

# 复合交互地层地铁盾构施工参数引起的地面变形分析

崔小普<sup>1</sup> 王亚辉<sup>2</sup> 时泽龙<sup>3</sup>

(1. 北京工业大学城市建设学部, 100124, 北京; 2. 深圳市建设综合勘察设计院有限公司, 518108, 深圳;

3. 湖南联智科技股份有限公司, 410200, 长沙//第一作者, 博士研究生)

**摘要** 地铁盾构施工参数间的相互关系,对地面变形存在不同程度的影响。以天津某地铁盾构区间复合交互地层作为研究对象,采用 SAS 软件对盾构施工参数间的相关性进行分析。运用灰色关联理论计算引起地面变形的盾构施工参数相关性系数,并与现场地面沉降结果进行对比验证。结果表明:土舱压力与千斤顶推力的相关性最高,其相关性系数达到 0.872;从粉质黏土地层到复合交互地层,千斤顶推力平均值变化最大,增加了 63.1%;地面变形实测相关性系数与灰色关联系数较为接近。地铁盾构施工参数的调整可降低施工对地面变形的影响。

**关键词** 地铁;盾构施工参数;地面变形;复合交互地层

**中图分类号** TU433

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.06.016

100124, Beijing, China

盾构法施工会引起地面沉降,严重时会对邻近建筑物造成巨大损害。国内外学者对盾构施工参数引起地面变形进行了大量研究。文献[1]针对上海软土进行了模型试验,考虑刀盘扭矩、千斤顶推力等施工参数的影响,探究盾构机对特定地层的适应性。文献[2]基于 Mindlin 解,提出三维地面变形公式,并考虑了附加推力、摩擦力对地面变形的影响。文献[3]指出土舱压力设置过大将引起地面隆起变形。文献[4]研究了施工参数间的相互关系,得出施工参数对地面变形的影响。文献[5]针对天津软土建立三维盾构有限元模型,指出施工参数间存在相互关系,并对施工参数敏感性进行了分析。

盾构掘进参数间存在相互关系,并对地面变形影响程度不一,应充分分析各个参数的影响程度达到减小变形的效果。灰色关联理论对多个参数小样本具有较强的分析预测能力,在工程施工中应用广泛。文献[6]对施工参数进行了相关性分析,通过建立神经网络对地面沉降进行预测。文献[7]采用灰色关联理论探究了施工参数影响巷道破坏的显著性排序。文献[8]研究了施工参数对地面沉降的影响,并运用灰色关联理论对地面沉降进行预测。本文以天津某盾构区间复合交互地层为例,对施工参数进行统计分析,从而明确施工参数间的相互关系。通过灰色关联理论预测施工参数对地面变形的影响程度,并将其与实测数据进行验证,从而达到调节施工参数、降低地面沉降的效果。

## 1 工程概况

### 1.1 工程地质条件

某盾构隧道区间总长 722.163 m,顶部覆土厚度约为 9.76 ~ 17.6 m,隧道底部埋深为 17.25 ~ 29.15 m(相当于标高 -14.32 ~ -26.03 m)。某盾构隧道区间地质剖面如图 1 所示。

## Analysis of Ground Deformation Caused by Metro Shield Construction Parameters in Composite Interacting Stratum

CUI Xiaopu, WANG Yahui, SHI Zelong

**Abstract** The correlation among metro shield construction parameters affects ground deformation to various degrees. Taking the composite interacting stratum of a shield interval of Tianjin Metro as research object, the correlation among shield construction parameters is analyzed using SAS software. GRA (grey relation analysis) is employed to calculate the correlation coefficient of shield construction parameters that cause ground deformation, and the results are compared with the actual land subsidence for verification. The results show that the correlation between the earth chamber pressure and the jack thrust is the highest, the coefficient of which reaches 0.872; from silty clay stratum to composite interacting stratum, the average jack thrust increases by 63.1%; the field-measured correlation coefficient of ground deformation is close to the GRA coefficient. The adjustment of metro shield construction parameters can reduce the influence of construction on ground deformation.

**Key words** metro; shield construction parameter; ground deformation; composite interacting stratum

**First-author's address** Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology,



表 2 盾构施工参数及地面最终沉降变化范围

Tab.2 Shield construction parameters and land final subsidence variation range

项目		取值
盾构 施工 参数	千斤顶推力/kN	5 150 ~ 16 500
	刀盘扭矩/(kNm)	600 ~ 2 450
	施工速度/(mm/min)	19 ~ 45
	土舱压力/kPa	100 ~ 248
	注浆压力/kPa	100 ~ 530
	注浆量/m <sup>3</sup>	3.0 ~ 6.9
出土量/m <sup>3</sup>		40 ~ 55
地面最终沉降/mm		6.590 0 ~ 18.089 2

显,注浆量变化较小;盾构掘进速度整体表现为下降趋势,掘进速度减小时地面沉降也有所下降;随

表 3 盾构施工参数间相关性系数汇总

Tab.3 Summary of correlation coefficient among shield construction parameters

名称	相关性系数						
	千斤顶推力	刀盘扭矩	施工速度	土舱压力	注浆压力	注浆量	出土量
千斤顶推力	1.000	0.314	-0.456	0.872	0.731	0.580	0.100
刀盘扭矩	0.314	1.000	-0.190	0.220	0.132	0.097	0.001
施工速度	-0.456	-0.190	1.000	-0.486	-0.307	-0.478	-0.264
土舱压力	0.872	0.220	-0.486	1.000	0.784	0.736	0.165
注浆压力	0.731	0.132	-0.307	0.784	1.000	0.642	-0.065
注浆量	0.580	0.097	-0.478	0.736	0.642	1.000	0.164
出土量	0.100	0.001	-0.264	0.165	-0.065	0.164	1.000

2.2 盾构施工参数相关性分析

对相关性较好的施工参数进行同坐标对比,见图 3—图 5。首先基于施工参数的变化范围获得施工参数之间的相关性,接着对粉质黏土地层到复合交互地层盾构施工参数之间的相关性进行分析。

图 3 为千斤顶推力与掘进速度的相关性曲线。由图 3 可见:同一地层和隧道埋深时,千斤顶推力与掘进速度呈正比关系;千斤顶推力保持定值时,掘进速度最大变化值约 16%;从粉质黏土地层到复合交互地层,千斤顶推力的平均值增加了 63.1%;粉质黏土地层的千斤顶推力标准差为 5 150 kN,复合交互地层的千斤顶推力标准差为 10 500 kN,可见两种地层千斤顶推力标准差差异较大;复合交互地层中千斤顶推力分布较广泛。

图 4 为千斤顶推力与土舱压力相关性曲线。由图 4 可见:当千斤顶推力不变时,土舱压力最大的变化范围约 47.9%。盾构机施工前方会形成扰动变

着埋深的增加千斤顶推力呈现增长趋势。

2 盾构施工参数间相关性计算与分析

2.1 盾构施工参数间相关性系数计算

盾构施工过程中地面变形是由多个施工参数引起的,为了解各个因素间的相互影响,采用 SAS 软件对施工参数间的相互关系进行计算。盾构施工参数间的相关系数详见表 3。由表 3 可知:土舱压力与千斤顶推力的相关性系数最高,为 0.872;土舱压力与注浆压力和注浆量的相关性系数分别为 0.784 和 0.736;注浆压力与千斤顶推力和注浆量的相关性系数分别为 0.731 和 0.642;注浆量与千斤顶推力的相关性系数为 0.580;刀盘扭矩、出土量与其他参数的相关性较弱。

形区,推力过大而土舱压力较小时会引起上部地层隆起,继而引起更大的地面沉降;如果千斤顶推力和土舱压力小于施工地层的荷载时,施工区域将卸荷,土体呈现出明显的松动状态,将会造成地面沉降。由图 4 还可得到:从粉质黏土到复合交互地层,土舱压力的平均值增加 46.5%;黏土地层和复合交互地层的千斤顶推力标准差分别为 5 150 kN 和 10 500 kN,可见两种地层千斤顶推力标准差分布差异较大。

图 5 为土舱压力与注浆量相关性曲线。由图 5 可见:土舱压力数值保持定值时,注浆量约为 38.8%;土舱压力增加时,粉质黏土地层注浆量有所增加,复合交互地层注浆量则基本保持不变;从粉质黏土地层到复合交互地层,注浆量平均值增加了 12.6%;粉质黏土地层的注浆量标准差为 3.5 m<sup>3</sup>,复合交互地层的注浆量标准差为 2.2 m<sup>3</sup>,可见两种地层注浆量标准差分布差异较小。

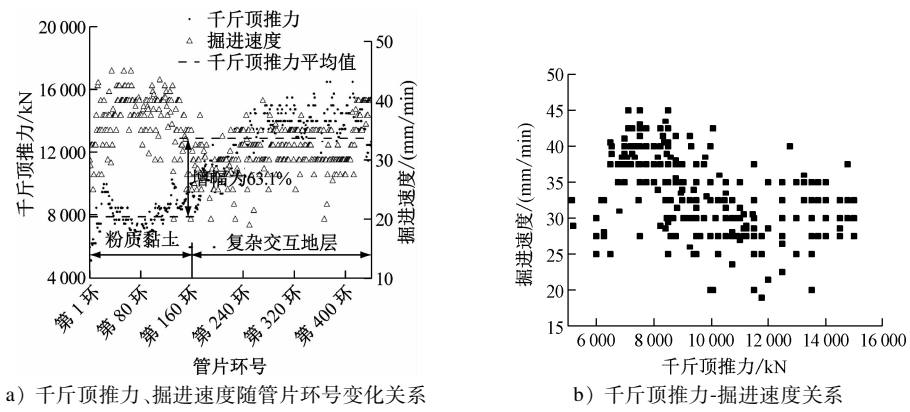


图3 千斤顶推力与掘进速度相关性曲线

Fig. 3 Correlation curve of jack thrust and tunneling speed

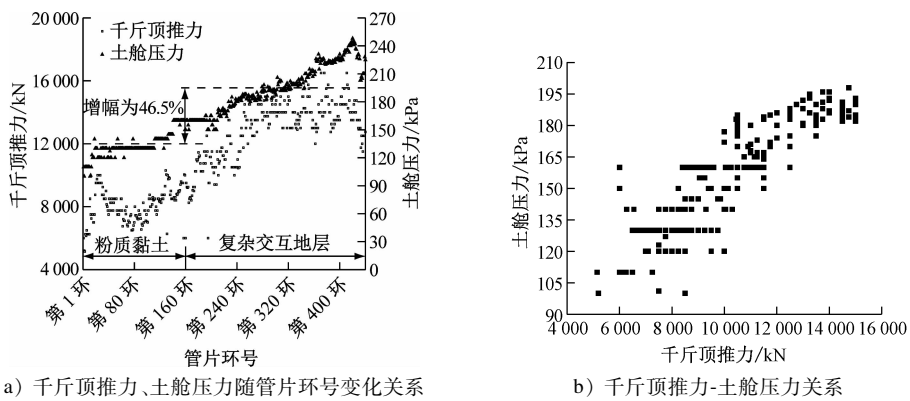


图4 千斤顶推力与土舱压力相关性曲线

Fig. 4 Correlation curve of jack thrust and soil chamber pressure

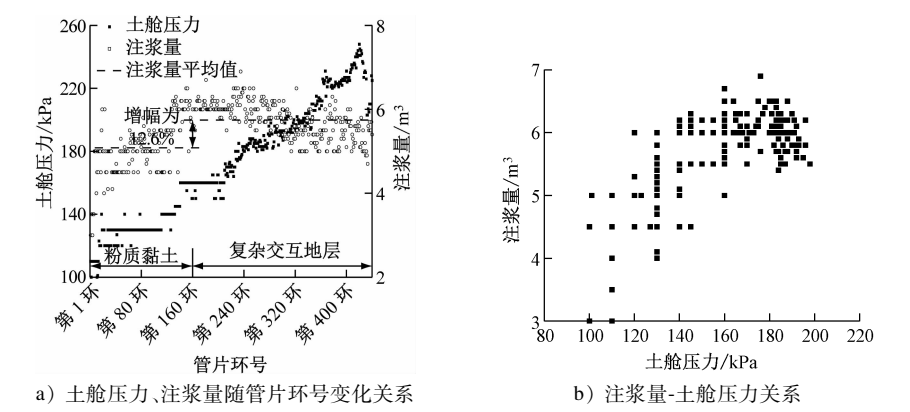


图5 土舱压力与注浆量相关性曲线

Fig. 5 Correlation curve of soil chamber pressure and grouting volume

### 3 盾构施工参数与地面变形量相关性分析

#### 3.1 灰色关联理论

灰色关联理论是通过影响因素进行相关关联计算,获得影响因素对所研究内容的影响程度。选取该区间左线隧道5个断面的地面沉降作为参考项,与各断面所对应的盾构施工参数形成矩阵进行

对比。对各盾构施工参数进行量纲一计算,在此基础上计算参考项与盾构施工参数差值的绝对值,进而获得灰色关联系数。分辨系数一般取0.5。最终的灰色关联系数结果见表4。

#### 3.2 地面变形实测相关性系数与灰色关联系数对比

为了使研究具有一般性,选取右线第50环—第

表 4 地面变形灰色关联系数与实测相关性系数对比  
Tab. 4 Comparison of ground deformation GRA coefficient and field-measured correlation coefficient

盾构施工参数	灰色关联系数	实测相关性系数		
		左线	右线	中值
出土量	0.845	0.896	0.894	0.895
注浆量	0.828	0.809	0.819	0.814
刀盘扭矩	0.818	0.804	0.788	0.793
施工速度	0.817	0.796	0.730	0.796
千斤顶推力	0.791	0.726	0.75	0.738
注浆压力	0.767	0.709	0.693	0.701
土舱压力	0.747	0.676	0.720	0.698

140 环、左线第 10 环—第 200 环的地面变形进行计算。盾构施工参数对地面变形的影响相关性见表 4。选取相关性系数较高的施工参数对地面变形量进行拟合,其结果见图 6。由表 4 可以发现:出土量对地面变形的影响程度最大;盾构掘进过程中由于刀盘直径大于隧道直径会引起超挖现象,且隧道转弯时超挖现象更甚。由图 6 可见:出土量减小时,地面日变形量也相应减小,应避免超挖;注浆量与地

面变形的增长趋势呈负相关,可见,注浆量适当增加时,可有效减小地面变形;施工速度过大时将引起地面沉降量增大,因此可在不影响施工进度的前提下适当减小盾构施工速度,从而有效减小地面沉降;刀盘扭矩与地面变形量显现出正相关,可见适当增加刀盘扭矩使得盾构施工线路不偏离设计轴线,从而减小盾构姿态纠偏引起的地面沉降。

图 7 为地面变形实测相关性系数与灰色关联理论预测值对比曲线。表 4 显示出 7 个盾构施工参数对地面变形的影响程度基本一致,其变化体现在刀盘扭矩和施工速度的排序对调,两者与地面变形的关联性都比较显著且数值接近;注浆压力的实测相关性系数为 0.701,灰色关联系数为 0.767,两者误差最大,其值为 9.42%,且所有盾构施工参数中两者的平均误差为 5.82%。可见,采用灰色关联理论预测各盾构施工参数对地面变形的影响是可信的,可将其应用到复合交互地层施工环境中。

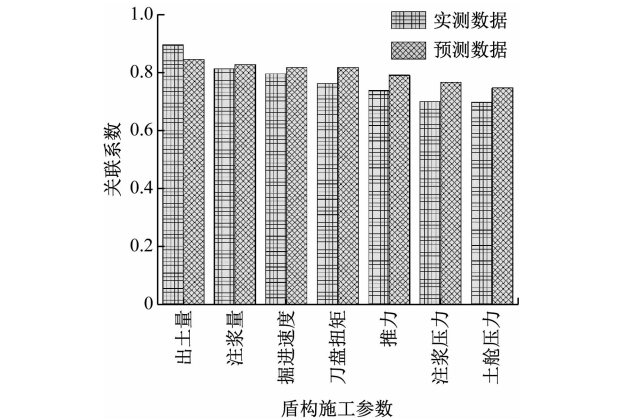


图 7 地面变形实测相关性系数与灰色关联系数随施工参数变化曲线

Fig. 7 Curves of ground deformation field-measured correlation coefficient and GRA coefficient changing with construction parameters

## 4 结论

1) 土舱压力与千斤顶推力、注浆压力相关性最高,分别达到 0.872 和 0.784,刀盘扭矩和出土量与其他参数呈现出较弱的相关性,相互影响效果不明显。

2) 千斤顶推力与土舱压力相互影响最显著。千斤顶推力保持定值时,土舱压力起伏范围最大为 47.9%;从粉质黏土地层到复合交互地层,千斤顶顶进推力均值变化最大,增加了 63.1%;千斤顶推力、

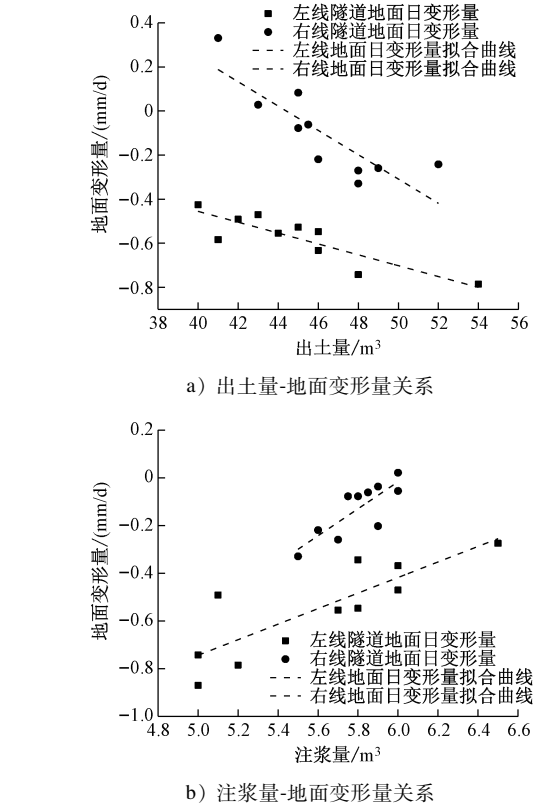


图 6 盾构施工参数与地面变形相关性曲线  
Fig. 6 Correlation curve of shield construction parameters and ground deformation

土舱压力及刀盘扭矩的标准差分布差异较大。

3) 出土量对地面变形影响最大,灰色关联系数达到0.845;将灰色关联理论获得的结果与施工实测数据进行对比,发现两者对地面变形的影响程度基本一致;注浆压力的灰色关联系数和实测相关性系数的误差最大(其值为9.42%),注浆量两者的误差最小(其值为1.72%),平均误差为5.82%,可见灰色关联理论的预测值是可信的。地面变形较大时,应优先调节影响地面变形较大的施工参数,并考虑各参数的相关性。

## 参考文献

- [1] 朱合华,徐前卫,傅德明,等. 地层适应性盾构模型试验设计方法初探[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1437.  
ZHU Hehua, XU Qianwei, FU Deming, et al. Study on design principle of shield machine applicable to different strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1437.
- [2] 魏纲,徐日庆. 软土隧道盾构法施工引起的纵向地面变形预测[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1077.  
WEI Gang, XU Riqing. Prediction of longitudinal ground deformation due to tunnel construction with shield in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1077.
- [3] WONG K S. Centrifuge and numerical investigation of passive failure of tunnel face in sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 297.
- [4] 魏新江,周洋,魏纲. 土压平衡盾构掘进参数关系及其对地

层位移影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 73.

WEI Xinjiang, ZHOU Yang, WEI Gang. Research of EPB shield tunneling parameter relations and their influence on stratum displacement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 73.

- [5] 郑刚,路平,曹剑然. 基于盾构机掘进参数对地表沉降影响敏感度的风险分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 3604.  
ZHENG Gang, LU Ping, CAO Jianran. Risk analysis based on the parameters sensitivity analysis for ground settlement induced by shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3604.
- [6] 杨欢欢,杨双锁,罗百胜. 地铁盾构施工地表变形的神经网络预测及应用[J]. 中国科技论文, 2019, 14(6): 625.  
YANG Huanhuan, YANG Shuangsoo, LUO Baisheng. Prediction and application of neural network on surface deformation from subway shield tunneling construction[J]. China Sciencepaper, 2019, 14(6): 625.
- [7] 顾士坦,台连海,陈长鹏,等. 深部巷道围岩稳定性影响因素显著性分析[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(9): 71.  
GU Shitan, TAI Lianhai, CHEN Changpeng, et al. Significance analysis on the factors affecting surrounding rock stability in deep roadway[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(9): 71.
- [8] BURGESS N, FAGENTS J, PATERSON J. Northern Line tunnel reconstruction at Old Street[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 2002, 153(1): 1.

(收稿日期:2020-12-13)

(上接第87页)

遮挡,扭转不利因素,消除繁杂标志误导。如:利用柱子进行标志设计,以弱化匀质空间的负向作用。

3) 在复杂空间设置重点标志,避免其他引导标志干扰。如:在换乘、通道、岔路口应简化标志数量,优化标志排布,突出重点标志,给出明确安全引导。

4) 为进一步完善疏散系统,利用色彩等元素划分空间层次,使乘客明悉所处位置和疏散进度,增强乘客方向感。

西南角站火灾场景建模是VR在复杂建筑中的深度应用。在防火疏散过程和个人信息相关性研究的基础上,进一步探讨空间影响因素。研究结果可为地铁车站优化设计策略、应急规划等提供理论支持,具有实际应用价值。

## 参考文献

- [1] ZHAO L, KIM Y, YU S, et al. BIM modeling and VR simulation

for optimal design of subway-station evacuation facility[J]. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 2019, 19(7): 339.

- [2] FENG Y. Development and evaluation of a VR research tool to study wayfinding behaviour in a multi-story building[J]. Safety Science, 2022, 147: 105573.
- [3] DING N. The effectiveness of evacuation signs in buildings based on eye tracking experiment[J]. Natural Hazards, 2020, 103(1): 1201.
- [4] 高宇航. 地铁站突发事件应急疏散能力评价方法及应用[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.  
GAO Yuhang. Evaluation method and application of emergency evacuation capacity of subway station[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [5] 刘畅,李俊达,李莹莹. 基于眼球追踪技术的城市轨道交通导向标志评价试验[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12): 113.  
LIU Chang, LI Junda, LI Yingying. Evaluation of guiding signs of urban rail transit based on eye-tracking technology[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12): 113.

(收稿日期:2023-04-04)