岩土力学

深基坑上跨运营盾构隧道 MJS 加固方案优化分析

Optimization Analysis of MJS Reinforcement Scheme for Cross Operation Shield Tunnel on Deep Foundation Pit

陈俊驰[1]，刘 波[1]，周博闻[2,3]，汤立峰[2,3]

（1. 中电建重庆勘测设计研究院有限公司，重庆 401329；2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司，长沙 410000；3. 湖南省轨道勘察设计有限公司，长沙 410000）

摘 要：为确定深基坑上跨盾构隧道施工时隧道的隆起及水平变形规律，以某深基坑上跨区间隧道工程为研究对象，采用有限元分析方法，研究了不同基底加固面积、加固深度、加固方式时隧道的变形规律，并与隧道实测变形结果对比验证了有限元模型的合理性。结果表明：淤泥质地层中采用 MJS 基底加固方法可有效控制隧道的隆起及水平变形，减小隧道截面的相对变形；隧道隆起变形随基底加固面积增加而减小，应采取全封底加固措施控制隧道结构变形；随基底加固深度增加隧道隆起变形减小，基底加固深度超过一定限值后，增加加固深度对减小隆起变形效果减弱；隧道两侧地层加固与基底加固形成的门式加固体系控制隧道结构变形优势显著，隧道水平变形、隆起变形随两侧加固宽度增加而减小，两侧最佳加固宽度为 2 m。研究成果可为类似工程提供参考。

关键词：基坑；区间隧道；MJS 工法；数值分析；变形；加固方案

中图分类号：U231 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-8249（2025）02-0060-08

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.011

CHEN Junchi[1]，LIU Bo[1]，ZHOU Bowen[2,3]，TANG Lifeng[2,3]

（1. China Power Construction Chongqing Survey，Design and Research Institute Co.，Ltd.，Chongqing 401329，China；2. Hunan Provincial Communications Planning，Survey & Design Institute Co.，Ltd.，Changsha 410000，China；3. Hunan Rail Survey and Design Co.，Ltd.，Changsha 410000，China）

Abstract：In order to determine the vertical uplift and horizontal deformation laws of a shield tunnel construction on a deep foundation pit，a cross section tunnel project on a deep foundation pit was taken as the research object. The finite element analysis method was used to study the deformation laws of the tunnel under different base reinforcement areas，reinforcement depths，and reinforcement methods. The results show that the use of MJS base reinforcement method in silty strata can effectively control the uplift and horizontal deformation of tunnels，and reduce the relative deformation of tunnel sections；The uplift deformation of the tunnel decreases with the increase of the base reinforcement area，and full bottom reinforcement measures should be taken to control the deformation of the tunnel structure；As the depth of foundation reinforcement increases，the uplift deformation of the tunnel decreases. After the depth of foundation reinforcement exceeds a certain limit，increasing the

基金项目：湖南高新技术产业科技创新引领计划（2022GK4033）。

作者简介：陈俊驰（1990—），男，本科，高级工程师，研究方向：轨道交通地下结构。

通信作者：周博闻（1990—），男，硕士，高级工程师，研究方向：城市轨道交通工程技术。

收稿日期：2024-10-21

reinforcement depth weakens the effect of reducing uplift deformation; The portal reinforcement system formed by the reinforcement of the strata and foundation on both sides of the tunnel has significant advantages in controlling the deformation of the tunnel structure. The horizontal deformation and uplift deformation of the tunnel decrease with the increase of the reinforcement width on both sides, and the optimal reinforcement width on both sides is 2m. The research results can be used as a reference for similar projects.

Key words: pit; running tunnel; MJS construction method; numerical analysis; deformation; reinforcement plan

0　引言

随着我国城市化的不断发展，城市地下空间开发利用增长迅速，新建地下工程不可避免以邻近、上跨、下穿等多种方式临近既有地下建（构）筑物施工，增加了施工难度，对保障既有建筑安全提出了更高的要求。淤泥质地层中深基坑开挖将引起周边地层产生较大变形，当基坑下部存在既有区间隧道时，将使其产生附加应力及变形[1-2]，需采取合理加固措施，以确保隧道运营安全。

对软弱地层中深基坑开挖施工对下卧区间隧道变形规律的影响已取得研究成果，吴龙梁等[3]、蔡宗洋等[4]结合工程实例，分析了软土地层中基坑开挖时下卧隧道的变形规律，认为采取预加固措施可有效控制隧道变形。但传统搅拌桩、旋喷桩等地层加固措施，施工期间对地层存在一定的扰动影响[5-6]，不利于控制隧道变形。MJS 工法是采用高压喷射注浆置换地层中土体颗粒的特殊施工工艺，其加固体强度高，适用于紧邻建筑及对变形要求高的工程[7]，对软弱地层具有较好的加固效果，当前已广泛应用于地铁工程的地层加固。姚志雄等[8]、陈光辉等[9]研究了 MJS 工法加固淤泥质软弱地层、富水砂层的效果及对周边环境的影响规律，取得良好效果；徐敏等[10]、邵耀锋等[11]结合基坑上跨既有隧道工程，研究了采用 MJS 加固工法后隧道的变形规律；王怀东等[12]在新建隧道上跨既有隧道施工中采用 MJS 桩加固，加固范围为 1.5 倍隧道洞径时，隧道变形可满足变形要求；牛自强[13]针对富水粉砂地层基坑上跨既有隧道工程，以 MJS 工法结合管幕反压施工工艺，良好控制了隧道结构变形；张文博等[14]、王中兵等[15]采用 MJS 工法加固富水软弱地层，顺利完成隧道密贴下穿既有车站施工；王恩波等[16]对基坑上跨隧道施工时采用 MJS + 三轴水泥搅拌桩地基加固工艺，隧道变形控制效果显著。

综上，MJS 加固工法在软弱地层中具有良好的适用性。隧道 MJS 工法加固采用全封底加固方式，且对隧道两侧地层均进行加固，工程造价较高。因此依托某地道深基坑上跨区间隧道工程，采用有限元方法模拟分析基坑开挖期间隧道的水平及隆起变形规律，并与隧道实测隆起变形对比验证有限元结果的合理性；分析基坑底部加固面积、加固深度、加固形状对隧道隆起及水平变形规律的影响，可为类似工程制定经济、合理的基底加固方案提供参考。

1　工程概况

1.1　基坑与隧道概况

某地道工程深基坑于长安路上跨轨道交通 1 号线区间隧道，地道主体采用两跨箱型现浇混凝土框架结构。为降低地道基坑围护桩施工对区间隧道的影响，平行于隧道方向围护桩与隧道净距设为 5 m，隧道上方基坑平面尺寸为 38.7 m × 31.6 m，垂直于隧道方向基坑两侧深度分别为 10、8.1 m；深基坑支护结构采用 ϕ1 m@ 0.75 m 套管咬合桩，其中，素混凝土桩长 15.3 m，进入不透水层不小于 3 m；钢筋混凝土桩长 29.6 m，进入隧道拱底以下不小于 5 m。基坑内设 2 道钢筋混凝土支撑体系，内支撑截面尺寸均为 0.8 m × 1 m。区间隧道采用盾构法施工，隧道外径 6.2 m，线间距 15.4 m，管片厚度 0.35 m，隧道拱顶覆土厚度约 18.1 m；左线、右线隧道拱顶与基坑底净距分别为 9.5、8.5 m。

深基坑范围地层自上而下依次为杂填土、粉质黏土、淤泥质土、粉质黏土、粉质黏土、黏土，地层物理学参数见表 1。

岩土力学

表 1 土层物理指标参数表

Table1 Soil physics parameter

地层	容重/(kN/m^3)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
杂填土	18.2	3.2	18.6	5.1
粉质黏土	18.8	18.4	16.5	3.6
淤泥质土	17.2	18.1	13.2	1.8
粉质黏土	18.6	33.4	16.5	4.7
淤泥质土	17.8	25.1	27.2	1.8
黏土	19.2	31.2	76.5	6.5
MJS 加固体	20.0	200.0	30.0	65.0

1.2 基坑底部加固方案

为控制基坑开挖对隧道的影响，拟对基坑底部至隧道拱顶上部 1 m 范围内地层采用 MJS 工法进行全封底加固，加固体 28 d 无侧限抗压强度不小于 1.0 MPa。根据施工经验及现场试桩效果，MJS 设计桩径为 2 m，桩间距为 1.6 m，MJS 工法技术参数见表 2。

表 2 MJS 工法技术参数

Table 2 MJS construction method technical parameters

注浆压力/MPa	空气压力/MPa	空气流量/(Nm^3/min)	浆液流量/(L/min)	提升速度/(min/m)
40	1.0	1.2~2.0	90~120	40

1.3 隧道变形监测

根据 CJJ/T 202—2013《城市轨道交通结构安全保护技术规范》中外部施工作业对轨道交通工程影响的相关规定，隧道上方基坑底距离隧道拱顶约 8.5 m，处于接近程度，基坑开挖影响分区为显著影响区，综合评判隧道上部基坑开挖影响等级为一级，根据外部作业影响等级制定隧道变形控制值，隧道结构最大隆起变形、水平变形限值为 10 mm。

基坑开挖期间对隧道结构变形进行监测，在基坑中心线两侧各 60 m 范围内每 5 m 布置一个隧道变形监测断面，每个监测断面布置 4 个测点，测量隧道隆起、水平变形，如图 1 所示，采用全自动全站仪每 12 h 自动测量一次。

2 数值分析

采用 Midas-NX 有限元软件进行模拟计算分析，三维有限元模型长×宽×高尺寸为 120 m×100 m×45 m，计算模型边界条件：顶面自由约束、侧面水平约束、底面固定约束。地层土体采用修正摩尔-

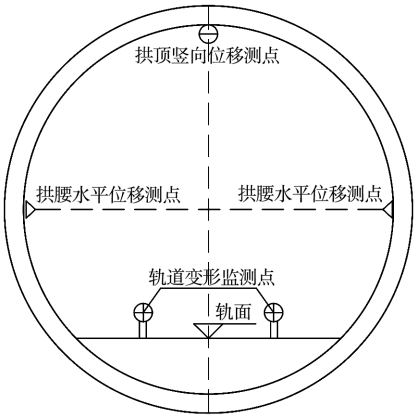


图 1 隧道横断面监测点布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tunnel cross-section monitoring point layout

库仑本构模型，模型参数见表 1，采用实体单元模拟，有限元模型如图 2 所示。根据实际基坑施工步骤将各模拟施工步骤进行简化，具体见表 3。

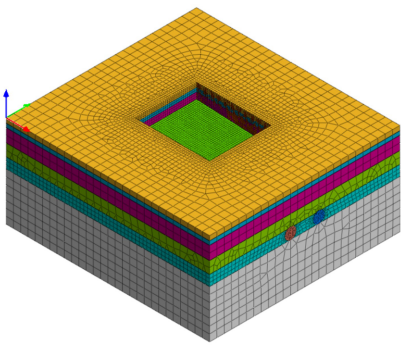


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 Model of fem

表 3 模拟基坑开挖步序

Table 3 Simulation of excavation steps for foundation pit

步序	内容	方法
St-1	地应力平衡	激活土体及边界约束，位移场清零
St-2	盾构隧道施工	激活盾构隧道、钝化隧道内土体，位移场清零
St-3	支护结构、MJS 加固施工	激活支护桩、改变坑底地层为 MJS 加固土体属性
St-4	基坑开挖	从上至下分三次钝化坑内土体，依次激活冠梁、两道内支撑，至基坑底
St-5	基坑回筑	依次激活地道墙结构

3 基坑开挖对隧道变形影响

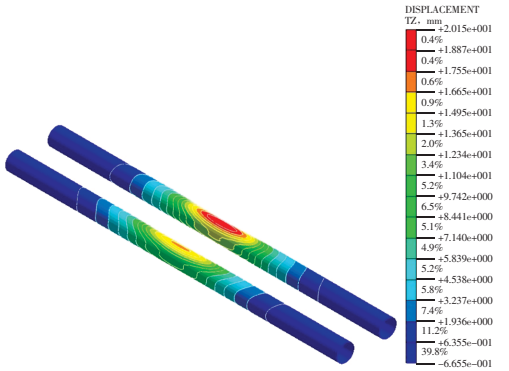
模拟分析基底未加固及全封底加固（加固深度 8 m），探究隧道的隆起、水平变形规律。

3.1 隧道隆起变形

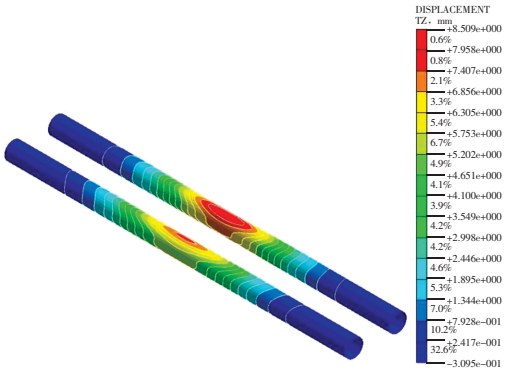
图 3 为两种加固方案时隧道的隆起变形云图。基

坑开挖至坑底后，隧道产生显著的隆起，在基坑中心位置隧道隆起变形最大，向两侧基坑边缘过渡减小；未采取基底加固时隧道最大隆起量为 20.15 mm，采取全封底加固措施后隧道最大隆起量减小至 8.51 mm，降低了 57.8%，满足变形限值要求；左线隧道相比右线隧道基坑开挖深度增加约 1 m，对应加固体厚度减薄 1 m，左线隧道隆起值及最大隆起范围均显著大于右线隧道。可见，基坑开挖深度、基底加固体厚度均对隧道隆起变形的影响较为敏感。

隧道隆起变形沿隧道纵向呈高斯分布，在基坑中心位置隧道隆起变形最大，隧道拱顶竖向位移明显大于拱底；基底未加固时拱顶、拱底位移差为 4.82 mm，采取全封底加固后拱顶、拱底位移差减小至 1.21 mm。这主要由于基坑开挖卸载了隧道拱顶竖向荷载，使隧道拱顶产生卸载隆起变形，基底加固不仅可限制隧道隆起变形，还可减小隧道截面的相对变形。



（a）基底未加固



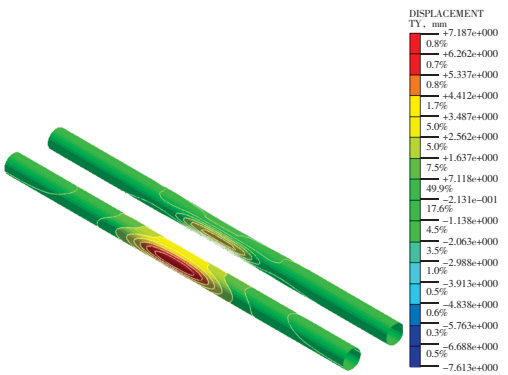
（b）全封底加固

图 3　隧道隆起变形云图

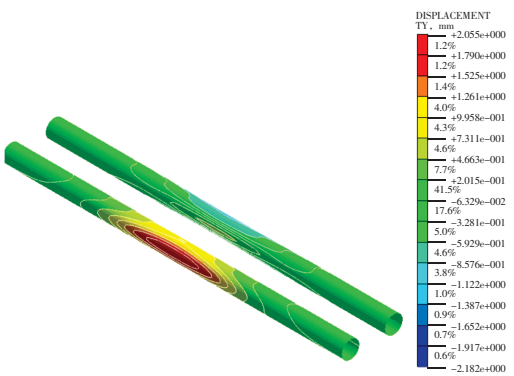
Fig. 3　Cloud map of tunnel bulge deformation

3.2　隧道水平变形

图 4 为两种加固方案时隧道的水平变形云图。基坑开挖至坑底后，两个区间隧道均产生指向基坑内的水平变形，基坑中心位置两隧道呈现靠拢趋势；水平变形规律与隆起变形相同，基坑中心位置隧道水平变形最大，向两侧基坑边缘过渡减小。基坑开挖深度最大处的左线隧道水平变形最大，基底未加固时左线隧道最大水平变形为 7.61 mm，采取全封底加固后减小至 2.18 mm，降低了 71.4%；隧道左、右拱腰呈现挤压收缩的水平变形，临近基坑侧拱腰水平变形最大，基坑中心侧拱腰水平变形最小，基底未加固时两侧拱腰水平变形之和为 11.71 mm，采取全封底加固后两侧拱腰水平变形之和为 2.46 mm。采取基底加固措施可显著抑制隧道的水平变形，减小隧道左、右拱腰水平位移差，基坑中心侧拱腰最大水平变形仅 0.28 mm，效果显著。这主要由于基底加固形成空间厚板体系作用于隧道顶部，与基坑支护结构协同受力，共同约束隧道结构整体变形以及隧道截面相对变形。



（a）基底未加固



（b）全封底加固

图 4　隧道水平变形云图

Fig. 4　Tunnel horizontal deformation cloud map

岩土力学

3.3 实测变形与计算结果对比

为验证计算模型的准确性，取左线隧道沿纵向的隆起变形计算与实测值进行对比分析，如图 5 所示。由图5 可以看出实测隧道隆起变形规律与计算结果基本一致，实测隆起值均大于模拟计算值，两者差值在远离基坑范围基本为 0，向基坑中心方向逐渐增加，在基坑开挖范围差值在 0.17 ~ 0.54 mm 范围。实测值大于计算值的主要原因是受外部施工作业影响、地层加固强度小于理论设计值、基坑回筑不及时等因素影响，故可以认为，计算结果与基坑实际变形基本吻合，模型参数选取准确、合理。

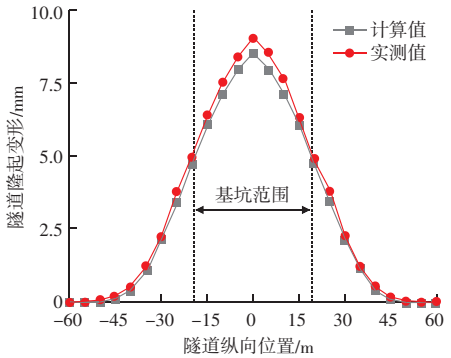


图 5 隧道隆起变形计算与实测值对比

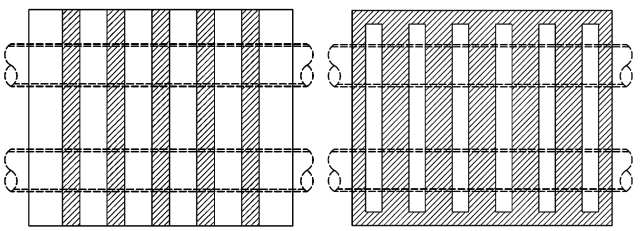
Fig. 5 Comparison between tunnel uplift calculation and measured values of tunnel uplift

4 基底加固方案对隧道变形影响

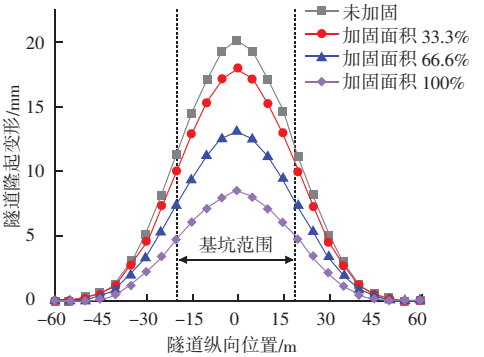
4.1 基底加固面积对隧道隆起变形影响

为探究基底加固面积对隧道隆起变形的影响，基底加固面积分别取 33.3%、66.6%、100%，加固深度为 8 m，基底加固面积对隧道隆起变形影响如图 6 所示。

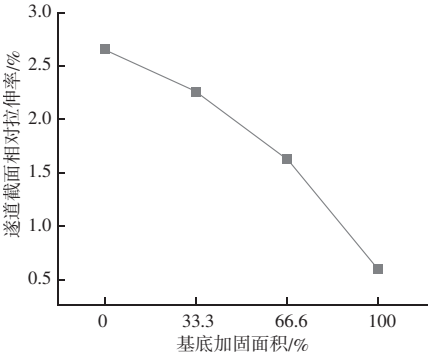
基底加固面积分别为 33.3%、66.6%、100% 时，隧道最大隆起变形分别为 17.93、13.09、8.51 mm，随基底加固面积增加，隆起变形逐渐减小，加固面积每增加 33.3%，隆起变形相比未加固的 20.15 mm 分别减小 11.0%、35.1%、57.8%。加固面积为



（a）加固面积 33.3%　（b）加固面积 66.6%



（c）隧道隆起变形



（d）隧道截面相对拉伸变化率

图 6 不同加固面积对隧道隆起变形影响

Fig. 6 The influence of different reinforcement areas on tunnel uplift deformation

33.3% 时，隆起变形降幅较小；随加固面积增大至 66.6%，隆起变形降幅迅速增大，说明基底加固面积越大，加固体的整体性越强，控制隧道隆起变形效果越佳。根据隧道隆起变形不大于 10 mm 限值的要求，基底加固应采取全封底加固方式。

基坑开挖后隧道竖向呈拉伸变形，水平呈压缩变形；随加固面积增大，截面相对拉伸率呈减小趋势。与未加固相比，加固面积为 33.3%、66.6%、100% 的截面相对拉伸率分别减小 15.4%、39.3%、77.9%；与加固面积为 33.3% 相比，加固面积为 66.6%、100% 的截面相对拉伸率减小幅度分别增加 8.6%、23.2%。可见，随加固面积增加，截面相对拉伸率减小幅度不断增大。

4.2 基底加固深度对隧道隆起变形影响

为探究基底加固深度对隧道隆起变形的影响，采取基坑全封底加固措施，基底加固深度分别取 2、4、6、8 m，不同基底加固深度时隧道隆起变形如图 7 所示。

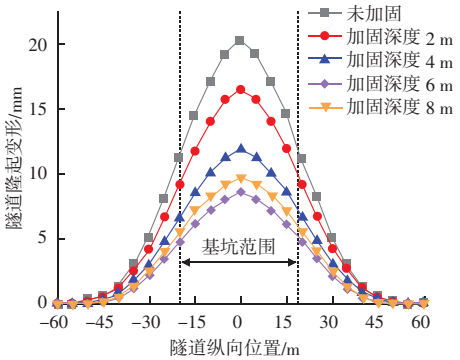


图 7　不同基底加固深度隧道隆起变形曲线

Fig. 7　Deformation curves of tunnel bulges with different base reinforcement depths

4 种加固深度隧道最大隆起变形分别为 16.36、11.83、9.68、8.51 mm，隆起变形相比未加固分别减小 18.8%、41.3%、51.9%、57.8%，随着加固深度增加隆起变形逐渐减小；同样，隆起变形降幅也逐渐减小，加固深度从 6 m 增加至 8 m，隆起变形仅减小 1.17 mm，增加坑底加固深度可增强抑制隧道隆起变形的能力。当加固深度达到一定深度后，继续增加加固深度对减小隧道隆起变形效果已不明显，工程经济性不佳，这种情况下，可进一步采取基坑分区、分块开挖等措施控制隧道隆起变形。

图 8 为不同基底加固面积、加固深度时隧道最大隆起变形曲线。不同基底加固面积时，隧道最大隆起变形随加固深度增加而减小，基底加固深度大于 4 m 后，最大隆起变化减小幅度变缓；加固深度由 2 m 增加至 8 m、加固面积为 33.3% 时，隆起变形减小 1.79 mm，加固面积为 66.6% 时隆起变形减小 4.80 mm，全封底加固时隆起变形减小 7.85 mm；基底加固面积由 66.6% 增加至 100%，隧道最大隆起位

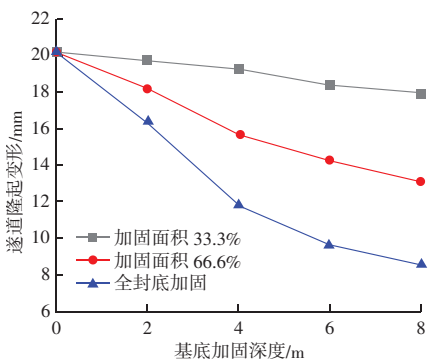


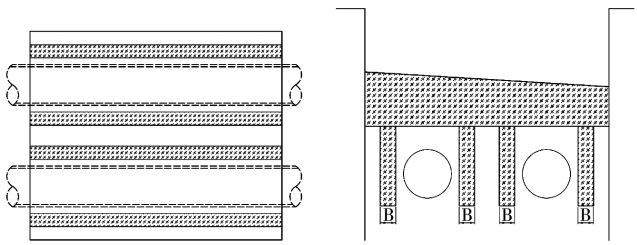
图 8　不同加固面积、深度时隧道最大隆起变形曲线

Fig. 8　Maximum uplift deformation curve of tunnel with different reinforcement areas and depths

移减小了 47.9%。由此可见，基底加固面积越大，增加加固深度对减小隧道最大隆起变形越明显，采用全封底加固、增加加固深度，隧道最大隆起变形降幅最明显。这主要由于采用全封底加固时，增加加固深度后加固体的整体刚度越大、抗变形能力更强，整个加固体中的应力分布更加均匀；未采取全封底加固时加固体之间存在非加固区，没有形成连续性的整体，无法有效协同受力控制隧道变形，故增加加固深度对控制隧道变形效果较差。

4.3　基底门式加固对隧道水平、隆起变形影响

基坑开挖卸载后，开挖范围支护结构受主动土压力作用，坑内土体受外侧主动土压力挤压产生被动土压力，在被动土压力作用下土体产生向基坑侧的水平变形，该水平变形将带动隧道产生水平位移；同时，由于上部地层卸载减小了隧道拱顶覆土压力，变相增大了隧道两侧土压力，使隧道产生水平向的压缩变形。为控制隧道水平变形，可对隧道两侧 1 m 外土体进行加固，加固深度至隧道底以下 1 m 位置，如图 9 所示，两侧地层加固与基底加固形成门式加固体系。取隧道两侧地层加固宽度 B 分别为 1、2、3 m，基底加固深度为 6 m，探究两侧地层不同加固宽度对隧道水平、隆起变形的影响。



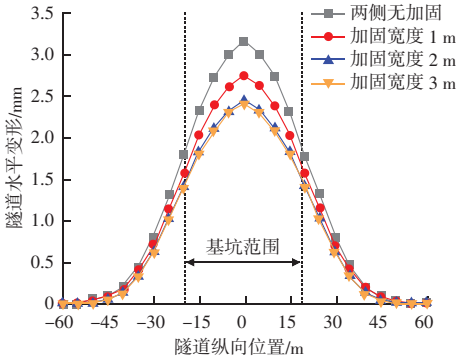
（a）平面布置　　（b）剖面布置

图 9　隧道两侧门式加固示意图

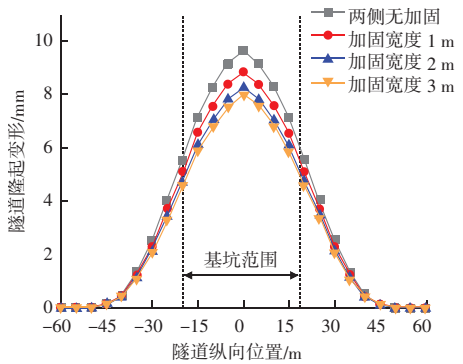
Fig. 9　Schematic diagram of portal reinforcement on both sides of the tunnel

图 10 为隧道两侧地层不同加固宽度时隧道的水平、隆起变形曲线。基坑开挖后，双线隧道外侧地层土压力使隧道产生向基坑侧的水平变形，采用 6 m 基底加固深度时，隧道最大水平变形为 3.16 mm，对隧道两侧地层加固后，隧道水平变形显著减小，1、2、3 m 三种加固宽度下最大水平变形分别为 2.75、2.46、2.42 mm，相比两侧未采取加固方案分别减小了 12.97%、22.15%、23.42%。可见，对隧道两侧地层采取加固措施可约束隧道沿纵向的水平变形。

加固宽度不大于 2 m 时，最大水平变形近似于线性减小；加固宽度大于 2 m 后，水平变形趋于稳定。



（a）水平变形



（b）隆起变形

图 10　隧道两侧不同加固宽度时隧道变形曲线

Fig. 10　Horizontal and vertical deformation curves of tunnels with different reinforcement widths on both sides

隧道两侧采取加固措施后，隧道隆起变形呈减小趋势，隆起变形随加固宽度增加而减小。两侧无加固及两侧加固宽度为 1、2、3 m 时最大隆起变形分别为 9.68、8.88、8.26、7.98 mm；与无两侧加固方案相比，两侧加固宽度分别为 1、2、3 m 时隧道最大隆起变形分别减小了 8.26%、14.67%、17.56%，可见随加固宽度增加，最大隆起变形呈减小趋势，加固宽度由 2 m 增加至 3 m，最大隆起变形仅减小 2.89%。基底加固深度为 8 m 时隧道最大隆起变形为 8.51 mm，相比基底加固深度 6 m + 宽 2 m 门式加固方案，隧道最大隆起变形增加了 0.25 mm。可见，采用门式加固方式约束隧道隆起变形相比基底加固具有一定优势。

综上，对隧道两侧土体采取加固，与基底加固体形成门式结构，可较好地约束隧道水平变形和隆起变形。隧道两侧加固体宽度为 1 m 时，由于其刚度相对较小，控制变形效果一般；当隧道两侧加固宽度为 2 m 时，其整体刚度有了较大提升，可与基底加固组成有效的门式加固体系，控制隧道变形最佳；隧道两侧加固宽度大于 2 m 后，隧道水平、隆起变形减小不再明显，故建议隧道两侧加固体宽度为 2 m。

5　结论

以某地道深基坑上跨区间隧道为研究对象，采用有限元分析方法，探究了基底采用不同 MJS 加固方案时隧道隆起、水平变形规律，得到以下主要结论：

（1）淤泥质地层中采用 MJS 基底加固措施可有效控制隧道隆起、水平变形，也可减小了隧道截面相对变形。

（2）采用三维有限元计算方法获取了基坑开挖期间隧道理论隆起变形值，与隧道实测隆起变形结果基本一致，有限元计算模型合理，可用于不同加固方案优化分析。

（3）相同加固深度下，隧道隆起变形随基底加固面积增大而减小，为满足隧道隆起变形限值要求，宜采取全封底加固方案。

（4）采用全封底加固方案，隧道隆起变形随基底加固深度增加而减小，基底加固达到一定深度后，继续增大加固深度对减小隆起变形效果变差。

（5）隧道两侧地层加固可与基底加固组成门式加固体系，控制隧道变形效果最佳，隧道两侧地层最佳加固宽度为 2 m。

参　考　文　献

[1] 韩嘉玮．基坑施工大面积卸荷对既有地铁区间隧道的影响分析［J］．黑龙江交通科技，2024，47（4）：143－146.

[2] 徐国元，黄思源．基坑开挖对下卧盾构隧道变形影响的计算分析［J］．重庆交通大学学报（自然科学版），2021，40（9）：78－85.

[3] 吴龙梁，王威，钟勇，等．软土深基坑开挖对下卧地铁隧道影响的实测分析［J］．桂林理工大学学报，2023，43（3）：436－441.

[4] 蔡宗洋，张戈，潘毫．软土地区地铁区间两侧深基坑对称开挖影响分析［J］．都市快轨交通，2023，36（4）：93－98，106.

[5] 赵伟，杨龙才，王炳龙，等．水泥搅拌桩施工引起邻近地层位移的监测分析［J］．地下空间与工程学报，2018，14（增刊 2）：869－873.

[6] 敖江忠，郑新江，李东，等．旋喷桩连

（下转第 168 页）

研究与应用

面冻融裂缝红外图像的精准检测，体现了良好的鲁棒性，推动智能道路维护技术的发展。

参 考 文 献

[1] 黄俊博，宁宝宽，李明烁，等. 既有裂缝混凝土的冻融劣化及损伤特性分析［J］. 工业建筑，2020，50（1）：142－147.

[2] 郭香蓉，李鸿. 一种基于集成学习的路面裂缝检测仿真算法［J］. 计算机仿真，2022，39（2）：121－125.

[3] 李太文，范昕炜. 基于 Faster R－CNN 的道路裂缝识别［J］. 电子技术应用，2020，46（7）：53－56，59.

[4] 马跃坤，李再帏，赵彦旭，等. 无砟轨道板表面裂缝的红外热成像检测方法［J］. 铁道科学与工程学报，2022，19（3）：579－587.

[5] 白锋，马庆禄，赵敏. 面向航拍路面裂缝检测的 AC－YOLO［J］. 计算机工程与应用，2025，61（1）：153－164.

[6] 赵志宏，何朋，郝子晔. 一种道路裂缝检测的变尺度 VS－UNet 模型［J］. 湖南大学学报（自然科学版），2024，51（6）：63－72.

[7] 张明星，徐健，刘秀平，等. 改进 U－Net 的路面裂缝检测方法［J］. 计算机工程与应用，2024，60（24）：306－313.

[8] 邓治林，罗仁泽，费越，等. 基于 FE－Unet 的机场道面裂缝检测［J］. 光电子. 激光，2023，34（1）：34－42.

[9] 龚芳媛，方冰杰，程雪佼，等. 基于改进 YOLOv5 的路面裂缝检测算法［J］. 大连理工大学学报，2024，64（3）：314－322.

[10] 李禹萱，宋伟东，孙尚宇，等. 基于改进 Swin－Transformer 的农村路面裂缝检测算法［J］. 北京交通大学学报，2024，48（5）：88－97.

[11] 刘震，顾兴宇，李骏，等. 探地雷达数值模拟与道路裂缝图像检测的深度学习增强方法［J］. 地球物理学报，2024，67（6）：2455－2471.

[12] 何礼. 基于深度学习的光学元件表面缺陷检测技术研究［D］. 西安：西安工业大学，2023.

[13] 孙朝云，马志丹，李伟，等. 基于深度卷积神经网络融合模型的路面裂缝识别方法［J］. 长安大学学报：自然科学版，2020，40（4）：1－13.

（上接第 66 页）

续施工引起的地表变形现场试验研究［J］. 地下空间与工程学报，2022，18（3）：982－988，996.

[7] 张子新，李佳宇. MJS 法地基处理技术综述与应用［J］. 土木建筑与环境工程，2017，39（6）：1－11.

[8] 姚志雄，夏华灿，吴波，等. MJS 工法桩在滨海地区软基加固工程中的应用［J］. 人民长江，2023，54（10）：141－149.

[9] 陈光辉，李永胜，赵建勋，等. MJS 加固桩在砂层地质施工技术研究［J］. 建筑结构，2023，53（增刊2）：2043－2045.

[10] 徐敏，王敬敬，徐国胜. MJS 工法桩加固施工对运营隧道的影响研究［J］. 地基处理，2023，5（增刊1）：131－137.

[11] 邵耀锋，何猷豪，郭健宝，等. MJS 加固范围对隧道和地表变形影响［J］. 建筑结构，2021，51（增刊2）：1402－1406.

[12] 王怀东，袁云辉，王二丽. MJS 工法在盾构上跨隧道工程中的应用研究［J］. 现代交通技术，2021，18（6）：22－27.

[13] 牛自强. MJS 工法与管幕法处理基坑上跨运营地铁扰动效应研究［J］. 铁道建筑技术，2022（3）：120－124.

[14] 张文博，张康，陈卫军. MJS 工法在富水砂层隧道密贴下穿既有车站工程中的应用［J］. 现代城市轨道交通，2018（10）：35－38.

[15] 王中兵，王自强. 承压富水软土地层中暗挖车站下穿运营车站的水平 MJS 加固［J］. 建筑施工，2022，44（7）：1489－1492.

[16] 王恩波，昝文博，张喆，等. 基坑开挖对下卧地铁隧道结构的扰动效应分析［J］. 甘肃科学学报，2024，36（5）：16－23.

（上接第 159 页）

[8] 金娇，高玉超，李锐，等. 有机蒙脱土改性沥青抗老化性及其分子模拟试验研究［J］. 中国公路学报，2022：1－19.

[9] 胡栋梁，顾兴宇，孙丽君，等. 基于量子化学的沥青热老化与紫外老化机理［J］. 交通运输工程学报，2023，23（2）：141－152.

[10] 屈鑫，丁鹤洋，汪海年. 道路沥青老化评价方法研究进展［J］. 中国公路学报，2022，35（6）：205－220.

[11] 袁浩，王黎明，宋子坤，等. 超声处置对 SBS 改性沥青抗疲劳和耐老化能力影响的分析［J］. 合成材料老化与应用，2024，53（4）：25－28，88.

[12] 黄开栈. 填料对 SBS 改性沥青涂盖料老化性能的影响［J］. 福建建材，2023（4）：11－13.

[13] 齐辉，吴银芳，徐懿梦，等. 沥青混合料动态模量预测模型构建研究［J］. 粉煤灰综合利用，2020，34（6）：79－83，134.

[14] VURAL KÖK B，GÜRÇAY ÖZDEMIR N. Performance evaluation of crumb rubber and bio－based polyurethane compound in terms of rheological and aging properties of asphalt binder［J］. Construction and Building Materials，2023，389：131759.

[15] XIANG H，HE Z，TANG H，et al. Effects of thermo－oxidative aging on the macrophysical properties and microstructure of asphalt［J］. Construction and Building Materials，2023，395：132315.