

超前小口径管幕在广州地铁浅埋暗挖隧道中的应用

王科甫^{1,2}

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安;

2. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 710043, 西安//工程师)

摘要 广州地铁 21 号线天河公园折返线大断面双线暗挖隧道下穿黄埔大道及市政管线。下穿位置属于复合地层, 拱顶地质条件差、隧道埋深浅, 且地面对沉降要求高。对传统的超前加固方法及管幕法进行了数值计算分析比较。结果表明, 常规的超前加固方法不能满足地表沉降要求, 而采用管幕法能有效控制地面沉降。根据数值计算结果, 暗挖隧道采用管幕法施工。数值模拟计算结果与实际施工监测数据吻合得较好。

关键词 地铁; 浅埋暗挖隧道; 管幕法施工

中图分类号 U455.49

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.05.035

Application of Advanced Small Caliber Tube Curtain in Shallow Buried Tunnel of Guangzhou Metro

WANG Kefu

Abstract The large-section double-line undercut tunnel of Tianhe Park return line on Guangzhou metro Line 21 is studied, which crosses under Huangpu Avenue and municipal pipelines, and the lower crossing section is in the compound stratum, featuring bad vault geological condition, shallow buried depth and higher requirements for surface subsidence. Through numerical calculation and comparative analysis of the traditional advanced reinforcement method and the pipe curtain method, it is concluded that the former cannot meet the requirements of surface subsidence, while the latter can effectively control land subsidence. According to a numerical calculation, it shows that the calculated result and the actual construction monitoring data fit well when the pipe curtain method is used in tunnel excavation.

Key words metro; shallow buried tunnel; pipe curtain method

Author's address China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China

近年来,随着城市发展,地铁施工环境越来越复杂,施工场地及限制愈加苛刻。在此背景下,地

铁建设过程中不可避免会出现一些超浅埋、大跨度的暗挖隧道。如何保证暗挖施工过程中的隧道安全及周边临近建(构)筑物安全,是暗挖隧道设计、施工的核心问题。

广州地铁浅埋暗挖隧道大部分处于第四系土层,覆土浅,地质条件较差,隧道工程必须施设超前支护,以保证隧道施工安全。目前常规的超前支护措施很多,根据实际地质情况,有超前锚杆、超前小导管、超前管棚、超前旋喷加固等。这些超前加固方法简单,在隧道施工中得到了广泛的应用,也取得了显著的效果。但这些方法也存在其局限性,即:超前支护加固后不能形成连续的止水帷幕,施工中一旦遇到富水砂层、软土、淤泥质土层等不良地层,既难以形成连续可靠的隧道支护体系,也不能有效控制施工过程中地面的沉降;如果隧道上方有重要管线或重要建(构)筑物时,其风险是不可接受的。因此,可有效形成止水帷幕的超前支护措施应运而生。其中具有代表性的措施有管幕法、冻结法^[1]和 MJS(全方位高压喷射)水平注浆法^[2]等。

管幕法自引进以来,先后在地重要下穿工程中得以应用,代表性的项目有上海北虹路地道下穿工程^[3]、港珠澳拱北隧道工程^[4]、成都致力路隧道下穿铁路站场工程^[5]、北京捷运系统下穿机场跑道工程^[6]等。上述重大高风险工程均通过实施管幕法成功实现了下穿重要建(构)筑物。同时,管幕法的理论研究也取得了一定成果:文献[7]对管幕法施工地下通道进行了施工过程的三维模拟计算;文献[8]以拱北隧道为实际工程背景对管幕结合冻结施工进行了研究;文献[9-11]针对软土地层中管幕法隧道施工风险及施工工艺进行了研究和探讨。

本文以广州地铁 21 号线天河公园折返线暗挖段为实际工程背景,结合管幕法的特点,对使用小口径管幕的必要性及其在广州复合地层中的首次应用进行分析,以期对管幕法在类似地质条件下的

设计与施工提供有益借鉴和参考。

1 管幕法特点及其分类

管幕法,是以暗挖工作井为施工工作面,顺着结构的纵向轴线方向沿结构横断面外轮廓线顶入大直径钢管,通过设置锁扣、进行土体冻结、管间注浆等措施,使钢管间相互连接并形成一个整体帷幕;然后在帷幕保护下完成初期支护及二次衬砌结构施工,最终形成地下空间的建造方法。简言之,管幕法指的是以管幕为超前措施的暗挖施工方法。

管幕与管棚的作用机理如图 1 所示。管幕为一种超前支护法,与常规超前加固措施相比,主要有以下三个显著特点:

(1) 从承载机理看,常规超前措施是与围岩、注浆加固体共同承载,常应用于拱形隧道;管幕在一定跨度范围内可独自承担全部水土压力,可用于任何断面型式的隧道;

(2) 从止水方式看,常规超前措施一般采用注浆止水,对于砂层等高渗透地层,浆液扩散具有随机性,常造成较大的工程浪费且难以形成连续的周边止水帷幕,止水效果较差;管幕依靠锁扣密封或采用管间冻结、水平注浆等工艺形成连续的止水帷幕,止水效果好。

(3) 从施工设备来看,常规超前加固措施以管棚为例,采用普通钻机钻进,管外间隙排渣,施工扰动大;管幕采用管幕钻机静压顶进,管内螺旋钻机钻进出土,或采用小口径顶管机,施工扰动小。

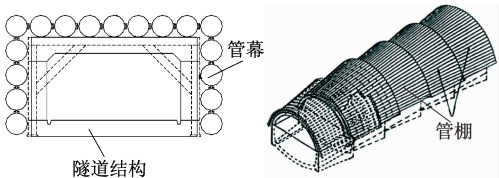


图 1 管幕与管棚对比图

管幕有多种分类方法:按照线型,可分为直线管幕和曲线管幕;按照口径,可分为小口径管幕、大口径管幕;按照管间连接方式,可分为锁扣连接、注浆连接和冻结连接等;按照断面排列方式,可分为全周型、U 型、一字型等。工程中可根据实际情况选用不同的管幕。

拱北隧道采用小顶管机成孔、管间冻结的管幕;首都机场捷运系统穿越机场跑道段隧道采用钻机成孔、管间设置锁扣的管幕。

2 广州地铁 21 号线天河公园折返线工程概况

天河公园站为广州地铁 11、21、13 线的换乘车站,由 21 号线同期建设。其中 11 号线与 21 号线为双岛四线平行换乘,站台位于地下二层,21 号线设于中间,11 号设于两侧。

天河公园折返线设置于天河公园站南侧,近似南北向布置。折返线南端采用明挖法施工,北端采用矿山法施工。折返线暗挖部分长约 80 m,位于黄埔大道下方,横穿广州城区主干道黄埔大道。该道路交通繁忙,车流量极大,设有员村立交高架桥及较多市政管线,因此对隧道施工要求高,沉降控制严格。折返线周边环境条件如图 2 所示。



图 2 折返线平面控制条件示意图

从周边环境来看,工程附近的控制性建(构)筑物主要有:

(1) 直径 0.8 m 的排水管,埋深 5 m,距离隧道最小净距仅 5.09 m;

(2) 员村立交高架桥桩基,距离隧道最小净距仅 4.3 m,对沉降要求极高。

控制性建(构)筑物的基本情况及沉降要求如表 1 所示。

表 1 控制性建(构)筑物基本情况及沉降要求

建(构)筑物名称	参数	沉降要求
员村立交	连续梁桥,2 桩 1 承台;承台尺寸为 7 m×3 m×3 m;桥桩直径 1.2 m,桩长 30 m	竖向沉降不大于 5 mm,不均匀沉降比不大于 0.001
污水管线	5 mm 厚铸铁管,管径 0.8 m	竖向沉降不大于 15 mm,不均匀沉降比不大于 0.005

折返线隧道区域地层自上至下主要为填土层、淤泥质土层、粉质黏土层、残积土层、全风化岩、强风化岩及中风化岩。

隧道穿越范围属于典型的复合地层,大部分为

全风化碎屑岩 <6>、强风化砾岩 <7-1>、强风化泥质粉砂岩 <7-3> 地层,局部存在中微风化岩。

折返线暗挖隧道地质情况及与周边控制性建(构)筑物的位置关系如图 3 所示。

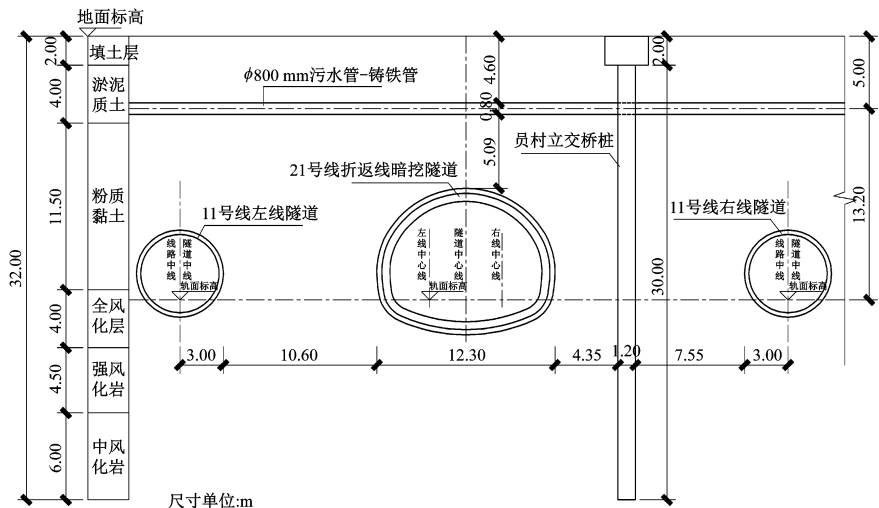


图 3 折返线地质及周边控制条件剖面图

综上所述,暗挖施工存在如下重点和难点:

(1)折返线暗挖隧道为单洞双线隧道,跨度 12.3 m、高度 10.1 m、覆土约 10.5 m,断面大,埋深不足一倍洞跨,属于超浅埋大断面隧道。

(2)地质岩面起伏大,裂隙发育,<6>号地层存在遇水软化的特点,稳定性较差,如果支护不及时,施工过程中极易引起坍塌;

(3)暗挖隧道拱顶存在较厚的淤泥质土层,最厚达 4 m。拱顶支护一旦失稳,易引起管线渗漏及地面塌陷,从而导致严重的工程事故。

3 超前支护方案选择

针对上述重点、难点以及存在的施工、环境风险,超前支护措施的选择将对施工成败起关键作用。为降低隧道施工对桥桩的影响,控制地面沉降及管线纵向变形,合理规避施工风险,利用三维有限元软件进行了施工全阶段模拟;并据此对比了传统的超前注浆法(超前小导管、大管棚)与管幕法两种超前支护的效果,以期选择出更优的超前支护方案。

3.1 数值计算方案设计及模型参数选取

3.1.1 计算工况设计

方案分 2 种工况,分别为注浆法和管幕法。其主要施工步骤见表 2。

在上述 2 种工况下进行隧道开挖时,均采用

表 2 注浆法、管幕法主要施工步骤		
步骤	注浆法	管幕法
1	打设左上导洞范围超前支护,2.5 m 一个循环	施设暗挖拱顶范围内超前管幕,逐根施工,利用管间锁扣封闭
2	左上导洞开挖进尺 0.5 m,随挖随封闭初期支护	左上导洞开挖进尺 0.5 m,随挖随封闭初期支护
3	左下导洞滞后左上导洞 5 m 开挖,及时封闭初期支护	左下导洞滞后左上导洞 5 m 开挖,及时封闭初期支护
4	打设左上导洞范围超前支护,2.5 m 一个循环	右上导洞滞后左上导洞 10 m 开挖,及时封闭初期支护
5	右上导洞滞后左上导洞 10 m 开挖,及时封闭初期支护	右下导洞开挖滞后右上导洞 5 m 开挖,及时封闭初期支护
6	右下导洞开挖滞后右上导洞 5 m 开挖,及时封闭初期支护	

CRD(中隔墙加台阶)法,即设 4 个开挖工作面,1、2、3、4 步纵向错开依次开挖。CRD 法施工工序图如图 4 所示。

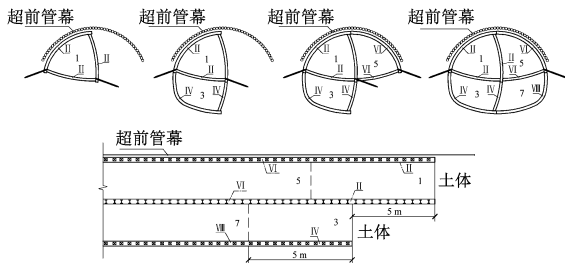


图 4 CRD 法施工工序图

3.1.2 计算模型及材料参数

模型横向左右两侧距离 11 号线盾构隧道边界约 15 m,总长 80 m;竖向边界上部取自由地面,下部取桩底以下 15 m,总高 50 m;隧道开挖方向以受影响的桥桩为中心,前后各取 25 m,总长 50 m。数值模型如图 5 所示。

建模过程中,围岩可视为摩尔-库仑理想弹塑性材料,支护结构视为弹性材料。

模型四周及底部均施加法向位移约束,地表为自由边界。

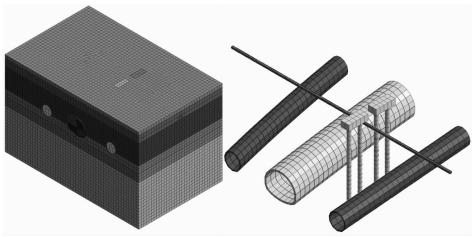


图 5 暗挖隧道三维地层模型及结构示意图

假定在开挖长度内土层厚度一定,土体的参数根据地质资料按照最不利钻孔确定,如表 3 所示。

表 3 各土层力学参数表

层序	土层名称	层厚/ m	变形模 量/MPa	泊松比	重度/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
<1>	人工填土	2.0	10.0	0.30	18.5	10.0	15.0
<4-2B>	淤泥质土	4.0	5.0	0.42	17.8	12.0	5.5
<5N-1>	粉质黏土	11.5	20.0	0.35	19.4	24.0	22.0
<6>	全风化碎屑岩	4.0	60.0	0.30	19.9	35.0	24.0
<7-3>	强风化泥质粉砂岩	4.5	80.0	0.25	20.6	45.0	25.5
<8-3>	中风化泥质粉砂岩	4.2	2 000.0	0.22	26.0	150.0	28.0

注:对于岩层,变形模量指弹性模量

加固区及初期支护的物理力学参数根据地质资料、TB 10103—2016《铁路隧道设计规范》及 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》确定。

结构单元按实际进行取值。其中,既有桩基及承台为 C30 钢筋混凝土,污水管线材料为铸铁,初期支护采用 C25 喷射早强混凝土,二次衬砌采用 C35 模筑混凝土,管片结构采用 C50 高强混凝土。

隧道拱部超前支护范围采用实体单元进行模拟,其参数根据实际受力机理及其材料性质确定。超前管幕由于刚度较大且连续封闭,可按照弹性材料进行模拟,其刚度按照 C30 素混凝土进行考虑。对于超前注浆区,其本质上是通过注浆改善了注浆范围的土层抗剪强度,需结合实际经验,对其抗剪强度指标进行调整。结构及加固区材料参数如表 4 所示。

表 4 结构及加固区材料参数表

名称	材料	弹性模 量/MPa	泊松 比	重度/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
初期支护	C25 混凝土	2.80×10^4	0.2	25.0		
二次衬砌	C35 混凝土	3.15×10^4	0.2	25.0		
管片	C50 混凝土	3.45×10^4	0.2	25.0		
桩承台	C30 混凝土	3.00×10^4	0.2	25.0		
污水管	铸铁	1.00×10^5	0.2	70.0		
管幕	钢管+混凝土	2.50×10^4	0.2	25.0		
注浆	加固土	60.00	0.3	20.0	72	22

3.2 计算结果分析及超前支护选定

根据计算结果,地表沉降及三维沉降槽如图 6、

图 7 所示。

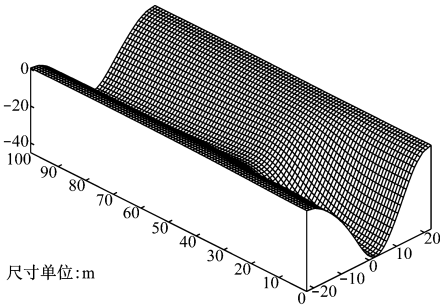


图 6 注浆法工后三维沉降槽

为减少边界效应影响,提取模型中部 25 m 位置处的横截面沉降槽(如图 8 所示)进行分析。

注浆法工后最终沉降,管幕法管幕加固后以及工后最终沉降及占比如表 5 所示。

由此可得出如下结论:

- (1)注浆法最终沉降最大值为 44.9 mm,沉降较大,说明在隧道拱顶上部有较厚软弱地层时,常规的超前加固措施不能有效控制地表沉降;
- (2)管幕法在管幕施工阶段地表最大沉降约 3.15 mm、最终沉降约 19.39 mm,管幕施工地表沉降占最终沉降的 16% 左右,说明管幕本身施工引起的地表沉降较小,且有利于控制后期隧道开挖引起的地面沉降;
- (3)管幕法引起的最终地面沉降仅为注浆法的

50% ,说明管幕法在该地层中可有效控制地面沉降。

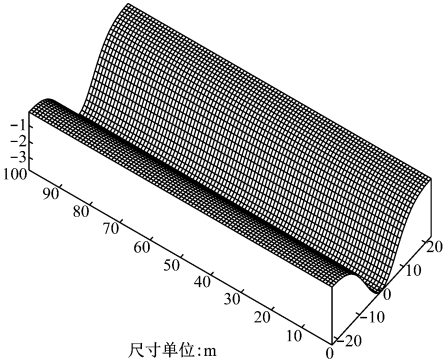


图7 管幕法工后三维沉降槽

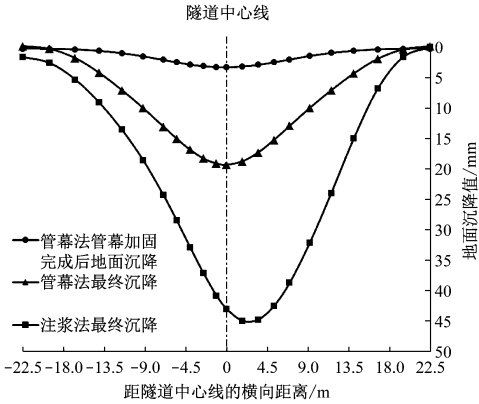


图8 模型中部25 m处注浆法、管幕法最终沉降槽对比

表5 注浆法、管幕法最终沉降对比表

点位	管幕法沉降/mm		注浆法沉 降/mm	最终沉降比(管幕法 沉降/注浆法沉降)
	加固完	开挖后	开挖	
1	0.12	0.30	1.49	
2	0.15	0.18	2.49	0.07
3	0.26	1.69	5.20	0.33
4	0.49	4.12	9.02	0.46
5	0.87	6.96	13.47	0.52
6	1.38	9.94	18.53	0.54
7	1.97	12.98	24.25	0.54
8	2.36	14.96	28.42	0.53
9	2.71	16.77	32.79	0.51
10	2.98	18.20	37.04	0.49
11	3.13	19.06	40.80	0.47
12	3.15	19.39	42.97	0.45
13	3.04	18.68	44.93	0.42
14	2.76	17.23	44.75	0.39
15	2.35	15.16	42.51	0.36
16	1.89	12.84	38.67	0.33
17	1.32	9.87	32.06	0.31
18	0.83	6.98	23.90	0.29
19	0.48	4.20	14.87	0.28
20	0.25	1.80	6.67	0.27
21	0.14	0.24	1.49	0.16
22	0.11	0.26	0.11	

综合以上分析可知,超前注浆不利于控制隧道工后沉降,而超前管幕可有效阻止地面沉降。为保证上方管线及黄埔大道通行安全,推荐采用管幕法。

3.3 管幕法对建(构)筑物的影响分析

超前管幕方案对污水管及桥桩的影响如图9和图10所示。

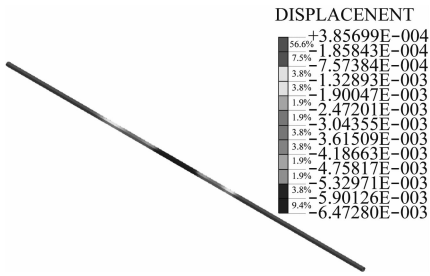


图9 管幕法引起的管线沉降云图

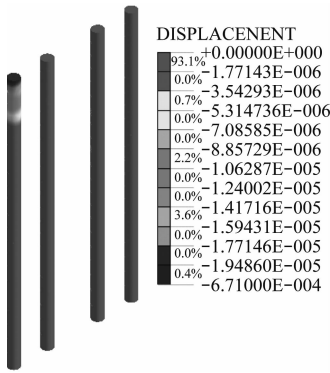


图10 管幕法引起的桥桩沉降云图

结果表明:采用超前管幕方案后,地面沉降控制在19.39 mm,管线沉降为6.47 mm,立交桥桩基沉降为0.67 mm;计算结果均小于沉降控制值,满足设计预期要求。

3.4 管幕设计

综合上述的计算结果,隧道加固措施采用管幕法,可以最大限度控制地面沉降,控制开挖引起的拱顶范围地层失水,保证隧道施工安全;并能有效控制管线不均匀变形及员村立交桩基沉降。考虑到施工场地环境的复杂性及重要性,采用管幕作为超前措施是更稳妥的设计方案。

本工程是广州地铁首次采用管幕法进行超前支护,参考外地经验,结合工程实际情况,其管幕材料选用如下:

(1) 钢管规格:采用 Q235B 无缝钢管,管径 ϕ 299 mm,壁厚 10 mm,钢管间距 0.36 m;

(2) 钢管间焊接公母锁扣进行管间搭接,锁扣采用 Q235B 钢材的不等边角钢,规格为 80 mm \times 50

mm × 10 mm。

(3)管幕间连接大样如图 11 所示。

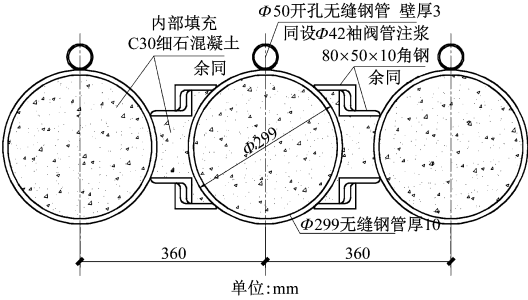


图 11 管幕锁扣大样图

除超前支护外,暗挖隧道初期支护采用 0.35 m 厚 C25 喷射混凝土、φ 8 mm@ 150 mm × 150 mm 钢筋网,钢架采用工 25a 型钢,钢架间距 0.5 m。

4 现场监测情况分析

工程于 2017 年 10 月 15 日开始管幕施工,2018 年 2 月 12 日初期支护施工完成,2018 年 3 月 20 日隧道二次衬砌施工完成,历时 5 个月完成隧道施工。根据监测数据,桥桩未监测到变形,暗挖拱顶上方的 W4 号监测点最大沉降为 17.45 mm,其沉降趋势如图 12 所示。

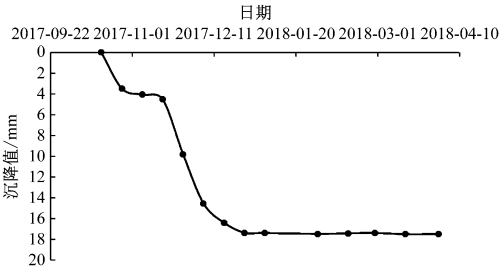


图 12 W4 号监测点沉降历程表

由图 12 可知,实际施工过程中沉降分为 4 个阶段:①管幕施工阶段地表沉降约 4.06 mm,开挖阶段管幕处于相对稳定阶段;②隧道开挖至监测点正下方范围时,地表沉降速率较快,但最终趋于稳定;③隧道初支护贯通后,地面沉降稳定在 17.45 mm 以内;④初期支护拆撑及二次衬砌施工阶段地面沉降基本无变化。

监测结果表明:管幕超前支护施工过程中会引起地面一定程度的沉降,但管幕封闭成环后可有效控制地面最大沉降,且可保证工程短期停工(如春节放假)期间的周边环境安全。实测数据与数值模拟计算的对比如表 6 所示。

数据表明,计算结果与实测值间绝对误差不大于 1.94 mm,相对误差约 22%,说明数值计算的假

表 6 实测数据与数值模拟计算数据吻合度对比

阶段	实测沉降/mm	计算沉降/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
管幕施工阶段	4.06	3.15	0.91	22.41
隧道开挖阶段	17.45	19.39	1.94	11.12

定基本符合实际情况,具有较大参考价值。

5 结论

(1)管幕施工不需降水,地面沉降小,施工噪声及振动小,可连续施工,满足城市工程环保要求,且施工效率高。对于车站大断面隧道、重要下穿工程和超浅埋隧道,以及地面沉降大、地质情况复杂、需要止水的地下空间工程,管幕具备较大优势。

(2)管幕施工本身会引起地面沉降,但施工完成后暗挖隧道施工安全可得到有效保证。

(3)管幕施工后的建筑物性质接近于弹性体,计算时,可将其视为与管径等同的一个等厚度弹性体进行计算。

(4)管幕超前支护技术在工程实践中已得到不断发展。小直径曲线管幕技术的推广以及管幕法与其他加固方案的联合使用也是管幕法的发展方向,有待进一步研究和创新。

参考文献

[1] 李长春,史志明. 基于冻结法的地铁区间隧道矿山法暗挖施工[J]. 煤炭科学技术,2009,37(12):22.

[2] 王科甫. 盾构隧道下穿客运专线沉降预测及控制研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.

[3] 陈鸿. 管幕工法在北虹路地道中的应用[J]. 地下工程与隧道,2007,1(1):16.

[4] 张鹏,潘建立,刘应亮. 拱北隧道曲线顶管管幕施工关键技术[J]. 隧道建设,36(8):968.

[5] 周国辉. 大直径管幕超前支护在市政隧道中的应用[J]. 铁道标准设计,2016,60(4):68.

[6] 刘增龙. 超长管幕暗挖法下穿机场跑道沉降变形研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.

[7] 董雪娇. 管幕法地下通道施工过程与数值模拟研究[D]. 长春:吉林大学,2015.

[8] 李剑. 管幕冻结施工工法研究与应用[D]. 西安:长安大学,2015.

[9] 朱合华,闫治国,李向阳,等. 饱和软土地层中管幕法隧道施工风险分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,24(2):5549.

[10] 李耀良. 软土地区管幕法工艺研究与应用[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(5):962.

[11] 李博. 富水软土长距离非锁口曲线管幕施工风险研究[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(5):1382.

(收稿日期:2018-03-06)