

盾构隧道管棚法下穿铁路路基变形控制*

姜键骏^{1,2,3} 邱乾胜³ 杨全⁴ 张月莹⁴ 居庆⁵

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 300072, 天津; 2. 浙江机电职业技术大学智慧交通学院, 310059, 杭州;

3. 浙江芯能光伏科技股份有限公司, 314400, 嘉兴; 4. 浙江省机电产品质量检测所有限公司, 310051, 杭州;

5. 浙江建设职业技术学院工程造价学院, 310059, 杭州)

摘要 [目的] 在近接施工扰动影响下, 盾构下穿施工会对路基沉降造成一定影响, 管棚在不同环向布置范围及环向间距条件下对路基沉降的控制效果有所不同, 因此有必要研究管棚超前支护对上方铁路路基沉降的控制效果。[方法] 以成都地铁5号线下穿铁路路基为例, 提出双层管棚支护方案, 并采用FLAC 3D软件进行数值模拟。根据路基沉降标准, 基于隧洞围岩塑性区体积、路基沉降及管片位移3项指标, 结合现场监测数据, 对管棚在不同环向布置范围及环向间距下的支护效果进行研究。[结果及结论] 相比于管棚环向间距, 合理布置环向范围更能发挥管棚的支护效果。针对一般地层, 当管棚布置形式为拱部环向范围150°、环向间距40 cm时, 能够满足管片位移的控制要求。当环向间距为30 cm时, 随着管棚环向范围由拱部夹角90°增大至拱部夹角180°, 路基沉降最大值则由50.00 mm减小至2.50 mm, 小于路基沉降预警值3.75 mm, 此时围岩塑性区体积接近于0, 且管片位移值较小, 路基沉降监测结果满足沉降预警值要求。所确定的最佳管棚布置方案为: 环向间距30 cm, 拱部夹角180°。

关键词 城市轨道交通; 盾构隧道; 管棚支护; 路基变形规律

中图分类号 U455.43

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.05.021

Railway Subgrade Deformation Control of Shield Tunnel Underpassing with Pipe Roof Support Method

JIANG Jianjun^{1,2,3}, QIU Qiansheng³, YANG Quan⁴, ZHANG Yueying⁴, JU Qing⁵

(1. School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, 300072, Tianjin, China; 2. School of Intelligent Transportation, Zhejiang Polytechnic University of Mechanical and Electrical Engineering, 310059, Hangzhou, China; 3. Zhejiang Xinneng Photovoltaic Technology Co., Ltd., 314400, Jiaxing, China; 4. Zhejiang Testing & Inspection Institute for Mechanical and Electrical Products Quality

Co., Ltd., 310051, Hangzhou, China; 5. School of Project Cost, Zhejiang College of Construction, 310059, Hangzhou, China)

Abstract [Objective] Under the disturbance of adjacent construction, the shield tunneling underpassing construction will have a certain impact on the subgrade settlement. The control effect of the pipe roof on the subgrade settlement varies under different circumferential layout scopes and spacing conditions. Therefore, it is necessary to study the control effect of advanced pipe roof support on the settlement above the railway subgrade. [Method] In the case study of Chengdu Metro Line 5 underpassing the railway subgrade, a double-layer pipe roof support scheme is proposed, and the FLAC 3D software is used for numerical simulation. According to the subgrade settlement standards, based on the three indexes of the volume of the tunnel surrounding rock plastic zone, the subgrade settlement and the segment displacement, and combined with the on-site monitoring data, the support effect of the pipe roof under different circumferential layout scopes and spacing is studied. [Result & Conclusion] Compared with the circumferential spacing of the pipe roof, a reasonable arrangement of the circumferential scope can better exert the support effect of the pipe roof. For the general strata, the control requirements of the segment displacement can be met when the pipe roof layout is in a form of 150° arch part circumferential scope and the circumferential spacing is 40 cm. When the circumferential spacing is 30 cm, as the circumferential scope of the pipe roof increases from the arch angle of 90° to 180°, the maximum value of the subgrade settlement decreases from 50.00 mm to 2.50 mm, less than the subgrade settlement warning value of 3.75 mm. At this time, the volume of the plastic zone of the surrounding rock is close to 0 with a smaller segment displacement, and the monitoring result of the subgrade settlement meets the requirements of the settlement warning value. The determined optimal pipe roof layout scheme is that the circumferential spacing is 30 cm,

* 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划资助项目(2022C01105)

and the arch angle is 180° .

Key words urban rail transit; shield tunnel; pipe roof support; subgrade deformation law

0 引言

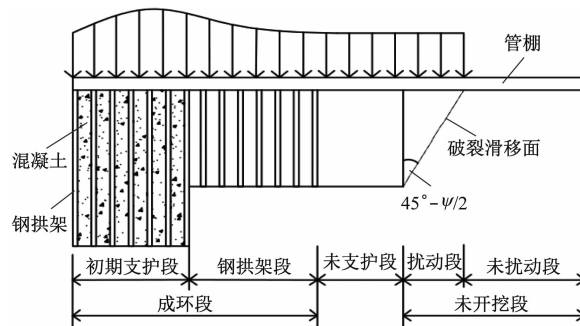
为防止铁路路基或建筑物在施工期发生过大沉降,目前普遍采用的超前支护措施有:超前小导管法、超前锚杆法、水平旋喷注浆法、管棚法、冻结法等。超前支护技术是指在隧道开挖前,对掌子面前方地层采取加固措施,进而在隧道拱部上方形成加固区,以保证开挖面前方土体的稳定性,并减少地面沉降变形^[1]。

在实际工程中,普遍采用管棚法进行超前预支护,已有较多学者针对盾构下穿铁路路基的支护措施进行了大量研究。文献[2]的研究结果表明,在管棚支护作用下,既有隧道最终隆起值得到了减少。文献[3]通过理论和数值模拟相结合的方法发现,在隧道开挖过程中,掌子面处管棚受力较大,支护稳定后受力较小。文献[4]使用双层大管棚结合地层跟踪注浆方法对地层进行加固,研究结果表明,采用该方法能实现对地面沉降的有效控制。文献[5]通过研究不同地层加固范围下的路基变形规律发现,加固盾构周边地层能有效控制路基沉降。

本文以成都地铁5号线赛云台站—西北桥站(以下简称“赛北区间”)线路下穿铁路咽喉区为例,基于FLAC 3D有限差分软件,对管棚预支护隧道的施工过程进行三维数值模拟,分析在不同环向间距及布置范围条件下,围岩塑性区体积、路基沉降及管片位移的相关变形规律,并将数值模拟分析结果与现场监测数据进行对比分析。本文研究可为类似隧道工程案例提供参考。

1 管棚超前支护原理

根据管棚在隧道施工过程中的受力形式,可将管棚简化为梁单元进行分析。通常将管棚纵向力学模型分为3段:①成环段;②未支护段;③未开挖段。其中:成环段又分为初期支护段和钢拱架段;未支护段即开挖段,范围为钢拱架与掌子面前方围岩的水平距离;未开挖段分为扰动段与未扰动段,扰动段范围为围岩破裂面与掌子面裸露围岩的间距,未扰动段为围岩破裂面与梁右端的范围。管棚各段受力示意图如图1所示。



注: ψ 为调节角度。

图1 管棚各段受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the force acting on each section of the pipe roof

对于未支护段,由于管棚上方承受围岩荷载,下部没有支撑,导致未支护段管棚处于悬空状态,此时可将成环段与未开挖段当作固定端来处理,简化为两端固定的梁单元。从理论上可推断,该段管棚的变形值要大于其他段,且变形最大值位于该段中点处。因此在现场实际施工时,需要严格控制开挖进尺所带来的施工影响,避免因开挖扰动过大造成掌子面前方围岩塌方。

2 工程概况

2.1 工程简介

成都地铁5号线赛北区间线路在里程YDK17+370—YDK17+400段下穿宝成铁路道岔咽喉区(包含6股轨道,均为有砟道床基础)。隧顶距离宝成铁路基础底最小净距为13.958 m。隧顶距离铁路轨面最小净距为14.260 m,隧道底离铁路轨面最小净距为20.260 m。由于下穿施工过程可能对邻近铁路运行产生影响,需对铁路路基沉降进行监测,以确保铁路运行和下穿正常施工。整体线路、区间隧道及铁路咽喉区位置示意图如图2所示。

2.2 管棚布置方式

管棚施工的主要技术参数为:沿隧道上半部 180° 范围布设两层 $\phi 159 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 钢管;内层布设66根钢管,与管片间距为600~750 mm;外层布设61根钢管,与内层管棚中心间距为300 mm;两层管棚呈梅花形布设。管棚单根长为52 m,管壁钻设 $10 \text{ mm} @ 200 \text{ mm}$ 注浆孔,呈梅花形布设,端头2.0 m为止浆段,不设注浆孔。双层管棚横断面布置示意图如图3所示。

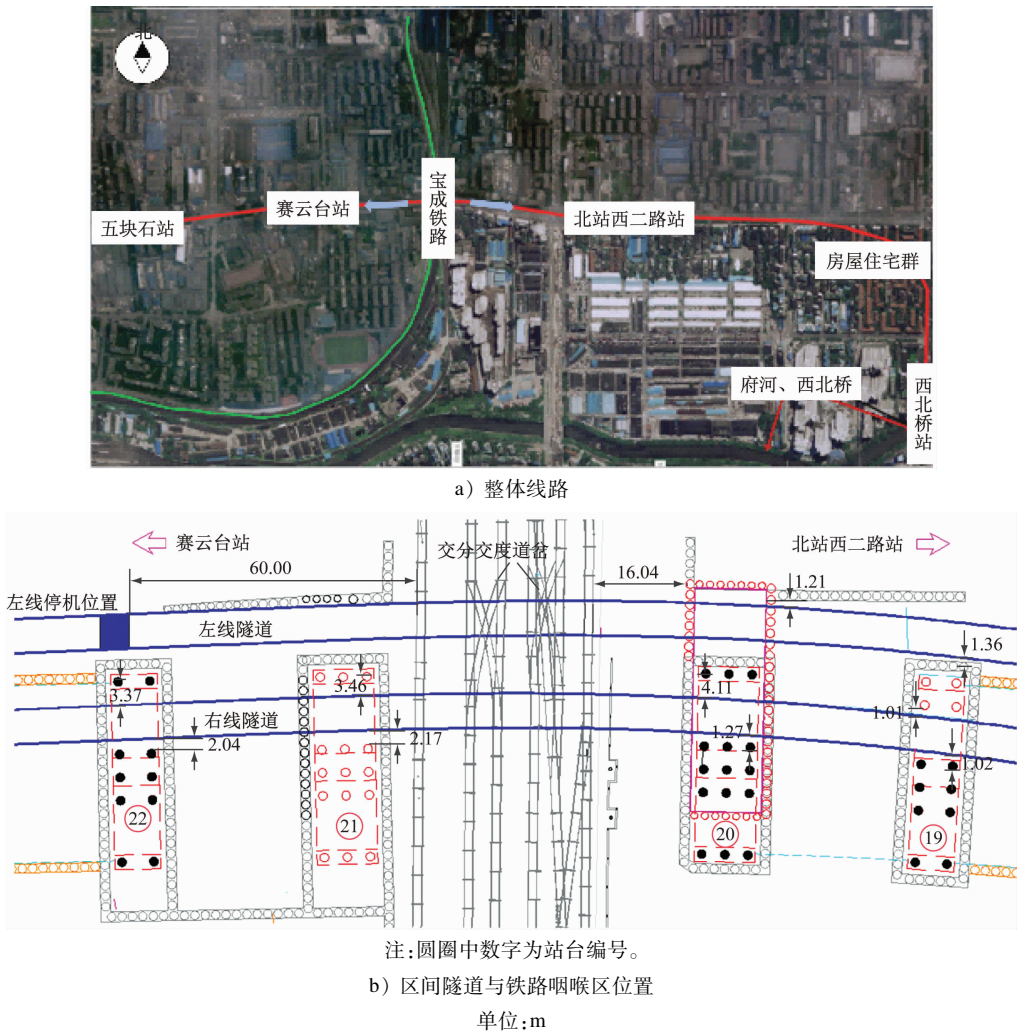


图 2 整体线路、区间隧道及铁路咽喉区位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the whole line, section tunnel and the location of the railway throat area

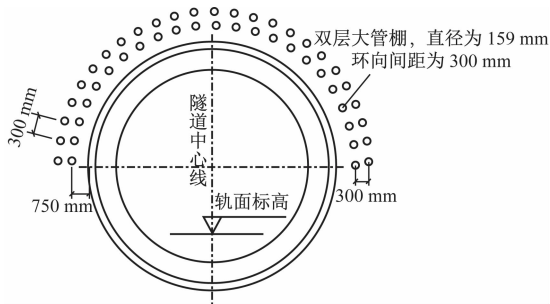


图 3 双层管棚横断面布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cross-sectional layout of double-layer pipe roof

管棚施作工艺流程可大致分为 4 步:施工准备;测量放线;冲击破碎钢管顶进;管棚注浆。其中,管棚定位、施工测量及注浆需严格按照操作流程及检查要求进行。管棚施作工艺流程示意图如图 4 所示。

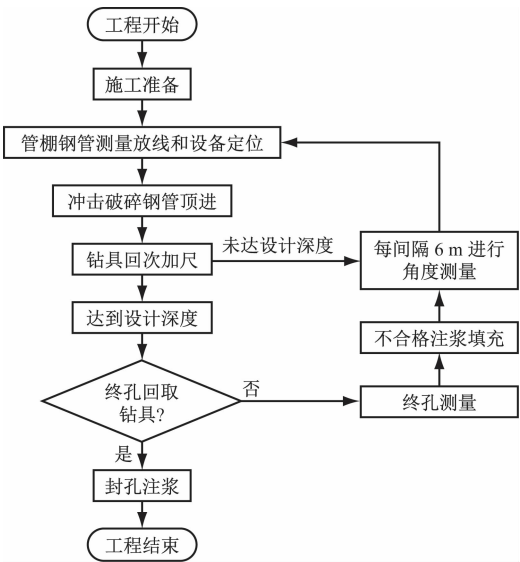


图 4 管棚施作工艺流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of process flow in pipe roof construction

3 数值模拟分析

3.1 建立计算模型

采用 Midas GTS 软件划分网格,导入 FLAC 3D 软件后进行隧道开挖及管棚支护模拟。建模时,取隧道 3~5 倍洞径为模型边界,以满足圣维南原理,模型上表面为自由边界,仅在模型侧面及底面施加法向约束。模型整体尺寸为 100 m(长)×50 m(宽)×80 m(高),模型围岩按照实体单元模拟,选用摩尔-库仑本构模型,围岩的物理力学参数根据相关地勘报告和规范选取,围岩等级为 V 级。管片采用 Shell 单元进行模拟,注浆等代层采用弹性本构模型模拟。管棚选用 Beam 单元模拟,注浆加固区选用弹性本构模型模拟,上部咽喉区简化为一条铁路路基,采用弹性本构模型模拟。测线及整体模型示意图如图 5 所示。其中:L1 为铁路路基沉降测线;L2 为拱顶竖向位移测线。

3.2 确定计算参数

管棚注浆加固后,注浆区的整体弹性模量由两部分组成:初始围岩和砂浆。按照等效刚度法原

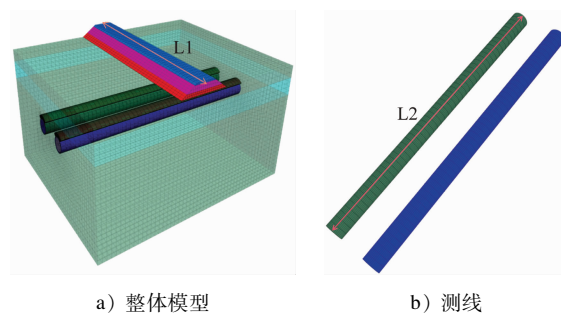


图 5 测线及整体模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the measuring line and the overall model

则^[6-7],管棚注浆区整体弹性模量 E 可以表示为:

$$E = \frac{E_s A_s + E_c A_c}{A}$$

式中:

E_s ——加固区初始围岩弹性模量;

E_c ——加固区砂浆弹性模量;

A_s 、 A_c 、 A ——加固区初始围岩、砂浆、注浆后的

围岩截面积。

围岩及其结构计算参数如表 1 所示。

表 1 围岩及其结构计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of surrounding rock and its structure

| 项目 | 模拟单元类型 | 计算模型 | 重度/ (kN/m^3) | 弹性模量/ MPa | 黏聚力/ kPa | 内摩擦角/ ($^\circ$) | 泊松比 |
|-------|--------|-----------|-----------------------------------|--------------|-------------|-----------------------|------|
| 围岩 | 实体 | 摩尔-库仑本构模型 | 19.0 | 1 000 | 100 | 22 | 0.35 |
| 管片 | 结构 | 弹性本构模型 | 25.0 | 28 400 | — | — | 0.20 |
| 注浆等代层 | 实体 | 弹性本构模型 | 21.0 | 1 000 | — | — | 0.20 |
| 注浆加固区 | 实体 | 弹性本构模型 | 22.0 | 1 200 | — | — | 0.20 |
| 管棚 | 结构 | 弹性本构模型 | 78.5 | 21 000 | — | — | 0.20 |
| 路基 | 实体 | 弹性本构模型 | 20.0 | 210 | — | — | 0.28 |

3.3 设置计算工况

针对不同地质情况,应合理设置管棚环向间距。对于直径为 159 mm 的大管棚,管棚长度一般不超过 40 m,本文计算管棚长度取为 30 m;实际工程中,管棚环向间距通常设为 30~60 cm,本文计算管棚环向间距分别设为 30 cm、40 cm、50 cm、60 cm;管棚布设范围分别设为拱部夹角为 90° 、拱部夹角为 120° 、拱部夹角为 150° 、拱部夹角为 180° ,此处的拱部夹角是指隧道中心点与两侧管棚连线的夹角。具体工况设置如表 2 所示。通过设置不同计算工况,研究不同管棚环向布设范围及环向间距条件下,隧洞周围岩塑性区、路基沉降及管片位移的变

化规律。

3.4 路基沉降标准

本工程所穿越的铁路道床为碎石形式,隧道盾构掘进过程中由施工引起的沉降范围,需根据工程经验进行确定,进而获得既有铁路路基允许的最大沉降值。根据目前暗挖隧道埋深及铁路运行情况^[8],路基允许最大沉降值普遍为 14.4 mm。

本工程为客运专线(列车运行速度为 60~250 km/h),且盾构下穿涉及富水砂卵石地层及铁路咽喉岔道区等特殊情况,基于既有工程经验与规范要求,最终确定本工程盾构隧道下穿铁路咽喉区路基沉降控制标准可定为 5 mm,铁路路面允许沉降速

表2 具体工况设置

Tab.2 Settings of specific working conditions

| 工况编号 | 拱部夹角/(°) | 管棚环向间距/cm |
|------|----------|-----------|
| 1 | 90 | 30 |
| 2 | 90 | 40 |
| 3 | 90 | 50 |
| 4 | 90 | 60 |
| 5 | 120 | 30 |
| 6 | 120 | 40 |
| 7 | 120 | 50 |
| 8 | 120 | 60 |
| 9 | 150 | 30 |
| 10 | 150 | 40 |
| 11 | 150 | 50 |
| 12 | 150 | 60 |
| 13 | 180 | 30 |
| 14 | 180 | 40 |
| 15 | 180 | 50 |
| 16 | 180 | 60 |

率标准为2 mm/d。根据沉降控制基准值和工程实践需求,以沉降控制基准值的75%为预警值,以沉降控制基准值的85%为施工报警值。

3.5 计算模拟结果分析

3.5.1 洞周围岩塑性区

待盾构隧道开挖掘进完成后,导出不同工况下的围岩塑性区体积,并以此为基准判别管棚的支护效果。各工况下,围岩塑性区体积变化情况如图6所示。

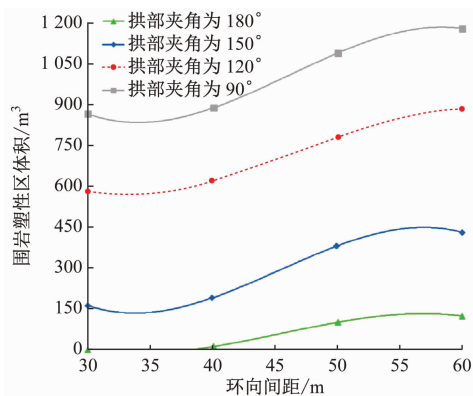


图6 各工况下的围岩塑性区体积变化情况

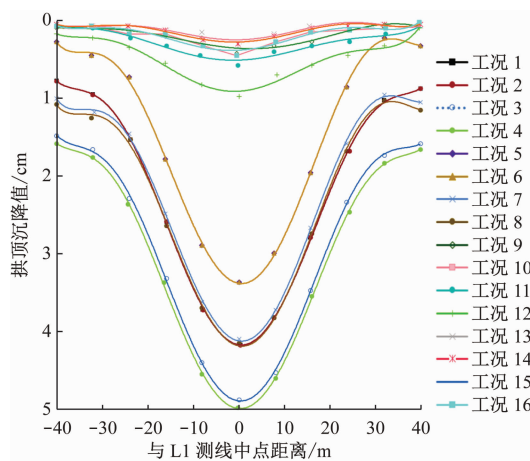
Fig. 6 Volume changes of surrounding rock plastic zone under various working conditions

随着管棚拱部布置范围和环向间距的不断增大,围岩塑性区体积逐渐减小。当拱部夹角为150°

时,围岩塑性区体积减少趋势明显,且当管棚环向间距达到40 cm时,围岩塑性区体积急剧减小。相较于管棚环向间距为50 cm时的情况,管棚环向间距为40 cm时的下围岩塑性区体积为380 m³,降低了55%。随着管棚环向间距的增大,围岩塑性区体积的减小速率远大于因环向间距减小所引起的围岩塑性区体积减小速率,因此相比于环向间距,管棚环向布置范围对围岩塑性区的影响更大。

3.5.2 路基沉降

不同工况下,路基拱顶沉降曲线如图7所示。盾构掘进完成后,路基沉降满足沉降槽曲线规律;各工况下,路基最大沉降均发生在测线中点位置。工况1—工况8中,路基沉降值迅速减小;工况9—工况16中,路基最大沉降值不超过1 cm。由此可知,当拱部夹角为150°时,管棚充分发挥群梁效应,能够极大地降低盾构开挖对路基沉降造成的影响,而管棚环向间距的布置方式对路基沉降的影响较小。当拱部夹角为180°、管棚环向间距为30 cm时,满足路基最大沉降值低于预警值的要求。



注:与L1测线中点距离向右为正,向左为负。

图7 不同工况下的路基拱顶沉降曲线

Fig. 7 Curves of the subgrade vault settlement under different working conditions

工况13下,不同监测点(J3-1至J3-6)的路基拱顶沉降数值计算与实测结果对比如图8所示。由图8可知:两者的模拟误差较小,最大误差仅为2.3%,表明数值模拟基本可靠,能在一定程度上反映不同工况的路基拱顶沉降。

3.5.3 管片位移

3.5.3.1 管片拱顶沉降

在左线隧道拱顶上,沿轴向布置位移测线L2,

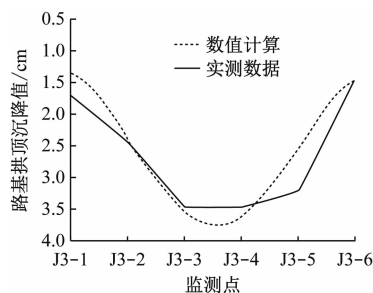


图8 工况13下不同监测点的路基拱顶沉降数值计算与实测结果对比

Fig. 8 Comparison between the numerical calculation results and the measured results of the subgrade vault settlement at different monitoring points under Working Condition 13

研究各工况下的拱顶沉降变化情况。分析结果显示,不同条件下的拱顶沉降变化规律大致相似,即在盾构掘进过程中,前一个工作环内的拱顶沉降总是大于下一个工作环内的拱顶沉降,说明在盾构掘进时,掌子面空间效应对管片拱顶沉降造成影响。当减小管棚环向间距、增大管棚环向布置范围时,隧道结构拱顶沉降值不断减小。由此可知,对于软弱围岩地层,可通过加大管棚环向布置范围、减小管棚环向间距的方式,改善围岩的支护效果,保证盾构掘进的安全性。

3.5.3.2 管片水平收敛

对于盾构隧道而言,在盾构施工过程中应关注管片的水平收敛影响。根据相关文献研究结果可知:当盾构隧道水平收敛变形不超过 30 mm 时,管片结构服役良好,病害发生概率较低;当盾构隧道水平收敛变形为 30~60 mm 时,管片容易发生渗漏水及裂缝等病害,且有不断发展的趋势。因此,管片水平收敛基准值取为 30 mm,综合考虑本工程围岩地质、下穿铁路路基等特殊情况,采用水平收敛基准值的 75% 作为预警值。

对各工况下的管片最大水平收敛值进行分析,研究管棚在不同布置范围、环向间距下对管片水平收敛的影响。各工况下管片的水平收敛曲线变化情况,如图 9 所示。由图 9 可知:管棚布置范围对管片水平收敛影响较大。当布置范围一定时,环向间距对管片水平收敛的影响较小。当拱部夹角为 150°、环向间距为 40 cm 时,管棚的布置范围对管片水平收敛影响较大,此时管片水平收敛值为 2.20 cm,小于水平收敛预警值 2.25 cm,能够满足要求。

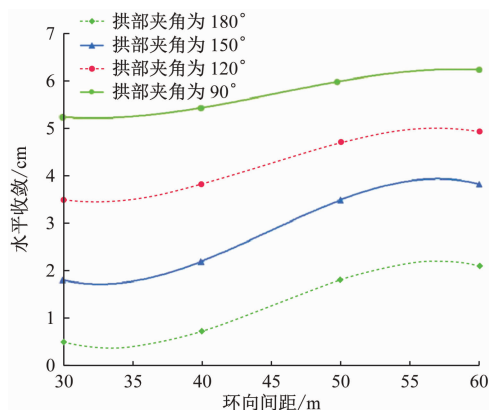


图9 各工况下管片的水平收敛曲线变化情况

Fig. 9 Changes of the horizontal convergence curves of the segments under various working conditions

3.5.4 管棚合理布置方案

结合盾构下穿铁路路基及相关围岩地质等特殊情况,综合分析各工况下隧道周边围岩塑性区体积、路基沉降及管片位移,管棚布置方案设置应优先选用计算工况 13,即管棚环向布置范围为拱部夹角 180°、环向间距为 30 cm。

4 路基沉降监测情况

4.1 监测方案实施情况

根据成都地铁 5 号线下穿宝成铁路工程的实际情况,为了解宝成铁路咽喉区的轨道沉降,确保铁路的运营安全,对宝成铁路下方、成都地铁 5 号线赛北区区间隧道施工影响范围内的 6 股轨道进行监测。现场监测共布置 4 个断面,每个断面布置 6 个测点,共计 24 个测点,2 个基准点,测点布置示意图如图 10 所示。

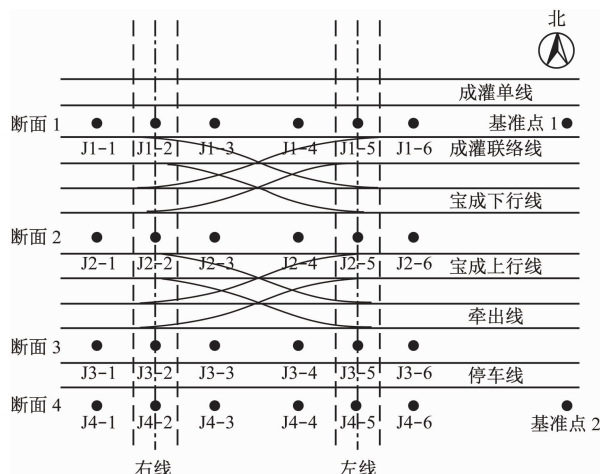


图10 测点布置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of measuring points layout

4.2 监测结果分析

根据监测方案,对成都地铁5号线下穿铁路咽喉区40 m(长)×40 m(宽)范围内的24个监测点进行了分析。不同监测点处的路基竖向位移如图11所示。由图11可知:所有监测点的竖向位移均未超过控制标准值3.75 mm。由此可知,左、右线盾构施工对铁路路基的影响在可控范围内。

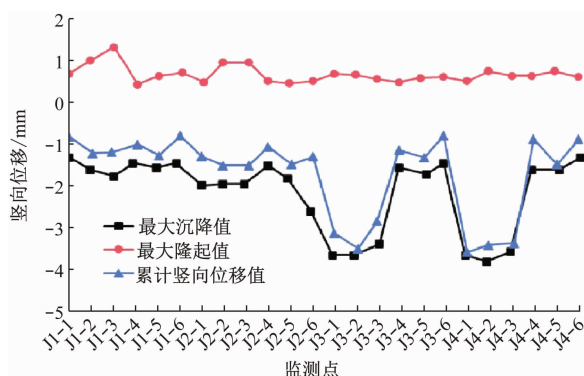


图11 不同监测点处的路基竖向位移

Fig. 11 Vertical displacement of the subgrade at different monitoring points

根据中国铁路成都局集团有限公司成都工务段线检人员的检查结果,J3-1、J3-2、J3-3、J4-1、J4-2、J4-3监测点的沉降值略大的原因为:J3-1位于11号道岔导曲中部路肩,J3-3位于11号道岔直股大接头路肩,J4-1位于21号道岔导曲中部与11号道岔导曲中部之间的警冲标。相较于正常道岔,由于这些监测点位于道岔中部而导致沉降位移会更大。

综上所述,所有监测点的监测值均未超过控制值3.75 mm,表明现场施工严格按照规范和设计进行,宝成铁路咽喉区轨道路基受成都地铁5号线下穿施工影响较小,即能够保证盾构下穿施工期间,宝成铁路咽喉区轨道路基的运营安全。

5 结语

1) 本文分析了管棚在不同布置形式下的支护效果,得出了环向间距和布置范围对路基沉降的影响程度,明确了环向范围是控制路基沉降和管片位移的关键参数。

2) 盾构掘进过程中,应对管片位移和路基沉降加强监控量测,同时对管片进行同步跟踪注浆,并在盾构通过后进行二次注浆,以补偿地层损失。

3) 管棚布置范围过小或环向间距过大均会导致管棚无法有效发挥其支护作用。针对一般地层,

结合数值模拟结果可知,当管棚拱部夹角为150°、环向间距为40 cm时,管棚可有效控制管片位移,但继续增大环向范围或减小环向间距对管片位移和路基沉降的控制效果并不显著。

4) 结合隧道周边围岩塑性区体积、路基沉降及管片位移情况,本工程宜采用布置范围为拱部夹角180°、环向间距为30 cm的双层大管棚支护,该支护形式能有效减少路基沉降和围岩塑性区体积。

5) 采用管棚支护控制路基沉降,除考虑管棚布置形式外,也应充分考虑管棚直径和注浆饱满度对路基沉降的影响,这两项指标可作为今后研究的重点。

参考文献

- [1] 王志龙,王明年,严志伟,等. 考虑超前支护作用效应的围岩-支护相互作用机制研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(10): 1748.
WANG Zhilong, WANG Mingnian, YAN Zhiwei, et al. Surrounding rock-support interaction mechanism considering effect of tunnel advance supports [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(10): 1748.
- [2] 何继华,姜潇,张宇,等. 上穿既有隧道大直径管棚支护效果研究[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(3): 98.
HE Jihua, JIANG Xiao, ZHANG Yu, et al. Supporting effect of large-diameter pipe shed in tunneling up-crossing engineering[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(3): 98.
- [3] 毕志刚,王凯,王仪宇,等. 闽南山区软弱围岩小净距隧道超前支护力学机理与施工技术[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 46.
BI Zhigang, WANG Kai, WANG Yiyu, et al. Mechanical mechanism and construction technology of advance support for small spacing tunnel of soft surrounding rock in southern Fujian mountainous area[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 42(6): 46.
- [4] 仇文革,万世付,高刚刚,等. 砂卵石地层盾构隧道下穿铁路咽喉区地表沉降控制研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 37.
QIU Wenge, WAN Shifu, GAO Ganggang, et al. Study on the control measures against ground settlement induced by shield tunnel construction underneath railway throat in sandy cobble stratum [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(5): 37.
- [5] 李士中. 合肥地区新建盾构隧道下穿铁路路基段地层预加固措施研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(12): 60.
LI Shizhong. Research on ground reinforcement measures for new shield tunnel passing under railway subgrade section in Hefei area [J]. Railway Engineering, 2019, 59(12): 60.

(下转第134页)

- trol of ancient buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(1): 1.
- [2] 杨娜, 李天昊, 刘威, 等. 中国古建筑木结构健康监测 Benchmark 平台[J]. 土木工程学报, 2022, 55(6): 1.
YANG Na, LI Tianhao, LIU Wei, et al. Health monitoring Benchmark platform of Chinese ancient wooden structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(6): 1.
- [3] DAI L, YANG N, ZHANG L, et al. Monitoring crowd load effect on typical ancient Tibetan building[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(7): 998.
- [4] 吴贤国, 杨赛, 田金科, 等. 盾构近接施工对既有隧道影响参数分析及近接度分区研究[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(4): 96.
WU Xianguo, YANG Sai, TIAN Jinke, et al. Analysis on the influence of shield tunneling construction on the proximity of existing tunnels and research on proximity zoning[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 38(4): 96.
- [5] 骆瑞萍, 陈保国, 闫腾飞, 等. 淤泥地层中盾构上穿近接地铁线施工稳定性研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(10): 88.
LUO Ruiping, CHEN Baoguo, YAN Tengfei, et al. Construction stability of shielded tunnel overcrossing an adjacent metro tunnel in silt stratum[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(10): 88.
- [6] 陈卓, 孔超. 地铁车站隧道群近接既有桥梁结构施工的安全影响分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊2): 1235.
- CHEN Zhuo, KONG Chao. Study on the influence of the construction of metro station tunnel group on the adjacent existing bridge structure [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(S2): 1235.
- [7] 李恒一, 王志杰, 何晟亚, 等. 地铁基坑下穿铁路桥的桥墩保护设计方案合理性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(7): 180.
LI Hengyi, WANG Zhijie, HE Shengya, et al. Rationality study on pier protection and design scheme of metro foundation pit under crossing railway bridge [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(7): 180.
- [8] 胡建林, 孙利成, 崔宏环, 等. 基于修正摩尔库伦模型的深基坑变形数值分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7717.
HU Jianlin, SUN Licheng, CUI Honghuan, et al. Numerical analysis of deep foundation pit deformation based on modified Mohr-coulomb model[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(18): 7717.
- 收稿日期:2023-03-13 修回日期:2023-04-13 出版日期:2025-05-10
Received:2023-03-13 Revised:2023-04-13 Published:2025-05-10
• 通信作者:何晟亚,工程师,410160733@qq.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 120 页)

- [5] 魏贤奎, 王平, 庞玲, 等. 一种小半径曲线桥上无缝线路稳定性加强方案研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(4): 14.
WEI Xiankui, WANG Ping, PANG Ling, et al. One strengthening scheme of stability of small radius curve continuous welded rail on bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(4): 14.
- [6] 张大超. 半径 250 m 曲线无缝线路稳定性分析及加强措施[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(1): 54.
ZHANG Dachao. Analysis and reinforcement measures for stability of CWR with a radius of 250 m[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1): 54.
- 收稿日期:2023-03-08 修回日期:2023-09-19 出版日期:2025-05-10
Received:2023-03-08 Revised:2023-09-19 Published:2025-05-10
• 通信作者:胡志鹏,高级工程师,779355629@qq.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 127 页)

- [6] 余俊, 翁贤杰, 樊文胜, 等. 松散地层隧道进洞段管棚注浆加固效应分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(6): 92.
YU Jun, WENG Xianjie, FAN Wensheng, et al. Analysis of pipe roof grouting reinforcement effect at tunnel entrance in loose stratum[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(6): 92.
- [7] 王海洋. 浅埋暗挖黄土隧道下穿铁路道岔区技术研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(8): 85.
WANG Haixiang. Research on the technology for shallow mining tunnel in loess area crossing railway turnout zone[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(8): 85.
- [8] 戴志仁, 任建, 李小强, 等. 富水砂卵石地层盾构隧道穿越铁路咽喉区道岔群技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 1005.
DAI Zhiren, REN Jian, LI Xiaoqiang, et al. Technologies for shield tunnel crossing underneath turnout groups of railway turnout area in water-rich sandy cobble stratum[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(6): 1005.
- 收稿日期:2023-08-09 修回日期:2023-09-12 出版日期:2025-05-10
Received:2023-08-09 Revised:2023-09-12 Published:2025-05-10
• 通信作者:姜键骏,副教授,jiangjianjun@zime.edu.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license