

DOI: 10.11779/CJGE2015S1001

# TRD 水泥土搅拌墙施工环境影响分析及微变形控制措施

王卫东<sup>1, 2</sup>, 陈永才<sup>1, 2</sup>, 吴国明<sup>3</sup>

(1. 华东建筑设计研究总院地基基础与地下工程设计研究中心, 上海 200002; 2. 上海基坑工程环境安全控制工程技术研究中心, 上海 200002; 3. 上海广大基础工程有限公司, 上海 200032)

**摘 要:** TRD 水泥土搅拌墙在深大基坑工程中的应用逐渐增多。TRD 水泥土搅拌墙在施工过程中不可避免会对邻近土体产生扰动, 在复杂的城市环境中水泥土搅拌墙施工扰动可能对周边环境产生一定的影响。在上海虹桥商务区一期 08 地块项目、上海新闻路西斯文里项目和上海国际金融中心项目基坑工程中, 超深水泥土搅拌墙试成墙实施期间对邻近土体侧向位移、地表沉降进行了监测, 根据监测结果对水泥土搅拌墙施工环境影响作了系统分析。分析结果表明, TRD 水泥土搅拌墙施工过程中对周边环境的影响总体较小, 邻近地表最大沉降和土体侧向位移均小于 10 mm, 主要影响范围在 10 m 之内, 并基于敏感环境的保护要求提出了控制墙体施工微变形影响的技术措施。

**关键词:** 基坑; TRD 工法; 等厚度水泥土搅拌墙; 环境影响; 微变形

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0001-05

**作者简介:** 王卫东(1969-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地基基础与地下工程的设计研究。E-mail: weidong\_wang@ecadi.com。

## Impact analysis and macro-deformation control measures of TRD construction cement-soil mixing walls

WANG Wei-dong<sup>1, 2</sup>, CHEN Yong-cai<sup>1, 2</sup>, WU Guo-ming<sup>3</sup>

(1. Department of Underground Structure & Geotechnical Engineering, East China Architecture Design & Research Institute, Shanghai 200002, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Safety Control for Facilities Adjacent to Deep Excavations, Shanghai 200002, China; 3. Shanghai Guangda Foundation Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** TRD construction cement-soil mixing walls have been increasingly used in deep and large excavations. The TRD construction will disturb the soils around construction panels and hence influence the nearby facilities when it is used in urban areas. Field monitoring is carried out on lateral soil displacements and ground surface settlements during TRD construction in three projects, i.e., Hongqiao Business District-08 block (phase I), Shanghai Xisiwenli excavation on Xinsha Road, and Shanghai International Financial Center. Based on the field monitoring results, the impact of TRD construction on the nearby environment is systematically analyzed. It is shown that the overall influence of TRD construction on the nearby environment is small. Both the measured maximum ground surface settlement and lateral soil displacement are less than 10 mm in all the three cases. Moreover, the influence zone of TRD construction is within 10 m away from the panel. Some measures for minimizing the deformation during TRD construction are also proposed and discussed.

**Key words:** excavation; TRD construction method; constant thickness cement-soil wall; environmental impact; micro-deformation

## 0 引 言

TRD 水泥土搅拌墙施工通过纵向和横向切削土体, 使土体与水泥浆液充分搅拌混合形成等厚度墙体, 施工过程对墙体范围内的原状土体进行了破坏, 并且 TRD 水泥土搅拌墙的深度一般较深, 施工过程中不可避免地会对邻近的土体产生扰动, 在复杂的城市环境中, 这种土体扰动可能对周边环境产生一定的影响。根据 TRD 水泥土搅拌墙在日本工程中的实践, 搅拌成

墙施工对周边环境的影响较小, 均处于可控范围内。但是国内地质条件和城市环境条件更加复杂, TRD 水泥土搅拌墙的深度更大, 因此开展对 TRD 水泥土搅拌墙施工期间的环境影响研究对于进一步完善搅拌墙施工工艺和基坑工程变形控制以及推广该工法的应用均

**基金项目:** 上海市科委工程技术研发中心平台建设项目 (13DZ2251400); 上海市科委科研计划子项 (13231201006)

收稿日期: 2015-03-26

有重要意义<sup>[1-4]</sup>。

笔者在上海国际金融中心项目中进行了 TRD 水泥土搅拌墙对周边环境影响的实测研究, 研究表明 TRD 水泥土搅拌墙施工过程中对周边环境的影响均为毫米级<sup>[5]</sup>。为系统的研究 TRD 水泥土搅拌墙在不同的土层以及施工深度条件下对周边环境的影响, 笔者结合上海虹桥商务区一期 08 地块项目、上海新闻路西斯文理项目基坑工程 TRD 水泥土搅拌墙试成墙实施期间的环境影响监测, 对水泥土搅拌墙施工的环境影响进行了综合分析, 并提出了敏感环境下控制墙体施工微变形影响的技术措施。

## 1 TRD 水泥土搅拌墙成墙试验

### 1.1 上海虹桥商务区一期 08 地块

#### (1) 工程概况

上海虹桥商务区一期 08 地块基坑面积约为  $4.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 挖深约 17.05 m, 基坑总体支护设计方案: 板式围护结构结合三道钢筋混凝土临时支撑的顺作法设计方案。采用  $\Phi 1250 \sim 1300 \text{ mm}$  灌注桩围护体, 采用“桩墙合一”技术<sup>[6]</sup>。灌注桩外侧设置 800 mm 厚 TRD 水泥土搅拌墙作为悬挂隔水帷幕, 悬挂隔水帷幕搅拌桩插入地面以下 52 m, 水泥掺量不小于 25%。

本工程基底处于第④层灰色淤泥质黏土层中, 在开挖深度范围的土层中有②层、③层、④层土。场地分布有⑤<sub>2</sub>层、⑦层和⑧<sub>2</sub>层承压含水层土, 是上海地区微承压含水层和承压含水层。本场地大部分区域⑤<sub>2</sub>层、⑦层与⑧<sub>2</sub>层承压水连通, 勘察期间测得承压水头为 5.0~6.0 m。

为确定 TRD 水泥土搅拌墙的施工参数, 在正式墙体施工前进行了非原位试成墙试验。试成墙深度 52 m, 长度 8 m, 厚度 800 mm, 墙底进入第⑦砂质粉土层。TRD 水泥土搅拌墙采用三工序成墙施工工艺(即先行挖掘、回撤挖掘、成墙搅拌), 对地层先行挖掘松动后, 再行喷浆搅拌固化成墙。在 TRD 水泥土搅拌墙

试成墙过程中, 布设地表沉降监测点和深层水平位移监测点进行相应监测。监测点布置图如图 1 所示。

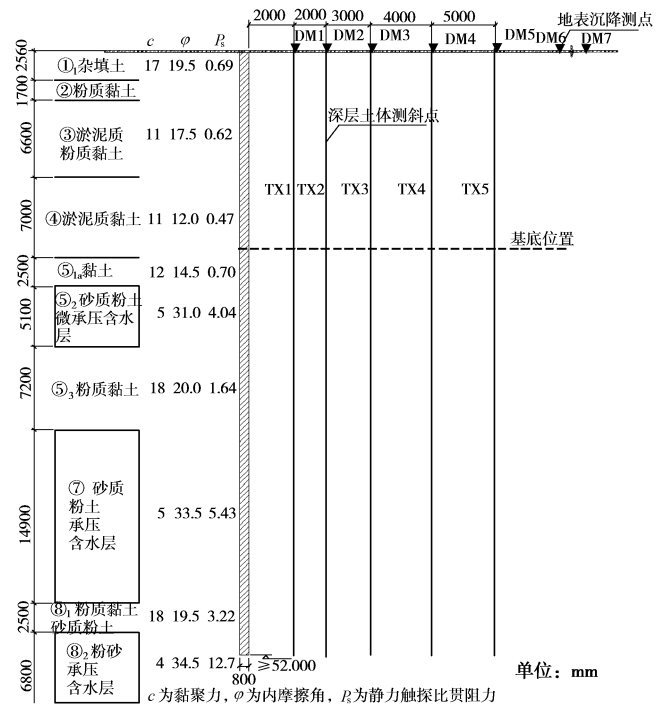


图 1 试验监测点剖面布置图

Fig. 1 Sectional view of monitoring points

#### (2) 深层土体侧向位移

图 2 为水泥土搅拌墙试成墙养护 2 天距离试验墙体 2, 4, 7, 11, 16 m 的测斜点测得的土体侧向位移曲线。从图中可以看出, 土体侧向位移主要朝向成墙侧, 类似于悬臂结构的变形形态, 顶部位移相对较大, 随着深度增加, 侧向位移逐渐变小; 距离成墙越近, 土体侧向位移相对越大, 最大侧向位移约 8 mm, TX5 测点距离试成墙较远, 成墙施工的影响较小, 土体侧向位移平面影响范围主要在距墙体约 7 m 的范围内。总体而言, 在距离试成墙 7 m 范围内, 深层土体侧向位移由近及远逐步减小。

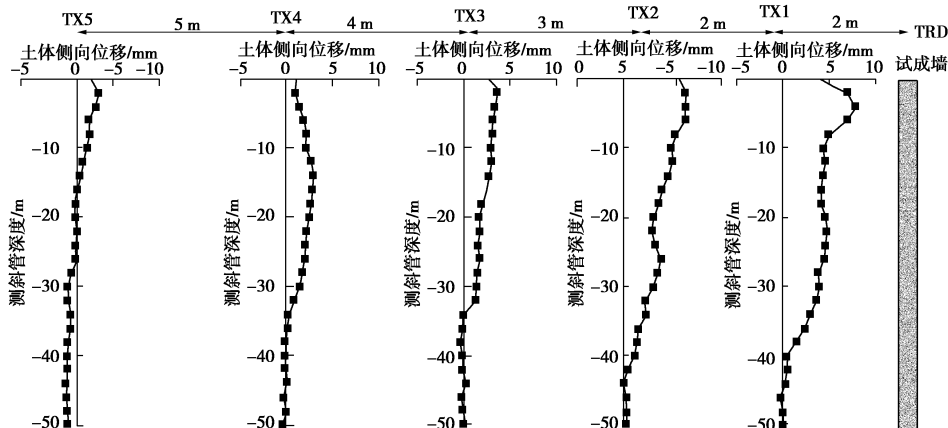


图 2 土体测斜曲线

Fig. 2 Lateral displacements in soil inclinometers

(3) 地表沉降

图 3 为试成墙施工期间邻近地表沉降分布曲线。从图中可以看出, 距离试成墙越近, 地表沉降相对越大, 最大沉降约 4 mm; 随距离增大, 地表沉降逐渐减小。试成墙施工对地表沉降的主要影响范围约 5 m, 最大沉降为 4 mm, 影响程度属于毫米级。

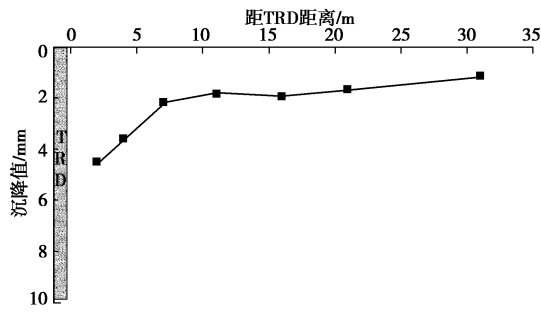


图 3 地表沉降曲线

Fig. 3 Curves of surface settlement

1.2 上海新闻路西斯文理成墙试验

(1) 工程概况

上海新闻路西斯文理地下室设 3~4 层, 基坑围护面积约  $1.0 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 基坑开挖深度 15.75~18.65 m, 基坑总体支护设计采用分区顺作方案。为减小承压水降水对紧邻地铁隧道及建筑物等环境的影响, 本工程在已施工围护地墙外侧设置等厚度水泥土搅拌墙, 以隔断⑦层承压含水层。

场地属滨海平原地貌, 场地内较为平坦, 本工程基底处于第③层灰色淤泥质粉质黏土层中, 在开挖深度范围的土层中有②层、③层土。场地分布有⑦<sub>1</sub>层和⑦<sub>2</sub>层承压含水层, 是上海地区微承压含水层和承压含水层。勘察期间测得承压水头为 8.1~8.5 m。

为确定 TRD 水泥土搅拌墙的施工参数, 在正式墙体施工前在原位进行了试成墙试验。试成墙深度 50 m, 长度 12 m, 厚度 700 mm, 墙底进入⑧层黏土层不小于 3 m。TRD 水泥土搅拌墙同样采用三工序成墙施工工艺, 对地层先行挖掘松动后, 再行喷浆搅拌固化成墙。

在 TRD 水泥土搅拌墙试成墙过程中, 布设地表沉降监测点和深层水平位移监测点进行相应监测。监测点布置图如图 4 所示。

(2) 深层土体侧向位移

图 5 为水泥土搅拌墙试成墙施工期间土体侧向位移分布曲线。从图中可以看出, 试成墙施工过程中引起的土体侧向位移方向朝向墙体位置, 类似于悬臂结构的变形形态, 顶部位移相对较大, 随着深度增加, 侧向位移逐渐变小; 距离墙体越近, 土体侧向位移相对越大, 最大侧向位移约 3 mm, 位于约 8 m 深度,

TX3 测点距离试成墙较远, 成墙施工的影响较小。总体而言, 试成墙施工期间引起的邻近土体的侧向位移较小。

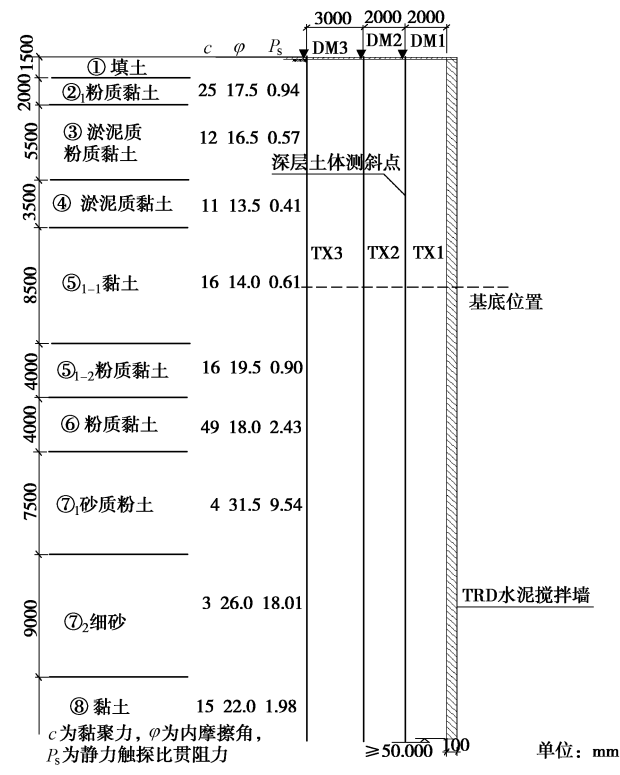


图 4 试验监测点剖面布置图

Fig. 4 Sectional view of monitoring points

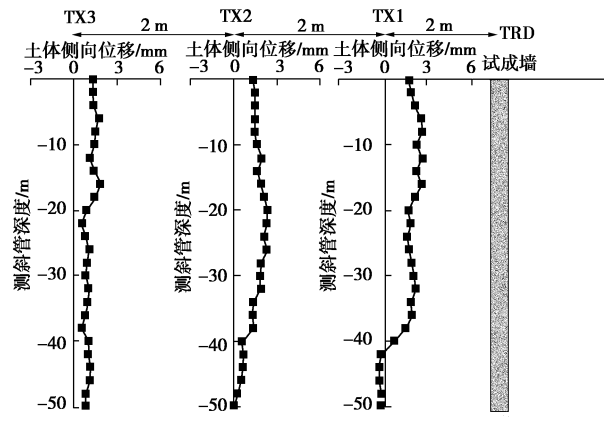


图 5 土体测斜曲线

Fig. 5 Lateral displacements in soil inclinometers

(3) 地表沉降

图 6 为试成墙施工期间邻近地表沉降分布曲线。从图中可以看出, 距离试成墙越近, 地表沉降相对越大, 最大沉降约 2.7 mm; 随距离增大, 地表沉降逐渐减小。总体而言, TRD 工法墙体施工期间, 引起的邻近土体的变形较小。

1.3 上海国际金融中心项目

上海国际金融中心项目试成墙环境影响分析详见

文献[5]。试验时深层土体侧向位移监测表明,试成墙施工过程中引起的土体侧向位移方向朝向墙体位置,类似于悬臂结构的变形形态,土体侧向位移随深度增大大致呈减小的趋势;距离墙体越近,土体侧向位移相对越大,距离墙体 1.4 m 处,除顶口位置存在异常外,侧向位移最大约 11 mm,在距离试验墙体 22 m 处,侧向位移几乎为 0。TRD 成墙施工时,土体侧向位移影响范围主要是在 5 m 远的范围之内。

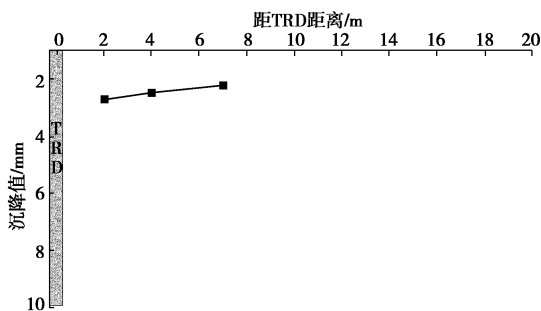


图 6 地表沉降曲线

Fig. 6 Curves of surface settlement

地表沉降监测表明,靠近墙体处地表有一定的沉降,随距离增大,地表沉降逐渐减小。最大沉降约为 8 mm,距离墙体 5 m 以外,地表沉降小于 5 mm,TRD 成墙施工时,成墙的主要影响范围约 5 m。

## 2 TRD 水泥土搅拌墙施工环境影响分析

根据上述 3 个基坑工程案例的深层土体侧向位移监测分析表明,TRD 水泥土搅拌墙试成墙过程中,邻近土体产生朝向成槽方向的侧向变形,土体侧向位移随深度增大大致呈减小的趋势;随距墙体距离的增大,成墙影响逐渐减小,成墙对周边土体的影响范围主要集中在距墙体约 10 m 内;土体侧向变形量较小,最大变形不超过 10 mm。

根据上述 3 个基坑工程案例的地表沉降监测分析表明,靠近墙体处地表有一定的沉降,随距离增大,地表沉降逐渐减小。最大沉降约为 4~8 mm,距离墙体 5 m 以外,地表沉降小于 5 mm,TRD 成墙施工时,地表沉降主要分布在 5 m 范围内。TRD 水泥土搅拌墙施工引起的最大地表沉降量与成墙深度的比值约 0.15%。

## 3 控制成墙施工微变形影响的技术措施

上述实测分析表明,TRD 水泥土搅拌墙施工对周边环境的影响总体较小。但对于邻近更加敏感环境的深基坑工程,从环境影响微变形控制角度,可进一步采取如下技术措施,减小对周边环境的影响:

(1) 通过试成墙试验确定合理施工参数

TRD 水泥土搅拌墙施工对周边环境的影响与地层条件关系密切,首先需根据工程经验并结合环境变形控制要求初步确定合理的施工参数。正式施工前应进行现场试成墙试验对施工参数及保护措施进行验证和修正。在试成墙施工前应布设土体测斜、地面沉降及土体分层沉降等监测点,在试成墙各个工序中进行跟踪监测,以掌握 TRD 水泥土搅拌墙施工各阶段的土体及环境变形规律,为制定合理、可行的施工参数提供依据。

(2) 控制先行挖掘单次掘进长度和喷浆成墙时间

由于 TRD 水泥土搅拌墙先行挖掘时采用泥浆护壁,结合已有工程实测数据,先行挖掘至喷浆成墙前的阶段深层土体及地表沉降最大,且墙体越深、单次掘进长度越长、静置时间越长影响越大。因此,为控制先行挖掘成槽阶段对周边环境的影响,在墙体深度一定的情况下,控制单次挖掘长度、缩短喷浆成墙时间是减小对周边环境的关键。

(3) 控制先行挖掘掘进速度,提高挖掘液泥浆持壁性能

先行挖掘过程中随着切割箱掘进要及时向槽内补充挖掘液,防止槽内液面过低造成坍塌。先行挖掘过程中掘进速度不宜过快,宜控制在 60~90 min/m,一方面可以降低挖掘液补充不及时的风险,另一方面可以防止掘进速度过快引起坍塌。

挖掘液的持壁性能直接关系到槽壁稳定性,为了增强槽壁稳定性,挖掘液宜采用具有一定黏度和流动度的膨润土浆液,对砂层较厚的地层条件,在挖掘液配置不宜采用钙基土膨润土,应采用性能更稳定的钠基土膨润土,同时应适当加大膨润土泥浆比重,以增加挖掘液的持壁性能,确保槽壁稳定性。

(4) 施工作业范围采取应力扩散措施

结合工程实践,地表浅层土体承载力较低、土性较差时,可在 TRD 工法机施工范围内采用铺设钢筋混凝土路面和施工钢筋混凝土导墙的方案,以扩散设备的基底压力,确保地基承载力和槽壁稳定满足要求。混凝土路面及导墙有效避免了设备行走及切割过程中路面塌陷、槽壁坍塌问题,有利于确保槽壁稳定性,在保证设备安全施工的同时,可有效减小由于槽壁变形、槽壁坍塌对周边环境的影响。

## 4 结 论

本文基于上海虹桥商务区一期 08 地块、上海新闻路西斯文理、上海国际金融中心项目基坑工程深度 50~56 m 的水泥土搅拌墙成墙实施期间对邻近土体侧向位移、地表沉降的监测结果,分析了超深 TRD

水泥土搅拌墙施工对周边环境的影响, 并从施工角度提出了敏感环境下控制搅拌成墙微变形影响的技术措施, 主要结论如下:

(1) 超深 TRD 水泥土搅拌墙一般采用“三工序”成墙施工, 在墙体先行挖掘和回撤挖掘阶段, 由于开槽区域土体应力释放, 挖掘稳定液未完全补偿释放的应力, 使得槽壁向槽内产生变形, 同时地表产生一定沉降。

(2) TRD 水泥土搅拌墙成墙过程中, 邻近土体产生朝向成槽方向的侧向变形, 土体侧向位移随深度增大大致呈减小的趋势; 随距墙体距离的增大, 成墙影响逐渐减小, 成墙对周边土体的影响范围主要集中在距墙体约 10 m 内; 土体侧向变形量较小, 最大变形约 10 mm。在 TRD 成墙过程中, 周边土体总体变形较小, 对周边环境影响较小。

(3) 超深 TRD 水泥土搅拌墙施工对周边环境影晌总体较小, 针对敏感环境下的基坑工程, 可采取控制墙体施工微变形影响的技术措施有: 通过试成墙试验确定合理施工参数; 减小单次掘进长度, 控制喷浆成墙时间; 控制先行掘进速度, 提高挖掘液泥浆持壁性能; 施工作业范围采取应力扩散措施。

#### 参考文献:

- [1] 王卫东, 邸国恩, 王向军. TRD 工法构建的等厚度型钢水泥土搅拌墙支护工程实践[J]. 建筑结构, 2012, 42(5): 168 - 171. (WANG Wei-dong, DI Guo-en, WANG Xiang-jun. Engineering practice of the constant thickness steel cement-soil wall constructed by TRD method[J]. Building Structure, 2012, 42(5): 168 - 171. (in Chinese))
- [2] 王卫东, 常林越, 谭 轲. 采用 TRD 工法控制承压水的邻近地铁深基坑工程设计与实践[J]. 岩土力学, 2012, 42(5): 168 - 171. (WANG Wei-dong, CHANG Lin-yue, TAN Ke. Design and practice of a deep excavation using TRD construction method cutting off confined water nearby subway tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 42(5): 168 - 171. (in Chinese))
- [3] 李 星, 谢兆良, 李进军, 等. TRD 工法及其在深基坑工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 945 - 950. (LI Xing, XIE Zhao-liang, LI Jin-jun, et al. TRD method and its applications in the deep excavation engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(5): 945 - 950. (in Chinese))
- [4] 王卫东, 邸国恩. TRD 工法等厚度水泥土搅拌墙技术与工程实践[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 628 - 633. (WANG Wei-dong, DI Guo-en. Engineering practices of constant thickness steel cement-soil wall constructed by TRD method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 628 - 633. (in Chinese))
- [5] 王卫东, 翁其平, 陈永才. 56 m 深 TRD 工法搅拌墙在深厚承压含水层中的成墙试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3247 - 3252. (WANG Wei-dong, WENG Qi-ping, CHEN Yong-cai. Experimental investigation of construction of a 56m deep constant thickness cement-soil wall using Trench Cutting Re-mixing Deep Wall (TRD) method in deep aquifers [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3247 - 3252. (in Chinese))
- [6] 王卫东, 沈 健. 基坑围护排桩与地下室外墙相结合的“桩墙合一”的设计与分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 303 - 308. (WANG Wei-dong, SHEN Jian. Design and analysis of unity of support piles and basement external walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S0): 303 - 308. (in Chinese))
- [7] 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 Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering handbook[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press. 2009. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)