

DOI: 10.11779/CJGE2014S2067

# 下穿运营高铁及地铁的交通枢纽深基坑数值分析

李明广<sup>1</sup>, 徐安军<sup>2</sup>, 董 锋<sup>2</sup>, 陈锦剑<sup>1</sup>, 王建华<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240; 2. 上海市基础工程有限公司, 上海 200002)

**摘要:** 某地下综合交通枢纽基坑下穿沪宁城际铁路和已建11号线地铁车站, 周围环境复杂, 铁路路基和地铁车站结构变形控制要求严格。采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>对该深基坑施工过程进行三维数值分析, 研究邻近铁路基坑、下穿铁路基坑以及已建地铁车站两侧共墙基坑开挖引起的基坑围护结构和周围已有结构的变形特性, 并采用现场实测数据对理论分析进行验证。通过对比分析计算结果和实测数据可知, 铁路路基沉降和隧道隆起量均控制在允许范围内; 采用坑内土体加固和加厚地连墙等措施可以有效地控制地连墙变形和邻近铁路路基沉降; 已建地铁车站两侧共墙基坑开挖卸荷会导致地铁轨道的隆起, 隆起量随共墙基坑卸荷量增加而增加; 下穿基坑开挖和上部列车移动荷载共同作用下, 铁路路基整体表现为上台。

**关键词:** 综合交通枢纽; 运营铁路; 地铁车站; 基坑工程; 数值分析

**中图分类号:** TU473      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2014)S2-0386-05

**作者简介:** 李明广(1987-), 男, 重庆人, 博士研究生, 主要从事岩土工程、地下工程等领域数值试验工作。E-mail: lmg20066028@163.com。

## Numerical study on a deep excavation of transportation hub underlying operating railways and a metro station

LI Ming-guang<sup>1</sup>, XU An-jun<sup>2</sup>, DONG Feng<sup>2</sup>, CHEN Jin-jian<sup>1</sup>, WANG Jian-hua<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Foundation Engineering Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

**Abstract:** The excavation of the transportation hub is located below Shanghai-Nanjing high-speed railways and metro station of Line 11. The surroundings are extremely complicated and the deformation controls of both the railway subgrade and the metro station are strict. 3D numerical simulation, using the FLAC<sup>3D</sup>, is carried out to model the construction process of the deep excavation. The deformation behaviors of the retaining structures and the surrounding existing structures are investigated during the construction of the adjacent pit, underlying pit and the pits sharing the same diaphragm walls with the existing structures. Numerical predictions are verified by the monitoring data. The results show that both the settlement of the railway subgrade and the rebound of the metro station are controlled within the allowable values, and the numerical predictions are reasonable and close to the monitoring data. Deformations of diaphragm wall and settlement of railway subgrade can be reduced by deepening and thickening the diaphragm wall and improving the soils. The soils excavated at both sides of the existing metro station will result in rebound of the structures, and the rebound depends on the unloaded volume. The overlying railway subgrade heaves as a result of the interaction of the underlying excavation and the train loads.

**Key words:** comprehensive transportation hub; operating railway; metro station; deep excavation; numerical study

## 0 引言

随着中国综合交通枢纽以及相关配套工程向地下发展, 基坑工程的建设变得更加重要。近年来, 基坑呈现出开挖深度深大、开挖面积大、周围环境日益复杂等特点。其施工方法和围护结构受力往往受到地面建筑物、道路、城市交通、环境保护等因素的影响, 传统的经验及半经验方法很难准确预测复杂环境下深基坑开挖引起的围护结构变形及开挖对周围环境的影

响, 因此, 采用数值方法研究复杂环境下开挖引起的围护结构变形特性及周围环境的影响显得尤为重要。

基坑工程具有明显的时空效应<sup>[1-2]</sup>, 开挖引起的围护结构的受力和变形复杂。Hsiung<sup>[3]</sup>采用平面应变模型对台湾某车站基坑施工过程中的蠕变变形进行模拟, 结合实测数据进行对比分析, 揭示了基坑工程中

土体蠕变变形引起墙体变形的规律。Ou 等<sup>[4]</sup>采用数值方法分析了转角效应对基坑围护结构及坑外地表沉降的影响, 研究指出三维有限元可以更加准确地预测基坑开挖引起的围护结构和坑外土体的变形。Hou 等<sup>[5]</sup>结合上海南站北广场大型逆作基坑, 采用考虑土体各向异性的三维有限元方法研究了分区开挖方案对基坑围护结构受力变形的影响规律。

随着基坑周围环境的复杂化, 基坑施工过程中, 周围的已有结构变形控制已经成为决定建设成败的关键因素。然而, 由于理论研究滞后于实际工程及经验方法的使用受限, 数值方法对于研究基坑开挖引起的周围已有结构受力变形优势更为突出。Liu 等<sup>[6]</sup>采用三维有限差分法得到了上部基坑不同施工方案对下卧隧道变形的影响规律。通过设置不同参数, 进一步研究了土体加固、开挖顺序及基坑与隧道位置关系对隧道变形的影响规律。郑刚等<sup>[7]</sup>采用有限元分析基坑开挖对邻近任意角度建筑物的影响, 分析表明, 纵墙与基坑边相互垂直时是建筑物的最不利位置。根据前人的研究可知, 数值方法是研究复杂环境下的基坑开挖非常有效的手段。

本文结合上海西站地下综合交通枢纽基坑工程, 采用三维数值分析方法, 研究下穿运营高铁及地铁的交通枢纽基坑施工引起的铁路路基、地铁轨道及基坑围护结构受力变形的特性。

## 1 工程概况

### 1.1 基坑开挖分区

上海西站综合交通枢纽为地铁 11 号和 15 号在铁路上海西站地区形成轨道交通换乘节点。为了组织复杂环境下深基坑的施工、保证铁路和 11 号线地铁的正常运营, 分 3 个分区进行施工, 如图 1 所示。

A 区位于铁路上海西站站场下, 地下共 3 层, 地下一层为地下南北通道综合大厅, 与铁路站台和地铁 11 号线相连通, 可实现各轨道交通的零换乘。南北通道主体结构外包全长约 83.00 m, 宽 77.85 m, 深 9.7 m。地下二层宽 23.5 m, 深 15.5 m, 主要放置地铁车站的相关设备; 地下三层净宽 23.5 m, 长约 84 m, 深 23.5 m, 为 15 号线岛式站台车站。

地下南北通道 B 区主体结构外包全长约 98 m, 最宽处约 31 m, 基坑中间为 15 号线车站, 根据基坑深浅分为三块。15 号线车站西侧区为地下二层, 开挖深度约为 15.9 m, 15 号线车站区为地下三层, 开挖深度约为 23.5 m, 15 号线车站东侧区为地下一层, 开挖深度约为 9.5 m。

C 区为 15 号线南端头井及部分标准段, 主体结构

为不规则矩形, 长约 47 m, 最宽处约 28.6 m, 地下三层。端头井开挖深度约为 24.48 m, 标准段开挖深度约为 22.88 m。

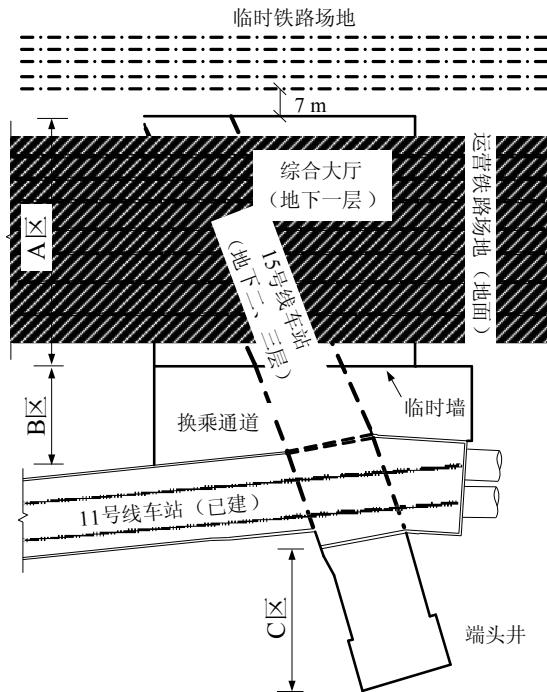


图 1 基坑分区平面图

Fig. 1 Plan of excavation zones

### 1.2 支护结构设计

为了控制围护结构和周围环境的变形, 基坑主体结构采用地下连续墙作为基坑的围护结构。A 区地下一层采用 600 mm 厚地下墙, 墙深 23.0 m; 地下三层采用 1000 mm 厚地下墙, 墙深 47.5 m; 北侧地下一层采用 1000 mm 厚地下墙, 墙深 40.5 m; 南侧与 B 区地下二层临时封堵墙采用 800 mm 厚地下墙, 墙深 29.5 m。支撑体系采用钢筋混凝土支撑, 地下一层结构为 2 道, 二、三层结构共 2 道。B 区地下一层采用 600 mm 厚地下墙, 墙深 29 m; 地下二层采用 800 mm 厚地下墙, 墙深 29 m; 地下三层采用 1000 mm 厚地下墙, 墙深 46.5 m。支撑体系采用钢筋混凝土支撑, 地下一层结构为 2 道; 二层结构为 3 道; 三层结构为 4 道。C 区地下连续墙厚 1000 mm, 端头井处墙深 45 m, 标准段处墙深 43 m。支撑体系首道采用钢筋混凝土支撑, 其余为钢支撑。端头井处共设 8 道支撑, 标准段为 7 道。

### 1.3 施工方法计时工流程

A 区地下一层采用明挖顺作法施工, 二、三层采用逆作法施工。B 区地下一、二层采用明挖顺作法施工, 地下三层采用逆做法施工。C 区采用明挖法施工。按照铁路部门的要求, 首先开挖 A 区一层综合大厅,

开挖之前将铁路临时翻交至北侧地连墙以外 7 m, 综合大厅土体采用分层分块的开挖方法施工。开挖结束后施工顶板并回填覆土, 然后将铁路翻交至原有路线, 保证高铁的正常运营。先后施工 11 号线车站北侧综合大厅、换乘通道和 15 号线车站基坑和南侧 15 号线车站部分标准段和端头井基坑。最后施工 A 区铁路场地下方 15 号线车站。

## 2 工程难点

铁路路基位于综合大厅正上方, 施工前将轨道临时移至基坑北侧, 改造后临时路线距地连墙仅 7 m。由于施工过程中铁路荷载与基坑土体卸荷相互作用, 铁路路基和基坑围护结构受力变形复杂。

根据统筹安排, A 区 15 号线车站地下二、三层施工时正上方的高铁正常运营。下穿基坑施工中, 高铁铁路路基变形控制要求高, 高铁动荷载作用下下穿基坑围护结构受力复杂, 基坑施工风险大。

新建地铁车站既有地铁车站近垂直相交, 地铁车站变形控制要求非常严格, 仅为 20 mm。然而北侧综合大厅及换乘通道与既有地铁车站共墙, 既有地铁车站两侧开挖卸荷量大, 潜在的地铁车站结构变形很可能超过允许范围。

## 3 数值分析

根据上述分析, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 对上海西站地下综合交通枢纽基坑进行数值评估, 研究开挖引起的铁路路基、地铁车站以及基坑围护结构的变形特性。

### 3.1 基本模型与分析方法

本文采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性本构模型, 根据土体本构模型以及地勘报告中的相关参数, 计算参数如表 1 所示。由于基坑形状的不规则形, 必须采用三维模型进行分析。模型尺寸为 380 m×360 m×60 m。计算模型的上边界为自由边界, 底部全约束, 侧边约束水平方向位移。土体采用实体单元 (zone 单元), 基坑的围护墙采用两面接触的板单元 (liner 单元), 楼板采用无接触的板单元 (shell 单元), 梁采用与土体无接触的一维杆单元 (beam 单元), 桩采用可以与土接触的一维杆单元 (pile 单元) 模拟。计算模型共有 zone 单元 11.8 万, liner 单元 1.5 万, shell 单元 1.2 万, pile 单元 1.1 万和 172beam 单元。计算模型见图 2。

列车荷载采用《新建时速 300~350 公里客运专线铁路设计暂行规定 (上下)》和《铁路桥涵设计基本规范》中桥涵设计荷载的规定, 最终等效静荷载取 40 kN/m<sup>2</sup>。计算工况见表 2。

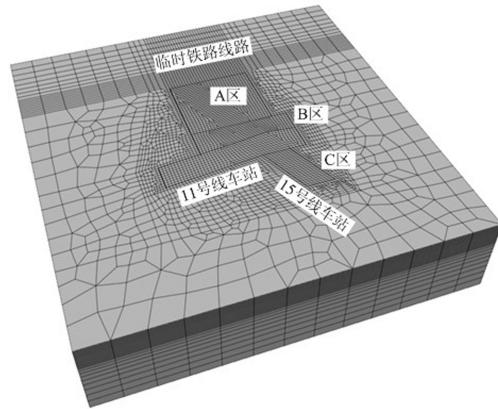


图 2 数值分析计算模型

Fig. 2 Numerical model

表 1 莫尔-库仑模型计算参数

Table 1 Parameters of Mohr-Coulomb model

序号	$H$ /m	$e$	$\gamma$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$E_s$ /MPa	$c$ /kPa	$\varphi$ ( $^{\circ}$ )
1	1.8	2.00	18.0			
2	4.5	0.88	18.6	5.0	17	23.0
3	3.3	1.20	17.4	2.6	12	18.0
4	7.6	1.45	16.7	2.1	14	11.5
5	5.9	1.17	17.5	3.3	16	12.0
6	5.6	1.00	18.0	4.3	16	17.0
7	5.7	0.69	19.6	7.0	46	17.0
8	27.1	0.81	18.7	14.0	0	34.5
9	31.2	0.84	18.8	11.4	2	32.0

表 2 基坑施工主要计算步

Table 2 Main calculation steps of excavation

计算步	开挖区域	开挖工况	层高/m
stage0	整个模型	初始地应力平衡	
stage1	A 区地下一层	第 1 层开挖	1.5
		第 2 层开挖	5.4
		第 3 层开挖	2.7
stage2	B 区	第 1 层开挖	1.4
		第 2 层开挖	6.0
		第 3 层开挖	5.5
		第 4 层开挖	2.9
		第 5 层开挖	4.7
		第 6 层开挖	3.7
stage3	C 区	第 1 层开挖	0.9
		2~8	约 3.0
		第 9 层开挖	2.2
stage4	A 区地下二、三层	第 1 层开挖	3.5
		第 2 层开挖	3.9
		第 3 层开挖	3.5
		第 4 层开挖	3.0

### 3.2 近铁路基坑变形特性分析

由于沪宁铁路位于 A 区场地内, A 区一层综合大厅施工前, 沪宁铁路临时移至基坑北侧。为了保证基坑施工过程中铁路正常运营, 北侧采用 1000 mm 厚、40.5 m 深地连墙作为围护结构; 距地连墙 7 m、坑底以下 4 m 范围内土体进行加固。图 3 为 A 区综合大厅开挖引起的地连墙水平位移。从图中可以看出, 由于东西两侧墙的深度和厚度较小, 计算所得的东西两侧

地连墙变形量最大。由于墙体加深、加厚和土体加固等原因, 邻近铁路一侧地连墙变形远小于东西两侧。由于南侧地连墙后的土体有限, 作用在改墙后的土压力较小, 地连墙变形量最小。通过对比实测数据可知, 计算所得的地连墙最大变形量和变形趋势均符合墙体实际的变形。

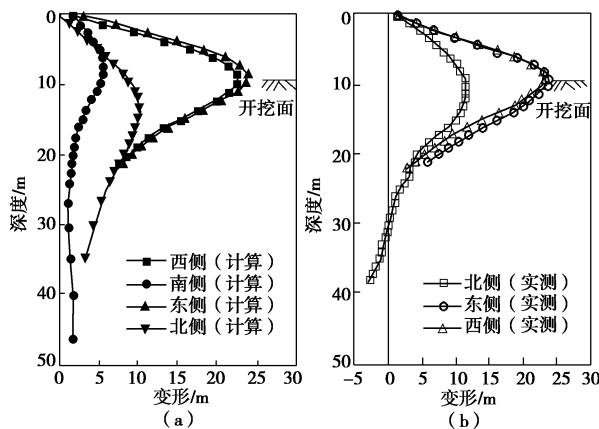


图 3 A 区一层开挖引起的墙体变形

Fig. 3 Wall deflections due to excavation of underpass

图 4 为 A 区一层综合大厅开挖结束后, 坑外地表及铁路路基的沉降云图。从图中可以看出, 铁路路基沉降小于东西两侧坑外地表沉降, 控制在 20 mm 范围内。由于施工过程中铁路正常运营, 无法监测铁路场地内路基的变形, 只能对地连墙与铁路场地之间的临时围墙处地表沉降进行监测, 监测结果表明, 临时围墙处的地表最大沉降量仅为 5 mm, 得到了很好的控制。由此可知, 采用合理的土体加固和地连墙加深、加厚等措施可以有效地控制围护结构变形和坑外地表沉降。

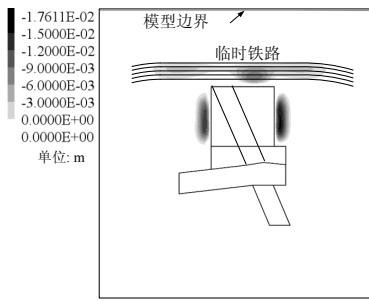


图 4 A 区一层开挖引起的坑外地表沉降

Fig. 4 Ground settlements due to excavation of underpass

### 3.3 下穿铁路基坑变形特性分析

为减小施工对铁路运营的影响, A 区综合大厅施工结束后, 铁路立即翻交回原有场地, 此时, 铁路轨道位于 15 号线车站正上方, 地下二、三层采用逆作法并结合通道式土方开挖方法<sup>[8]</sup>施工。图 5 为 A 区地下二三层开挖引起的地连墙水平变形。从图中可以看出,

开挖引起的最大墙体水平位移较小, 仅为开挖深度的 0.14%, 远小于上海软体地区基坑开挖引起地连墙变形的平均值<sup>[9]</sup>。通过对比实测数据和数值结果可知, 数值方法能够较准确的预测开挖引起的地连墙变形。

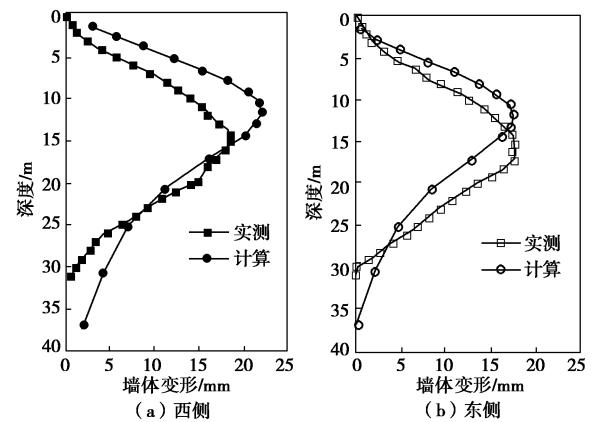


图 5 A 区车站开挖引起的墙体变形

Fig. 5 Wall deflections due to excavation of metro station

由于铁路路基无法监测, 只能通过顶板位移监测间接得到铁路路基的隆沉。图 6 为 A 区开挖结束后, 计算得到的顶板竖向位移云图。由图可见, 开挖卸荷和列车移动荷载共同作用下, 顶板整体表现为上抬, 最大隆起量为 5.1 mm。现场监测数据呈现出相同的趋势, 顶板北侧监测点 T1~T3 的监测结果分别为 4.80, 5.00, 3.39 mm; 顶板南侧监测点 T4~T6 的监测结果分别为 4.88, 4.07, 5.56 mm。由此可间接推断, 铁路路基变形控制在允许范围内。

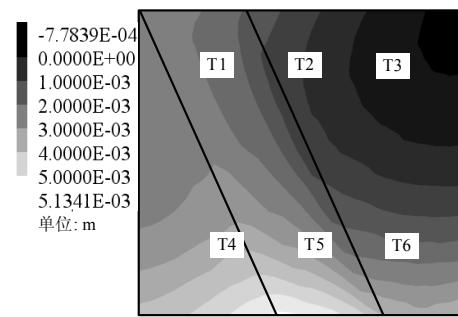


图 6 A 区地下二三层开挖引起铁路路基隆沉

Fig. 6 Vertical displacements of top slab in zone A

### 3.4 与车站共墙基坑变形特性分析

已建 11 号线地铁车站与南北两侧基坑共用一部分地连墙, 共墙长度分别为 98, 24 m, 两侧基坑开挖卸荷必定会导致车站结构隆起。图 7 为计算所得的施工结束后 11 号线车站的竖向隆起云图。由图可知, 开挖卸荷导致车站整体上抬, 上抬量与开挖深度和卸荷量密切相关。最大隆起量出现在 15 号线车站附近, 为 13.2 mm, 小于允许值 20 mm。

图 8 为开挖结束后 11 号线地铁轨道的实测变形曲

线, 从图中可以看出, 最大隆起量出现在 15 号线车站附近, 车站外的地铁隧道表现为下沉。对比计算结构和实测数据可知, 最大轨道隆起量数值结果较实测数据偏小, 主要是由于数值模拟过程中没有考虑土体的时间效应。

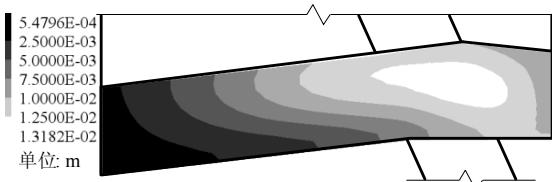


图 7 11 号线车站隆起计算云图

Fig. 7 Rebounds of metro station (numerical results)

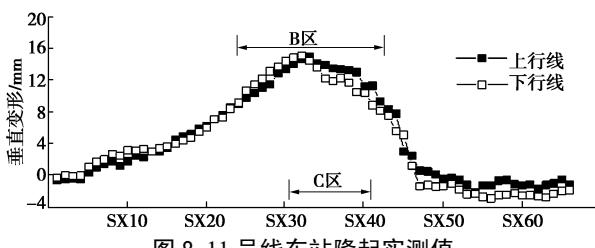


图 8 11 号线车站隆起实测值

Fig. 8 Rebounds of metro station (monitoring data)

## 4 结 论

本文依托上海西站深基坑工程, 采用三维数值分析方法并结合实测数据, 研究了近铁路基坑、下穿铁路基坑及已建地铁车站两侧基坑开挖对围护结构受力变形和周围环境影响的规律, 主要结论如下:

(1) 对于近铁路基坑, 通过采取地连墙加厚、加深及坑内土体加固等措施可以有效地控制围护结构的变形, 减少开挖引起的坑外地表沉降, 将铁路路基变形控制在允许范围内。

(2) 对于下穿铁路场地的深基坑工程, 铁路路基在列车荷载和基坑开挖卸荷共同作用下呈现整体隆起状态, 因此, 合理地利用开挖卸荷可以有效的控制铁路路基的竖向位移。

(3) 与已有结构共墙的深基坑开挖会导致结构明显上抬, 最大上抬量出现在开挖深度最深和卸荷量最大的位置。相反, 基坑开挖范围以外的已有地铁隧道下沉, 沉降量相对较小。

## 参 考 文 献:

[1] 刘建航, 刘国彬, 范益群. 软土基坑工程中时空效应理论

与实践(上)[J]. 地下工程与隧道, 1999(3): 7 - 12. (LIU Jian-hang, LIU Guo-bin, FAN Yi-qun. The theory and its practice by using the rule of time-space effect in soft soil excavation[J]. Undergroudn Engineering and Tunnels, 1999(3): 7 - 12. (in Chinese))

- [2] 刘建航, 刘国彬, 范益群. 软土基坑工程中时空效应理论与实践(下)[J]. 地下工程与隧道, 1999(4): 10 - 14. (LIU Jian-hang, LIU Guo-bin, FAN Yi-qun. The theory and its practice by using the rule of time-space effect in soft soil excavation[J]. Undergroudn Engineering and Tunnels, 1999(4): 10 - 14. (in Chinese))
- [3] HSIUNG Bin-Chen Benson. A case study on the behaviour of a deep excavation in sand [J]. Computers and Geotechnics, 2009, **36**: 665 - 675.
- [4] OU Chang-yu, SHIAU Bor-yuan. Analysis of the corner effect on excavation behaviors[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(3): 532 - 540.
- [5] HOU Yong-mao, WANG Jian-hua, ZHANG Lu-lu. Finite-element modeling of a complex deep excavation in Shanghai[J]. Acta Geotechnica, 2009, **4**(1): 7 - 16.
- [6] LIU Han-long, LI Ping, LIU Jin-yuan. Numerical investigation of underlying tunnel heave during a new tunnel construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, **26**(2): 276 - 283.
- [7] 郑刚, 李志伟. 基坑开挖对邻近任意角度建筑物影响的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(4): 615 - 624. (ZHENG Gang, LI Zhi-wei. Finite element analysis of response of buildings with arbitrary angle adjacent to excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(4): 615 - 624. (in Chinese))
- [8] LI Ming-guang, CHEN Jin-jian, XU An-jun, et al. Case study of innovative top-down construction method with channel-type excavation[J]. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 2014, **140**(5): 05014003-1-05014003-10.
- [9] WANG Jian-hua, XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2010, **136**(7): 985 - 994.

(本文责编 胡海霞)