

Excavation Technology and Analysis of Mechanical Properties of Small-Spacing Tunnel

Runzhi Jia^{1*}, Gang Fang², Wei Chen¹, Laniu Zhang¹

¹The No. 1 Engineering Co., Ltd. of China Railway Beijing Engineering Group, Xi'an Shaanxi

²Key Lab of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai

Email: *31390800@qq.com

Received: Nov. 5th, 2019; accepted: Nov. 20th, 2019; published: Nov. 27th, 2019

Abstract

Taking the small-spacing tunnel of the Menghua Railway as an engineering background, based on the elasto-plastic finite element method, the three-dimensional numerical simulation of the excavation and support of the small-spacing tunnel was carried out. The stress and deformation characteristics of small-spacing tunnel were analyzed and compared with the field measurement data. The results show that the numerical simulation results are basically consistent with the field test results, which provides a theoretical basis and guidance for the design and construction of the small-spacing tunnel.

Keywords

The Small-Spacing Tunnel, Full Face Excavation, Mechanical Properties, Numerical Simulation, Field Test

小间距隧道开挖施工技术与力学特性分析

贾润枝^{1*}, 方刚², 陈伟¹, 张腊牛¹

¹中铁北京工程局集团第一工程有限公司, 陕西 西安

²同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海

Email: *31390800@qq.com

收稿日期: 2019年11月5日; 录用日期: 2019年11月20日; 发布日期: 2019年11月27日

*通讯作者。

摘要

以蒙华铁路某隧道小间距段为工程背景, 基于弹塑性有限单元法对小间距隧道段的开挖和支护全过程进行三维数值模拟, 分析了小间距段隧道受力和变形特性, 并结合现场实测数据进行对比。结果显示: 在围岩较好条件下, 小间距隧道采用全断面法开挖, 可有效地控制小间距隧道的应力集中和变形, 数值模拟计算结果与现场测试结果基本吻合, 为小间距隧道的设计和施工提供了理论依据和指导。

关键词

小间距隧道, 全断面法, 力学特性, 数值模拟, 现场测试

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着铁路建设规模的不断扩大, 隧道和地下工程的形式也多种多样, 小间距隧道结构形式就是其中典型的代表。小间距隧道是一种特殊的隧道形式, 具有地形条件限制小、线形顺畅、占地较少、施工周期较短和工程造价相对较低等优点, 近些年逐渐受到工程界的重视。但小间距隧道围岩力学性质复杂, 隧道开挖可能引起围岩变形较大等其它灾害, 轻则给地下工程造成一定的经济损失, 重则会带来灾难性后果, 因此研究这类隧道的受力和变形特性有着重要的工程价值。

李云鹏[1]采用数值模拟的方式对采用典型双侧导坑法的3车道小间距隧道的开挖施工过程进行了研究, 给出了不同围岩类型下的3车道小间距隧道在施工过程中的围岩破坏特征及其变形规律和变形规律的相似性, 获得了洞周最大变形量值之间的相对比值关系, 比选出了3车道隧道中隔墙最小间距的设计参考值。张聚文[2]采用FLAC3D对软弱围岩条件下大跨度浅埋偏压小间距隧道不同开挖工法的动态施工进行了数值模拟, 得出了隧道开挖支护施工过程中围岩与支护体系的位移变形及应力扩展的发展规律。荆春燕[3]对小间距隧道在洞口偏压和两个洞口有错台的情况下进行施工动态监测和平面数值模拟分析, 以云南省平年隧道为例, 通过分析现场监测数据, 得出现场量测的洞口地表沉降值对预测洞口塌方有重要作用的结论。

本文立足于蒙华铁路某隧道小间距段工程实践, 采用弹塑性有限单元法对小间距隧道段的开挖和支护全过程进行三维数值模拟, 研究了其开挖的施工力学特性, 为施工设计提供相应依据。

2. 工程概况

蒙华铁路小间距隧道位于江西省宜丰县车上乡境内, 隧道进出口里程分别为DK1700+928、DK1701+090, 隧道全长162 m。小间距隧道平面布置如图1所示。

隧道区属于剥蚀低山地貌, 地形起伏较大, 自然坡度多在 10° ~ 50° 之间, 地表为第四系残坡积层粉质粘土, 下伏基岩为雪峰期晚期第一次斜长闪长岩。地下水主要类型为基岩裂隙水及风化层中的孔隙水, 裂隙水主要赋存于基岩风化裂隙中, 其主要补给来源为地下水的渗透, 向低洼处径流排泄。全隧道洞身涌水量最大为 $752.4 \text{ m}^3/\text{d}$, 围岩富水程度为中等富水区。

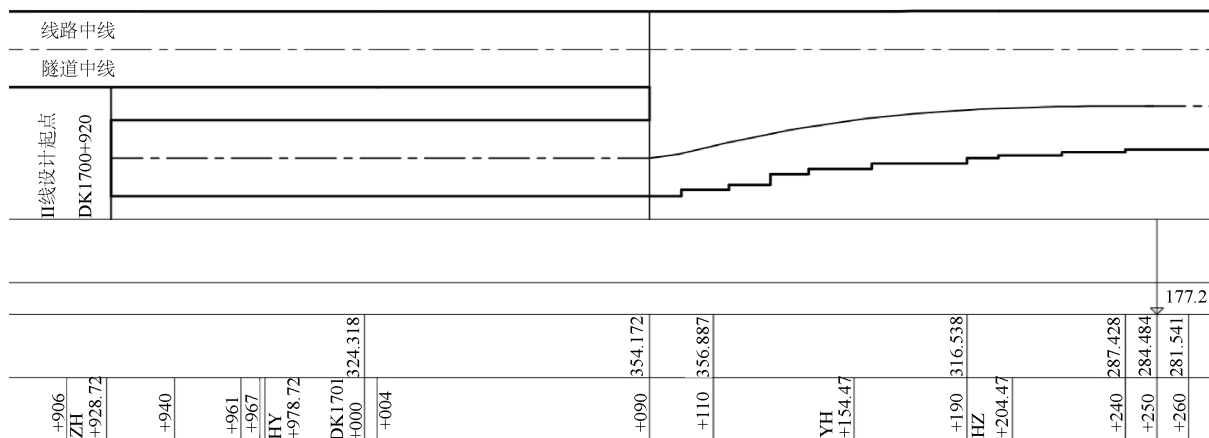


Figure 1. Plane arrangement chart of the small-spacing tunnel

图 1. 小间距隧道平面布置示意图

3. 小间距隧道开挖施工方案

针对小间距隧道结构受力复杂、围岩变形较大的特点，制定的相应施工顺序为：锚杆施工→左洞上断面开挖→左洞拱部初期支护→左洞下断面开挖→左洞下断面初期支护→右洞侧导洞开挖→中隔墙预应力锚杆施工→右洞扩挖→右洞初期支护→仰拱施工→衬砌施工。

施工现场制定的相应支护为：拱墙初期支护设置环向、纵向间距为 25 cm × 25 cm，φ6 钢筋网片，拱部锚杆采用 25 mm 组合中控锚杆，外侧边墙采用 22 mm 砂浆锚杆，内侧边墙采用 25 mm 低预应力对拉锚杆。锚杆间距环 × 纵 = 1.2 m × 1.2 m，长 2.5 m。初期支护拱墙采用 C25 网喷混凝土，仰拱采用 C25 素混凝土。

由于左右洞隧道间距小，洞身采用钻爆开挖必定会对中间岩柱稳定产生很大的破坏作用。为了使爆破对围岩的扰动降低到最小的程度，采用预裂式微振爆破的方式，控制爆破产生的振速，从而降低爆破对围岩的干扰。爆破时主要采取以下技术措施：

1、缩短洞身开挖循环进尺，从而减少每循环开挖的炸药总用量；II 类围岩的开挖进尺控制在在 1.0 m~1.5 m 以内。

2、炮眼采用线性布置，光面微差面爆破 即增加毫秒雷管的起爆段数，减少振动波叠加，控制振速。

3、分部爆破在局部破碎地段，采用分部爆破的方式。即在开挖面分部装药，各部间采用高段级毫秒雷管串接，防止各部同时起爆。本隧道在围岩破碎地段采用了小导洞分部开挖的方式，在围岩较好地段采用了台阶法环向切槽法开挖方式。

4、加固中间岩柱，隧道左右 2 洞室净间距最小距离为 2.2 m，围岩为 II 类，较为破碎。为了保证中间岩柱的坚固及永久稳定，采用水平拉杆加固措施。

5、加固水平拉杆，待中隔墙加固稳定后，进行隧道的右导洞开挖，同时进行中隔墙水平预应力拉杆的施工。水平预应力拉杆为 Φ25 精轧螺纹钢，拉杆长度比中间岩柱孔道长 5 cm，两端采用螺纹结构。

6、在右导洞开挖完毕后，由测量人员在中隔墙上确定水平拉杆的位置，采用风枪钻眼。为了保证拉杆垫板部位围岩的强度，在初期支护时，对拉杆端头部位围岩凿槽喷射高标号混凝土进行加强。并在喷射混凝土中预埋 PVC 注浆管，必须保证 PVC 管与注浆孔连通。

钻孔结束，喷射混凝土达到强度后，在孔道中安设水平拉杆，杆 2 端为螺纹结构，中间岩柱锚固时，一端采用锚垫板固定，另一端进行张拉。张拉设备为液压泵配合 YC60A 型千斤顶。当张拉到钢筋抗拉设

计强度 60%时, 进行拉杆初步锁定, 当岩体变形稳定, 锚杆应力增幅小于 15%时, 采用拧紧螺母进行拉杆最终锁定。为了防止锚杆张拉产生应力集中现象, 在同一截面上锚杆要进行间隔张拉。

根据蒙华铁路燕尾段隧道围岩特性, II 级围岩采用全断面法开挖施工。施工中, 对围岩和衬砌结构进行实时监控量测, 及时反馈结果, 为洞身开挖围岩稳定评判提供依据。如图 2 所示。

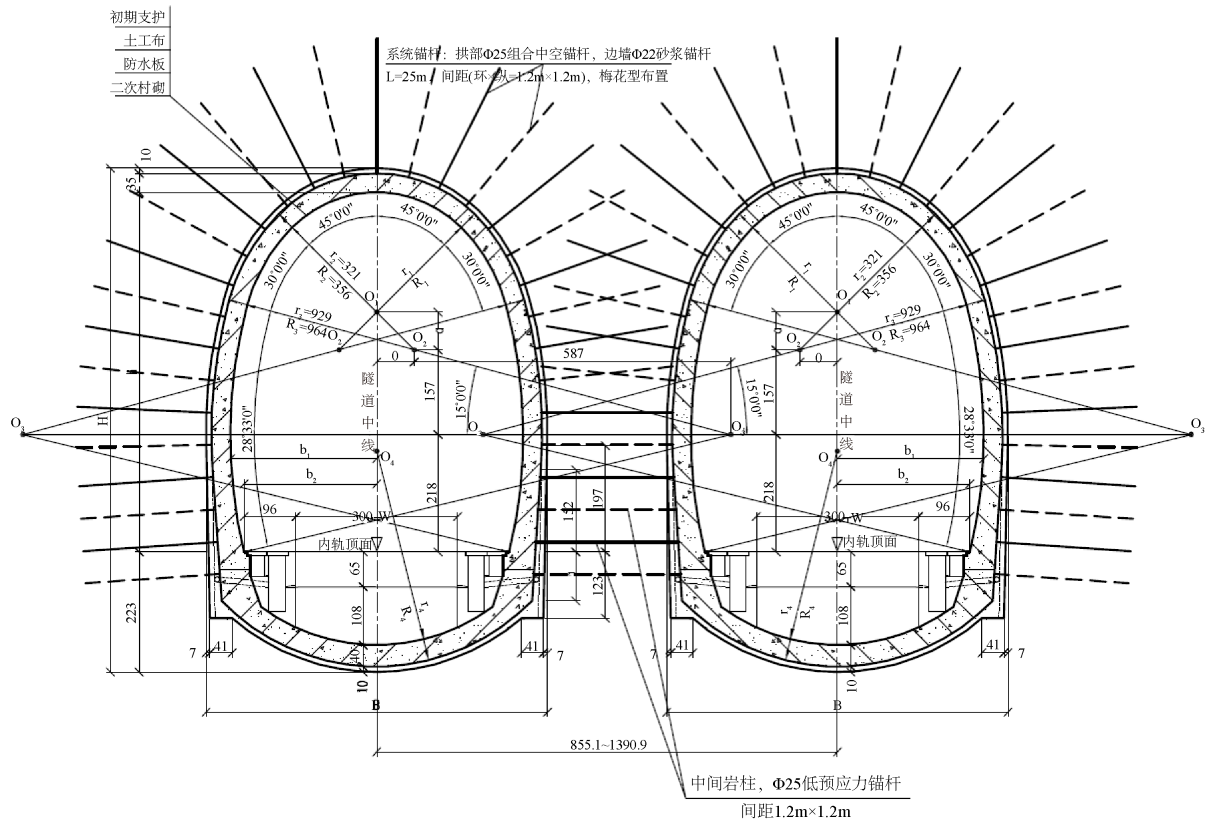


Figure 2. Diagram of small-spacing tunnel cross section
图 2. 小间距隧道横断面图

4. 数值计算方法与结果分析

4.1. 单元类型

数值模拟计算过程采用大型有限元 MIDAS GTS NX 软件。计算时假定[4] [5] [6] [7] [8]隧道围岩为连续介质, 采用各向同性弹塑性实体单元进行模拟; 初期支护采用壳体单元进行模拟, 二次衬砌采用弹性实体进行模拟, 单元锚杆则采用植入式梁单元进行模拟。计算中未单独考虑钢筋网和钢支架的作用。

4.2. 计算模型

根据勘察设计资料, 模型计算时围岩物理力学参数取值如表 1 所示。

为减小有限元模型中边界约束条件对计算结果产生的不利影响, 计算模型的边界范围在各个方向上均大于三倍的洞跨。具体计算时, 计算域在水平方向宽度取 150 m, 在竖直方向上, 考虑隧道实际情况模拟, 在横向取隧道纵深长度 45 m。围岩、二衬均用实体单元模拟, 如图 3~4 所示。

各工况的计算步骤如下:

- (1) 确定断面的几何参数及围岩和支护结构的各种力学参数;

- (2) 确定计算域及围岩和支护结构的有限元网格;
- (3) 计算围岩的初始位移场;
- (4) 分阶段计算围岩和结构的应力和位移;
- (5) 叠加各阶段的计算值, 得到围岩和支护结构的最终应力和位移;
- (6) 根据最终的应力和位移值, 评估围岩和支护结构的强度和稳定性。

Table 1. Physical and mechanics parameters of the small-spacing tunnel

表 1. 小间距隧道物理力学参数

材料	重度/kN/m ³	弹性模量/Gpa	内摩擦角/°	粘聚力/kpa	泊松比
II 级围岩	26	25	55	1700	0.22
C25 混凝土	24	28	-	-	0.167
C35 混凝土	25	30	-	-	0.2
钢材	78.5	210	-	-	0.2

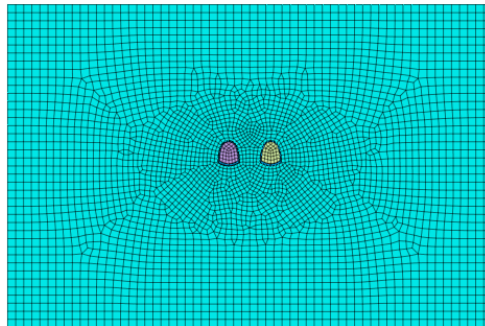


Figure 3. Calculation model grid graph of the small-spacing tunnel

图 3. 小间距隧道计算模型图

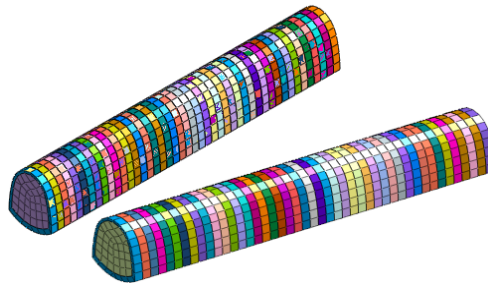


Figure 4. Lining position relationship diagram of the small-spacing tunnel

图 4. 小间距隧道衬砌位置关系示意图

4.3. 模拟施工过程

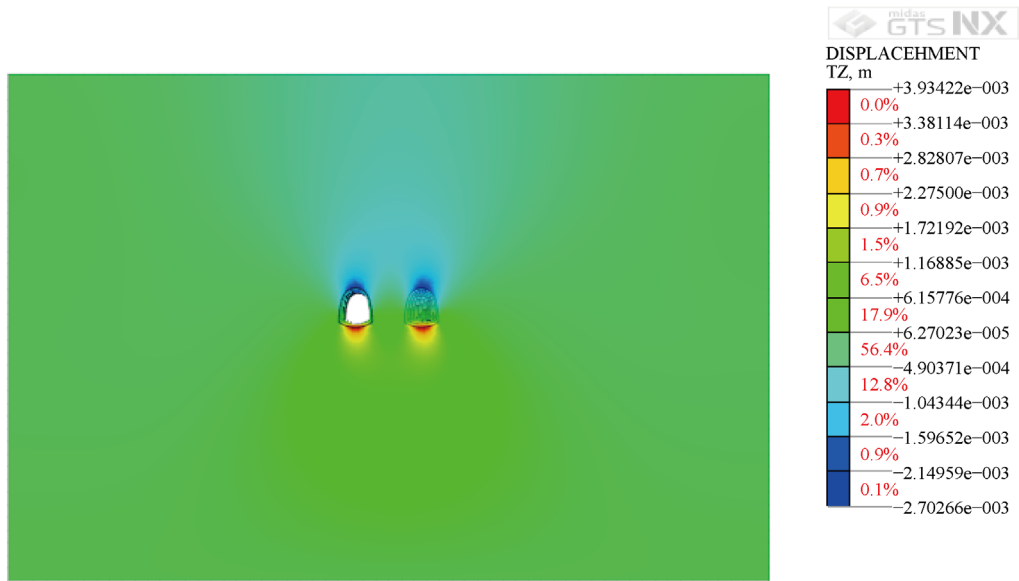
模拟施工先开挖左侧隧道, 对应围岩级别为 II 级围岩, 采用全断面开挖法; 再开挖右侧隧道, 对应围岩级别为 III 级围岩, 全断面开挖法。模型选取循环进尺为 3 m, 分 30 步开挖。模拟过程中更改相应区域岩体单元参数模拟二衬, 激活加固区域材料模拟锚杆加固, 激活相应板单元作为初衬模拟喷射混凝土, 在模型上方施加相应荷载模拟隧道埋深受力状况。

4.4. 计算结果分析

(1) 围岩变形分析

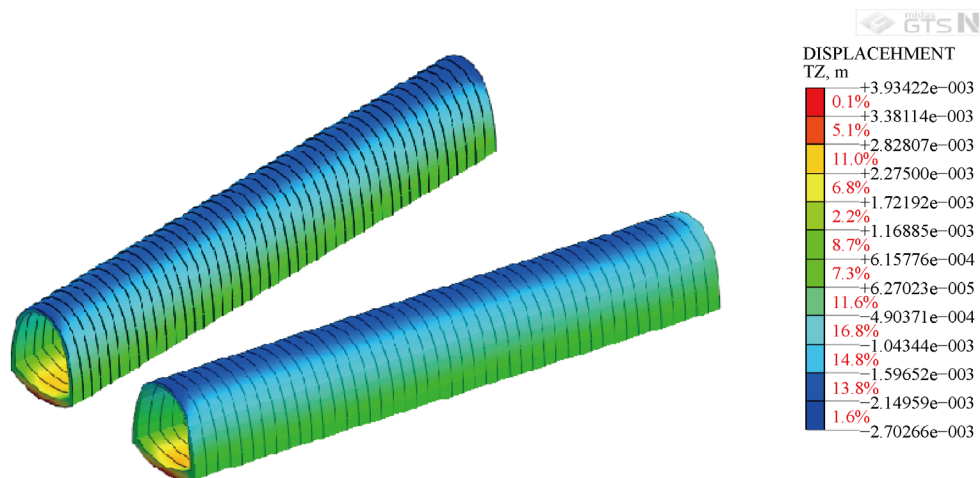
根据模型数值计算的结果，对小间距隧道开挖引起的围岩和隧道的竖向变形进行分析，如图 5~6 所示。

左侧隧道开挖完成后，对右侧隧道在开挖过程中对左侧隧道拱顶下沉的影响进行研究分析，得到右侧隧道开挖过程中左侧隧道拱顶最大下沉量如图 7 所示。



[DATA] 小间距分岔隧道开挖, S92, INCR=1 (LOAD=1.000), [UNTT] kN, m

Figure 5. Contour of vertical deformation of the small-spacing tunnel
图 5. 小间距跨隧道竖向变形云图



[DATA] 小间距分岔隧道开挖, S92, INCR=1 (LOAD=1.000), [UNTT] kN, m

Figure 6. Contour of vertical deformation of the small-spacing tunnel secondary lining
图 6. 小间距隧道二衬竖向变形云图

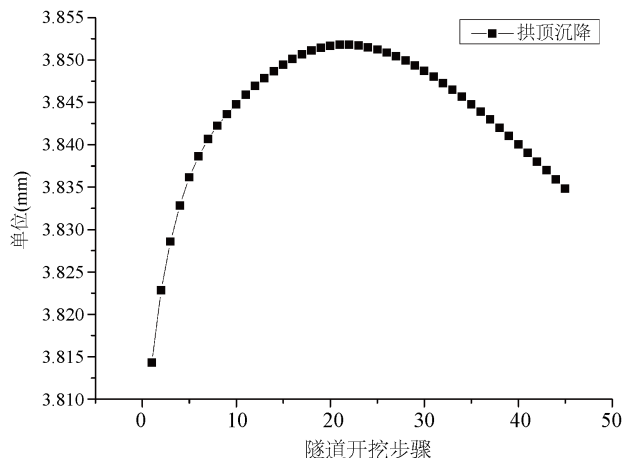


Figure 7. Vertical deformation graph of the small-spacing left tunnel
图 7. 小间距左侧隧道拱顶最大竖向变形图

由图表分析可知：小间距隧道采用全断面开挖法开挖时，拱顶最大沉降量 2.7 mm，隧底最大隆起量为 3.93 mm，该最大变形与 II 级围岩隧道最大变形阈值比较接近，可见选用的支护结构和开挖方式是比较合理的。此外，小间距隧道开挖的时候会对另一侧隧道有扰动，建议加强开挖完成的隧道的监控监测。

(2) 衬砌受力分析

隧道开挖过程中衬砌最大主应力图如图 8 所示。

由图表可知：衬砌最大主应力为 9.72 Mpa，与支护结构最大承受应力相比，仍有一定安全富余，可见，选用的支护和注浆是比较合理的。但是可以发现，最大主应力在隧道开挖初期变化较大，分析可能是因为土地受到扰动，应力重分布所致，建议做好初期支护，以减少围岩受力变形。随后最大主应力值趋于稳定，分析可能是由于围岩为 II 级围岩，岩性较好，这表明在岩性较好的地段，隧道开挖可以进行更加快速安全的施工。

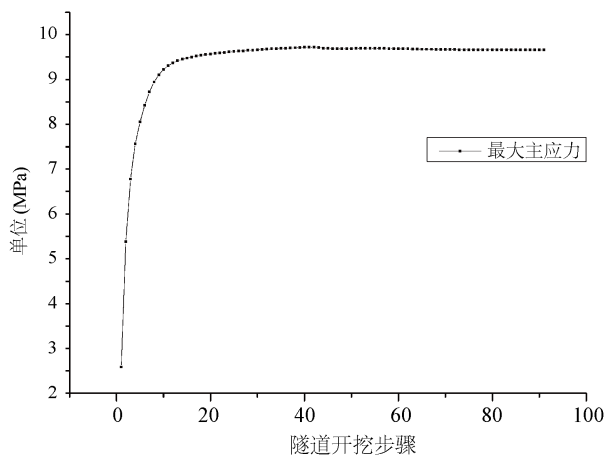


Figure 8. Lining maximum principal stress cloud of the small-spacing span tunnel
图 8. 小间距跨隧道衬砌最大主应力图

(3) 小间距隧道开挖变形分析

为确保隧道施工安全，施工过程中对隧道进行了信息化监控量测，表 2 分别为拱顶沉降现场测试结

果与计算结果的对比。结果显示：现场测试值与理论计算值基本吻合。

Table 2. Comparison of the site measured vault settlement and calculation value

表 2. 现场实测拱顶沉降与计算值对比

里程	DK1701 + 045	DK1701 + 070	DK1701 + 090
实测值/mm	1.2	1.5	1.3
计算值/mm	2.15	2.16	2.7

5. 结论

本文结合蒙华铁路某隧道小间距道的工程实例，通过有限元分析软件对隧道施工全过程进行动态模拟。模拟计算结果表明，小间距跨隧道采用全断面法开挖时，拱顶最大沉降量为 2.7 mm，隧底最大隆起量为 3.93 mm，仍有一定安全富余，小间距隧道开挖的时候会对另一侧隧道有扰动，建议加强开挖完成隧道的监控监测。

衬砌最大主应力为 9.72 Mpa，与支护结构最大承受应力相比，仍有一定安全富余，可见，选用的支护和注浆是比较合理的。

现场监测结果显示，拱顶最大沉降为 1.5 mm，满足施工要求，且与数值计算结果较为吻合。

参考文献

- [1] 李云鹏, 王芝银, 韩常领, 霍明, 艾传志. 不同围岩类别小间距隧道施工过程模拟研究[J]. 岩土力学, 2006(1): 11-16+28.
- [2] 张聚文, 傅鹤林. 浅埋偏压小间距大跨隧道开挖工法的数值分析[J]. 公路工程, 2018, 43(3): 26-30.
- [3] 荆春燕, 黄宏伟, 张子新, 张亮, 雷新文. 小间距隧道施工动态监测与数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007(3): 503-508.
- [4] 李毕华. 小间距隧道施工的现场实测与物理模型试验和数值模拟结果的对比研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2007.
- [5] 黄宝龙. 复杂环境下小间距隧道施工控制关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [6] 朱灿. 小间距隧道施工分析[J]. 交通世界, 2018(19): 118-119.
- [7] 黄方. 恶劣地质条件下小间距隧道施工的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [8] 李云鹏, 艾传志, 韩常领, 霍明. 小间距隧道爆破开挖动力效应数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2007(1): 75-81.