

不同施工方式对既有地铁隧道的影响分析

魏光华, 郑 玮, 朱海平

(深圳市综合交通与市政工程设计研究总院有限公司, 广东 深圳 518033)

摘 要:以深圳机场九道的道路及管线施工上跨地铁隧道为背景, 分别采用放坡开挖和顶管施工方式, 通过 MIDAS 软件建立了 2 种施工方式的二维和三维模型, 分别统计了各种情况下地铁隧道的横向、纵向位移, 对不同施工方式进行评估分析, 为后续施工提供了一定的指导意义。

关键词:放坡开挖; 顶管; 增量法; 地铁隧道; 位移

中图分类号: TU997; U453

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)08-0209-05

0 引 言

经过几十年的城市化进程, 大多数城市已有地铁线路, 当施工项目遇到地铁时, 须评估工程对现状地铁的影响, 已有学者对其进行了研究分析。

姜之阳等^[1]采用 FLAC3D 有限差分软件, 建立了顶管隧道上跨北京某地铁的模型, 发现地铁隧道最大上浮位移位于顶管隧道轴线处, 且当配重 50% 的损失土体重量时, 地铁上浮位移最小。林启明^[2]通过数值计算, 分析了广州某地铁上方基坑开挖对地铁的影响。张弘弛^[3]使用三维数值模拟, 评估了合肥某地铁上方顶管施工的影响, 最终发现各项指标均满足控制值。易丹等^[4]采用了数值模拟与现场监测相结合的手段, 对四川某上跨地铁的涵洞进行了分析, 发现地铁竖向位移先受先期掌子面支护压力影响较大, 后面以卸载效应为主, 而横向位移则受二者共同控制。赵飞阳^[5]采用数值模拟, 研究了顶管施工中的不同工况对现有地铁的影响。

不同的施工方式对既有地铁隧道的影响各有不同。鉴于此, 本文以实际现场为基础, 分别建立了二维和三维模型, 对放坡开挖和顶管施工 2 种方案进行模拟分析, 对工程施工过程进行评估, 为该地区类似项目的施工提供一定的借鉴意义。

1 项目概述

拟建工程沿线原始地貌为海积平原、冲积平原。里程桩 K0+000 ~ K1+200 现状为新近堆填土, 进行

软基处理后, 部分区域尚未卸载。里程桩 K1+200 ~ K2+000 现状南侧为现有机场九道, 北侧主要为福永河河道水域用地、绿地、综合保障设施用地、机场场道用地。地表水较为发育, 雨季水量大, 汇水面积较大, 缺少长期水文观测资料。除此之外, 拟建工程沿线仅零星分布有排水沟、水坑等, 地表水贫乏, 主要为雨季积水, 汇水面积小。

本项目道路红线内拆迁量较小, 有部分厂房需要拆迁, 没有重要建筑物、文物、名木、古迹等设施。其中五福盈门绿地公园为福永街道主要城市景观雕塑公园, 建成已有 10 年, 对福永人民有一定历史文化影响。

因此, 在桩号 K0+440 附近, 影响道路及管线施工的主要因素即为现状地铁。以下详述机场九道工程及地铁情况。

1.1 地铁情况

机场九道新建工程位于深圳市宝安区。该工程涉及的地铁线路为 11 号线和 11 号线出入线。

地铁 11 号线和 11 号线出入线大致呈南北走向, 隧道采用盾构法施工。隧道外径均为 6.0 m, 衬砌管片厚度为 300 mm。地铁 11 号线穿越地层有砂质黏性土层、全风化土层, 道路红线范围内正线盾构隧道顶高程为 -13.587 ~ -13.088 m; 11 号线出入线穿越地层有黏土层、砂质黏性土层, 道路红线范围内正线盾构隧道顶高程为 -3.765 ~ -3.684 m。

1.2 机场九道工程情况

机场九道新建工程施工及管道基坑开挖上跨地铁 11 号线和 11 号线出入线隧道, 隧道结构边线外 50 m 范围内为地铁安全保护区。地铁安全保护区涉

收稿日期: 2023-05-24

作者简介: 魏光华(1981—), 男, 学士, 高级工程师, 从事道路及岩土工程设计与研究工作。

及的地铁 11 号线左右线隧道总长度约 500 m, 地铁 11 号线出入线左右隧道总长度约 450 m。

本文研究断面为道路桩号 K0+440 处, 所涉及的地铁平面设计图和研究断面 1-1 位置见图 1。

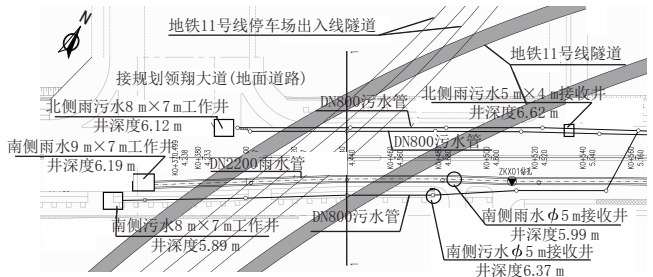


图 1 地铁平面设计图及研究断面 1-1 位置

2 数值模拟情况

关于上跨地铁隧道, 本工程共做 2 套方案, 分别为放坡开挖方案和顶管方案。数值模拟采用 MIDAS 软件, 分别建立二维和三维模型, 并对结果进行分析。

2.1 放坡开挖工况条件下

2.1.1 二维情况

计算断面选取道路里程 K0+440 处, 原路面高约 4.10 m, 新建道路高约 4.44 m。

道路北侧雨污水管(皆为 DN600 管径)同槽开挖, 与道路南侧污水管(DN600 管径)开挖同时施工; 道路南侧污水管基坑开挖回填后, 对雨水箱涵(2.6 m×2.4 m)进行开挖回填。

南侧污水管基坑底标高约 -0.5 m, 南侧雨水箱涵基坑底标高约 0.5 m; 北侧污水管基坑底标高约 0.2 m, 北侧雨水管基坑底标高约 2.1 m, 基坑采用 1:1 放坡开挖。

道路北侧雨污水管同槽开挖; 道路南侧分 2 次施工, 先进行污水管基坑开挖回填, 再对雨水箱涵进行开挖回填。

地质条件自上而下分别为: 杂填土、淤泥、砾砂、砂质黏性土。主要岩土物理力学参数见表 1。

表 1 主要岩土物理力学参数

地层编号	地层名称	地基承载力基本容许值 f_{a0} /kPa	压缩模量 E_s /kPa	变形模量 E_0 /kPa	天然重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)	岩土体黏结强度特征值 /kPa
①	杂填土	80~110	2.5	4.0	18.3	10.0	14.0	15
②	淤泥	45	2.0	3.0	17.0	10.0	3.5	8
③ ₁	黏土	160	4.5	10.0	18.6	22.0	16.0	25
③ ₂	砾砂	200		25.0	19.0	0	35.0	50
④	砂质黏性土	220	4.8	23.0	18.8	25.0	20.0	35
⑤ ₁	全风化花岗岩	350	7.0	30.0	19.0	28.0	23.0	50
⑤ ₂	强风化花岗岩	500	8.0	50.0	20.0	28.0	33.0	80
⑤ ₃	中风化花岗岩	2 500			22.5			300
⑤ ₄	微风化花岗岩	5 000			26.0			650

注: 依据勘察报告相关表格数据, 部分参数根据规范与经验调整。

MIDAS GTS NX 模型中土体采用二维面单元, 模型外尺寸为 130 m×43 m; 地铁 11 号线和 11 号线出入线隧道衬砌采用一维线单元, 其截面尺寸与实际结构相同。各土层则假设为弹塑性体, 采用莫尔-库仑破坏准则及修正摩尔-库仑本构模型, 回弹模量取弹性模量的 3 倍, 约束侧面水平向位移和底部竖向位移。模型断面和尺寸见图 2。

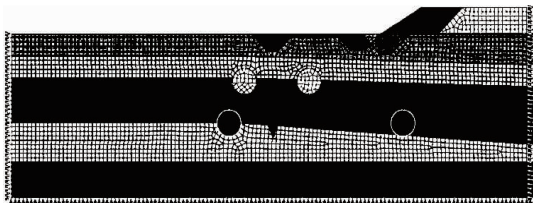


图 2 模型断面和尺寸

计算工况共有 5 个: 初始场地应力计算; 地铁隧道建成工况, 位移清零; 道路结构层开挖; 第一次管道开挖; 第二次管道开挖。

二维状态下各工况模型图见图 3。

二维有限元分析成果综合考虑道路开挖和管道开挖双重影响, 假定工程问题为平面应变问题, 建立平面应变模型。

地铁隧道位移值(二维开挖)见表 2。其中的 Y 方向位移以向上为正(下同)。

由表 2 可知: 随着工况的不断推进, 地铁 11 号线及 11 号线出入线隧道在 X、Y 方向上均会表现出位移增大的结果; 由于地铁 11 号线出入线距离地面更近, 其比地铁 11 号线受影响更大, 因此在 X 方向

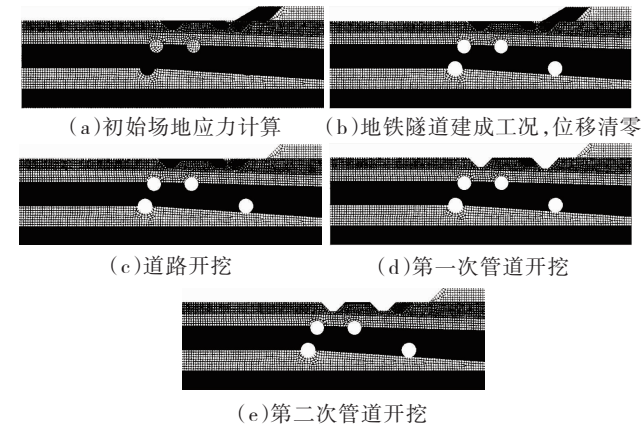


图 3 二维状态下各工况模型图

表 2 地铁隧道位移值(二维开挖) 单位:mm

工况	11 号线出入线		11 号线	
	X 向位移	Y 向位移	X 向位移	Y 向位移
工况 2(隧道建成)	0	0	0	0
工况 3(道路开挖)	2.8	0.4	2.1	3.3
工况 4(第一步开挖)	4.3	4.2	3.0	5.0
工况 5(第二步开挖)	4.3	5.2	2.9	4.0

上,地铁 11 号线出入线隧道比 11 号线正线隧道的位移更大;Y 方向上的位移则与 X 方向上有较大不同,主要表现在地铁 11 号线出入线隧道是连续的增大,而地铁 11 号线正线隧道为先增大后减小的趋势。这应与道路开挖状况有关,道路开挖部分的土体在地铁 11 号线隧道正上方,而 11 号线出入线隧道则在其侧方,因此地铁 11 号线隧道的 Y 方向位移会表现得更大。

2.1.2 三维情况

三维有限元模型见图 4,地铁隧道结构模型见图 5。模型底面为强风化岩,模型节点 18 289 个,单元 105 875 个。模型中土体采用实体单元,水平方向宽 178 m,掘进方向长 198 m,土层厚度 38 m。三维状态下各工况模型图见图 6。

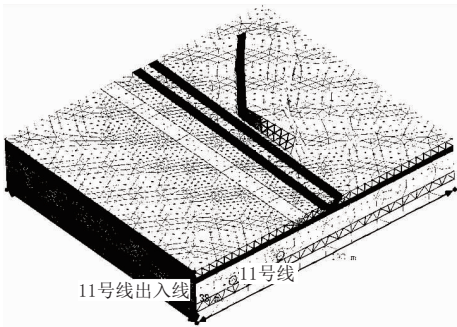


图 4 三维有限元模型

地铁 11 号线及 11 号线出入线隧道采用二维板单元,其截面尺寸与实际结构相同,地质信息与二维

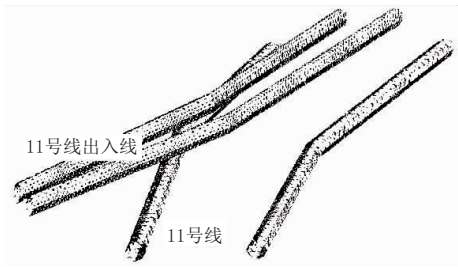


图 5 地铁隧道结构模型图

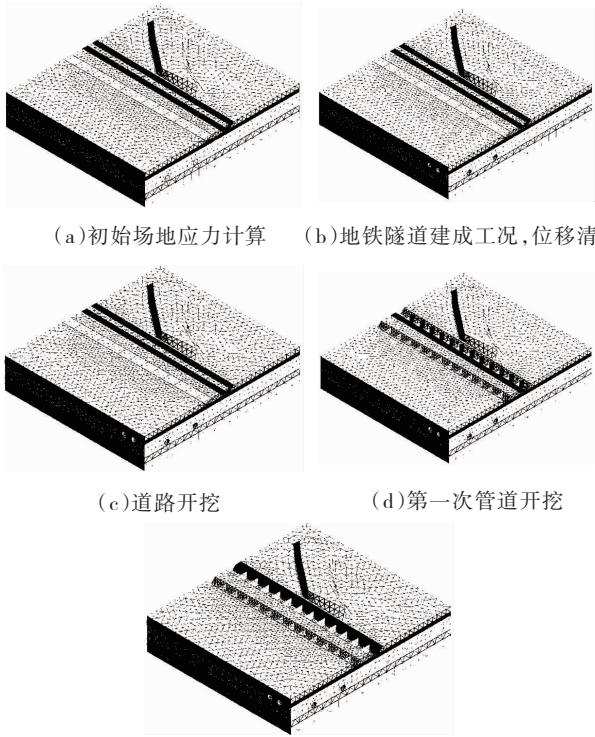


图 6 三维状态下各工况模型图

情况相同;计算模型中各垂直边边界条件为水平铰支约束,模型底面为竖向位移约束;各计算施工阶段边界条件不变。

本次分析计算采用增量法。增量法中荷载根据施工过程的变化逐步增加(或减小),边界条件也作相应调整,整个计算分析过程完全按实际施工过程分为多个阶段,最终工况的结构内力和单元应力、应变根据各个阶段计算结果逐步叠加而成。

通过三维有限元数值模拟分析,地铁隧道位移表(三维开挖)见表 3。

2.1.3 放坡开挖工况下对比

在放坡开挖工况下,由上述模拟结果可得以下结论:

(1)随着工况的推进,不管是二维模拟还是三维模拟,地铁 11 号线及 11 号线出入线隧道在 X、Y 方向上均会表现出位移增大的结果。

(2)在 X 方向上,随着工况的推进,地铁 11 号线

表 3 地铁隧道位移表(三维开挖) 单位:mm

工况	11 号线出入线		11 号线	
	X 向位移	Y 向位移	X 向位移	Y 向位移
工况 2(隧道建成)	0	0	0	0
工况 3(道路回填)	0.40	0.50	0.40	2.40
工况 4 (第一步管道开挖)	0.50	2.60	0.40	3.70
工况 5 (第二步管道开挖)	0.60	2.90	0.40	3.80

出入线隧道表现出位移增大的趋势,而地铁 11 号线正线隧道则一直稳定。这应与二者的上覆土层厚度有关,地铁 11 号线隧道埋深更深。但三维模拟结果均比二维模拟结果小,这应该是三维工况条件与现实更为接近,结果更为真实。

(3)Y 方向上的位移比 X 方向上大,但三维模拟结果均比二维模拟结果小。这说明施工时主要存在纵向的位移,横向位移相对较小。

2.2 顶管工况条件下

2.2.1 二维情况

模型尺寸及各种参数皆与放坡开挖工况下的二维模型一致。模型及位移边界约束见图 7,计算工况见表 4,地铁隧道位移表(二维顶管)见表 5。

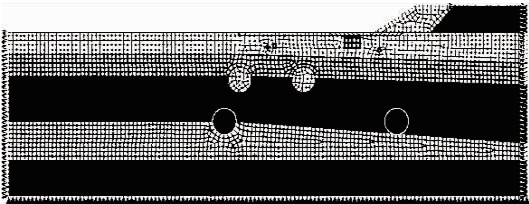


图 7 模型及位移边界约束

表 4 计算工况

工况	工况明细
工况 1	初始场地应力计算
工况 2	地铁隧道建成,位移清零
工况 3	道路开挖
工况 4	顶管施工
工况 5	考虑 1%土层损失

表 5 地铁隧道位移表(二维顶管) 单位:mm

工况	11 号线出入线		11 号线	
	X 向位移	Y 向位移	X 向位移	Y 向位移
工况 2(隧道建成)	0	0	0	0
工况 3(道路开挖)	2.7	3.1	2.1	0.3
工况 4 (第一步顶管施工)	3.0	3.5	2.2	4.0
工况 5 (考虑 1%土层损失)	3.4	3.5	2.3	4.0

2.2.2 三维情况

模型尺寸及各种参数皆与放坡开挖工况下的三维模型一致。计算工况见表 6,地铁隧道位移表(三维顶管)见表 7。

表 6 计算工况

工况	工况明细
工况 1	初始场地应力计算
工况 2	地铁隧道建成,位移清零
工况 3	道路开挖
工况 4	顶管两侧基坑施工
工况 5	顶管顶进 30 m
工况 6	顶管顶进 60 m
工况 7	顶管施工完成

表 7 地铁隧道位移表(三维顶管) 单位:mm

工况	11 号线出入线		11 号线	
	X 向位移	Y 向位移	X 向位移	Y 向位移
工况 2(隧道建成)	0	0	0	0
工况 3(道路开挖)	0.3	0.3	0.4	0.3
工况 5 (顶管顶进 30 m)	0.3	0.1	0.4	2.1
工况 6 (顶管顶进 60 m)	0.3	0.1	0.4	2.2
工况 7 (顶管完成 + 1%土层损失)	0.4	1.1	0.4	2.3

2.2.3 顶管工况下对比

在顶管工况下,由上述模拟结果可得到以下结论。

(1)不管是二维模拟还是三维模拟,随着工况的推进,地铁 11 号线及 11 号线出入线隧道在 X、Y 方向上均会表现出位移增大的结果。

(2)在 X 方向上,随着工况的推进,地铁 11 号线出入线隧道表现出位移增大的趋势,而地铁 11 号线正线隧道则一直稳定。但三维模拟结果均比二维模拟结果小。

(3)Y 方向上的位移比 X 方向上大,但三维模拟结果均比二维模拟结果小。

2.3 不同工况对比分析

2.3.1 二维结果对比分析

二维情况下,对放坡开挖工况与顶管工况的模拟数据进行对比,可得到结论。

(1)地铁 11 号线及 11 号线出入线隧道无论是在 X 方向还是在 Y 方向上,放坡开挖的施工方式均要比顶管施工方式的位移大。

(2)由于地铁 11 号线隧道距离地面较深,因此其在 2 个方向上的位移均要小于地铁 11 号线出入线隧道。

2.3.2 三维结果对比分析

三维情况下,对放坡开挖工况与顶管工况的模拟数据进行对比,可得到如下结论:

与二维情况类似,顶管施工位移均较小;相比 X 方向,Y 方向上的位移更大,约 2 mm;因为是三维模拟,与现实情况接近,其模拟结果也更接近真实值。

2.4 方案对比评价

以上内容是从技术和模拟方面的对比分析,以下从环境、造价、工期、程序审批等方面,对 2 种方案进行分析,见表 8。

表 8 方案对比评价

项目	放坡开挖	顶管
工期	短	长
造价	低	高
环境影响	大	小
地铁安全影响	大	小
程序审批	不通过	通过

相比放坡开挖方案,顶管方案在工期和造价方面都不占优。但是在环境影响和地铁安全影响方面,顶管方案影响较小。

最重要的一点是本工程在方案审批阶段,放坡开挖方案审批不通过,最终采用了顶管方案。

3 结 语

(1)无论是二维模拟还是三维模拟、放坡开挖工况和顶管施工工况,地铁 11 号线及 11 号线出入线

隧道在 X、Y 方向上均会表现出位移增大的结果。

(2)由于地铁 11 号线出入线隧道距离地面更近,因此其位移较大。同时 X 方向上的位移要比 Y 方向上的位移小。

(3)通过对比可知,三维数值模拟结果明显小于二维平面模拟结果。同时顶管施工位移要明显小于放坡开挖位移。

(4)采用顶管施工工艺和三维有限元模拟,X 方向位移最大为 0.4 mm,Y 方向位移最大为 2.3 mm。

(5)综合考虑环境影响、造价、工期、地铁安全影响、程序审批等因素,地铁正上方段 K0+353~K0+520(共 167 m)市政雨污水管道施工采用顶管方案。

(6)本次计算分析结果对将来的类似工程具有借鉴意义,顶管施工可以解决地铁保护与道路管线施工之间的矛盾。

(7)机场九道新建工程已开始施工,下一步将进行既有隧道的监测数据采集和处理,并与仿真模拟数据进行对比。

参考文献:

[1] 姜之阳,张彬,刘硕,等.大断面矩形顶管上跨施工对既有地铁隧道变形影响研究[J].工程地质学报,2022,30(5): 1703-1712.
[2] 林启明.基坑施工对下卧地铁隧道影响与控制措施[J].广东土木与建筑,2021,28(11):66-69.
[3] 张弘弛.顶管施工对既有地铁隧道的安全影响分析[J].低温建筑技术,2020,42(11): 105-108.
[4] 易丹,严德添,党军.大断面矩形土压平衡式顶管上跨施工对运营地铁隧道变形的影响分析[J].隧道建设(中英文),2018,38(4):594-602.
[5] 赵飞阳.矩形顶管通道施工对既有地铁区间隧道的影响分析[J].城市道桥与防洪,2017(4):154-157.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com