

文章编号: 1006—2106(2009)10—0055—04

深圳地铁隧道邻接施工沉降数值模拟研究^{*}

张会刚^{1**} 姜志玲² 章玉伟¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南石油大学, 成都 610500)

摘要: 研究目的: 针对深圳地铁新建隧道邻接既有隧道工程, 利用 FLAC3D 软件进行施工过程模拟, 探讨新建地铁区间隧道施工过程中新建隧道周边地层位移、既有隧道施工沉降、地面沉降、新建与既有隧道的安全等问题。

研究结论: 在本地质条件和特定盾构推力情况下, 地面最大沉降 12.9 mm, 最大隆起值 0.7 mm, 变形量满足设计要求; 既有隧道施工结束并完成相应固结沉降最终沉降值为 1.8 mm, 地表沉降槽宽度约 60 m, 沉降曲线相对平坦, 满足既有隧道横向差异沉降要求。

关键词: 邻接施工; 地铁隧道; 地面沉降; 数值模拟

中图分类号: U231+.3 **文献标识码:** A

Research on the Numerical Simulation of Subsidence of Existing Tunnel Caused by Adjacent Metro Tunnel Construction in Shenzhen

ZHANG Hui-gang, JIANG Zhi-ling, ZHANG Yu-wei

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd. Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: Research purposes: The process is simulated for construction of a metro tunnel adjacent to existing tunnel in Shenzhen with FLAC3D software and the discussions are made on the surrounding stratum displacement, the existing tunnel subsidence, ground subsidence, the safety of the new tunnel and the adjacent metro tunnel.

Research conclusion: Under this geological condition and specially pushing force of shield, the maximum of the ground subsidence is 12.9 mm, and the maximum rise value of ground is 0.7 mm. They satisfy the design requirements. After the completion of the existing tunnel and taking some measures, the corresponding consolidated subsidence value is 1.8 mm. The width of subsidence slot under the tunnel floor is 60 m. The subsidence curve is relatively flat, which satisfies the lateral differential subsidence demand of the existing tunnel.

Key words: adjacent construction; metro tunnel; ground subsidence; numerical simulation

随着城市土地利用的高度化, 城轨交道建设重叠隧道、线站位平行或交叉等日益普遍, 轨道交通施工对既有结构物的影响以及自身近距离施工时的相互影响(以下简称: 近接施工影响)问题已引起岩土工程勘察、设计及地铁承建商的广泛关注, 并成为一项亟待解

决的课题。《既有铁路隧道近接施工指南》对既有铁路隧道近接死活工分类问题做了较为系统、全面的阐述, 提出了“近接度”的划分标准。与以前相比, 近期的近接施工工程规模更大、与既有建筑物的间距更小。本文通过对深圳地铁某线下穿既有地铁隧道交叉段进

* 收稿日期: 2008—12—16

** 作者简介: 张会刚, 1975年出生, 男, 工程师。

行动态施工模拟,探讨施工过程地层位移、既有隧道施工沉降、地面沉降,为隧道交叉段监控量测系统的设计、施工方案的优化及安全控制提供依据。

1 工程地质概况

该工程区间新建隧道与既有隧道垂直交叉,既有隧道为运营隧道,新建隧道拟采取盾构法施工。区段范围上覆地层为第四系全新统人工填筑土(Q_4m)、冲洪积粘性土及砂层(Q_{4al+pl})、残积粘性土层(Q_{el})、下伏基岩为燕山期($\gamma 53$)花岗岩(图1)。新建隧道洞身穿越花岗岩全、强、中等风化层;与既有隧洞间最小净距仅为1.07 m,中间夹土体为全风化岩层。花岗岩全风化颗粒成分组成中,粉粘粒含量一般为5%~35%,角砾含量为10%~60%,砂粒含量基本上大于30%~54%,反应花岗岩颗粒组成的高度不均一性,是花岗岩不均匀风化、原岩结构及局部斑晶条带、蚀变带等综合影响的结果。综合围岩分级为V级。

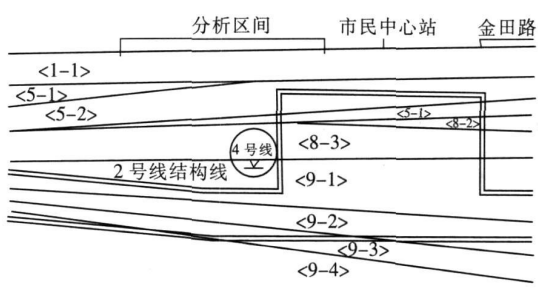


图 1 目标断面地质概况

2 三维分析模型

2.1 最不利工况的确定

根据纵断面图资料,确定盾构隧道近接既有隧道施工时的最不利工况在YCK 26+270处,与既有隧洞间最小净距仅为1.07 m,中间夹土体为全风化岩层,既有隧道埋深为9.2 m。为分析盾构施工过程对既有隧道的影响,选择YCK 26+270作为目标断面(图2),选择正交段YCK 26+270~YCK 26+330作为分析区间。

2.2 计算模型的建立

利用FLAC3D进行三维施工模拟分析局部重叠隧道段在整个施工过程中的地层位移、既有隧道施工沉降、地面沉降等问题。

盾构隧道尺寸及各项参数严格按照设计图尺寸建模(图3)。材料采用摩尔库仑准则,大应变变形模型;假定地表及各岩土层均成层均质水平分布,各向同性,不考虑地下水的影响;隧道埋深较浅,所处围岩结构疏

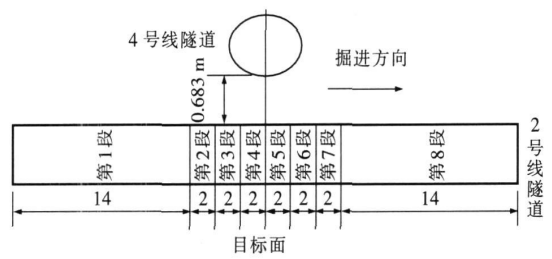


图 2 目标断面示意图(单位:环)

松,计算中忽略构造应力;地应力场按自重应力场考虑,支护结构按弹性计算;土压平衡盾构机,盾构推力为在开挖面静止土压力的基础上另加20 kN/m²的推力。采用等参8节点6面体三维实体单元模拟衬砌、地层及注浆加固层,在隧道结构的周边围岩采用细密单元;数值模型分析总共13.79万个单元,约14.7万个节点。

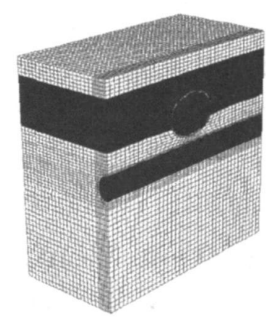


图 3 有限元整体网格(局部)

2.3 模型边界条件

在隧道横断面内水平向右为X轴(横向)正向,竖直向上为Y轴(竖向)正向,盾构隧道掘进方向为Z轴(纵向)负向。边界条件:在隧道横断面内水平方向取60 m(约10倍盾构隧道直径),竖直方向从地表向下取总长54 m(约9倍盾构隧道直径),纵向断面为60 m(40环)盾构隧道区间;其中YCK 26+270断面和YCK 26+330断面为Z方向约束,左右X面为X方向约束,底面为Y方向约束,地表面则为自由面。

因地铁4号线已经建成并投入运营,主要模拟2号线隧道开挖对4号线隧道的影响,重点研究2号线下穿既有隧道前后12环(18 m)的情况,将第4和第5段的交界面作为数值模拟分析的目标面,本三维数值模拟分析中采用17个施工荷载步模拟现场盾构隧道的施工全过程。

2.4 计算参数

按照不同成因时代、不同岩土类别、不同状态确定目标断面附近自上而下穿越地层,按照岩土工程勘察报告逐层提供相应力学参数(表1)。盾构管片衬砌管

片厚度为 300 mm, 衬砌环每环 1.5 m, 衬砌环采用错缝拼接方式。考虑接头影响及拟定采用的错缝拼接方式, 刚度折减系数按 0.75 考虑。

表 1 盾构邻接既有隧道施工计算参数

项 目	E /GPa	ν	γ / (kN·m ⁻³)	c /MPa	φ /(°)
< 1-1>素填土	0.02	—	19	0.015	10
< 5-2>细砂	0.03	0.22	19.5	—	30
< 8-3>砾质粘土	0.02	0.3	18.8	0.025	20
< 9-1>全风化花岗岩	0.08	0.26	18.4	0.026	23
< 9-2>强风化花岗岩	0.1	0.25	20.9	0.027	27
< 9-3>中等风化花岗岩	2	0.28	25.0	0.4	38
< 9-4>微风化花岗岩	20	0.27	25.9	1.0	42
盾构管片衬砌	$\frac{35 \times}{0.75}$	0.18	25.0	—	—

2.5 模拟结果及分析

2.5.1 地层位移

盾构隧道施工过程中, 在隧道横断面内, 地层竖向位移主要集中在两隧道拱顶以上和仰拱以下的竖直区域; 施工过程中, 以下洞圆心高度为分界线, 向上为地层下沉区域, 向下为地层隆起区域。在隧道纵断面方向上, 由于隧道施工对隧道前方和后方土体的影响范围将主要集中在盾构隧道施工断面前方和后方 6 环(9 m)的区域内, 洞周地层的最大下沉值为 12.9 mm(上洞与地表间土层)、最大隆起值为 0.7 mm(下洞拱底)、两洞之间地层的位移表现为向下沉降(图 4)。

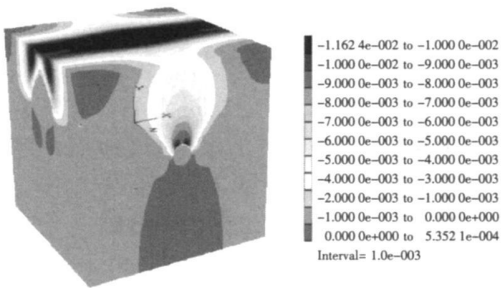


图 4 下洞施工结束后地层竖向位移分布(单位: m)

2.5.2 目标面地表沉降

在下洞的施工过程中, 当盾构机到达开挖面之前, 开挖面地表的累积地表沉降值约占其单洞累积地表沉降值的 90%; 当施工目标面前后 3 环盾构隧道时, 由施工引起开挖面地表的累积地表沉降值约占其单洞累积地表沉降值的 5%; 当盾构机通过以后, 盾构隧道的固结和后续沉降约占其单洞累积地表沉降值的 5%。在各施工阶段地表沉降的分布均为以隧道中心线对应地表点为中心对称轴成左右对称状态, 并且最大地表沉降点为隧道中心线两侧 5 m 对应的地表点。目标面

在施工结束并且完成相应的固结沉降后达到的最终地表沉降值约为 11.6 mm(图 5)。

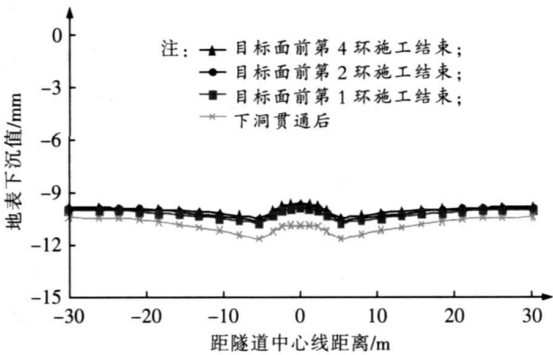


图 5 目标面地表随施工下沉情况(单位: mm)

2.5.3 目标面既有隧道沉降

在下洞的施工过程中, 当盾构机到达开挖面之前, 既有隧道的累积沉降值约占其最终累积沉降值的 25%; 当施工目标面前后 3 环盾构隧道时, 由施工引起既有隧道的累积沉降值约占其最终累积沉降值的 55%; 当盾构机通过以后, 既有隧道的固结和后续沉降约占其最终累积沉降值的 20%。在各施工阶段既有隧道沉降的分布均为以下洞中心线为中心对称轴成左右对称状态, 并且最大沉降点位于隧道中心线上, 既有隧道在施工结束并且完成相应的固结沉降后达到的最终沉降值约为 1.8 mm(图 6)。

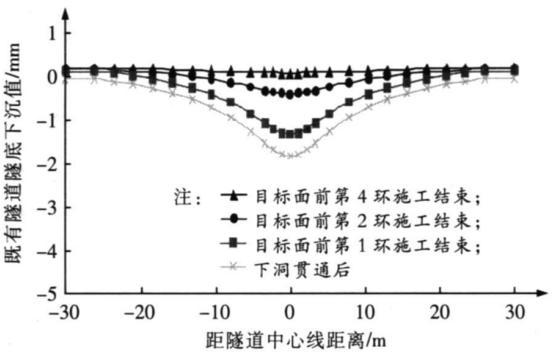


图 6 目标面既有隧道随施工下沉情况(单位: mm)

3 数值模拟结论

- (1) 地层竖向位移主要集中在两隧道拱顶以上和仰拱以下的竖直区域, 两洞之间地层的位移表现为沉降, 洞周地层的最大下沉值为 12.9 mm(上洞与地表间土层)、最大隆起值为 0.7 mm(下洞拱底)。
- (2) 地面沉降表现为新建隧道中线对应地面形成沉降槽, 其中隧道交叉部位上部隧道对应地表为主要沉降区, 地表沉降最大为 11.6 mm。满足“地面沉降量一般控制在 30 mm 以内, 隆起量控制在 10 mm 以内”。

的要求。

(3)既有隧道在目标面后第 1 环施工结束沉降值为 1.3 mm,既有隧道施工结束并完成相应固结沉降最终沉降值为 1.8 mm。沉降值满足运营部门“盾构隧道施工期间,4 号线既有隧道结构位移应控制在 ±15 mm 以内”的要求。

(4)既有隧道为运营隧道,保护等级为一级,运营隧道几何尺寸方面的要求为:隧道内两轨道横向高差不大于 2 mm,轨向偏差和高低差小于 2 mm/10 m (即横向差异沉降小于 1.4‰);由于隧道围岩物性指标较高,施工过程中既有隧道围岩位移较小且基本无塑性流动现象,地层稳定,沉降不大,地表沉降槽宽度约 60 m,沉降曲线相对平坦,满足既有隧道横向差异沉降要求。

4 地面沉降隆起原因分析

施工阶段隧道纵向所产生的地表变形可分为初始沉降、开挖面前的变形、盾尾沉降、盾尾空隙沉降、后续固结沉降 5 个阶段 (表 2)。盾构掘进产生地面沉降与施工方法、地质特性等密切相关,但盾构掘进产生地面沉降或隆起的原因可以归纳为地层损失。

表 2 地面沉降类型、成因及机理

沉降类型		主要原因	应力扰动	变形机理
初始沉降		地下水位降低,土体密实	孔隙水压力减少,有效应力增加	孔隙比减少,固结
开挖面前变形	隆起	盾构推力过大	反向土压力增加	压缩产生弹塑性变形
	沉降	推力过小或过量取土	应力释放,扰动	弹塑性变形
盾构通过时的沉降		施工扰动	扰动,应力释放	压缩
盾尾空隙沉降		注浆等支护不足或出现超挖	土体应力释放	弹塑性变形
固结沉降		产余影响	应力松弛	蠕变压缩

5 地面沉降控制措施及建议

控制地面沉降的主要技术关键是保持盾构开挖面的稳定和及时填充隧道与地层之间的建筑空隙。

5.1 保持盾构开挖面的稳定

盾构开挖面的稳定可以通过优化掘进参数来控制。为优化盾构施工参数,必须熟练掌握盾构机的操作,根据地面变形曲线进行实测反馈,以验证选择施工的合理性或据以再调整优化施工参数。通过设定推进速度、调整排土量或设定排土量调整推进速度,以求得舱压力与地层压力的平衡。

5.2 同步注浆与二次注浆

为了减小和防止地面沉降,在盾构掘进中,要尽快在脱出盾构后的衬砌背面环形建筑空隙中充填足量的浆液材料。根据地质条件,确定合理的浆液配比,注浆压力、注浆量及注浆起讫时间对同步注浆能否达到预期效果起关键作用;二次压浆可弥补同步注浆不足,是减少地表沉降的有效辅助手段。

5.3 注意盾构在曲线上推进及盾构纠偏

盾构在曲线上推进时,土体对盾构和隧道的约束力差,盾构轴线较难控制,因此推进速度要放缓、纠偏幅度不要过大、加大注浆量、加强纠偏测量工作等,以减小地层损失,降低地面沉降量。

5.4 隧道断面上软下硬,盾构施工前应进行地层注浆处理;同时应精心设计制作刀盘,在保留对软岩、黏性土地层适应性的基础上,着重提高刀盘对硬岩的破岩能力和对软硬不均地层的适应性,避免盾构机推进过程因地层上软下硬而出现“抬头”现象加大对既有隧道的影响。

5.5 因交叉隧道距离盾构井距离较短,盾构机处于调整姿态阶段,对地层的影响较大,因此应严格控制盾构进洞的姿态,进行精度控制和纠偏。同时施工图设计阶段应结合车站、区间进行优化,尽量增加盾构机进洞姿态调整的距离,以便盾构机平稳推进。或盾构机改由本站进洞为本站出洞以减少盾构机进洞的影响。

5.6 盾构隧道施工过程中上下两洞之间地层应力释放,施工过程中应对上下两洞间的地层进行加固,加固后地层的凝聚力应不小于 0.32 MPa。

5.7 为了保证盾构机进出洞的安全、正常的掘进方向、洞口的止水要求,在盾构进出洞前均应对一定范围内的地层进行加固和止水,建议地面采用旋喷注浆方式加固地层及止水。注浆加固范围为线路纵向 6.0 m 隧道周边 3.0 m 线以内的范围,如遇强风化岩层,则加固至强风化化岩层顶面。要求加固后的土体的无侧限抗压强度不小于 1.0 MPa,渗透系数小于 10^{-5} cm/s。

5.8 施工过程应做好土体变形监测、建(构)筑物监测、衬砌环内力、变形量测。

6 结论

该工程采用 FLAC3D 对局部重叠隧道段的施工过程进行三维模拟分析,实际施工监测数据与模拟分析结果基本吻合,实际监测结果略大于模拟结果,主要原因为:

- (1) 计算未考虑地下水损失而引起的地表沉降,
- (下转第 63 页)

可, 盾构通过时地面列车应减速缓慢行驶。

(2) 通过与铁路邻近的和平大道侧地表沉降监测数据比较可知, 由于地面列车的影响, 隧道下穿铁路引起的地表沉降比一般情况下盾构推进引起的地表沉降量大, 沉降槽的深度和范围也更大。下穿铁路时, 在盾构通过后较长一段时间后续沉降持续增大, 后续沉降占总沉降的比重也更大。

(3) 计算和监测结果都显示双线盾构最终沉降槽中心位于两条隧道之间并明显靠近后推进的隧道。

(4) 盾构施工阶段引起地面沉降主要因素是施工导致地层损失, 主要通过同步注浆和调整盾构施工参数来控制, 因此在下穿铁路前一段距离, 根据地面沉降监测情况, 进行模拟推进, 不断优化盾构施工的各种技术参数是必要的。

(5) 根据本工程的经验, 类似工程地质条件下, 通过加强施工管理, 合理设定泥水压力, 熟练盾构机操作, 控制泥水压力波动, 保证适当的注浆量, 地层损失可以减小到 0.5% 左右。

参考文献:

- [1] 吕培林, 周顺华. 软土地区盾构隧道下穿铁路干线引起的线路沉降规律分析 [J]. 中国铁道科学, 2007(2): 12—15
- [2] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991
- [3] 杜孔泽, 严广艺. 近距离盾构隧道下穿铁路沉降分析 [J]. 山西建筑, 2005(14): 80—81
- [4] 肖龙鸽, 王超峰, 赵运臣. 大直径泥水盾构施工引起的地表沉降分析和对策 [J]. 现代隧道技术, 2008(5): 50—53
- [5] 曹剑峰, 韦凯. 软土地区盾构下穿铁路地表变形规律研究 [J]. 甘肃科技, 2008(4): 111—113
- [6] 肖广良. 盾构在软土地层穿越既有铁路施工技术 [J]. 隧道建设, 2008(3): 325—329
- [7] 骆建军, 张顶立, 王梦恕. 地铁施工沉降监测分析与控制 [J]. 隧道建设, 2006(1): 10—12
- [8] 刘洪洲. 盾构施工对软土地层沉降影响综述 [J]. 公路隧道, 2001(3): 5—10

(编辑 梅志山)

(上接第 58 页)

虽然施工过程采取一定的止水措施, 但仍有少量地下水漏失而引起地表沉降。

(2) 隧道工作面范围岩质不均一, 造成盾构工作面受力不均匀, 造成对既有隧道的扰动加大。

参考文献:

- [1] 曹俊发. 有限元数值模拟预控地表沉降在大断面地铁隧道中的应用 [J]. 铁道建筑, 2005(9): 42—44
- [2] 吕勤. 地铁隧道暗挖施工中土层特性对地层变形的影响分析 [J]. 现代隧道技术, 2005(2): 29—31
- [3] 章玉伟, 等. 深圳地铁福市区间初步设计报告 [R]. 深圳: 中铁二院成都地勘岩土公司, 2007.
- [4] 黄俊, 张顶立. 地铁重叠隧道上覆地层变形的数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005(12): 2179—2182
- [5] 俞鑫风, 王健. 地铁隧道近接施工相互影响研究现状及思考 [J]. 北京建筑工程学院学报, 2008(3): 30—34

- [6] 郑保才, 程文斌, 胡国伟. 浅埋暗挖法施工近接交叉地铁隧道地表沉降监测分析 [J]. 铁道工程学报, 2009(1): 72—76
- [7] 范国文, 王先堂. 暗挖双连拱隧道穿越浅基础高层楼群区施工技术 [J]. 铁道工程学报, 2003(3): 109—115
- [8] 李国和, 孙树礼, 许再良, 等. 地面沉降对高速铁路桥梁工程的影响及对策 [J]. 铁道工程学报, 2008(4): 37—41
- [9] 胡国伟. 复杂条件下超大跨地铁车站施工仿真技术研究 [J]. 铁道工程学报, 2007(9): 87—90
- [10] 刘辉. 浅埋暗挖法修建地下工程应用分析 [J]. 铁道工程学报, 2005(2): 38—40
- [11] 吴波, 刘维宁, 索晓明, 等. 地铁施工近邻桥基加固效果三维数值分析 [J]. 铁道工程学报, 2005(5): 48—52

(编辑 赵立兰)