

非对称填土荷载诱发地铁变截面 隧道差异变形特征分析

郭 金, 焦奔康

(石家庄市轨道交通集团有限责任公司运营分公司, 石家庄 050011)

摘 要: 地表堆载导致地铁隧道产生一定的变形, 过大的变形影响地铁隧道安全运营。为研究地表非对称填土对变截面地铁隧道的影响, 以石家庄地铁某地下区间侧上方道路回填改造工程为背景, 建立马蹄形及箱形断面隧道结构有限元模型, 对道路回填施工中的地表沉降、隧道受力变形规律进行分析, 并与现场监测结果进行对比验证。进一步探讨隧道埋深、堆载大小、堆载尺寸等参数对下方变截面隧道的影响。结果表明: 在非对称填土作用下, 地表土体位移场近似表现为“V”形沉降, 马蹄形断面、箱形断面隧道区域地表土体最大沉降量分别为 15.85、27.17 mm, 隧道结构变形以竖向沉降为主, 水平变形较小, 相比于马蹄形截面隧道, 箱形截面隧道受地表堆载影响更为明显; 在马蹄形断面与箱形断面相交处隧道的变形量有一定突变, 该结合部位的隧道结构开裂、渗漏水问题需要在施工时进行密切监控; 堆载大小、堆载范围与隧道的竖向沉降呈正相关, 堆载中心与隧道轴线水平距离、隧道埋深与隧道的竖向沉降呈负相关, 堆载范围对隧道沉降的分布范围影响显著。当隧道埋深超过 24 m 或堆载中心线与隧道轴线之间的水平距离超过 50 m 时, 地表堆载对隧道的沉降几乎没有影响。

关键词: 地铁隧道; 偏压堆载; 数值模拟; 自动化监测; 变截面隧道

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)02-0112-08

Analysis of Differential Deformation Characteristics in Variable Cross-Section Metro Tunnels Induced by Asymmetric Backfill Loading

GUO Jin, JIAO Benkang

(Shijiazhuang Rail Transit Group Co., Ltd., Operations Branch, Shijiazhuang 050011)

Abstract: Surface loading can cause certain deformations in subway tunnels, and excessive deformation will affect the safe operation of subway tunnels. To study the influence of asymmetric surface filling on variable-section subway tunnels, a finite element model of horseshoe-shaped and box-shaped tunnel structures was established based on the road backfilling reconstruction project above the side of a certain underground section of Shijiazhuang Metro. The surface settlement and tunnel stress-deformation patterns during road backfilling construction were analyzed and compared with field monitoring results for verification. Furthermore, the effects of parameters such as tunnel burial depth, loading magnitude, and loading dimensions on the underlying variable-section tunnel were discussed. The results show that: under asymmetric filling, the surface soil displacement field approximately exhibits a “V”-shaped settlement; the maximum surface settlements in the tunnel areas of horseshoe-shaped and box-shaped sections are 15.85 mm and 27.17 mm, respectively; tunnel structural deformation is dominated by vertical settlement with relatively small horizontal deformation; compared with the horseshoe-shaped section tunnel, the box-shaped section tunnel is more

收稿日期: 2025-05-23 修回日期: 2025-12-26

第一作者: 郭金, 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为地铁运营管理, 249774135@qq.com

通信作者: 焦奔康, 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为地铁运营管理, 1491071534@qq.com

基金项目: 河北省重点研发计划项目(21317601D)

引用格式: 郭金, 焦奔康. 非对称填土荷载诱发地铁变截面隧道差异变形特征分析[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(2): 112–119.

Guo Jin, Jiao Benkang. Analysis of differential deformation characteristics in variable cross-section metro tunnels induced by asymmetric backfill loading[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(2): 112–119.

significantly affected by surface loading; the deformation of the tunnel at the intersection between the horseshoe-shaped and box-shaped sections shows a certain abrupt change, and cracking and water leakage issues in this junction area require close monitoring during construction; loading magnitude and loading range are positively correlated with tunnel vertical settlement, while the horizontal distance between the loading center and tunnel axis and tunnel burial depth are negatively correlated with tunnel vertical settlement; the loading range has a significant influence on the distribution range of tunnel settlement. When the tunnel burial depth exceeds 24 m or the horizontal distance between the loading centerline and tunnel axis exceeds 50 m, surface loading has almost no effect on tunnel settlement.

Keywords: subway tunnel; asymmetric surcharge loading; numerical simulation; automated monitoring; variable cross-section tunnel

随着城市轨道交通网络扩展和城市更新改造不断推进,涉及地铁区间的施工逐渐增多。在地铁隧道附近的桥涵回填、新建建筑物等施工,对周围土体产生附加应力,引发土体变形,进而导致地铁隧道位移场及应力场发生变化。随着隧道变形的加剧,可能会出现诸如接缝处开裂、渗漏水等问题,严重的变形则可能导致地铁无法安全正常地运营。因此,在地面堆载条件下,控制隧道变形对于确保地铁运营的安全性和可靠性至关重要。

近年来,国内外学者通过理论计算、室内试验、现场测量与有限元分析等手段,分析地表堆载对下卧隧道的影响。吕荔炫^[1]以福州地铁6号线区间隧道上方施工路基为背景,利用Midas有限元软件,对考虑流固耦合作用时软土的变形特性以及复合地基加固处理的效果展开分析。孙文波^[2]分析盾构隧道在地面堆载情况下的堆载位置与隧道埋深对盾构隧道管片变形的影响,得出不同影响因素作用下的隧道变形规律。邵华等^[3]通过现场测量,分析盾构隧道上方突发大量堆土对隧道结构造成的影响,提出及时卸载、堵漏及碎裂修补、采用芳纶布及钢环结构补强的结构整治措施。

但由于现场施工情况的复杂性,已有研究多聚焦于单一断面隧道,对于变截面隧道,实际情况可能更加复杂,现有研究成果不具备广泛适应性。本文依托石家庄地铁某区间侧上方道路回填改造工程,针对地表非对称填土荷载对下卧变截面地铁隧道的影响机制,构建三维有限元模型,并结合现场变形监测数据进行验证,系统揭示了地表沉降、变截面隧道差异变形的演化规律,研究成果可为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

1.1 项目背景

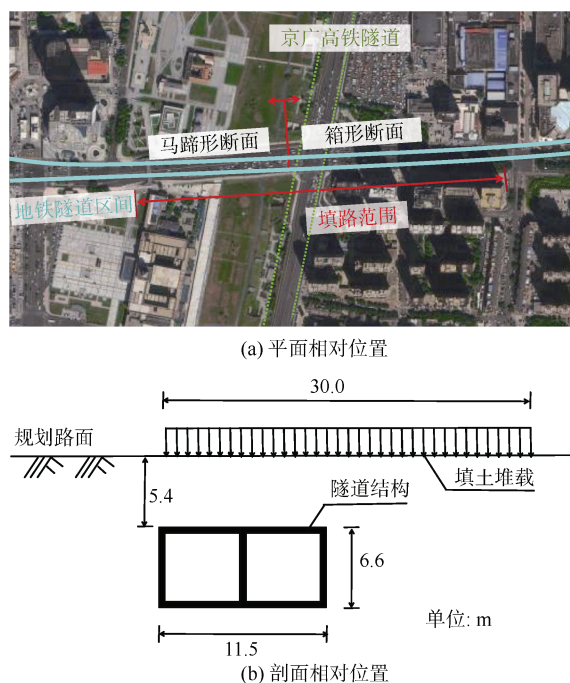
中山路道路回填改造工程位于石家庄地铁1号线某区间侧上方区域,改造里程K9+700~K10+200,长度500 m。其中K9+800~K10+100范围内原路面为四

孔箱形框架桥结构,框架桥上部为铁路设施,本项目采用轻质泡沫混凝土对框架桥范围进行回填,回填高度为0~8.2 m,回填宽度30 m。回填区域中心线与左线隧道中心线水平距离约10 m,与右线隧道中心线水平距离约22 m。

回填区域侧下方既有隧道结构中K9+800~K9+950里程段对应为马蹄形断面,K9+950~K10+100里程段对应为箱形断面。其中马蹄形断面高度约6.57 m,初支厚度250 mm,二衬厚度为300 mm。箱形断面为单层双跨结构,断面宽度约11.5 m,断面高度约6.6 m。顶板厚度为600 mm,底板厚度为800 mm,侧墙厚度为600 mm,中隔墙厚度为400 mm。回填改造工程与地铁区间位置关系如图1所示。

1.2 地质条件

根据现场钻探结果,本工程勘察范围内的土层由上向下依次为:人工填土层、黄土状粉质黏土层、砂土层、粉质黏土层、砂土层。地质剖面示意如图2所示。



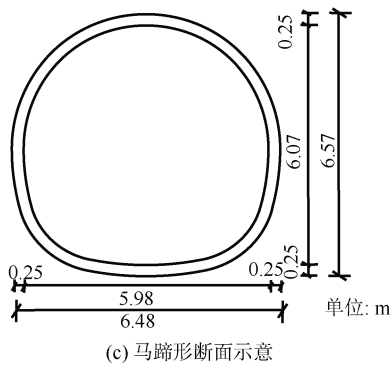


图 1 回填改造工程与地铁区间位置关系
Figure 1 Relationship between the backfill reconstruction project and the vertical position of subway section

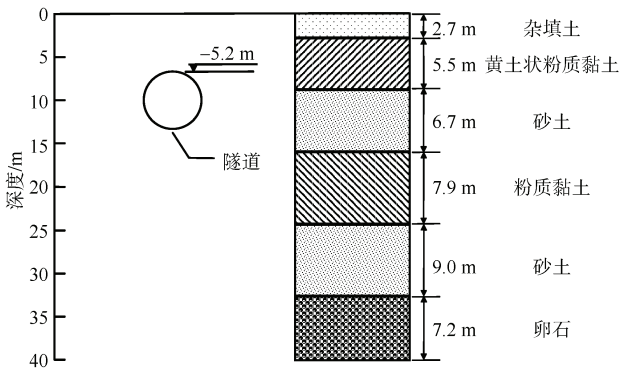


图 2 地质剖面示意
Figure 2 Schematic diagram of the geological section

项目位于中山路与胜利大街交叉口，现场管线较多，地质条件较为复杂，勘探孔最大深度为 39 m，受施工工艺限制，在勘察深度范围内未能实测到地下水位，经调查本场地周边水井资料及区域水文地质资料，本区域水位埋深约为 45 m，含水层为中砂层。

2 道路回填模拟分析

2.1 计算模型及参数

数值模拟考虑施工过程中的空间效应，初始条件是地铁区间结构已完成施工，计算分析地面堆载对周边土体及下方既有地铁结构的影响。为了确保三维模型有足够的计算精度，并减少计算收敛时间，本次计算对模型范围作出了一定的限定，有限元整体及隧道计算模型如图 3~4 所示，计算模型长度沿隧道走向 560 m，宽度方向垂直于隧道走向取 150 m，垂直方向上从地表以下取 40 m。简化地表填土为矩形荷载，填土荷载大小为 80 kPa。填土荷载长度 300 m，对应马蹄形隧道、箱形隧道区域各 150 m，填土荷载宽度 30 m。隧道底板埋深取 12 m，堆载中心线与左线隧道轴线之

间的水平距离为 10 m。

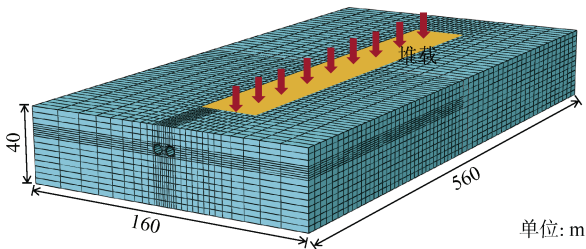


图 3 有限元计算模型
Figure 3 Finite element calculation model

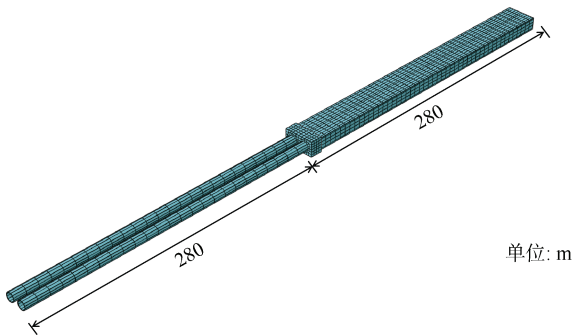


图 4 隧道计算模型
Figure 4 Tunnel calculation model

土体采用实体单元进行模拟，各土层物理力学参数如表 1 所示，结构参数为：弹性模量 32 500 MPa，泊松比 0.18，容量 25.0 kN/m³。边界条件设置为：在土体的底面保持固定，限制了水平向和竖向的位移，土体的左右两侧限制 X 方向上的位移，土体前后两侧限制 Z 方向上的位移。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

土层名称	泊松比	容重/ kN·m ⁻³	内摩擦角 (快剪)/(°)	黏聚力 (快剪)/kPa	弹性模量/ MPa
杂填土	0.31	16.5	10	8	—
黄土状 粉质黏土	0.30	19.3	18	30	7.8
砂土	0.32	19.5	28	0	15
粉质黏土	0.28	19.3	16	26	10.1
砂土	0.25	18.8	26	0	25
卵石	0.20	21.1	40	0	60

模拟分析步骤如下：①初始状态地应力平衡；②开挖隧道范围土体并激活衬砌单元；③施加地表荷载。

2.2 计算结果分析

2.2.1 土层位移场

在地表堆载作用下土体整体变形云图如图 5 所示。

在马蹄形断面与箱形断面相交处,地表的沉降量达到最大,对应里程为 K9+950。其中马蹄形断面隧道对应区段地表土体最大沉降量为 15.85 mm,箱形断面隧道对应区段地表土体最大沉降量为 27.17 mm,因此在相同地表堆载作用下,箱形断面隧道受到的影响更为明显。

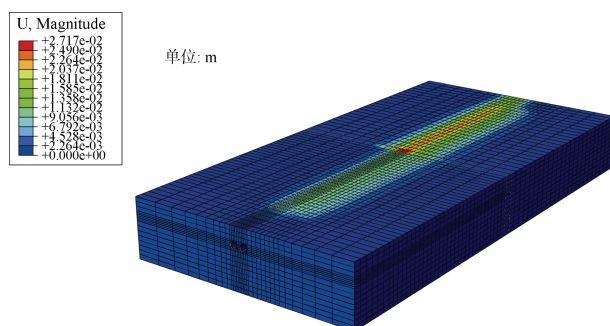


图 5 土体变形云图

Figure 5 Soil deformation contour plot

如图 6 所示,在地表堆载沉降最大断面 K9+950 处,土体的位移场近似表现为“V”形沉降,越靠近堆载的土体沉降量越大,距离堆载较远土体沉降量趋于平缓。对比不同截面隧道区域堆载两侧土体沉降值发现:在有隧道一侧的土体位移等值线相较另一侧更为陡峭,因此隧道的存在对地表附加应力在土体的传播起到一定的加筋阻拦作用,且马蹄形隧道加筋阻拦效果较箱形隧道更佳。

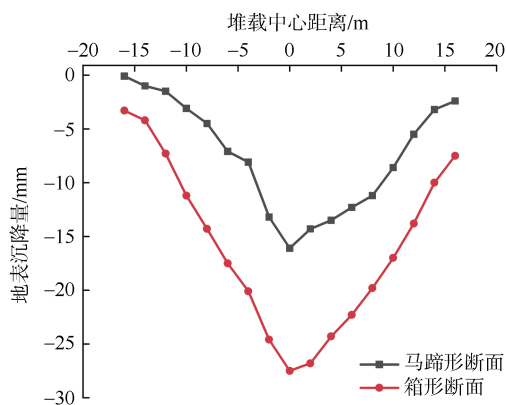


图 6 K9+950 处地表沉降曲线

Figure 6 Surface subsidence curve at K9+950

2.2.2 隧道结构变形情况

通过图 7~8 分析不同截面的隧道变形情况发现:隧道沉降值随其与荷载中心水平距离的减小而逐渐增大,在两断面相交处隧道沉降量达到最大,为 3.68 m,对应里程为 K9+950。且在该交接处隧道轴线方向的不均匀沉降最为明显,因此该结合部位的隧道开裂、渗

漏水等问题应在施工过程中进行密切监控。

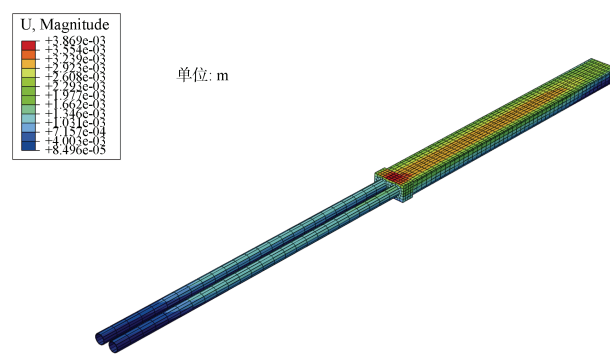


图 7 隧道位移云图

Figure 7 Tunnel displacement contour plot

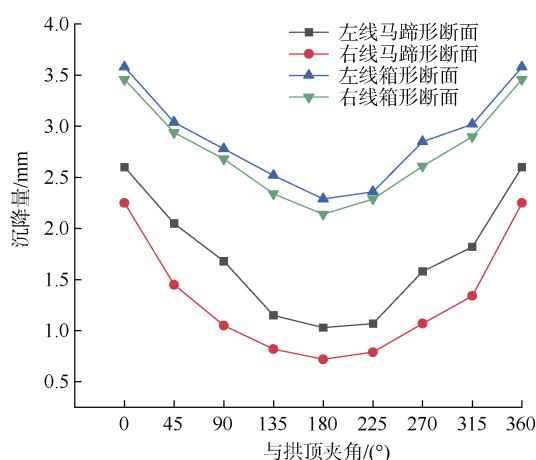


图 8 K9+950 处隧道截面最大沉降量

Figure 8 Maximum settlement of each section at K9+950

地面堆载对于箱形断面隧道的影响更为显著,荷载影响范围内马蹄形断面隧道整体沉降量小于箱形断面隧道,右线隧道整体沉降量小于左线隧道。以距离荷载中心 30 m 处为例,左线马蹄形断面隧道区间拱顶最大沉降量为 2.62 mm;箱形断面隧道拱顶最大沉降量为 3.58 mm。右线马蹄形断面隧道区间拱顶最大沉降量为 2.25 mm;箱形断面隧道拱顶沉降量为 3.46 mm。

如图 9 所示,随着地表非对称堆载的施加,隧道结构在堆载范围内发生了整体下沉和变形,马蹄形截面及箱形截面隧道均在竖向发生压缩,水平向向外拱出。两种截面隧道变形均以竖向沉降为主,水平向变形较小。变形最大值和最小值分别对应隧道衬砌结构顶部和底部,且隧道有向远离堆载一侧轻微转动的趋势。以左线 K9+920 处马蹄形断面隧道为例,竖向最大变形位于拱顶处,最大值为 2.62 mm。水平向最大变形位于左拱腰处,最大值为 0.35 mm,水平向最大变形量约为竖向最大变形量的 13%。

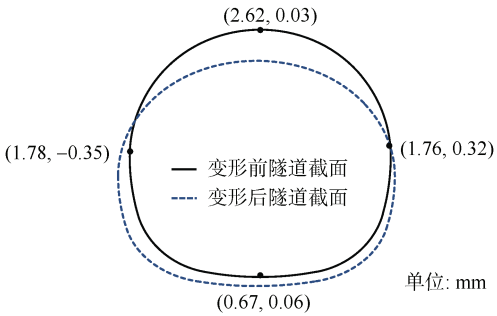


图 9 K9+920 处马蹄形隧道变形示意
Figure 9 Schematic diagram of the deformation of the horseshoe-shaped tunnel at K9+920

2.3 隧道结构受力情况

随着地表非对称堆载的施加，各截面隧道轴力均有不同程度的增加，其中马蹄形隧道轴力增加值较箱形隧道轴力增加值更高。如图 10 所示，以距离荷载中心 30 m 处为例，左线马蹄形断面隧道在右拱肩 45°位置处的轴力增量最大，达到 420 kN，在左拱肩 315°位置处的轴力增量最小，为 20 kN；箱形隧道在右边墙 90°位置处的轴力增量最大，达到 160 kN，在左边墙 315°位置处轴力增量最小，为 10 kN。

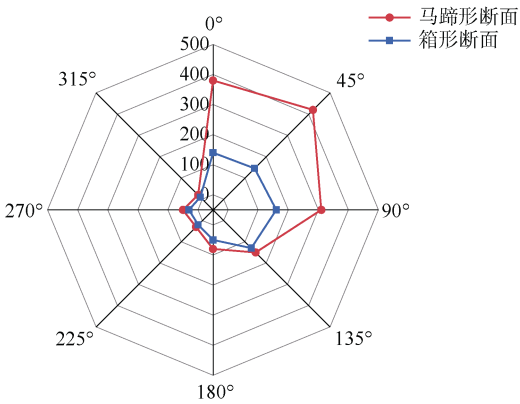


图 10 隧道轴力增量
Figure 10 Tunnel axial force increment

2.4 计算值与实测值对比

在道路回填工程中，对地铁隧道左、右线分别进行管片结构竖向位移、水平位移跟踪检测，监测范围为 K9+700~K10+200，共计 500 m，每 10 m 布置一个监测断面。各断面测点布置如图 11 所示。

2.4.1 隧道沉降累计变形量分析

如图 12 所示，隧道纵向沉降整体呈“V”形，其中左线隧道实地监测最大沉降量为 4.21 mm，右线隧道实地监测最大沉降量为 4.12 mm，左、右线隧道沉降变形规律较为一致，但因右线距离回填位置较左线远，

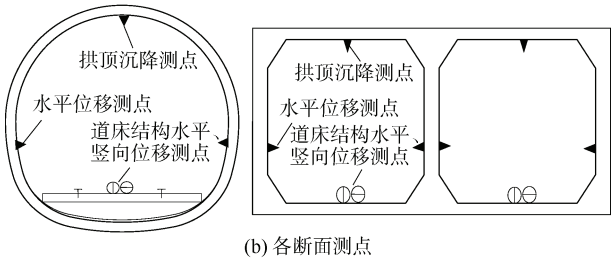
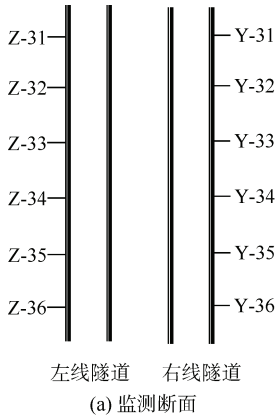


图 11 监测点布置
Figure 11 Layout of monitoring points

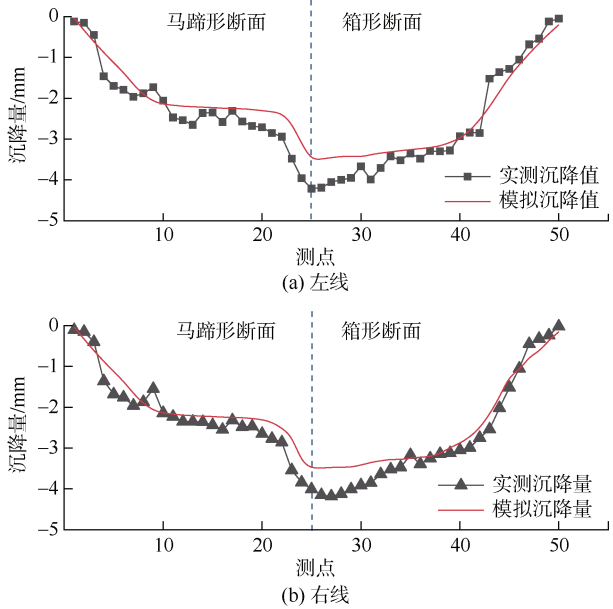


图 12 隧道沉降变形曲线
Figure 12 Tunnel settlement deformation curve

项目施工扰动产生的沉降量略小于左线。实地监测数据与模拟结果变化情况基本保持一致，但由于数值模型的假设条件过于理想化，使得模拟值比监测数值稍小。

马蹄形断面隧道沉降量整体稍小于箱形断面沉降量，隧道最大沉降位置为变截面结合部位前后，该处的隧道沉降值变化率最大，因此该结合部位的隧道结

构开裂、渗漏水问题需要在施工时进行密切监控。

2.4.2 隧道水平变形

如图 13 所示,左线隧道实地监测水平最大位移量为 0.41 mm,右线隧道实地监测水平最大位移量为 0.38 mm,隧道水平位移量整体呈现先增长后趋于稳定、最后逐渐缩小的趋势。马蹄形断面隧道与箱形断面隧道之间的水平位移量无明显差距。实地监测数据与模拟结果变化情况基本保持一致。

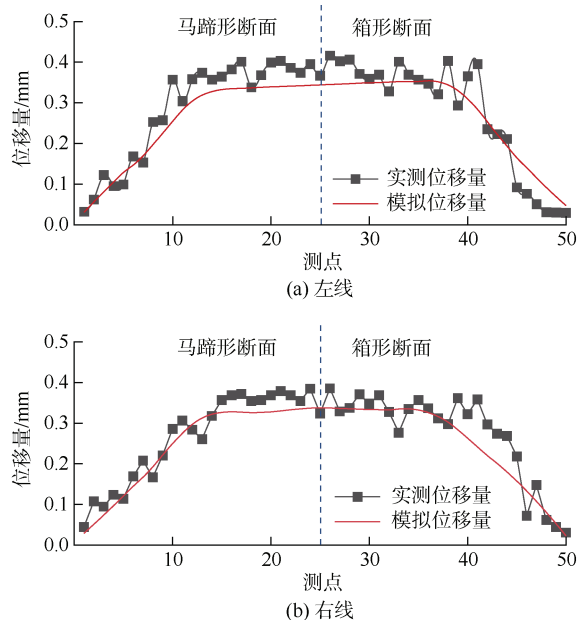


图 13 隧道水平变形曲线

Figure 13 Horizontal deformation curve of the tunnel

3 参数敏感性分析

为揭示非对称填土荷载作用下变截面隧道的变形响应规律。本章通过调整隧道埋深、地表堆载大小及堆载作用位置等关键参数,开展参数敏感性分析。其中标准工况为隧道底板埋深 12 m,堆载大小 80 kPa,堆载中心线与隧道轴线水平距离 10 m,矩形堆载总长度 300 m,堆载宽度为 30 m。与堆载中心水平距离 -150~0 m 范围内对应为马蹄形断面隧道,与堆载中心水平距离 0~150 m 范围内对应为箱形断面隧道。

3.1 隧道埋深

为探究地表非对称填土荷载对不同埋深条件下变截面隧道变形的影响,将隧道底板埋深分别设置为 8、12、16、20、24 m 进行计算,其余参数保持不变,隧道沉降变形曲线如图 14 所示。

由图 14 可知,随着隧道埋深的增加,隧道沉降逐渐减小,且减小速率逐渐放缓。地面堆载对浅埋隧道的

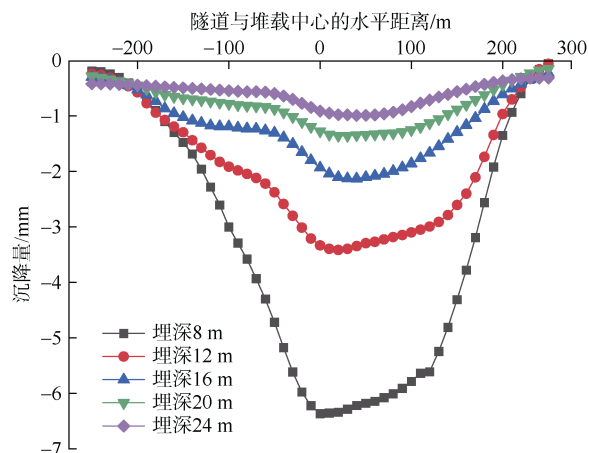


图 14 隧道沉降量随埋深的变化曲线

Figure 14 The curve of tunnel settlement versus burial depth

影响程度远大于其对深埋隧道的影响。当隧道底板埋深为 8 m 时,隧道沉降量最大,达到 6.34 mm,超过预警值,沉降最大位置为马蹄形断面与箱形断面相交处,隧道沉降量由相交处向两端逐渐降低,其中马蹄形隧道沉降量下降速度更快;当隧道埋深增加至 16 m 时,隧道最大沉降量减小为 2.12 mm,最大沉降量减小约 66.6%。当隧道底板埋深大于 24 m 时,隧道最大沉降小于 1 mm,此时地面堆载对隧道的影响可忽略不计。隧道埋深的变化对隧道沉降分布范围影响较小。

3.2 堆载大小

为探究不同堆载大小对变截面隧道变形的影响,将地表堆载大小分别设置为 40、60、80、100、120 kPa 进行计算,其余参数保持不变,隧道沉降变形曲线如图 15 所示。由图 15 可知,隧道沉降变形量与堆载大小

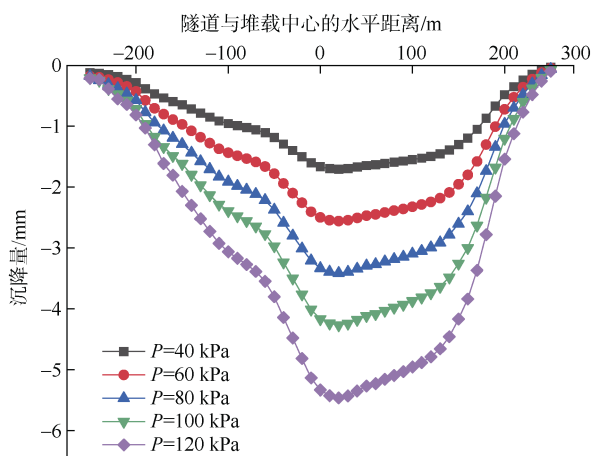


图 15 隧道沉降量随堆载大小的变化曲线

Figure 15 The curve of tunnel settlement versus surcharge magnitude

基本呈线性正相关。当堆载大小为 40 kPa 时,隧道最大沉降量为 1.70 mm;当堆载大小增加至 80 kPa 时,隧道最大沉降量为 3.43 mm,最大沉降量增加约 102%;当堆载大小增加至 120 kPa 时,隧道最大沉降量为 5.46 mm,最大沉降量增加约 295.9%。堆载大小的变化对隧道沉降的分布范围影响较小。

3.3 堆载位置

为探究不同堆载位置对变截面隧道变形的影响,将堆载中心与隧道轴线水平距离分别设置为 5、10、20、30、40、50 m 进行计算,其余参数保持不变,隧道沉降变形曲线如图 16 所示。随着堆载中心与隧道轴线偏移距离的增大,隧道沉降量逐渐减小,且减小速率逐渐变缓,最终趋于稳定。当堆载中心与隧道轴线的偏移距离为 5 m 时,隧道最大沉降量为 5.79 mm;当偏移距离增加至 10 m 时,隧道最大沉降量减小为 3.41 mm,最大沉降量减小约 41%。当堆载的偏移距离达到 50 m 时,隧道的最大沉降量仅为 0.32 mm,此时地面堆载对隧道的影响可忽略不计。

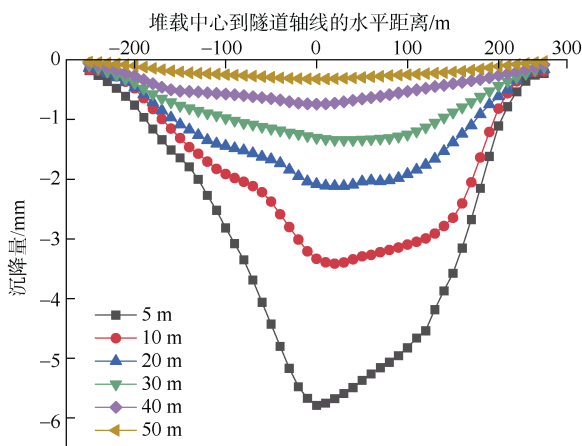


图 16 隧道沉降量随堆载位置的变化曲线

Figure 16 The curve of tunnel settlement versus surcharge location

3.4 堆载范围

为探究不同堆载尺寸对变截面隧道变形的影响,将地表堆载长度范围分别设置为 150、200、250、300、350 m 进行计算,其余参数保持不变,隧道沉降变形曲线如图 17 所示。堆载范围对隧道沉降的分布范围影响显著,隧道沉降范围随着堆载长度的增大而不断扩大,且变大速率逐渐变缓。当堆载范围为 150 m 时,隧道最大沉降量为 1.61 mm;当堆载范围增加到 350 m 时,隧道的最大沉降量增加到 3.81 mm。

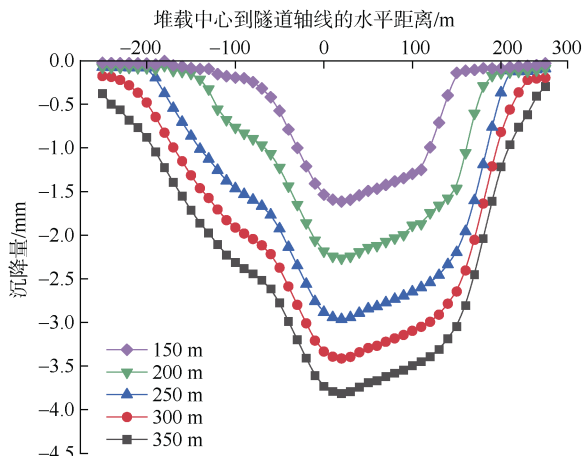


图 17 隧道沉降量随堆载范围的变化曲线

Figure 17 The curve of tunnel settlement versus surcharge extent

4 结论

通过有限元数值模拟和实地变形监测手段,系统分析地表非对称填土对变截面地铁隧道的影响,主要得出以下结论。

1) 在非对称填土作用下,隧道变形以竖向沉降为主,水平向变形较小,截面变形的最大值和最小值分别对应衬砌结构顶部和底部,隧道有向远离堆载一侧轻微转动的趋势。相比于马蹄形截面隧道,箱形截面隧道受地表堆载影响更为明显。

2) 马蹄形断面与箱形断面相交处隧道变形量有突变,该结合部位的隧道结构开裂、渗漏水问题需要在施工时进行密切监控。

3) 堆载大小、堆载范围与隧道的竖向沉降呈正相关,堆载中心与隧道轴线水平距离、隧道埋深与隧道的竖向沉降呈负相关,堆载范围对隧道沉降的分布范围影响显著。当隧道埋深超过 24 m 或堆载中心线与隧道轴线之间的水平距离超过 50 m 时,地表堆载对隧道的沉降几乎没有影响。

参考文献

- [1] 吕荔炫. 软土路基堆载下既有隧道变形特性分析[J]. 路基工程, 2019(3): 125-129.
Lv Lixuan. Deformation characteristics analysis for existing tunnel under surcharge preloading of subgrade in soft soil foundation[J]. Subgrade engineering, 2019(3): 125-129.
- [2] 孙文波. 地面堆载对盾构隧道变形影响的有限元分析[J]. 甘肃科技, 2018, 34(16): 75-76.
Sun Wenbo. Finite element analysis for influence of ground

- surchage on shield tunnel deformation[J]. Gansu science and technology, 2018, 34(16): 75-76.
- [3] 邵华, 黄宏伟, 张东明, 等. 突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1036-1043.
- Shao Hua, Huang Hongwei, Zhang Dongming, et al. Case study on repair work for excessively deformed shield tunnel under accidental surface surcharge in soft clay[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2016, 38(6): 1036-1043.
- [4] 魏井申, 柴天建, 郭文杰, 等. 基于能量法的地表堆载引起邻近隧道沉降研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(6): 28-34.
- Wei Jingshen, Chai Tianjian, Guo Wenjie, et al. Study on settlement of adjacent tunnel caused by surface surcharge based on energy method[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(6): 28-34.
- [5] 李军华, 姜峰林. 路基填筑施工和运营对下伏正交地铁的影响[J]. 路基工程, 2024(3): 131-137.
- Li Junhua, Jiang Fenglin. Influence of subgrade filling construction and operation on the underlying orthogonal subway[J]. Subgrade engineering, 2024(3): 131-137.
- [6] 朱旻, 陈湘生, 夏长青, 等. 地面堆载下盾构隧道结构韧性演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 35-44.
- Zhu Min, Chen Xiangsheng, Xia Changqing, et al. Resilience evolution of shield tunnel structures under ground surcharge[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2024, 46(1): 35-44.
- [7] 王露露, 丁爽, 黄磊, 等. 地面堆载作用下既有隧道的工作状态[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5764-5769.
- Wang Lulu, Ding Shuang, Huang Lei, et al. Working state of existing tunnel under ground surcharge[J]. Science technology and engineering, 2023, 23(13): 5764-5769.
- [8] 张芳, 王露露, 朱云桂, 等. 地面堆载作用下盾构隧道结构变形分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(8): 3474-3481.
- Zhang Fang, Wang Lulu, Zhu Yungui, et al. Deformation analysis of shield tunnel structure under ground loading[J]. Science technology and engineering, 2023, 23(8): 3474-3481.
- (编辑: 王艳菊)

(上接第 80 页)

参考文献

- [1] 地铁设计规范: GB50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [2] 地下铁道工程施工标准: T51310—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [3] 谭永辉, 李小龙, 曾宏晖. 面向隧道衬砌渗漏识别的深度学习方法综述[J]. 北京测绘, 2024, 38(7): 949-959.
- Tan Yonghui, Li Xiaolong, Zeng Honghui. A review of deep learning methods for tunnel lining leakage identification[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2024, 38(7): 949-959.
- [4] 戴保华. 基于YOLOv5的施工振动邻近区域房屋裂缝智能检测[J]. 建材技术与应用, 2024(5): 9-12.
- Dai Baohua. Intelligent detection of house cracks in the vicinity of construction vibrations based on YOLOv5[J]. Research & application of building materials, 2024(5): 9-12.
- [5] 傅金阳, 王浩宇, 谢纪辰, 等. 基于全景展开图像的水工隧洞渗水侵蚀病害快速检测方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(10): 1971-1981.
- Fu Jinyang, Wang Haoyu, Xie Jichen, et al. Rapid detection methods for seepage and erosion diseases in hydraulic tunnels using panoramic image[J]. Tunnel construction, 2024, 44(10): 1971-1981.
- [6] 桂佳扬, 王顺吉, 周正康, 等. 基于改进YOLOv8n的隧道内异物检测算法[J]. 计算机应用, 2025, 45(2): 655-661.
- Gui Jiayang, Wang Shunji, Zhou Zhengkang, et al. Tunnel foreign object detection algorithm based on improved YOLOv8n[J]. Journal of computer applications, 2025, 45(2): 655-661.
- [7] 韦选万, 余金凤, 李小莲, 等. 视觉监测与机器学习在地铁隧道自动化监测中的应用研究[J]. 广西水利水电, 2024(6): 148-153.
- Wei Xuanwan, Yu Jinfeng, Li Xiaolian, et al. Research on application of visual monitoring and machine learning in subway tunnel automatic monitoring[J]. Guangxi water resources & hydropower engineering, 2024(6): 148-153.
- (编辑: 王艳菊)