

TBM 导洞掘进与扩挖对上部建筑及下覆隧道影响规律

杨 建¹, 李恒光², 伏志威¹, 莫颜飞³, 陈保国²

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081; 2. 中国地质大学(武汉)

工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200112)

摘要:为研究含建构筑物的施工场地内 TBM 导洞掘进与扩挖施工过程对临近建构筑物的影响规律, 依托布吉南环路隧道工程, 采用有限元分析软件建立含有上部建筑物与下覆供水隧道的 TBM 导洞掘进与扩挖三维数值模型, 分析 TBM 导洞掘进与扩挖各个施工阶段的地面沉降、隧道收敛、围岩应力特征及对上部建筑物和下覆供水隧道的影响规律, 并利用监测数据对数值模拟结果进行了验证。研究表明: 1) TBM 导洞掘进与扩挖过程中, 地面沉降出现叠加效应, 沉降量随施工步呈现出非线性增长趋势, 隧道扩挖阶段产生的地面沉降明显大于 TBM 导洞掘进过程, 左线隧道施工产生的地面沉降大于右线隧道; TBM 四导洞掘进贯通时各导洞收敛值不同; 在隧道拱腰、拱脚及仰拱部位出现明显的应力集中现象。2) TBM 导洞掘进与扩挖施工会对上部建筑物和下覆供水隧道产生一定影响, 建筑物沉降随施工步呈现明显增长趋势, 隧道扩挖完成后建筑物最大沉降为 4.53 mm; 下覆供水隧道竖向位移沿导洞轴线呈梯度化分布, 位移由供水隧道顶端向底端逐渐减小, 隧道扩挖阶段造成供水隧道产生的隆起值较大, 扩挖后最大隆起为 1.11 mm。本文研究成果可应用于实际隧道开挖与支护过程, 保障施工过程中隧道及周围建构筑物安全。

关键词: TBM 导洞; 隧道扩挖; 近接施工; 沉降; 收敛变形; 数值模拟

中图分类号: TV554

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)03-0056-09

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.03.031

The influence mechanisms of TBM pilot tunnel excavation and enlargement on overlying structure and underlying tunnel

YANG Jian¹, LI Hengguang², FU Zhiwei¹, MO Yanfei³, CHEN Baoguo²

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Faculty of

Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200112)

Abstract: In order to investigate the influence of TBM pilot tunnel excavation and enlargement construction on adjacent structures in a site containing existing buildings, this study takes the Buji south ring road tunnel project as a case study. A three-dimensional numerical model incorporating upper buildings and an underlying water supply tunnel was established using finite element software. The model simulated and analyzed ground settlement, tunnel convergence, surrounding rock stress characteristics, and the impact on both upper buildings and the underlying water supply tunnel during various construction stages of TBM pilot tunneling and enlargement. Monitoring data were used to validate the numerical simulation results. The findings reveal that: 1) During TBM pilot tunneling and enlargement, ground settlement exhibits a superposition

收稿日期: 2025-07-10

基金项目: 中国水利水电第七工程局有限公司科技攻关项目(BJNHL-科研-2024-001)

作者简介: 杨 建(1976—), 男, 高级工程师, 从事市政工程施工技术研究与管理工。

通信作者: 李恒光(1999—), 男, 硕士研究生, 从事隧道工程方面的研究工作。

effect and increases nonlinearly with construction steps. The settlement induced by tunnel enlargement is significantly greater than that caused by TBM pilot tunneling, and the settlement generated by the left tunnel excavation exceeds that of the right tunnel. The convergence values of each pilot tunnel vary upon completion of the four-tunnel excavation. Notable stress concentration occurs at the tunnel haunches, arch feet, and invert. 2) TBM pilot tunneling and enlargement construction exert a measurable impact on both upper buildings and the underlying water supply tunnel. Building settlement shows a clear increasing trend with construction progress, reaching a maximum settlement of 4.53 mm after tunnel enlargement. The vertical displacement of the underlying water supply tunnel exhibits a gradient distribution along the pilot tunnel axis, decreasing from the crown to the invert. The enlargement phase induces significant uplift in the water supply tunnel, with a maximum uplift of 1.11 mm post-enlargement. The research findings of this paper can be applied to practical tunnel excavation and support processes to ensure the safety of the tunnel and surrounding structures during construction.

Key words: TBM pilot tunnel; tunnel enlargement; adjacent construction; settlement; convergence deformation; numerical simulation

随着基础设施建设向纵深发展,隧道施工面临穿越复杂地质区域、临近密集建构筑物等挑战。TBM 导洞掘进与扩挖技术凭借高效、安全、环境友好等优势,成为解决此类难题的关键手段。然而,TBM 掘进与扩挖施工过程中不可避免地面面临下穿既有构筑物、高架桥、老旧建筑群、隧道等复杂场景,施工过程产生的围岩扰动、地层变形等极易威胁邻近建构筑物安全。

许多学者针对 TBM 掘进与扩挖过程隧道及周边建构筑物的受力变形规律进行了研究。TBM 导洞掘进与扩挖施工方面,丁小军等^[1]依托秦岭天台山隧道工程,对特长隧道 TBM 导洞扩挖法施工方案进行研究,论证分析了 TBM 导洞扩挖法的可行性及优缺点;王春国^[2]以深圳地铁 9 号线下穿工程为背景,利用 FLAC 软件建立了隧道开挖的三维数值模型,研究了相同地质条件下不同开挖方式对既有隧道稳定性的影响,并提出了合理的施工方案;王赞^[3]依托重庆轨道 9 号线二期中央公园东站—从岩寺站区间复合岩层隧道工程,针对 TBM 掘进过程中穿越不同地层时引起的地表沉降、相邻既有建筑物沉降过大等问题开展研究,总结出了一套针对复合岩层隧道 TBM 施工的关键技术;REN 等^[4]依托重庆 9 号线地铁工程,采用数值模拟和现场监测的方法对 TBM 双线隧道施工过程中产生的地面沉降变化进行了研究。

TBM 导洞掘进与扩挖施工对临近建筑物影响方面,孙杰等^[5]以青岛地铁 1 号线小北区间硬岩地层中 TBM 隧道掘进下穿既有建筑群为工程依托,构建了 TBM 隧道连续下穿多座既有建筑模型,探

究了 TBM 隧道单洞掘进过程中,建筑物变形的空间分布特性及其影响规律。冯涵等^[6]以南京地铁三号线项目为依托,结合经验公式和数值模拟进行对比分析,研究了存在建筑物情况下的地表变形规律;张顶立等^[7]结合厦门机场路隧道下穿地表复杂建筑群的工程实践,揭示了隧道施工影响下地表建筑物的变形规律、变形破坏模式,提出了以差异沉降和裂缝开展为主的建筑物变形控制标准和“预警、报警及极限”的三级管理办法。

TBM 导洞掘进与扩挖施工对下穿既有隧道影响方面,唐福尧^[8]以黑白面将军山隧道工程为依托,运用数值模拟的方法对双线公路隧道近距离下穿既有供水隧洞引起的沉降及受力情况进行分析;王伟^[9]基于 MidasGTS NX 数值模拟软件,构建了 TBM 掘进隧道下穿既有公路隧道的三维仿真模型,通过对不同工况下的模拟结果进行分析,系统探讨了 TBM 施工过程对既有公路隧道应力增量与变形特征的影响机制;杜明芳等^[10]采用有限元软件 Midas GTS 对新建隧道近距离下穿既有隧道及邻近地铁车站的工程案例进行数值模拟分析,重点探讨了新建隧道施工过程中邻近既有地铁站及隧道的变形规律,系统总结了既有结构在水平位移和竖向沉降方面的变化特征。

本研究所依托的布吉南环路隧道工程采用 TBM 掘进与扩挖技术施工,施工场地内既存在上部建筑物,又存在既有下覆供水隧道。为进一步明确 TBM 导洞掘进与扩挖过程中隧道受力变形特征、TBM 掘进与扩挖过程对上部建筑物及下覆供水隧道的影响,本文通过数值模拟与现场监测相

结合的方法,研究 TBM 掘进与扩挖各个施工阶段产生的地面沉降、隧道收敛,以及临近建构筑物位移变化规律,将所得研究结果反馈于项目实际施工过程中,确保隧道及临近建构筑物在施工过程安全稳定。

1 工程概况及重难点问题分析

1.1 工程概况

布吉南环路隧道全长 481 m,属于小净距隧道类型。整个隧道坡度为 -0.3% ,最大埋深约为 62 m。隧道内部的主洞轮廓宽度为 13.66 m(双向双洞宽度相同),高度为 9.46 m,最大开挖断面面积达到 140 m^2 ,最大开挖高度为 11.3 m。隧道施工方案采用四道洞的 TBM 静爆扩挖法:隧道分为左右两个主洞,各主洞先利用 TBM 盾构机开挖出两个导洞,随后在已开挖导洞的基础上进行扩挖作业,其中 TBM 掘进每环开挖 1.5 m, TBM 导洞掘进施工顺序为: $3^\# \rightarrow 4^\# \rightarrow 1^\# \rightarrow 2^\#$,隧道断面设计如图 1 所示。

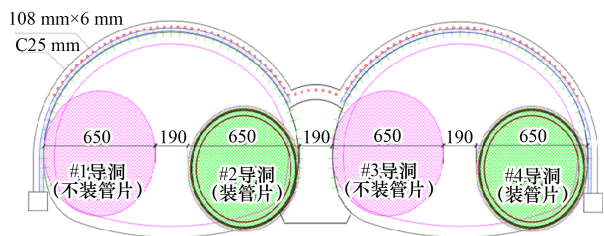


图 1 隧道断面设计

根据勘察结果及现场调查,隧道进口左线下穿 7 层民用建筑物,建筑物距离隧道拱顶距离约为 18 m,建筑物长度为 12.3 m,宽度为 11.5 m,为钢筋混凝土框架结构,建筑物基础为独立基础,

基础材料为 C25 混凝土,基础尺寸为 $2.8\text{ m} \times 2.2\text{ m}$ (长 $\times$ 宽)。隧道洞顶主要为强、中风化凝灰质砂岩,围岩属 V 级围岩,地层岩石强度较高,平均值达 120 MPa。隧道下方存在一条供水隧道,供水隧道设有 ECB 塑料防水板,采用钢筋混凝土结构,断面净尺寸为 $4.2\text{ m} \times 4.2\text{ m}$ (宽 $\times$ 高)。供水隧道初衬采用 15 cm 厚 C20 素混凝土,局部初支结构为 5 cm 厚锚喷混凝土,二衬为 50 cm 厚 C25 钢筋混凝土。南环路隧道与下覆供水隧道位置基本上下交叠,隧道底标高约为 32m,与供水隧道竖向间距约为 31.76 ~ 35.34 m,隧道与构建筑物相对位置关系如图 2 所示。

1.2 重难点分析

拟建布吉南环路隧道工程在 TBM 导洞掘进与扩挖施工过程中,对隧道自身及临近建构筑物产生复杂影响,相关分析中存在重难点问题如下。

(1) TBM 导洞掘进与扩挖施工的稳定性问题。需探究 TBM 导洞掘进与隧道扩挖作业引发的围岩应力重分布规律,解决施工顺序导致的应力叠加、变形滞后、围岩收敛等问题,通过数值模拟与现场监测,量化施工顺序对稳定性的影响程度,为制定适配的风险预控与支护优化策略提供参考。

(2) TBM 导洞掘进与扩挖施工对上部建筑物的影响。TBM 掘进与扩挖施工过程会对上部建筑物造成不同程度的影响,多导洞 TBM 掘进与双线隧道扩挖先后施工易导致地层沉降累积,使得确定建筑物关键受力部位与可能出现的破坏形式极为复杂,施工过程中可能引发建筑物沉降、倾斜、开裂等严重后果,对上部建筑物安全构成威胁。

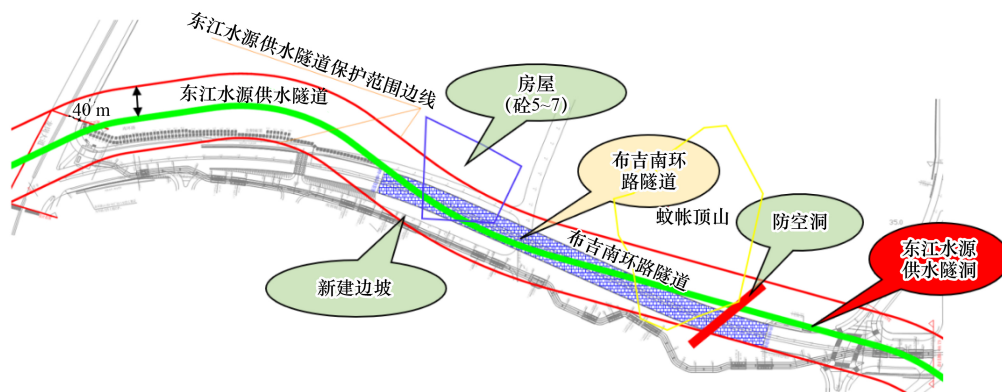


图 2 隧道与构建筑物相对位置关系

(3) 下覆供水隧道结构安全与变形问题。TBM 导洞掘进与导洞扩挖施工产生的地层扰动、应力释放, 通过土体介质传递至下覆供水隧道, 会对供水隧道结构安全构成潜在威胁。TBM 导洞掘进与隧道扩挖施工顺序会造成地层变形影响叠加, 使得确定供水隧道关键受力部位与可能出现的破坏形式极为复杂。

2 数值模拟

2.1 数值模型建立

基于实际工程地质条件和施工参数, 本文采用有限元分析软件建立了包含隧道及周边建构物的三维数值模型, 如图 3 所示。模型整体尺寸设定为 80 m×30 m×75 m(长×宽×高), 其中 X 轴代表水平方向, Y 轴为隧道纵向延伸方向, Z 轴表示重力作用方向。在边界条件设置方面, 模型四周施加法向位移约束, 底部边界同时约束水平位移和竖向位移, 以准确模拟实际工程中的边界约束条件。

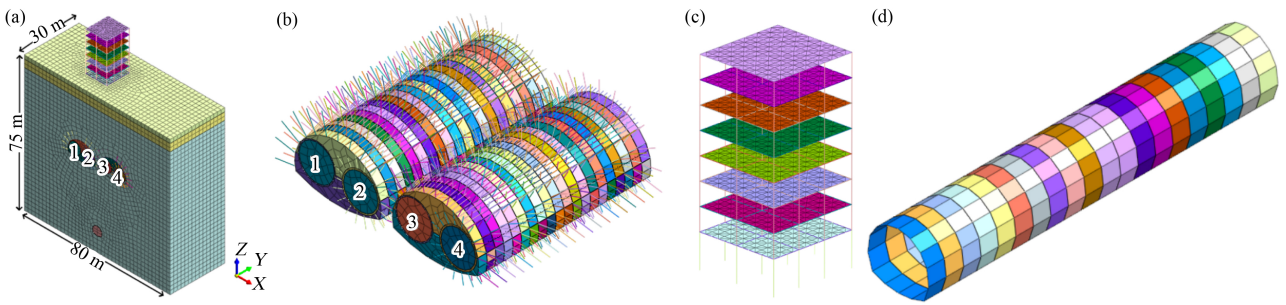
2.2 材料本构及参数

数值模拟中材料本构关系及参数: 岩土体选取 Mohr-Coulomb 弹塑性模型; 管片、喷混凝土及

锚杆选取线弹性模型。导洞支护方案采用差异化设计, 1[#]、3[#]导洞选用预制管片支护体系, 2[#]和 4[#]导洞则选用喷锚联合支护。其中, TBM 管片采用 C35 混凝土浇筑, 喷锚支护中喷射混凝土强度等级为 C25, 配套使用直径 25 mm 的 HRB400 级钢筋锚杆。扩挖工程主洞断面设计为高度为 11.46 m、宽度为 15.66 m 的拱形结构, 扩挖支护系统选用 Ø42 mm×4 mm 热轧无缝钢管作为超前支护, 配合 Ø22 mm 药卷锚杆和 C25 喷射混凝土组成联合支护体系。模型上部建构物采用 C25 混凝土独立基础, 下部供水隧道采用复合衬砌结构, 初期支护为 15 cm 厚 C20 素混凝土, 二次衬砌为 50 cm 厚 C25 钢筋混凝土。盾构管片采用板单元; 锚杆系统采用植入式桁架单元; 喷混凝土层采用实体单元; 上部建筑采用 3D 实体单元; 供水隧道采用 2D 板单元。各材料详细力学参数如表 1 所示。该建模方案充分考虑了实际工程中的材料特性与结构-土体相互作用机制, 可准确反映施工过程中的力学响应特征。

2.3 模拟工况设置

(1) 工况 1: S₀, 初始应力状态, 激活所有土层、建筑物、供水隧道、自重及边界荷载等,



(a) 整体模型; (b) TBM 四导洞及扩挖隧道模型; (c) 建筑物模型; (d) 供水隧道模型

图 3 隧道模型

表 1 土层及其他材料物理力学参数

名称	容重/(kN·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	弹性模量/MPa	泊松比
杂填土	19.0	17.0	25.0	11.4	0.30
粉质黏土	20.0	23.7	23.6	13.7	0.35
V 级围岩	20.0	26.0	100.0	4 500.0	0.40
管片	25.0	—	—	26 775.0	0.20
C25	24.0	—	—	28 000.0	0.20
Q235	78.5	—	—	210 000.0	0.30
C20	23.6	—	—	25 500.0	0.20

模拟土体及初始隧道在未施工情况下的自然状态, 并进行位移初始化。

(2) 工况 2: $S_1 \sim S_{20}$, 逐环进行右线 TBM3[#] 导洞掘进, 共掘进 20 环, 每环 1.5 m。

(3) 工况 3: $S_{21} \sim S_{40}$, 逐环进行右线 TBM4[#] 导洞掘进, 共掘进 20 环, 每环 1.5 m。

(4) 工况 4: $S_{41} \sim S_{60}$, 逐环进行右线 TBM1[#] 导洞掘进, 共掘进 20 环, 每环 1.5 m。

(5) 工况 5: $S_{61} \sim S_{80}$, 逐环进行右线 TBM2[#] 导洞掘进, 共掘进 20 环, 每环 1.5 m。

(6) 工况 6: $S_{81} \sim S_{100}$, 逐环进行右线隧道扩挖, 共扩挖 20 环, 每环 1.5 m。

(7) 工况 7: $S_{101} \sim S_{120}$, 逐环进行左线隧道扩挖, 共扩挖 20 环, 每环 1.5 m。

2.4 数值模拟验证

选取南环路隧道断面 K0+506 上 11 个监测点位监测施工过程中地面沉降变化, 监测点位布置如图 4 所示, 对比分析 V 级围岩条件下 TBM 导洞掘进与隧道扩挖过程中地面沉降实际监测数据与数值模拟结果, 对比结果如图 5 所示, 施工过程中建筑物沉降数值模拟计算结果与现场收敛监测数据对比如图 6 所示。根据地面沉降及建筑物沉降数据对比如图 5、6 可知: 实际监测数据与数值模拟结果数据的变化规律一致, 二者数值接近, 最

大误差不超过 10%, 表明本文所建立的数值模型合理可行, 结果可靠。

3 数值模拟结果分析

3.1 隧道周围地层受力变形特性

3.1.1 地面沉降规律

通过模拟计算得到的 V 级围岩条件下 TBM 四导洞掘进与扩挖施工各工况对应的地面沉降曲线如图 7 所示。模拟工况设定下, 隧道扩挖作业遵循既定施工顺序, 优先从右线隧道 3[#] 导洞启动施工, 3[#] 导洞贯通时对应的地面沉降最大值为 0.34 mm, 最大地面沉降值位于 3[#] 导洞上方, 距隧道轴线 8 m 处位置; 而后进行 4[#] 导洞掘进, 在 4[#] 导洞贯通时对应的地面沉降最大值为 0.70 mm, 相较于 3[#] 导洞贯通时地面沉降最大值增加了 105%, 最大沉降值位置向右偏移至距隧道轴线 16 m 处; 左线隧道首先进行 1[#] 导洞掘进, 1[#] 导洞贯通时对应的地面沉降最大值为 1.12 mm, 相较于 4[#] 导洞贯通时地面沉降最大值增加了 60%, 最大沉降值位置距隧道轴线 32 m; 最后进行 2[#] 导洞掘进, 2[#] 导洞贯通时地面沉降最大值为 1.42 mm, 相较于 1[#] 导洞贯通时地面沉降最大值增加了 26%, 最大沉降值位置向左偏移至距隧道轴线 16 m 处。TBM 四导洞全部贯通后进行导洞扩挖施工, 首先进行右线隧道

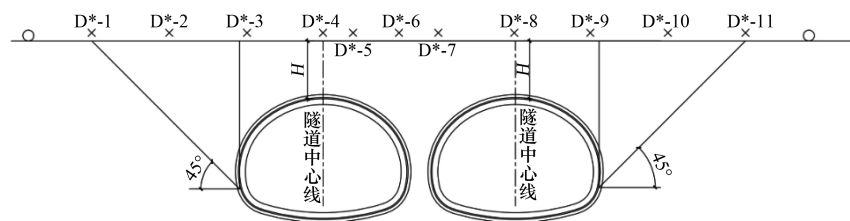
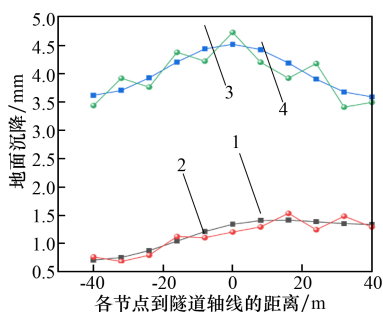
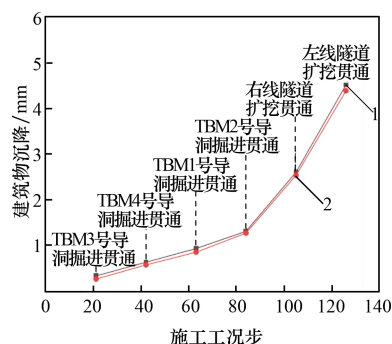


图 4 地面沉降监测点位布置



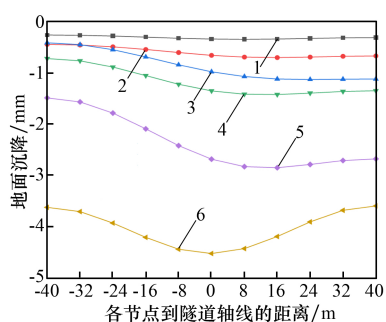
1—模拟结果; 2—监测数据;
3—导洞掘进贯通; 4—隧道扩挖贯通。

图 5 地面沉降模拟结果与监测数据对比



1—模拟结果; 2—监测数据。

图 6 建筑物沉降模拟结果与监测数据对比



1—3[#]导洞贯通; 2—4[#]导洞贯通;
3—1[#]导洞贯通; 4—2[#]导洞贯通;
5—右线隧道贯通; 6—左线隧道贯通。

图 7 各工况地面沉降规律

扩挖,右线隧道扩挖贯通时对应的地面沉降最大值为 2.85 mm,最大地面沉降值位置位于距隧道轴线 16 m 处;而后进行左线隧道扩挖,左线隧道扩挖贯通时对应的地面沉降最大值为 4.53 mm,相较于右线隧道扩挖贯通时地面沉降最大值增加了 58%,最大沉降值向左偏移至隧道中轴线附近。

总体上看,地面沉降值随着隧道施工顺序呈现出明显的叠加作用,后续施工过程对应的地面沉降值随施工顺序呈现非线性增长趋势,地面最大沉降点位置也随隧道施工顺序而发生偏移,在隧道施工过程中,隧道扩挖相较于 TBM 导洞掘进引发更大的地面沉降,主要归因于开挖规模与应力释放程度的差异。TBM 导洞掘进断面较小,单次开挖对地层扰动有限,应力释放相对局部化,仅在导洞周边形成小规模沉降槽;而隧道扩挖需将导洞断面扩大至设计尺寸,开挖断面面积显著增加,导致地层应力大范围卸荷,形成大面积沉降区域。同时,扩挖过程中支护结构转换与施工工序衔接易产生额外扰动,加剧土体变形;且扩挖阶段围岩应力重分布更剧烈,可能引发既有导洞已稳定的沉降区域二次变形,最终使得隧道扩

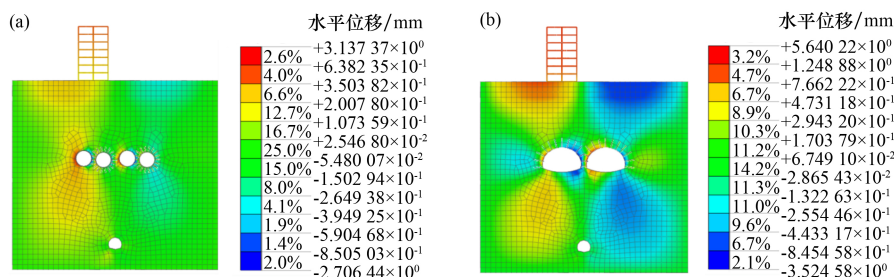
挖过程产生的地面沉降整体高于 TBM 导洞掘进阶段。在实际项目施工过程中,应优化施工工艺,采用分层分块、短进尺扩挖,减少单次应力释放量;强化超前支护与初期支护强度,如增设大管棚、提高注浆加固范围与密实度,控制围岩变形;建立高频次、高精度的地面沉降监测体系,实时反馈数据动态调整施工参数,同时对已开挖导洞区域加强支护结构稳定性复核,预防二次沉降风险,保障施工安全。

3.1.2 隧道收敛变形规律

TBM 四导洞掘进贯通及左右双线隧道扩挖贯通时围岩水平位移云图如图 8 所示。

结果显示:四导洞全部贯通时 3[#]导洞围岩水平方向收敛值为 3.77 mm;4[#]导洞围岩收敛值为 4.39 mm;1[#]导洞围岩收敛值为 3.11 mm;2[#]导洞围岩收敛值为 3.79 mm。可以看出各导洞贯通时围岩收敛值并不相同,4[#]导洞收敛值最大,3[#]导洞次之,2[#]与 1[#]导洞收敛值相对较小。左右双线扩挖贯通后,围岩水平位移云图呈现以隧道轴线为中心的对称分布,最大位移集中于双线隧道中间区域与拱腰部位,其中右线隧道收敛值为 4.04 mm,左线隧道收敛值为 3.62 mm。

各导洞围岩收敛值差异及双线扩挖后位移分布特征,主要受施工顺序、地层特性与应力叠加效应共同作用。4 条 TBM 导洞施工时,右线 3[#]、4[#]导洞先行开挖,由于 V 级围岩自稳能力弱,开挖后应力迅速重分布,且后续施工对其形成两侧扰动叠加,致使收敛变形集中,4[#]导洞尤为明显;而左侧 1[#]、2[#]导洞后行施工,受右线已开挖导洞“应力释放缓冲”影响,周边土体应力提前消散,因此收敛量相对较小。进入双线扩挖阶段,左右线对称施工使地层应力双向释放,位移场在隧道



不同工况:(a) TBM 四导洞掘进贯通时;(b) 左右双线隧道贯通时

图 8 隧道收敛变形云图

顶部与底部交汇叠加,加之拱腰部位为应力集中敏感区,最终在围岩水平位移云图上呈现以隧道轴线对称的分布特征。

3.1.3 围岩应力变化规律

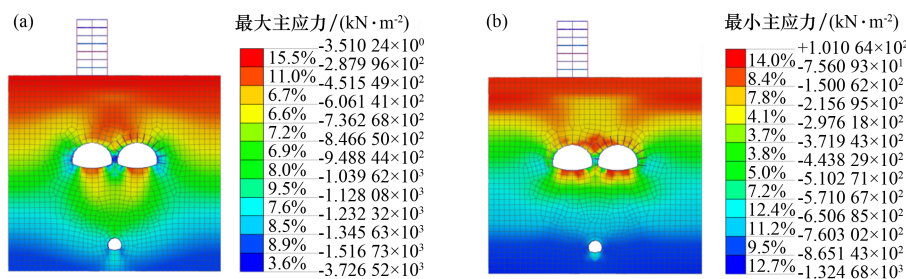
隧道扩挖贯通时围岩应力分布如图 9 所示。从图 9 中可以看出:双线隧道扩挖贯通时,隧道附近围岩主要受到压应力影响。在最大主应力和最小主应力云图中,双线隧道附近围岩都出现了明显的应力集中现象,尤其是在双线隧道的拱腰、拱脚及仰拱部位,这是因为隧道开挖打破了围岩初始应力平衡,导致围岩应力重新分布,在隧道周边产生应力集中。最大主应力主要集中在双线隧道拱腰附近区域,隧道拱腰处最大压应力为 3.73 MPa;隧道仰拱位置受拉,拉应力约为 0.10 MPa。从整体趋势看,距离隧道较远区域,应力分布相对均匀,接近初始地应力状态;而靠近隧道区域,应力因开挖扰动发生显著改变,呈现出从隧道周边向远处逐渐过渡、趋于稳定的态势,说明隧道开挖对围岩应力的影响范围有限,主要集中在隧道周边一定区域内。由于下方供水隧道的存在,对双线隧道周边应力分布产生一定影响,使双线隧道与供水隧道之间的围岩应力状态更复杂,应力集中区域相互叠加,该部位围岩

受力情况需重点关注,隧道施工过程中要做好防护措施,防止因应力集中引发围岩失稳从而对隧道本身及下方供水隧道造成危害。

3.2 对邻近建构筑物影响规律

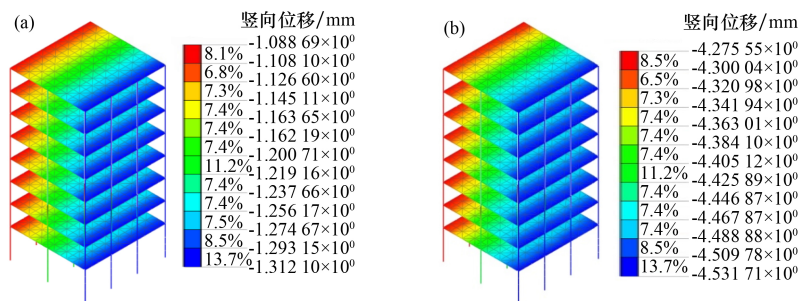
3.2.1 TBM 导洞掘进与隧道扩挖过程建筑物沉降规律

TBM 导洞掘进与隧道扩挖采用分阶段施工模式,施工顺序直接影响建筑物沉降规律,如图 10 所示。通常先开挖的导洞会导致地层应力初步释放,周边土体产生初始沉降,后续导洞开挖时,应力进一步叠加,沉降速率加快。先行导洞开挖后,建筑物沉降可能以缓慢增长为主;随着后续导洞相继掘进,各导洞引起的沉降槽相互叠加,建筑物进入快速沉降阶段。模拟结果显示:3[#]导洞贯通时,建筑物沉降最大值为 0.33 mm;4[#]导洞贯通时,建筑物沉降最大值为 0.63 mm,相较于 3[#]导洞贯通时增加了 90%;1[#]导洞贯通时建筑物沉降最大值为 0.93 mm,相较于 4[#]导洞贯通时增加了 48%;2[#]导洞贯通时建筑物沉降最大值为 1.31 mm,相较于 1[#]导洞贯通时增加了 41%,四导洞全部贯通时建筑物位移云图如图 10(a)所示。左右双线隧道扩挖的先后顺序直接决定建筑物沉降的变化规律,若采用先右侧后左侧的单向扩挖



不同应力:(a)最大主应力(b)最小主应力

图 9 应力云图

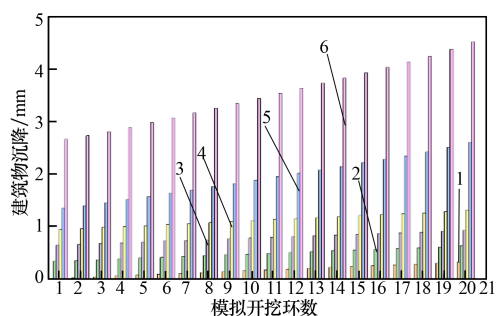


不同工况:(a)TBM 四导洞掘进贯通时;(b)左右双线隧道贯通时

图 10 建筑物位移云图

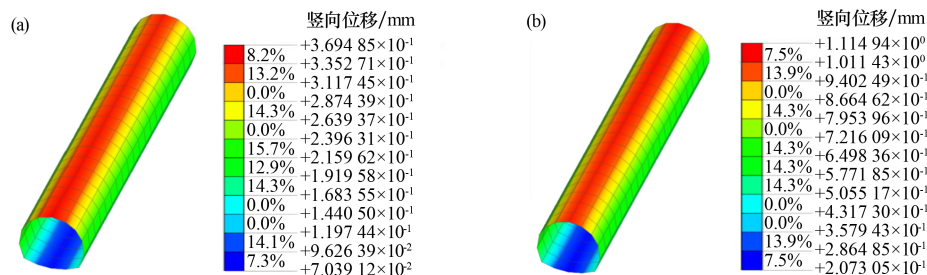
顺序,先行扩挖右侧隧道会导致地层应力向未开挖的左侧隧道方向转移,使建筑物向右侧倾斜,初期沉降以靠近右侧为主;后扩挖左侧隧道造成应力二次释放引发的沉降槽与首次扩挖过程应力叠加,致使建筑物整体沉降量显著增加,且沉降曲线呈现显著的上升趋势。模拟结果显示右线隧道扩挖贯通时建筑物沉降最大值为 2.61 mm,左线隧道扩挖贯通时建筑物沉降最大值为 4.53 mm,相较于右线隧道贯通时增加了 74%,左右双线隧道全部贯通时建筑物位移云图如图 10(b)所示。

数值模拟得到的 4 条 TBM 导洞掘进与左右双线隧道施工过程中建筑物沉降随开挖环数的变化如图 11 所示,从图 11 中可以看出:随着模拟开挖环数增加,隧道各开挖阶段对应的建筑物沉降呈上升趋势,TBM 导洞掘进阶段各工况建筑物沉降值整体处于较低水平,波动小,对建筑物沉降影响相对较小;隧道扩挖(尤其是左线)在施工过程造成的建筑物沉降较大,说明左线隧道扩挖是影响建筑物沉降的主要施工环节,右线隧道扩挖引起的建筑物沉降也高于 TBM 导洞掘进阶段,但低于左线。因此在项目实际施工过程中,隧道扩



1—TBM 3#导洞掘进; 2—TBM 4#导洞掘进;
3—TBM 1#导洞掘进; 4—TBM 2#导洞掘进;
5—右线隧道扩挖; 6—左线隧道扩挖。

图 11 建筑物沉降随开挖环数的变化



不同工况:(a) TBM 四导洞掘进贯通时;(b) 左右双线隧道贯通时

图 12 供水隧道位移云图

挖过程中应及时施作初期支护,如锚喷支护、钢拱架支护,减小单次开挖对土体的扰动,控制沉降发展。并合理安排 TBM 导洞掘进与隧道扩挖的施工间隔,让土体变形释放间隔一定时间,降低叠加影响。

3.2.2 TBM 导洞掘进与隧道扩挖过程供水隧道位移变化规律

TBM 导洞掘进与隧道扩挖贯通时下覆供水隧道竖向位移云图如图 12 所示。TBM 导洞掘进与隧道扩挖贯通后,供水隧道竖向位移沿轴线呈梯度化分布,从云图色彩渐变看,位移值从供水隧道顶部向底部逐渐变化,说明供水隧道顶部受 TBM 导洞掘进与隧道扩挖过程产生的力学响应影响更为显著,地层应力释放相对更充分,位移变化响应更快,表现为位移数值由顶部较大区域向下逐渐减小。根据云图显示的数据结果,在 TBM 四导洞掘进贯通时,供水隧道产生隆起值最大为 0.37 mm;在后续双线隧道扩挖贯通时,供水隧道产生的隆起值继续增大,最大达 1.11 mm。造成这一结果的原因是供水管道上方 TBM 导洞掘进与隧道扩挖施工过程中部分土体被移除,使原有地层的竖向应力平衡被打破,土体自重应力因开挖卸载而释放,下方供水隧道附近未开挖区域的土体会向开挖空区产生应力补偿性回弹,供水隧道便会受到向上的附加应力作用,从而出现隆起变形。

4 结论与建议

(1) 在 TBM 导洞掘进与左右双线隧道扩挖施工过程中,地面沉降值随施工工况变化总体上呈现出非线性增长趋势,且最大沉降点位置随施工顺序不断偏移,右线隧道扩挖贯通时地面沉降值最大为 4.53 mm;TBM 四导洞掘进贯通时各导洞

收敛情况不同,4[#]导洞收敛值最大,达 4.39 mm,3[#]、2[#]和 1[#]导洞依次减小,双线隧道扩挖完成后,水平位移呈现以隧道轴线对称分布,其中右线隧道收敛值为 4.04 mm,左线隧道收敛值为 3.62 mm;左右双线隧道扩挖贯通后,隧道附近围岩主要受压应力,隧道拱腰处最大压应力为 3.73 MPa;隧道仰拱位置受拉,拉应力约为 0.10 MPa。

(2) TBM 导洞掘进与左右双线隧道扩挖施工顺序对建筑物沉降规律有一定的影响,四导洞掘进过程中建筑物沉降逐步增长,4 条 TBM 导洞完全贯通时建筑物沉降最大值为 1.31 mm;左右双线隧道扩挖施工对建筑沉降影响较 TBM 导洞掘进过程更大,左线隧道扩挖贯通时建筑物沉降值最大为 4.53 mm。实际隧道扩挖施工过程应及时施作支护,并合理安排导洞掘进与扩挖施工间隔,以控制沉降。

(3) TBM 导洞掘进与左右双线隧道扩挖施工过程中,下覆供水隧道竖向位移沿轴线呈梯度化分布,顶部受开挖影响更显著,位移值由供水隧道顶部向底部渐减小,4 条 TBM 导洞完全贯通时供水隧道最大隆起值为 0.37 mm,双线隧道扩挖贯通后隆起值增至 1.11 mm。为降低 TBM 导洞掘进与左右双线隧道扩挖施工过程对供水隧道的影响,在隧道施工过程中应加强监测预警,通过优化 TBM 掘进参数、调整刀盘转速、降低掘进速度等方法,减少隧道施工对周边土体的扰动,合理设置各施工阶段的间隔时间。

参考文献:

- [1] 丁小军,王万平,奚魏征,等. 特长隧道 TBM 导洞扩挖法施工方案研究[J]. 公路,2023,68(7):63-68.
- [2] 王春国. 新建隧道下穿对既有隧道稳定性影响研究[J]. 交通科学与工程,2020,36(3):62-66.
- [3] 王赞. 复合岩层隧道下穿既有建筑 TBM 施工关键技术:以重庆轨道 9 号线中从区间隧道为例[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(增刊 2):520-526.
- [4] REN T,ZHANG H,GUO Y,et al. Calculation method for investigating the behavior of ground surface settlement of underpass buildings in TBM double-line tunnels [J]. Sustainability,2022,14(20):13410-13410.
- [5] 孙杰,武科,郑扬,等. 城市地铁 TBM 隧道掘进诱发既有建筑物变形的空间属性效应[J]. 山东大学学报(工学版),2021,51(1):32-38.
- [6] 冯涵,张学民,乔世范,等. 双线盾构隧道下穿既有建筑物诱发地表变形规律分析[J]. 铁道科学与工程学报,2015,12(4):866-871.
- [7] 张顶立,李鹏飞,侯艳娟,等. 城市隧道开挖对地表建筑群的影响分析及其对策[J]. 岩土工程学报,2010,32(2):296-302.
- [8] 唐福尧. 双线隧道近距离下穿对既有供水隧洞的影响[J]. 铁道勘察,2022,48(6):151-156.
- [9] 王伟. 下伏 TBM 掘进输水隧道对既有公路隧道影响的数值分析[J]. 土工基础,2023,37(5):769-772.
- [10] 杜明芳,张鹏,易领兵,等. 新建隧道施工对邻近既有地铁车站及隧道影响研究[J]. 工程建设,2024,56(1):18-23.