

隧道围岩超挖识别与力学响应预测方法研究

黄鑫元*, 郭 健#, 王 阳, 戴绍冉, 赵浩然

武汉轻工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年9月21日; 录用日期: 2025年10月11日; 发布日期: 2025年10月24日

摘 要

隧道围岩超欠挖是影响隧道施工质量与长期稳定性的关键问题。本文结合三维激光扫描技术与数值模拟方法, 开展围岩超挖识别与力学响应预测研究。通过实际隧道工程点云数据采集与处理, 实现超欠挖区域的高精度识别与量化分析; 利用ABAQUS建立数值模型, 分析不同超挖深度与范围对拱顶竖向位移的影响规律; 最终构建基于算法模型的力学响应预测架构, 实现对拱顶位移的预测。研究成果为隧道施工质量控制与风险识别提供了技术支撑, 具有较强的工程应用价值和理论意义。

关键词

隧道工程, 围岩超挖, 三维激光扫描, 数值模拟, 力学响应预测

Research on Identification of Tunnel Surrounding Rock Over-Excavation and Prediction of Mechanical Response

Xinyuan Huang*, Jian Guo#, Yang Wang, Shaoran Dai, Haoran Zhao

School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan Hubei

Received: September 21, 2025; accepted: October 11, 2025; published: October 24, 2025

Abstract

Over-excavation and under-excavation of tunnel surrounding rock are critical issues affecting both construction quality and long-term stability. This study integrates 3D laser scanning technology and numerical simulation methods to investigate the identification of surrounding rock over-excavation and the prediction of its mechanical response. Through the acquisition and processing of point

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 黄鑫元, 郭健, 王阳, 戴绍冉, 赵浩然. 隧道围岩超挖识别与力学响应预测方法研究[J]. 土木工程, 2025, 14(10): 2470-2479. DOI: 10.12677/hjce.2025.1410266

cloud data from an actual tunnel project, high-precision identification and quantitative analysis of over-excavation and under-excavation areas are achieved. A numerical model is established using ABAQUS to analyze the influence of different over-excavation depths and ranges on the vertical displacement of the tunnel vault. Finally, a prediction framework based on a machine learning model is constructed to forecast vault displacement. The research results provide technical support for quality control and risk identification in tunnel construction, demonstrating significant practical application value and theoretical importance.

Keywords

Tunnel Engineering, Surrounding Rock Over-Excavation, 3D Laser Scanning, Numerical Simulation, Mechanical Response Prediction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

隧道工程作为交通、水利、矿山等领域的关键构筑物，其施工质量直接关系到工程安全与使用寿命。围岩超欠挖是隧道施工中常见的问题，超挖可能导致支护结构受力不均、衬砌厚度不足，甚至引发局部塌方；欠挖则会影响隧道净空，导致二次开挖增加施工成本与工期。二者均会对隧道的长期稳定性带来不利影响。传统检测方法如全站仪测量、断面仪检测等，虽然在一定范围内可完成形态检测，但存在效率低、精度有限、难以全面反映围岩实际形态等缺点。

近年来，随着测绘技术与计算机仿真手段的不断发展，三维激光扫描技术因其高精度、高效率和非接触测量等特点，被广泛应用于隧道施工质量检测中。该技术能够快速获取隧道内壁高密度点云数据，并通过后续处理实现围岩形态的精确重建与偏差分析。同时，有限元分析等数值模拟方法是研究该问题的有力工具，它能精确模拟围岩在开挖过程中的力学行为，深刻揭示超欠挖对隧道稳定性的影响机制[1]-[3]。

本文结合实际隧道工程，系统介绍三维激光扫描技术在围岩点云数据采集、处理与分析中的应用，并通过 ABAQUS 软件建立精细化数值模型，对超挖区域的力学响应进行多工况对比分析。在此基础上，提出一种基于机器学习算法的围岩力学响应预测架构，实现对拱顶位移的智能预测，为隧道施工质量控制与风险识别提供更加科学、高效的技术支持。

2. 隧道围岩超欠挖的三维激光扫描检测方法

2.1. 点云数据采集

采用架站式三维激光扫描仪对实际工程隧道内部进行扫描。外业操作流程如下：首先收集现场数据资料，包括测量控制点布设情况、隧道内部施工作业进度、既有支护结构信息等；随后进行现场踏勘，根据隧道走向、断面形状及现场障碍物分布情况，合理制订测站架设位置，确保测站间具有良好的通视条件与重叠度；在确定测站位置后，选择合适测站架设间距及标靶距离，结合扫描设备的最大测距以及点云质量要求，在测站前后布设标靶，以方便后续的测站拼接工作；设置扫描分辨率、扫描速度等参数，执行扫描并实时检查点云质量，对不满足要求的区域进行补扫[4]。

完成外业数据采集后，将各测站的点云数据导入专业点云处理软件，通过标靶匹配、特征匹配等方法完成多站数据的精确拼接[5]，最终得到完整的隧道内部点云模型。该模型具有高精度、高完整性的特

点，为后续超欠挖分析提供了可靠的数据基础。

2.2. 点云数据处理与超欠挖分析

将整体的隧道围岩点云数据进行处理分析，步骤如下：

1) 围岩三维模型重建与设计模型导入

在软件 3DReshaper 中，用所采集的点云数据生成网格得到现场隧道围岩模型，并根据隧道设计图纸及相关围岩设计资料，建立隧道设计理论模型，如图 1 所示。将实际模型与设计模型置于同一坐标系下，为后续超欠挖对比分析奠定基础。

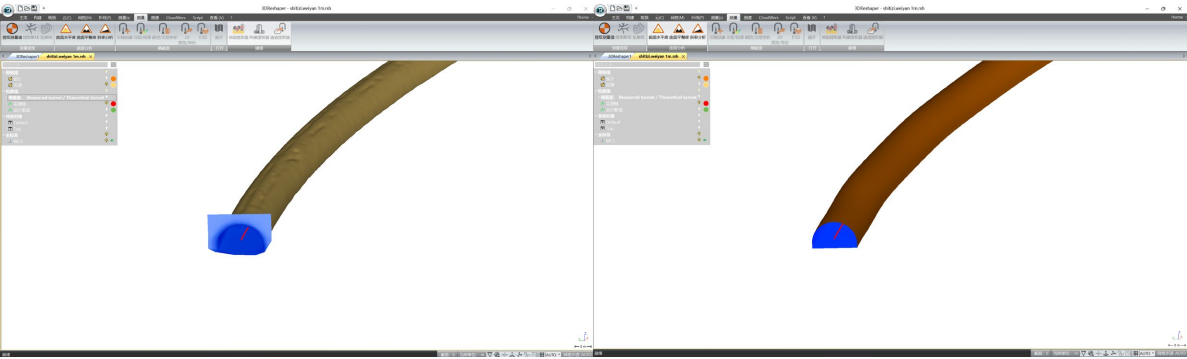


Figure 1. 3D Reconstruction of *in-Situ* tunnel surrounding rock and establishment of design surrounding rock
图 1. 现场隧道围岩三维重建与设计围岩建立

2) 超欠挖断面对比与量化分析

接着将实际模型与设计模型沿隧道轴线方向按每 1 m 间距进行断面划分，获取一系列连续断面。在每个断面上，计算实际轮廓与设计轮廓之间的法向距离，以此作为超欠挖的判断依据，进而统计各断面的超欠挖面积、体积、最大超挖深度、最大欠挖深度等量化指标，全面评估施工质量，如图 2 与图 3 所示。

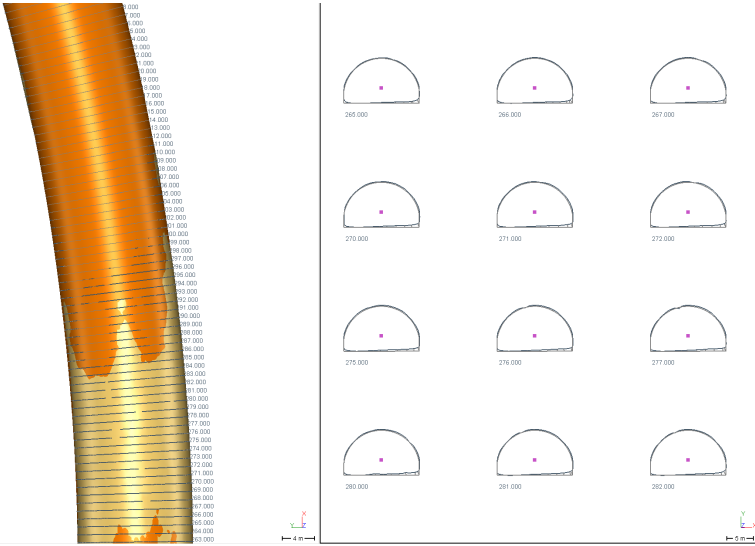


Figure 2. Cross-section classification of surrounding rock and construction quality comparison diagram
图 2. 围岩断面划分与施工质量对比图

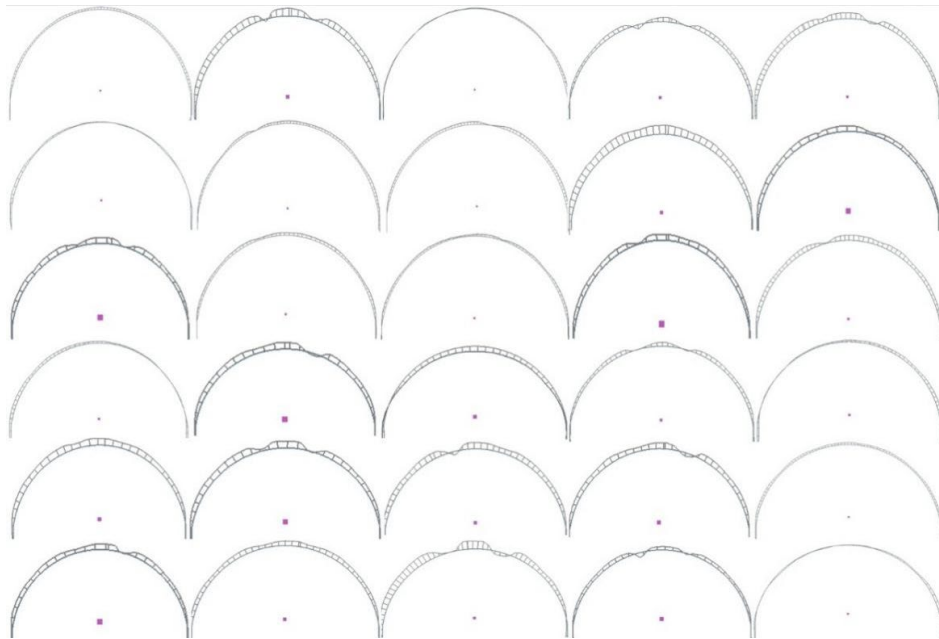


Figure 3. Overbreak and underbreak comparison diagram of surrounding rock (partial)
图 3. 围岩超欠挖对比图(部分)

通过对典型断面的详细分析,可明确超欠挖的分布规律与严重程度。如图 4 所示,选取 4 个典型断面进行展示,图中清晰标示出各点的偏差值,正值代表围岩超挖,负值代表围岩欠挖,单位为 m。该分析结果可为后续数值模拟提供准确的几何输入,也为施工整改提供了明确指向。

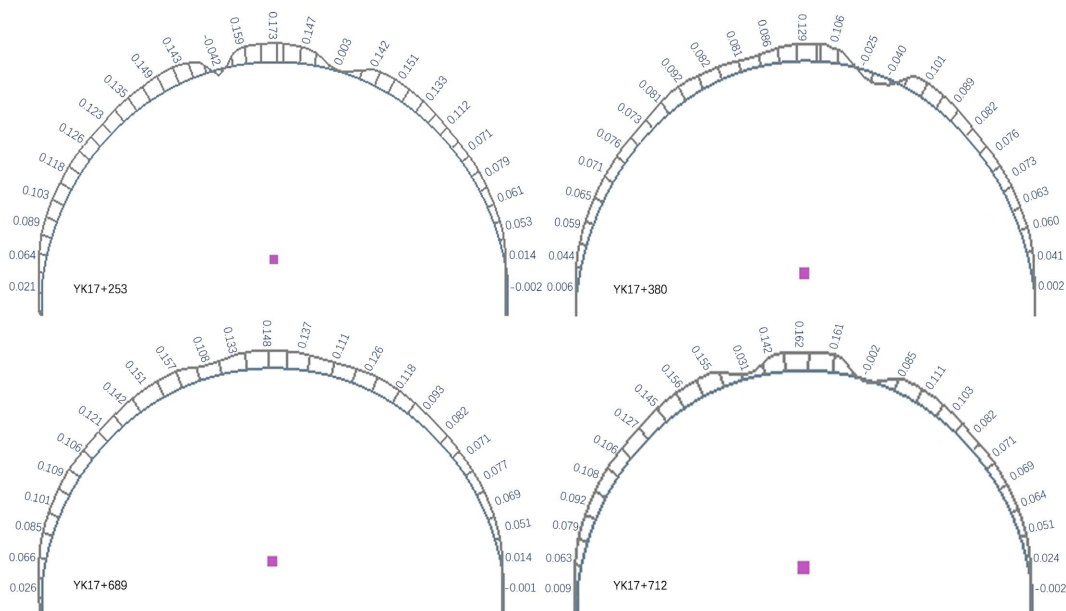


Figure 4. Detailed comparison diagram of surrounding rock overbreak and underbreak
图 4. 围岩超欠挖对比详图

2.3. 超挖数据统计分析

基于三维激光扫描获得的完整超挖数据,本文对拱顶区域的超挖特征进行了统计分析。统计结果表

明, 该隧道拱顶超挖深度主要分布在 15~30 cm 范围内, 出现频率达 78.3%; 超挖范围多集中于 30°~60° 之间, 占总数的 82.1%。这一统计结果为后续数值模拟中参数范围的选取提供了工程依据, 确保后文模拟工况能够真实反映实际工程中的超挖情况。根据统计分析结果, 确定数值模拟中的超挖深度水平为 15 cm、20 cm、25 cm、30 cm, 超挖范围水平为 30°、40°、50°、60°, 如表 1 所示。

Table 1. Factor level table of influencing factors for tunnel crown overbreak
表 1. 隧道拱顶超挖影响因素水平表

水平	拱顶处超挖影响因素	
	超挖深度(cm)	超挖范围(°)
1	15	30
2	20	40
3	25	50
4	30	60

3. 拱顶超挖区围岩力学响应研究

由上一章分析可知, 该隧道工程拱顶处存在显著超挖现象。超挖将改变围岩应力分布状态, 进而对隧道稳定性构成潜在威胁。为此, 本章采用数值模拟方法, 系统研究超挖深度与范围对拱顶围岩力学行为的影响规律, 并构建基于数据驱动的力学响应预测模型。

3.1. 数值模型建立与工况设计

隧道超欠挖造成的形态变异分为环向形态变异与纵向形态变异, 已有研究[6][7]认为, 纵向形态变异主要是由施工质量控制不良造成的。因此, 后续开展的数值模拟不考虑超欠挖沿隧道轴向的变化情况, 认为在隧道轴向方向上, 隧道超欠挖无论是尺寸规模还是形态特征, 均保持统一状态, 不存在变化。故后续模型的尺寸为 120 m × 120 m × 1 m。

模型边界条件设置为: 模型底部为固定约束, 两侧限制水平位移, 顶部为自由边界。初始地应力场按自重应力场考虑, 重力加速度取 9.8 m/s²。网格类型为 C3D8R (八节点六面体线性减缩积分单元), 在拱顶超挖区域进行局部加密, 共计 7164 个结点, 4694 个单元。

拱顶超挖的部分的轮廓线以隧道设计轮廓线为基础, 调整超挖深度与超挖范围后, 将轮廓线导入 abaqus 中进行模型建立与网格划分, 如下图所示, 图中拱顶超挖深度为 15 cm、超挖范围为 30°。

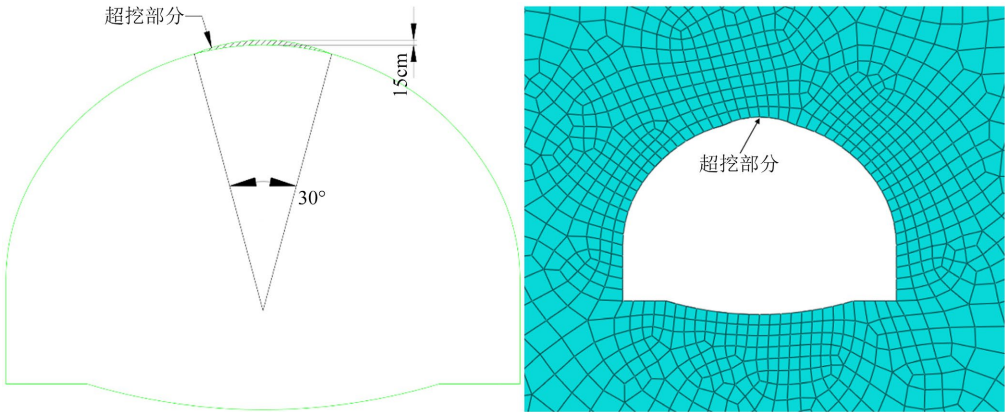


Figure 5. Diagram of crown overbreak profile and mesh division for tunnel surrounding rock
图 5. 隧道围岩拱顶超挖轮廓线与网格划分图

进行毛洞开挖模拟所需参数主要为围岩的物理力学参数，如表 2 所示。选用的材料力学模型为摩尔-库仑弹塑性理论模型。

根据第 2.3 节对拱顶扫描结果的统计分析，工况模拟一览表依据因素水平表(表 1)进行设置，共设计 16 种工况，见表 3。

将上节各工况的下的拱顶竖向位移结果进行整理归纳，如表 4 所示。

3.2. 模拟结果分析与统计

以工况 1 为例，展示该工况下的竖向位移云图与竖向应力云图，如图 6 所示。

3.3. 基于算法模型的隧道围岩超挖力学响应预测架构

为实现对超挖力学响应的快速、准确预测，本文构建了一种数据驱动的预测架构，如图 7 所示。该架构以数值模拟产生的样本数据为基础，通过机器学习算法建立从超挖参数(深度、范围)到拱顶位移的非线性映射关系。

具体实施步骤如下。

随机选取表 4 中的 14 组数据对算法模型进行训练，剩余的 2 组数据作为验证样本不参与迭代学习，仅在模型迭代完成后用于验证模型的学习效果。

Table 2. Basic parameters of tunnel surrounding rock

表 2. 隧道围岩基本参数

质量密度 kg/m ³	弹性模量 GPa	泊松比	内摩擦角°	膨胀角°	粘聚力 MPa
2100	2	0.3	30	0.1	1.2

Table 3. Table of simulation on cases

表 3. 工况模拟一览表

工况	超挖深度(cm)	超挖范围(°)
1	15	30
2	15	40
3	15	50
4	15	60
5	20	30
6	20	40
7	20	50
8	20	60
9	25	30
10	25	40
11	25	50
12	25	60
13	30	30
14	30	40
15	30	50
16	30	60

如工况 5 与工况 9 不参与迭代学习,向其它 14 组训练出的模型中输入工况 5 与工况 9 所对应的超挖深度与超挖范围,得出预测后的拱顶竖向位移值,看预测值与工况所对应的实际值的偏差来不断优化模型,以寻找最优模型。

再得到最优模型后,即可通过输入隧道围岩拱顶处的超挖深度与超挖范围对该隧道的拱顶超挖力学响应进行预测[8][9],从而通过对隧道施工轮廓的测量,进行隧道风险识别,如图 8 所示。

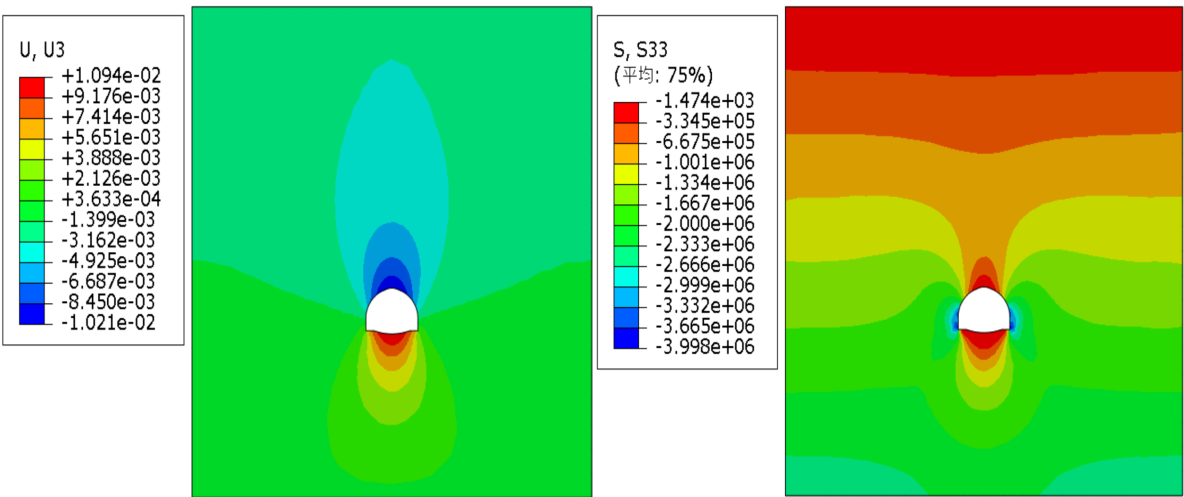


Figure 6. Contour plots of displacement and stress for case 1
图 6. 工况 1 位移云图和应力云图

Table 4. Summary table of simulation results for all cases
表 4. 各工况模拟结果统计表

工况	超挖深度(cm)	超挖范围(°)	拱顶竖向位移/mm
1	15	30	10.21
2	15	40	10.25
3	15	50	10.33
4	15	60	10.41
5	20	30	10.21
6	20	40	10.28
7	20	50	10.35
8	20	60	10.42
9	25	30	10.25
10	25	40	10.31
11	25	50	10.37
12	25	60	10.43
13	30	30	10.3
14	30	40	10.34
15	30	50	10.39
16	30	60	10.44

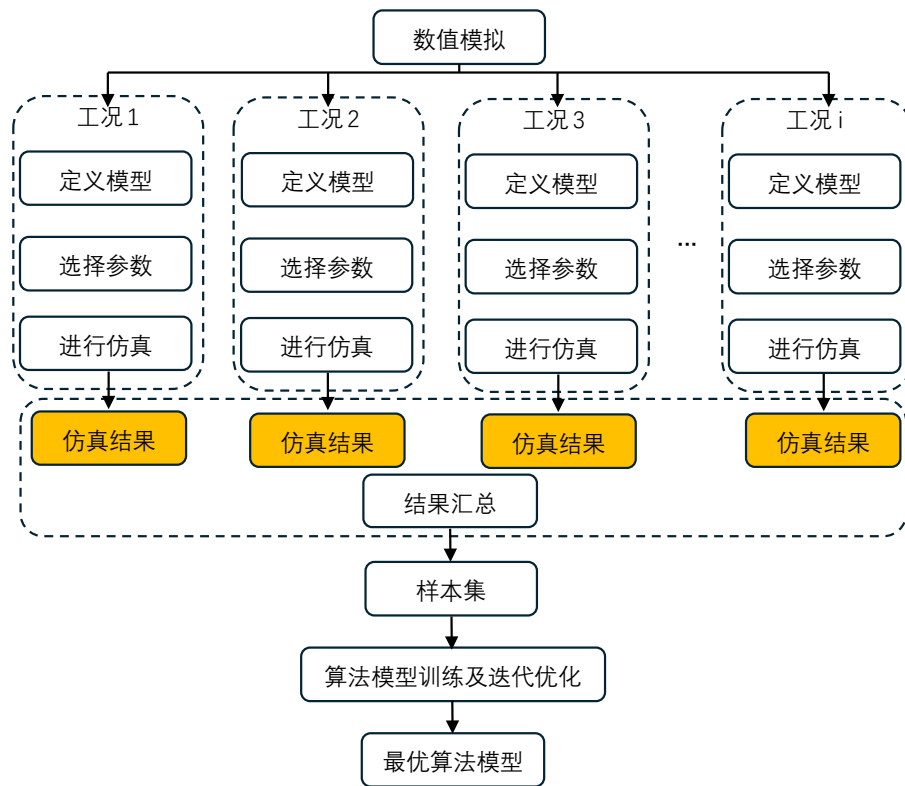


Figure 7. Framework for predicting mechanical responses to overbreak

图 7. 超挖力学响应预测架构

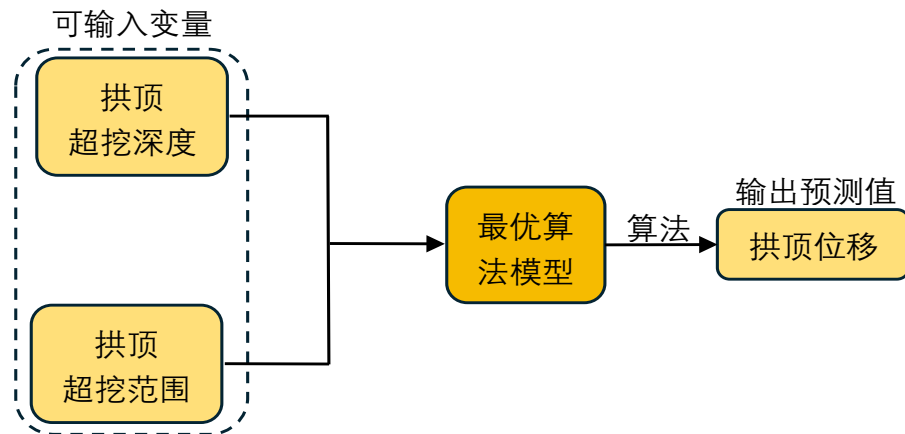


Figure 8. Flowchart for predicting mechanical responses to overbreak

图 8. 超挖力学响应预测流程

3.4. 基于算法模型的隧道围岩超挖力学响应预测实操

本节基于上节预测架构, 采用 MATLAB 平台中的 LIBSVM 工具箱实现支持向量回归(SVR)建模。以超挖深度和超挖范围为输入特征, 拱顶竖向位移为输出目标。将 16 组数值模拟数据划分为训练集和测试集, 工况 5 与工况 9 作为测试集, 其它工况作为训练集。

数据预处理采用 `mapminmax` 函数进行归一化处理, 将数据映射到 $[-1, 1]$ 区间。SVR 模型选用径向基函数(RBF)作为核函数, 通过网格搜索法优化惩罚系数 C 和核参数 γ , 搜索范围为 2^{-10} 到 2^{10} 。采用 5 折

交叉验证确定最优参数组合。

模型性能评价采用平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)三个指标。测试结果表明,SVR 模型能够准确预测拱顶位移,预测值与数值模拟值高度吻合,如图 9 与图 10 所示,表明模型具有良好的预测精度和工程适用性。

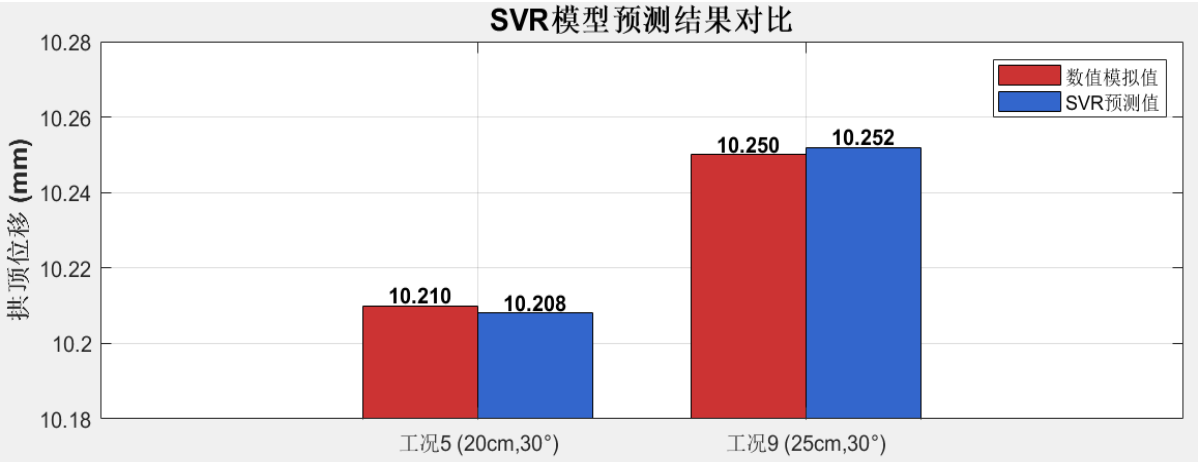


Figure 9. Comparison of SVR model prediction results
图 9. SVR 模型预测结果对比

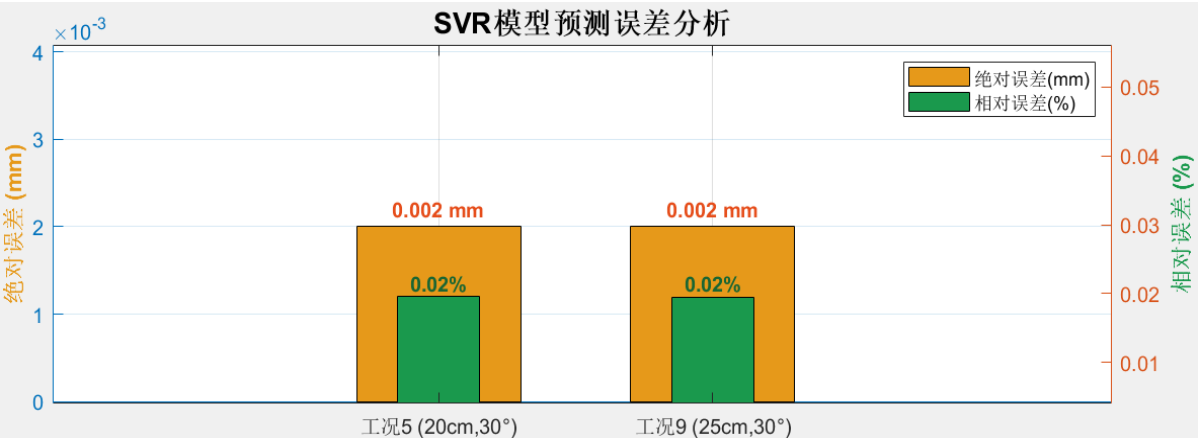


Figure 10. Analysis of prediction errors for the SVR model
图 10. SVR 模型预测误差分析

4. 结论

本文通过集成三维激光扫描、数值模拟与机器学习算法,建立了一套适用于隧道围岩超挖识别与力学响应预测的综合方法体系。主要结论如下:

- 1) 三维激光扫描技术可实现隧道围岩的高精度、高效率数字化重构,结合断面对比分析方法,能够准确识别与量化超欠挖区域,为施工质量评价提供了可靠依据。
- 2) 数值模拟结果表明,拱顶竖向位移随超挖深度与范围的增加而增大,超挖对围岩稳定性具有不利影响,应在施工中予以严格控制。
- 3) 所提出的基于机器学习算法的力学响应预测架构,能够较好地学习超挖参数与拱顶位移之间的复杂关系,实现快速、准确的位移预测,为隧道施工期风险防控提供了新的技术途径。

参考文献

- [1] 张志鹏, 程文明, 杜润, 等. 基于点云数据的隧道超欠挖计算方法[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(5): 155-159.
- [2] Zhang, H., Mao, S. and Li, M. (2024) A Coal Mine Excavation Tunnels Modeling Method Based on Point Clouds. *Applied Sciences*, **14**, Article 9454. <https://doi.org/10.3390/app14209454>
- [3] Cui, H., Li, J., Mao, Q., Hu, Q., Dong, C. and Tao, Y. (2024) STSD: A Large-Scale Benchmark for Semantic Segmentation of Subway Tunnel Point Cloud. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **150**, Article ID: 105829. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105829>
- [4] 穆宝胜, 马世龙, 杜雁欣. 三维激光扫描技术在地铁隧道收敛变形监测中的应用[J]. 智能城市, 2025, 11(4): 22-24.
- [5] 赵利民, 王瀚斌, 姜涛, 等. 三维多站点云拼接新技术在文物保护中的应用[J]. 北京测绘, 2024, 38(9): 1295-1299.
- [6] 杨迪. 大断面隧道机械化施工超欠挖特征及力学响应规律研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [7] 朱林. 超欠挖状态下隧道支护结构力学特性研究及围岩稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2018.
- [8] An, P., Jia, B., Meng, F., Wang, Z., Wei, H. and Zhang, Y. (2022) Forecast of Ground Deformation Caused by Tunnel Excavation Based on Intelligent Neural Network Model. *Mobile Information Systems*, **2022**, Article ID: 2924093. <https://doi.org/10.1155/2022/2924093>
- [9] 魏世俊. 基于数字孪生的隧道施工智能监测预警技术及系统研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.