

# 含砂砾土层 SMW 围护结构变形的三维数值分析与监测

李东海<sup>1,2</sup>, 王梦恕<sup>1</sup>, 丁振明<sup>2</sup>, 刘军<sup>3</sup>, 张顶立<sup>1</sup>, 刘继尧<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044; 2. 北京市市政工程院, 北京 100037;

3. 北京市政建设集团有限责任公司, 北京 100045)

**摘要:** 结合某含砂砾地层中的地铁基坑工程, 对这种非软土地层 SMW 围护结构变形情况进行了三维数值模拟分析, 同时对基坑开挖过程中的围护结构变形和周边地表沉降监测数据进行了对比分析。通过综合分析, SMW 围护结构适用于含砂砾地层, 而且其刚度优于桩径 800 mm、桩间距 1400 mm 的排桩围护结构。同时对围护结构变形和周边地表沉降的时空分布规律进行了总结, 为今后类似工程的变形预测及变形控制值的确定提供有益的参考。

**关键词:** 地铁基坑; SMW; 三维数值分析; 现场监测

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0120-05

**作者简介:** 李东海(1977-), 男, 河北泊头人, 高级工程师, 博士研究生, 从事隧道及地下工程监测与评估方面研究。

E-mail: sidenli2000@163.com。

## Three-dimensional numerical analysis and monitoring of deformation of SMW retaining structures of deep excavations in gravelly soils

LI Dong-hai<sup>1,2</sup>, WANG Meng-shu<sup>1</sup>, DING Zhen-ming<sup>2</sup>, LIU Jun<sup>3</sup>, ZHANG Ding-li<sup>1</sup>, LIU Ji-yao<sup>2</sup>

(1. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing

Municipal Engineering Research Institute, Beijing 100037, China; 3. Beijing Municipal Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100045, China)

**Abstract:** According to a deep excavation of subway in gravelly soils, the deformation of SMW retaining structures in non-soft soils is analyzed by three-dimensional numerical analysis. At the same time, the monitoring data of the deformation of retaining structures and the settlement of adjacent ground surface during the excavation of foundation pit are analyzed. Through the comprehensive analysis, the SMW retaining structures are suitable to the gravelly soils and their stiffness is more than that of the row piles with diameter of 800 mm and pile spacing of 1400 mm. The spatial and temporal distribution laws of the deformation of retaining structures and the settlement of the adjacent ground surface are summarized. It may be useful for deformation prediction and determination of control value of similar projects in future.

**Key words:** subway excavation; SMW; three-dimensional numerical analysis; field monitoring

## 0 引言

Soil Mixing Wall (SMW) 围护结构自引入我国以来, 因其具有止水性好、施工速度快、造价低、对周边环境的影响小等特点<sup>[1]</sup>, 从而获得了广泛的应用。特别是在上海、南京等地的软土地层中, 已有十分丰富的研究成果<sup>[2-7]</sup>。周希圣等结合上海的某基坑介绍了国内首次利用 SMW 进行围护的逆筑深基坑设计与施工技术<sup>[8]</sup>; 周顺华等通过用预制桩替代型钢作为劲性材料新工艺的现场实测分析, 论述了该方法的有效性和预制桩内力变化的特征<sup>[9]</sup>; 李罡等结合上海某工程介绍了 SMW 在保护既有近邻旧建筑物中的应用情况, 表明效果很好<sup>[10]</sup>; 刘涛等根据深基坑工程中常规监测得到的 SMW 围护结构的测斜曲线, 提出了一种根据变形

曲线反算弯矩的简便方法<sup>[11]</sup>。虽然成果众多, SMW 在非软土中的应用却未见报道。随着北京地区地铁工程的发展, 地铁基坑的施工环境越来越复杂, 同时对地下水资源的保护和周边邻近建筑物的保护要求越来越严格。鉴于 SMW 的特点在某些方面优于排桩或者地连墙, 所以在北京地铁某基坑工程中采用了 SMW。本文结合北京地区首例 SMW 基坑工程的数值分析和现场监测分析, 对 SMW 在非软土的适用性和围护结构变形规律进行了分析总结, 以期以后的深基坑工程设计等提供参考。

1 工程概况

北京某地铁基坑围护设计方案如下：

(1)桩号K11+049.072—K11+350.000之间槽段采用钻孔灌注桩+网喷桩间混凝土+内支撑结构，灌注桩直径和间距参数为Φ600@1200，设三道内支撑，内支撑体系采用钢围檩加横向。

(2)桩号K11+350.000—K11+402.000之间槽段采用北京首段SMW工法。应用850SMW工法可拔H型钢工艺技术，加两道内支撑，底部应用预应力锚索或刚支撑进行加固，SMW工法段的北侧约20 m为一商务中心；南侧紧邻公路。

根据岩土工程勘察报告，SMW工法试验段场地地面标高约为42.83 m，场地高差小、较平整。地层以粉土、粉质黏土、细中砂为主，局部夹有粉砂层及卵石圆砾层（图1）。

场地工程影响范围内含有三层地下水：上层滞水标高为33.17~38.21 m，主要为城市生活用水；潜水标高为26.23~29.32 m，含水层主要为粉土、粉细砂层，透水性一般，水量较少；微承压水标高位于基槽之下。

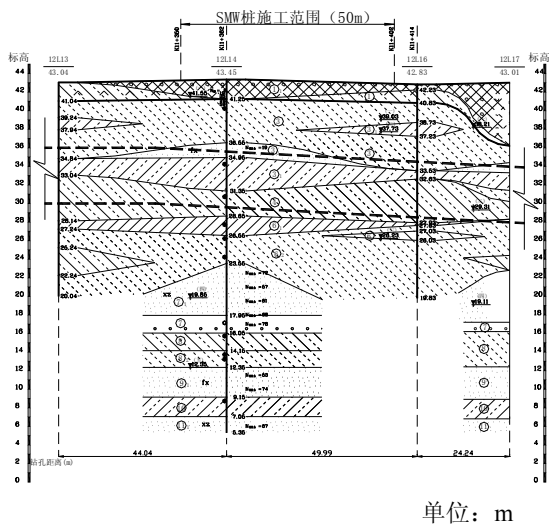


图1 典型地质剖面图  
Fig. 1 Typical geological profile

2 SMW 围护结构设计

基坑总深度约14~12.7 m（由桩顶起算），围护结构净宽度16 m。SMW桩试验段围护结构体系主要采用H型钢+内支撑，内支撑沿深度方向上共分3道，选用钢管内支撑，围护结构体系的设计参数见图2。

钻孔直径Φ850 mm，两根搅拌桩搭接为250 mm，内插H型钢中心距1200 mm（图3）；H型钢尺寸为700×300×24×13，型钢钢号为A3，H钢梁长21.5 m。桩

墙水泥土采用#425普硅水泥，水泥掺量20%。

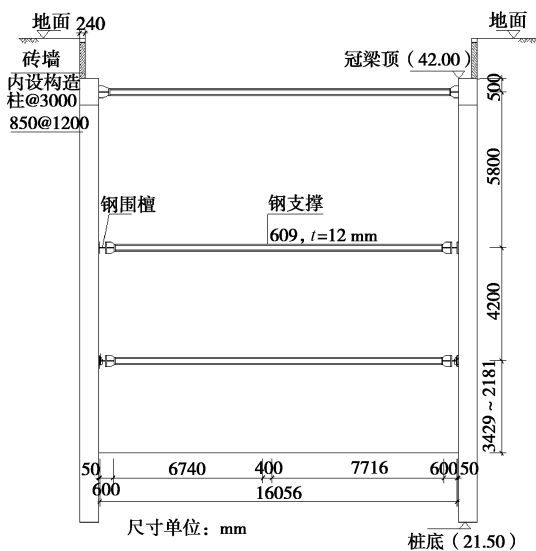


图2 基坑横断面图  
Fig. 2 Section of excavation

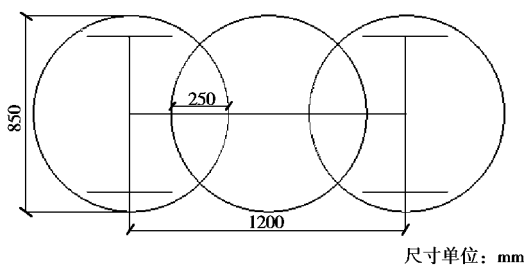


图3 SMW工法布置图  
Fig. 3 Arrangement of SMW retaining wall

3 基坑开挖方式

SMW工法基坑开挖横向由东向西顺向进行，由于在北京地区该工法围护结构的刚度表现和变形特征没有经验可以借鉴。因此，对基坑开挖过程应进行严格的控制。

为了有效控制基坑围护结构的变形，施工中必须加强内支撑设置的及时性，基坑土方开挖采用平面分段、纵向台阶分层下降方式进行基坑开挖。

基坑开挖在平面东西方向上分成两段，每段长约25 m，在竖向方向上分层开挖下降，基槽中部开挖深度控制到挖土机械可操作空间的要求即可，在支撑位置预留一定宽度的基坑边壁土，减小由于土体开挖的而引起的较大卸荷作用，有效控制围护结构的变形。

4 围护结构变形的三维数值分析

为了研究该开挖方案的合理性，对开挖方式进行了数值模拟分析。模拟每一步开挖过程中地表、围护结构的变化规律，从而对开挖拟采用的开挖方法综合评价。



表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soils

地层名称	地层厚度/m	压缩模量/kPa	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	泊松比	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
杂填土	3.8	7000	17.0	0.42	10	10
粉 土	3.5	11000	19.5	0.30	31	30
粉质黏土 1	4.7	13000	20.0	0.34	36	16
粉质黏土 2	2.0	12500	20.0	0.30	38	20
细中砂	5.0	30000	19.5	0.34	30	20

表 2 模拟桩体基本参数表

Table 2 Parameters of piles in numerical model

桩长/m	周长/m	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	截面积/m <sup>2</sup>
21	2.67	2.6	5.0×10 <sup>4</sup>	0.20	0.567
切向耦合弹簧参数			法向耦合弹簧参数		
黏聚强度/(N·m <sup>-1</sup> )	摩擦角/(°)	刚度/(N·m <sup>-2</sup> )	黏聚强度/(N·m <sup>-1</sup> )	摩擦角/(°)	刚度/(N·m <sup>-2</sup> )
1.0×10 <sup>8</sup>	20	1.0×10 <sup>11</sup>	1.0×10 <sup>8</sup>	20	1.0×10 <sup>10</sup>

4.1 模拟计算参数的设定

根据地质勘察报告，场地内的开挖深度内，土体自上而下为：杂填土、粉质黏土、细中砂、粉土和卵石圆砾。卵石圆砾层厚度较薄（小于1 m）且分布不均，因此计算中未考虑该层土。模拟时将地层以物理力学的特点简化划分为5个不同的材料类别，各土层的物理力学性质计算值见表1。

基坑围护结构中，模拟的结构主要包含SMW桩体、钢围檩和内支撑。SMW桩采用PILE结构单元进行模拟，在基坑两侧布置，综合考虑SMW桩的几何关系和面积模量，SMW桩体模拟参数采用如表2。围檩、支撑采用BEAM结构单元，具体参数不再赘述。

4.2 计算分析结果

通过数值分析，初步预测 SMW 围护结构与周边地表变形的最大值和变化规律，并提出围护结构水平位移控制值为 30 mm，周边地表沉降的控制值为 20 mm。对于围护结构水平位移，桩体的最大水平位移为 28 mm，桩顶最大水平位移 20 mm，随基坑的开挖，桩体位移逐渐变大，位移最大值位置逐渐下移，最终稳定在距基坑 7 m 深度处，图 4 为沿基坑纵向选取的含中间剖面的 3 个剖面上的桩体水平位移，最大值出现在中间剖面上。对于地表沉降，最大值为 10.4 mm，距基坑坡顶水平距离 2 m 处的地表沉降最终极大值为 10.4 mm；距基坑坡顶水平距离 5 m 处的地表沉降最终极大值为 10.0 mm；距基坑坡顶水平距离 15 m 处的地表沉降最终最大值为 10.4 mm（图 5）。

5 现场监测

监测内容主要为桩体位移和周边地表沉降，桩体位移采用精度为 0.02 mm/0.5 m 的测斜仪进行量测，地表沉降采用精度为 0.3 mm/km 的电子精密水准仪进行量测。测点的布设如图 6 所示。在监测过程中同时对其邻近的 Φ800@1400 混凝土灌注桩围护结构的变

形进行监测，以便于监测数据的对比分析。

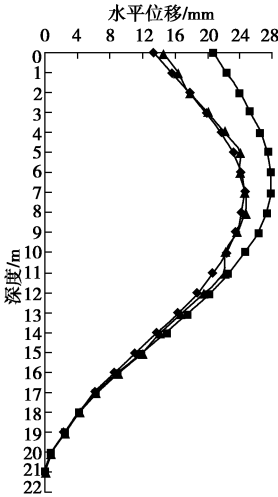


图 4 围护结构水平位移计算结果

Fig. 4 Calculated results of horizontal displacement of retaining structures

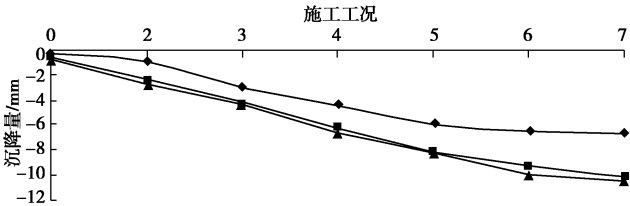


图 5 基坑周边地表沉降计算结果

Fig. 5 Calculated results of ground settlement around excavation

6 监测数据对比分析

6.1 桩体水平位移监测分析

桩体水平位移是反映围护结构刚度和基坑开挖安全风险的主要监测项目，经过细致分析形成典型的变化规律曲线，如图 7，由图 7 可以看出基坑两侧的变形并非如模拟一般，而是北侧的桩体变形较南侧的桩体变形增加了近 13 mm，这可能是由于基坑北侧力学

性质差的杂填土分布深度较大而引起的相对变形较大。桩体变形最大值为 26 mm，位于基坑深度 7~8 m 位置间，与数值模拟的计算值基本一致。另外，冠梁和第一道支撑的作用明显，对桩顶的位移控制有着极为重要的作用，在施工中应及时跟进设置内支撑以减小桩体位移。总之，影响 SMW 的桩体位移的因素众多，主要仍是 SMW 自身刚度，土层的力学性质，开挖方式与速度，支撑的及时性等。

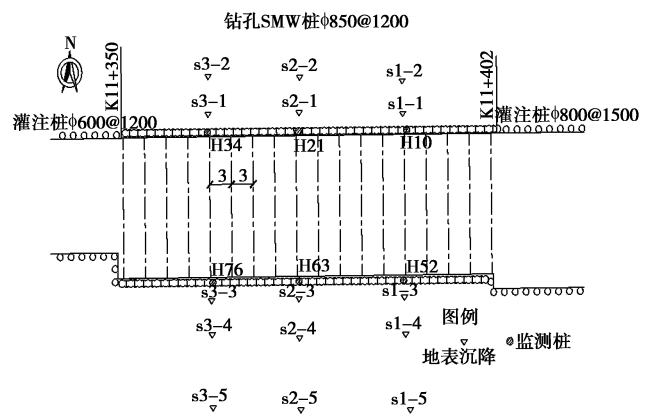


图 6 监测点平面布置图  
Fig. 6 Layout of monitoring points

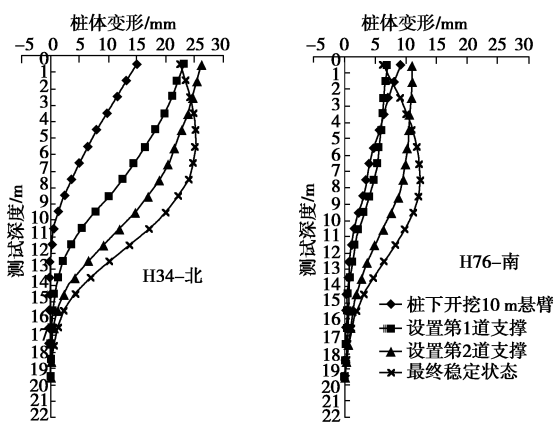


图 7 围护结构水平位移监测数据分析  
Fig. 7 Curves of horizontal displacement of retaining structures

图 8 为邻近的 SMW 和混凝土灌注桩桩体变形对比分析图，从图 8 可以看出 SMW 桩的刚度整体性较灌注桩均匀，桩体变形的协调性较好；灌注桩的变形表现出变化的幅度大，变异性大。支撑的位置对灌注桩的变形产生了较大的影响，在支撑位置处均出现较大的变形减缓区间；而 SMW 桩体变形受支撑作用得减缓变化比灌注桩小。灌注桩桩体最大变形为 16.2 mm，灌注桩桩体位移最大处为基坑深度 10.5 m 处。SMW 桩体最大变形为 10.42 mm，SMW 桩体位移最大处为基坑深度 8.5 m 处，总体来看，SMW 刚度较灌注桩好。

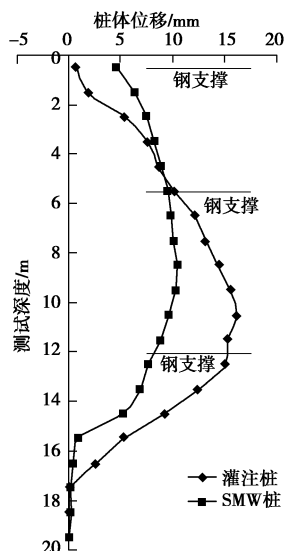


图 8 SMW 与灌注桩水平位移对比分析  
Fig. 8 Comparative analysis curves of horizontal displacement of retaining structures

## 6.2 周边地表沉降监测分析

地表沉降监测是控制周边环境风险最直接的监测项目，当无特别重要的邻近建筑物时，取 20 mm 为控制值。图 9 为地表沉降监测历时曲线，从图 9 可以看出：基坑两侧的地表沉降变化相差较大，北侧的 s3-1，s3-2 点沉降较大且大于模拟计算的 10.4 mm。而南侧的 s3-3、s3-4、s3-5 测点总体偏小，且表现出随着距基坑边缘的距离增加，沉降值减小。北侧沉降值较大可能有两个主要影响因素：一是北侧杂填土分布深度较大，扰动后沉降大；二是由于北侧开挖的速度较快，使得围护结构的变形较大，为地表沉降提供了较大的空间。这也验证了桩体水平位移与周边地表沉降具有一定的相关性。同时，通过邻近的 SMW 和混凝土灌注桩桩后地表沉降历时曲线的对比分析，得出地表沉降时空分布规律一致，只是由于 SMW 的刚度优于本工程中的混凝土灌注桩，其后地表沉降的最值相对较小。

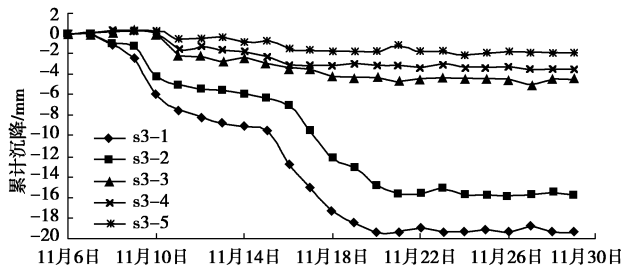


图 9 基坑周边地表沉降历时曲线  
Fig. 9 Variation curves of ground settlement around excavation with time

## 7 结 论

(1) 通过监测分析表明，SMW 适用于含砂砾的土层。桩体水平位移最大值为 26 mm，地表沉降的最

大值为近 20 mm, 均满足基坑工程自身安全和周边环境安全的要求。当不能采取降水措施或者邻近有重要建筑物时, 可以充分利用 SMW 的止水性好、对周边环境的影响小等特点。

(2) 通过 SMW 和混凝土灌注桩桩体变形及桩后地表沉降监测的对比分析, SMW 和混凝土灌注桩这两种围护结构的变形时空分析规律基本一致, 但 SMW 的整体刚度和变形的协调性都优于混凝土灌注桩。

(3) 三维数值分析在一定程度上反映了围护结构和地表沉降的变化规律, 但在最大值的预测方面并不准确, 当进行具有重大风险的基坑工程施工时, 变形监测是控制其风险的有效而直接的措施。

#### 参考文献:

- [1] 张忠苗, 赵玉勃, 吴世明, 等. 过江隧道深基坑中 SMW 工法加钢支撑围护结构现场监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(6): 1271 - 1278. (ZHANG Zhong-miao, ZHAO Yu-bo, WU Shi-ming, et al. In-situ monitoring analysis of retaining structure of SMW piles plus steel support in deep foundation pit of a river-cross tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(6): 1271 - 1278. (in Chinese))
- [2] 杨有海, 王建军, 武进广, 等. 杭州地铁秋涛路车站深基坑信息化施工监测分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(10): 1550 - 1554. (YANG You-hai, WANG Jian-jun, WU Jin-guang, et al. Informationized construction monitoring analysis of deep foundation pit for Qiutao Road station of Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(10): 1550 - 1554. (in Chinese))
- [3] 安关峰, 高峻岳. 广州地铁公园前地下空间深基坑综合支护监测分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(6): 872 - 979. (AN Guan-feng, GAO Jun-yue. Comprehensive analysis of deep foundation pits for underground space in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(6): 872 - 979. (in Chinese))
- [4] 安关峰, 宋二祥. 广州地铁琶洲塔站工程基坑监测分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(3): 333 - 337. (AN Guan-feng, SONG Er-xiang. The analysis of excavation monitoring for the Pazhou subway station in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(3): 333 - 337. (in Chinese))
- [5] 戴宏伟, 陈仁鹏, 陈云敏. 地面新施工荷载对邻近地铁隧道纵向变形的影响分析研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(3): 312 - 316. (DAI Hong-wei, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min. Study on effect of construction loads on longitudinal deformation of adjacent metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(3): 312 - 316. (in Chinese))
- [6] 李东海, 萧岩, 刘军, 等. 浅埋暗挖隧道穿越既有地铁线路的实时动态监测与分析[J]. 建筑技术, 2006, **37**(增刊): 96 - 98. (LI Dong-hai, XIAO Yan, LIU Jun, et al. In-situ real-time-dynamic monitoring and analysis of the process of shallow-tunnel thru existent subway[J]. Architecture Technology, 2006, **37**(S0): 96 - 98. (in Chinese))
- [7] 张冠军, 徐永富, 傅德明. SMW 工法型钢起拔试验研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(3): 444 - 448. (ZHANG Guan-jun, XU Yong-fu, FU De-ming. Testing study and application of shape steel pullout in SMW construction method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(3): 444 - 448. (in Chinese))
- [8] 周希圣, 陈裕康, 张伟. SMW 围护深基坑逆筑法设计研究与工程实践[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4): 511 - 515. (ZHOU Xi-sheng, CHEN Yu-kang, ZHANG Wei. Design and practice of SMW top-down construction method in deep pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(4): 511 - 515. (in Chinese))
- [9] 周顺华, 刘建国, 潘若东, 等. 新型 SMW 工法基坑围护结构的现场试验和分析[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(6): 659 - 662. (ZHOU Shun-hua, LIU Jian-guo, PAN Ruo-dong, et al. Field test and analysis on using the new SMW method to brace the pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(6): 659 - 662. (in Chinese))
- [10] 李罡, 许铭. 与旧有建筑近距离的基坑围护采用 SMW 工法施工的技术措施[J]. 建筑施工, 2007, **29**(3): 163 - 164. (LI Gang, XU Ming. Several ways of SMW construction method for foundation pit excavation support close-up to existing building[J]. Building Construction, 2007, **29**(3): 163 - 164. (in Chinese))
- [11] 刘涛, 刘国彬, 吴小将. SMW 围护结构内插型钢弯矩估算方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, **1**(4): 498 - 501. (LIU Tao, LIU Guo-bin, WU Xiao-jiang. Study on approximate method for calculating bending moment based on SMW lateral deformation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, **1**(4): 498 - 501. (in Chinese))

(本文责编 明经平)