

厦门轨道交通 1 号线某区间盾构隧道施工引起的地表变形特征研究^{*}

李东明

(厦门轨道交通集团有限公司, 361008, 厦门//高级工程师)

摘 要 依托厦门轨道交通吕厝站—城市广场站区间盾构隧道工程, 针对典型风化花岗岩地层盾构施工引起地表变形的问题, 采用现场监测数据统计分析结合数值模拟的方法, 开展地表横向、纵向变形规律的研究。结果表明: 厦门典型风化花岗岩地层盾构隧道施工的主要横向影响范围大致为轴线两侧 20 m 内, 沉降槽宽度参数约为 0.55; 纵向影响范围大致分布在刀盘前方 5~10 m 至盾尾后方 20~30 m 的范围内; 此外, 典型风化花岗岩地层盾构施工引起的地表沉降均值约为 -15.0 mm, 地层损失率约为 1.0%。

关键词 城市轨道交通; 盾构隧道施工; 地表变形特征; 现场监测; 风化花岗岩地层

中图分类号 TU433; U455.43

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.10.027

Analysis of Surface Settlement Characteristics Induced by Shield Tunneling in A Section on Xiamen Rail Transit Line 1

LI Dongming

Abstract Based on the shield tunnel project between Lvcuo Station and City Square Station in Xiamen urban rail transit, the surface deformation caused by shield tunneling in typical weathered granite strata is studied by using the field monitoring data analysis and the numerical simulation method, the transverse and longitudinal deformation laws of the surface are analyzed. The results show that the main lateral influence range of shield tunneling in Xiamen metro is approximately 20 m on both sides of the two tunnel axis, and the width parameter of the settlement trough is around 0.55 m. The influence range of longitudinal surface deformation is approximately 5~10 m in front of the shield cutter, and 20~30 m behind the shield tail. In addition, the mean surface settlement caused by shield tunneling in typical weathered granite strata is about -15.0 mm, and the formation loss rate is about 1.0%.

Key words urban rail transit; shield tunneling; surface set-

tlement characteristics; field monitoring; weathered granite strata

Author's address Xiamen Rail Transit Group Co., Ltd., 361008, Xiamen, China

盾构隧道施工引起的地表沉降一直受国内外相关科研工作者的重视, 准确预测地表沉降十分重要。针对这一问题, 文献[1]基于对地表沉降数据和工程资料的系统分析, 提出了地层损失的概念和 Peck 试验公式, 用来估算由隧道开挖引起的地表沉降, 文献[2-3]对 Peck 经验公式进行了修正和补充。文献[4]对英国地铁盾构隧道的现场实测资料进行了系统的分析研究。文献[5]采用随机介质理论, 对盾构隧道施工引起的地表沉降进行分析和预测。数值分析方面, 文献[6]提出一种用于模拟施工条件对地面沉陷影响的三维弹塑性有限元方法。文献[7]结合广州地铁 2 号线盾构隧道施工监测数据, 研究了开挖、地层损失及地下水位变化引起的地表沉降。

岩土工程具有很强的区域特性, 盾构隧道工程亦不例外。本文依托厦门轨道交通 1 号线吕厝站—城市广场站区间(以下简称“吕城盾构区间”)隧道工程, 采用监测数据统计分析结合数值模拟的方法, 开展厦门市典型风化花岗岩地层盾构隧道施工引起的地表变形的研究, 以期厦门市类似盾构隧道工程的设计和施工提供具有参考价值的建议。

1 工程概况

厦门轨道交通 1 号线吕城盾构区间为单洞单线隧道, 左、右线主要穿越地层为残积砂质黏土、残积砾质黏性土, 局部穿越全风化花岗岩。洞顶以上围岩以第四系松散土层和全、残积土为主, 局

^{*} 云南联合基金重点项目(U1402231); 湖北省技术创新重大项目(2017ACA186)

部存在淤泥质土层。其中,干燥状态的残积土颗粒间有较好的结合力,遇水后强度急剧降低,受动水压力作用,易产生突泥和坍塌现象;淤泥质土含水量高、空隙比大、压缩性高、强度低,易发生触变和流变。

吕城盾构区间覆土厚度约 8.54~14.95 m,采用土压平衡式盾构机。盾构机刀盘开挖直径为 6 480 mm,盾构机前体外径为 6 450 mm,后体外径为 6 430 mm,盾体全长 8 650 mm;盾构管片外径 6.2 m,内径 5.5 m,厚度 350 mm,宽度 1.2 m,采用错缝拼装方式。盾构掘进过程中,扭矩、推力、盾构姿态、注浆量、注浆压力等施工参数的设置与地层变形大小密切相关。吕城盾构区间的掘进参数大致如下:上部土压为 110~130 kPa,下部土压约为 160 kPa;刀盘转速约为 1.2 r/min;掘进速度为 20~50 mm/min;总推力为 900~1 300 T;刀盘扭矩为 1 000~2 000 kN·m;出渣量为 45~46 m³;同步注浆压力为 200~300 kPa,注浆量为 4.5~5.5 m³。盾尾空隙包括盾尾壳体厚度、衬砌管片的空隙厚度以及施工因

素导致的土体损失,施工超挖约 20 mm,盾构机型选定后,盾尾空隙大小便可大致确定。

2 地表实测数据分析

基于吕城盾构区间现场实测地表沉降数据,从横向和纵向两个维度分析盾构隧道施工引起的地表沉降规律。

2.1 地表横向变形

图 1、图 2 分别给出了盾构推进过程中,断面 DBC8、DBC10 上 10 个监测点连成的横向沉降槽曲线(地表位移中,正值为隆起,负值为沉降)。监测时间主要为盾构通过及盾尾脱出阶段,该过程的地表沉降变化趋势最为明显。从图 1 中可知,随着盾构的推进,地表呈现明显的沉降槽,先行隧道施工引起的地表沉降近似关于隧道轴线对称,且隧道轴线正上方的地表沉降最大,影响范围离轴线为 15~20 m;后行隧道施工会对地层产生二次扰动,监测点的沉降值也将增大,其沉降量可由最终沉降扣除先行隧道引起的变形量求得。

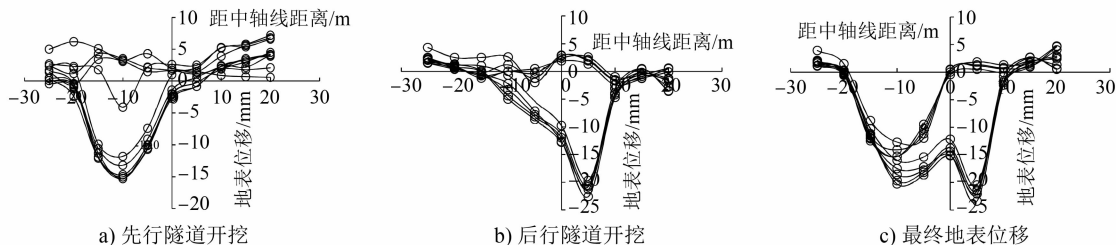


图 1 吕城盾构区间 DBC8 监测断面地表横向沉降槽

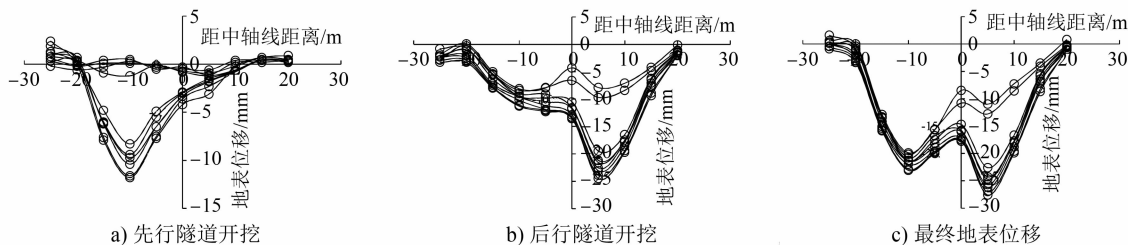


图 2 吕城盾构区间 DBC10 监测断面地表横向沉降槽

采用 Peck 经验公式分析单线、双线共同影响下的地表沉降变形。图 3、图 4 分别为断面 DBC8、DBC10 地表沉降的拟合结果。分析最终沉降变形时,将双线隧道等效为大洞径的单线隧道,以粗略估计施工引起的最终地层损失率。由图 3 可知,单线沉降曲线的拟合效果更好。表 1 给出了高斯拟合曲线的各拟合参数。由表 1 可知,断面 DBC8、DBC10 位置处的最大地表沉降值分别为 21.7 mm、24.7 mm;单

线施工引起的沉降槽宽度系数为 5.5~6.5 m,沉降槽宽度参数为 0.50~0.55;最终地层损失率约 1.0%。

此外,对比 DBC8、DBC10 两个监测断面的沉降变形发现,先行隧道施工在两断面处,引起的地表变形大致相同;后行隧道施工时,DBC10 断面的沉降变形明显大于 DBC8 监测断面。这主要是后行隧道在 DBC10 断面位置,穿越残积土、全强风化花岗岩的上软下硬复合地层,施工扰动更显著。

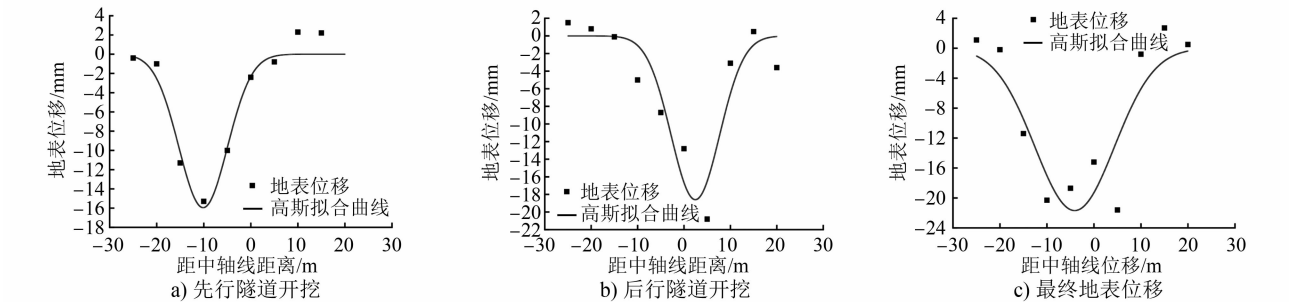


图 3 吕城盾构区间 DBC8 监测断面地表位移高斯拟合曲线

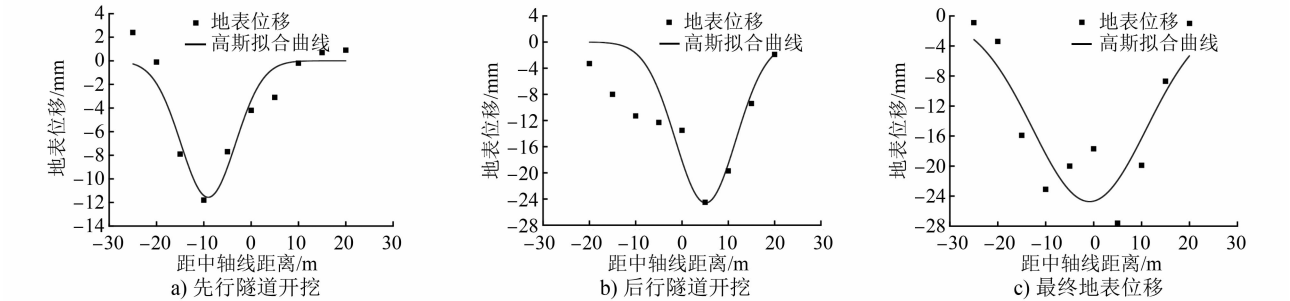


图 4 吕城盾构区间 DBC10 监测断面地表位移高斯拟合曲线

表 1 DBC8、DBC10 监测断面高斯拟合参数表

施工步骤	断面面积/m ²	最大沉降值/mm		沉降槽宽度系数/m		沉降槽宽度参数		地层损失率/%	
		DBC8	DBC10	DBC8	DBC10	DBC8	DBC10	DBC8	DBC10
先行	30.2	15.95	11.56	5.16	5.77	0.49	0.52	0.68	0.55
后行	30.2	18.60	24.60	5.23	6.55	0.50	0.58	0.81	1.34
整体	60.4	21.68	24.73					0.76	1.22

2.2 地表纵向变形

图 5、图 6 分别为盾构推进过程中,各断面监测点地表沉降随盾构推进过程的变化情况,其中 04[#]、07[#]为先行隧道和后行隧道正上方的测点。由图 5 可知,各监测点地表沉降的变化趋势大致遵循:当掌子面距离监测断面约 10~20 m 时,地表出现少量隆起;随着掌子面与断面位置距离的减小,地表变形由隆起变为沉降,当距离隧道 5~10 m 时,沉降变形开始显著;盾构通过和盾尾脱出阶段

的沉降量最大,这两个阶段的沉降变形达到总沉降量的 75%~80%。因此,盾构通过和盾尾脱出阶段应加强对地表变形的监测。当掌子面离开监测断面约 20~30 m 时,测点受盾构推进的影响大大削弱。图 6 为后行隧道施工过程中,地表测点沉降的变化情况。由图 6 可知,后行隧道轴线上方 07[#]测点及其附近的地表测点受施工影响较显著,其沉降规律与先行隧道施工的变化规律大致相同。

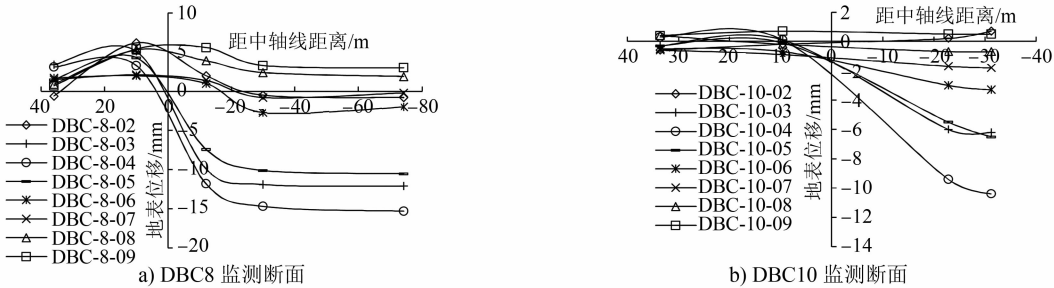


图 5 吕城盾构区间各监测断面地表纵向位移曲线(先行隧道开挖)

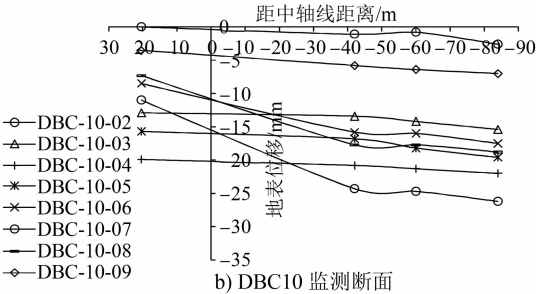
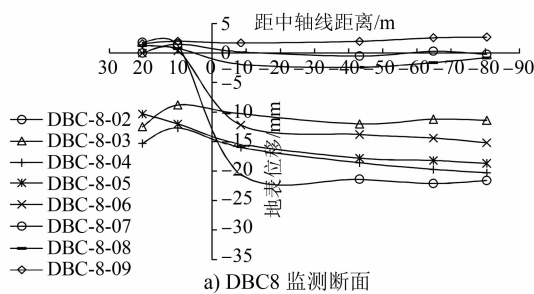


图6 吕城盾构区间各监测断面最终地表纵向位移曲线

2.3 地表沉降数据统计

以吕城盾构区间 57 个监测断面的 218 个测点作为样本,每个监测断面仅提取最大值作为断面最大沉降表征值,继而进行筛选统计并绘制成分布直方图,如图 7 所示。表 2 为地表最大沉降分布的统计特征。由图 7 和表 2 可知,该区间最大沉降值为 2.00~51.00 mm,沉降均值约为 19.41 mm,标准差为 12.46 mm,其中超过 49.00 mm 的数据占总样本的 95%左右。

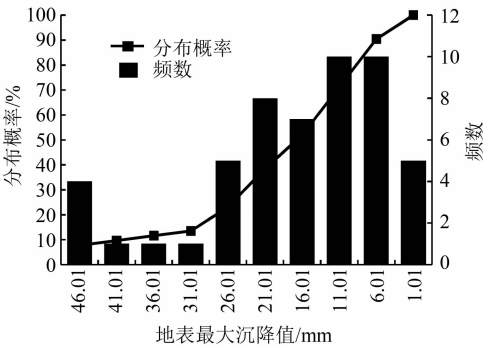


图7 吕城盾构区间地表最大沉降值分布图

表2 吕城盾构区间地表最大沉降分析统计表

测点 数	最小沉降 值/mm	最大沉降 值/mm	沉降量 均值/mm	标准 差/mm	变异 系数	95%分 位数/mm
52	2.00	51.00	19.41	12.46	0.64	48.97

此外,图 8 给出了厦门轨道交通 1 号线 11 个典型风化花岗岩地层盾构区间地表最大沉降的分布情况。统计样本包括吕厝站—城市广场站、将军祠站—文灶站、莲坂站—莲花路口站、集美中心站—诚毅广场站、软件园站—集美大道站等 11 个区间。结合表 3 可知,典型风化花岗岩地层的地表最大位移值多介于-43.4 mm 和 3.3 mm 之间,均值约为 -13.5 mm,标准差为 12.46 mm,监测数据的 95%分位数值约为-32.42 mm。综合可知,吕城盾构区间地表最大位移的分布情况与典型风化花岗岩地层大致相同。

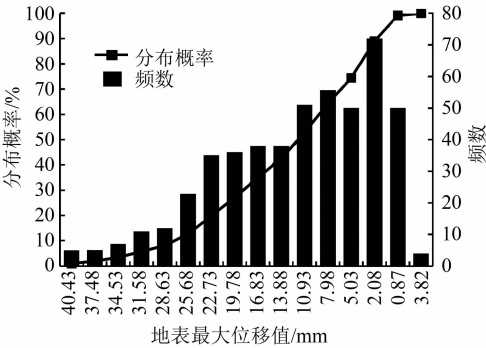


图8 厦门市轨道交通 1 号线风化花岗岩地层区间地表最大位移分布

表3 1 号线风化花岗岩地层区间地表最大位移分析统计表

测点 数	最大隆起 值/mm	最大沉降 值/mm	沉降量 均值/mm	标准 差/mm	变异 系数	95%分 位数/mm
493	3.26	43.38	13.50	10.05	0.74	32.42

3 数值模拟分析

为进一步探讨厦门典型风化花岗岩地层盾构隧道施工引起的地表变形机理,运用 FLAC 3D 开展盾构隧道施工过程的二维、三维模拟分析,研究盾构隧道施工过程中,地表横向和纵向的变形规律,揭示施工工序与地层变形的动态关系以及地表沉降值的时效特征,为工程施工提供参考价值。

3.1 数值模型及参数

选取厦门典型风化花岗岩地层,开展双线盾构隧道二维、三维建模分析,两隧洞先后开挖。二维模型中,后行隧洞待先行隧洞开挖完成且沉降稳定后再施工;三维模型中,后行隧洞掌子面滞后先行隧洞 36 m。模型尺寸为 80 m×33 m(宽度×高度),三维模型隧道轴线方向长 96 m,盾构隧道直径 D 为 6.2 m,隧道轴线埋深 H 为 12 m,隧道间距取 9.0 m。除地表为自由边界外,其他边界均施加法向约束。采用 shell 单元模拟隧道衬砌结构,模型中土体和衬砌结构材料的物理力学参数如表 4 所示。

表 4 模型中各地层和材料物理力学参数

名称	密度/(g/cm ³)	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
填土	1.80	18.0	0.38	12	20
淤泥质土	1.78	12.0	0.40	10	12
粉土	1.87	30.0	0.35	18	25
残积土	1.85	35.0	0.34	23	25
全风化花岗岩	1.90	65.0	0.30	25	26
散体状强风化花岗岩	1.95	85.0	0.25	26	27
管片	2.45	2.1×10 ⁴	0.20		
盾构机外壳	7.00	2.05×10 ⁵	0.20		
等代层(注浆/硬化)	2.20	0.30×10 ² /4.0×10 ²	0.40/0.25		
等代层(超挖)	1.70	0.01	0.40		

二维模型采用应力释放法模拟盾构隧道的开挖、支护过程,应力释放系数取 0.65。三维模型中,盾构机长度取 8.4 m,盾构施工一步推进一个管片环宽,即推进 1.2 m。为减小边界效应的影响,盾构机的起始推进位置 $x=14.4$ m 处。

3.2 数值计算结果分析

3.2.1 地表横向变形

表 5 给出了不同施工步序下,地表沉降 Peck 公式的拟合参数,其中后行隧道开挖引起的变形由最终变形量扣除先行隧道引起的变形量所得。由表 5 可知,单线沉降槽宽度系数约 6.0~6.5 m,地层损失率约为 1.0%,该地层下沉降槽宽度参数基本保持在 0.55 左右。对比表 1 可知,数值分析所得横向地表的变形规律与现场监测情况大致相同。

表 5 地表沉降 Peck 公式的拟合参数表

施工步序	最大沉降值/mm	沉降槽宽度系数/m	沉降槽宽度参数	地层损失率/%
施工右洞	20.88	6.32	0.53	1.10
施工左洞	20.43	6.55	0.54	1.11
双洞贯通	24.31			1.20

图 9 给出了三维计算模型中, $x=36$ m 位置处地表沉降槽形状随盾构推进过程的变化情况。由图 9 可知,先行隧道开挖时,地表位移关于隧道轴线对称,当盾构推进 18 步($x=36$ m)处时,地表开始出现少量沉降,此前略微存在隆起的趋势,沉降变形主要发生在 18 步至 34 步($x=36\sim 55$ m);后行隧道推进至 $x=$

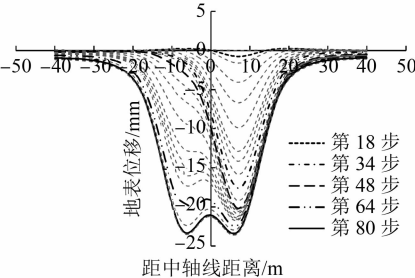
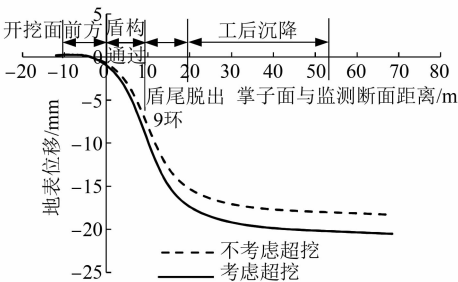


图 9 地表位移横向沉降槽随施工步变化图

36 m 处(第 48 步)时,先行隧道上方地表测点发生二次沉降,对于后行隧道,其变形显著的时间跨度也大致为 16 步,且该阶段先行隧道所受影响也较大;当隧道推至 80 步时,两隧洞地表变形基本稳定,此时记录位置距离掌子面约 40~50 m。此外,盾构区间施工的横向主要影响区域 $x=-20\sim 20$ m。

3.2.2 地表纵向变形

为更准确地得出盾构推进的轴向影响范围,绘制地表测点沉降随盾构推进的变化过程,如图 10 所示。从图 10 可知,地表沉降整体呈隆起-沉降-稳定的规律,影响范围大约为掌子面前方 8~10 m,后方 15~20 m,沉降主要发生在盾构通过和盾尾脱出这两个阶段。另外,建立不考虑超挖的数值模型并进行对比分析,研究超挖对最大地表沉降值的影响,结果表明超挖对地表沉降变形的发展规律无影响,主要影响沉降量的大小。



注: 图中盾构通过引起的地表位移占比为30%;
盾尾脱出引起的地表位移占比为50%;
工后沉降引起的地表位移占比为16%

图 10 地表位移随盾构推进变化图

4 结语

本文依托厦门轨道交通 1 号线吕城盾构区间隧道工程,采用现场监测数据分析和数值模拟相结合的方法,开展盾构施工地表变形特征的分析研究,主要结论如下:

1) 厦门轨道交通盾构隧道单线施工引起的地表沉降变形基本符合 Peck 经验预测公式;双线隧道先后开挖,两轴线间的地层存在明显的叠加效应。

2) 数值模拟所得沉降曲线的特征及规律基本符合工程现场的实际监测情况,表明数值分析能较好地模拟隧道施工引起的地层位移场和应力场的变化,因此运用 FLAC 3D 来预测城市轨道交通盾构隧道施工引起的地表沉降具有较高的可信度。

3) 厦门市风化花岗岩地层盾构隧道施工引起的地表变形规律主要表现为以下特征:①横向地表沉降的主要分布范围 $x = -20 \sim 20$ m,最大沉降发生位置并不在隧道轴线正上方而是位于两隧道之间;②纵向地表变形呈隆起-沉降-稳定的规律,影响范围大致分布在刀盘前方 5~10 m 至盾尾后方 20~30 m 的范围内。

4) 厦门轨道交通典型风化花岗岩地层盾构隧道施工引起的地表沉降均值约为 15.0 mm,沉降槽宽度约 5.5~6.5 m,沉降槽宽度参数基本保持在 0.55 左右,地层损失率约为 1.0%。

参考文献

- [1] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, A. C., 1969: 225-290.
- [2] 刘建航,侯学渊. 盾构法隧道 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [3] ATTEWELL P B. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil [J]. Ground Engineering, 1982, 15(8): 13.
- [4] 韩焯, 李宁. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析 [J]. 岩土力学, 2007(1): 23.
- [5] 阳军生, 刘宝琛. 挤压式盾构隧道施工引起的地表移动及变形 [J]. 岩土力学, 1998(3): 10.
- [6] LEE K M, ROWE R K. Finite element modelling of the three-dimensional ground deformations due to tunnelling in soft cohesive soils: Part I—Method of analysis [J]. Computers & Geotechnics, 1990, 10(2): 87.
- [7] 刘招伟, 王梦恕, 董新平. 地铁隧道盾构法施工引起的地表沉降分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003(8): 1297.

(收稿日期: 2018-12-18)

(上接第 108 页)

因素与风险概率呈正相关关系,即 4 因素耦合风险>3 因素耦合风险>双因素耦合风险;从局部上看,部分双因素耦合风险高于 3 因素耦合风险,如人为-设备耦合风险>设备-自然-管理耦合风险,可以看出人为因素是影响地铁运营安全的重要因素。通过研究,得到影响城市轨道交通运营安全风险的 4 种因素及其不同耦合方式,为决策者提供了一种评估城市轨道交通运营风险的方法,并为管理决策的制定提供依据。

参考文献

- [1] 黄宏伟,叶永峰,胡群芳. 地铁运营安全风险现状分析 [J]. 中国安全科学学报, 2008(7): 55.
- [2] 张明锐,于猛,蒲琪. 城市轨道交通运营安全评价体系研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2018(11): 1.
- [3] 曾笑雨,刘苏,张奇. 基于事故统计分析的城市轨道交通运营安全和可靠性研究 [J]. 安全与环境工程, 2012(1): 90.
- [4] 肖雪梅,王艳辉,贾利民. 基于复杂网络和熵的城轨路网运营

安全评价模型 [J]. 中国安全科学学报, 2011(11): 41.

- [5] SHVETSOV A V, SHVETSOVA S V. Research of a problem of terrorist attacks in the metro (Subway, U-Bahn, Underground, MRT, Rapid Transit, Metrorail) [J]. European Journal for Security Research, 2017, 2(2): 131.
- [6] ISOZAKI H, OOSAWA J, KAWANO Y, et al. Measures against electrolytic rail corrosion in Tokyo metro subway tunnels [J]. Procedia Engineering, 2016, 165: 583.
- [7] 黄金川,方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析 [J]. 地理研究, 2003(2): 211.
- [8] 薛晔,刘耀龙,张涛涛. 耦合灾害风险的形成机理研究 [J]. 自然灾害学报, 2013(2): 44.
- [9] 刘耀彬,李仁东,宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析 [J]. 自然资源学报, 2005(1): 105.
- [10] 吴贤国,吴克宝,沈梅芳,等. 基于 N-K 模型的地铁施工安全风险耦合研究 [J]. 中国安全科学学报, 2016(4): 96.
- [11] 李敬强,李康,王蓓,等. 基于 N-K 模型的机务维修安全风险耦合分析 [J]. 数学的实践与认识, 2018(14): 178.

(收稿日期: 2018-12-24)

《城市轨道交通研究》欢迎投稿

投稿网址: tougao.umat1998.com