

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2016.04.006

盾构隧道下穿铁路群引起路基沉降的数值研究

赵勇博¹, 吴波^{1,2}, 王鸣涛¹

(1.福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2.福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要:以福州地铁一号线(罗汉山站~福州火车站区间)为依托工程,采用 MIDAS/GTS 有限元软件对盾构隧道下穿铁路轨道群引起的路基沉降进行了三维数值模拟分析。根据计算结果,分析了铁路轨道路基以及隧道轴线方向地表的沉降规律。并与工程现场实测数据进行对比,发现沉降规律基本一致。可为类似工程的设计、施工提供参考。

关键词:盾构隧道; 数值模拟; 路基沉降; 围岩应力

中图分类号: U455.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2016)04-0339-05

Numerical study on embankment settlement induced by shield tunnelling under railway track groups

Zhao Yongbo¹, Wu Bo^{1,2}, Wang Mingtao¹

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informationization in Civil Engineering, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Fuzhou subway line1 (Luo Hanshan Station to Fuzhou Railway Station) was taken as a foundation engineering project. 3D numerical simulation analysis of embankment settlement induced by shield tunnelling under railway track groups was conducted via finite element software MIDAS/GTS. The regularity of the railway embankment and the ground surface settlements along the rail axis were analysed. The simulation result was compared with that of the on-site measured data, which indicates that the simulation is effective.

Keywords: shield tunnel; numerical modelling; embankment settlement; surrounding rock stress

盾构施工具有对周围环境影响小,受地形、地貌等地表环境限制小,同时施工速度快等优点。盾构法已经成为城市地铁施工中最普遍的方法,在最近几年发现盾构隧道下穿既有铁路的工程也越来越多。盾构法作为目前中国城市地铁隧道建设的一种重要施工方法,同其他施工方法一样,由施工引起的地表沉降及对周围环境的影响成为盾构法施工的一个重要问题。由于盾构施工改变了既有铁路地基原土体应力场,造成开挖面周围土体的扰动,导致隧道周围土体发生位移,进而引起地表变形,势必引起铁路线路变形,加剧轨道的不平顺,加大铁轨间的冲击力,加速轨道结构和基床的破坏,严重时还会影响到铁路的运营安全^[1]。

目前,国内外学者对盾构法隧道施工引起地表沉降规律已经有了较多的研究。其常用的研究方法包括经验公式法、模型试验法、数值模拟法等方法^[2-3]。尤其随着有限元数值模拟软件的愈发成熟,数值分析不仅可以较真实地模拟出实际工程的水文地质情况,而且可以模拟盾构施工过程,方便对不同施工步骤下的路基沉降作研究,因此该方法得到了越来越多的应用。如肖立^[4]等依托工程实际对多条铁路轨道下盾构长距离推进过程

收稿日期: 2016-06-15
基金项目: 国家自然科学基金项目(51478118); 福建省自然科学基金项目(2014J01170)
第一作者简介: 赵勇博(1991-),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事岩土与地下工程技术研究。

中引起的地表变形进行了三维有限元数值模拟,总结了盾构开挖过程中垂直和平行于盾构方向的地表沉降规律;吕培林^[5]等对软土地区盾构下穿铁路干线引起的线路沉降规律作了研究;吴波^[6]等也从地铁开挖过程中失水引起的地表沉降作了充分研究。但大多数研究对象仅局限于地表沉降规律,对盾构法隧道施工引起的铁路路基沉降规律研究较少,而且福州地铁规划场区地貌变化大,地质环境复杂,区内沿江、沿海一带的含水层富水性大、透水性强,水头压力大,隧道盾构开挖风险大。福州市轨道交通 1 号线(罗汉山站~福州火车站区间)下穿福州火车站咽喉区,因此有必要对该区间盾构施工引起的路基沉降做深入研究。

本文以福州地铁一号线罗汉山站~福州火车站站区间为研究背景,首先通过建立三维数值模型分析隧道开挖过程中铁路路基沿盾构方向和轨道方向的沉降规律,最后与工程现场实测数据对比研究。对盾构隧道下穿既有铁路轨道群引起的路基沉降规律进行了分析、总结,可为类似工程的设计、施工提供参考。

1 工程概况

福州市轨道交通 1 号线(罗汉山站~福州火车站区间)盾构始发井为 2#矿山法工作井。区间盾构隧道上行线起讫点里程为:SK3+712.8~SK4+223.7,长 510.9 m,下行线里程 XK3+722.01~XK4+223.7,长 501.69 m。2#竖井~福州火车站区间隧道总长 1 012.59 m。其中盾构段施工(实推)总长度为 451.745 m。

盾构区间隧道下穿地表铁路轨道,沿规划西路向南下穿福州火车站咽喉区(车站正线 14 股道,2 组道岔,铁路路堤高 2 m,有砟道床),平面与其约成 60°角,线间距 11~14.65 m。穿越段里程为:XK4+020~XK+049、SK4+010~SK4+062。盾构下穿铁路的上覆主要地层为杂填土、淤泥,隧道范围内主要地层为粉质粘土、砾质粘土、强风化花岗岩。隧道与铁路平面关系如图 4 所示。

2 模型建立与参数取值

2.1 模型建立

采用 MIDAS/GTS 有限元分析软件对福州地铁穿越铁路轨道群进行数值分析时假设:①各地层材料采用实体单元,管片、盾构钢壳、注浆层以

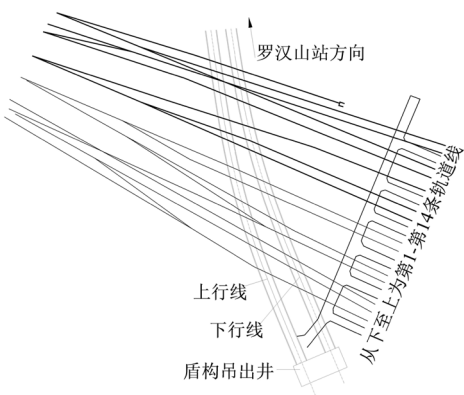


图 1 隧道与铁路平面关系图

Fig.1 Tunnel and rail plane diagram of Fuzhou subway line 1

及开挖超空隙采用弹性结构单元;②实体单元遵循 Mohr-Coulomb 屈服准则;③模型四周边界采用单向铰支约束,下表面为固定约束,上表面为自由面;④不考虑施工过程中的爆破影响;⑤不考虑施工过程和地表荷载的影响;⑥不考虑地下水的影响和流固耦合效应。模型结构单元尺寸为 1 m,单元划分采用自动混合六面体,实体单元最大尺寸 2.5 m,最小 0.5 m。混凝土等级 C50。计算模型横向取至距隧道轴线 5 倍盾构隧道直径(隧道半径 $R = 3.15\text{ m}$),其中横向宽 77 m,高 40.65 m,纵向长 64 m。模型共 61 815 个单元,135 184 个节点。其计算模型如图 2 所示。

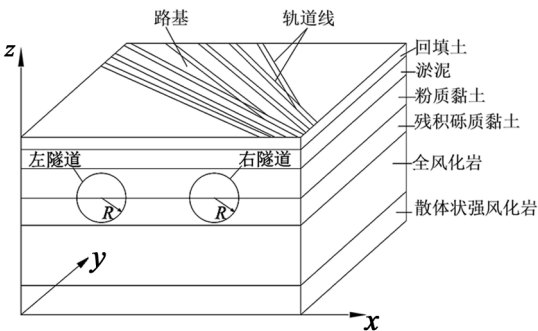


图 2 计算模型

Fig.2 Calculation model of rail embankment induced by shield tunnelling under rail track groups

2.2 参数取值

各地层力学、物理参数按《福州轨道交通 1 号线 02 标段罗汉山站~福州火车站站区间详细勘察阶段岩土工程勘察》参数建议表取值。具体围岩及支护物理力学参数见表 1。

表 1 围岩及支护参数表

Tab.1 Parameters of surrounding rock and timbering shoring

材料	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	内摩 擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	粘聚力 c/MPa
路堤	35.0	200.0	0.30	—	10
回填土	18.9	28.0	0.30	15.0	13
淤泥	15.8	38.2	0.35	15.5	40
粉质粘土	18.8	161.2	0.30	21.5	90
残积砾质 粘性土	18.6	628.2	0.35	26.5	190
全风化岩	25.0	650.0	0.35	35.0	220
管片	25.0	24.2	0.20	—	—
盾构钢壳	78.0	34.5	0.20	—	—
注浆	18.0	2.2e-01	0.25	—	—
超空隙	0.1	2.5e-05	0.30	—	—

除考虑土体自重外,还需考虑城际铁路的列车及轨道荷载,根据《铁路路基设计规范》^[7]采用换算土柱的方法,可将列车及轨道荷载等效为静

荷载考虑。查附录 A-轨道和列车荷载换算土柱高度和分布宽度表,可得等效荷载为 60 kPa。根据《盾构法隧道施工与验收规范》^[8]在实际工程中盾构总推力在 9 500~12 000 kN。数值模拟中取 10 000 kN。

3 计算结果与分析

3.1 平行于轨道方向的路基沉降位移分析

由计算结果可知,在隧道掘进过程中,每条路基的沉降曲线规律基本一致。因此,文中仅选出第 1 条和第 7 条路基作为研究对象。图 3 和图 4 是第 1 条路基和第 7 条路基分别在左、右隧道掘进过程中的沉降曲线。其中:R4 代表右隧道掘进 4 m 时的沉降曲线;L4 代表左隧道掘进 4 m 时的沉降曲线,其它符号与之类似。

从图 3 和图 4 可以看出:①随着右隧道的掘进,第一条轨道下方路基沉降曲线的沉降中心逐渐偏移并稳定在轨道长度 24 m 处,最大沉降值约为 6.8 mm。横向影响范围约为 50 m,分布在沉降中心两侧。第 7 条轨道下方路基沉降曲线的沉降中心组建偏移并稳定在轨道长度 32 m 处,最大沉

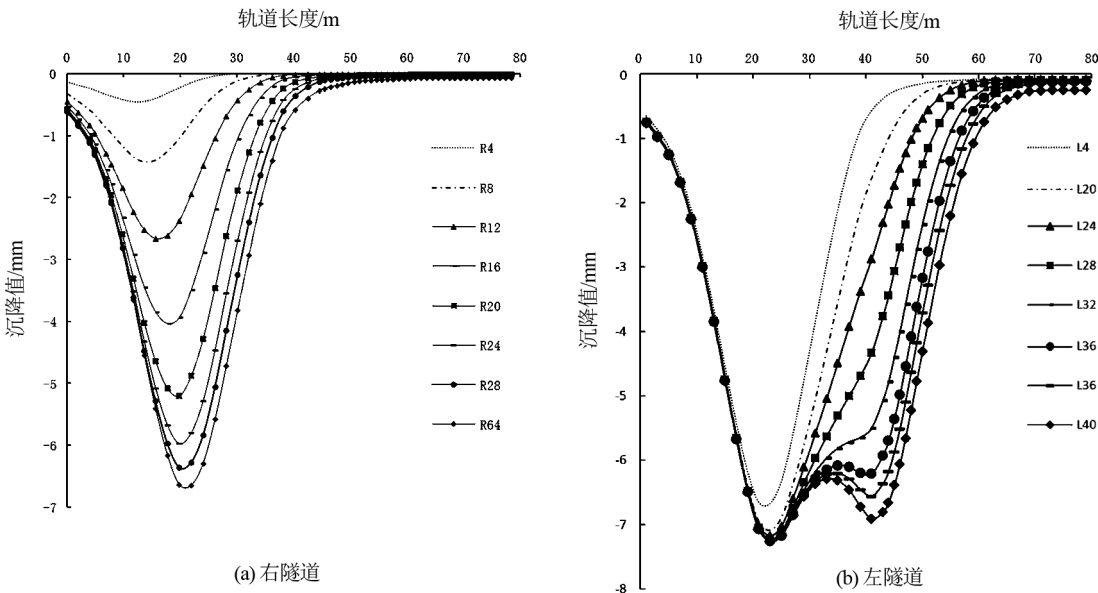


图 3 隧道掘进第一条路基沉降曲线

Fig.3 The first embankment settlement curve

降值约为 7.1 mm。横向影响范围约为 65 m,分布在沉降中心的两侧。②随着左隧道的掘进,第 1 条轨道下方路基沉降曲线的沉降中心逐渐由上行线隧道正上方偏移并稳定至轨道长度 34 m 处,沉降值为 6.3 mm,沉降量由中心向两侧递减,左

侧峰值在 23 m 处,沉降值为 7.3 mm,右侧峰值在 41 m 处,沉降值为 6.9 mm。横向影响范围约为 70 m,即 11 倍的隧道直径,分布在沉降中心的两侧。第 7 条轨道下方路基沉降曲线的沉降中心逐渐由上行线隧道正上方偏移并稳定至轨道长度

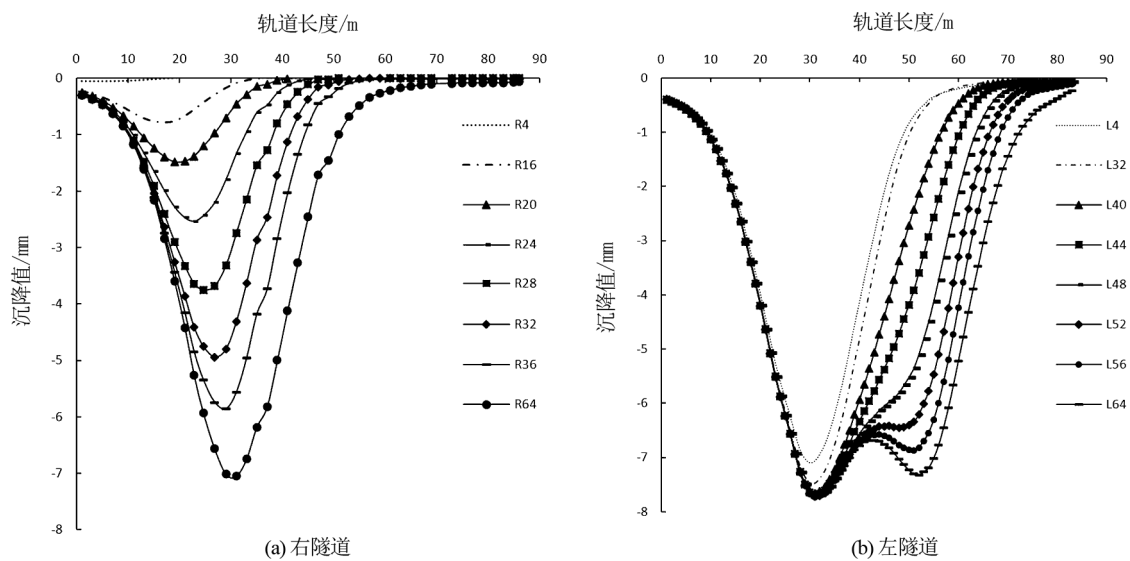


图 4 隧道掘进第七条路基沉降曲线

Fig.4 The seventh embankment settlement curve

41 m 处,沉降值为 6.7 mm,沉降量由中心向两侧递减,左侧峰值在 31 m 处,沉降值为 7.7 mm,右侧峰值在 52 m 处,沉降值为 7.5 mm。横向影响范围约为 80 m,即 12 倍的隧道直径,分布在沉降中心的两侧。由于和右隧道掘进过程中的沉降曲线叠加,左隧道掘进过程中出现类似“W”型的沉降曲线。③轨道线正下方路基的最大沉降值出现在隧道正上方且双线开挖大于单独开挖隧道一侧所产生的最大沉降值,最大沉降值增长量在8.2%~10.1%之间。

3.2 沿盾构方向的路基沉降位移分析

取位于左、右隧道正上方的地表线(其中包括轨道路基与地表线的交点)为研究对象,研究沿盾构方向的路基沉降规律。计算结果如图 5 所示。可以看出:①盾构掘进对掌子面前方(未开挖部分为前方)土体的影响范围在 20 m 内,对后方(已开挖部分为后方)土体的影响范围在 30 m 内,总体范围约为隧道直径的 6 倍。对后方 30 m 处影响达到最大累计沉降,对前方 20 m 处及之后沉降影响几乎为 0。②随着盾构向前掘进隧道轴

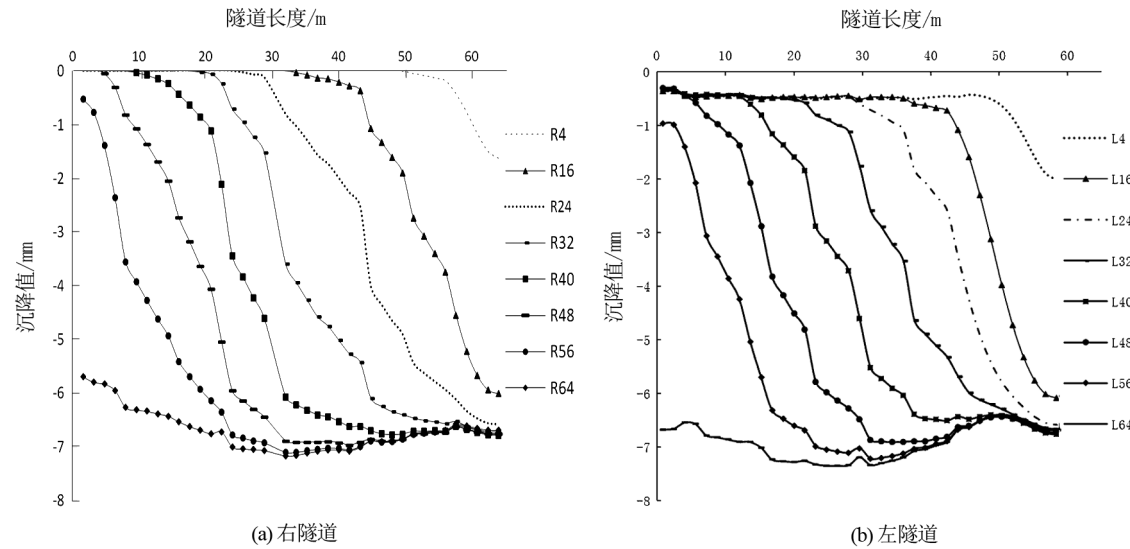


图 5 隧道轴线正上方地表沉降曲线

Fig.5 The settlement curve of ground surface right above the tunnel axis

线正上方地表沉降值会逐渐增大,但最终都趋近于一稳定值,上行线开挖完毕,上行线隧道正上方路基最大沉降值为 7.2 mm;下行线开挖完毕,下行线隧道正上方路基最大沉降值为 7.4 mm,并都位于隧道中间正上方位置。③曲线中的转折点为轨道路基与隧道正上方的表现的交点,可知在列车动荷载的作用下会明显加剧路基的沉降。

4 监测结果

路基监测布设沿轨道长度方向,在距离铁路 1 m 的位置,共设置 11 条地表沉降监测线。每条监测线根据现场实际情况设置多个监测点,大约每 5 m 设一个沉降监测点。为了简化研究任务,文中仅选取具有代表性的第 7 条路基分别在左、右隧道盾构结束后的监测曲线与数值模拟计算结果进行对比研究。其详细布设方案如图 6 所示,对比结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出:①上行线(右隧道)开挖完路基沉降监测曲线呈现漏斗状,下行线(左隧道)开挖完路基沉降监测曲线呈现“W”形状,均与数

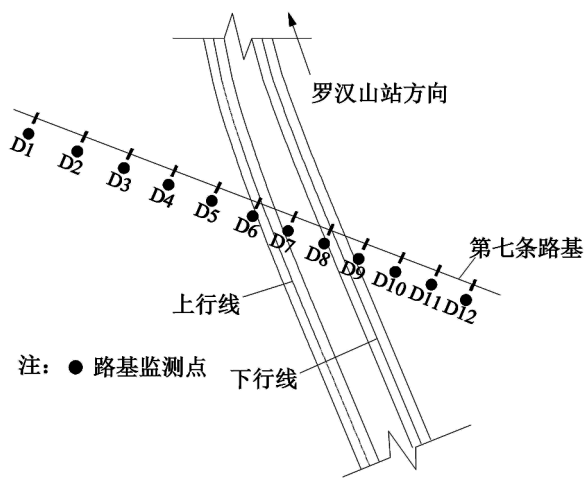


图 6 路基监测点布设图
Fig.6 Setting sketch of roadbed monitoring points

值计算结果曲线相似。②左、右隧道盾构结束后实际监测结果的最大沉降值分别为 8.1 mm、9.6 mm,与计算结果相比较存在一定的差距,这是因为在实际施工中外界环境(降雨、地下水、地表车辆等)复杂多变,各种外界因素都会影响围岩的应力变化,进而最终影响到路基的沉降变化,但是

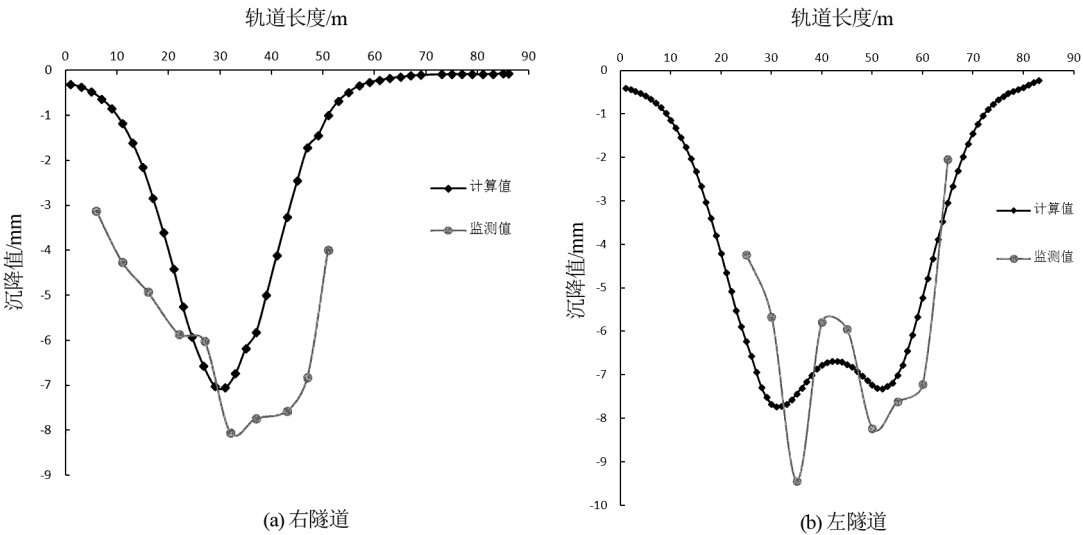


图 7 计算值与监测值对比图
Fig.7 Comparative analysis of calculated and monitoring values

在有限元计算中简化了这些因素,所计算的结果与实际监测数据存在差距在所难免。本文差距很小,在允许范围之内。③监测数据曲线的影响范围与数值计算结果相似。综上分析表明,本文计算方法具有合理性和适用性。

5 结论

1)轨道线正下方路基的最大沉降值出现在隧道正上方且双线开挖时因左、右隧道沉降曲线的叠加会出现类似“W”形沉降槽,最大沉降值也大于单独开挖隧道一侧所产生 (下转第 355 页)

3 结论

1)Fe-Mn-Ni 系 TWIP 合金铸铁的力学性能随着锰镍比的提高而降低,在锰镍比为 3 : 2 时,力学性能最好。此时材料的抗拉强度为 885 MPa,伸长率为 29.7%。

2)随着锰镍比的提高,铸态组织中碳化物的含量逐渐增加。

3)通过热处理(1 050 ℃保温 10 h 后进行水淬)可以使 TWIP 合金铸铁铸态组织中的碳化物分解,得到单相奥氏体基体组织。

参考文献:

[1] 郝石坚.现代铸铁学[M].北京:冶金工业出版社,2004:353-364.

[2] 吴德海.球墨铸铁[M].北京:中国水利水电出版社,2006:50-68.

[3] 万仁芳.浅谈近年来铸铁件的发展[J].现代铸铁,2014,34(3):15-24.

[4] 王亚萍,高峰,王顺序,等.高强度、高伸长率球铁件的研究与开发[C]//第六届湖北省铸造学术年会论文集.北京:中国铸造协会,2013:66-69.

[5] 张伯明.六十年来我国铸铁材料的发展[J].铸造,2012,61(1):1-10.

[6] 张云,龚文邦,刘欢. ADI 的研究应用前景探讨[J].铸造,2014,63(5):439-443.

[7] 林淑梅,朱定一,杨泽斌,等.高强韧 TWIP 铸铁的形变组织与力学性能[J].铸造,2010,59(12):1267-1270.

[8] 黄芬芬,朱定一,宋卫涛,等. Mn 含量对高强韧 TWIP 球墨铸铁组织和性能的影响[J].铸造,2011,60(9):831-840.

[9] 陈希杰.高锰钢[M].北京:机械工业出版社,1989:98-99.

[10] 陆文华.铸造合金及其熔炼[M].北京:机械工业出版社,2008:73-90.

[11] Grassel O,Kruger L,Frommeyer G,et al. High strength Fe-Mn-(Al,Si)TRIP/TWIP steels development-properties-application[J]. International Journal of Plasticity,2000,16(10/11):1391-1409.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 343 页)

的最大沉降值,增长量在 8.2%~10.1%之间。在实际施工过程中,通过加强支护和优化施工参数等措施来确保施工过程的安全性。

2)盾构掘进对掌子面前方(未开挖部分为前方)土体的影响范围在 20 m 内,对后方(已开挖部分为后方)土体的影响范围在 30 m 内,整体范围约为隧道直径的 6 倍。对后方 30 m 处影响达到最大累计沉降,对前方 20 m 处及之后沉降影响

几乎为 0。且左、右隧道正上方地表的最大沉降值均出现在隧道中间正上方的位置。

3)监测值与计算结果虽存在一定的误差,但整体规律基本一致。验证了数值模拟分析方法在福州地铁一号线(罗汉山站~福州火车站区间)应用的合理性和适用性。在实际工程中可采取数值计算方法对盾构开挖过程中的路基沉降规律进行估算,从而提高施工过程中的可靠性和安全性。

参考文献:

[1] 霍军帅,王炳龙,周华顺.地铁盾构隧道下穿城际铁路地基加固方案安全性分级[J].中国铁道科学,2011,32(5):71-77.

[2] 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.

[3] 肖立,张庆贺.盾构长距离下穿铁路股道引起的地表沉降分析[J].上海交通大学学报,2011,45(5):672-676.

[4] 肖立,张庆贺.铁路轨道下盾构施工所致地面沉降的数值模拟[J].同济大学学报,2011,39(9):1286-1265.

[5] 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,2007,28(2):12-16.

[6] 吴波,高波,索晓明.地铁隧道开挖与失水引起地表沉降的数值分析[J].中国铁道科学,2004,25(4):59-63.

[7] 铁道第一勘察设计院.铁路路基设计规范:TB10001-2005[S].北京:中国铁道出版社,2005.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部.盾构法隧道施工与验收规范:GB50446-2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.

(责任编辑:陈雯)