

地铁盾构下穿建筑群施工地面建筑沉降控制方案及富水砂-黏地层沉降预测方法^{*}

陈志敏^{1,2} 范长海¹ 张常书³

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 730070, 兰州;

2. 兰州交通大学道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 730070, 兰州;

3. 中铁十八局集团有限公司, 300222, 天津//第一作者, 教授)

摘要 以广州地铁某区间隧道下穿城市密集建筑群工程为例, 利用 MIDAS GTS NX 软件模拟施工过程, 研究盾构穿越富水砾砂、粉质黏土和全风化-微风化花岗岩等复合地层时, 地层与地面建筑物的沉降规律, 并对比分析线间注浆加固和筏板结构加固方案的有效性。研究表明: 相较于筏板结构加固方案, 线间注浆加固方案可显著控制建筑物与桩基持力层的变形失稳及裂隙水渗流损失。所提经验公式法适用于线间注浆加固工况下的地层沉降变形预测。

关键词 地铁; 盾构隧道; 富水砂-黏地层; 沉降控制

中图分类号 U455.43; P642.26

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.01.008

Building Subsidence Control in Metro Shield Tunneling under Construction Ground of Buildings and Water-rich Sand-clay Stratum Subsidence Prediction Method

CHEN Zhimin, FAN Changhai, ZHANG Changshu

Abstract Relying on an interval tunnel project of Guangzhou Metro under-passing dense urban building group, MIDAS GTS NX software is adopted to simulate the construction process, the ground and surface building subsidence law when the shield passes through composite strata such as water-rich gravel sand, silty clay and completely-slightly weathered granite is studied. The effectiveness of the inter-line grouting reinforcement and the raft structure reinforcement schemes are comparatively analyzed. Research results show that, compared with the raft structure reinforcement scheme, the inter-line grouting reinforcement scheme can significantly control the deformation and instability of the building, the pile foundation supporting layer, and the seepage loss of fissure water. The proposed empirical formula method is suitable for the stratum subsidence deformation prediction under inter-line grouting reinforcement working

condition.

Key words metro; shield tunnel; water-rich sand-clay stratum; subsidence control

First-author's address School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 730070, Lanzhou, China

由地铁穿越城市既有建筑群引发的地面不均匀沉降问题, 已成为我国城市轨道交通发展的重点问题。文献[1]基于北京地铁盾构隧道下穿地铁隧道工程, 对地面建筑物沉降规律及控制沉降的盾构施工参数展开研究。文献[2]探究盾构隧道穿越富水软弱地层时建筑物桩基沉降规律及加固方案的有效性。文献[3]针对富水风化花岗岩隧道围岩力学特性与变形机制, 提出可行性加固措施。

目前, 大多数研究都集中于盾构隧道下穿地面建筑物或既有隧道等工况下的单一地层沉降与控制, 而广州地铁某区间隧道主要穿越富水砾砂、粉质黏土及全风化-微风化花岗岩等复合地层(以下简称“复合地层”)。在此类特殊地层中, 关于盾构施工对建筑物桩基及基础沉降变形的影响规律, 尚且缺乏系统性的研究成果。故本文以广州地铁盾构隧道工程为例, 就该特殊地层及建筑物基础沉降控制措施展开研究, 以确保地面建筑物群能够保持正常使用功能。本研究可为类似工程提供理论基础与工程经验。

1 工程概况与地层-建筑物有限元模型

1.1 工程概况

广州地铁某区间隧道呈东西走向, 上行线和下行线横穿水西村, 下穿建筑群段的上行线和下行线埋深

^{*} 国家自然科学基金项目(12262018); 中央引导地方科技发展资金项目(22ZY1QA005)

为 10.3~18.1 m。隧道上行线 ZDK 20+232.4—ZDK 20+370.4,长为 138.0 m;下行线 YDK 20+259.0—YDK 20+394.3,长为 135.3 m。隧道洞身全部位于地下水位线以下,主要穿过富水砾砂、粉质黏土及全风化-微风化花岗岩带等复合地层,局部穿越软土地层、砂层以及软硬不均的特殊地层,上行线和下行线地质差异不大。各地层物理力学参数和衬砌结构参数如表 1 所示。线路区间隧道将下穿密集排列的 3~8 层既有楼,以及少量 10~15 层的较高建筑。地面建筑分布图如图 1 所示。

表 1 各地层物理力学参数和衬砌结构参数
Tab.1 Stratum physical and mechanical parameters and lining structure parameters

地层及衬砌结构	重度/ (kN/m ³)	变形模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	泊松比	侧向变形系数	厚度/ m
杂填土	19.7	10.0	12.3	18.0	0.360	0.610	2.99
粉质黏土	19.3	15.0	10.8	14.6	0.350	0.540	11.45
砾砂层	19.2	25.0	0	34.0	0.275	0.375	3.08
风化花岗岩	21.0	82.5	38.5	23.9	0.280	0.390	11.60
加固区	23.0	1.5	38.0	18.0	0.240	-	-
盾壳	78.0	250.0	-	-	0.200	-	-
桩、柱	23.0	30.0	-	-	0.300	-	-
管片	25.0	34.5	-	-	0.200	-	-

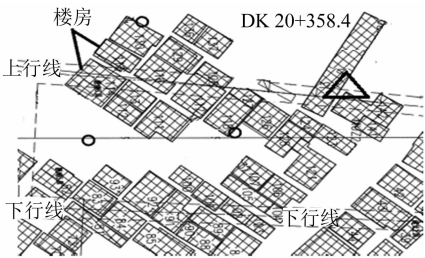


图 1 地面建筑分布图

Fig.1 Distribution diagram of surface buildings

1.2 确定计算模型

依据 MIDAS GTS NX 软件进行分析计算,建筑隧道内径为 5 400 mm,采用单层平板式钢筋混凝土管片,摩尔-库伦作为土体本构模型。桩、柱与土单元之间设置节点耦合,以实现基础与地层的相互作用。

1.3 盾构掘进过程模拟

隧道在 DK 20+358.4 处下穿高层建筑群且埋深最浅(见图 1),故对该里程周围地层作施工模拟。对模型边界添加横向、竖向约束,对初始开挖面施加水平约束。模型整体结构如图 2 所示。区间隧道下穿地面建筑物盾构推进时,根据现场盾构出渣情

况与地面沉降监测数据,动态调整掘进施工参数。盾构参数范围如表 2 所示。

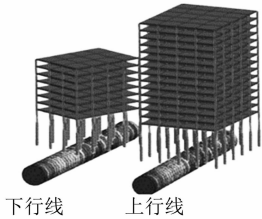


图 2 整体结构图

Fig.2 Diagram of overall structure

表 2 盾构参数范围

Tab.2 Range of shield parameters

盾构参数	取值
土仓压力/kPa	130~150(掘进),140~150(停机)
推力/kN	11 000~12 000
扭矩/(Nm)	1 300~2 500
掘进速度/(mm/min)	25~45
刀盘转速/(r/min)	1.3~1.5
同步注浆量/m ³	≥6
注浆压力/kPa	200~300

2 模拟结果的沉降分析

2.1 建筑结构沉降分析

隧道掘进完成后,整体模型结构各部位沉降示意图如图 3 所示。由图 3 可知,区间隧道盾构掘进完成后,整体最大沉降量为 71.80 mm;最大隆起量发生在隧道底部,为 20.99 mm。建筑 1(8 层建筑)的最大不均匀沉降为 20.00 mm,建筑 2(15 层建筑)的最大不均匀沉降为 56.10 mm。根据现场对建筑物的沉降控制标准(标准值为 30.00 mm,报警值为 20.00 mm),建筑 1 和建筑 2 部分结构的不均匀沉降已超过项目沉降标准。

2.2 建筑基础变形分析

由图 3 c)可知,隧道掘进导致整体地层形成明显沉降槽,其中建筑物基础与地面区域最为突出,周围地层发生轻微隆起。这主要是由于建筑 2 的桩基持力层最大沉降量为 62.20 mm,建筑 1 的桩基持力层最大沉降量比建筑 2 小 26.10 mm。盾构施工对建筑 1 和建筑 2 的桩基持力层的稳定性产生了较大的破坏,相比于下行线,上行线上部建筑物对地层的荷载作用更大,使富水砂砾、粉质黏土等软弱土层产生了显著沉降,进而导致建筑物与上方地层的不均匀沉降。因此,有必要对建筑物桩基持力层进行加固处理。

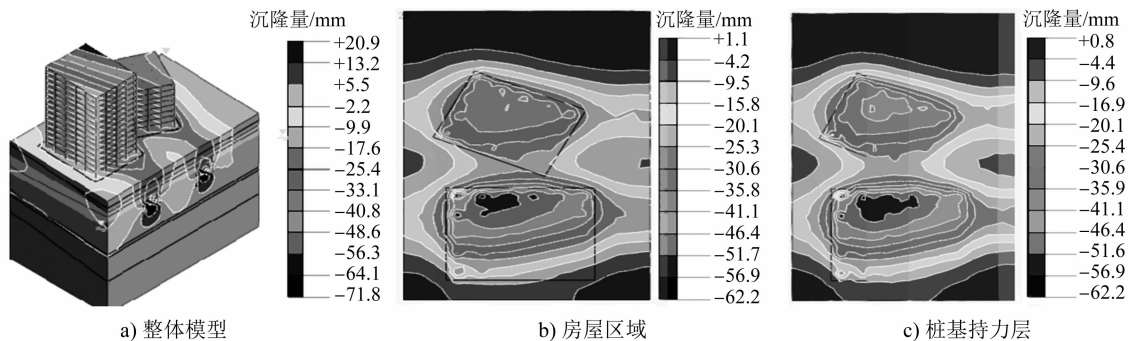


图 3 整体模型结构各部位沉降示意图

Fig. 3 Subsidence and heave diagram in various parts of the overall model structure

3 沉降控制方案比选

由于盾构施工穿越的复合地层结构松散、可塑性差,且花岗岩存在不同程度的破碎、整体性不良等特点,结合盾构机机械特性,采用改进的线间注浆加固方案对开挖洞室上方和下方地层进行加固处理。针对盾构掘进完成后建筑 1 和建筑 2 基础部分与建筑物桩基持力层的不均匀沉降,可利用筏板结构的整体力学特性加固处理建筑基础,以提高其安全性与稳定性。

3.1 线间注浆加固方案

前盾盾体设置 4 个直径为 50 mm 的径向孔,通过径向孔向盾体 2~3 m 范围内的地层加压注入膨润土液浆,对地层进行加固处理。线间注浆加固方案如图 4 所示。注浆材料选用膨润土-水泥液浆,水泥采用 P.O42.5 级普通硅酸盐水泥。在保证水泥-水玻璃双液浆适宜流动性的同时,应控制初凝时间为 3~4 h。

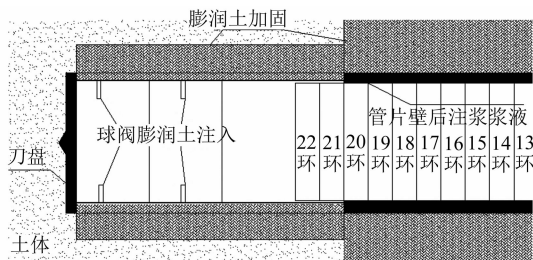


图 4 线间注浆加固方案

Fig. 4 Inter-line grouting reinforcement scheme

3.2 筏板结构注浆加固方案

对建筑物下部施加厚度为 0.7 m 的钢筋混凝土筏板,其保护层厚度为 20 mm,采用 C35 混凝土。同时,对筏板下部粉质黏土层及砾砂等富水软弱夹层进行注浆加固,厚度为 0.2 m。筏板结构注浆加固方案如图 5 所示。

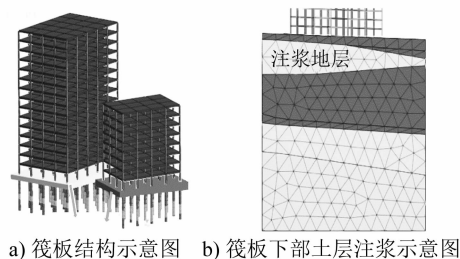


图 5 筏板结构注浆加固方案

Fig. 5 Grouting reinforcement scheme for raft structure

4 加固方案沉降控制效果分析

隧道周围地层经线间注浆加固和筏板结构加固后的建筑物沉降变形情况如图 6 和图 7 所示。

由图 6 a)—图 6 c) 可知,在筏板结构加固工况下,建筑物出现整体性沉降变形,建筑 1 和建筑 2 邻近部位的最大沉降量为 27.50 mm,超过了项目规定值,两者的最小沉降量为 10.10 mm。筏板结构与桩基持力层沉降趋势基本一致,沉降变形更为集中化,其沉降量随建筑 1 和建筑 2 相邻区域距离的增大而逐渐减小。筏板结构在左右侧高层建筑的差异荷载作用下,变形量自顶板区域向外侧区域逐渐扩散、衰减,与非建筑区域沉降量存在较大差异,最大沉降量差值达到了 15.00 mm。左侧区域的较大荷载导致左侧区域的沉降量明显大于右侧区域的沉降量,可能会引起建筑结构的倾覆破坏。因此,筏板结构注浆加固方案在该工程项目中是不可行的。

由图 7 a)—图 7 c) 可知,相比于未加固工况,在线间注浆加固方案下,建筑物各部位的沉降量降低了一个数量级,建筑 1 和建筑 2 的整体沉降量为 1.00~7.00 mm,两建筑相邻区域的沉降变形为 6.30 mm 左右,小于控制标准值。该方案通过对隧

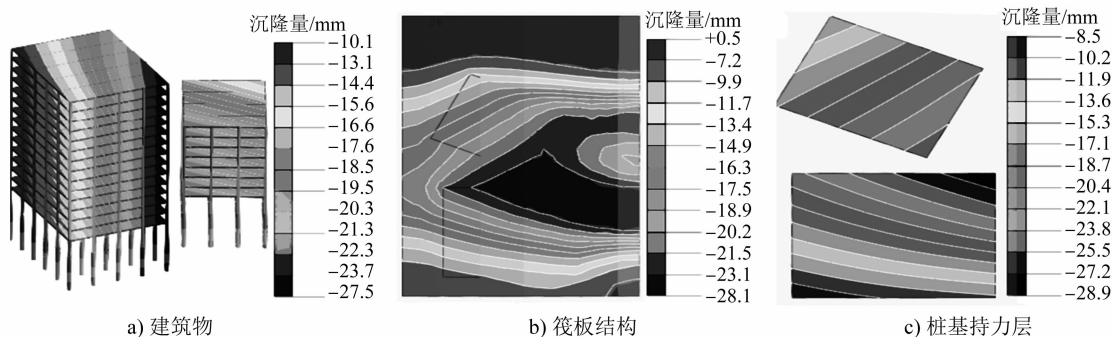


图6 筏板结构加固工况下的建筑物沉降示意图

Fig. 6 Schematic diagram of building subsidence and heave under raft structure reinforcement working condition

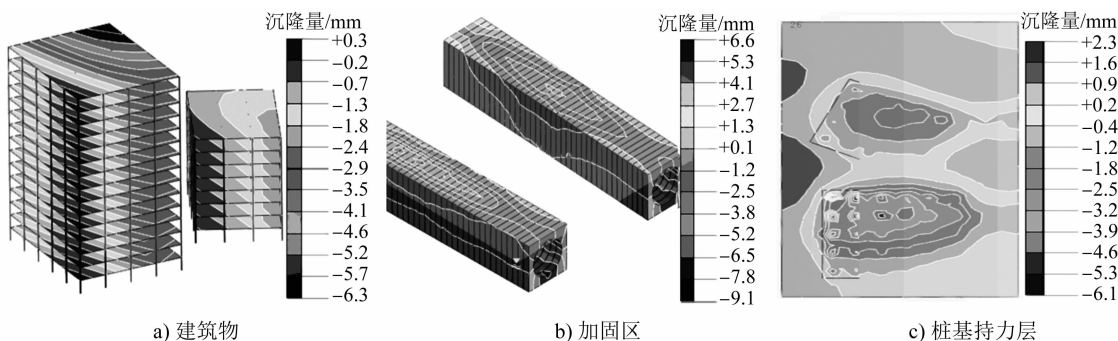


图7 线间注浆加固工况下的建筑物沉降示意图

Fig. 7 Schematic diagram of building subsidence and heave under inter-line grouting reinforcement working condition

道四周松散地层进行注浆加固,将加固区的最大沉降和隆起变形均控制在 10 mm 以内,保证了桩基持力层的稳定性,降低了盾构掘进工法对地层扰动变形的影响。通过对比分析可知,线间注浆加固方案更适用于盾构施工时该类复合地层中的沉降控制。

5 富水砂-黏地层沉降预测方法

地层沉降经验公式为:

$$S = S_{\max} \exp(-x^2/2i^2) \quad (1)$$

$$S_{\max} = \frac{\pi D^2 V_i}{4i\sqrt{2}\pi} = \frac{0.313 D^2 V_i}{i} \quad (2)$$

$$i = kh \quad (3)$$

式中:

S ——地面上任意处沉降量,mm;

S_{\max} ——地面沉降最大量,mm;

x ——开挖隧道中线距计算点的横向距离,mm;

i ——沉降槽宽度,mm;

D ——隧道直径,mm;

h ——隧道埋深,mm;

k ——沉降槽宽度系数,取为 0.76;

V_i ——地层损失率,取为 2%。

根据式(1)和式(2),以及数值模拟法^[4-6],结合现场试验段所得地层沉降量进行对比分析,探究经验公式法对于富水砂-黏地层沉降规律预测的适用性。

上行线和下行线隧道开挖时的地层沉降结果如图 8 所示。由图 8 可知,上行线和下行线隧道施工完成后,由经验公式计算所得的 0 m 地面、-8 m 地层的沉降值和数值模拟的结果均关于隧道中线呈正态分布。在隧道中线处,沉降量达到最大值,且随着与隧道中线距离的增大,沉降量逐渐减小,在 1.5 D 范围处沉降变形趋于稳定。监测断面各点沉降数据相对零散,但大体遵循正态分布走向。经验公式忽略了施工中的众多因素,所得地层沉降量处于数值模拟结果和监测数据之间,与两者分别相差约 10.00 mm,与后者吻合程度较高。因此,经验公式法可应用于此种地质条件中由盾构隧道施工引起的地层沉降预测。

6 结语

结合地铁隧道盾构下穿城市建筑群工程,研究了地层与建筑群的沉降规律与控制措施,获得以下几点结论:

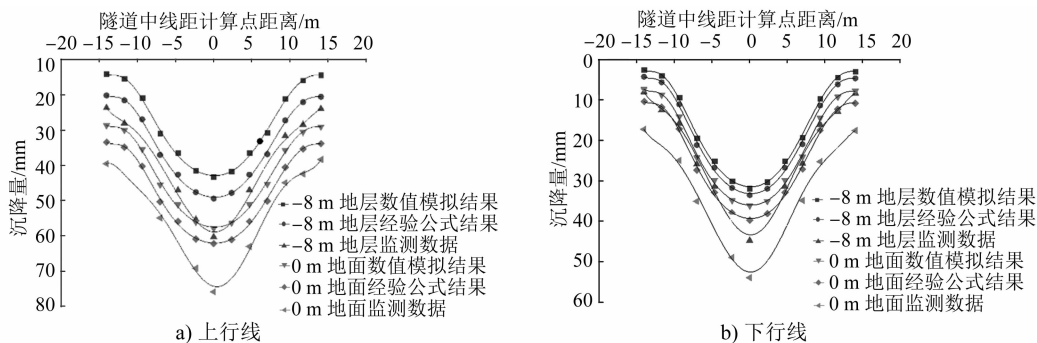


图8 隧道地层沉降结果
Fig. 8 Tunnel ground subsidence results

1) 筏板结构加固对该种复合地层的沉降控制效果较差。由于高层建筑的差异荷载及厚度的扩散作用,部分变形可导致建筑失稳破坏。

2) 线间注浆加固通过加固松散的桩基持力层、封闭围岩裂隙和注浆抬升力等作用,有效控制了地层的水平变形范围与竖向沉降数值,适用于该复合地层的沉降控制。

3) 相比于数值模拟,经验公式法与实际监测数据更为吻合,可适用于富水砂-黏复合地层中由盾构施工引起的地层沉降变形预测。

参考文献

- [1] 杨成永,马文辉,彭华,等. 地铁双线盾构近距下穿盾构隧道施工沉降控制[J]. 铁道工程学报,2018,35(7):91.
YANG Chengyong, MA Wenhui, PENG Hua, et al. Research on the settlement control of existing shield tunnels affected by construction of underneath dual shield tunnels[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(7): 91.
- [2] 任建喜,郑康龙. 富水圆砾地层盾构隧道施工对地表及建筑物影响分析[J]. 城市轨道交通研究,2020(1):14.
REN Jianxi, ZHENG Kanglong. Influence of shield tunnel con-

struction in water-rich gravel stratum on surface and buildings [J]. Urban Mass Transit, 2020(1): 14.

- [3] 南勇. 富水全风化花岗岩隧道施工技术[J]. 铁道建筑, 2016, 56(3): 90.
NAN Yong. Construction technology of tunnel in water-rich and full-weathered granite [J]. Railway Engineering, 2016, 56(3): 90.
- [4] 程霖,杨成永,王伟,等. 考虑轴力的管线变形控制微分方程及其优化解[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 126.
CHENG Lin, YANG Chengyong, WANG Wei, et al. Governing differential equations and optimal solution for deformation of jointless pipeline considering axial force[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(3): 126.
- [5] RANKIN W J. Ground movements resulting from urban tunneling: predictions and effects[J]. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 1988, 5(1): 79.
- [6] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]//Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE). Mexico: International Scientific Committees, 1969: 225.

(收稿日期:2020-08-30)

(上接第38页)

- [4] 马前涛. 大坡道上地铁9号道岔区动力学特性及钢轨爬行分析[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
MA Qiantao. Research on dynamic characteristics and rail crawling of No. 9 turnout area of metro on A steep slope [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [5] 颜乐,熊震威,魏贤奎,等. 坡度对长大坡道桥上无缝道岔的影响分析[J]. 铁道标准设计, 2013, 57(9): 33.
YAN Le, XIONG Zhenwei, WEI Xiankui, et al. Influence of slope gradient on gapless turnout upon bridge with long heavy grade[J]. Railway Standard Design, 2013, 57(9): 33.
- [6] 张梦楠,颜乐,王平,等. 长大坡道铺设无缝道岔可行性分析[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(2): 13.
ZHANG Mengnan, YAN Le, WANG Ping, et al. Feasibility a-

nalys of seamless turnout on long steep grade [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(2): 13.

- [7] 高亮. 高速铁路无缝线路关键技术研究与应用[M]. 北京:中国铁道出版社, 2012.
GAO Liang. Research and application of key technologies of high-speed railway jointless track [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.
- [8] 易思蓉. 铁道工程[M]. 2版. 北京:中国铁道出版社, 2009.
YI Sirong. Railway engineering [M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.
- [9] 杨荣山. 轨道工程[M]. 北京:人民交通出版社, 2013.
YANG Rongshan. Railway track [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.

(收稿日期:2020-10-16)