

[文章编号] 1003—4684(2019)01-0038-06

TRD 水泥土搅拌墙在基坑工程中的应用

张世轩, 严学宁, 王翠英

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] TRD 地下水泥土搅拌墙能有效利用现有地层中的软土,减少排放,已经在越来越多的工程中投入使用。TRD 地下水泥土搅拌墙+支护桩首次应用在武汉复地汉正街基坑工程中,通过室内试验确定了 TRD 试成墙的施工参数;钻孔取芯进行成墙质量检测分析;28d 龄期的渗透试验,满足强度和抗渗要求;采用天汉软件计算墙体水平位移并与实测值对比,墙体水平位移均控制在规范允许范围,为在武汉软土地区大型深基坑支护提供一种新型的实用方法。

[关键词] TRD; 支护结构; 渗透系数; 天汉软件

[中图分类号] TU470.3

[文献标识码] A

近年来,建筑领域倡导绿色施工,实现建筑领域资源节约和节能减排,在软土地层中采用 TRD 地下水泥土搅拌墙作为基坑支护结构,可以有效利用现有地层的软土,减少排放。目前有许多学者已经对 TRD 工法性能展开了研究,如 2005 年安国明等人通过对 TRD 工法与 SMW 工法施工工艺的比较分析,得出 TRD 工法构筑的地下连续墙其挡土、止水效果、垂直度连续性以及墙体的质量都要优于其它施工工法^[1];2010 年黄成通过对 TRD 和 SMW 两种工法的实测数据对比分析,指出 TRD 工法的支护和止水效果都优于 SMW 工法^[2];2011 年李星等人结合天津和南昌地区 TRD 工法的实际工程应用情况进行了分析,结果表明 TRD 工法技术的可行性和可靠性都较好,具有较高的推广应用价值^[3];2012 年张少钦等人对 TRD 围护结构深基坑施工监测及结果进行分析^[4];2013 年王刚等人对 TRD 围护结构深基坑施工变形规律进行了研究^[5]。

汉口地区软土层厚度大,地下水位较高,超大型深基坑支护采用传统围护结构已经很难满足支护的抗渗性、止水性以及强度稳定性的要求,如果采用地下连续墙支护造价太高,本文采用 TRD 地下水泥土搅拌墙+支护桩复合支护方式代替地下连续墙,成功的应用在武汉复地汉正街深基坑工程支护中;对于水泥土搅拌墙,本文通过对墙体自身的抗渗性、强度和水平位移的监测对比等,对 TRD 自身的一些特点进行了综合的分析研究,该新型墙体为类似

的软弱土层的基坑支护提供了一种新的支护方法,对于新型基坑支护的研究提供了参考。

1 TRD 工法简介

1.1 TRD 工法原理

TRD 工法根据原有的设计支护图纸来确定刀具和器械,不同的土质条件需要对应不同类型的刀具,以便施工进展的顺利。器具链条带动刀具对土体进行切割搅拌,在机具的下方增设有加压空气,使得流动的土体与添加的添加剂、切削液等,在切割过程中,使各种添加剂与土体充分的混合搅拌,通过监测设备来检测墙体的垂直度和深度,同时,地下水可以很好的被利用到土体搅拌过程中,废浆的处理也相对简单,对于不同的地质条件都有很好的兼容性。

1.2 TRD 工法的适用范围

TRD 工法对于软土和 N 值大于 50 的硬质地层都可以进行施工,根据不同的刀具和场地条件选择不同的机具,适应性非常广,同时机械相对尺寸较小,受施工现场的环境影响较小,对于复杂地况同样具有很强的适应性,与一般传统的围护结构相比,TRD 自身具有较强的止水性能外,还具有一定的强度,墙身整体性强,而且成墙的效率、工期短、成本低,降低了施工的难度,可以作为基础设施的围护结构、挡土墙、止水帷幕等,适用范围较广。

[收稿日期] 2017—12—29

[第一作者] 张世轩(1992—),男,河南平顶山人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为岩土工程

2 武汉复地汉正街基坑工程 TRD 试成墙施工及检测分析

2.1 工程及地层概况

武汉复地汉正街工程位于武汉市江汉区中山大道南侧,美奇国际广场对面,项目地下室共三层,基坑开挖面积约 50665 m^2 ,基坑开挖周长约 941 m 。基坑普挖深度为地面以下 15.0 m 。拟建场地地层表层为①层杂填土(Q^{ml}),其下分别为②层淤泥质粉质粘土、③层粉质粘土、④层粉土粉砂互层、⑤-1层粉砂、⑤-2层粉砂、⑤-3层中砂、下伏基岩为第三系一白垩系⑥-1层泥岩(强风化)、⑥-2层泥岩(中风化)。

上层滞水主要赋存于场地上部①层杂填土层中,承压水主要赋存于④层粉土粉砂互层、⑤-1层粉细砂、⑤-2层细砂及、⑤-3层中粗砂夹卵砾石层中,承压水地下水位埋深为4.50 m,承压水位根据区域水文地质资料年变化幅度为4~6 m。场地地层剖面及TRD试成墙见图1。

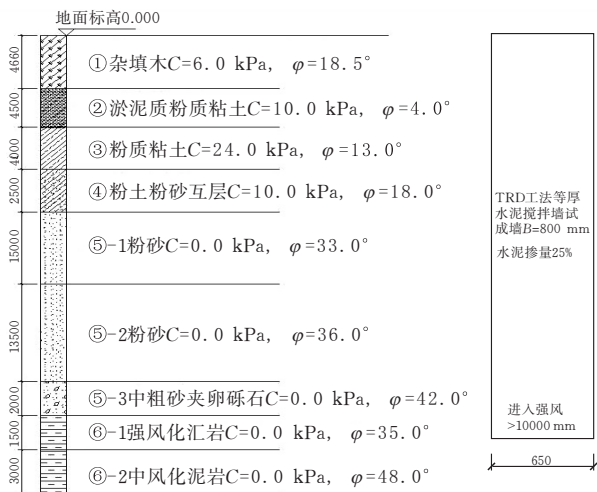


图 1 场地地层剖面及 TRD 试成墙图

2.2 基坑支护方案比选

依据现场情况,将 TRD 新型围护结构与其他两种常见的基坑围护结构方案进行对比分析,综合考虑,选取:(a)灌注桩+三轴止水帷幕;(b)地下连续墙;(c)TRD+三轴搅拌桩。

方案(a)传统的支护方法对于复杂环境下的支护具有一定的局限性,同时三轴搅拌桩在施工过程中容易出现桩与桩搭接的问题,存在渗水和漏水的隐患,且施工周期太长;方案(b)中,地下连续墙的施工,受深度影响较大,不能很好的保证墙体整体的密实度,对于地下承压水的截断具有一定的局限性,从而产生裂缝和漏水等问题,同时施工成本高,墙体越深成槽越困难^[6],施工过程中,受到的限制因素较

多,增加了施工成本和工期,对于基坑整体围护结构来说,影响较大;方案(c)中,TRD与三轴搅拌桩的结合,抗渗性能和支护整体的刚度都有很大的保证,同时具有施工周期短和成本低的优点,对于地质条件差的基坑支护也有很好的效果^[7]。

本基坑采用的支护方案为:“单排桩+两道临时钢筋混凝土支撑,双排桩+一道临时钢筋混凝土支撑,局部区域采用双排桩+被动区加固留土”混合布置,冠梁顶为自然地面标高下 2.0 m,排桩外侧均设置一排渠式切割水泥土连续墙(TRD)加强止水,坑内采用中深井疏干降水。

2.3 TRD 试成墙施工参数

为减小基坑内抽降承压水对周边环境造成影响, 基坑采用 TRD-Ⅲ 型设备进行施工, 采用 800 mm 厚 TRD 等厚度水泥土搅拌墙隔断坑内外承压水的水力联系。TRD 墙体在该基坑中深度达到了 50 m, 局部区段超过了 50 m, TRD 墙体下端需要嵌固到地质岩层中, 且嵌固深度不得小于 1 m, 保证墙体竖向位移控制在一定范围内。通过现场取土样, 根据室内水灰比试验结果, 同时依据地质勘探的结果, 综合考虑, 找出墙体最优的水泥掺量, 报告中显示水泥掺量不得小于 25%, 水灰比为 1.5, 在 TRD 全面施工前, 需要进行试成墙试验, 并根据试成墙的检测试验来展开施工。

本工程 TRD 等厚度水泥土搅拌墙施工按以下参数进行：

1)墙深约 50 m,共 14 节切割箱,由下至上排列分别是:1 节 3.55 m 被动轮+13 节 3.65 m 切割箱,总长 51 m。墙厚 800 mm,采用 550~800 mm 宽度的刀具,呈菱形布置,确保全断面切割土层。

2) 水泥掺量: 25 % (450 kg/m³, 土容重取 1.8 kN/m³)。

3) 固化液水灰比:1.2~1.5, 固化液比重:1.38~1.45。固化液使用过程中,使用的水量和水泥的用量需要根据实际情况,用电脑来计算用量。同时水灰比的量直接决定墙体的强度,需要通过试验来确定在保证不减少水泥用量的前提下来控制水灰比,尽可能的降低水灰比。

4) 膨润土掺量: 5.5% (50 kg/m³, 土容重取 1800 kg/m³)。水灰比 10~20 (经验值)。

2.4 成墙质量检测分析

成墙质量检测,需要对达到一定龄期的墙体进行钻孔取芯,28 d 后对基坑的 TRD 上均匀的取点,每个检测点的有效深度为墙顶下 1 m,同时对于钻孔仪器的垂直度偏差不得大于 $1/200$,取芯的深度要达到风化岩层才停止,且对取芯的样品拍彩色照

片并及时封装送检,同时要采用水中养护的方法,确保试样的外界条件。选取了 ZK1~ZK6 一共 6 个钻孔点(图 2),测定其不同龄期的无侧限抗压强度(表 1),强度标准值不小于 1.5 MPa。钻孔取样如图 3 所示。

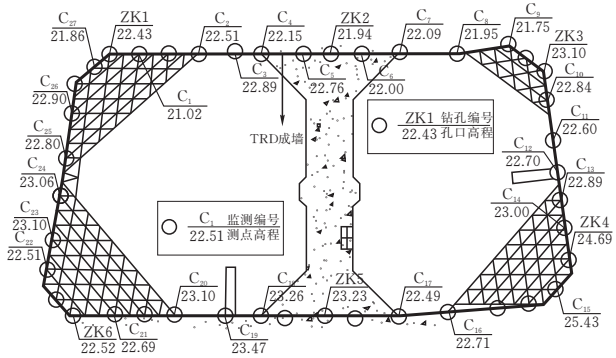


图 2 TRD 成墙钻孔位置和测点分布图

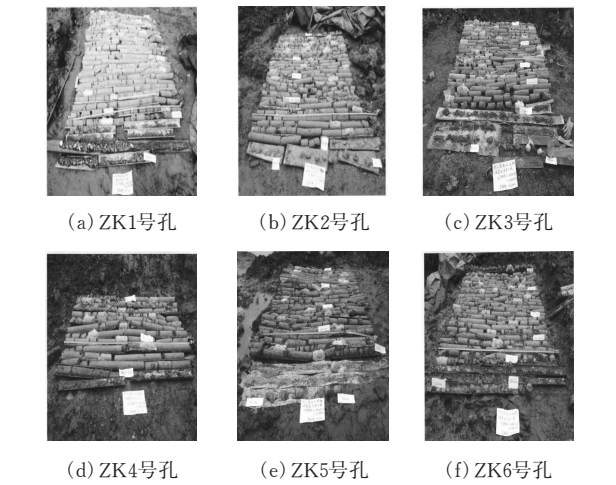


图 3 现场钻孔取芯样

在试成墙完成后,在现场选取墙体的钻孔样品,以此来检测试成墙在不同时间内的强度,同时通过钻孔取芯的样品来观测墙体成型是否均匀完整,对 28~105 d 的墙体进行钻孔取芯,由图 3 的取芯样图可以看出,每一个区域的试样都显示整体性较好,不同深度的墙体颜色基本一致,墙体整体搅拌均匀,完成度较好。同时不同龄期的墙体取芯样品的无侧限抗压强度都大于 1.5 MPa,满足强度的设计要求,使得整个墙体整体性得到保障,取得了强度高和指数性能好的效果。

3 TRD 试成墙 28 d 龄期渗透试验

采用常规三轴仪测试水泥土墙芯样的渗透系数,试样按土工试验规程(SL237-1999)^[8]中的三轴压缩试验规定,将现场成墙后的 28 d 的 TRD 墙体芯样进行处理,使得芯样达到饱和的状态,按照试验渗透试验的流程,需要对试样进行提前的试压,将试样放在周围压力控制力范围内,增设 20 kPa 的预

表 1 墙身芯样无侧限抗压强度

测孔号	龄期/d	取样位置/m	抗压强度/MPa
1	28	0.2—1.5	1.92
		5.2—6.2	1.92
		11.9—12.9	2.00
		13.5—14.5	1.84
		19.8—20.8	1.84
		31.4—32.4	2.06
		41.2—42.2	2.09
		46.7—47.7	1.96
2	45	0.5—1.5	1.94
		5.6—6.6	1.85
		10.2—11.2	1.99
		14.0—15.0	1.94
		17.3—18.3	1.83
		1.5—2.5	2.05
		5.3—6.3	2.19
		10.2—11.2	2.10
3	78	14.0—15.0	2.25
		19.6—20.6	2.07
		23.5—24.5	2.12
		42.1—43.1	2.05
		46.7—47.7	2.18
		1.0—2.0	3.06
		4.8—5.8	2.65
		10.1—11.1	2.91
4	86	13.4—14.4	2.81
		16.9—17.9	2.99
		35.5—36.5	2.85
		39.9—40.9	2.93
		46.9—47.9	2.94
		0.0—1.0	2.02
		5.0—6.0	2.11
		9.8—10.8	2.13
5	85	13.6—14.6	2.03
		22.0—23.0	2.15
		35.0—36.0	2.13
		47.4—48.4	2.11
		49.5—50.5	2.02
		0.5—1.5	2.48
		5.7—6.7	2.32
		11.6—12.6	2.42
6	105	13.7—14.7	2.39
		25.6—26.6	2.24
		43.6—44.6	2.28

压力,然后增加不同等级的反压力,同时增加渗透水压力和周围压力,使周围压力的大小始终大于反压力约 20 kPa。与此同时,观察渗水出口的体变管,当水位稳定上升时,表示试样已经饱和。在给定的周围压力 σ_3 和渗透水压力 σ_b 下,每间隔 30 min 时间测读连接渗水出口的体变管中的渗出水量,每级

压力下,测读 3 次渗出水量,不考虑水泥土的固结和渗透变形,按照下式计算其渗透系数。

$$k_t = \frac{\Delta V \cdot H}{A \cdot \Delta h \cdot \Delta t}$$

式中： k_t 为水温 $t^{\circ}\text{C}$ 时试样的渗透系数； ΔV 为在渗流稳定后 Δt 时间内通过试样的渗流量； H 为试样高度； A 为试样的横断面积； Δh 为作用在试样两端

的水头差， $\Delta h = \sigma_b \times 10 / \gamma_w$ ； σ_b 为渗透压力； Δt 为 σ_b 作用下渗流量 ΔV 需要的时间间隔。

试验分 2 组进行,经估算,取样位置的压力水头为 10 m,土水侧压力(合力)约为 150 kPa 选择周围压力 σ_3 为 150 kPa,渗透水压力 σ_b 为 100 kPa 的试验条件。不同样底深度的水泥土渗透系数见表 2。

表 2 28 d 龄期水泥土渗透系数值

土层序号	1 号试样组		2 号试样组	
	样底深度/m	渗透系数/($10^{-7}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	样底深度/m	渗透系数/($10^{-7}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
②	5.87	0.35	5.64	5.74
			7.23	3.41
	8.05	4.95	8.76	2.56
③	11.95	5.24	11.56	1.23
			12.37	5.59
④	13.21	6.58	13.87	4.85
			14.12	3.24
	15.32	5.63	15.26	2.52
⑤			19.29	4.46
	25.41	6.84	23.66	11.65
			27.87	18.02
			31.55	8.9
⑤-1			35.98	6.23
	41.69	1.38	39.19	6.28
			42.54	8.09
			45.79	10.32
⑤-2	48.11	1.62	48.56	2.47

图 4、图 5 分别为 1 号、2 号试样组在三轴实验中不同深度下的渗透系数,从图 3 中可以看出,每一个土层在不同深度内的芯样都充分搅拌,整体上下成型基本一致,成型质量良好,在 TRD 施工中使得水泥土搅拌均匀,同时未出现有局部的积水或黏土成块的现象,整个试验测得的渗透系数都在一个数量级内,证明墙体整体的抗渗性良好,具有一定的止水效果。

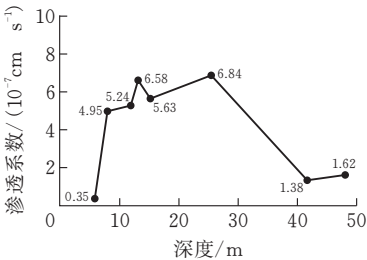


图 4 1 号试样组水泥土渗透参数随深度的变化

4 TRD 围护墙体水平位移计算及实测

4.1 天汉软件计算结果

利用天汉软件,分四个工况计算 TRD 复合围

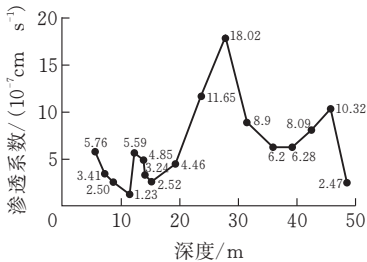


图 5 2 号试样组样水泥土渗透参数随深度的变化

护结构随深度的位移变化,工况 S1 为 TRD 与围护桩施工阶段;工况 S2 为开挖到第一层支撑底标高以及第一道支撑浇筑阶段;工况 S3 为开挖到第二层支撑底标高以及第二道支撑浇筑阶段;S4 为基坑开挖到底阶段。由于工况 S1 为基坑开挖前的状态,墙体位移较小,不予考虑,图 6 为 S2~S4 每个工况下 TRD 与围护结构随深度的位移变化图以及主、被动土压力随深度的变化图。

天汉软件计算共分四个工况,图 6a 中 E_p — E_R 为被动区弹性抗力, E_{a4} 和 E_p — UE_4 分别为为工况 S4 结束后主、被动区的土压力;图 6b、c 中曲线分别表示 S2、S3 和 S4 工况下墙体随深度的位移变化图。

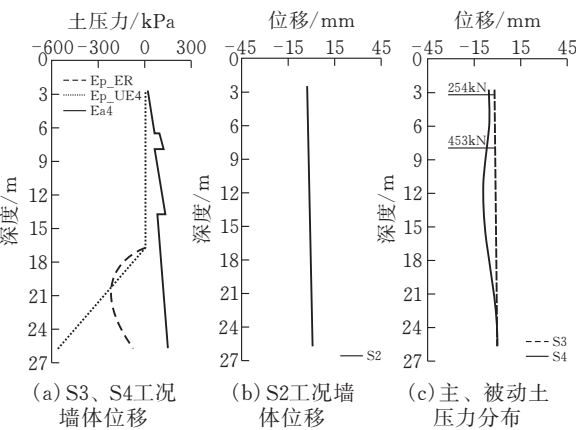


图6 土压力与TRD成墙位移图

4.2 天汉软件计算值与实测值对比

在TRD成墙均匀设置监测点 $C_1 \sim C_{27}$ (图2),在TRD成墙顶部圈梁上设置预埋件(图7),用智能超声成墙测斜仪监测墙身不同深度的水平位移量。监测数据显示,由于基坑北面有高级写字楼以及大量居民楼, $C_1 \sim C_9$ 、 C_{10} 、 C_{27} 的监测结果较为明显,选取监测的最大位移量作为实测值,与天汉软件在该处的计算值进行对比分析。选取工况2、3、4的计算结果和现场墙体位移监测值进行对比研究分析,并将不同工况下墙体水平位移的计算值和实测值绘成沿深度方向的变化曲线图。结果见图8~10。

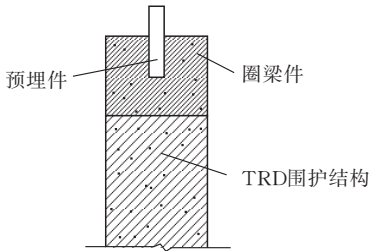


图7 墙顶测点埋设示意图

对比结果显示:TRD成墙在三个工况下,天汉软件计算值与实测数值相吻合,曲线变化规律较为接近,能准确反映成墙位移变化趋势;计算数值比实测数值偏大,是由于施工现场不确定因素造成的;随着开挖深度的增加墙体位移逐渐变大,在基坑开挖过程中要时刻进行监测,确保施工安全;TRD在软弱土层超大深基坑支护工程的运用中,具有很好的抗倾斜能力、强度较高、位移较小,确保了基坑安全。

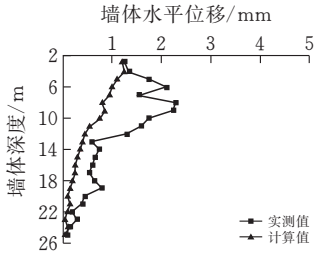


图8 工况S2下TRD成墙位移对比曲线图

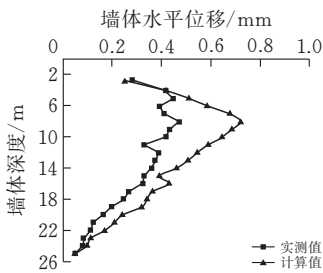


图9 工况S3下TRD成墙位移对比曲线图

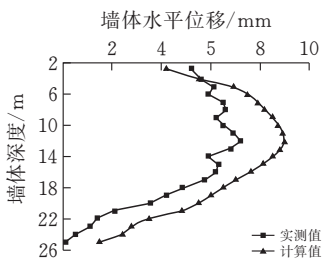


图10 工况S4下TRD成墙位移对比曲线图

5 小结

TRD与围护桩的围护结构代替地下连续墙,在武汉软弱地层中成功的应用,结论如下。

- 1)通过现场试验,确定了TRD试成墙施工参数,钻取桩芯进行成墙质量检测分析,检测28~105 d无侧限抗压强度均大于1.5 MPa,满足强度要求;TRD试成墙28 d龄期渗透试验,渗透系数都在 10^{-7} cm/s数量级,满足抗渗要求。
- 2)TRD墙体水平位移随着深度的变化,TRD成墙在三个工况下,天汉软件计算值与实测数值相吻合,曲线变化规律较为接近,能准确反映成墙位移变化趋势;位移值均在规范允许的范围内。
- 3)TRD与围护桩首次在武汉复杂软弱土层中的成功运用,对于倡导绿色施工以及TRD在不同地层施工的推广与应用具有借鉴意义。

[参 考 文 献]

[1] 安国明,宋松霞.横向连续切削式地下连续墙工法—TRD工法[J].施工技术,2005(S1):278-282.
[2] 黄成.TRD工法在基坑支护工程中的应用效果分析[J].施工技术,2010,41(12):1145-1147.
[3] 李星,谢兆良,李进军,等.TRD工法及其深基坑工程中的应用[J].地下空间与工程学报,2011,7(5):945-950.
[4] 王刚,张少钦.TRD围护结构深基坑施工监测及结果分析[J].施工技术,2012,45(379):8-12.
[5] 王刚.TRD围护结构深基坑施工变形规律研究[D].南昌:南昌航空大学,2013.
[6] 吴炜.地下连续墙施工技术难点的处理对策[J].中国高

新技术企业,2014,7(5):78-80.

[7] 邓金城.谈 TRD 水泥土搅拌墙在地下围护体系中的应
用优势[J].四川建材,2016,42(10):136-138.

[8] 中华人民共和国水利部.SL237-017-1999.土工试验规
程[S].南京:中国水利水电出版社,1999.

Application of TRD to Foundation Pit Engineering in Wuhan Forte of Hanzheng Street

ZHANG Shixuan,YAN Xuening,WANG Cuiying

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: TRD can effectively utilize the soft soil on the existing stratum to reduce the emission, and it has been put in use in more and more projects. The joint use of TRD and supporting piles was firstly applied in the Foundation Pit Engineering in Wuhan Forte of Hanzheng Street. The construction parameters of TRD has been confirmed by the laboratory test; drilling for cores was carried out for the quality test analysis of TRD; after 28-day penetration test, it was discovered that strength and impermeability requirements were meet; after the horizontal displacement of diaphragm walls was calculated by means of Tianhan Software and was compared with the measured values, it was found that the horizontal displacement of diaphragm walls were all controlled in the standard allowable range, which provides a new practical method for the large foundation pit engineering in the soft area of Wuhan.

Keywords: TRD; supporting structure; permeability quotient; Tianhan Software

[责任编辑: 裴 琴]

(上接第 29 页)

Study on the Surface Subsidence Control of Small Radius Section of a Section of Shenzhen Metro Line 9

BAI Yinghua¹,DUAN Zhanpeng¹,ZHAO Xin²,Shi Junfeng¹

(1.School of Civil Engin. and Environment , Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China ;

2 CCTEB Infrastructure Construction Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on the three-dimensional finite element numerical analysis method, the finite element model was established by using Midas GTS nx software in the curve section of a small radius of a certain section of Shenzhen Metro Line 9, and the settlement variation law of the small radius section in the section during the shield construction was studied. Based on the results of numerical analysis and the previous research, we adopted corresponding surface settlement control measures, and analyzed the numerical simulation results and the feasibility of adopting corresponding settlement control measures. The final monitoring results show that: 1) The numerical analysis of finite element method is of certain reference value for the prediction of shield settlement in small radius curve section, and the inside of the curve is often the focus of settlement control and monitoring; 2) Through the reasonable selection of shield machine, appropriate grouting, slag control and timely setting of reinforcing ribs, the effect of surface subsidence control is very obvious.

Keywords: finite element; tunnel; radius of small curve; settlement control; settlement monitoring

[责任编辑: 裴 琴]