

# TRD工法等厚度水泥土搅拌墙技术与工程实践

王卫东, 邱国恩

(华东建筑设计研究院有限公司地基基础与地下工程设计研究所, 上海 200002)

**摘要:** TRD (trench cutting re-mixing deep wall) 工法构建的等厚度水泥土搅拌墙具有地层适用性广、墙体均质性好、隔水性能可靠等特点。详细介绍了 TRD 工法构建的等厚度水泥土搅拌墙围护结构的承载变形特性、设计方法、施工关键技术、检测方法, 以及作为基坑型钢水泥土搅拌墙围护结构和超深隔水帷幕的工程实践。

**关键词:** TRD 工法; 等厚度水泥土搅拌墙; 超深隔水帷幕; 承载变形特性

中图分类号: TU463 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0628-06

**作者简介:** 王卫东 (1969-), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 教授级高工, 主要从事基坑及桩基的设计与研究工作。E-mail: weidong\_wang@ecadi.com。

## Engineering practices of constant thickness steel cement-soil wall constructed by TRD method

WANG Wei-dong, DI Guo-en

(Department of Underground Structure & Geotechnical Engineering, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd.,  
Shanghai 200002, China)

**Abstract:** The constant thickness steel cement-soil wall constructed by TRD (trench cutting re-mixing deep wall) method is a new type of retaining structure. TRD walls have many advantages, such as wide applicability for multiple strata, good homogeneity of walls and reliability of watertight performance. Therefore, TRD walls used as steel cement-soil retaining structure and ultra-deep impermeable curtain have been successfully applied in many deep excavations in China. The design, construction, test and engineering application of steel cement-soil retaining structure and ultra-deep impermeable curtain constructed by TRD method are introduced.

**Key words:** TRD construction method; constant thickness steel cement-soil wall; ultra-deep waterproof wall; bearing and deformation characteristic

## 0 引言

TRD (Trench cutting Re-mixing Deep wall) 工法又称等厚度水泥土搅拌墙技术, 是 2009 年从日本引进的一种利用锯链式切削箱连续施工等厚水泥土搅拌墙的施工技术, 它首先将链锯型切削刀具插入地基, 挖削至墙体设计深度, 然后注入固化剂在整个设计深度范围内与原位土体充分混合搅拌, 并持续横向挖削、搅拌, 水平推进, 构筑成连续的等厚度水泥土搅拌墙体<sup>[1]</sup>。

由 TRD 工法构建的等厚度水泥土搅拌墙最大成墙深度可达 60 m, 垂直度偏差不大于 1/250, 墙体均质性好、隔水性能可靠。不仅适用于黏性土、砂土、直径小于 100 mm 的砂砾及砾石层, 也适用于标贯击数达 50~60 击的密实砂层和无侧限抗压强度不大于 5 MPa 的软岩地层。其可作为基坑型钢水泥土搅拌墙围护结构以及深度超过 50 m 的隔水帷幕。

等厚度水泥土搅拌墙技术在上海软土地层、天津和淮安地区深厚密实坚硬的砂层、南昌地区砾砂层及软岩地层的多个基坑工程中得到成功应用, 成墙工效高, 墙体隔水性能可靠, 取得了显著的社会经济效益。

本文详细介绍了 TRD 工法构建的等厚度型钢水泥土搅拌墙围护结构的承载变形特性、设计方法、施工关键技术、检测方法及工程实践。

## 1 承载变形特性分析

对等厚度型钢水泥土搅拌墙围护结构的承载和变形特性采用三维有限元分析方法进行数值分析, 计算模型取上海典型地层条件下开挖深度 10 m 的矩形基坑工程, 基坑竖向设置两道水平支撑。围护结构采用 850 mm 厚的等厚水泥土搅拌墙, 内插 H700×700×

13×24 型钢, 型钢中心距 1.2 m。按对称原则取基坑 1/4 空间建立三维模型, 按照规范规定的弹性地基梁法, 坑外施加水土压力, 坑内基底以下被动区土体抗力采用土体弹簧模拟, 采用三维“m”法进行计算分析, 模拟围护结构施工、支撑施工、土方开挖等整个基坑施工过程。

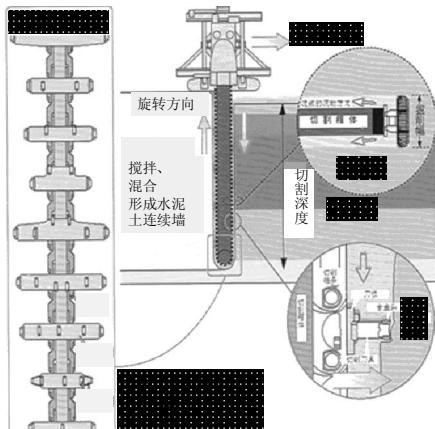


图 1 TRD 工法施工设备

Fig. 1 Construction equipment for TRD method

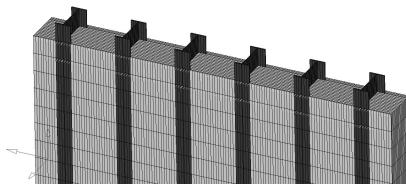


图 2 型钢水泥土搅拌墙局部计算模型

Fig. 2 Numerical model of steel cement-soil wall

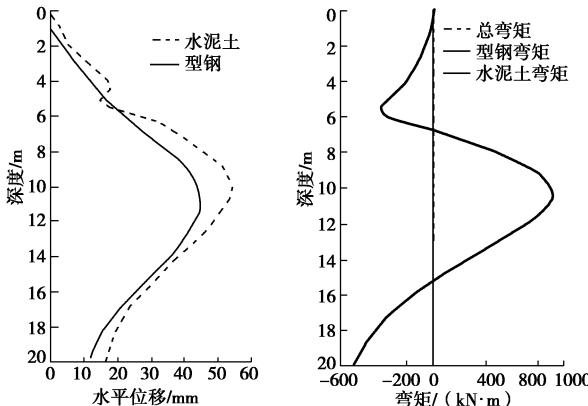


图 3 型钢与水泥土的弯矩与位移对比曲线图

Fig. 3 Comparison of moments and displacements between steel and cement-soil

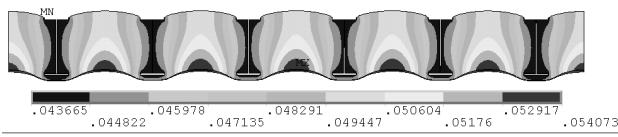


图 4 围护结构变形最大段位移平面云图

Fig. 4 Plane nephogram of deformation of enclosure structure

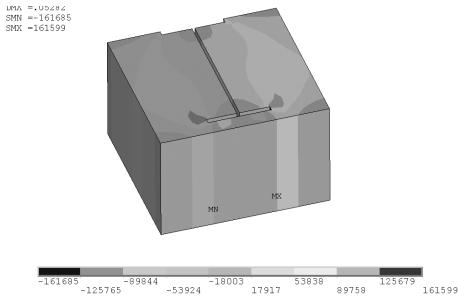


图 5 水泥土与型钢之间错动剪应力分布

Fig. 5 Distribution of shear stresses between cement-soil and steel

三维有限元计算分析得到如下结论: 墙顶、底部位置水平位移较小, 型钢和水泥土变形协调较好。越接近坑底, 随着变形增大, 型钢和水泥土之间的位移错动和剪应力越大; 型钢所承担的弯矩要远高于水泥土, 型钢为等厚度型钢水泥土搅拌墙结构中的主要抗弯构件, 水泥土对弯矩的贡献则可以忽略不计; 等厚度型钢水泥土搅拌墙结构中, 局部剪应力发生位置在开挖面变形最大的位置。型钢两端翼缘端部间的型钢和水泥土交界面为最弱剪切面。

根据分析结果, 等厚度型钢水泥土搅拌墙的受力机理和承载特性与柱列式型钢水泥土搅拌墙类似, 采用相关规范中关于板式支护结构的设计计算方法是合理可行的, 并应对型钢两端翼缘端部间的型钢和水泥土交界面进行局部抗剪计算。

## 2 设计方法

### 2.1 设计计算

等厚度型钢水泥土搅拌墙采用相关规范中板式支护结构的设计计算方法进行围护墙的内力和变形计算, 并应对基坑的整体稳定性、抗倾覆稳定性、坑底抗隆起等各项稳定性进行计算。

墙体抗弯刚度只计算内插型钢的截面刚度。在对等厚度型钢水泥土搅拌墙进行支护结构内力、变形和各项稳定性计算时, 支护结构的深度应取型钢的插入深度, 不计入型钢端部以下水泥土的作用。应对型钢翼缘端部间的型钢和水泥土交界面受剪承载力进行验算。水泥土搅拌墙的深度除需满足型钢的插入要求外, 还应满足基坑的抗渗流稳定性要求。

### 2.2 设计与构造

墙体厚度为 550~850 mm, 并按 50 mm 模数调整, 墙厚应与内插型钢截面相匹配。为确保型钢插入和隔水可靠性, 墙厚宜大于型钢截面高度 100~150 mm。内插型钢间距应均匀布置, 且型钢中心距不宜小于 550 mm, 以便型钢拔出。墙体深度主要取决于型钢插入深度和隔水两方面要求。墙体深度宜深于型钢底部 0.5 m, 以便型钢插入。同时墙体深度应满足

隔水深度要求。

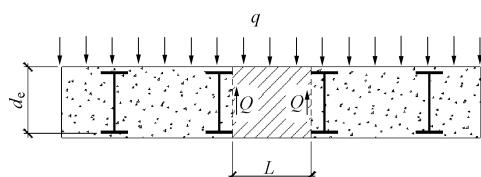


图 6 型钢水泥土搅拌墙局部抗剪计算示意图

Fig. 6 Calculation diagram of local shear of steel cement-soil wall

整个墙体深度范围内水泥掺量均一,水泥掺量宜取20%~30%,在渗透性较弱的地层中宜取低值,当地层中存在较厚的强透水层时,水泥掺量宜取高值。水灰比宜为1.5~2.0,水泥土28d龄期无侧限抗压强度不小于0.5 MPa。由于各个地区地质条件存在较大差异,建议通过试成墙试验确定水泥掺量、水灰比等施工参数。

### 3 施工关键技术

#### 3.1 成墙工序

等厚度水泥土搅拌墙的成墙施工有三工序成墙方法和一工序成墙方法<sup>[2]</sup>。三工序成墙方法即分为先行挖掘、回撤挖掘和成墙搅拌3个工序完成搅拌墙体施工。即切割箱钻至预定深度后,首先注入挖掘液先行挖掘一段距离,然后回撤至原处,再注入固化液向前推进搅拌成墙。一工序成墙方法在三工序成墙工艺的基础上取消回撤挖掘工序,将先行挖掘和成墙搅拌合并为一道工序完成,即切割箱钻至预定深度后边注入固化液边向前推进挖掘搅拌墙。

一工序成墙过程中,切割箱的行进速度受到地质条件限制,当地层较硬时会给水泥用量和墙体的均匀性带来较大影响。而三工序成墙首先将土体挖掘松动,在喷浆成墙过程中切割箱行进速度均匀,水泥用量及墙体均匀性较易控制。

#### 3.2 垂直度控制

TRD工法施工设备在切割箱箱体内设置多段式测斜仪,实现了施工水泥土搅拌墙过程中对墙体面内和面外垂直度的双向实时监控,根据实施监控数据对切割箱和成墙垂直度偏差进行及时纠正,使墙体垂直度在施工过程中做到可控、可调,墙体垂直度可控制在1/250以内,确保了墙体的隔水性能。

#### 3.3 转角位置的处理

由于等厚度水泥土搅拌墙切割箱直线掘进成墙,在转角位置需将切割箱提出,调整方向后重新向下切割到设计标高后。对已经施工的墙体需重新切削搭接后,再继续向前直线掘进成墙。

#### 3.4 复杂地层施工技术

在复杂地层中需要对切削刀具、工序及施工参数等方面进行优化组合,以确保成墙工效和质量。在不同的地层中选用合适的刀头有利于提高工效,降低磨损:标贯值小于30击的土层可采用标准刀头;标贯值大于30击的硬质土层采用圆锥形刀头;卵砾石层、软岩地层宜使用齿形刀头。根据地层特性结合现场试成墙试验选择合适的成墙工序,以及合理的挖掘液、固化液、固化液混合泥浆及工艺参数控制指标,确保成墙质量和施工效率,降低消耗。

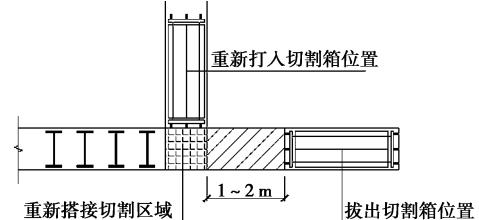


图 7 型钢水泥土搅拌墙转角位置处理示意图

Fig. 7 Schematic of treatment at corner of steel cement-soil wall

### 4 检测方法

等厚度水泥土搅拌墙墙体的检测包括强度检测和抗渗性能检测。墙体强度检测主要采用水泥土试块强度检测方法,包括水泥土强度室内配比试验、浆液试块强度试验、钻孔取芯试块强度试验3种检测方法。墙体的抗渗性能主要通过墙体钻孔取芯芯样的室内渗透试验测得。浆液试块强度试验所采用的浆液应取固化成墙过程中浆面以下1.0~2.0 m深度范围尚未初凝的固化液混合泥浆,制成试块脱模后进行标准养护,达到28d龄期后进行单轴抗压强度试验。在试验段或正式墙体施工完成且养护28d后,进行钻孔取芯,检测水泥土搅拌墙水泥搅拌的均匀性,并对芯样进行强度和渗透性试验。南昌绿地中央广场、奉贤中小企业总部大厦等项目对等厚度型钢水泥土搅拌墙均采用了浆液试块强度试验、钻孔取芯试块强度试验检测方法。

### 5 工程实践

TRD工法构建的等厚度型钢水泥土搅拌墙围护结构和超深隔水帷幕在国内多个工程中得到成功应用。

#### 5.1 南昌绿地广场

南昌绿地中央广场位于南昌红谷滩中心区,整体设置3层地下室,基坑面积约14000 m<sup>2</sup>,周长约440 m。裙楼区基坑开挖深度约15.45 m,塔楼区域基坑开挖深度约17.45 m。

拟建场地地貌类型属赣抚冲积平原,地表下10~22 m深度范围内分布有深厚的砂层,底部卵砾石粒径

为 2~5 cm, 砂层以下为饱和单轴抗压强度标准值达到 8.8 MPa 的中风化砂砾岩层。

场地内的砂层为承压含水层, 与赣江连通, 水量丰富, 渗透性强。下部中风化砂砾岩层为相对隔水层。由于承压含水层分布于基坑开挖深度范围内, 为了确保基坑安全, 本工程采用 TRD 工法构建的等厚度水泥土搅拌墙嵌入基岩隔断承压水, 并内插型钢, 形成等厚度型钢水泥土搅拌墙, 可同时满足受力和隔水要求。基坑竖向设置两道钢筋混凝土水平支撑。支护结构剖面见图 8。

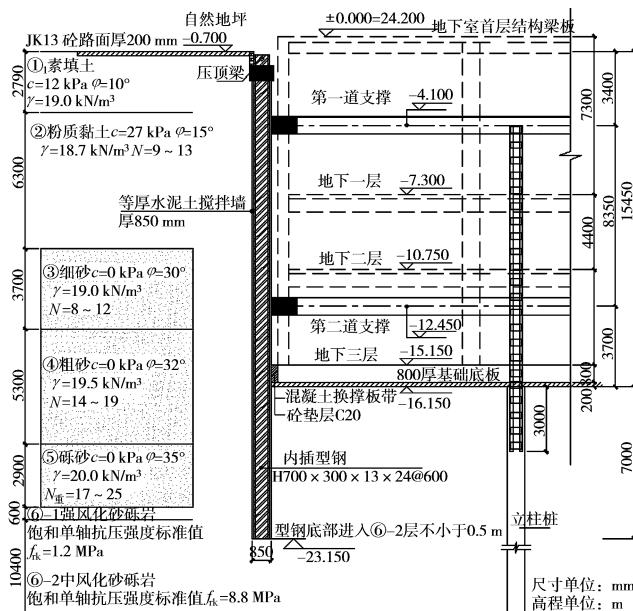


图 8 基坑支护结构剖面图

Fig. 8 Profile of support system of excavation

等厚度水泥土搅拌墙厚 850 mm, 墙底穿过强风化岩层嵌入到层⑥-2 中风化砂砾岩约 500 mm, 隔断承压水。结合现场试成墙试验和检测结果, 等厚度水泥土搅拌墙水泥掺量取 27%, 水灰比 1.5。挖掘液采用钠基膨润土拌制, 每立方米被搅土体掺入约 100 kg 的膨润土。

等厚度水泥土搅拌墙内插 H700×300×13×24 型钢, 采用 Q235B 级钢。型钢中心距为 600 mm, 底部需嵌入层⑥-2 中风化砂砾岩约 0.5 m。



图 9 基坑侧壁现场照片

Fig. 9 Field picture of side wall

根据养护 28 d 后取芯检测结果, 墙体在深度方向

水泥搅拌均匀, 芯样成形良好, 胶结度良好, 各标高芯样抗压强度大于 1 MPa, 满足设计要求。基坑开挖阶段从开挖暴露面观察, 型钢水泥土搅拌墙侧壁干燥, 无渗漏水现象。墙面平整、水泥土强度较高。等厚度水泥土搅拌墙墙身隔水效果良好, 其与中风化岩层交界面结合较好, 基坑内疏干降水效果明显, 坑外承压水位观测井无明显水位下降现象。等厚度水泥土搅拌墙实景如图 9。

从基坑变形情况来看, 从基坑开挖至基础底板施工结束, 等厚度型钢水泥土搅拌墙身测斜最大水平位移约为 5 mm, 坑外土体测斜最大水平位移约为 6 mm, 基坑周边市政管线最大沉降量约为 3.7 mm。基坑本身及周边环境各项监测数据均在合理、可控范围之内。

## 5.2 奉贤中小企业总部大厦

本工程位于上海奉贤区南桥镇, 地下室由地下一层区域和地下二层区域组成, 基坑总面积约为 23000 m<sup>2</sup>。其中地下二层区域基坑面积约为 8000 m<sup>2</sup>, 开挖深度约为 11.85 m。地下二层区域基坑首先实施, 待地下二层区域基坑施工完毕后再进行地下一层区域基坑施工。地表下 13 m 深度范围内为软塑的粉质黏土和流塑淤泥质黏土, 13~24 m 深度范围为第⑤层粉砂微承压水层。地下二层区域基坑不满足承压水突涌稳定性要求, 需采取处理措施。

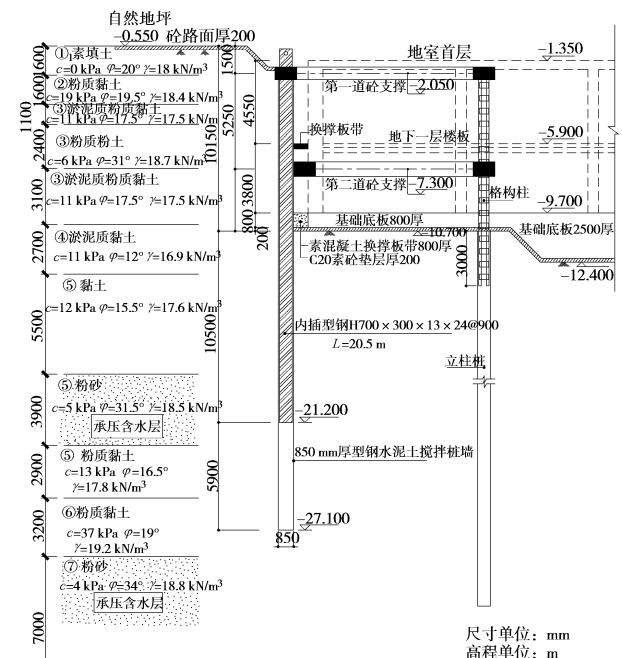


图 10 支护结构剖面图

Fig. 10 Profile of support system of excavation

在地下二层区域北侧采用等厚度水泥土搅拌墙嵌入下部隔水层隔断承压水, 并内插型钢, 形成等厚度型钢水泥土搅拌墙围护结构。南侧和东侧邻地下一

层区域采用排桩结合三轴水泥土搅拌桩帷幕。基坑竖向设置两道钢筋混凝土圆环支撑。基坑支护剖面图见图 10。

等厚度水泥土搅拌墙厚度 850 mm, 穿过⑤t 层粉砂嵌入⑥层粉质黏土, 墙深 26.55 m。水泥掺量 25%, 水灰比 1.5。墙体内插 H700×300×13×24 型钢, 中心距 900 mm, 有效长度 20.5 m。

等厚度水泥土搅拌墙成墙工效较高, 每天成墙 8.0~15 延米。根据养护 28 d 后取芯检测结果, 墙体在深度方向水泥搅拌均匀, 芯样成形良好, 胶结度较好, 各标高芯样抗压强度平均值 0.99 MPa, 满足设计要求。



图 11 等厚度型钢水泥土搅拌墙侧壁实景

Fig. 11 Field picture of side wall

本工程目前已完成基础底板施工, 基坑开挖暴露面墙面较平整, 基本无渗漏现象。基坑开挖墙体累计最大水平位移不大于 25 mm, 场地周围地下管线和道路变形在允许范围以内。基坑侧壁现场实景见图 11。

### 5.3 中钢天津响螺湾项目

本工程位于天津滨海新区响螺湾地区, 整体设置 4 层地下室, 基坑面积约为 23000 m<sup>2</sup>, 褶楼区挖深为 20.6 m, 塔楼区挖深为 24.1 m。场地周边为道路和大量的市政管线, 环境保护要求较高。场地内埋深约 24~58 m 深度范围主要由粉砂、细砂组成, 为深厚的承压含水层。砂层呈密实状态, 标贯击数达 40~70 击。

本工程围护结构采用灌注桩排桩结合隔水帷幕方案。由于基坑不满足承压水突涌稳定性要求, 需大幅抽降承压水, 为减小对周边环境的影响, 采用了以坑内降压为主, 基坑周边辅以 45 m 深超深悬挂隔水帷幕的承压水处理对策。由于隔水帷幕超深, 且需进入深厚密实的砂层中成桩, 选用了 TRD 构建的等厚度水泥土搅拌墙作为隔水帷幕, 墙厚 700 mm, 水泥掺量为 25%。基坑支护结构剖面见图 12。

等厚度水泥土搅拌墙施工顺利, 每天可成墙 6~7 延米。基坑开挖前, 在等厚度水泥土搅拌墙隔水帷幕养护 28 d 后进行了取芯检测, 根据检测结果, 整个深度范围墙体的水泥搅拌均匀, 芯样成形良好, 强度均大于 1 MPa。芯样照片见图 13。

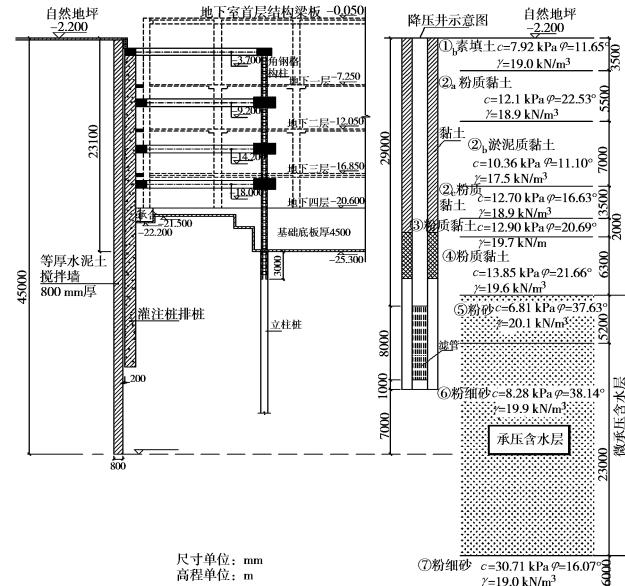


图 12 基坑支护结构剖面图

Fig. 12 Profile of support system of excavation



图 13 等厚度水泥土搅拌墙 28 d 取芯试样

Fig. 13 Photo of 28-day coring samples of constant thickness steel cement-soil wall

从基坑开挖阶段开挖暴露面观察, 排桩围护墙侧壁干燥, 无渗漏水现象。说明等厚度水泥土搅拌墙墙体隔水帷幕隔水效果良好。基坑侧壁实景如图 14 所示。



图 14 基坑侧壁实景照片

Fig. 14 Photo of side wall of constant thickness steel cement-soil wall

### 5.4 淮安雨润中央新天地项目

本工程位于淮安市淮海路商业中心城区, 基坑面积 43657 m<sup>2</sup>, 周长 1020 m, 基坑开挖深度为 22.1~27.4 m。

场地地表下 25 m 深度范围内主要以第③层粉土

和第④层中砂为主, 粉土和砂土中富含地下水, 渗透系数达到  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  cm/s, 渗透性强, 补给充分。下部⑤<sub>1</sub>层粉质黏土中夹有⑤<sub>2</sub>层细砂层透镜体。⑤<sub>2</sub>层厚度 0.90~7.20 m, 为微承压含水层, 与浅层地下水有水力联系, 水头埋深约 2.5 m, 基坑不满足⑤<sub>2</sub>层微承压水突涌稳定性要求。由于在开挖深度范围内有巨厚的含水层, 在基底以下又有微承压含水层, 因此本工程面临严峻的地下水处理问题。

本工程分 I 、 II 两区实施, 先实施 I 区, 待 I 区地下结构施工完毕后再实施 II 区。基坑围护结构普遍区域和两区之间临时隔断区域均采用钻孔灌注桩结合隔水帷幕。为确保隔水可靠性, 本工程隔水帷幕选用 TRD 构建的超深等厚度水泥土搅拌墙。基坑周边等厚度水泥土搅拌墙底穿过⑤<sub>2</sub>层微承压含水层, 嵌入下部⑤<sub>1</sub>层粉质黏土隔水层, 隔断基坑内外的潜水和微承压水水力联系。等厚度水泥土搅拌墙墙厚 850 mm, 墙深 36~46 m。结合现场试成墙试验, 水泥掺量取 25%, 水灰比 1.5。基坑支护剖面详见图 15。

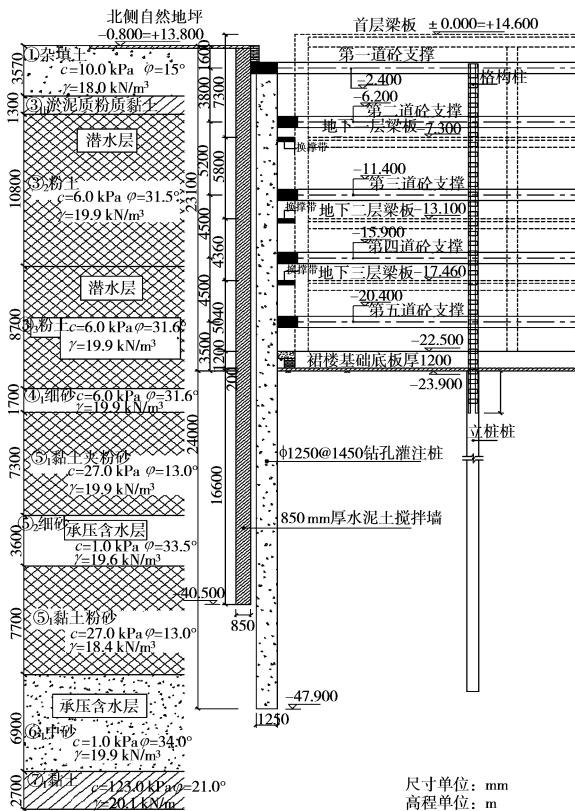


图 15 围护结构剖面图

Fig. 15 Profile of support system of excavation

目前本工程等厚度水泥土搅拌墙已顺利施工完

毕, TRD 工法设备在本工程地层中成墙工效较高, 每天成墙 8~12 延米。墙体 28 d 龄期钻孔取芯抗压强度平均值 1.05 MPa, 满足设计要求 (芯样照片见图 16)。等厚度水泥土搅拌墙成墙施工期间对周围环境进行地下管线等周边环境监测表明, 等厚度水泥土搅拌墙施工对周边环境影响较小, 有效保护了周边环境。



图 16 等厚度水泥土搅拌墙 28 d 取芯试样

Fig. 16 Photo of 28-day coring samples of constant thickness steel cement-soil wall

## 6 结语

由 TRD 工法构建的等厚度水泥土搅拌墙地层适用性广、隔水性能可靠。本文介绍了等厚度型钢水泥土搅拌墙围护结构的承载变形特性、设计方法、施工关键技术和检测方法, 以及等厚度水泥土搅拌墙在上海奉贤中小企业大厦的软土地层、天津中钢响螺湾项目深厚密实坚硬的砂层, 及南昌绿地广场工程砾砂层及软岩地层中的工程实践, 可为类似基坑工程型钢水泥土搅拌墙和超深隔水帷幕的设计提供新的设计思路和借鉴参考。

## 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] 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))

(本文责编 黄贤沙)