

DOI: 10.7672/sgjs2026030096

超大直径盾构隧道下穿铁路路基变形影响分析*

吕计瑞¹, 何剑光¹, 邹小春¹, 崔明²

(1. 中交隧道工程局有限公司, 北京 100024; 2. 中交一公局集团有限公司, 北京 100024)

[摘要] 大直径盾构隧道下穿施工会引起隧道周围土层变形,使城市既有道路或铁路发生沉降。依托北京市东六环改造工程,针对盾构隧道下穿既有铁路线的特级风险源,采用现场实测与有限元模拟相结合的方法,考虑同步注浆浆液硬化过程,探讨盾构隧道穿越施工对地表沉降及既有铁路路基变形的影响。研究表明,随着盾构隧道的掘进,既有铁路路基沉降现象逐渐显现,路基中心区域沉降最显著,两侧沉降相对较小。随着同步注浆强度的增加,地表整体沉降及最大沉降均呈明显下降趋势,盾构隧道穿越过程中保证合理的同步注浆强度,能够有效控制地表及铁路路基沉降。地表沉降实际监测数据与模拟预测结果较吻合,建立的模型准确可靠。

[关键词] 隧道;盾构;路基;变形;注浆;监测

[中图分类号] U45

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0096-07

Analysis on the Influence of Railway Subgrade Deformation Caused by the Undercrossing of Super-large Diameter Shield Tunnel

LÜ Jirui¹, HE Jianguang¹, ZOU Xiaochun¹, CUI Ming²

(1. CCCC Tunnel Engineering Bureau Co., Ltd., Beijing 100024, China; 2. China First Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: The undercrossing construction of large diameter shield tunnel will cause the deformation of soil around the tunnel, which will lead to the settlement of existing roads or railways in the city. Based on the reconstruction project of the East Sixth Ring Road in Beijing, this paper adopts the method of field measurement and finite element simulation to discuss the influence of shield tunnel undercrossing construction on surface settlement and deformation of existing railway subgrade by considering the hardening process of synchronous grouting slurry, aiming at the special risk source of shield tunnel undercrossing existing railway line. The research results show that with the excavation of the shield tunnel, the settlement of the existing railway subgrade gradually appears, the settlement of the central area of the subgrade is the most significant, and the settlement on both sides is relatively small. With the increase of synchronous grouting strength, the overall settlement and maximum settlement of the surface show a significant downward trend. In the process of shield tunnel undercrossing, reasonable synchronous grouting strength can be ensured, which can effectively control the settlement of surface and railway subgrade. The actual monitoring data of surface settlement are in good agreement with the simulation prediction results, and the established model is accurate and reliable.

Keywords: tunnels; shields; subgrade; deformation; grouting; monitoring

0 引言

随着我国轨道交通建设新规划的全面铺开,各大城市纷纷致力于完善其轨道交通网络,促使交通网络日益密集化。伴随技术革新与经济腾飞,城市

轨道交通线路正稳步向地下空间更深处拓展。在此进程中,盾构施工法凭借其卓越的安全性能、高效作业能力及对环境的低扰动特性,已成为轨道交通建设领域备受青睐的施工技术之一。

作为现代城市新建市政隧道工程的重要构成,盾构隧道在施工过程中不可避免地需穿越既有铁路与道路结构。穿越既有道路段时,盾构掘进作业

* 国家重点研发计划(2017YFC0805305)

[作者简介] 吕计瑞,高级工程师,E-mail:547271972@qq.com

[收稿日期] 2025-09-10

会扰动其上方地层,打破原有地质力学平衡。如果施工控制策略不当,易导致地层沉降,进而诱发路面开裂、变形、塌陷、隆起等破坏现象,甚至影响周边挡土结构的稳定性。此外,此类下穿作业还会对邻近地层及既有隧道结构产生扰动,引发过量变形风险。因此,在盾构隧道下穿既有设施施工过程中,须采取科学合理的施工措施与监控手段,以确保工程安全顺利进行。

当前,在大直径盾构隧道穿越作业对既有结构影响方面,已有学者运用理论探讨、数值建模、物理模型试验等多种手段,深入研究了由此类施工引发的地层变形机理及相应控制措施。尽管当前研究成果已提高了相关施工技术的成熟度,但在大直径盾构近距离穿越施工的具体技术细节及其对运营隧道影响的深入分析方面,仍有进一步探索与完善的空间。

本文以北京市东六环(京秦高速至潞苑北大街段)改扩建项目中盾构隧道下穿京秦铁路工程为依托,利用FLAC 3D软件建立了盾构隧道下穿京秦铁路精细化数值仿真模型。通过对模拟结果与现场沉降观测数据的系统性对比分析,深入探讨了盾构掘进过程中上部铁路路基沉降演变规律及盾构隧道自身变形特性。进一步地,通过细致对比现场实测沉降数据与数值模拟预测值,发现二者间差异较小,验证了所建数值模型的高精度与可靠性。

1 工程概况

1.1 项目概况

北京市东六环(京秦高速至潞苑北大街段)改扩建项目南端始于京秦高速公路以南约2km处,北端延伸至潞苑北大街,项目总里程达16km,严格依据高速公路建设标准进行规划,行车速度设定为80km/h,以确保道路通行的高效与安全。整个工程线路布局精心规划,区分为直接拓宽区段与地下化改造区段。自项目起点至京津公路南侧,约4.9km长的路段被设计为直接拓宽区段,此区段内标准横断面将由原有的双向4车道结构向两侧扩展,最终

形成双向6车道。地下化改造区段长约9.6km,该区段自京津公路之南延伸至潞苑二街以北,横断面设计如图1所示,展现了该区段独特的构造特点与规划布局。

地下化改造区段采用分离式隧道与既有六环路相连,此段路径始于张采路以北,随后以渐进下沉的方式,连续横穿京津公路、通三铁路、滨河大道、北运河等关键交通干线及自然水系,还跨越了广渠路、地铁6号线、京秦铁路、通胡路等重要交通与基础设施节点,同时穿越减河、通燕高速公路及京榆旧路等关键地带,最终在京榆旧路之北约定位置隧道逐步抬升,无缝衔接至地面交通系统,整体线路布局如图2所示。此外,自潞苑二街北延至项目终点潞苑北大街约1.5km路段,同样采用了直接加宽的设计策略,其拓宽形式与项目南端的直接加宽段保持一致,确保了全线设计的连贯性与统一性。

1.2 工程地质与水文地质条件

工程所在地位于北京市东南隅的通州区,该区域坐落于冲洪积平原之上,地势平坦辽阔,自西北方向缓缓向东南方向倾斜。第四纪沉积地层厚度展现出明显的东增西减趋势,地层岩相分布从山地向平原过渡时,表现出鲜明的阶段性特征,即在市区西部的古河流冲洪积扇顶端及其上中段,地层主要由粗厚的砂土层及卵砾石层主导,向东推进至冲洪积扇的中下段区域转变为黏性土、粉土与砂土、卵砾石等多种类型地层相互交织的复杂沉积结构。此外,地表以下9.0~10.0m深度处达潜水层,隧址区域内砂层中蕴藏着多层承压水层,对工程建设造成一定影响。

1.3 下穿京秦铁路隧道节点相对位置关系

盾构隧道右线LYK10+843.000—LYK10+876.000段约33m范围下穿京秦铁路路基,隧道与路基间平面交角约为50°,隧道覆土厚度约58m,地下水埋深约13m。影响段起点里程距京秦铁路上行线平面垂直距离约为53m,终点里程距京秦铁路下行线平面垂直距离约为50m。下穿段铁路轨面标

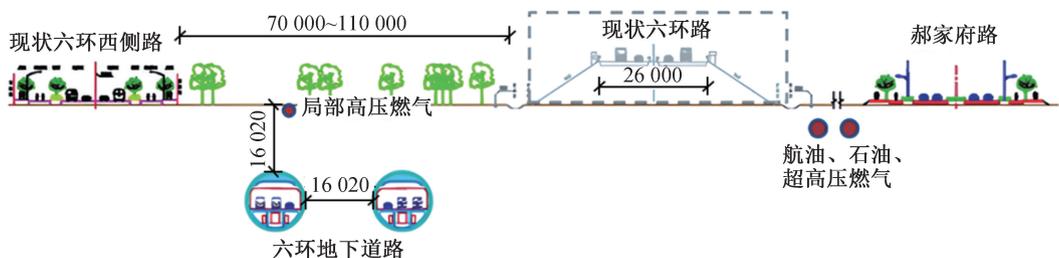


图1 地下化改造区段横断面

Fig. 1 Cross-section of the underground reconstruction section



图 2 地下化改造区段整体线路布局

Fig. 2 Overall route layout of the underground reconstruction section

高约为 22.860m, 盾构区间轨面标高约为 -45.600m, 区间结构顶面与铁路轨面垂直净距约为 58m ($>2.0D$, D 为隧道直径)。参照 GB 50652—2011《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》, 根据 DB11/1067—2014《城市轨道交通土建工程设计安全风险评估规范》, 盾构隧道下穿京秦铁路, 环境风险分级为“特级”。

2 数值模拟分析

2.1 基本假定

在模型建立阶段, 设定了以下假设条件以简化分析过程并确保逻辑严谨性: ①假定水位线之下的土体均为饱和状态, 且其几何形态规整, 沿水平方向呈均匀分布特性, 便于后续计算与模拟; ②地层在受到外力作用时, 其变形行为被限定在弹塑性范畴内, 表现为各向同性, 在此基础上, 岩土材料本构关系采用弹性模型与莫尔-库仑塑性模型相结合的方式描述, 以更准确地反映其力学特性; ③盾构掘进过程被简化为沿水平隧道轴线直线进行。

2.2 模型建立

为深入探究盾构隧道穿越京秦铁路过程中地表及路基沉降特性, 本研究采用 FLAC 3D 软件建立了针对该穿越工程的精确数值分析模型, 严格依据工程实际工况进行模拟, 以精确展现盾构掘进全过程及其影响。

鉴于计算边界条件的限制与计算能力的考量, 建立的数值模型长 116m、宽 80m、高 87m, 以全面覆盖并准确反映关键影响区域(见图 3)。京秦铁路路基横断面宽度为 33m, 高度为 2.86m, 与盾构隧道形成 50° 的平面交叉角。本工程盾构隧道设计开挖直径达 16.07m, 采用外径 15.6m、内径 14.1m 的管片结构, 每环宽度为 2m。结合实际施工情况, 注浆层厚度设定为 5m。为便于分析, 本研究未对盾构管片

进行分块处理, 而是将其视为整体进行分析。在模型边界条件设置上, 模型底部采用了完全固定的约束方式, 以确保基础的稳定性; 模型前后左右侧施加了水平方向的约束, 以模拟实际环境中的侧向限制; 模型上表面设置为自由边界, 以反映地表无约束的自然状态。

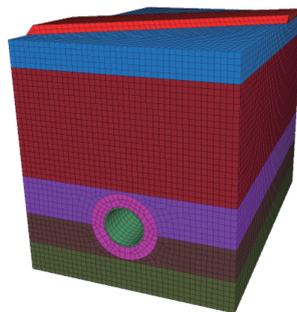


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

2.3 模型参数选取

土体材料及盾构管片均通过线性弹性模型进行仿真模拟, 土层采用莫尔-库仑模型模拟以体现其力学特性。基于地质勘察报告, 将物理性质相近的土层归并为同一类, 进而将上覆土层简化为 5 个主要层次, 以简化分析。各土层物理力学参数如表 1 所示。

2.4 开挖环数影响分析

2.4.1 地层竖向位移

隧道右线开挖 20, 30, 40 环时地层竖向位移云图如图 4 所示。由图 4 可知, 在盾构盾壳尚未通过时, 地层位移微小, 近乎为零状态。盾尾脱离后地层沉降变化加剧, 随着盾构持续向前掘进, 地层受到的扰动逐渐累积并最终趋于稳定状态。隧道顶部上方地层呈渐进式的下沉趋势, 直至开挖至一定

阶段后,该区域沉降趋于稳定。隧道顶部最大沉降为 30.33mm,且自该点垂直向上沉降逐渐递减,至地表处达最小值。与此同时,隧道底部表现出相反的隆起现象,随着开挖过程逐渐稳定。隧道底部区域最大隆起为 17.96mm,该位置与隧道顶部最大沉降点呈镜像对称关系。此外,从隧道底部向下延伸,隆起展现出逐渐减小的趋势,呈现出垂直方向上的递减特征。

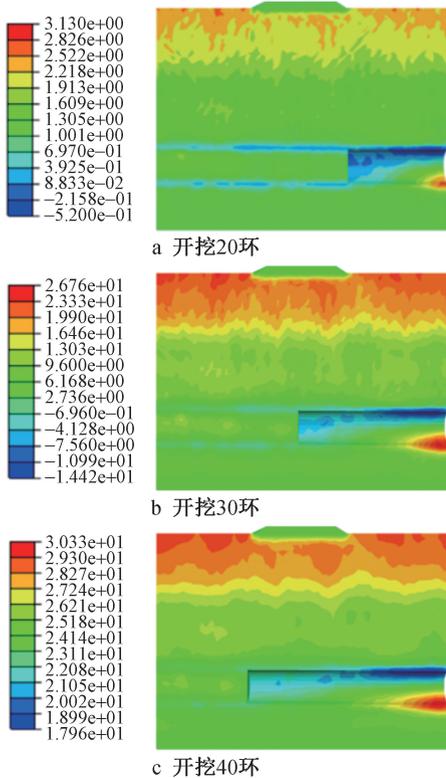


图 4 不同开挖环数下地层竖向位移云图(单位:mm)
Fig. 4 Cloud maps of vertical displacement of stratum under different numbers of excavation rings(unit:mm)

2.4.2 铁路路基竖向位移

隧道右线开挖 20,40 环时铁路路基竖向位移云图如图 5 所示。由图 5 可知,京秦铁路路基在盾构掘进过程中会产生沉降现象,其特点为中间区域沉降显著,而两侧沉降相对较小,这与地表沉降变化规律相吻合。值得注意的是,随着盾构隧道掘进深

度的增加,铁路路基最大沉降点逐渐向右偏移。铁路路基沉降变化是沿着盾构开挖方向逐步演进的,未出现整体性的突然沉降,而是展现出明显的滞后效应。当右线盾构隧道掘进至其影响范围的边界时,铁路路基达到最大沉降状态,此时的最大沉降为 2.20mm,整个路基均受到了不同程度的影响。

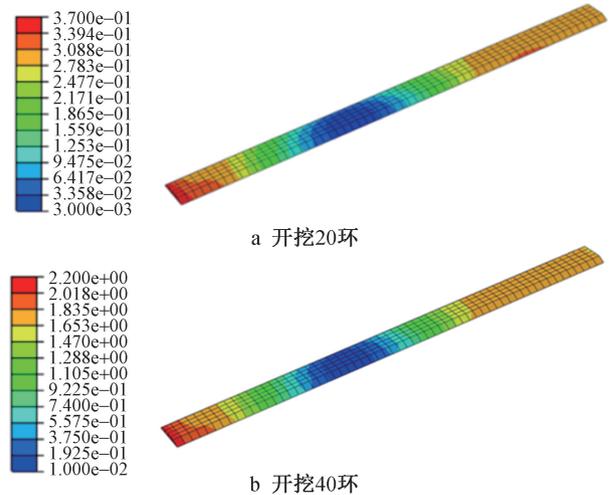


图 5 不同开挖环数下铁路路基竖向位移云图(单位:mm)
Fig. 5 Cloud maps of vertical displacement of railway subgrade under different numbers of excavation rings(unit:mm)

2.5 注浆强度影响分析

2.5.1 盾构隧道竖向位移

盾构隧道施工过程中采用同步注浆技术,将特定配合比、具备适宜早期及最终强度的注浆材料,以规定的压力与量值,精准注入盾尾与管片之间的空隙中。同步注浆过程依托专门的注浆系统,通过盾尾内置的注浆管道实施。随着盾构的持续向前掘进,盾尾空隙形成时,注浆材料能够即时、充分地填充至空隙中,为周围岩体提供即时且有效的支撑力,从而有效遏制岩体坍塌风险,并减少地表沉降现象的发生。

当盾构隧道穿越运营中的铁路线路时,同步注浆过程中浆液凝结强度成为控制路基沉降的关键因素。注浆作业可依据具体的注浆配合比、压力及

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层名称	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
粉土素填土	9.4	19.5	8.0	10.0	12	0.30
粉质黏土	40.3	20.2	37.1	19.8	30	0.35
粉土	14.7	21.0	20.0	25.0	25	0.33
细砂	12.0	21.0	0	30.0	30	0.33
粉土	10.0	20.4	25.0	32.0	25	0.34

量值,灵活选择单液浆或双液浆作为注浆材料。针对北京市东六环盾构隧道穿越京秦铁路特级风险段的特殊工况,实际工程中采用了双液浆作为注浆材料,以应对复杂的地质与环境挑战。

双液浆具有凝结时间短、早期强度高及抗渗性能好等特点。为研究注浆强度的影响,基于已建立的数值模型,保持其他物理与几何参数不变,仅对同步注浆强度进行调整,设置注浆强度分别为 0, 2.6, 3.3, 4.0MPa,本工程实际注浆强度为 3.3MPa。

不同注浆强度下盾构隧道竖向位移云图如图 6 所示。由图 6 可知,当注浆强度为 0MPa 时,隧道拱顶出现显著下沉,沉降达 30.33mm,而隧道拱底隆起 17.96mm。当注浆强度提升至实际工程采用的 3.3MPa 时,隧道拱顶沉降减至 1.5mm,隧道拱底隆起减至 2.2mm。这表明随着注浆强度的提升,隧道拱顶与拱底变形均呈减小趋势,从而验证了增强同步注浆强度对于有效控制隧道变形的积极作用。

2.5.2 铁路路基竖向位移

不同注浆强度下铁路路基竖向位移云图如图 7 所示。由图 7 可知,铁路路基中心线位置处沉降最明显,随着距中心线距离的增加,沉降逐渐减小。随着注浆强度的增加,路基最大沉降呈下降趋势。当注浆强度由 0MPa 增至 3.3MPa 时,路基最大沉降由 7.98mm 减至 3.15mm,降幅达 60.5%。这表明同步注浆质量及其浆液凝结强度对于盾构施工较关键,施工过程中应严格把控注浆质量,提升浆液凝结强度,以确保盾构隧道能够安全、顺利地穿越既有铁路。

2.5.3 地表沉降

在完成掘进作业且模型中所有管片均已完成拼装,地表沉降趋于稳定时,分析不同注浆强度下距盾构隧道中心线特定区域(12m 范围内)的受扰土层地表沉降,如图 8 所示。由图 8 可知,随着注浆强度的增大,盾构隧道穿越铁路引起的地表沉降变化模式保持了一致性,即随着距中心线距离的增加,地表沉降逐渐减小,这与经典的 Peck 沉降曲线较吻合,进一步验证了模拟结果的合理性与准确性。

3 实际监测与数值模拟对比分析

3.1 监测点布置

在盾构隧道穿越及其潜在影响区域内,沿隧道中心线每隔 10m 设置沉降监测点,以确保全面覆盖并精确捕捉地表变形情况。此外,为分析隧道施工对周边环境的影响,布置了与隧道轴线垂直的监测横断面,这些横断面沿隧道中心线呈对称分布(见图 9)。值得注意的是,横断面上各监测点之间的距

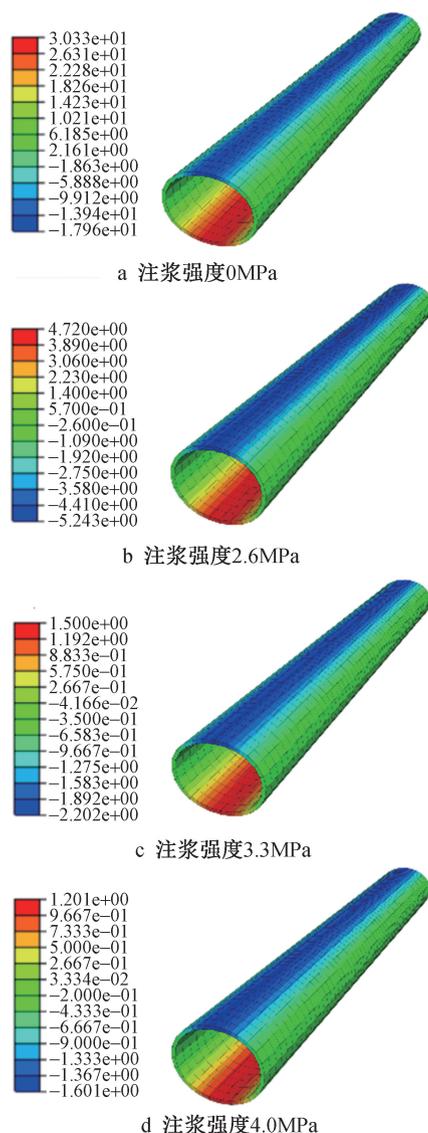


图 6 不同注浆强度下盾构隧道竖向位移云图(单位:mm)
Fig. 6 Cloud maps of vertical displacement of shield tunnel under different grouting strength(unit:mm)

离并非固定,而是根据具体位置灵活调整,间距包括 3,4,8,10m,可更精准地反映不同区域地层响应特性。

累积沉降控制为 $-10\sim 3\text{mm}$,沉降速率 $<2\text{mm/d}$ 。设计要求监测频率为 2 次/d,实际监测加密至 3 次/d,并安排专人值守巡视,如有异常立即反馈,并进一步提高监测频率。

3.2 对比结果

将实际监测得到的地表沉降与同步注浆强度 3.3MPa 条件下的数值模拟结果进行对比分析,如图 10 所示。由图 10 可知,实际监测与数值模拟得到的地表沉降曲线变化趋势保持了良好的一致性。特别地,对于隧道中心线正上方的监测点 JQ-2611,其实测最终地表沉降为 2.98mm,数值模拟预测值

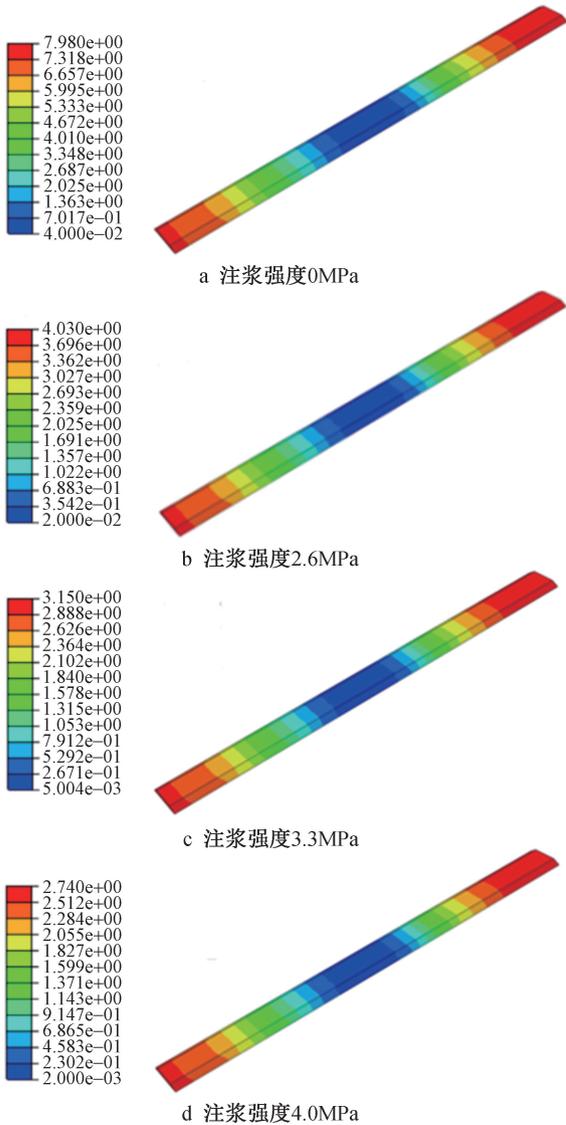


图7 不同注浆强度下铁路路基竖向位移云图(单位:mm)
Fig. 7 Cloud maps of vertical displacement of railway subgrade under different grouting strength(unit:mm)

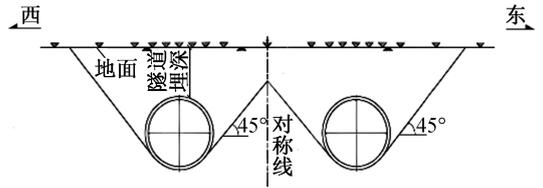


图9 地表沉降监测横断面布置

Fig. 9 Layout of cross-sections for surface settlement monitoring

型的精确性与可靠性。

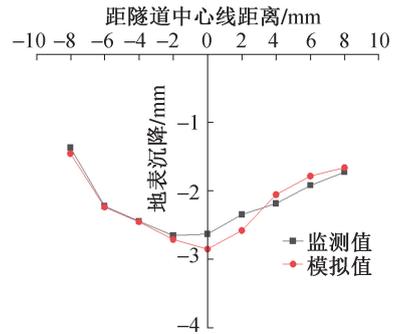


图10 实际监测与数值模拟得到的地表沉降曲线
Fig. 10 Surface settlement curves obtained from actual monitoring and numerical simulation

4 结语

1)随着盾构隧道掘进进程的推进,京秦铁路路基沉降现象逐渐显现,其中路基中心区域沉降最显著,而两侧沉降相对较小,这与地表整体沉降变化较吻合。值得注意的是,随着隧道掘进深度的增加,路基最大沉降点呈向右侧偏移的趋势。

2)同步注浆强度在控制隧道变形及地表沉降过程中扮演了至关重要的角色。随着注浆强度的增加,地表整体沉降及最大沉降均呈明显的下降趋势。当注浆强度由0MPa增至3.3MPa时,地表最大沉降由7.98mm减至3.15mm。同时,隧道拱顶沉降由30.33mm大幅度减至1.5mm,隧道拱底隆起由17.96mm减至2.2mm。这表明提高同步注浆强度是有效抑制隧道变形及减小地表沉降的关键措施。

3)为验证数值模拟结果的精确度,将地表沉降实际监测数据与模拟预测结果进行对比分析,二者变化趋势较吻合,这表明本文建立的模型准确可靠。

参考文献:

[1] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground [C]//Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1969.
 [2] MROUEH H, SHAHROUR I. A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction [J]. Computers and geotechnics, 2003, 30(3): 245-253.
 [3] 潘屹, 马安震, 孙海东, 等. 下穿黄河强透水砂卵石地层盾构

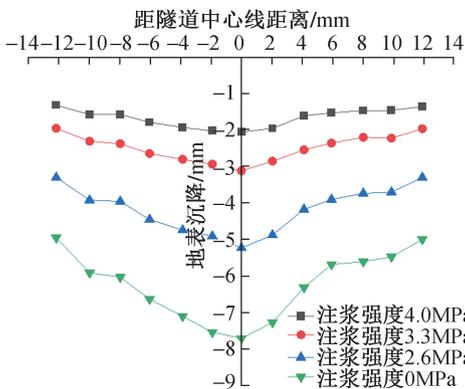


图8 不同注浆强度下受扰土层地表沉降曲线
Fig. 8 Surface settlement curves of disturbed soil layers under different grouting strength

为3.15mm,二者之间差异小,进一步证实了所建模

- 隧道施工技术[J]. 施工技术(中英文),2025,54(3):28-35.
- PAN Y, MA A Z, SUN H D, et al. Construction technology of shield tunnel crossing the Yellow River under strong permeable sandy pebble strata[J]. Construction technology, 2025, 54(3): 28-35.
- [4] 韩焯, 李宁, STANDING J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 23-28, 35.
- HAN X, LI N, STANDING J R. An adaptability study of Gaussian equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China[J]. Rock and soil mechanics, 2007, 28(1): 23-28, 35.
- [5] JENCK O, DIAS D. 3D-finite difference analysis of the interaction between concrete building and shallow tunnelling[J]. Geotechnique, 2004, 54(8): 519-528.
- [6] 薛景沛, 何浩. 盾构两次近距离下穿既有运营地铁的施工技术[J]. 隧道建设, 2009, 29(S1): 46-51.
- XUE J P, HE H. Tunneling technology of crossing beneath the existing metro lines by shield machine within short distance[J]. Tunnel construction, 2009, 29(S1): 46-51.
- [7] 张海超. 大直径盾构下穿运营地铁隧道施工变形控制技术[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1): 934-940.
- ZHANG H C. Construction deformation control technology of large diameter shield undercrossing subway tunnel in operation[J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(S1): 934-940.
- [8] 黄毅, 何健, 张家硕, 等. 曲线盾构隧道下穿施工影响分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(21): 71-77.
- HUANG Y, HE J, ZHANG J S, et al. Analysis of influence of curved shield tunnel undercrossing construction[J]. Construction technology, 2024, 53(21): 71-77.
- [9] 张治国, 张孟喜. 软土城区土压平衡盾构上下交叠穿越地铁隧道的变形预测及施工控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(S2): 3428-3439.
- ZHANG Z G, ZHANG M X. Deformation prediction of subway tunnel induced by EPB shield in soft clay during above and down overlapped traversing process and its construction control[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013(S2): 3428-3439.
- [10] 马忠政. 复杂环境下软土地区地铁隧道近距离穿越施工技术[J]. 施工技术, 2013, 42(8): 60-64.
- MA Z Z. Construction for metro shield crossing adjacent tunnels in complex environment[J]. Construction technology, 2013, 42(8): 60-64.
- [11] 章邦超, 刘洪亮, 雷锋国, 等. 上软下硬地层大直径土压平衡盾构下穿民房建筑群沉降控制[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 172-181.
- ZHANG B C, LIU H L, LEI F G, et al. On settlement control in large-diameter EPB shield tunnelling under civil housing complex in upper-soft and lower-hard strata[J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(2): 172-181.
- [12] 王学斌. 公路隧道施工对邻近建筑物的影响及控制[J]. 公路交通科技, 2022, 39(8): 182-190.
- WANG X B. Influence and control of highway tunnel construction on adjacent buildings[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2022, 39(8): 182-190.
- [13] 李锁在, 郭仁亮, 孙博, 等. 盾构下穿胶济铁路路基沉降规律与变形控制[J]. 科技和产业, 2022, 22(8): 398-403.
- LI S Z, GUO R L, SUN B, et al. Settlement law and deformation control of subgrade when shield underneath Jiaoji Railway[J]. Science technology and industry, 2022, 22(8): 398-403.
- [14] 邓飞. 盾构隧道下穿既有铁路路基的加固措施[J]. 科技与创新, 2022(16): 136-138, 142.
- DENG F. Reinforcement measures of shield tunnel under existing railway subgrade[J]. Science and technology & innovation, 2022(16): 136-138, 142.
- [15] 罗雄文, 张文广, 梁荣柱. 双孔隧道中后掘进盾构对地表沉降的影响[J]. 公路交通科技, 2020, 37(9): 82-89.
- LUO X W, ZHANG W G, LIANG R Z. Influence of subsequent shield tunneling on ground surface settlement during construction of twin tunnel[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2020, 37(9): 82-89.
- [16] 刘士海. 新建隧道下穿不同结构形式既有运营隧道变形分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(10): 73-79.
- LIU S H. Deformation analysis of existing operating tunnel with different structural forms crossed by new tunnel[J]. Construction technology, 2024, 53(10): 73-79.
- [17] 余彪. 公路隧道中关于盾构机掘进的研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(7): 248-251.
- YU B. Study on shield tunneling in highway tunnel[J]. Journal of highway and transportation science and technology (applied technology edition), 2020, 16(7): 248-251.
- [18] 李斯, 孙高伟, 张志超, 等. 盾构隧道下穿陇海铁路路基预加固及沉降控制[J]. 铁道建筑, 2023, 63(2): 129-133.
- LI S, SUN G W, ZHANG Z C, et al. Pre-reinforcement and settlement control of Lanzhou-Lianyungang Railway subgrade with shield tunnel underpass[J]. Railway engineering, 2023, 63(2): 129-133.
- [19] 王刚, 张津钰, 吕杨. 双线盾构隧道下穿铁路路基施工过程数值模拟[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(3): 42-48.
- WANG G, ZHANG J Y, LÜ Y. Numerical simulation of double-track shield tunnel crossing railway subgrade construction[J]. Construction technology, 2024, 53(3): 42-48.