

# 地铁换乘车站基坑围护结构变形监测与数值模拟

胡安峰<sup>1, 2</sup>, 张光建<sup>1, 2</sup>, 王金昌<sup>3</sup>, 宋欢<sup>4</sup>

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058;

3. 浙江大学交通工程研究所, 浙江 杭州 310058; 4. 中铁二院工程集团有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要:** 以某地铁换乘车站基坑为研究背景, 分析了基坑施工过程中地下连续墙水平位移随基坑开挖深度和时间的變化规律。建立三维有限元模型对地铁车站深基坑开挖进行模拟计算, 将获得的地下连续墙变形结果与监测结果进行了对比分析。结果表明: 地下连续墙最大水平位移的计算值与实测值差距很小, 其发展变化的趋势几乎一致, 有限元计算的结果是可信的。三维有限元模型能够更好的考虑基坑空间效应对地下连续墙水平位移的影响, 可以为优化设计和施工提供有益的参考。

**关键词:** 换乘车站; 深基坑; 有限元; 水平位移; 空间效应

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0077-05

作者简介: 胡安峰(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事软黏土力学与深基坑研究工作。E-mail: anfenghu@zju.edu.cn。

## Monitoring and numerical simulation of deformation of retaining structure excavation of a metro transfer station

HU An-feng<sup>1, 2</sup>, ZHANG Guang-jian<sup>1, 2</sup>, WANG Jin-chang<sup>3</sup>, SONG Huan<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Soft Soil and Environmental Geotechnical Engineering of the Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou

310058, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Institute of Transportation

Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610000,

China)

**Abstract:** Based on the excavation project of a metro transfer station, the change laws of horizontal deformation of the retaining structure with the excavation depth and time are studied. Three-dimensional finite element model is established to simulate the excavation of the metro station. The FEM results and in-situ monitoring results of retaining structure deformation are compared. The results show that the difference of the maximum horizontal displacement of diaphragm wall between the calculated and in-situ monitoring results is small. And the trend of change laws is almost uniform. The results of finite element analysis are credible. Three-dimensional finite element model can consider the influence of spatial effect to the horizontal displacement of diaphragm wall. It may provide reference for the design and construction.

**Key words:** transfer station; deep excavation; finite element; horizontal displacement; spatial effect

## 0 引言

随着中国城市建设规模不断扩大, 高层建筑及地下交通工程建设中面临很多深开挖问题。特别是城市地铁的兴建, 产生了大量的地铁车站深基坑工程<sup>[1-3]</sup>。地铁车站深基坑工程作为一项复杂的综合性岩土工程, 在施工过程中基坑内外土体应力状态的改变将会引起土体的变形, 从而造成其围护结构的变形。由于深基坑施工边界的复杂性, 一般很难通过解析的方法来求解基坑工程中围护结构的变形及其对周边环境的影响, 数值分析方法为这种问题的求解提供了有力的工具<sup>[4-6]</sup>。本文通过有限元程序与理正深基坑分析软件对地铁换乘车站基坑进行模拟计算, 以及对现场监测结果的分析来研究地铁车站深基坑在开挖过程中围护

结构的变形特性。

## 1 工程概况及地质条件

### 1.1 工程概况

拟建杭州地铁1号线滨江站位于杭州市滨江区江陵路与江南大道交叉处江陵路上, 6号线滨江站位于江南大道与江陵路相交叉路口江南大道上, 与沿江陵路的地铁1号线车站换乘, 1号线在上, 6号线在下。本站为地下3层岛式车站。1号线车站沿江陵路南北向布置, 为地下2层站, 车站总长474.5 m, 标准段宽20.3 m, 车站总建筑面积15812 m<sup>2</sup>。6号线沿江南

大道东西向布置, 为地下3层站, 车站总长148 m, 标准段宽19.3 m, 车站总建筑面积14425.3 m<sup>2</sup>。地铁1号线和6号线在滨江站节点同时施工。

主体部分围护结构采用1000 mm厚地下连续墙, 附属结构采用钻孔咬合桩。标准段设置6道支撑, 端头井7道支撑, 先期施工的换乘节点设置4道混凝土支撑和2道钢支撑, 其余标准段设置2道混凝土支撑和4道钢支撑, 端头井2道混凝土支撑和5道钢支撑。主体设置2道封堵墙, 分三段二期施工。

## 1.2 工程地质条件

该地铁车站场地属于钱塘江冲海积平原地貌单元, 地基土属中软场地土。主要地层为①-2素填土, 层厚1.5 m; ③-2砂质粉土, 层厚2.1 m; ③-3砂质粉土夹粉砂, 层厚4.4 m; ③-4砂质粉土, 层厚5.0 m; ③-5粉砂夹砂质粉土, 层厚2.6 m; ③-7砂质粉土, 层厚1.4 m; ④-3淤泥质粉质黏土, 层厚8.0 m; ⑥-2淤泥质粉质黏土, 层厚4.6 m。地下水分布为两个主要含水层, 即浅层潜水和深层承压水。潜水含水层组主要为全新统冲海积砂(粉)土, 包括③层粉土及粉砂夹粉土, 潜水位埋深2.10~3.90 m; 承压含水层主要分布于⑩-1层中砂、⑩-1层圆砾中, 勘察期间测得承压水位埋深4.00 m, 水位标高为2.24 m。

## 2 车站基坑围护结构设计及监测方案

### 2.1 围护结构设计

本文的研究对象为先期施工的换乘节点, 节点区1号线方向长41.6 m, 宽20.1 m, 地下连续墙深30.8 m; 6号线方向长45.6 m, 宽20.5 m, 地下连续墙深43 m。节点基坑开挖深度为16.7~24.3 m, 采用明挖顺作法施工。基坑主体围护结构采用1000 mm厚的地下连续墙, 节点处基坑从上到下设计为四道钢筋混凝土支撑, 两道钢管支撑。节点区基坑围护结构平面布置图见图1~2, 节点区基坑围护结构剖面图见图3。

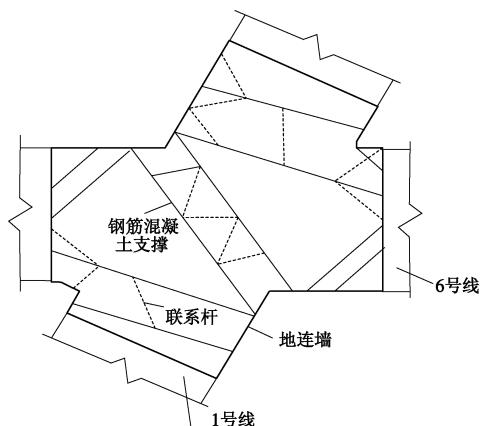


图1 第1~4道钢筋混凝土支撑平面布置图

Fig. 1 Layout of reinforced concrete internal support

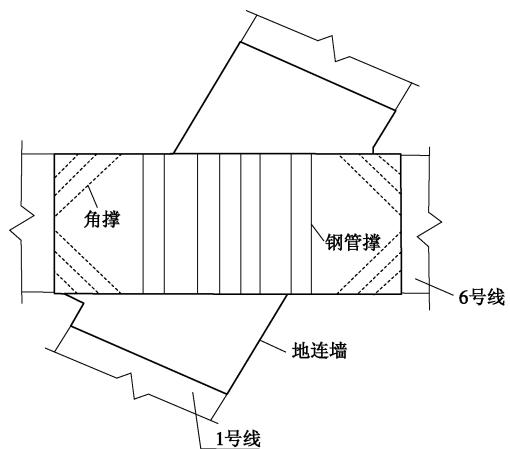


图2 第5~6道钢管支撑平面布置图

Fig. 2 Layout of steel pipe internal support

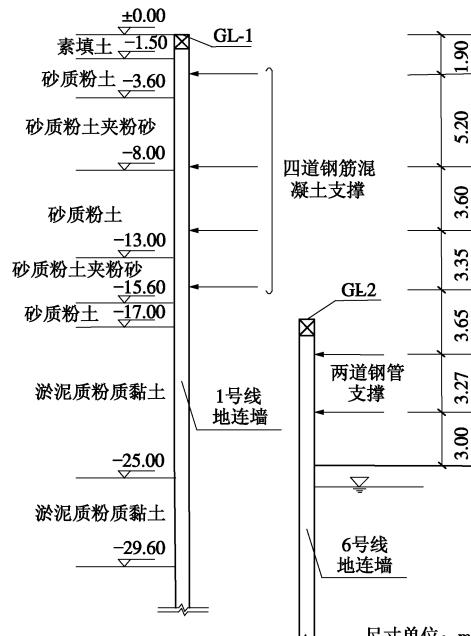


图3 基坑围护结构剖面图

Fig. 3 Profile of retaining structure of excavation

### 2.2 监测项目及方法

综合考虑现场调查情况及规范要求, 主要的基坑监测点平面布置图见图4。

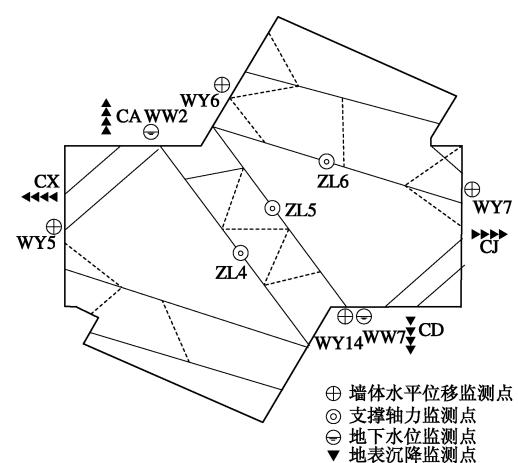


图4 节点基坑主要测点布置图

Fig. 4 Layout of main monitoring point of excavation

### 2.3 监测结果分析

土体水平位移是基坑监测的一个主要内容, 是考察围护结构安全状况的重要指标。选取 1 号线方向测斜孔 WY6 及 6 号线方向测斜孔 WY7 的监测数据进行分析。图 5, 6 分别为埋设在紧靠围护墙外侧土体内的测斜管测得的各施工工况下土体水平位移随深度变化曲线, 基坑开挖的关键工况见表 1。从两图可以看出, 土体的水平位移表现为典型的两头小中间大的“鼓胀”型变形特征。且随着基坑的开挖和支撑的施作, 最大水平位移发生的部位也随之下移。1 号线基坑开挖至

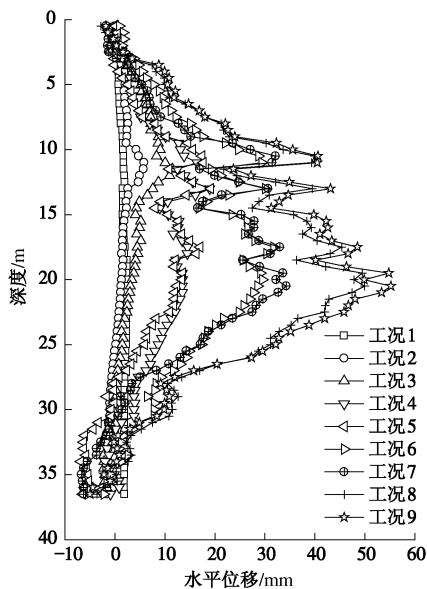


图 5 WY6 测斜管在开挖阶段水平位移曲线

Fig. 5 Horizontal displacement curves of inclinometer WY6 during excavation stage

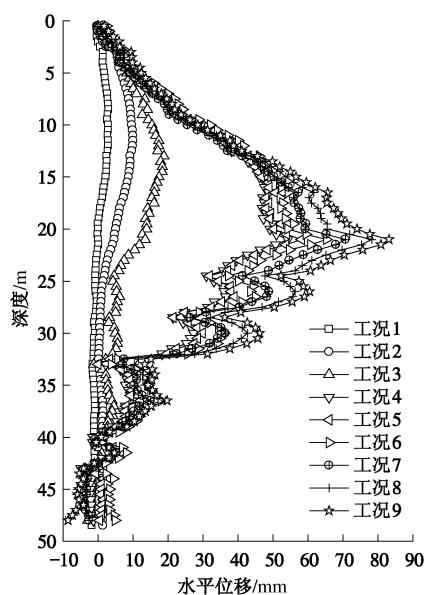


图 6 WY7 测斜管在开挖阶段水平位移曲线

Fig. 6 Horizontal displacement curves of inclinometer WY7 during excavation stage

表 1 关键施工阶段

Table 1 Key construction stages

工况	基坑施工阶段
1	施工地下连续墙以及封堵墙
2	开挖第一层土, 施工冠梁 GL-1 和第一道混凝土撑
3	开挖第二层土, 施工第二道混凝土撑
4	开挖第三层土, 施工第三道混凝土撑
5	开挖第四层土, 施工第四道混凝土撑
6	开挖第五层土至地下连续墙冠梁 GL-2 下并施工 GL-2
7	开挖第六层土, 施工第五道双幅钢支撑
8	开挖第七层土, 施工第六道钢支撑
9	开挖到基坑底
10	施工垫层和底板, 拆除第六道钢支撑
11	施工第五道换撑, 拆除第五道双幅钢支撑
12	施工二层中板, 拆除第四道支撑
13	拆除第三道支撑
14	施工一层中板, 拆除第二道混凝土撑
15	施工顶板, 拆除第一道混凝土撑和第五道换撑

基底时, WY6 处土体的最大水平位移为 13.5 mm。当继续开挖至 6 号线基底时, WY6 处土体的最大水平位移达到 55.19 mm, 增长了 308.8%。说明内坑的开挖对外墙水平位移的影响较大, 这与侯新宇等的研究结论略有不同。究其原因, 可能本工程深浅坑的水平距离、开挖高差、围护方案及土质条件等都与之不尽相同。另外, 本文的节点基坑平面不规则, 空间效应更为明显<sup>[7-9]</sup>可能也是影响因素之一。此外, 6 号线基坑开挖完成后, WY7 处土体的最大水平位移达到 83.21 mm, 比 WY6 处土体的最大水平位移大 50.8%, 说明地下连续墙的侧向位移存在明显的空间效应。

### 3 有限元计算模拟及分析

#### 3.1 数值计算模型

由于节点基坑的空间不对称性, 取整体进行计算分析, 采用有限元软件 ABAQUS 建立三维有限元模型, 有限元计算模型见图 7。其中, 支撑结构中的梁和柱采用空间梁单元, 地铁车站的楼板和地下连续墙采用空间壳单元, 联系杆采用线弹性杆单元模拟。

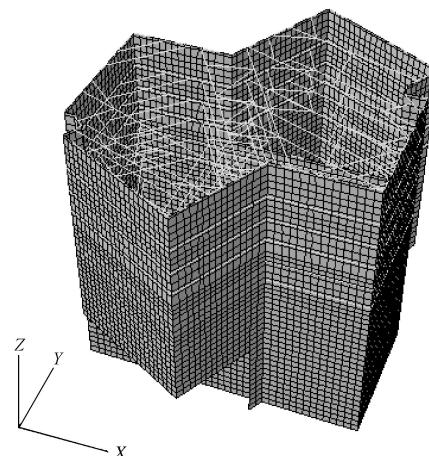


图 7 节点基坑的三维有限元模型

Fig. 7 Three-dimensional finite element model of excavation

车站底板下和基坑外侧的土体采用 Winkler 弹性地基, 简化为土弹簧单元。随着开挖深度的增加, 被动区土层标高下降后会导致不同土层的等效土弹簧刚度逐步减小。本文的有限元模型考虑了土弹簧刚度的动态调整。

### 3.2 计算参数的选取

由于支护结构刚度较大, 选用线弹性模型, 地下连续墙及混凝土水平支撑为 C30, 弹性模量取为 25 GPa, 泊松比取为 0.2。水平钢管支撑弹性模量取为 210 GPa, 泊松比取为 0.3。

### 3.3 计算与监测结果对比

选取两个关键工况的计算结果与实测值进行对比分析, 图 8 为基坑开挖面以上地下连续墙水平位移的变化情况, 从图中可以看出, 在基坑开挖的深度范围内, 计算值小于实测值, 可能是由于计算中无法考虑人为、车辆、施工机械等的影响, 使实测和计算结果有一定的偏差, 但实测值与计算值变化趋势基本一致。由于计算模型所限, 在基坑坑底以下深度范围内, 水平位移的计算值与实测结果有较大差异。但由于一般基坑设计中重点关注的是围护结构的最大水平位移, 因此图中未示出该范围内的位移变化曲线。

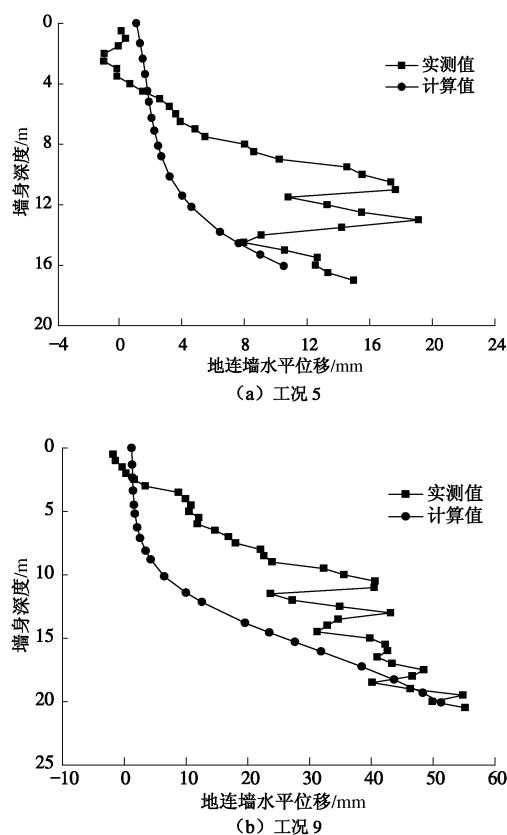


图 8 关键工况地下连续墙水平位移实测值与计算值对比曲线

Fig. 8 Comparison between observed and calculated horizontal displacements of diaphragm wall during key construction stage

图 9 为 WY14 处地下连续墙最大水平位移随施工工况的变化图。从图 9 中可以看出, 开挖完成后 (对应工况 9), 墙身最大水平位移基本稳定。在施工过程中, ABAQUS 计算的地下连续墙最大水平位移为 61.0 mm, 理正深基坑软件计算值为 27.1 mm, 实测值为 63.55 mm。ABAQUS 计算值与实测值差距很小, 其变化规律几乎一致, 而理正深基坑软件计算值远小于实测值。刘燕等指出, 软土地区的深基坑存在时空效应<sup>[10]</sup>。本文通过 ABAQUS 软件对节点基坑建立整体的三维有限元模型, 相比理正深基坑软件而言, 能够更好的考虑基坑空间效应对地下连续墙水平位移的影响。其计算值与实测值吻合较好, 进一步说明了本文模型建立、参数选取以及计算方法是合理的。

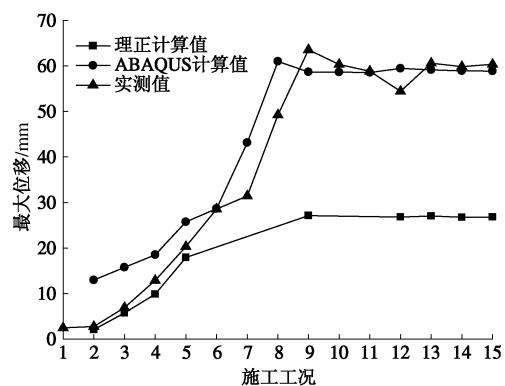


图 9 地下连续墙最大水平位移随施工工况的变化

Fig. 9 Variation of maximum horizontal displacement of diaphragm wall with construction stage

## 4 结 论

(1) 采用 ABAQUS 有限元软件对基坑开挖的施工过程进行模拟研究, 将计算结果与监测结果进行了对比, 结果表明: 地下连续墙最大水平位移的计算值与实测值差距很小, 其发展变化的趋势几乎一致。有限元计算模型和参数选取是合理的, 可用于基坑工程数值模拟分析。

(2) 对于本工程实例而言, 内坑的开挖对外墙水平位移的影响较大, 这可能与深浅坑的水平距离、开挖高差、围护方案及土质条件等因素有关, 具体影响规律尚需进一步研究。

(3) ABAQUS 软件对节点基坑建立整体的三维有限元模型, 相比理正深基坑软件而言, 能够更好的考虑基坑空间效应对地下连续墙水平位移的影响。

(4) 本文所建立的数值模型考虑了土弹簧刚度的动态调整, 实际计算工作量小, 能够较好的模拟地下连续墙最大水平位移的发展, 可用于基坑围护设计中考虑空间效应的水平位移计算分析。

## 参考文献:

- [1] 应宏伟, 杨永文, 胡安峰, 等. 软土某深基坑开挖的实测性状和环境效应分析[J]. 土木工程学报, 2011(增刊 2): 90 - 93. (YING Hong-wei, YANG Yong-wen, HU An-feng, et al. Analysis on observed performance and environmental effect of a deep excavation in soft clay[J]. China Civil Engineering Journal, 2011(S2): 90 - 93. (in Chinese))
- [2] 武朝军, 陈锦剑, 叶冠林, 等. 苏州地铁车站基坑变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2010(增刊 1): 458 - 462. (WU Chao-jun, CHEN Jin-jian, YE Guan-lin, et al. Deformation characteristics of foundation pits of subway stations in Suzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(S1): 458 - 462. (in Chinese))
- [3] 杨有海, 武进广. 杭州地铁秋涛路车站深基坑支护结构性状分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(增刊 2): 3386 - 3392. (YANG You-hai, WU Jin-guang. Analysis of retaining structures for deep foundation pit of qutao road station in Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(S2): 3386 - 3392. (in Chinese))
- [4] 霍润科, 颜明圆, 宋战平. 地铁车站深基坑开挖监测与数值分析[J]. 铁道工程学报, 2011(5): 81 - 85. (HOU Run-ke, YAN Ming-yuan, SONG Zhan-ping. The monitoring and numerical analysis of deep foundation in subway station[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(5): 81 - 85. (in Chinese))
- [5] 刘杰, 姚海林, 任建喜. 地铁车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩土力学, 2010(增刊 2): 456 - 461. (LIU Jie, YAO Hai-lin, REN Jian-xi. Monitoring and numerical simulation of deformation of retaining structure in subway station foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010(S2): 456 - 461. (in Chinese))
- [6] 强健. 深大基坑施工对邻接地铁工程的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010(增刊 1): 1432 - 1437. (QIANG Jian. Analysis of influence of deep excavation on adjacent subway project[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010(S1): 1432 - 1437. (in Chinese))
- [7] 吴铭炳, 林大丰, 戴一鸣, 等. 坑中坑基坑支护设计与监测[J]. 岩土工程学报, 2006(增刊 1): 1569 - 1572. (WU Ming-bing, LIN Da-feng, DAI Yi-ming, et al. Design and monitoring of retaining of pits in foundation-pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006(S1): 1569 - 1572. (in Chinese))
- [8] 霍军帅, 宫全美, 陈娟. 坑中坑基坑围护结构变形特性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011(增刊 1): 139 - 142. (HOU Jun-shuai, GONG Quan-mei, CHEN Juan. Analysis of the deformation of retaining structure of pit-in-Pit excavation[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011(S1): 139 - 142. (in Chinese))
- [9] 侯新宇, 刘松玉, 童立元. 地铁换乘站坑中坑开挖变形特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011(6): 1289 - 1294. (HOU Xin-yu, LIU Song-yu, TONG Li-yuan. Deformation characteristics in pit-in-pit of metro interchange station[J]. Journal of southeast university (Natural Science), 2011(6): 1289 - 1294. (in Chinese))
- [10] 刘燕, 刘国彬, 孙晓玲, 等. 考虑时空效应的软土地区深基坑变形分析[J]. 岩土工程学报, 2006(增刊 1): 1433 - 1436. (LIU Yan, LIU Guo-bin, SUN Xiao-ling, et al. Analysis of deformation laws by using the rule of time-space effect in soft soil excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006(S1): 1433 - 1436. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)