

泥水平衡盾构泥水仓压力与地表沉降关联性实测研究

卢瑞¹ 丁智儒¹ 李小鹏¹ 黄学荣¹ 张力¹ 郭海²

1 中国建筑第八工程局有限公司

2 中国建设基础设施有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21080

[摘要] 依托芳白城际机东—机场南站盾构区间现场实测数据,针对隧址富水、淤泥与粉砂交错的复杂地层条件,收集盾构逐环掘进参数和地表长期沉降监测原始数据,综合采用现场数理统计、多元回归建模、灰色关联度分析、BP神经网络非线性拟合多种实测分析手段,探究泥水仓压力、仓压动态波动幅度两项指标和地面沉降发展规律的内在联系。从实测结果来看,泥水仓压力和隧道上方地表累计沉降仅存在微弱正向变化关系,仅依靠单一仓压数值很难解释地表沉降的变化;在模型中新增仓压变化速率指标后,多元回归模型拟合精度明显提升,现场实测同样证明泥浆压力频繁波动带来的土体扰动影响,要高于平均仓压固定值。依托分段实测统计结果,本工程软土地层泥水盾构最优仓压管控区间锁定1.6~1.7bar,仓压长期低于1.6bar易出现沉降超标问题,超过1.8bar后大概率造成地表土体上拱隆起。本次实测总结的数据规律,能够为本片区同类型海陆交互相软土泥水盾构施工参数精细化管控提供实测参考。

[关键词] 泥水盾构; 泥水仓支护压力; 地表变形; 灰色关联分析; BP神经网络; 现场原位实测

中图分类号: U455.43 **文献标识码:** A

Experimental Study on the Correlation Between Pressure in the Mud Water Tank of a Shield Tunneling Machine and Surface Settlement

Rui Lu¹ Zhiru Ding¹ Xiaopeng Li¹ Xuerong Huang¹ Li Zhang¹ Hai Guo²

1 China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd.,

2 China Construction Infrastructure Co., Ltd.

[Abstract] Based on field measurement data from the shield tunneling section between Dong Station and Airport South Station of the Fangbai Intercity Railway, this study addresses the complex geological conditions at the tunnel site characterized by water-rich strata with alternating layers of silt and silty clay. By collecting sequential excavation parameters and long-term surface settlement monitoring data, and employing multiple analytical methods—including field statistical analysis, multiple regression modeling, grey relational analysis, and BP neural network nonlinear fitting—the study investigates the intrinsic relationship between two key indicators (slurry chamber pressure and dynamic pressure fluctuations) and surface settlement patterns. Results demonstrate a weak positive correlation between slurry chamber pressure and cumulative surface settlement above the tunnel; thus, relying solely on individual chamber pressure values fails to adequately explain settlement variations. The introduction of a chamber pressure change rate parameter significantly improved the accuracy of the regression model, with field measurements confirming that frequent slurry pressure fluctuations exert greater soil disturbance effects than fixed average chamber pressures. Using segmented statistical data, the optimal chamber pressure range for soft-soil slurry shield construction in this project was determined to be 1.6–1.7 bar. Persistent chamber pressures below 1.6 bar may lead to excessive settlement, while pressures exceeding 1.8 bar are highly likely to cause surface soil bulging. These findings provide valuable empirical references for precise parameter control in similar sea-land interface soft-soil slurry shield projects in this region.

[Key words] slurry shield; support pressure in slurry chamber; surface deformation; grey relational analysis; BP neural network; in-situ measurements at the site

1 绪论

1.1 研究背景

珠三角全域广泛分布海陆交替沉积形成的淤泥质软土、粉细砂互层地层，这类土体压缩模量偏低、孔隙水富集，盾构机械掘进扰动土体后易引发地面沉降超限，威胁隧道沿线既有市政管线、低层建(构)筑物使用安全。泥水平衡盾构凭借仓内泥浆静压力平衡掌子面水土荷载，是复合地层施工首选工法，泥水仓压力作为掌子面稳定性控制的核心施工参数，参数选取合理与否，直接决定掘进的安全性。

现场实际施工过程中，受地层竖向分层杂乱、地下水位动态浮动、操作人员动态调整等多重客观条件约束，泥水仓压力和地表沉降很难套用固定线性计算公式，单纯依靠经典土压力理论核算设定仓压，和现场实际无法匹配。数据反应，即便仓压设定数值一致，泥浆压力频繁起伏的掘进断面，最终地表沉降量远高于全程稳压掘进区段。由此可见，除平均仓压外，仓压短时间波动幅度同样是控制地表沉降的关键变量，基于现场连续实测数据梳理两者变化规律，是实现掘进参数动态优化、精细化管控地面沉降的现实需要。

1.2 国内外研究现状

国外多数研究以Peck沉降槽经验理论为基础，依托土体损失假定推导地表沉降计算公式，后续部分学者通过室内离心模型试验，分析泥水支护压力与围岩位移变化规律，但室内模型试验的边界约束条件，和现场杂填土、不规则砂透镜体并存的复杂地质差异明显，结论落地性有限。国内科研人员围绕盾构沉降开展了大量理论分析与数值模拟工作，多数借助有限元仿真软件模拟不同仓压工况下地应力演化特征，但数值建模过程中土体参数经过简化取值，无法体现天然地层不均匀带来的沉降离散特性。

现有实测类文献大多只针对单一均质地层开展监测分析，多数已有研究只采用一元线性相关性分析，忽略了仓压频繁波动带来的附加地层扰动效应。基于上述研究短板，依托在建城际项目完整实测台账开展多方法耦合分析，具备明确的工程落地价值。

1.3 研究内容与技术路线

本文选取机东—机场南盾构左线实测施工记录、地表沉降逐日监测数据作为研究基础，先完成无效数据剔除、掘进里程与监测断面一一匹配，依次开展单因子相关性验算、多元线性回归拟合、灰色关联权重排序、BP神经网络非线性建模、分仓压区间沉降统计分析，总结不同仓压区段地表变形特征，确定本项目适配的最优仓压控制范围，并结合现场施工痛点给出沉降防控优化措施。

技术路线：现场工程踏勘+地层资料收集→实测掘进与沉降数据筛选预处理→多方法交叉数据分析→分区间沉降规律归纳→施工参数优化落地建议。

2 工程及监测概况

2.1 工程概况

机东—机场南盾构隧道为城际铁路重点施工标段，采用两台泥水盾构分别负责左右线掘进施工，本次试验研究选取左线215m为试验段，宽宽1.6m，管片外径8.5m，隧道覆土埋深区间11.2~27.6m。洞身依次穿越人工回填杂土、流塑淤泥质土、饱和粉细砂、可塑粉质黏土，局部洞身随机分布孤立砂透镜体；场区地下水赋存于砂层孔隙内部，稳定地下水位埋深2.6~5.8m，雨季降雨后水位最大抬升1.8m，土体受施工扰动后孔隙水逐步排水固结，极易产生后期固结沉降。项目沉降管控标准：单点累计沉降≤30mm，单日变形沉降≤3mm。

2.2 现场监测布设

地表沉降监测测点顺着隧道纵向轴线布设，纵向相邻测点间距10m，单个监测横断面布置7处监测点位，点位分别设在隧道中线、中线左右3m、6m、9m位置；监测作业采用国家二等水准测量规范，监测设备选用高精度电子水准仪，常规工况每日观测1次，单日沉降速率接近规范限值时加密观测频次。测点埋设阶段破除表层硬化路面与杂填土，监测测杆直接埋入原状天然土层，规避路面回填土自身压缩变形对监测数据的干扰，保障监测数据真实性。

3 数据预处理与分析方法

3.1 实测数据预处理

里程统一匹配：统一全线里程标注格式，逐一对应掘进环里程和地表沉降监测断面里程，删除里程无法对应的无效监测数据；

异常数据剔除：采用工程常用 3σ 异常判别准则，剔除仓压、沉降数值异常跳变的离散数据；

衍生指标计算：利用相邻掘进环仓压差值核算仓压变化速率(单位：bar/环)，用来量化泥浆压力波动幅度，作为新增分析变量；最终确定5项分析指标：平均仓压 X_1 、仓压变化率 X_2 、地表累计沉降 Y 、单日沉降变化量 ΔY 。

3.2 分析方法说明

结合数据分布特征选用5类分析手段：使用皮尔逊相关、斯皮尔曼秩相关两种算法，分别判别变量线性关联、单调非线性关联强弱；依托一元、多元线性回归量化指标影响系数与模型拟合效果；借助灰色关联分析(无需数据服从正态分布)区分两项仓压指标对沉降的影响权重；搭建BP神经网络非线性模型，弥补线性模型无法表征非线性耦合的缺陷；按0.1bar梯度划分仓压分段，统计各区间沉降均值、极值，总结分段变形规律。

4 实测数据结果与分析

4.1 基础数据统计

经过筛选后的59组有效样本中，全段平均仓压实测均值1.625bar；地表累计沉降实测范围-20.23~9.16mm，整体沉降平均值-3.001mm，绝大多数区段表现为土体下沉，少数点位因注浆超压、仓压取值过高出现小幅地表隆起；单日沉降数值波动幅度偏小，绝大多数监测点位变形满足规范控制要求。

4.2 相关性分析

对比组合	皮尔逊相关系数	斯皮尔曼相关系数	关联等级
X_1 -累计沉降Y	0.152	0.150	弱正相关
X_1 -单日沉降 ΔY	0.188	0.187	弱正相关

分别采用两种相关系数开展验算, X_1 (平均仓压)和累计沉降Y皮尔逊系数0.152、斯皮尔曼系数0.150,和单日沉降 ΔY 相关系数分别为0.188、0.187,两项指标均属于弱正相关关系。

两组相关系数数值相差极小,说明泥水仓平均压力和地表沉降线性关联程度很低,地表沉降是地层条件、注浆参数、掘进速率、仓压等多因素共同作用结果;相关系数为正值在工程层面可以解释:提升仓压能够增强掌子面支护效果,减少土体向洞内流失,沉降数值随之减小、逐步向地表隆起转变,和经典土压力平衡理论变化规律一致。

4.3线性回归分析

4.3.1一元线性(自变量 X_1)

拟合公式: $Y=9.98X-19.23$, 决定系数 $R^2=0.023$,仅依靠平均仓压只能解释2.3%的沉降变化规律,单一仓压指标拟合精度极差,无法实现地表沉降有效预判。

4.3.2多元线性(X_1 、 X_2 双自变量)

拟合公式: $Y=13.32X_1-44.30X_2-24.49$, $R^2=0.066$;新增仓压变化速率后模型拟合优度较一元模型提升186%, X_2 回归系数为负值,代表仓压变化速率越大(压力频繁波动),地表沉降数值越大。究其原因,泥浆压力短时间反复升降会持续扰动掌子面周边原状土体,加大地层土体损失量,加剧后期沉降,从实测数据可以看出,现场稳压施工效果远优于频繁调整仓压。

4.4灰色关联分析

影响因子	关联度	影响排序
仓压变化率 X_2	0.671	1
平均仓压 X_1	0.579	2

仓压变化率 X_2 关联度0.671(权重排名第1),平均仓压 X_1 关联度0.579(权重排名第2),两项指标关联度全部大于0.5,均为中等程度影响因子。从权重排序能明显看出:泥浆压力波动对地表沉降的影响优先级高于平均仓压基准值,现场管控工作需要优先保证仓压运行稳定,其次再优化基准仓压设定数值。

4.5 BP神经网络非线性拟合

考虑到线性模型难以适配地层带来的数据离散问题,搭建双输入BP神经网络预测模型:输入层设置2个神经元(平均仓压 X_1 、仓压变化率 X_2),设置两层隐藏层,节点数依次为10、5,输出

层为累计沉降Y;模型选用ReLU作为激活函数,最大迭代次数设定1000次。

模型最终拟合优度 $R^2=0.381$,对比一元线性模型提升幅度达1545%,神经网络可以捕捉仓压与沉降之间的非线性耦合关系。但即便同时纳入两项仓压指标,模型仅能解释38%左右的沉降变化,剩余变形量由场区地层差异性、同步注浆施工质量、掘进速度、地下水位变动等其他因素共同控制。

4.6分仓压区间沉降统计

仓压区间 (bar)	样本数	平均累计沉降 (mm)
1.4~1.5	8	-4.18
1.5~1.6	19	-3.72
1.6~1.7	14	-1.04
1.7~1.8	12	-7.02
1.8~1.9	6	+4.30

结合各分段实测沉降数据逐一分析:

(1) 仓压控制在1.4~1.6bar区间:整体地表沉降偏大,部分点位沉降突破20mm限值,主要原因是仓压支护力不足,掌子面后方土体持续向隧道内部滑移流失,该仓压区间不适合本项目长期使用;

(2) 仓压1.6~1.7bar:全段平均沉降仅-1.04mm,地表变形控制效果最优,确定为本项目基准仓压优选区间;

(3) 仓压1.7~1.8bar区间出现反常沉降变大,翻阅施工日志可知该分段施工期间现场频繁手动调整仓压,压力波动幅度超标,土体反复受扰动造成沉降异常增加;

(4) 仓压>1.8bar时地表普遍出现隆起变形,高压泥浆顺着土体缝隙向上劈裂渗入上覆地层,极易造成地下管线抬升破损,施工中严格规避仓压长期超1.8bar。

5 沉降多因素成因分析

综合全项目监测与施工台账,除泥水仓压力外,四类关键因素同步主导地表沉降发展,也是单一仓压指标解释度偏低的核心诱因:

第一,场区软土先天工程特性差:本标段分布软土固结度不足、土体压缩模量偏小,盾构掘进扰动后,土体内孔隙水缓慢排出产生长期固结沉降,该部分后期固结变形在总沉降中占比很高,直接造成仓压和沉降相关性偏弱;

第二,盾尾同步注浆施工质量:盾尾环形空隙填充是否饱满直接决定后期地层收敛变形,注浆用量不足、浆液失水凝固过快都会留下空隙,诱发后续持续性沉降,注浆管控优先级高于仓压小幅微调;

第三,现场掘进施工工艺管控:掘进速度忽快忽慢、刀盘长期高速切削土体,会持续剪切破坏原状土内部结构,产生额外附加沉降;

第四,场区水文环境动态变化:沿线地表水持续补给砂层孔隙,降雨、季节变化带来地下水位升降,掌子面实际水土荷载实时变动,固定仓压数值很难适配瞬时水土压力变化。

6 结论与施工管控建议

6.1 主要结论

(1)珠三角富水软土地层施工条件下,泥水仓平均支护压力与地表累计沉降仅微弱正向相关,只依靠调整基准仓压无法精准管控地表沉降,泥浆压力波动带来的土体扰动影响,整体大于平均仓压数值变化;

(2)对比线性拟合模型,双输入BP神经网络能够更好表征仓压、压力波动与沉降之间的非线性变化规律,拟合精度提升显著,可在本标段用作简易沉降预判工具;

(3)结合分段实测统计,本项目泥水盾构最优仓压控制区间1.6~1.7bar,仓压低于1.6bar大概率出现沉降超标,持续高于1.8bar易诱发地表隆起病害;

(4)地表沉降是地层、注浆、掘进参数、仓压多要素耦合结果,想要实现沉降常态化达标,需要多工序系统化协同管控。

6.2 现场施工管控实操建议

(1)仓压精细化管控:日常掘进基准泥浆压力固定在1.6~1.7bar优选区间,单环掘进过程中单次仓压调整幅度不得超过0.2bar,杜绝短时间内多次大幅升降仓压,减少土体反复扰动;

(2)同步注浆管控:盾尾同步注浆填充系数最低控制在150%以上,现场技术员根据实时盾尾间隙动态微调注浆压力,充分填满管片外围建筑空隙,从源头削减后期固结沉降;

(3)掘进参数稳定控制:保持盾构掘进速度匀速运行,避免启停频繁、速率骤变,仓压调整与掘进速度优化同步开展,降低掌子面扰动;

(4)信息化联动施工:搭建沉降监测与盾构掘进联动机制,监测数据显示单日沉降超过2mm时,现场立刻放缓掘进速度,同步优化仓压、注浆两项关键参数。

[参考文献]

[1]张庆贺,朱合华.软土盾构隧道地表沉降机理与控制[J].岩土工程学报,1994,16(06):32-39.

[2]宋克志,王梦恕.泥水平衡盾构地层损失与地表变形分析[J].岩土力学,2004,25(10):1657-1661.

[3]陈馈.盾构设计与施工[M].人民交通出版社,2021.

[4]张顶立,李鹏飞.城市盾构隧道地层变形控制技术[J].岩石力学与工程学报,2010(S1):3121-3128.

[5]刘建航.软土隧道盾构法施工技术[M].上海科学技术出版社,1989.

[6]李新宇,侯永茂.软土泥水盾构支护压力现场试验研究[J].现代隧道技术,2019,56(03):112-117.

[7]黄宏伟,杜佳.基于实测数据的盾构沉降灰色预测[J].地下空间与工程学报,2018,14(02):523-529.

[作者简介]

卢瑞(1996--),男,汉族,云南省曲靖市人,工程师,文章方向:盾构施工。

丁智儒(1993--),男,汉族,陕西省安康市人,工程师,文章方向:盾构施工。

李小鹏(1990--),男,汉族,甘肃省定西市人,工程师,文章方向:盾构施工。

黄学荣(1994--),男,汉族,四川省达州市人,工程师,文章方向:盾构施工。

张力(1996--),男,汉族,甘肃省陇南市人,工程师,文章方向:盾构施工。

郭海(1975--),男,汉族,北京市朝阳区人,高级工程师,文章方向:盾构施工。