

DOI: 10.11779/CJGE2014S2037

TRD 水泥土搅拌墙在武汉地区深基坑工程中的应用

魏 祥¹, 梁志荣¹, 李 博², 朱作猛³

(1. 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200040; 2. 温州大学土木工程系, 浙江 温州 325000; 3. 上海智平基础工程有限公司, 上海 201501)

摘 要: 武汉地区深基坑落底式止水帷幕目前主要采用地下连续墙直接施工至基岩的方式。受地下连续墙施工工艺及垂直度控制等因素的影响, 该方式往往不同程度的存在渗漏水现象, 且造价相对较高。本文通过武汉长江航运中心大厦深基坑工程设计实例, 初步研究了 TRD 水泥土搅拌墙作为落底式止水帷幕在武汉地区一级阶地土层中的施工可行性、成墙质量及渗透性情况。经过技术方案对比, 采用 TRD 水泥土墙落底式止水帷幕, 止水效果好, 可先行施工, 缩短了基坑支护结构施工工期, 且较地下连续墙落底经济, 为武汉地区落底式止水帷幕的设计提供一种新思路。

关键词: TRD 水泥土搅拌墙; 深基坑; 武汉地区

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0222-05

作者简介: 魏 祥(1982-), 男, 工程师, 主要从事基坑工程方面的设计和研究工作。E-mail: tongjiwx@163.com。

Application of TRD cement-soil wall in deep excavations in Wuhan area

WEI Xiang¹, LIANG Zhi-rong¹, LI Bo², ZHU Zuo-meng³

(1. Shanghai Shen Yuan Geotechnical Engineering Co., Ltd, Shanghai 200040, China; 2. Department of Civil Engineering, Wenzhou

University, Wenzhou 325000, China; 3. Shanghai Zhiping Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 201501, China)

Abstract: The form of waterproof curtain wall in deep foundation construction in Wuhan primarily adopts the diaphragm wall directly seated onto the bedrock. However, leakage always occurs in the construction of diaphragm walls owing to their perpendicularity. Meanwhile, the cost is much higher. The case study concerning the building of Wuhan Yangtze River Shipping Center is introduced. As a waterproof technique the constructability of this technique is investigated including the quality control and seepage of the wall. Through comparison, the TRD technique has sound waterproof properties, which can be constructed in advance. Meanwhile, this technique can reduce the project construction period significantly and more economic than diaphragm wall. This case study can be an option in waterproof technique in construction of deep excavations.

Key words: TRD cement-soil wall; deep excavation; Wuhan area

0 引 言

随着武汉的城市建设发展, 地下空间的开发亦得到大规模的发展, 基坑工程往深、大方向发展。

武汉位于长江中游, 为典型二元结构地层即上部为黏性土、淤泥质土, 下部为交互层即砂及砂砾石层。武汉地区的地下水主要分为三层, 上部的潜水含水层、中部的弱透水层、下部的承压含水层。实际上中部的互层土中即赋存有承压水^[1]。

受上述因素影响, 武汉的深基坑工程地下水的控制是重中之重。尤其是临江的一级阶地, 承压含水层水头高且与长江有密切的水力联系。由于直接抽取承压水进行降水一方面对周边环境的影响较大, 另一方面大量抽取地下水造成水资源的浪费, 且大量的排水占用了城市基础排水设施。因此, 武汉的深基坑工程往往采用落底式止水帷幕。受常规的止水水泥土桩施工深度、垂直度控制的限制, 武汉的深基坑工程设计

时往往考虑采用地下连续墙直接落底至基岩的方式作为基坑开挖的止水帷幕。大量的工程实践显示, 地下连续墙受施工工艺及质量管理控制的限制, 往往不同程度的存在地墙接缝处渗水、地墙墙身夹泥渗水、超深地墙下部“开叉”透水等不同程度的渗漏水现象。TRD 水泥土搅拌墙起源于日本, 具有施工深度相对较大、除转角外连续成墙止水效果好等优点。目前在上海、天津等地得到较多应用。在武汉地区尚属首次应用, 尤其是本工程位于临江一级阶地, 承压含水层厚度大且与长江水力联系较大, 若采用 TRD 水泥土搅拌墙, 需要施工的深度近 60 m, 结合本工程特点的成墙可行性、成墙质量、均匀性及墙身的渗透性需要进行初步试验研究。

基金项目: 上海市科研计划项目 (14XD1420400)

收稿日期: 2014-07-28

1 工程概况

武汉长江航运中心项目位于沿江大道、民生路及黄陂街合围处。有一幢超高层及多幢高层住宅组成，设有 4 层地下室。

工程基坑长约 210 m，宽约 170 m，整个基坑面积约 32000 m²，765 延米。普遍开挖深度 19~22.4 m，塔楼核心筒区域开挖深度达到 29 m。

周边环境较复杂，北侧临近民生路及一幢 16 层居民楼，南侧临近长航大厦，西侧临近黄陂街，东侧临近沿江大道，距离长江堤岸最近处仅 60 m。道路及道路下管线、临近建筑及长江防汛墙是基坑围护设计保护的重点（见图 1）。

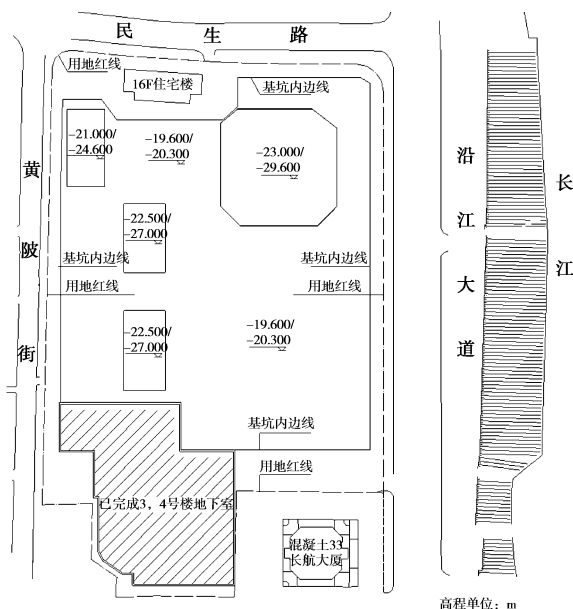


图 1 基坑总平面图
Fig. 1 General layout of excavation

2 工程地质及水文条件

2.1 土层分布

拟建场区地层在勘察深度范围内主要可划分为以

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of soil strata

土层	层厚 /m	状态	重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)
①杂填土	4.60~9.60	松散	19.2	8	18	—
②-1 粉质黏土夹粉土	3.00~12.40	软塑—流塑	18.5	16	10	5.96×10 ⁻⁶
②-2 粉质黏土与粉土粉砂互层	4.60~15.90	可塑—软塑	18.3	14	15	4.61×10 ⁻⁵
③-1 细砂	2.7~16.50	中密	19.2	0	28	—
③-2 细砂	0.80~23.70	密实	19.5	0	32	—
④中细砂夹卵砾石	0.00~3.90	密实	18.5	0	38	—
⑤强风化泥岩	0.30~2.50	破碎	20.0	35	25	—
⑥中风化泥岩	未钻穿层顶埋深约 57 m		较破碎	—	—	—

下几层：①杂填土；②-1 粉质黏土夹粉土；②-2 粉质黏土与粉土、粉砂互层；③-1 细砂；③-1a 粉质黏土；③-2 细砂；③-2a 粉质黏土；④中细砂夹卵砾石；⑤强风化泥岩；⑥中风化泥岩；各岩土层空间分布及工程特性详见表 1。

2.2 潜水

主要赋存于浅层填土中，无统一的自由水面，其水位、水量随季节变化，主要受大气降水、生活排水渗透补给；部分勘察孔中测得上层滞水水位在地然地面以下 1.90~2.0 m，相当于绝对标高 23.90~24.46 m。本次基坑设计计算按照地面下 1.5 m 考虑。

2.3 承压水

赋存于砂土层中的承压水，与长江有一定的水力联系，其水位变化受长江水位变化影响，水量较丰富；根据场区东侧《长江航运中心大厦抽水试验报告》（2011 年 11 月），场区下部砂层承压水含水层平均渗透系数 k 取 18.29 m/d， R 取 200 m。地下水位为自然地面以下 8.3 m，相当于绝对高程 17.90 m，抽水试验期间为枯水季节，武汉地区 I 级阶地承压水水位的绝对标高值一般为 17.0~22.5 m，受长江水位影响，临江一带年变化幅度为 5.00~7.00 m。长江、汉江与其两岸地下承压水有较密切联系，本工程紧邻长江，水位互补关系明显。本次勘察期间（2012 年 5 月）量测的承压水水位为自然地面以下 6.5 m，相当于绝对标高 19.8 m 左右。

长江航运中心大厦项目基坑开挖深度大，开挖面普遍位于②-2 粉质黏土与粉土（砂）互层，局部已经揭露③-1 层，需要进行专项承压水控制设计。

3 考虑承压水控制的围护结构选型

根据本工程的开挖深度及周边环境保护要求等，初步考虑本工程基坑围护结构均采用地下连续墙，可根据不同的开挖深度及周边环境的保护要求，通过计算分析可以采用不同的墙厚和墙底埋深。

地下连续墙本身既挡土又具有良好的止水性能,但本工程场地深部承压水问题较突出。本工程基坑开挖深度大,局部已经揭露承压水层。武汉地区目前常用的为落底式止水帷幕。止水帷幕可以考虑地下连续墙直接落底形成既挡土又止水的围护结构,亦可采用水泥土墙形成止水帷幕。

3.1 地下连续墙落底式止水帷幕存在的问题

武汉长江航运中心大厦基坑采用落底式止水帷幕,以确保安全。由于目前常用的水泥土搅拌桩施工深度的限制,武汉地区一般考虑采用地下连续墙直接落底至基岩作为基坑开挖的止水帷幕。地墙直接落底存在以下问题:

(1) 地墙的垂直度控制是一定的,地墙越深,深处地墙墙幅之间的连接处容易产生开叉现象而渗漏水;上海地区近期某工程出现了深层地墙渗漏水(见图1),承压水层涌水严重,造成周边建构筑物沉降严重,且水压大,常规的旋喷、双液注浆等止水方法难以凑效,最后不得已将基坑用水填满,坑内外水压平衡后,重新施工地墙的严重事故。



图2 某工程地下连续墙墙身、墙幅接缝渗水现象

Fig. 2 Seepage phenomenon of diaphragm walls in a project

(2) 地墙施工时一般5~6 m一幅,后施工墙幅在混凝土浇注前需对先浇注墙幅侧面混凝土进行“刷槽”,防止先后浇注混凝土的墙幅之间夹泥渗漏水。“刷槽”工作依赖于工人的责任心,质量较难控制,大量的地下连续墙工程实践证明,基坑开挖后墙幅接缝处仍多少存在渗漏水现象。

(3) 地下连续墙水下浇注混凝土,混凝土密实度控制要求较高,偶见墙身本身夹泥、孔洞现象而渗漏水也时有发生。

(4) 墙幅之间钢筋笼距离控制较难,墙幅之间常常为素混凝土,基坑开挖地墙受力后,素砼区域容易开裂渗水。

(5) 地下连续墙成槽费用较高,地墙越深成槽越困难,对施工工期的影响也较大。

3.2 TRD 水泥土搅拌墙特性

(1) 工艺原理

该工法机具兼有自行掘削和混合搅拌固化液的功能。与传统的 SMW 工法采用垂直轴纵向切削和搅拌施工方式不同,TRD 工法首先将链锯型切削刀具插入地基,掘削至墙体设计深度,然后注入固化剂,与原位土体混合,并持续横向掘削、搅拌,水平推进,构筑成高品质的水泥土搅拌连续墙。

(2) TRD 水泥土搅拌墙的特点

a) 成桩质量好,沿桩长方向水泥土搅拌均匀,在相同地层条件下可节约水泥。相对于传统的水泥土搅拌桩,在相同地层条件下,TRD 工法桩身深度范围内的水泥土强度普遍提高。水泥土无侧限抗压强度在0.5~2.5 MPa 范围之内。

b) 墙体连续等厚度,截水性能好。经过 TRD 工法加固的土体渗透系数在砂质土中可以达 10^{-7} cm/s。成墙作业除转角外连续无接头。

c) TRD 工法施工机架重心低,稳定性好。TRD 工法可施工墙体厚度为450~850 mm,深度可达60 m,而 TRD (I、II、III) 三种型机中最大高度仅为12 m。

d) TRD 工法可将主机架变角度,与地面的夹角最小为 30° ,可以施工倾斜的水泥土墙体,满足特殊设计要求。

3.3 小结

武汉长江航运中心项目基坑采用地下连续墙作为基坑开挖的挡土结构(地墙本身具有一定的止水效果),地墙外侧再采用57 m 深的 TRD 水泥土搅拌墙施工至基岩作为落底式止水帷幕。初步估算该法节约了约20 m 深部地层条件下的地下连续墙的施工费用,初步估算节约基坑造价近千万元,且 TRD 不受主体结构施工进度影响,可先行施工,工期及经济效益亦较为明显。

4 TRD 水泥土搅拌墙试成墙及检测

本工程为武汉地区首个采用 TRD 水泥土搅拌墙的基坑工程。虽然在上海、天津等地区已有成功案例,但是本工程采用57 m 深的 TRD 水泥土搅拌墙尚数全球首次。是否能够成功成墙及适合本工程土层的相关工艺参数需要进行试验确认。

4.1 试成墙及检测方案

TRD 水泥土搅拌墙应采用 TRD-III 型设备进行施工。采用水平轴锯链式切割箱沿墙深垂直整体搅拌,逐节打入切割箱切削至预定设计深度,水平横向挖掘推进,同时在切割箱底部注入挖掘液或固化液,使其与原位土体强制混合搅拌,形成的水泥土搅拌连续墙,在墙体范围内必须做到水泥搅拌均匀。

本次试成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。

TRD 水泥土搅拌墙试成墙厚度为 850 mm，长度 8 m，试成墙深度不小于 57 m，试成墙位置须仔细核对地质资料，墙底应进入中风化泥岩层不小于 0.2 m，试成墙实际施工过程中，可根据实际情况加大试成墙的深度。TRD 水泥土搅拌墙成墙采用 P.O42.5 级普通硅酸盐水泥。根据成墙范围内所有土层的特性确定墙体水泥掺量，水泥掺量不宜小于 25%；建议水灰比 1.2~2.0。

挖掘液采用钠基膨润土拌制，每立方被搅土体掺入约 100~150 kg/m³ 的膨润土，挖掘液混合泥浆流动度宜控制在 160~240 mm。

墙体垂直度偏差不大于 1/300，成墙厚度应不小于设计墙厚（控制切割箱刀头尺寸偏差）。

对#1 号孔，在每层土范围内取样进行渗透性检测。对#3，#5，#7，#9 号孔，在每层土范围内均应截取不少于一组试块，厚度大于 3 m 的土层不少于 2 组试块，厚度大于 10 m 的土层不少于 3 组试块，每组试块包括 3 个抗压试件，进行强度检测（见图 3）。

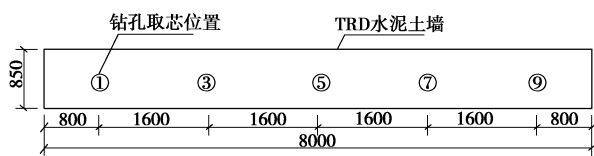


图 3 试成墙及钻芯取样孔位图

Fig. 3 Test wall and sampling holes of core-drilling

4.2 试成墙施工小结

从 2013 年 1 月 31 日 11 时 18 分开钻下第一节被动轮切割箱，至 2013 年 2 月 2 日 12 时 40 分持续下了剩余 11 节的切割箱，下钻过程 2 台经纬仪时刻观察切割箱的垂直度，达到设计的 57 m 深并且进入中风化层（根据掘削负荷、链条带上来石头、地质报告等判断）。耗时 49 h 22 min，先后经过杂填土层，粉质黏土夹粉土层、粉质黏土与粉土粉砂互层、细沙层（约在 29~40 m 位置），粉质黏土层、中细砂夹卵石层（深度 50 m 位置左右）、强风化泥岩层、中风化泥岩层。（细沙层、中细砂夹卵石层、强风化泥岩层、中风化泥岩层 4 层掘削缓慢）。

先行挖掘前放入测斜仪，高精度的测斜装置能够保证先行挖掘及成墙搅拌时的垂直度。

2013 年 2 月 2 日 14 时 30 分开始进行先行挖掘，2 月 4 日 14 时切割 11 m 并喷浆 11 m 后起拔，判定 TRD 有切割细沙层、卵石层、强风化泥岩、中风化泥岩等地层的能力，但对于切割中风化泥岩较缓慢，初步判定成墙工效约为 4~7 m/d（不考虑下钻情况）。

此次试成墙的桩长、垂直度、水泥膨润土用量均符合试验方案要求。此次超深、超宽、入中风化岩层的试成墙非常成功，为今后武汉地区的基坑工程应用提供了宝贵经验，提高施工工效。

4.3 试成墙检测结果

试成墙完成养护 28 d 后，进行钻芯取样检测，钻具直径 108 mm，试块直径约 90~93 mm，考虑钻过程中的损伤补偿系数 1.3。其中，#9 孔钻芯取样强度检测结果见表 2，#1 孔钻芯取样渗透性检测结果见表 3。

表 2 #9 孔钻芯取样强度检测

Table 2 Strength tests on core-drilling samples from hole No.9			
取样深度/m	无侧限抗压强度/MPa	修正强度/MPa	强度平均值/MPa
1.0~2.0	0.792	1.03	1.05
	0.808	1.05	
	0.815	1.06	
3.4~4.4	0.885	1.15	1.16
	0.900	1.17	
	0.900	1.17	
6.6~7.6	0.923	1.20	1.22
	0.946	1.23	
	0.938	1.22	
8.3~9.3	0.954	1.24	1.24
	0.962	1.25	
	0.954	1.24	
11.4~12.4	0.954	1.24	1.24
	0.962	1.25	
	0.938	1.22	
15.5~16.5	0.946	1.23	1.23
	0.962	1.25	
	0.938	1.22	
19.2~20.2	0.954	1.24	1.23
	0.938	1.22	
	1.238	1.61	
24.2~25.2	1.246	1.62	1.62
	1.246	1.62	
	1.269	1.65	
27.2~28.2	1.262	1.64	1.65
	1.277	1.66	
	1.292	1.68	
38.3~39.3	1.300	1.69	1.67
	1.269	1.65	
	1.323	1.72	
42.5~43.5	1.338	1.74	1.75
	1.369	1.78	
	1.377	1.79	
48.5~49.5	1.369	1.78	1.77
	1.346	1.75	
	1.377	1.79	
53.5~54.6	1.392	1.81	1.80
	1.392	1.81	
	1.569	2.04	
54.5~55.5	1.569	2.04	2.04
	1.577	2.05	
	1.477	1.92	
55.3~56.3	1.485	1.93	1.93
	1.485	1.93	

由表 2 可看出，TRD 水泥土墙墙身相对均匀，20 m 以上的黏性土及互层土中强度普遍在 1.05~1.2

MPa 之间; 20~50 m 之间主要为细砂层, 强度有明显提高, 在 1.6~1.8 MPa 之间, 进入卵石层及强风化层强度上升至 1.8~2.0 之间。

由于本次试成墙 8 m 长度范围内土质起伏不大, #3、#5、#7 号孔强度大小及变化情况与#9 孔类似, 说明了在长度方向, TRD 水泥土搅拌墙亦相对较为连续均匀。

由表 3 可以看出, TRD 水泥土搅拌墙有良好的止水性能, 可以满足本工程的隔水要求。

表 3 #1 孔钻芯取样渗透性检测

Table 3 Permeability tests on core-drilling samples from hole No. 1

深度/m	渗透系数	
	测试值/(10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)	平均值/(10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)
2.0~3.0	2.88	2.63
	2.49	
	2.53	
6.0~7.0	2.79	2.67
	2.66	
	2.56	
15.0~16.0	3.11	2.96
	2.71	
	3.05	
21.0~22.0	1.39	1.37
	1.37	
	1.34	
25.0~26.0	3.22	3.40
	3.46	
	3.52	
40.0~41.0	2.92	3.23
	3.52	
	3.25	

5 结 论

水泥土搅拌桩类止水帷幕由于施工深度限制及垂直度控制较难, 难以运用至武汉地区深基坑落底式止水帷幕的设计中。

武汉地区采用的地下连续墙落底式止水帷幕往往难以达到隔水要求, 仍需要大量的进行地下水的抽取。对周边环境的影响、市政资源的占用仍较大。

TRD 水泥土搅拌墙由于其施工深度可以达到 60 m, 除转角外无接缝, 是较为良好的落底式止水帷幕

方式。

根据试成墙的实际施工情况及检测结果, TRD 水泥土搅拌墙具有切割武汉地区深部土层如细砂层、卵石层、强风化泥岩、中风化泥岩等地层的能力, 且成墙质量高且均匀, 强度、渗透性等能够满足止水帷幕的要求。

在深大基坑工程中, TRD 水泥土搅拌墙代替落底式地下连续墙止水帷幕经济性能及工期控制均较优, 可作为武汉地区落底式止水帷幕的首选。

参考文献:

[1] 李 英, 何忠泽, 严桂华, 等. 武汉二元结构地层基坑降水及其地面沉降研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 768 - 773. (LI Ying, HE Zhong-ze, YAN Gui-hua, et al. Excavation dewatering and ground subsidence in dual structural stratum of Wuhan[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S0): 768 - 773. (in Chinese))

[2] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Foundation pit engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))

[3] 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): 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(S0): 768 - 773. (in Chinese))

[4] 郑 刚. 水泥土抗渗性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. (ZHENG Gang. Study on the performance of anti permeability of cement soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))

[5] DB42/T159 — 2012 基坑工程技术规程 [S]. 2012. (DB42/T159—2012 Technical Specification for excavation engineering[S]. 2012. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)