

文章编号:1005-0523(2016)03-0087-07

基于路基加固条件下隧道下穿火车站路基沉降分析

郑明新¹,高其泽¹,欧阳林²,袁 钊¹,刘家桦¹

(1.华东交通大学岩土木建筑学院,江西 南昌 330013; 2.中国建筑西南勘察设计研究院有限公司,四川 成都 610053)

摘要:以福州地铁1号线的上行线下穿福州火车站工程为背景,将现场沉降监测数据和数值模拟结果进行对比分析,研究在旋喷桩加固和袖阀管注浆加固条件下铁路路基沉降变形规律。研究表明:盾构对铁路路基纵向影响范围为盾构刀盘前方10~20 m和刀盘后方40 m,横向影响范围为线路中心两侧20 m范围内;袖阀管注浆区域无论是在盾构施工过程中还是在施工结束后累计沉降变形均比旋喷桩加固区域小,袖阀管注浆加固效果更好;2种加固方式下铁路路基在盾构刀盘离开断面8 d后沉降变形均趋于稳定,路基沉降变形的最终稳定与盾构机离开断面的时间关系密切;数值计算表明,相对未加固而言,2种加固方式都能减小路基沉降,计算结果与监测数据基本相符,可通过数值计算对下行线施工开展路基沉降预测。

关键词:盾构隧道;路基沉降;旋喷桩;袖阀管注浆;数值模拟

中图分类号:U455;TU941

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.03.014

随着城市的不断发展,交通拥堵日益严重,地下空间的开发利用日益得到重视,城市地铁建设得到了大力发展。地铁盾构隧道下穿既有铁路工程项目日益增多,盾构隧道穿越既有铁路工程属于高风险工程,轨道变形属特级风险源^[1];因此在盾构隧道下穿铁路既有线路过程中,对铁路路基变形控制十分重要^[2]。对既有铁路线路路基沉降控制的主要措施有:盾构施工前进行路基预加固和施工过程中2次注浆等方式^[3]。目前在盾构隧道施工过程中引起路基沉降变形这方面的研究已取得了一定的成果,路基沉降预测有经验公式法^[4-6]、数值模拟法^[7-8]和现场测试法^[9]等。已有工程案例和研究成果显示盾构隧道所处位置埋深、水文地质条件、盾构施工土仓压力、注浆等均是影响路基沉降的主要因素^[10-11]。当工程处于复杂地质条件和经预加固处理的工况下,仅仅依靠理论计算往往出现较大偏差,而现场实测数据与理论计算进行对比能更好地反应路基沉降变形规律。

以福州地铁1号线下穿福州火车站铁路项目为研究背景,通过现场监测路基沉降变形,分析基于不同铁路路基加固方式下盾构隧道施工过程中引起路基在时间、空间上的沉降变形规律,通过比较分析不同加固方式的加固效果。

1 工程概况

本工程位于福州地铁1号线罗汉山站-福州火车站站区间;盾构隧道埋深为18.92~11.76 m;线间距为11.00~16.93 m;区间线路盾构隧道下穿火车站西端,共有15条铁路线,见图1。

根据地质勘察报告,第1~5轨道地层主要以杂填土、淤泥质土、粉质粘土和残积砂质粘性土为主,第6~14以及牵出线地层主要为杂填土、淤泥质土、残积砾(粉)质粘土,在盾构开挖面分布少量砂土和中等风化花岗岩。在盾构开挖之前,对铁路路基进行高压旋喷桩和袖阀管劈裂注浆加固。第1,4,6,8,11以及牵出线铁路路基采用旋喷桩方式进行加固,旋喷桩有效直径80 cm,桩间距65 cm,桩长6~10 m,呈四边形布置。第

收稿日期:2015-11-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51568022);江西省高等学校科技落地计划项目(KJLD13036)

作者简介:郑明新(1966—),男,教授,博士生导师,研究方向为路基与边坡工程。

1~5 股道铁路路基采用袖阀管劈裂注浆,注浆钻孔开孔直径为 98 mm,间距 3.0 m,交错布置,注浆半径 2.0 m,注浆范围为盾构断面底面至顶面 6 m 范围。地层剖面见图 1。

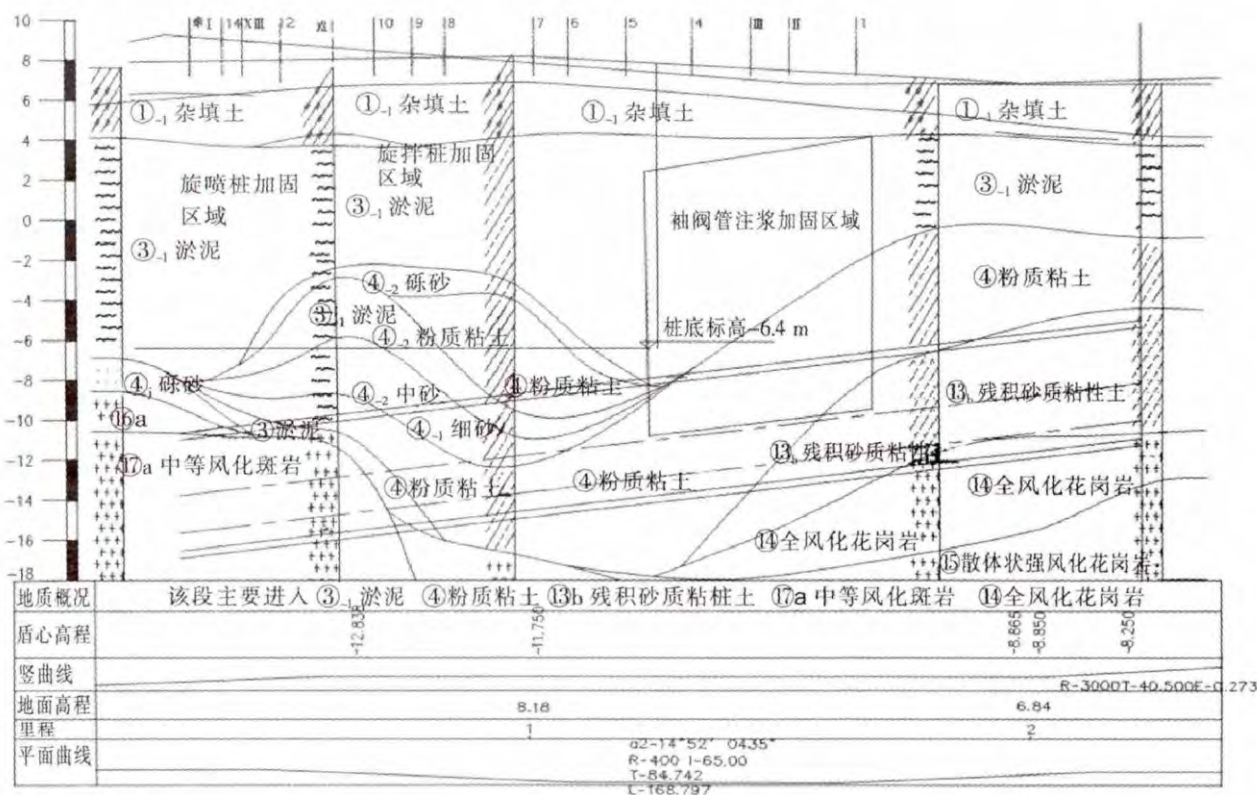


图 1 路基加固区域地层剖面图

Fig.1 Roadbed strengthening regional geological section

2 路基沉降规律分析

现场沉降观测点的布置主要包括:地表沉降及站台沉降监测、接触网柱基础监测及建构筑物沉降观测。测点横向从隧道中心线向两侧每 5 m 布置一个,布置范围为隧道中心线两侧 20 m。本文主要研究下行线盾构隧道引起的铁路路基沉降变形,选取高压旋喷桩加固区域 D7,D8 典型断面和以袖阀管注浆加固为主的区域 D2,D4 典型断面进行分析,见图 2 所示。

2.1 纵向路基沉降分析

2.1.1 盾构中心位置沉降与刀盘所处位置和时间关系

根据现场盾构施工进度,汇总分析盾构掘进过程中时间、刀盘所处位置和现场沉降监测数据,绘制盾构中心线位置沉降变形 $S-t-L$ 关系图。纵向路基沉降监测范围为盾构刀盘前方 20 m 和盾构刀盘后方 30 m 直至沉降趋于稳定(沉降变形小于 $\pm 0.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)为止。

2.1.2 沉降时空对比分析

通过图 2 中 D2,D4,D7 和 D8 断面可以看出:

1) 盾构掘进过程中对盾构刀盘前方 10 m 土体有较明显影响,盾构刀盘穿越断面之前,在旋喷桩加固区域平均累计沉降量为 1.73 mm,占总沉降量的 19%~26%。袖阀管注浆加固为主区域,平均累计沉降量为 1.24 mm,占总沉降量的比例为 13%~19%,盾构前方路基沉降主要由盾构掘进过程地下水排除以及土仓压力等引起土体扰动,通过以上数据可以得出,在盾构刀盘穿越断面之前,袖阀管注浆加固为主的区域的累计沉降量和占总沉降量的比例都较小。

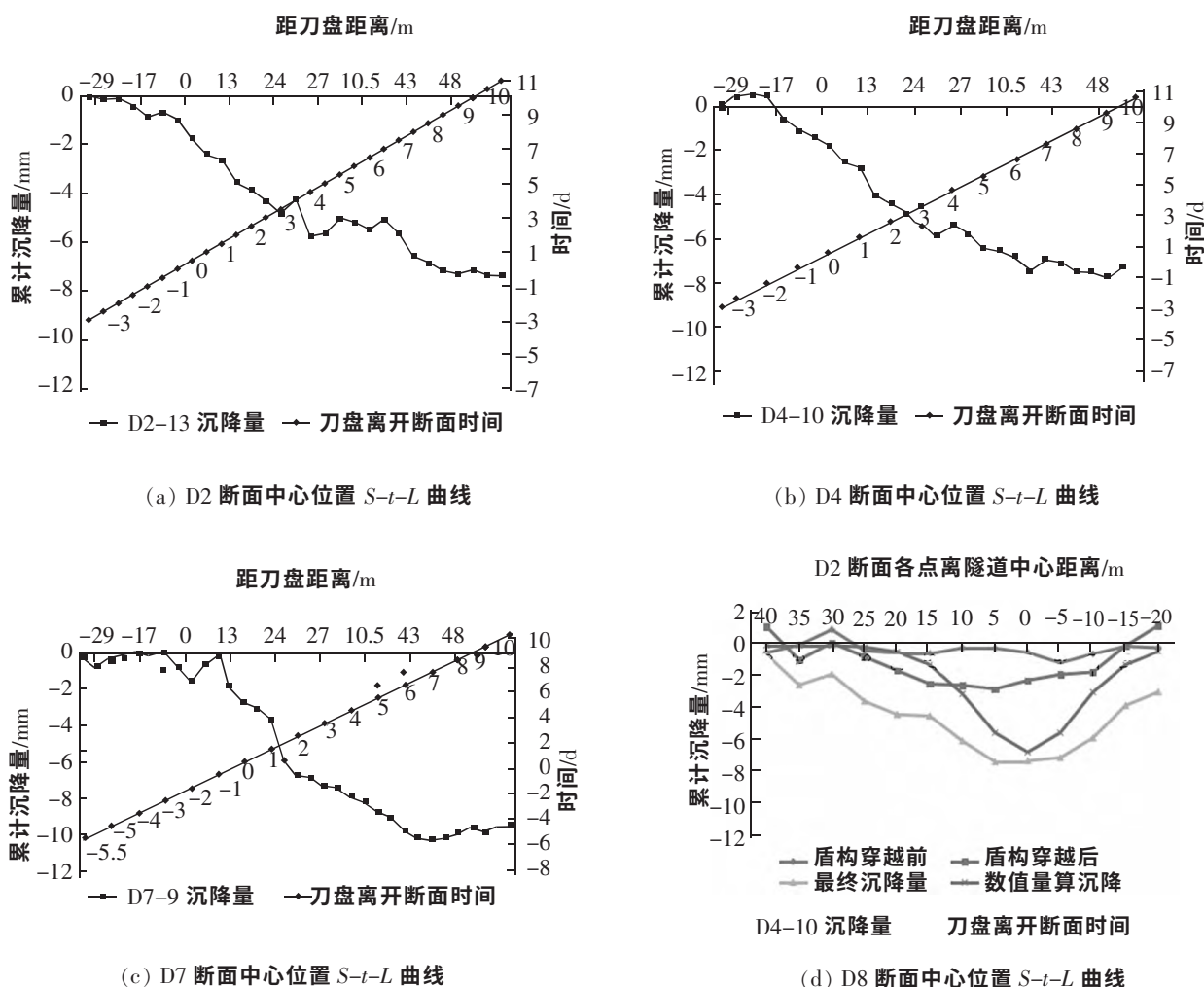


图2 各断面隧道中心位置沉降与刀盘位置和时间关系

Fig.2 Settlement of monitoring point of D2-13、D4-10、D7-9、D8-8 when the cutter are in different location and time

2) 盾构刀盘后方40 m 范围内路基沉降速率较快,累计沉降量大,旋喷桩加固区域此阶段沉降量为6.02 mm, 占总沉降量的72%~93%。袖阀管注浆加固区域此阶段沉降量为4.01 mm, 占总沉降量的72%~81%。此阶段是路基沉降的主要阶段,路基沉降原因主要是盾构超挖、地下水位下降、注浆压力不足等,该阶段是沉降变形监测的重点。盾构刀盘离开断面40 m 后各断面还有较小的沉降变形。

3) 构机在离开断面8 d 后路基沉降趋于稳定。对应的位置分别为盾构机离开断面45,47,96 m 和80 m。由此可以看出,路基沉降变形的最终稳定与盾构机离开断面的时间有较直接关系。

4) 盾构刀盘距断面0~10 m 为盾构机盾尾脱出阶段,此阶段沉降变化速率快,引起沉降的主要原因为存在3 cm 的盾尾间隙。由图中数据可以计算出D2,D4,D7,D8 盾构推进平均速度分别为5,6.6,15,4.5 $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$, 沉降量分别增加1.61,1.29,1.09,2.01 mm。由此得出,盾构机以较快速度通过断面时对路基沉降影响减小。

2.2 横向路基沉降分析

运用MIDAS/GTS 有限元分析软件建模,以探讨盾构单线隧道开挖情况下铁路路基沉降变形规律。模拟方案分为未加固、袖阀管注浆加固和旋喷桩加固3 种工况。根据现场调研和相关勘探资料,各土层及土体物理力学参数取值见表1。

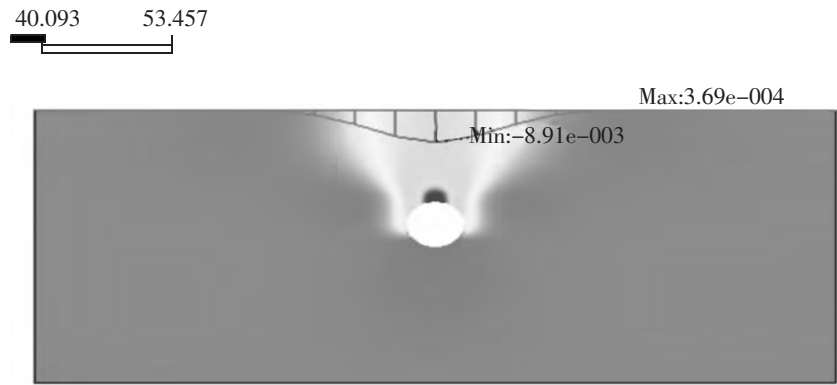
表 1 数值模拟参数取值
Table.1 The parameter of numerical simulation

名 称	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比	静止侧压力系数
杂填土	3.50	17.3	22.3	8.7	8	0.35	0.43
淤泥	7.67	15.7	15.2	6.4	2	0.40	0.52
粉质粘土	6.40	18.8	32.1	17.7	15	0.37	0.45
全风化岩	5.94	21.3	39.8	23.4	50	0.31	0.30
淤泥注浆后(旋喷)	7.67	15.7	15.2	6.4	15.2(5)	0.40	0.52
粉质粘土注浆后(旋喷)	6.40	18.8	32.1	17.7	43.4(22)	0.37	0.45
管片-盾尾注浆材料	0.39	24	—	—	3 450	0.167	—

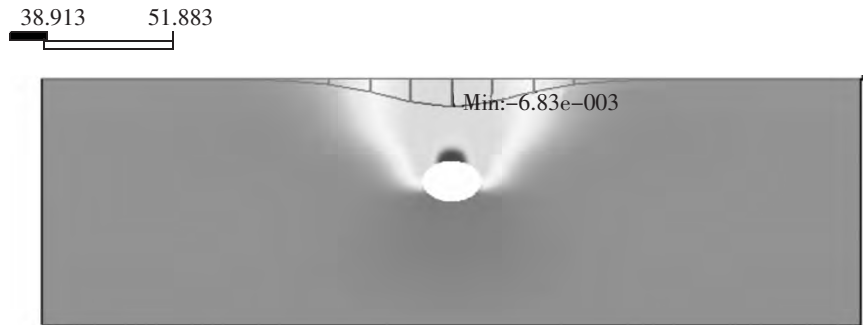
模型尺寸为 83 m×36 m,盾构埋深为 13 m,岩土采用摩尔-库伦本构,盾构管片及注浆采用弹性模型,数值计算模型两侧采用 X 方向约束,底部采用 X-Y 方向约束,上部无约束。

假定土层均为等厚层;旋喷桩复合地基加固区增强体视作一个整体,加强区土体复合模量按 $E_{sp}=mE_p+(1-m)E_s$ 计算,其中 E_{sp} 为复合土层的压缩模量, m 为桩体面积置换率, E_p 为桩的压缩模量, E_s 为桩间土的压缩模量, m 取 20%;不考虑地下水位的影响,不考虑盾构掘进后地层的次固结沉降;以路基所在位置的地表沉降作为路基沉降量。

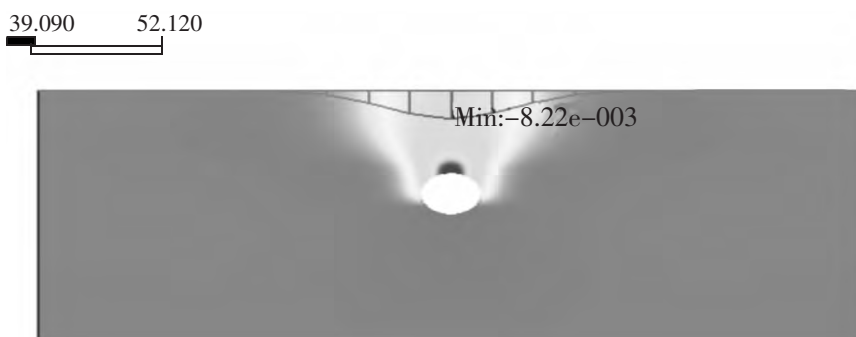
选取典型断面进行数值模拟计算,由于 D2 和 D4 断面,D7 和 D8 断面位置接近,工程地质条件相似,本文以袖阀管注浆区域模拟结果近似表示 D2 与 D4 断面沉降变形量,旋喷桩加固区域模拟结果近似表示 D7 和 D8 断面沉降变形量。具体数值模拟结果见图 3。



(a) 未加固时数值模拟结果



(b) 袖阀管注浆加固时模拟结果



(c) 旋喷桩加固时模拟结果

图3 数值模拟隧道贯通后路基沉降变形结果

Fig.3 Numerical simulation settlement value after the tunnel through the embankment

由不同工况下数值模拟计算云图可以得到,沉降量以盾构中心线上方,在两侧呈对称趋势。未加固、袖阀管注浆和旋喷桩加固时的最大沉降量分别为 8.91, 6.83 mm 和 8.22 mm。由数值计算结果可以看出在未加固情况下沉降量大,其中袖阀管注浆加固效果更理想,这是由于袖阀管注浆加固形成的注浆帷幕能增加路基整体的强度,而旋喷桩加固的效果主要体现在隔水的作用,减少施工过程中因地下水位变化过大而引起路基的沉降。

总结以上 4 个典型横断面现场监测数据,得出盾构穿越断面之前、穿越断面之后(盾构脱尾)及路基横断面最终沉降曲线,并将现场监测结果和数值计算结果进行对比,见图 4。

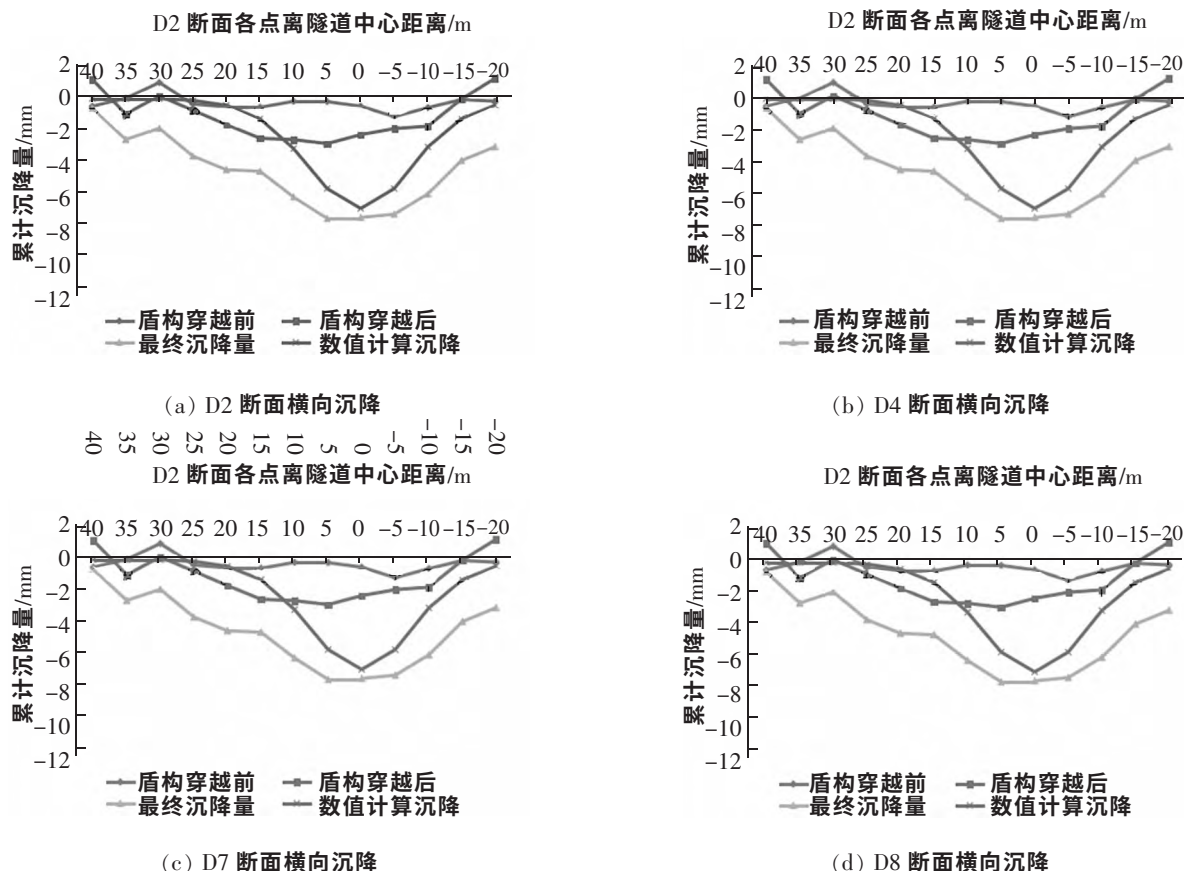


图4 各断面不同情况下路基变形曲线图

Fig.4 Settlement curves of D2, D4, D7 and D8

通过以上典型断面沉降对比曲线图可以看出:

1) 盾构隧道施工对隧道中心线两侧 10 m 范围路基横向沉降影响较大,超过最大沉降量的 50%,中心线两侧 15 m 范围沉降超过总沉降量的 30%。袖阀管注浆区域的 D2,D4 断面最大沉降量为 7.41 mm;旋喷桩加固区域的 D7,D8 断面最大沉降量为 9 mm,旋喷桩加固区域最大沉降量偏大,这与数值模拟结果的 6.83 mm 和 8.22 mm 相差不大,造成这种差异主要是数值模拟考虑均匀的土层厚度,未考虑地下水和土层的次固结等原因。

2) 数值模拟所得路基沉降规律和实测结果相吻合,可以说明数值模拟结果可靠。通过加固和未加固的数值模拟计算结果可以得到,袖阀管加固情况和旋喷桩加固分别可以减少 23.3%和 7.7%的路基沉降,由此可以得出 2 种加固方式都能减小路基的沉降,其中袖阀管加固效果更好。

3) 基于 2 种不同的加固条件下,盾构施工对刀盘前部铁路路基横向沉降影响结果相似,沉降量小于 2 mm;盾构脱尾阶段注浆加固区域最大沉降量为 2.56 mm,旋喷桩加固区域最大沉降量 4.31 mm;而盾构脱尾之后两者沉降分别增加了 4.92 mm 和 6.27 mm。由此可以看出,在盾构脱尾前后,袖阀管注浆加固区域沉降量都偏小。

3 主要结论

通过对盾构施工下穿福州火车站项目现场监测与数值模拟对比分析,探讨了基于不同铁路路基加固方式下盾构隧道施工过程中路基沉降在时间、空间上的沉降变形规律,得到主要结论:

1) 通常盾构掘进过程对刀盘前方 10 m 路基沉降有显著影响,刀盘后方 40 m 范围内路基沉降较大,特别是 10 m 范围内盾构脱尾阶段路基沉降变化速率快;在横向上(铁路方向),沿隧道中心两侧 10 m 范围内的路基沉降明显,最大沉降位置在盾构中心线上方。

2) 路基沉降变形的最终稳定与盾构离开断面位置的时间有直接关系,通常盾构机匀速、较快速通过有利于减小对铁路路基沉降的影响。

3) 使用袖阀管注浆和旋喷桩对路基的加固效果主要体现在盾构脱尾阶段和最终沉降数值。数值计算表明,袖阀管加固情况和旋喷桩加固均能减少路基沉降,其中袖阀管注浆加固方案更为有效。

参考文献:

- [1] 贺斯进,简云宏. 地铁盾构区间穿越铁路站场设计与施工分析[J]. 现代隧道技术,2012,49(3):166-170.
- [2] 游龙飞,王效文,龚彦峰,等. 盾构下穿新建铁路站场地基预处理技术研究[J]. 铁道工程学报,2012(6):104-108.
- [3] 党世伟. 盾构掘进地层变形原因分析与施工控制[J]. 建筑技术,2007,38(7):549-550.
- [4] 吴东海,龙汉,张希. 盾构法隧道施工纵向地表沉降的随机预测[J]. 岩土工程界,2004,7(12):64-66.
- [5] 刘铭,刘印,王志良. 上海地区盾构施工扰动对隧道弹性沉降的影响估算方法[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2012(3):480-484.
- [6] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of the 7th International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, 1969:225-290.
- [7] 车风,官全美. 盾构隧道下穿引起浅基础变形的有限元分析[J]. 华东交通大学学报,2015,32(6):74-81.
- [8] 张印涛,陶连金,边金. 盾构隧道开挖引起地表沉降数值模拟与实测分析[J]. 北京工业大学学报,2006,32(4):332-337.
- [9] 胡鑫. 长沙地铁二号线土压平衡盾构隧道施工引起的地表沉降特征研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
- [10] 许有俊,陶连金,李文博,等. 地铁双线盾构隧道下穿高速铁路路基沉降分析[J]. 北京工业大学学报,2010,36(12):1618-1623.
- [11] 欧阳林. 基于地基加固条件下隧道下穿福州火车站路基沉降分析[D]. 南昌:华东交通大学,2015.

Analysis on Roadbed Settlement of Tunnel-under Crossing Railway Station under the Condition of Roadbed Reinforcement

Zheng Mingxin¹, Gao Qize¹, Ou Yanglin², Yuan Qian¹, Liu Jiahua¹

(1.School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2.Southwest China Construction Survey and Design Institute Corporation Limited ,Chengdu 610053,China)

Abstract: This study presents the law of roadbed settlement and deformation in railway construction in the case of Fuzhou Metro Line 1 traversing Fuzhou Railway Station. The comparison of on-site monitoring data and numerical stimulation data was made in the study to analyze the settlement and deformation law under the condition of the jet grouting pile and the sleeve valve tube grouting reinforcement. The analysis indicates that longitudinal effect of shield on roadbed ranging from 10 m to 20 m in the front of the cutter head and 40 m behind the cutter head; and the horizontal effect range is 20 m from central line on both sides. The plastic valve pipe grouting area of plastic valve pipe grouting is comparatively smaller than jet grouting area whether in the process of shield tunnel construction or after the construction, thus the construction effect of plastic valve pipe grouting is better. For two reinforcements, the railway roadbed tends to be stable after 8 days when the shield cutter head left the cross section, and the stability and the settlement of the roadbed are directly related to the time of settlement deformation; Numerical stimulation shows that the embankment settlement could be reduced by both of reinforcements, and numerical stimulation statistics is in conformity with measured data and the sleeve valve tube grouting reinforcement effect is better.

Key words: shield tunnel; roadbed settlement; jet grouting piles; plastic valve pipe grouting; numerical stimulation

(责任编辑 刘棉玲)