

[文章编号] 1003—4684(2019)05-0025-05

深圳地铁 9 号线某区间小半径段地表沉降规律研究

白应华¹, 段展鹏¹, 赵 欣², 石峻峰¹

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430064;

2 中建三局基础设施工程有限公司, 湖北 武汉 430070)

[摘 要] 基于三维有限元数值分析法, 利用 Midas GTS nx 软件对深圳地铁 9 号线某区间小半径曲线段建立有限元模型, 研究该区间小曲线半径段在盾构施工过程中的沉降变化规律和应力分布状态, 根据数值分析结果结合以往的研究采取相应地表沉降控制措施, 并通过监测结果分析数值模拟结果和采取相应沉降控制措施的可行性。最终的监测结果表明: 利用有限元数值分析法对小半径曲线段盾构隧道地表沉降预测具有一定参考价值, 曲线内侧往往是沉降控制和监测的重点。通过采取对盾构合理选型、出渣量控制、合理注浆和及时设置加强肋等措施, 对小半径曲线段地表沉降控制效果十分明显。

[关键词] 有限元; 隧道; 小曲线半径; 沉降控制; 沉降监测

[中图分类号] TU94

[文献标识码] A

小曲线半径隧道是地铁盾构施工中的重点和难点之一, 其曲率半径小, 转弯幅度大, 采用盾构施工时常常会引起管片错台、崩缺以及内外侧推力差过大引发超挖等问题, 极易使地表沉降超限^[1]。目前关于盾构隧道地表沉降规律的研究主要采用理论分析、数值模拟、现场实测等研究方法开展。王亮^[2]根据沈阳某地铁线沉降实测数据, 对 Peck 曲线进行了修正, 研究出了砂性地层隧道施工过程中三维空间地表变形预测方法。宫亚峰等^[3]利用 Midas GTS nx 软件对双线隧道进行模拟, 并结合实测数据分析, 得出了双线盾构隧道的地表沉降曲线变化与沉降形态变化系数 C 之间关系。台启民^[4]以北京 6 号线某重叠隧道区间 18 个监测断面实测数据为依托, 分析了重叠隧道的施工过程中地表沉降槽变形规律。但对于小曲线半径隧道沉降规律研究中, 目前相关研究还不够深入。陈开端^[5]、赵俊^[6]等主要基于隧道施工经验, 对小曲线半径隧道的地表沉降、施工质量等控制要点进行了总结, 尚未对其地表变形规律进行深层次探讨。周诗俊等^[7]基于有限差分技术, 对某小半径曲线隧道变形规律进行了研究, 但尚未利用实测数据对研究成果进行论证。本文以深

圳地铁 9 号线某区间小半径曲线段为依托, 利用 Midas GTS nx 有限元软件进行模拟预测, 根据模拟结果采取了相应地表沉降控制措施, 根据现场监测结果对本文模拟结果和采取的措施的可行性进行了论证^[8], 可为同类工程施工和研究提供更多的参考依据。

1 工程概况

深圳地铁 9 号线向文区间(西村站~文锦站区间)采用盾构施工技术, 该区间最小半径为 345 m, 属于小曲线半径施工段^[9]。该区间沿线两侧多为高层建筑物, 对于地表沉降控制要求相对较高, 因此有必要对该区间地表沉降问题进行研究。该区间所处地质条件十分复杂, 地层具有上软下硬特性, 同时场内罗湖断裂带发育, 岩性复杂, 岩层破碎风化程度高。外线和内线工程地质的土层岩性以及厚度如表 1 所示。施工场区所处水文地质条件主要有两种类型, 位于第四系杂填土层、粉细砂层、中粗砂层和圆砾卵石层的松散岩类孔隙水以及位于变质砂岩强中微风化带中的基岩裂隙水, 这类水文条件无疑增加了地表沉降控制难度。

[收稿日期] 2018—04—16

[第一作者] 白应华(1975—), 男, 湖北应城人, 湖北工业大学副教授, 研究方向为结构工程

[通信作者] 段展鹏(1993—), 男, 湖北枝江人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为工程结构数值模拟

表 1 土层岩性表

土层	平均层厚/m	土(岩)性
素填土层	3.27	主要由砂土、粘性土、碎石和少量建筑垃圾组成,顶部为混凝土路面(约 0.2 m 厚),土体局部松散,略湿,略密
杂填土层	3.40	主要由粘土、碎石(粒径范围 3~5 mm)组成,部分土层中有少量建筑垃圾
淤泥、淤泥质粘土层	2.15	土层中含有少量的有机质,切面光滑,呈流塑状
粘性土层	2.65	主要由团状的高岭土和少量细砂组成,呈可塑状态
粉细砂层	1.71	主要由石英、长石等矿物质组成,形状为亚圆,饱和、略密
中粗砂层	3.77	该土层的矿物成分主要有石英和长石等,其中混有少量的粘粒
圆砾层	2.88	土层级配较差,有少量的粘粒,土体比较饱和,稍密
卵石层	3.55	土层具有良好的分选性,卵石(粒径范围 4~8 mm)主要由石英岩和花岗岩风化,粒间主要为粘土和砂质土进行填充,呈中密状态,局部地段呈松散状态
残积可塑状粉质粘土层	1.90	呈可塑造状态,由基岩风化形成,韧性中等,遇水易软化、部分可崩解
残积硬塑状粉质粘土层	3.94	呈硬塑造状态,由基岩风化形成,干强度中等,韧性中等,遇水易软化
全风化变质砂岩	3.92	风化程度严重,无明显组织结构,但岩芯强度较高,遇水易崩解
强风化变质砂岩	7.91	风化程度比较剧烈,部分组织结构已风化破坏,裂隙极其发育,遇水易发生崩解
中等风化变质砂岩	4.1	风化程度中等,裂隙比较发育,局部结构部分被风化破坏
微风化变质砂岩	3.33	岩体的裂隙发育较成熟,岩体大部分碎裂岩化,局部有较明显的重结晶现象

2 有限元计算模型的建立

有限元分析在岩土工程中能有效解决各种复杂边界问题以及非线性问题^[10],因此对于该区间小半径段地表沉降问题选用了目前岩土工程常用的分析软件 Midas GTS nx 进行了研究。

2.1 有限元模型的选取

选取隧道 161.2 m 小半径曲线段建立分析模型,同时降低土体的边界效应影响,模型截面高和宽分别是 40 m 和 60 m。考虑到模拟精度及计算工作量,结合地质勘察报告,将建立的模型土层简化成了十层,相同层土体简化为均质和各向同性材料属性。土体本构关系采用 Mohr-Coulomb 模型,管片采用线弹性模型,土体采用天然重度,不考虑土体固结引起的长期沉降和土体地下水位的变化。底部在 x 轴、 y 轴、 z 轴方向分别选取约束支座,约束垂直方向和水平方向变形。模型边侧选用垂直于面的约束,约束垂直方向变形。土体模型网格划分为六面体实体单元,对于管片划分为四边形壳单元,建立的整体模型如图 1 所示。

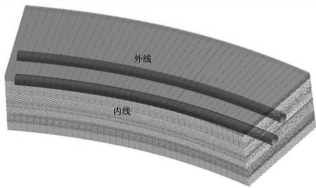


图 1 有限元模型

2.2 材料参数的确定

根据地勘资料,模型相关材料参数如表 2 所示。

表 2 材料参数

材料名称	弹性模量/MPa	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	c/kPa	$\Phi/(\text{^\circ})$	厚度/m
素填土	50	18.5	8	8	3.55
粘性土	56.6	19	35	12	2.53
粉细砂	208	22.3	51	24	2.09
中粗砂	400	23	30	30	4.2
圆砾层	500	20	5	40	2.54
卵石层	600	21	5	42	3
粉质粘土	460	18	23.34	19	5
变质砂岩	1000	20	26.16	21.22	4
全风化带	1500	20	31.53	27.27	7.5
变质砂岩	5000	23	33	30	5.59
强风化带	20100	23.5			0.3
变质砂岩					
中风化带					
管片					

3 计算结果分析

3.1 沉降模拟分析

地表沉降十分复杂,盾构法相对于其他施工方法对周围环境的影响较小,本文利用 Midas GTS nx 基于上述材料参数和约束条件开展模拟。首先建立土体简化模型,然后施加边界条件、约束条件以及重力场,通过重力作用模拟土体初始条件,最后通过删除盾构掘进位置土体单元建立相应单元体,迭代平衡后生成土体竖向位移云图(图 2)和地表沉降位移云图(图 3)。

从土体竖向位移云图和地表沉降云图清晰地看出:在上软下硬复合地层中地表沉降较大,选择最小半径横断面模拟结果,考虑到边界效应影响,剔除距离内外线 3 m 范围的数据,选择了若干距离外侧边



图 2 土体竖向位移云图

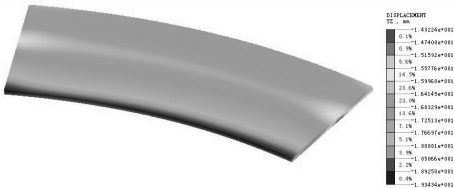


图 3 地表沉降位移云图

缘沉降点的沉降数值,绘制出了典型横向地表沉降曲线图(图 4)。

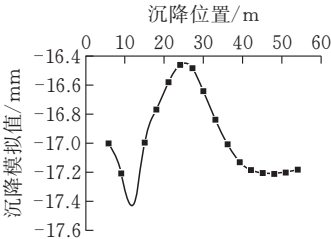


图 4 典型横向地表沉降曲线图

从图 4 可知:盾构外线隧道时,曲率小时,盾壳单元产生的地层损失并不明显,沉降呈正态曲线状,增大到中轴线位置附近达到最大值后减小。盾构机本身为直线刚体,在进行内线盾构施工过程中,必须通过一段段直线进行拟合使其与设计轴线吻合。内线曲率大,拟合难度大,掘进过程中纠偏效果差,内侧超挖严重,使得地层损失增大,因此沉降保持会逐渐增大,至中轴线保持最大值后会在一定区域继续持续,因此小半径曲线段盾构过程中,中轴线附近和半径内侧范围应作为沉降监测重点。本模型中模拟出外线和内线隧道最大峰值分别为 -17.43 mm 和 -17.20 mm ,已经接近了施工组织设计中根据《建筑地基基础规范》及以往深圳地铁建设经验中确定的 $\pm 20\text{ mm}$ 的地表沉降警戒值,应该采取相应沉降控制措施进行控制。

3.2 管片状态分析

隧道盾构施工过程中,管片受力状态十分复杂,在小半径施工过程中,内侧和外侧推力差过大往往会导致管片受力不均,对地表沉降以及管片破损影响最为明显^[11]。本实验主要模拟管片在小曲率半径施工情况下受力状态。其具体模拟过程如下:首先计算应力场去除初始位移,利用“钝化”、“激活”单元和改变材料参数模拟盾构的向前掘进,外围土体转换为衬砌,将掘进中产生的荷载施加到相应单元,

分别分析了管片纵向位移情况(图 5)和管片应力分布情况(图 6)。从图 5 中可以看出:外线纵向位移值较大,最大位移值为 11.47 mm ,施工过程中需要对相应施工工艺进行合理控制。



图 5 管片纵向位移

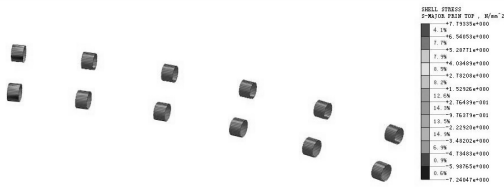


图 6 环向管片应力分布云图

图 6 是对部分典型的环向管片进行应力分析的云图,从云图可以清晰看出:环向管片主要受拉区为上部和下部,内外侧主要受压。环向管片的拉应力最大值为 7.78 MPa ,压应力最大值为 4.22 MPa 。管片内外侧应力分布明显不对称,上部和下部的应力分布呈现大致对称,外线和内线变化趋势基本相似。

4 地表沉降控制措施

通过上述模拟成果,有必要采取相应措施对地表沉降进行有效控制,以防地表沉降超限。依据该区间的工程地质和水文地质特点,结合全国地铁类似盾构项目地表沉降控制经验总结,提出了对整个向文区间地表沉降控制措施。

4.1 盾构机选型和参数优化

对盾构机的适当选型和合理的参数设置在地铁盾构过程中是十分重要的。为了保证在该上软下硬复合地层区间施工安全和满足该地质水文环境需要,本盾构项目选择复合式土压平衡盾构机。该类盾构机的刀盘具有避免泥饼形成的功能,其渣土装置优化后能排出各类粒径碎卵石,在盾构过程中配备了中轴式螺旋输送机、双闸门等装置,能有效防止施工过程中坍塌、喷涌等事故灾害,从而确保盾构过程中的安全。

为了有效地保证地表沉降控制在预警值之内,盾构的推力、掘进速度、扭矩、刀盘转速等掘进参数^[12]严格根据同类相似工程经验以及相关施工技术规范确定,本次盾构相关参数选择为:推力控制在 $1000\sim 1200\text{ kN}$,掘进速度控制在 $40\sim 45\text{ mm/min}$,扭矩控制在 $1100\sim 1600\text{ kN}$,刀盘转速控制

1.0~1.5 rap/min,具体参数值根据地质情况和监测反馈数据进行调整。

4.2 盾构掘进方向纠偏

盾构在曲线段推进过程中会有一定偏差,应该采取相关技术措施对掘进方向及时控制,保证掘进偏差在允许范围之内,避免土体超挖产生较大沉降。根据以往研究成果^[13]设置本次盾构偏差控制范围为:轴线偏差控制范围为± 50 mm、倾角控制控制范围±3 mm/m,在某些特殊情况下,倾角范围可根据实际情况调整到±10 mm/m。掘进过程上部千斤顶与下部千斤顶的行程差控制在±20 mm/m 内。

4.3 同步注浆及二次注浆

盾构施工过程中,管片与土体间会存一定孔隙,引起地表沉降。为提高土体强度应及时进行同步注浆^[14]。注浆材料和配合比根据以往施工经验和现场试验确定。同步注浆期间对地表沉降进行严格监测,出现过大沉降和隆起现象及时对注浆参数调整。本次盾构过程中对隧道顶部土体 120°范围内进行注浆,同时曲线内侧根据工程实际情况适当增加注浆范围。

注浆过程中浆液的硬化、收缩会导致浆体体积缩小,通过二次注浆来改善注浆材料与管片和土体之间的联结情况,提高其止水能力,减少地表沉降,

本次盾构中主要根据监测反馈结果,来判断是否进行二次注浆^[15]。

4.4 出渣量控制

出渣量过大或者过小,掘进掌子面容易发生坍塌或者空洞等工程灾害^[16]。因此为了保证掌子面的稳定性,必须对出渣量进行严格地控制。本次盾构掘进中,外壳直径为 6.28 m,管片长度为 1.5 m,基于理论 $V=(\pi/4)D^2L$ 分析出理论上出渣量约为 46.44 m³,考虑到土体松散系数等因素,因此实际掘进中出渣量应控制在 55.73~60 m³,以保证掌子面安全。

4.5 管片加强肋设置

根据管片数值分析结果看出:曲线外侧管片纵向位移相对较大,为了尽可能控制沉降在警戒值内,对管片纵向位移进行合理控制。对开挖后 50~60 m 范围内的管片选用纵向加强肋对其纵向刚度进行加强,从而约束其纵向位移。本盾构工程将槽钢与钢板进行焊接,将加强肋螺栓与管片注浆孔连接,实现管片纵向连接。本工程中根据管片宽度设计加强肋长度为 3 m,在管片内外两侧以及上下两侧分别布置两根加强肋,相邻加强肋段之间用螺栓进行连接,以保证随撑随拆。加强肋设计见图 7^[17]。

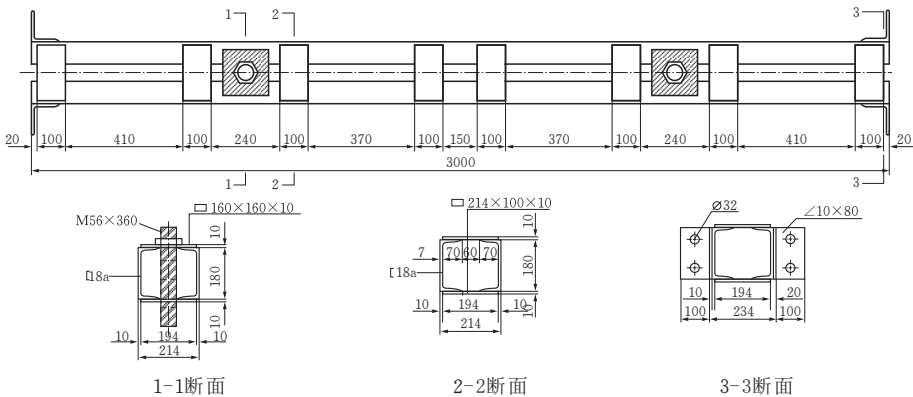


图 7 加强肋布置示意图

5 监测数据成果分析

通过该区间有限元分析,得出了小曲线半径段的地表沉降在转弯处的内侧明显较外侧大,在监测中应该作为重点进行监控,现场监测频率见表 3。

在监测中发现,各监测点最大沉降值并非出现在沉降最终稳定阶段,而是出现在外线开挖后二次扰动最剧烈时。根据典型横向沉降值所处位置附近的监测点最大沉降值绘制出相应的横向沉降曲线(图 8)可知:小曲线半径段内线最大沉降值在 D68 测点,为 -13.79 mm,内线最大沉降值约为

-9.20 mm,位于测点 D88 和 L6 之间,比数值模拟预测值分别减少了 3.64 mm 和 8 mm,这主要是在

表 3 现场监测频率表

监测位置	监测频率	
掘进面与监测断面前后距离	小于等于 20 m	1~2 次/天
	20~50 m	1 次/2 天
盾构后配套与监测断面前后距离	大于 50 m	1 次/周
	小于等于 30 m	1 次/天
	30~60 m	1 次/2 天
	大于 60 m	1 次/周
基本稳定后	1 次/月	

数值模拟过程中所假设条件处于保守和理想情况下设置以及采取相应沉降控制措施。总体上看,数值模拟结果与实际工程情况变化趋势基本相同,证明了数值模拟在进行预测过程中具有一定工程价值;同时根据监测点实测数据均远小于数值模拟结果,因此提出的总体沉降控制措施具有一定可行性。

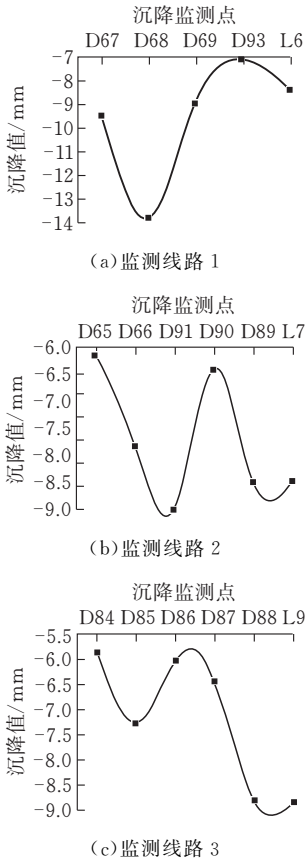


图 8 横向沉降监测沉降曲线图

6 结论与讨论

基于 Midas GTS nx 软件对深圳地铁 9 号线某小半径段地表沉降规律进行模拟预测,根据以往研究成果以及工程建设经验制定地表沉降控制措施,通过最终现场实测数据对模拟结果进行分析论证,可以得出以下几点结论:

- 1)最终的现场监测数据表明:基于上述有限元理论以及建模分析方法,对小曲线半径段地表沉降进行的模拟结果在进行盾构施工和地表沉降控制中具有一定的参考价值。
- 2)有限元数值模拟以及最终监测数据显示:在小曲线半径段盾构过程中,地表沉降量外线呈现沉降槽状,符合以往类似研究成果趋势,但小半径内侧由于盾构地层损失严重,沉降曲线呈指数状,因此外线中轴线处和内线中轴线起以内范围为小半径隧道盾构施工监测和沉降控制重点。
- 3)通过模拟数据和监测数据对比显示:对盾构

机合理选型,掘进中对盾构机参数、方向进行调整,做好出渣量控制,盾构完成后及时注浆,并为纵向位移大的管片设置加强肋,能有效降低地表沉降量。

[参 考 文 献]

[1] 陈龙.小半径曲线盾构掘进施工技术[J].建材与装饰, 2017(7):41-43.

[2] 王亮.砂性地层地铁暗挖施工地表沉降预测方法[J].城市轨道交通研究,2017(12):90-92,96.

[3] 宫亚峰,王博,魏海斌,等.基于 Peck 公式的双线盾构隧道地表沉降规律[J].吉林大学学报(工学版), 2018 (1):1-6.

[4] 台启民.暗挖交叠隧道地表沉降实测分析[J].现代隧道技术,2017,54(4):193-200.

[5] 陈开端.淤泥地层中小半径曲线隧道盾构施工技术[J].福建建材,2015(3):62,65-66.

[6] 赵俊.小半径曲线隧道盾构施工技术控制研究[J].建筑技术开发,2017,44(20):46-47.

[7] 周诗俊,王金安.曲线隧道盾构引起地表沉降分析[J].地下空间与工程学报,2007(5):909-913,971.

[8] 赵欣.深圳地铁九号线某区间隧道地表沉降控制研究[D].武汉:湖北工业大学,2017.

[9] 刘书斌,周立波.小半径曲线地段盾构施工质量调研与分析[J].地下空间与工程学报,2013(S2):1936-1939, 1950.

[10] Ma K S, Ding L Y. WSEAS Finite element analysis of tunnel-soil-building interaction using displacement controlled model[J]. Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2008,3(3):72-82.

[11] 段红海,方诗涛,赵东华,王金涛.地铁盾构管片受力分析及管片破损的控制措施研究[J]. 工程建设与设计, 2016(4):133-136+140.

[12] Loganathan N, Poulos H. G, Stewart D. P. Centrifuge model testing of tunneling induced ground and pile deformations[J]. Geotechnique, 2000,50(3):283-294.

[13] 宋天田,周顺华,徐润泽.盾构隧道盾尾同步注浆机理与注浆参数的确定[J]. 地下空间与工程学报,2008(1): 130-133.

[14] 吴贤国,姜洲,方伟立,张立茂,陈跃庆,张伟. 盾构同步注浆对地表沉降的影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016,19(6):101-106,111.

[15] 叶飞,苟长飞,陈治,毛家骅,杨鹏博,贾涛. 盾构隧道同步注浆引起的地表变形分析[J]. 岩土工程学报,2014, 36(4):618-624.

[16] 王怀志. 富水砂层土压平衡盾构施工关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2012.

[17] 陈强. 小半径曲线地铁隧道盾构施工技术[J]. 隧道建设,2009,29(4):446-450,474.