

深圳某地铁车站小盾构先行大盾构扩挖 施工模拟分析*

李 红¹ 柯 磊¹ 李宣颖¹ 周 浩² 肖 波¹ 张姣龙^{3,4}

(1. 中铁五局集团第五工程有限责任公司, 423002, 郴州; 2. 中铁五局集团有限公司, 550003, 贵阳; 3. 同济大学
土木工程学院, 200092, 上海; 4. 上海同济绿建土建结构预制装配化工程技术有限公司, 200092, 上海)

摘 要 [目的] 深圳地铁 14 号线(以下简称“14 号线”)肿瘤医院站首次采用小盾构先行、大盾构扩挖的施工工法。鉴于目前根据已有成果难以预测小盾构先行开挖且回填后,大盾构在形成的人工复合地层中掘进引起的地层稳定性,需要对采用此种工艺施工的车站进行模拟分析。[方法] 采用 MIDAS/GTS 软件,研究大盾构隧道开挖以及支护结构施作完成后,不同回填材料和不同埋深对地层沉降以及大盾构管片结构受力的影响。[结果及结论] 当小盾构隧道分别采用 C40 混凝土、C15 混凝土及渣土回填时,随着回填材料强度递减,大盾构开挖引起的地层位移递增,盾构管片结构的最大应力亦递增;当回填材料为 C15 混凝土和 C40 混凝土时,盾构掘进对围岩与地层的影响不大。建议本工程采用 C15 混凝土的回填方案;大盾构在小盾构隧道不回填的情况下直接掘进,存在较大的风险;埋深在 21~45 m 范围内,对地面沉降的影响不明显;随着埋深增加,地应力显著增加,隧道结构应力亦随之增加;14 号线肿瘤医院站最终采取 C15 混凝土回填方案,地面沉降监测基本符合数值模拟计算的结果。

关键词 地铁; 车站; 小盾构先行; 大盾构扩挖; 施工模拟
中图分类号 U455.43; U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.017

Simulation Analysis of A Metro Station Construction in Shenzhen with Small TBM Advancing Excavation Followed by Large TBM Enlargement

LI Hong¹, KE Lei¹, LI Xuanying¹, ZHOU Hao²,
XIAO Bo¹, ZHANG Jiaolong^{3,4}

(1. The Fifth Engineering Co., Ltd., China Railway No. 5 Engineering Group Co., Ltd, 423002, Chenzhou, China; 2. China Railway NO. 5 Engineering Group Co., Ltd., 550003, Guiyang, China; 3. College of Civil Engineering Tongji University, 200092, Shanghai, China; 4. Shanghai Tongji Green Building Prefabrication Construction Engineering Technology

Co., Ltd., 200092, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The new technique of small-diameter TBM (tunnel boring machine) advancing excavations followed by large-diameter TBM enlargement is used for the first time in the construction of Tumor Hospital Station on Shenzhen Metro Line 14. As the geological stability is hard to be predicted when the large diameter TBM advances in the artificial composite geological stratum, which is back-filled after the small diameter TBM excavation, it is necessary to simulate and analyze the station built with such construction technique. [Method] MIDAS/GTS software is used to simulate the effect of different backfill materials and buried depths on ground settlement and on the stress of the segment structure when the excavation of the large shield tunnel and the construction of support structure are completed. [Result & Conclusion] The analysis results show that when C40 concrete, C15 concrete and muck are respectively used as backfill materials, the stratum displacement and the maximum stress of the segment structure caused by the large excavation are increasing with the strength of the backfill material decreasing. When C15 and C40 concrete are used as backfill materials, the shield tunneling has no much effect on the surrounding rocks and geological stratum. C15 concrete is recommended as the backfill material for this project. It is highly risky that the large TBM directly drives the tunnel which is not backfilled after the small TBM tunneling. Ground settlement is insignificant when the buried depth ranges from 21 m to 45 m. But following the deepened buried depth, the ground stress increases significantly, and so does the stress of the tunnel structure. Tumor Hospital Metro Station on Shenzhen Metro Line 14 adopts the C15 concrete backfilling plan in the end, and the monitoring results of ground settlement is basically in line with the numerical simulation calculation.

Key words metro; station; small-diameter TBM advancing

* 国家自然科学基金项目(51908424,52078376,U1934210);上海市浦江人才计划项目(19PJ1409700);上海市青年科技启明星计划课题(22QB1405000)

excavation; large-diameter TBM enlargement excavation; excavation simulation

小盾构先行、大盾构扩挖是一套全新的先隧后站的城市轨道交通车站施工方法,首次在深圳地铁14号线(以下简称“14号线”)肿瘤医院站实施。该方法在小盾构内部回填后形成人工复合地层,采用大盾构在该地层中进行扩挖进而形成车站。大盾构扩挖过程中,周围地层必将受隧道施工扰动产生变形^[1],且难以预测大盾构在这种人工复合地层中掘进引起的地层稳定性。文献[2]采用三维弹塑性有限元方法,研究了盾构掘进对隧道周围地层应力及变形的影响情况。文献[3]采用有限差分程序Flac3D,分析了复合地层中TBM(隧道掘进机)开挖后隧道结构的三维弹塑性位移、主应力,以及塑性破坏分布变化特征,研究表明不同埋深和不同复合地层的不同叠置形式对地层的稳定性有显著影响。

本文采用MIDAS/GTS软件模拟小盾构先行开挖且回填后,大盾构在形成的人工复合地层中掘进引起的地层稳定性,研究回填材料和车站埋深对地面沉降以及大盾构管片结构受力的影响,以期对14号线肿瘤医院站的施工提供技术支撑。

1 工程概况

14号线串联深圳市福田中心、清水河、布吉、横岗、龙岗大运新城、坪山中心、坑梓、沙田等区域,覆盖深圳市东部地区南北向交通需求走廊,是联系深圳市中心区与东部组团的城市轨道交通快线,是支撑深圳市东部发展轴的城市轨道交通骨干线,是支持深圳市东进战略实施的重要交通保障。本线路设计速度为120 km/h,它将快速拉近深圳中心区与东部各组团间的时空距离,满足区域内以及组团间

的快速通勤需求。

新增肿瘤医院站位于14号线大运站—宝荷站区间,全长约264 m。该车站施工内容包含地下侧式站台、地面站厅、车站两端竖井等,隧道埋深为21~45 m。肿瘤医院站纵剖面图见图1。

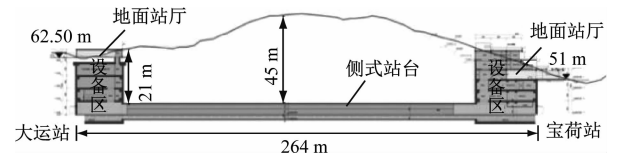


图1 肿瘤医院站纵剖面图

Fig.1 Longitudinal profile of Tumor Hospital Station

1.1 地质条件

依据已有地质资料,结合钻探所揭露地层、室内土工试验成果及原位测试资料,根据相关标准和规范,按不同成因时代、不同土类别、不同状态,对地层进行划分。地下水位埋深为2.5~29.5 m,高程为42.97~85.28 m。测得的岩溶水稳定水位埋深为12.0~46.50 m,水位高程为29.80~59.86 m。根据地区经验,地下水位的年平均变化幅度为2.0~10.0 m,雨季期间地下水位较高。肿瘤医院站地质剖面图如图2所示。各地层工程特性指标如表1所示。

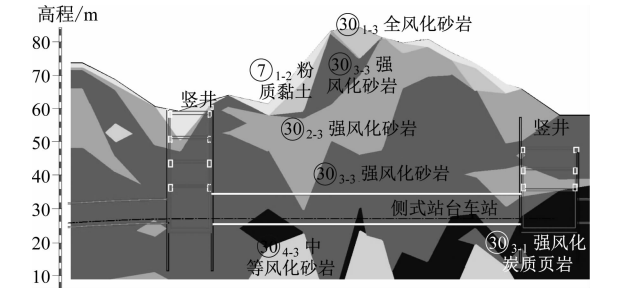


图2 肿瘤医院站地质剖面图

Fig.2 Geological profile of Tumor Hospital Station

表1 肿瘤医院站岩土层工程特性指标							
Tab.1 Engineering characteristic indexes of rock layers in Tumor Hospital Station							
岩土层名称	层厚/m	重度/(kN/m ³)		黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
		天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
⑦ _{1,2} 粉质黏土	0.50~5.00	18.3	18.6	23.1	21.0	21.1	19.0
③ _{0,1} 强风化炭质页岩(块状)	1.20~22.50	20.0	20.5	40.0	36.0	30.0	27.0
③ _{0,1,3} 全风化砂岩	0.90~16.10	19.1	19.6	22.7	20.0	21.4	19.0
③ _{0,2,3} 强风化砂岩(土状)	0.80~66.15	19.5	20.0	28.7	26.0	25.5	23.0
③ _{0,3,3} 强风化砂岩(块状)	0.70~52.70	20.5	21.0	42.0	38.0	32.0	28.0
③ _{0,4,3} 中等风化砂岩	0.80~18.00	24.0		800.0		35.0	

1.2 施工工法

肿瘤医院站是 14 号线整条线路开工建设两年后,在原有规划区间隧道上新增的地铁车站。该车站建设批复完成后,用于区间隧道掘进的小盾构即将掘进到该车站位置,为了避免小盾构机长时间停机等待车站开挖造成的资源浪费,以及延误整条隧道的贯通时间,新增车站拟采取先隧后站的施工策略,即小盾构先行、大盾构扩挖的施工工法。

在满足现行规范要求和技术标准的前提下,小盾构隧道结构采用低标号混凝土玻璃纤维筋管片。小盾构机先行通过车站区段后,选定合适的大盾构设备和扩挖方案,再用大盾构进行扩挖,最后在大盾构隧道内快速建造侧式站台车站。

本研究重点关注大盾构扩挖引起的地层响应和大盾构隧道结构的响应。大盾构扩挖的掘进工

作面是由小盾构管片、内部回填材料、外部注浆层及自然地层组成的人工复合地层,如图 3 所示。小盾构管片外径为 6 700 mm,厚度为 350 mm,采用 C40 混凝土和玻璃纤维筋制作而成;大盾构管片外径为 8 500 mm,厚度为 350 mm,采用 C50 钢筋混凝土。内部回填材料的选择范围包括 C40 混凝土、C15 混凝土及小盾构排出的渣土。整个车站范围内的小隧道全长约 200 m,沿隧道纵向分为 4 段,每段长 50 m。拟采取分段分层回填策略,回填前需将连接管片的螺栓拆除,使用混凝土输送泵进行浇筑。C40 混凝土或 C15 混凝土采用常规的商品混凝土,对于小盾构排出的渣土而言,则需在现场搅拌一定量的水泥基复合固化剂,形成可泵送、可固化的渣土拌合料。

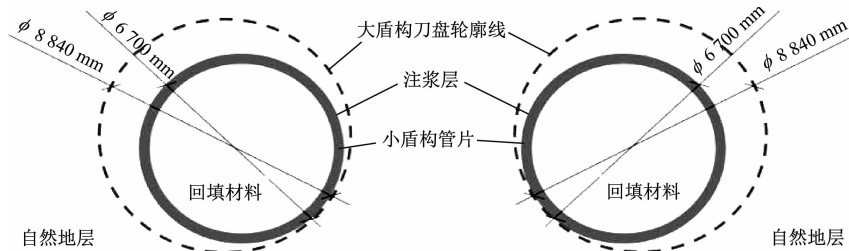


图 3 大盾构掘进横断面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the cross section of large-diameter shield tunnelling

2 数值模型的建立

2.1 计算模型

本研究采用 MIDAS/GTS 软件进行数值计算。建模时,先确定围岩和结构的物理力学参数,设置模型的边界条件,施加自重荷载,得到围岩的自重应力场。根据大盾构施工步骤,采用施工阶段助手钝化和激活单元,模拟盾构推进过程;通过改变单元属性的边界条件模拟注浆过程,同时添加注浆压力;通过在土体表面施加环向力模拟刀盘与土体间的切削作用。采用编辑好的施工阶段,进行模拟分析。分析完毕后,通过可视化树形菜单,快速查看位移、应力、应变等参数,从而分析地层沉降和结构受力规律。

2.2 计算参数

根据地质勘察资料,研究区间土层分布有粉质黏土、全风化砂岩、土状强风化砂岩、块状强风化砂岩及中等风化砂岩。岩土层的物理力学见表 1。地层材料采用莫尔-库伦准则;隧道支护结构材料均采

用弹性准则。隧道结构参数见表 2。

表 2 隧道结构参数

Tab. 2 Tunnel structure parameters

名称	重度/(kN/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/m
大盾构管片	25	34.5	0.2	0.35
小盾构管片	25	32.5	0.2	0.35
注浆层	24	2.0	0.2	0.15

考虑盾构施工过程中其支撑及支护的及时性,开挖应力释放系数取 0.2。考虑到盾构管片接头对管片结构刚度的影响,将管片结构刚度折减 20%。

2.3 计算工况

本数值模拟重点分析小盾构回填方案,以及隧道埋深对地层沉降和大盾构结构受力的影响。根据研究目标,设计 7 个计算工况,如表 3 所示。其中:工况 1—工况 3 在保持隧道埋深 45 m 不变的情况下,重点考察回填材料强度递减的影响。工况 4 是指在小盾构内部不回填的特殊情况下进行大盾构的掘进,旨在通过与工况 1—工况 3 对比,探究小盾构内

部回填的必要性。工况 2、工况 5—工况 7 均采用 C15 混凝土回填,且分别考虑不同埋深的隧道断面,旨在考察埋深对地层和盾构管片结构响应的影响。

表 3 计算工况

Tab.3 Calculation condition

工况	回填材料	埋深/m
1	C40 混凝土	45
2	C15 混凝土	45
3	渣土	45
4	无	45
5	C15 混凝土	40
6	C15 混凝土	30
7	C15 混凝土	21

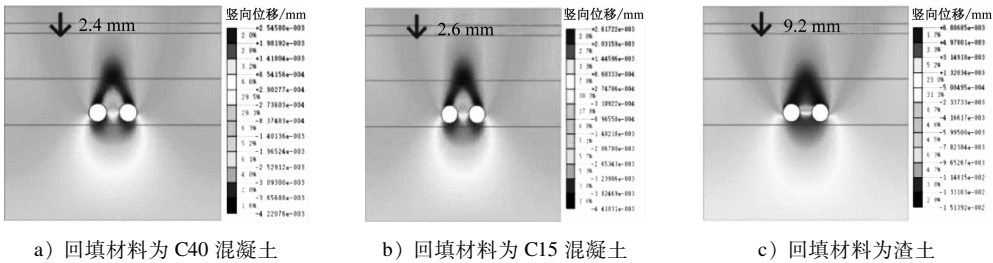


图 4 大盾构隧道开挖以及支护结构施作完成后不同回填材料下模型的竖向位移云图

Fig.4 Vertical displacement cloud diagrams of the model after completing the excavation of large-diameter shield tunnel and support structure construction with different backfill materials

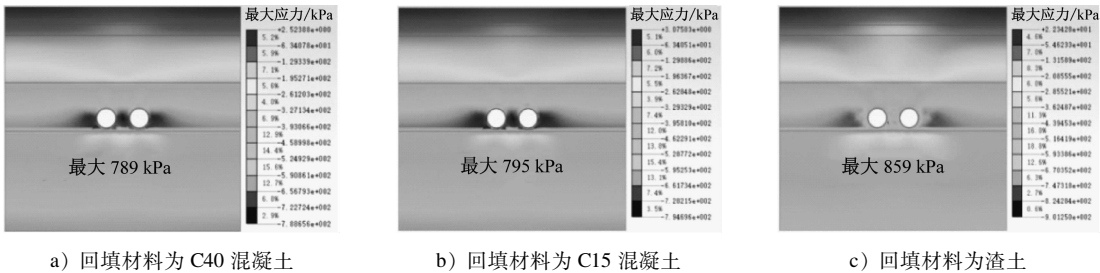


图 5 大盾构隧道开挖以及支护结构施作完成后不同回填材料下模型的最大应力云图

Fig.5 Maximum stress cloud diagrams of the model after completing the excavation of large-diameter shield tunnel and support structure construction with different backfill materials

由图 5 可见:盾构管片结构的最大拉应力出现在拱腰外弧面;回填材料分别采用 C40 混凝土、C15 混凝土及渣土的情况下,盾构管片结构的最大拉应力分别为 789 kPa、795 kPa、895 kPa。由此可见,盾构管片结构的最大拉应力随回填材料强度的增加而有所增加,但增加幅度不大。

综上,随着回填材料强度的降低,地面沉降和盾构管片结构拉应力均有所增加,但均在可接受范围内。渣土回填需要特殊的固化处理工艺,相较而言,混凝土的泵送工艺较为成熟,因此建议采用混凝土回填。C15 混凝土相比 C40 混凝土成本较低,

3 计算结果分析

3.1 不同回填材料的影响

大盾构隧道开挖以及支护结构施作完成后,地层和管片的竖向位移和最大应力云图如图 4 和图 5 所示。由图 4 可见:模型最大沉降量发生在隧道中心线对应的地面点;回填材料从 C40 混凝土分别变更为 C15 混凝土和渣土,随着回填材料强度和刚度递减,地面最大沉降量从 2.4 mm 分别增加到 2.6 mm 和 9.2 mm,但均在毫米级范围内,远小于 SJG 135—2023《深圳市工程建设地方标准》对地面沉降量的限制要求(30 mm)。

建议优先选用 C15 混凝土回填方案。

为进一步探究小盾构回填的必要性,对比分析不回填工况和不同回填材料工况的计算结果,如表 4 所示。由表 4 可见:相比前 3 个回填工况而言,不回填工况下,地面沉降、盾构管片结构的最大拉应力、拱顶竖向位移及拱顶水平位移均显著增加。以 C50 混凝土抗拉强度标准值 2.64 MPa 与盾构管片结构最大拉应力的比值作为结构抗裂安全系数,3 种不同回填材料工况下的结构抗裂安全系数分别为 3.35、3.32、3.07,但不回填工况下的结构抗裂安全系数减低至 2.28。此外,大盾构在不回填的地层

中掘进可能会遇到类似于穿越岩溶发育区常有的隧道轴线偏移、突泥涌水等工程风险^[4],因此,小盾构内部回填是必要的。

表 4 不同回填材料工况下地层和隧道结构计算结果

Tab.4 Calculation results of the stratum and tunnel structure with different backfill materials

回填材料工况	地面沉降/ mm	最大拉应力/ kPa	拱顶竖向 位移/mm	拱顶水平 位移/mm
回填 C40 混凝土	2.4	789	3.71	3.80
回填 C15 混凝土	2.6	795	3.91	4.08
回填渣土	9.2	859	15.10	15.70
不回填	14.0	1 158	18.40	21.40

3.2 不同埋深的影响

地层沉降和盾构管片结构的最大拉应力随埋深变化曲线,如图 6 所示。由图 6 可见:不同埋深下地层沉降量均较小,最大值仅为 2.82 mm;盾构管片结构的最大拉应力随隧道埋深增加而显著增加,当埋深由 21 m 增加到 45 m 时,盾构管片结构的最大拉应力增加约 2 倍,这主要是地应力随埋深增加的结果。

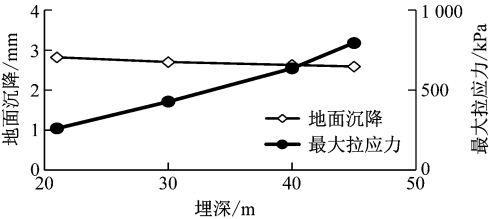


图 6 地面沉降和盾构管片结构最大拉应力随埋深变化曲线
Fig.6 Graph of the maximum tension and stress variation of the ground settlement and segment structure with burial depth

3.3 工程验证

综上,14 号线肿瘤医院站最终采取 C15 混凝土回填方案。大盾构扩挖过程中,施工监测单位对地面沉降进行了监测,结果显示最大沉降量为 3.1 mm,与计算分析结果基本相符。

4 结论

1) 当小盾构隧道分别采用 C40 混凝土、C15 混凝土及渣土回填时,随着回填材料强度递减,大盾构开挖引起的地层位移递增,盾构管片结构的最大

应力亦递增。

2) 当回填材料为 C15 混凝土和 C40 混凝土时,盾构掘进对围岩与地层的影响不大。建议本工程采用 C15 混凝土的回填方案。

3) 大盾构在小盾构隧道不回填的情况下直接掘进,存在较大的风险。

4) 埋深在 21 ~ 45 m 范围内,对地面沉降的影响不明显;随着埋深增加,地应力显著增加,隧道结构应力亦随之增加。

5) 14 号线肿瘤医院站最终采取 C15 混凝土回填方案,地面沉降监测基本符合数值模拟计算的结果。

参考文献

[1] 孙钧,袁金荣. 盾构施工扰动与地层移动及其智能神经网络预测[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 261.
SUN Jun, YUAN Jinrong. Soil disturbance and ground movement under shield tunnelling and its intelligent prediction by using ANN technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 261.

[2] ROWE R K, LEE K M. An evaluation of simplified techniques for estimating three-dimensional undrained ground movements due to tunnelling in soft soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(1): 39.

[3] 尚彦军,蒋毅,赵斌,等. 拉张盆地不同埋深复合地层中隧道围岩变形破坏数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(3): 896.
SHANG Yanjun, JIANG Yi, ZHAO Bin, et al. Numerical simulation of deformation and failure of surrounding rocks of tunnels in mixed stratum with different depths in extensional basins [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 896.

[4] 齐明山,郭振坤,王春凯,等. 溶洞分布对城轨交通盾构隧道影响规律研究[J]. 现代城市轨道交通, 2020(1): 30.
QI Mingshan, GUO Zhenkun, WANG Chunkai, et al. Study on influence of Karst cave distribution on urban rail transit shield tunnel[J]. Modern Urban Transit, 2020(1): 30.

· 收稿日期:2021-09-08 修回日期:2021-11-11 出版日期:2024-03-10
Received:2021-09-08 Revised:2021-11-11 Published:2024-03-10
· 第一作者:李红,高级工程师,48388256@qq.com
通信作者:张姣龙,副教授,jiaolong_Zhang@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license