

# 近距离平行盾构隧道施工引起的 土体沉降位移规律研究<sup>\*</sup>

武铁路

(中铁十六局集团有限公司,101100,北京//高级工程师)

**摘 要** 以广州地铁9号线4标段马莲盾构隧道施工为例,利用Plaxis 3D Tunnel有限元分析软件分析了近距离平行盾构隧道施工引起的地面沉降规律。研究结果表明:右线单线穿越时,地面沉降呈正态分布,水平位移呈“蝶形”分布;双线穿越时,地面沉降呈“W”型分布,水平位移的分布是单个隧道施工产生的水平位移的叠加;随着地层损失率的增加,右线单线穿越时的最大沉降量和沉降范围均不断增大。在右线隧道体积损失率一定时,随着左线隧道体积损失率的增大,沉降槽中线逐渐接近左线隧道的轴线位置,沉降槽最大沉降量出现位置也随之移动。现场监测数据验证了模拟结果的准确性,也说明马莲盾构隧道右线地层损失率为2.5%,左线地层损失率为2.4%。

**关键词** 地铁;盾构隧道;地面沉降规律;数值计算

**中图分类号** TU433

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.01.009

## Study on the Land Subsidence and Displacement Law Caused by the Adjacent Construction of Parallel Shield Tunnel

WU Tielu

**Abstract** With the 4th section of Malian shield tunnel on Guangzhou Metro Line 9 as an example, the land subsidence law caused by the adjacent construction of parallel shield tunnel is analyzed by using Plaxis 3D Tunnel finite element analysis software. The results show that the land subsidence is normally distributed and the horizontal displacement is distributed in a "butterfly pattern" when the right line passes alone; in the case of double lines, the distribution of the land subsidence is in a "W" pattern, the distribution of the horizontal displacement is the superposition of horizontal displacement generated by a single tunnel construction. With the increase of the layer loss rate, the maximum settlement and settlement range are increasing when the right line passes alone. When the layer loss rate of the right tunnel remains still, the central line of settling tank

gradually approaches the axis position of the left tunnel, and the position where the maximum settlement of the settling tank appears will move with the increase of the layer loss rate of the left tunnel. The field monitoring data have verified the accuracy of the simulation results, indicating that the layer loss rate of the right line of Malian shield tunnel is 2.5%, and that of the left line is 2.4%.

**Key words** metro; shield tunnel; land subsidence law; numerical calculation

**Author's address** China Railway 16th Group Co., Ltd., 101100, Beijing, China

## 0 引言

盾构法是建设城市轨道交通的主要方法,但复杂地层施工时,盾构施工容易导致土体发生变形,甚至引起地面塌陷、建筑物倒塌等事故。相比单线盾构隧道,双线平行盾构隧道产生的最大沉降量和沉降槽更大,对地面影响更严重。因此开展近距离平行盾构隧道施工引起的地面沉降规律研究具有重要意义。

国内外很多学者都对盾构隧道引起的地面沉降规律开展了研究。文献[1]在大量观察和实测数据基础上,认为单线盾构掘进形成的地面沉降槽的分布形式为正态分布并提出了相应的计算公式,其后很多人在Peck公式的基础上进行修正。如:文献[2]结合Peck公式和超几何方法,提出了双线平行盾构施工引起地面沉降的计算方法;文献[3]结合Peck公式和单线盾构引起三维土体沉降的计算方法,推导出了双线平行盾构施工引起的三维深层土体沉降计算公式;文献[4]利用改进的Peck公式和数值计算,发现在双孔平行盾构隧道中,隧道间

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41374120);湖南省自然科学基金项目(2018JJ3676);广东交通科技计划项目(201502008)

距越大,沉降曲线特征呈“W”形越明显。这些研究对 Peck 公式的修正扩大了其应用范围,但这些研究多为经验公式,实际上,也有一些专家进行了理论研究。如:文献[5]和文献[6]将随机介质理论分别用于武汉地铁、西安地铁盾构施工引起的地面沉降预测中;文献[7]利用复变函数分析方法得到了隧洞的应力场和位移场的计算公式,并分析了埋深、泊松比对位移场的影响规律;文献[8]利用解析延拓法和 Schwarz 交替法得到了任意形状、任意尺寸的双隧道在任意相对位置下的位移解。除上述方法外,数值模拟法在分析近距离平行盾构隧道施工引起的地面沉降规律时也取得广泛应用。如:文献[9]利用 FLAC3D 数值模拟软件分析了黏性土层条件下双线盾构隧道施工时隧道的断面大小和相对位置对地表沉降特征的影响规律,发现最大沉降量和地表沉降曲线的不对称性随着隧道断面的增大而增大;文献[10]利用 MIDAS/GTS 软件分析了双线盾构隧道主要施工参数对路基沉降的影响规律;文献[11]运用 ANSYS 有限元分析软件分析了注浆和未注浆两种情况下双线盾构隧道施工对既有隧道结构变形的影响规律。另外,文献[12]将神经网络、支持向量机等方法用于盾构隧道施工引起的地面沉降的预测中,并取得了良好的预测效果。

本文以广州地铁 9 号线 4 标段马莲盾构区间为背景,利用 Plaxis 3D Tunnel 有限元对近距离平行盾构隧道施工进行模拟,并结合现场监测分析隧道施工过程中单线开挖和双线开挖地面沉降规律,研究体积损失率对近距离平行盾构隧道施工引起地面沉降的影响规律。

## 1 工程概况

马莲盾构区间为双向平行隧道,区间线路总体

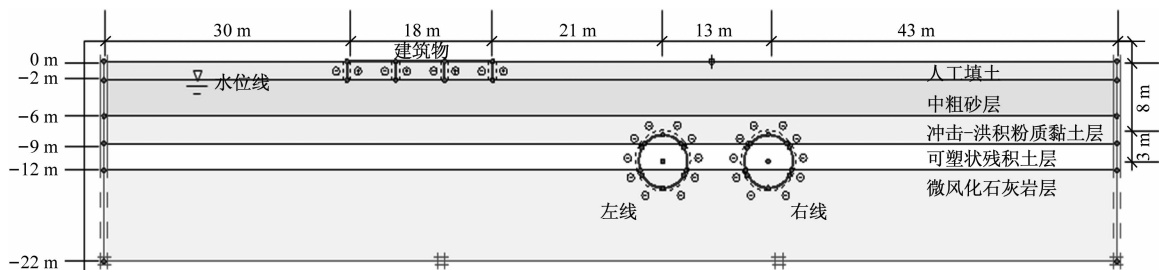


图 1 马莲盾构隧道数值模型剖面图

模拟时采用 Mohr-Coulomb 强度理论,条形基础采用板单元进行模拟,建筑物本身则采用刚性板

呈东西向,穿越花都城区,宏观上处于广花盆地的北部,总地势由北东向西南微倾。从线路穿越的剖面上看,清布一带地势较高(地面高程为 13.0 ~ 14.2 m),其余地段相对较为平坦。线路大部分地段为冲洪积平原。盾构隧道的直径为 6.0 m,内径为 5.4 m;管片宽度为 1.5 m,厚度为 0.3 mm;每环 6 片错缝拼装;盾构隧道上覆土厚度为 10 m,左右线的轴间距为 13 m。在距离左线隧道轴线左侧 21 m 的位置处有一栋建筑。该盾构区间地层主要包括人工填土层( $Q_4^{ml}$ )、冲积-洪积层( $Q_{3+4}^{al+pl}$ )、残积土层( $Q^{el}$ )、岩石风化带。整个线路无崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害现象。沿线路大部地段分布的基岩是石炭系中上统壶天群灰岩或石炭系下统大塘阶石磴子组灰岩,灰岩中溶洞发育,岩溶和地面塌陷是本线路的主要不良地质作用和地质灾害现象。在盾构施工前,对溶洞均已进行填充处理;处理后的检测数据表明,填充后的溶洞具备相当的工程承载能力。

## 2 马莲盾构隧道施工数值模拟分析

### 2.1 马莲盾构隧道数值模型构建

本文利用 Plaxis 3D Tunnel 软件模拟马莲区间盾构隧道施工,模型全长 125 m,高度为 22 m。地层由上至下共划分为 5 层,分别是 2 m 厚的人工填土层、4 m 厚的中粗砂层、3 m 厚的冲击-洪积粉质黏土层、3 m 厚的可塑状残积土层,以及 10 m 厚的下伏基岩微风化石灰岩层。地下水位设置在 -2 m 的深度。建筑物采用条形基础,位于模型纵向中心位置,长度设为 20 m,宽度设为 18 m,基础埋深设为 2 m。左、右线隧道在纵向上延伸 40 m。模型的剖面图和俯视图分别如图 1 和图 2 所示。

来代替,上层建筑物的荷载则用刚性板的自重来替代,隧道的衬砌采用 Plaxis 3D Tunnel 中的隧道单元

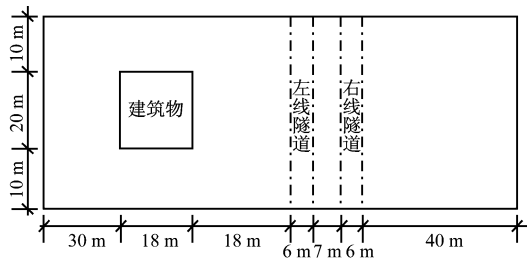


图2 马莲盾构隧道数值模型俯视图

表1 马莲盾构隧道土层力学参数表

土层名称	重度/ ( $\text{kN/m}^3$ )	饱和重度/ ( $\text{kN/m}^3$ )	弹性模量/ ( $\text{MPa}$ )	泊松比	剪胀角	黏聚力/ ( $\text{kPa}$ )	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	界面强度 折减因子
人工填土层	19.9	20.4	3.2	0.42	0	12.00	15.0	
中粗砂层	20.0	20.5	16.0	0.26	0	0.01	30.0	
冲击-洪积粉质黏土层	18.9	19.0	12.0	0.35	0	22.00	22.0	0.5
可塑状残积土层	19.6	19.7	16.0	0.31	0	23.80	25.8	0.3
微风化石灰岩层	27.8	28.0	51.8	0.15	1.8	295.20	31.8	刚性

表2 马莲盾构隧道结构单元参数表

单元名称	轴向刚度/ ( $\text{kN/m}$ )	抗弯刚度/ ( $\text{kN/m}$ )	泊松比	等效厚 度/ $\text{m}$	重度/ ( $\text{kN/m}^3$ )
衬砌	$1.500 \times 10^7$	$1.123 \times 10^5$	0.15	0.3	8.2
建筑物	$1.000 \times 10^{10}$	$1.000 \times 10^{10}$	0		25.0
条形基础	$1.400 \times 10^7$	$1.170 \times 10^6$	0.10	1.0	9.0

通体积损失率为 2.0% 的模型位移图,如图 3 所示。由图 3 可以看出,整个建筑物的基础沉降均在 14.2 mm 左右,左右边缘偏差小于 0.1 mm。由于建筑物使用埋深 2 m 的浅基础,因此对周边土体的影响范围较小,基本在建筑边沿的 6 m 以内,是基础埋深的 3 倍。右线隧道穿越引起的最大地表沉降约为 8 mm,对土体的影响范围约为轴线两旁 23 m 以内,约等同于 2 倍的盾构隧道中心的埋深。中心轴距其 13 m 的邻近尚未开挖左线隧道的轴线位置处的地表沉降变化较小;右线隧道穿越产生的土体水平位移方向上向隧道轴线聚拢,分布上基本是以隧道轴线为中心对称分布,向两边扩散,形状上呈现出“蝶”型。隧道下部是强度较强的微风化石灰岩,因此水平位移最大的位置基本集中在隧道中部边沿的残积土层中。地面的水平位移则随着远离隧道轴线呈现先增大后减小的变化趋势。

2.2.2 双线穿越地面后的位移分布规律

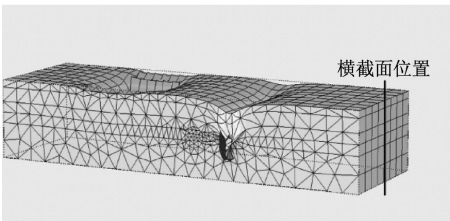
图 4 为双线贯通体积损失率均为 2.5% 时的模型位移图。由图 4 可以看出,双线隧道施工使左右两线隧道的沉降槽互相重合形成了一个新的呈现

进行模拟,土体强度和结构单元的计算参数如表 1 和表 2 所示。计算时,在应力平衡后先激活右线隧道,模拟右线隧道盾构施工,研究右线隧道穿越时土体的变形规律;然后再激活左线隧道,模拟左线隧道盾构施工。

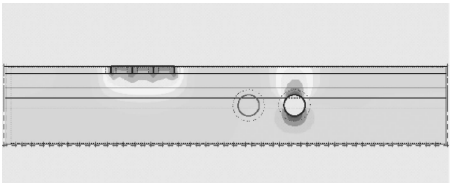
2.2 隧道穿越地面模拟结果分析

2.2.1 右线穿越地面后的位移分布规律

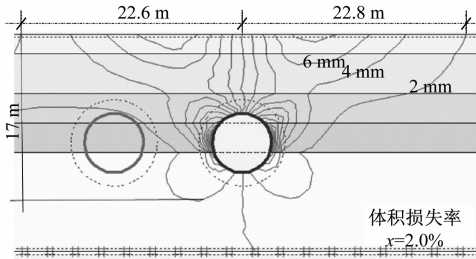
根据马莲盾构隧道数值计算模型,得到右线贯



a) 整体竖向位移



b) 截面竖向位移



c) 截面水平位移

图3 马莲盾构隧道右线贯通后模型位移图  
(体积损失率 2.0%)

“W”型的沉降槽,隧道周边土体的竖向位移基本是以双线隧道中线为中线对称分布,但沉降槽的两个谷底都偏离了左、右线隧道的轴线,而是向中线位置靠拢。双线隧道造成的土体水平位移基本是单个隧道施工产生的“蝶形”分布的土体水平位移的

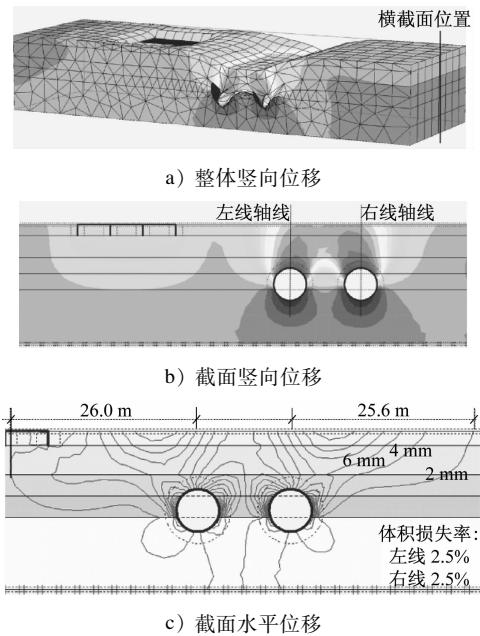


图 4 马莲盾构隧道双线贯通后位移图(体积损失率 2.5%)

叠加。左线隧道由于临近建筑物对土体水平位移的约束,影响区域出现“下探”的现象。此外,土体水平位移的最大值均发生在下伏基岩上方残积土层隧道衬砌周围的土体。

2.3 体积损失率对地面沉降规律的影响

为了模拟真实施工条件下的地层损失,分析地层损失对地面沉降规律的影响,进行了右线隧道体积损失率分别为 1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、3.5%,以及右线隧道的体积损失率为 2.5% 时左线隧道体积损失率分别为 1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、3.5% 的模拟计算,计算结果如表 3 所示。

根据表 3 中数据,得到不同体积损失率情况下地面沉降和地表影响范围的变化规律,如图 5 所示。从图 5 a) 可以看出,右线贯通后,地表沉降以隧道轴线为中心呈正态分布。随着体积损失率增大,正态分布曲线的标准差也随之增大,沉降槽的影响范围增长较缓慢,但中心处的地表沉降发展十分剧

表 3 不同体积损失率下模型计算结果表

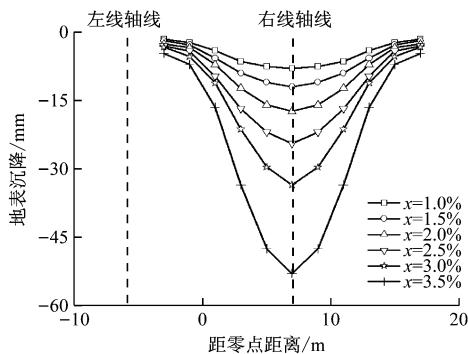
体积损失率/%	右线隧道				双线隧道(右线隧道的体积损失率为 2.5% 时)				
	左侧影响范围距轴线/ m	右侧影响范围距轴线/ m	中心垂直位移/ mm	最大水平位移/ mm	左侧影响范围距左洞轴线/ m	右侧影响范围距右洞轴线/ m	最大水平位移/ mm	左轴中心垂直位移/ mm	右轴中心垂直位移/ mm
1.0	19.0	18.0	-8.0	12.56					
1.5	21.5	21.0	-12.0	19.86	25.8	25.1	29.60	-15.2	-24.5
2.0	22.6	22.8	-17.4	27.04	26.0	25.6	29.87	-19.8	-25.1
2.5	22.8	23.2	-24.5	35.54	26.0	25.6	30.25	-26.5	-27.5
3.0	22.8	23.2	-33.6	40.33	26.2	25.9	30.62	-35.3	-31.2
3.5	22.8	23.2	-53.0	76.97	26.2	25.9	31.43	-40.9	-31.2

烈。从图 5 b) 可以看出,在右线隧道体积损失率一定时,随着左线隧道体积损失率的增大,沉降槽中线逐渐接近左线隧道的轴线位置,沉降槽最大沉降量出现位置也随之移动;当左线隧道的体积损失率与右线隧道的体积损失率相等时,地表沉降基本上对称分布,二者轴线的沉降量也基本相同。从图 5 c) 可以看出,随着体积损失率的增大,右线隧道单独穿越产生的土体水平位移在横向上的影响区域也不断增大,但增长速率不断降低;当体积损失率增长至 2% 以后,影响区域在轴线以右继续延伸到 23 m 左右后开始保持稳定,在轴线以左则受建筑物的限值保持在 21 m 左右。因此可以认为,右线隧道单独施工对土体水平位移的影响区域基本保持在轴线两旁 23 m 的范围以内。对双线隧道施工来说,左线隧道体积损失率的增加对影响范围的扩大影

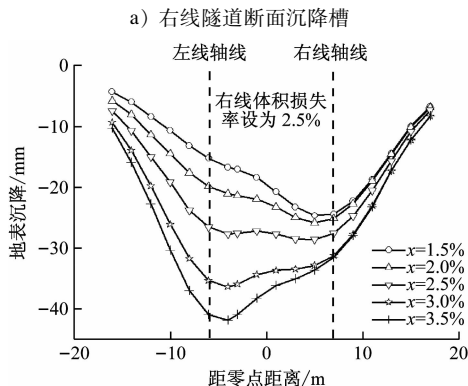
响十分微小,但是其水平位移影响区域相较单线穿越时隧道轴线向两边扩展 23 m 提高到了 26 m 左右。

右线贯通和双线贯通情况下位移随地层损失率的变化规律如图 6 所示。以此进一步分析体积损失率对右线贯通和双线贯通后地面沉降规律的影响。

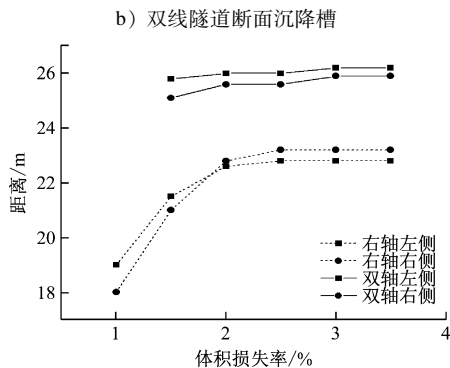
由图 6 可以看出,右线贯通时,体积损失率从 1.0% 每提高 0.5%,沉降槽中心的地表沉降则从 8.0 mm 依次增加了 4.0 mm、5.4 mm、7.1 mm、9.1 mm 以及 19.4 mm。可以发现,随着体积损失率的增大,地表沉降的发展逐渐加速;当体积损失率超过 3.0% 后,地表沉降开始急剧增加。土体的最大水平位移同样随着体积损失率的增加而增加,增加



注:  $x$  为体积损失率



注:  $x$  为左线体积损失率



c) 水平范围

图5 不同体积损失率下右线和双线贯通后地面沉降规律

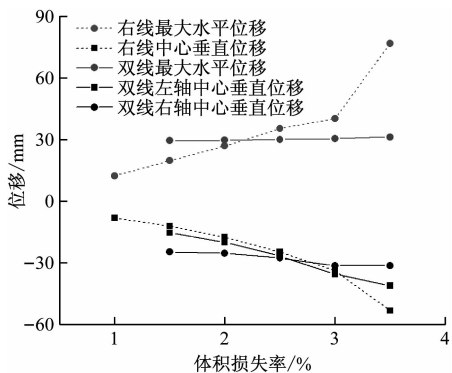


图6 不同体积损失率下右线和双线贯通后位移

速度也逐渐加快;当体积损失率超过 3.0% 后,水平

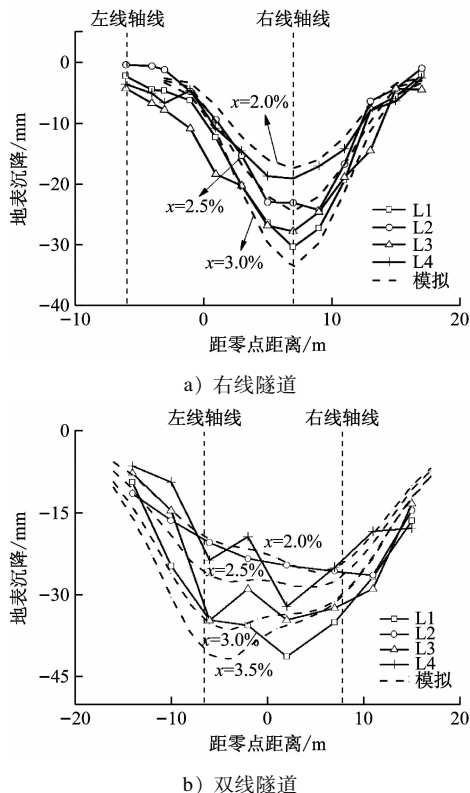
位移发展剧烈。这一规律与土体竖向位移的发展也是相符合的。但对于左线贯通而言,体积损失率的变化对水平位移的影响较小,而且土体的最大水平位移相较右线隧道单线穿越(体积损失率取 2.5%)时产生的 32.54 mm 最大水平位移均有一定程度的减小。

当左线隧道的体积损失率取 1.5%、2.0% 时,左线隧道轴线位置的地表沉降分别是 -15.2 mm、-19.8 mm,相较右线隧道在相同隧道收缩量下单线穿越时的轴线位置沉降量 -12.0 mm、-17.4 mm 有所提高;但右线隧道轴线位置的地表沉降分别为 -24.5 mm、-25.1 mm,与右线隧道在相同隧道收缩量单线穿越时的沉降槽 -24.5 mm 相比变化不大。当左线隧道的体积损失率取 2.5% 时,左线、右线隧道轴线位置地表沉降分别为 -26.5 mm、-27.5 mm,相较左线开挖前右线隧道轴线位置的地表沉降量 -24.5 mm 有少量增加;当左线隧道的体积损失率取 3.0%、3.5% 时,左线隧道轴线位置地表沉降依次增加到 -35.3 mm、-40.9 mm,而右线隧道轴线位置地表沉降增加到 -31.2 mm 后基本保持稳定。

### 3 马莲盾构隧道地面沉降监测数据对比

施工过程中监测了左右两线的盾构推力和位移情况,其中左线、右线平均盾构总推力分别为 8 783.2 kN 和 9 383.3 kN。右线隧道单线穿越和双线穿越后 4 个隧道断面沉降槽的现场监测情况与数值模拟结果对比图如图 7 所示。由图 7 可以看出,右线穿越后 4 个点的地表沉降的监测值基本符合正态分布的规律,轴线位置的沉降量分别是 -30.4 mm、-23.1 mm、-27.8 mm 和 -19.1 mm。现场监测的结果虽然并不能与数值模拟的结果直接等同,但从 4 个点的地表沉降变化综合来看,与体积损失率取 2.5% 时的沉降槽曲线拟合程度最好。双线穿越后,地表沉降虽然并不完全符合理论上的正态分布曲线,但其基本规律还是与理论预测的结果保持一致,如:双线隧道的沉降槽大体上还是符合距离隧道轴线位置越远沉降量较小,右线隧道轴线位置地表沉降量在左线穿越后有少量增加。现场监测结果也表明,双线隧道施工产生的地表沉降槽中,地表沉降最大的位置往往出现在双线隧道轴线的中间区域,而不再是隧道轴线位置处。从沉降槽最大沉降量的发生位置,大致可以判断左线隧道穿

越时发生的地层损失略小于右线隧道,考虑左、右线施工时又具有一定的相似性,左线的体积损失率应该在 2.4% 左右。



注:  $x$  为体积损失率

图7 隧道断面沉降槽实测与模拟结果

## 4 结论

本文以广州地铁9号线4标段马莲盾构隧道施工为工程背景,通过数值计算分析了隧道施工过程中单线开挖和双线开挖地面沉降规律,研究了体积

损失率对近距离平行盾构隧道施工引起地面沉降的影响,并通过现场监测数据验证了数值计算的准确性。

## 参考文献

- [1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]//State of the Art Reports. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: SMFE, 1969:225.
- [2] 马可栓. 盾构施工引起地基移动与近邻建筑保护研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2008.
- [3] 陈春来, 赵城丽, 魏纲, 等. 基于 Peck 公式的双线盾构引起的土体沉降预测[J]. 岩土力学, 2014, 35(8):2212.
- [4] 邱明明, 杨果林, 吴镇清, 等. 双孔平行地铁隧道盾构施工地表沉降分布规律研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2):96.
- [5] 胡斌, 刘永林, 唐辉明, 等. 武汉地铁虎泉—名都区间隧道开挖引起的地表沉降研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5):908.
- [6] 谷拴成, 李敏. 西安地铁盾构施工地表沉降随机介质预测研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(3):110.
- [7] 王立忠, 吕学金. 复变函数分析盾构隧道施工引起的地基变形[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3):319.
- [8] 苏锋, 陈福全, 施有志. 深埋双隧洞开挖的解析延拓法求解[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2):365.
- [9] 糜瑞杰, 杨双锁, 鲍飞翔, 等. 双线盾构隧道断面及相对空间位置对地表沉降的影响[J]. 太原理工大学学报, 2018, 49(3):438.
- [10] 黄文君, 郑明新, 欧阳林, 等. 盾构施工工艺对铁路路基沉降影响的数值分析[J]. 隧道建设, 2015, 35(2):128.
- [11] 詹涛. 双线盾构隧道小净距下穿时既有隧道结构的变形数值分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015(11):23.
- [12] 潘宇平, 倪静, 李林, 等. 基于 LIB-SVM 的盾构隧道地表沉降预测方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3):231.

(收稿日期:2018-09-10)

(上接第37页)

性。在电源条件受限时,通过供电距离和系统容量的优化选取,1路外部电源基本可满足运营需求。景区观光线采用安全滑触线和箱式变电所,在景观协调和空间利用方面有较好的优势。对于没有成熟标准的观光线供电系统设计,建议参考地铁等相似性较高的供电系统设计标准。

## 参考文献

- [1] 刘勇. 烟台中央山地公园观光铁路供电系统方案浅析[J]. 铁道标准设计, 2009(1):101.

- [2] 杜伟, 郑魏婧. 浅谈重庆跨座式单轨车辆车下电气优化[J]. 科技展望, 2014(22):40.
- [3] 连鹏飞. DC 1500 V 接触轨关键技术和选型研究[J]. 电气化铁道, 2016(增刊1):9.
- [4] 王会丰, 江志忠. 城市轨道交通牵引供电制式的比较与选择[J]. 铁道经济研究, 2014(2):43.
- [5] 侯红磊, 黄建霞. 城市轨道交通低压配电系统的设计总结[J]. 电子制作, 2017(增刊1):51.
- [6] 彭宏. 浅析地铁-接触网供电和低压配电、照明系统[J]. 科技视界, 2014(15):230.

(收稿日期:2017-11-22)