

(4) 建筑基础与基坑间设置的单排隔断桩对桩前土体侧向变形的控制几乎不起作用, 对桩后土体侧变形的控制效果也不明显。单排隔断桩对历史建筑沉降变形的控制效果不佳, 应联合水泥土搅拌桩或高压喷射注浆等方法, 才能较好地发挥变形隔断作用。

本文建立的基坑计算模型存在一定简化, 部分模型参数还需结合更多的区域性工程实例进行验证, 以便数值方法在基坑施工环境影响分析中的进一步推广。

参 考 文 献:

- [1] 岳建勇, 姚 激, 黄绍铭. 软土地区敏感条件下深基坑工程设计与实践[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊1): 271 - 277. (YUE Jian-yong, YAO Ji, HUANG Shao-ming. Design and practice of deep foundation pit engineering under sensitive conditions in soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 271 - 277. (in Chinese))
- [2] 王卫东, 李进军, 徐中华. 敏感环境条件下深基坑工程的设计方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 349 - 354. (WANG Wei-dong, LI Jin-jun, XU Zhong-hua. Design methods for deep foundation pits in close proximity to sensitive properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 349 - 354. (in Chinese))
- [3] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Go-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [4] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (DING Yong-chun. Excavation-induced deformation and control in soft deposits[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [5] 龚晓南. 对岩土工程数值分析的几点思考[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 321 - 325. (GONG Xiao-nan. Reflections on numerical analysis of geotechnical engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 321 - 325. (in Chinese))
- [6] 丁勇春, 王建华, 徐 斌. 基于 FLAC3D 的基坑开挖与支护三维数值分析[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(6): 976 - 800. (DING Yong-chun, WANG Jian-hua, XU bin. Three-dimensional numerical analysis of braced excavation based on FLAC3D[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(6): 976 - 800. (in Chinese))
- [7] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]// ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No. 25. New York, 1990: 439 - 470.
- [8] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (GONG Xiao-nan. Ground improvement manual[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))
- [9] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 2011. (GB 50007—2011 Code for design of building foundation[S]. 2011. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)