

文章编号:1005-0523(2015)04-0025-08

盾构隧道下穿铁路股道及火车站站房的影响分析

卢华喜,王漪璇,周珍伟,汪 雷

(华东交通大学土木与建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:通过对南宁地铁1、2号线盾构隧道下穿铁路股道及火车站站房现场的调查、了解,依据各自的环境条件分别建立二维、三维数值模型,选取适当的单元类型进行模拟计算。发现采用洞内注浆加固配合地面加固的方式可使股道最大沉降减小18.9 mm,且使沉降槽缩小60 m。对火车站站房下的隧道采用洞内加固可保证影响区范围内的最大桩基沉降差约4.5 mm,远小于过规范规定的允许值。这就确保了盾构隧道下穿南宁火车站站房及铁路股道的安全,为今后类似工程的数值模拟分析提供经验。

关键词:盾构隧道;铁路股道;桩基础;有限元模型;施工阶段分析

中图分类号:TU473.1;TU451

文献标志码:A

城市交通的迅猛发展带动地下空间的开发利用,如今盾构技术已经广泛应用于城市轨道交通业中,然而,由于土体结构分散且土颗粒性质具有随机性,实际工程中难以把握其受力变形规律,国内外学者对土体的变形沉降规律进行了大量的研究,基本总结出导致其沉降的因素及沉降规律。同时由于土体的变形,势必影响到土中基础的稳定性,需分析出土体与基础间的相互作用关系,从而得出盾构施工过程中基础的变形与沉降特点。找出规律后方可针对具体情况提出相应的加固措施,以确保工程的顺利进行。

美国学者R B Peck^[1]首次提出“地层损失”的概念认为地层损失是导致土体变位的根本原因,在假设地质条件良好、施工设备完善的情况下,通过大量实测数据,总结出地表横向沉降的规律,发现沉降槽宽度即为地层损失体积,并认为沉降值符合正态分布。Toshi Nomoto与Imamura仿照真实盾构情况制造微型盾构机模拟砂性土条件下盾构推进及盾尾脱出的情况,验证了Peck公式的可靠性,并总结出在不同埋深以及不同盾尾间隙时地表的沉降规律,得出土压力与盾尾间隙的关系。Sagaseta^[3]对浅挖隧道引起的地层损失进行研究,提出“源汇法”计算地表变形;我国学者施成华^[4]以随机介质理论为基础,将土体变形视为随机过程,经过演算最终以柯莫哥洛夫方程表示出地表沉降量。本文在现有理论的基础上,结合工程实例,针对南宁地质条件,土体采用摩尔-库伦本构模型,利用有限元的思想建立数值模型,对盾构掘进过程导致的地表沉降及桩基变形进行量化分析并总结其形变规律。

1 工程概况

南宁轨道交通一号线上火车站为换乘车站全长约32.1 km,设站25座。其中,一号线衡阳西站-火车站区间隧道与二号线友爱站-火车站区间隧道在华衡小学操场附近形成斜交,然后四线并行下穿南宁火车站站房及站场铁路股道。盾构隧道内径 $\Phi 5.4$ m,外径 $\Phi 6.0$ m。管片厚度0.3 m、宽度1.5 m,采用错缝拼装,标

收稿日期:2015-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(50968007);江西省青年科学家培养对象计划(2010DQ01800)

作者简介:卢华喜(1976—),男,副教授,博士,研究生导师,研究方向为土与结构动力相互作用。

通讯作者:王漪璇(1988—),女,硕士研究生,研究方向为盾构隧道下穿对周围环境的影响。

准环+左右转弯环相组合。盾构施工过程中,通过采取加固等辅助措施,使站房和铁路股道的沉降和变形控制在允许范围内。

1.1 区间隧道下穿南宁火车站铁路股道

南宁地铁1、2号线盾构区间隧道下穿铁路股道共14~16条股道,分别为南宁火车站(3座站台,10条股道;其中6股为类似整体道床的板式道床,其下方为碎石,4股为碎石道床)和南宁铁路局南宁客车车辆段(4~6股,有两股轨道分岔,多出两股道床)。具体下穿情况见图1。

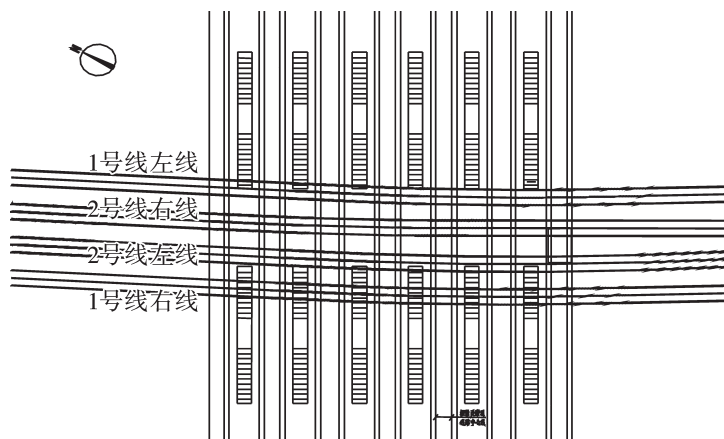


图1 1、2号线区间隧道下穿火车股道平面图

Fig. 1 The plan of shield tunnel of Line 1, 2 beneath the rail tracks

1.2 区间隧道下穿南宁火车站站房

南宁火车站站房修建于1978年,为2层钢排架结构,采用 $\Phi 300$ 、 $\Phi 420$ mm 振动灌注桩基础,桩长为8.63~11.18 m,桩尖进入圆砾层0.8 m,标准柱间距6 m $\times$ 6 m。区间隧道与火车站站房的平面关系详见图2。

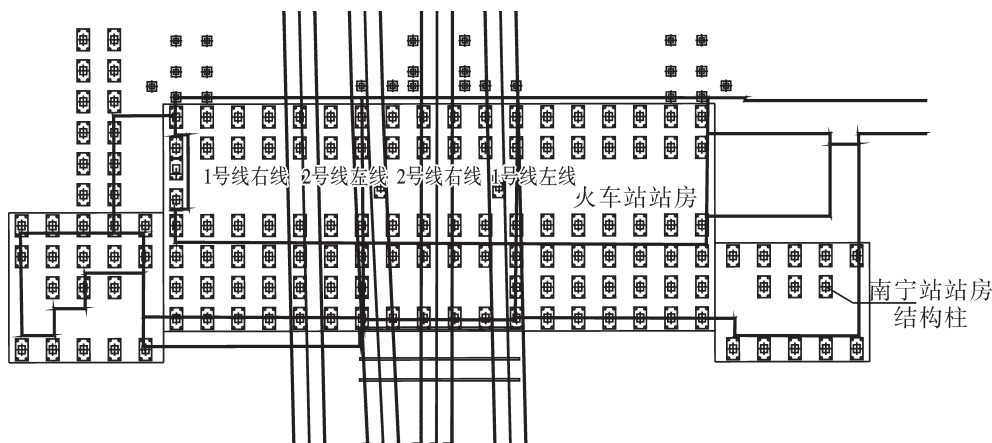


图2 1、2号线区间隧道下穿站房平面图

Fig. 2 The plan of shield tunnel of Line 1, 2 beneath the railway station

1.3 工程地质与水文地质条件

结合本工程地质断面,地层自上而下主要为:①2素填土、②1-2淤泥、淤泥质土、②3-2可塑状黏性土、③1粉土、④1-1粉(细)砂、⑤1-1圆砾、⑦1-3泥岩、粉砂质泥岩、⑦2-2粉砂岩、泥质粉砂岩、⑦2-3粉砂岩、泥质粉砂岩。其中,站场和站房段的区间隧道全断面穿越⑤1-1圆砾,隧道顶部有②1-2淤泥和③1粉土。

站址范围内有两层地下水:第一层地下水主要赋存于杂填土①1、素填土①2中,属上层滞水,第二层地下水主要赋存于⑤1-1圆砾层中,属孔隙松散岩类水,水量丰富,具承压性,与邕江河水有水力联系,与朝阳溪无直接的水力联系。

2 模型建立

2.1 下穿铁路股道

本模型采用大型有限元软件 MIDAS/GTS 进行模拟,建立 2D 模型,其中岩土采用平面应变单元模拟,管片由于为 1D 线单元,则使用梁单元模拟。考虑了开挖对土体的影响范围,取模型中围岩的宽度为 95 m,深度为 54 m,以研究特定断面处在不同施工工况下围岩与支护结构的受力与变形情况。施工顺序为:1 号右线→1 号左线→2 号右线→2 号左线。隧道与铁路股道相对位置关系如图 3,通过数值分析软件划分有限元网格如图 4。

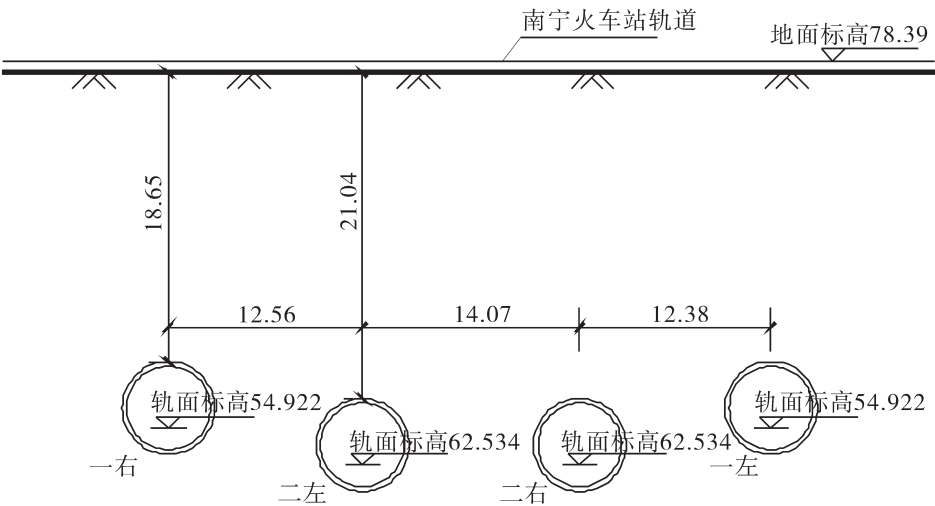


图3 下穿南宁火车站铁路股道横断面图(单位:m)

Fig.3 The cross-section of shield tunnel beneath the rail tracks (Unit: m)

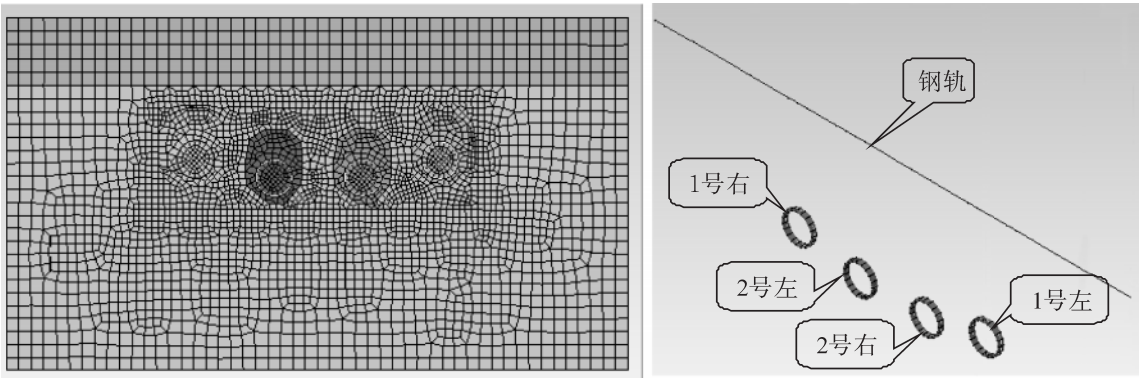


图4 有限元分析网格图

Fig.4 The grid finite element analysis

各材料计算参数如下表:

表1 围岩及支护结构物理力学参数取值表

Tab.1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and supporting structure

结构名称	材料类别	容重 $\gamma/(\text{kn} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
钢轨	-	78.5	210	0.3	-	-
管片	C50 砼	25	34.5	0.18	-	-
土层	圆砾	20.5	0.02	0.4	0	35

2.2 下穿火车站站房

对于下穿火车站站房模型的建立,建立3D模型,土体、基础采用实体单元,管片采用板单元。土体遵循 Mohr-Colomb 破坏准则,基础跟管片为线弹性。模型宽度为 95 m、深度为 54 m、长度为 80 m。四线并行隧道下穿站房,为了有效分析隧道开挖过程对站房的影响,按两者的实际位置关系建立三维模型,并将车站站房荷载按每层 24 kPa(含人群荷载 4.0 kPa)等效到每根立柱上,通过换算得到单个立柱承受的荷载为 864 kN(按标准柱距 6 m×6 m 考虑)。施工顺序为:1号右线→1号左线→2号右线→2号左线,隧道与基础相对位置关系如图 5,采取数值分析软件划分有限元网格图详见图 6。

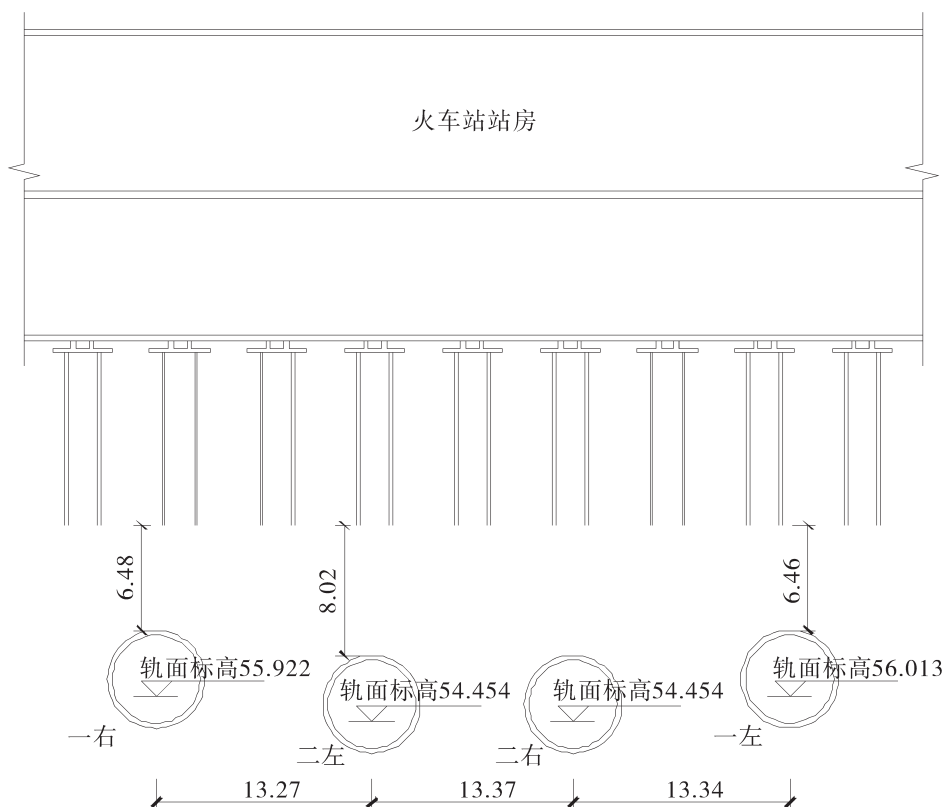


图5 下穿南宁火车站铁路股道横断面图(单位:m)

Fig.5 The cross-section of shield tunnel beneath the railway station (Unit: m)

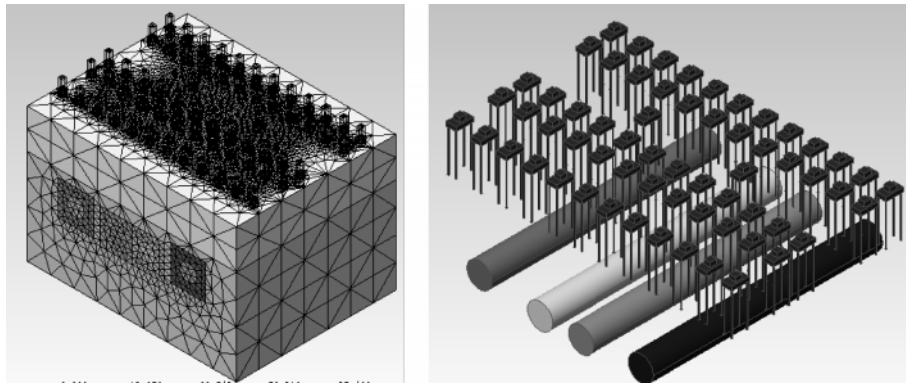


图6 有限元分析网格图

Fig.6 The grid finite element analysis

各材料计算参数如下表:

表2 围岩及支护结构物理力学参数表

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and supporting structure

结构名称	材料类别	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
基础	C30混凝土	23	30	0.2	—	—
管片	C50混凝土	25	34.5	0.18	—	—
围岩	土层1	19	0.005	0.36	15	10
	土层2	21.5	0.025	0.42	80	25

3 计算结果及分析

3.1 下穿铁路股道

图7为隧道开挖完后钢轨的沉降分布图,从图中可见:

- 1) 地层未加固时:盾构直接掘进后,单洞沉降槽宽度约80 m,股道的最大沉降值达25.9 mm。
- 2) 仅采取洞内加固后(通过已拼装好管片注浆),单洞沉降槽宽度约35 m,股道最大沉降约9.8 mm,相邻的钢轨沉降差4.2 mm。
- 3) 采取地面加固+洞内注浆:单洞沉降槽宽度约20 m,股道最大沉降约7.0 mm,相邻的钢轨沉降差3.8 mm。

由上可知,通过加固能显著抑制地层的变形和控制地层沉降。

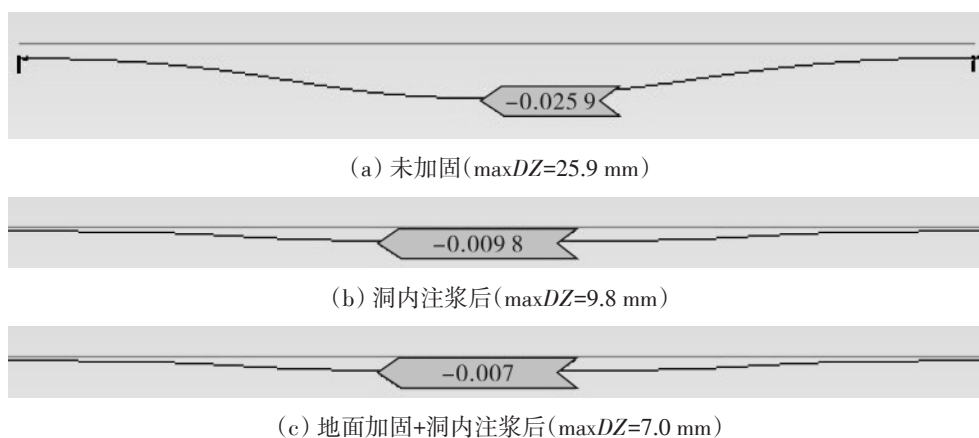


图7 盾构隧道掘进后股道沉降

Fig.7 The settlement of rail tracks after shield tunneling

3.2 下穿火车站站房

考虑洞内加固措施后,通过数值分析计算,图8~图10给出了管片内力及应力、站房基础及地表沉降图,从图中可见:

- 1) 各施工阶段,管片应力相对较小,最大压应力约2.0 MPa,最大拉应力约1.0 MPa;弯矩、轴力分布受施工先后的影响明显,呈非对称分布,先开挖隧道管片受力明显大于后施工隧道的管片受力。
- 2) 站房桩基础沉降主要发生在隧道顶部位置,且随着各洞室的开挖逐步增大;至施工完毕,站房桩基最大沉降约19.8 mm,最大地面沉降值为22.3 mm,其中影响区范围内的最大桩基沉降差约4.5 mm,最大相邻桩基沉降差约2.6 mm,沉降差<12 mm(根据GB50007-2002《建筑地基基础设计规范》规定,框架结构 $0.002l=0.002\times 6\,000=12\text{ mm}$)。

表3 各部分开挖沉降汇总表
Tab.3 All parts of the excavation subsidence mm

沉降值	1号线右线	1号线左线	2号线右线	2号线左线
最大地面沉降	13.72	15.97	20.79	22.34
最大桩基沉降	11.06	13.97	18.56	19.86
最大相邻桩基沉降差	0.32	0.97	2.10	2.60

综上所述,区间隧道在下穿南宁火车站站房时,盾构管片受力并不大,通过加强配筋能够满足结构安全的要求;站房地面和基础最大沉降值分别为22.3 mm和19.8 mm,可见地铁施工波及地层的影响不大,能够满足站房沉降控制要求。

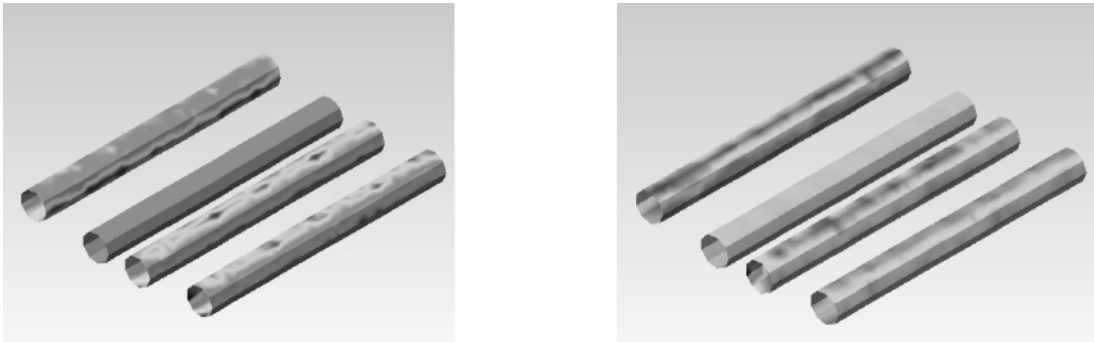


图8 各部分开挖完后管片弯矩(左)及轴力(右)图
Fig. 8 Segment bending moment (left) and axial force (right) after the excavation

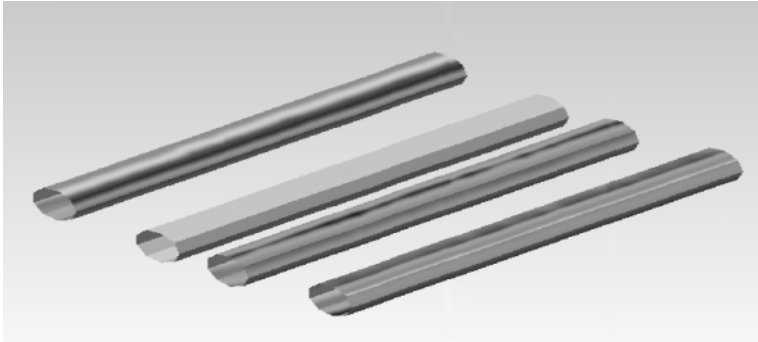


图9 各部分开挖完后管片应力图
Fig.9 Segment stress after the excavation

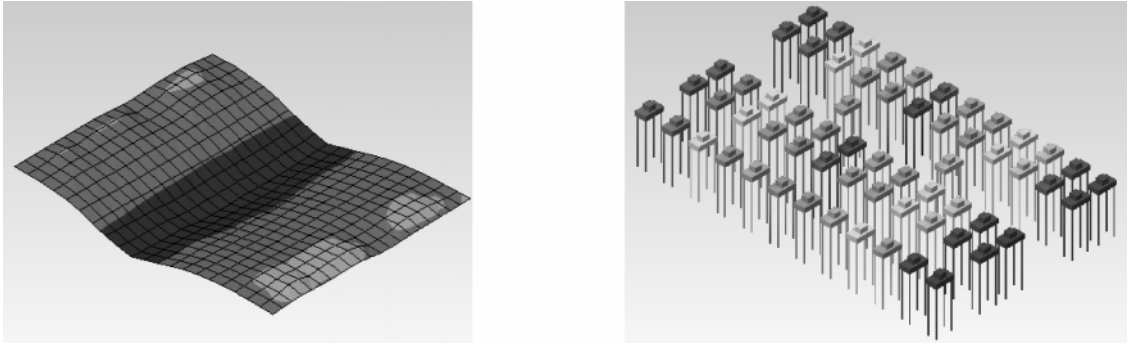


图10 各部分开挖完后站房基础及地面沉降图
Fig. 10 The settlement of foundation of railway station and surface after the excavation

4 加固方案

通过建立有限元模型,根据计算结果并针对本工程具体情况,对于隧道下穿铁路股道时,从安全角度考虑,加固方案采用地面袖阀管注浆加固+洞内加固相结合的形式;下穿火车站站房时,由于地面加固条件受限,加固方案采用洞内加固。具体加固措施为:

1) 地面袖阀管注浆加固:袖阀管呈梅花形布置,间距1 m,竖直方向加固范围为隧道上方至6 m,下方至2 m,水平方向加固范围即为沉降槽横向影响范围。外侧的3排袖阀管注入水泥、水玻璃混合浆,内侧中间区域仅注入水泥浆。浆液扩散半径不小于0.75 m,注浆压力0.5~3.5 MPa,注浆压力逐步提升,达到注浆压力后稳压10 min。地面注浆前,需与铁路主管部分协调同意。

2) 洞内加固:在管片处增设 $\Phi 32$ 注浆孔对管片外的地层加强加固,具体措施为:上部封顶块设置一个注浆孔,其余五片管片每片上设置3个注浆孔,注浆孔沿管片中线布置,环向间距22.5°。孔内浆液使用水泥、水玻璃混合浆。为保证注浆质量,切不可一次注入大量浆液,以防止浆液不均匀产生空隙。

5 结论

通过模拟隧道下穿铁路股道及火车站站房的施工过程及加固方案,观察未加固和加固情况下隧道上方环境的变化,得出以下结论:

1) 区间隧道在下穿铁路股道时,采用对开挖处地层进行加固和洞内加固的方式可以显著缩小单洞沉降槽的范围,抑制地层的变形。在覆土厚度约20 m、开挖直径为6 m的情况下最多可使沉降槽缩短60 m左右。说明沉降槽的宽度随着土层刚度及洞室刚度的增加而减小。

2) 通过加固地层及管片外土体可显著控制地表沉降,缓和沉降差。说明地表变形程度随土层刚度及洞室刚度的增加而减小。

3) 区间隧道在下穿火车站站房时,盾构管片受力并不大,通过加强配筋能够满足结构安全的要求,且先后开挖明显影响了管片内力的大小,并使内力呈不对称分布。

4) 当设置隧道距基础底端有一定距离,通过加固后即可有效地控制基础及地表变形。地层刚度的增加也使得桩基的沉降差明显缩小,从而保障了隧道上方建筑的安全。

参考文献:

- [1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proc 7th ICSMFE, Mexico, 1969:225-290.
- [2] SHINICHIRO I, TOSHIYUKI H, KENJI M, et al. Settlement trough above a model shield observed in a centrifuge[C]// Centrifuge 98, Tokyo, 1998:317-719.
- [3] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Geotechnique, 1987,37(3):301-320.
- [4] 施华成,鹏认敏,胡自林.隧道开挖对地表建筑物影响的随机介质分析方法[J].湘潭矿业学院学报,2002,12(2):45-50.
- [5] 张俊龙.地铁区间隧道下穿某火车站设计与研究[J].土工基础,2012,26(3):5-7,75.
- [6] 张志强,何川.深圳地铁隧道邻接桩基施工力学行为研究[J].岩土工程学报,2003,25(2):204-207.
- [7] 骆建军,张顶立,王梦恕,等.地铁施工沉降监测分析与控制[J].隧道建设,2006,26(1):10-13.
- [8] 张银平,雷震宇,周顺华.浅埋暗挖隧道对地表变形影响的三维数值分析[J].华东交通大学学报,2005,22(5):52-55.

Influence Analysis of Subway Shield Tunneling on Existing Track and Railway Station Building

Lu Huaxi, Wang Yixuan, Zhou Zhenwei, Wang Lei

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Through the research and analysis of field investigation for shield tunnel of Nanning Metro Line #1 and #2 which are underneath track and train station, based on two-dimensional and three-dimensional numerical models established under each corresponding environmental condition and stimulations of appropriate unit type, this study finds out that the usage of both inside grouting reinforcement and the outside ground reinforcement can help to reduce the maximum track settlement by 18.9 mm and the settling tank by 60 m. The maximum differential settlement of pile foundation can be controlled in scope of 4.5 mm for affected area by using grouting reinforcement to build the tunnel which is underneath the train station. It is far less than the permissible value required by regulations. It ensures the safety of shield tunnel passing through under Nanning train station and train track. Moreover, it provides valuable experience for numerical simulation of similar projects in the future.

Key words: shield tunneling; subway fields; subway track; pile foundation; finite element model; construction stage analysis

(责任编辑 王建华)

(上接第 17 页)

Dynamic Analysis on Spatial Coupled System of Train and Bridge under the Influence of Earthquake

Sha Feng, Yao Linqun, Cheng Xi

(School of Urban Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215131, China)

Abstract: In order to explore the impact of earthquakes on trains and bridges, the model of vehicle-bridge coupled system was established in this study. The normalized seismic wave was a kind of stimulation, meanwhile, the influence of track random irregularity was taken into account. The system equation was solved by new explicit integration method. The dynamic responses of the coupled system of train-bridge under earthquakes of different intensity were analyzed. Numerical results show that both the acceleration and the deflection response of the bridge meet the requirements of norms when earthquakes intensity is within the scope of the bridge's seismic fortification intensity. The Sperling index of vehicle stability is relatively looser than acceleration index, and the vehicle can't run steady on the bridge when seismic intensity is seven degrees or above. The track random irregularity has obvious effects on vertical acceleration of the bridge under a relatively weak earthquake, which shouldn't be ignored.

Key words: vehicle-bridge coupled system; track random irregularity; normalized seismic waves; dynamic response

(责任编辑 王建华)