

群洞开挖顺序对隧道仰坡的影响研究

蔡毛毛

重庆市轨道交通建设办公室, 重庆

收稿日期: 2022年8月19日; 录用日期: 2022年9月7日; 发布日期: 2022年9月14日

摘要

随着城市化进程的加快, 寸土寸金的城市建设局面, 涌现出大量的岩土工程技术问题亟待解决。研究群洞的开挖顺序对隧道仰坡的影响已经成为了城市地下工程建设中必须面临的一项重要课题。本论文依托重庆市红岩村隧道群工程, 采用数值模拟方法, 分别对三种开挖顺序进行了模拟。结果表明, 开挖顺序为“先开挖车站隧道, 再开挖上部的主线隧道”时群洞开挖引起仰坡的竖向位移最小, 即隧道群开挖对隧道仰坡的影响最小。

关键词

隧道群, 仰坡, 开挖顺序

Study on the Influence of Excavation Sequence of Group Caves on Tunnel Slope

Maomao Cai

Chongqing Rail Transit Construction Office, Chongqing

Received: Aug. 19th, 2022; accepted: Sep. 7th, 2022; published: Sep. 14th, 2022

Abstract

With the acceleration of urbanization and the situation of urban construction, a large number of geotechnical engineering problems have emerged to be solved urgently. It has become an important task to study the influence of excavation sequence of group caves on the slope of tunnel. Based on the Hongyancun Tunnel group Project in Chongqing, this paper adopts numerical simulation method to simulate three kinds of excavation sequence. The results show that when the excavation sequence is “first excavating station tunnel, then excavating upper main tunnel”, the vertical displacement of inverted slope caused by group excavation is the least, that is, the impact of group excavation on the inverted slope of tunnel is the least.

Keywords

Tunnel Group, Excavation, Sequence of Inverted Slope

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

近年来随着国民经济的快速发展,城市人口出现明显增加。为了很好地解决城市公共交通问题,以城市地铁建设为主的地下交通和地下空间的综合利用进入了飞速发展时期。为了能够在城市复杂环境及空间的制约下,合理高效地利用宝贵的地下空间资源,必然会出现大量隧道同时穿越同一狭窄地下空间的情况,形成大规模、高密度的城市隧道群。如何解决城市大规模、高密度隧道群的设计,以及在施工过程中对边仰坡和周围建筑物影响的难题,是在我国城市化进程中面临的紧迫课题。

隧道群的施工具有强烈的空间效应,隧道之间的相互影响不能忽略[1],而影响隧道群空间效应主要有以下几个因素:隧道群的开挖方法、施工顺序和隧道之间的间距[2] [3] [4]。

近年来,诸多学者和工程技术人员已在群洞隧道相互影响、隧道施工对边仰坡影响和对周围建筑物的影响等方面做了很多研究。万涛,林刚[5]利用有限差分软件对超小净距三洞隧道群的施工性态开展了研究,得到不同开挖方法及加固方式下的地表沉降的特点和初期支护结构的受力特征,并与现场实测数据相印证。李为洁[6]数值模拟不同开挖顺序下浅埋小净距隧道的力学行为,对比不同开挖顺序下的洞身沉降、地表沉降。同时,研究了最终围岩位移、应力以及中墙岩体位移。王腊梅[7]从隧道洞口施工扰动因素出发,研究其对隧道边仰坡的稳定性影响。李伟[8]等基于正交试验设计方法和数值模拟计算手段,对净距、埋深、围岩级别和隧道群掌子面错距等因素对隧道群开挖稳定性的影响进行了研究。李涵宇[9]针对地下洞室群围岩稳定性的研究中涉及小净距多孔洞开挖方法的研究较少问题,开展对小净距地下洞室群围岩稳定性进行研究。

尽管对这一问题已有许多研究成果,但是仍然存在有待解决的问题。很少有从隧道群单独开挖时的施工顺序方面去研究群洞开挖对隧道仰坡的影响。本论文依托重庆市红岩村隧道群工程,通过资料收集、地质资料勘查以及数值模拟的方法,对隧道群开挖顺序对隧道仰坡的影响开展研究。

2. 工程概况

如图 1,三纵线隧道与轨道交通五号线共用红岩村大桥跨越嘉陵江,受红岩村大桥高程及平面线位限制,三纵线 4 座隧道:红岩村左线隧道(长 3723.54 m,洞口群洞段埋深 14~64 m)、右线隧道(长 3715 m,群洞段埋深 14~53 m)、歇台子连接线 X-A 隧道(1490.23 m,群洞段埋深 24~63 m)和 X-B 隧道(1383.66 m,群洞段埋深 28~55 m),位于轨道五号线红岩村车站隧道(暗挖隧道长 40.8 m,埋深 24~42 m)之上。

其中红岩村三车道大断面隧道位于轨道五号线红岩村车站隧道左右拱肩,最小净距分别为 2.04 m 和 3.40 m,三隧依次呈交错关系,且长距离紧贴、并行。梨菜铁路隧道(已经暂停运营)红岩村隧道位于五号线红岩村车站隧道暗挖段下方,与五号线车站隧道仰拱净距约 1.3 m,与五号线车站明挖底部边墙最小净距约为 4.7 m。左右线隧道中心线距离为 31.1 m。

重庆轨道九号线(后建)位于轨道五号线红岩村车站及梨菜铁路隧道下方,其站后区间斜下穿五号线西南侧风道和区间隧道,与五号线风道结构净距 13 m 左右。

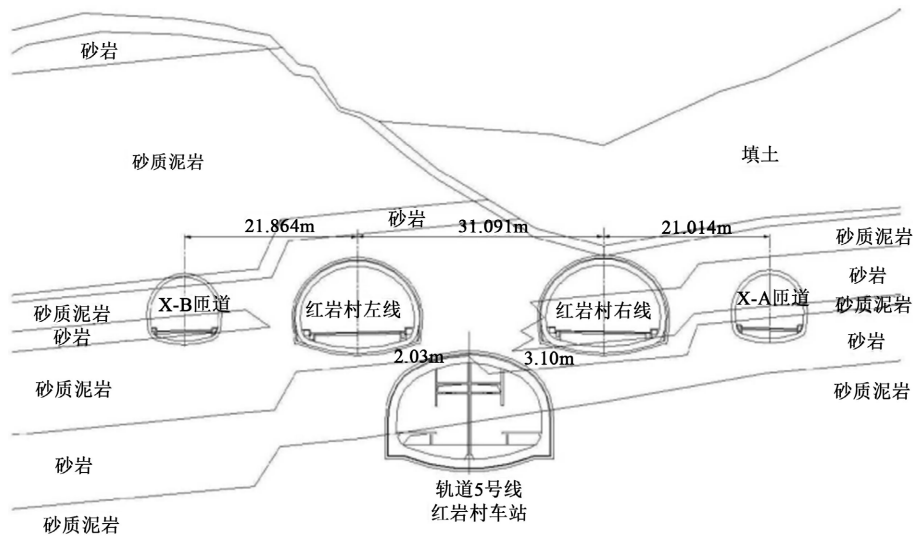


Figure 1. Front view of Hongyan Village group caves superimposed
图 1. 红岩村群洞叠加正面图

3. 数值模型的建立

本文采用 Abaqus 通用有限元软件进行三维数值模拟, 计算红岩村隧道群的施工过程并分析其产生的影响。

3.1. 计算模型

如图 2 和图 3。模型尺寸: 根据实际工程情况沿纵向取 60 m (其中包括三纵向主洞和地铁车站主洞); 在左右线隧道外各取 3.5 倍洞径(约 45 米)为隧道左右边界, 模型宽度总宽为 140 m; 取上水平地表面为模型上边界, 下边界取 3.5 倍洞高(约 49 米)为下边界, 模型总高度为 100 米。

边界条件: 前后、左右方向施加水平约束, 垂直方向底面施加竖向约束, 顶面和仰坡坡面为自由面。

荷载确定: 对于岩土体, 主要考虑土体单元的重力; 对于地表建筑物, 将其荷载视为作用在 $10\text{ m} \times 32\text{ m}$ 面积上的均布荷载, 大小为 15 kN/m^2 ·层, 通过基础传递给地基。建筑物共 12 层楼, 因此均布荷载换算到 15 根桩基础顶部 0.785 m^2 大小的面积上, 基础顶部轴向荷载约为 4892 kN/m^2 。

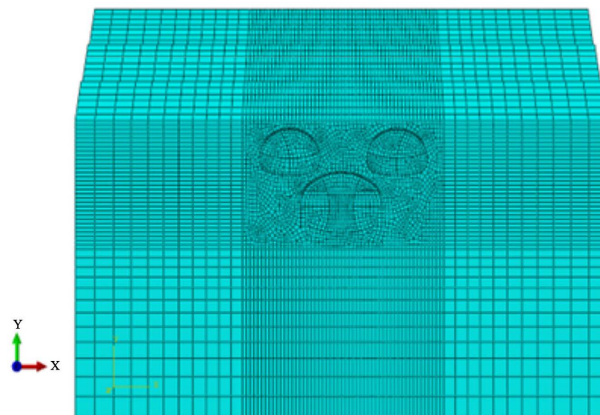


Figure 2. 3D model front view
图 2. 三维模型正视图

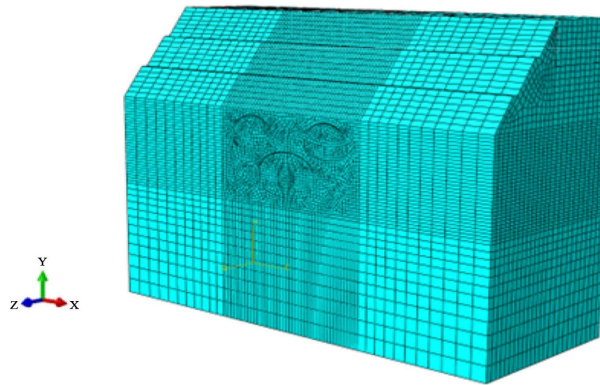


Figure 3. 3D model grid view
图 3. 三维模型网格图

3.2. 计算步骤

隧道群施工工序参照实际设计施工工序确定。左右线隧道采用 CRD 开挖法，隧道断面共分为 4 个开挖面；车站隧道采用双侧壁导坑法开挖，隧道断面共分为 9 个开挖面。每一个开挖面依次开挖 6 米。初期支护结构滞后一个分析步施作，二次衬砌施作与各隧道最后施工的掌子面前后距离为 12 米，二次衬砌在拆除临时支护的后一个分析步再施作。

4. 隧道群开挖顺序的影响研究

本章通过数值模拟的方法，分析比较以下三种不同施工顺序下对群洞开挖对隧道仰坡的影响：① 先开挖车站隧道，再开挖右线隧道，最后开挖左线隧道；② 先开挖右线隧道，再开挖车站隧道，最后开挖左线隧道；③ 先开挖右线隧道，再开挖左线隧道，最后开挖车站隧道。

为了定量了解隧道开挖过程对仰坡垂直方向变形的影响，调用仰坡监控点。如图 4 所示，断面 1~断面 4 依次为仰坡的坡脚线、一级边坡坡顶线、二级边坡坡顶线和三级边坡坡顶线所在的横断面，起始位置从仰坡前缘至仰坡后缘，各级边坡的高差均为 10 米。每个监测断面在仰坡上布置 5 个监测点，它们从左到右依次布置在左线隧道拱顶上方、左线隧道与车站隧道之间、车站隧道拱顶、右线隧道与车站隧道之间以及右线隧道拱顶上方，整个仰坡布设 20 个监测点。

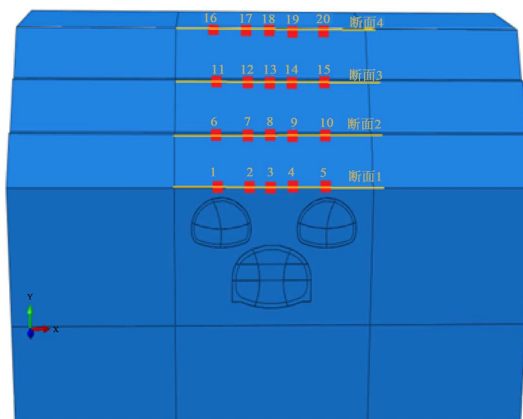


Figure 4. Schematic diagram of monitoring section and measuring point layout
图 4. 监测断面及测点布置示意图

4.1. 方案一：先开挖车站隧道

在车站隧道开挖后，如图 5 所示，仰坡形成以车站隧道拱顶为中心的沉降槽曲线。各级仰坡上，越靠近沉降槽中心的测点的沉降值越大，断面 1~断面 4 上仰坡沉降最大值分别为 11.44 mm、9.81 mm、8.71 mm 和 7.96 mm。且在左右两侧断面距离中心线 15 米的范围内，仰坡前缘的沉降值大于后缘的沉降值。

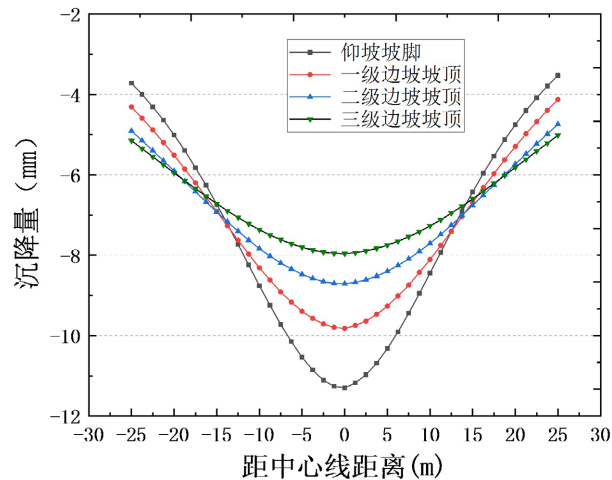


Figure 5. Supine slope displacement of the station tunnel through
图 5. 车站隧道贯通后仰坡位移

右侧隧道开挖完成后，如图 6，仰坡沉降最大值依然在断面 1 的坡脚上，位于车站隧道中心右侧 8.75 米，沉降值达到 18.72 mm。

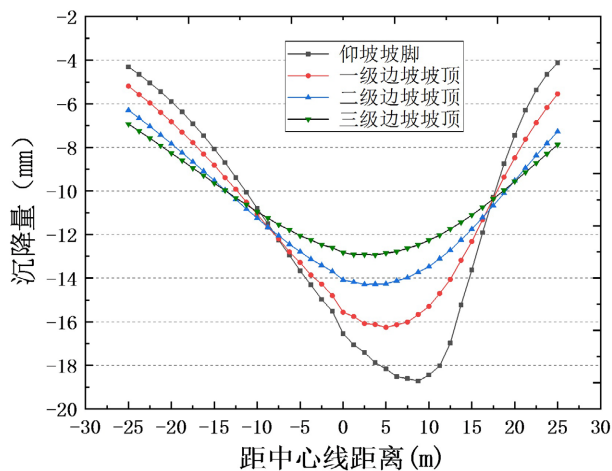


Figure 6. Vertical slope displacement of right-line tunnel through
图 6. 右线隧道贯通后仰坡位移

最终各隧道贯通后，如图 7，在车站隧道中心左右各 10 米范围内，仰坡坡脚上的沉降值较为接近，最大值为中心线左侧 8.75 米处的 23 mm。车站隧道拱顶上部，断面 2 上的仰坡沉降量与坡脚线上非常接近，这是因为三洞的对岩体的影响在车站隧道拱顶上部产生了叠加效应。左右线隧道开挖对仰坡前缘的影响程度不大，仅在其两拱腰附近范围内。

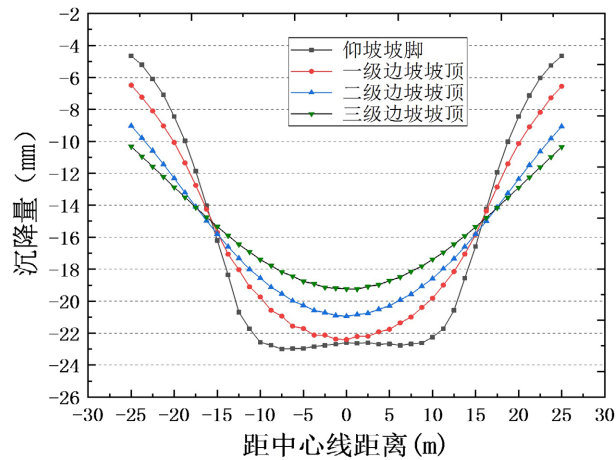


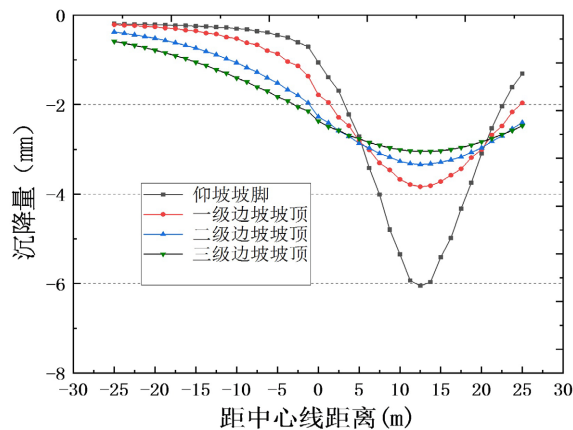
Figure 7. Lateral slope displacement of left line tunnel through
图 7. 左线隧道贯通后仰坡位移

4.2. 方案二：先开挖右线隧道

由图 8(a), 右线隧道开挖完成后, 各断面仰坡沉降槽中心均在距中心线 14.65 米, 即右线隧道拱顶部上部。仰坡前缘沉降量大于后缘沉降量, 各断面最大沉降量分别为 6.05 mm、3.83 mm、3.34 mm 和 3.05 mm, 可见右线隧道开挖对仰坡的影响范围较小。由于地层影响范围呈一定角度, 因此右线隧道左右两侧各 9 米范围外, 仰坡后缘的沉降量大于仰坡前缘。

由图 8(b), 车站隧道开挖完成后, 各断面最大沉降量分别为 18.43 mm、16.40 mm、14.62 mm 和 13.28 mm 差异量较上一阶段小, 并且各断面沉降槽中心均向左移动, 但断面 1 沉降槽中心较后缘断面偏移量较小。这是因为仰坡后缘在车站隧道拱顶上部的的位置, 受到车站隧道和右线隧道开挖的叠加影响, 因此对断面 2~断面 4, 靠近中心线位置的沉降量较大; 而对仰坡近坡脚线处, 车站隧道拱顶处上部主要受车站隧道开挖的影响, 右线隧道对其影响不大。

由图 8(c), 左线隧道开挖完成后, 随着左侧围岩的应力释放, 其上部岩体位移量大于右侧岩体, 因此仰坡横向沉降曲线的沉降槽中心左移至车站隧道拱顶上部。但同一断面上中心线左侧的仰坡沉降量大于右侧, 这是因为车站隧道和右线隧道的先行开挖恶化了围岩条件, 后行洞开挖的影响程度更大。各断面仰坡中心线处沉降量分别为 23.21 mm、22.97 mm、21.62 mm 和 19.93 mm, 断面 2 上仰坡沉降与仰坡坡脚线较为接近, 其原因同前所述, 仰坡后缘受各隧道开挖的叠加影响。



(a) 右线隧道贯通后

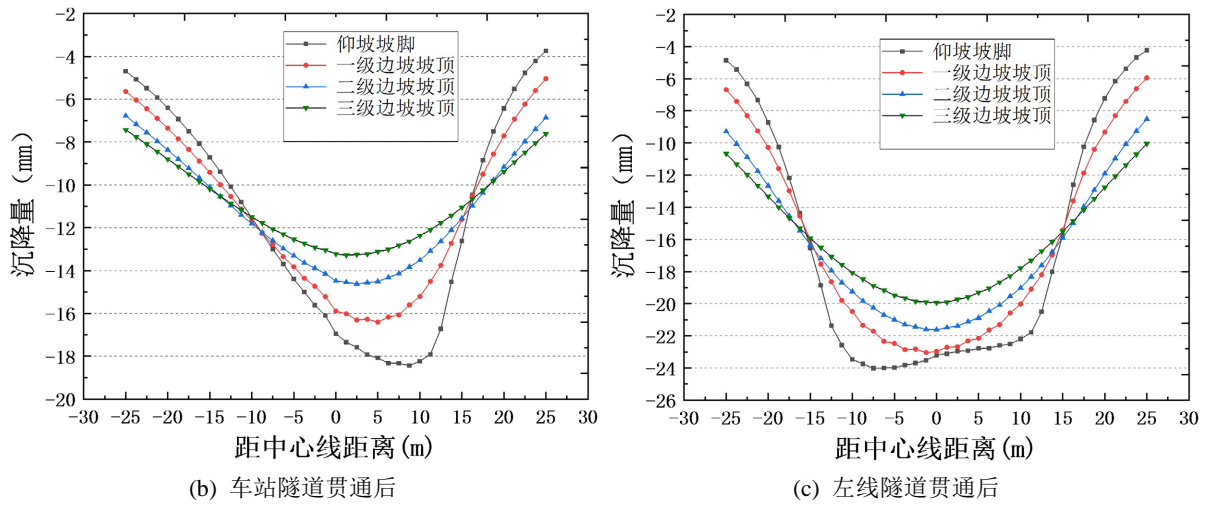


Figure 8. Lateral settlement curve of the vertical slope of each tunnel in Scheme 2
 图 8. 方案二各隧道贯通后仰坡横向沉降曲线图

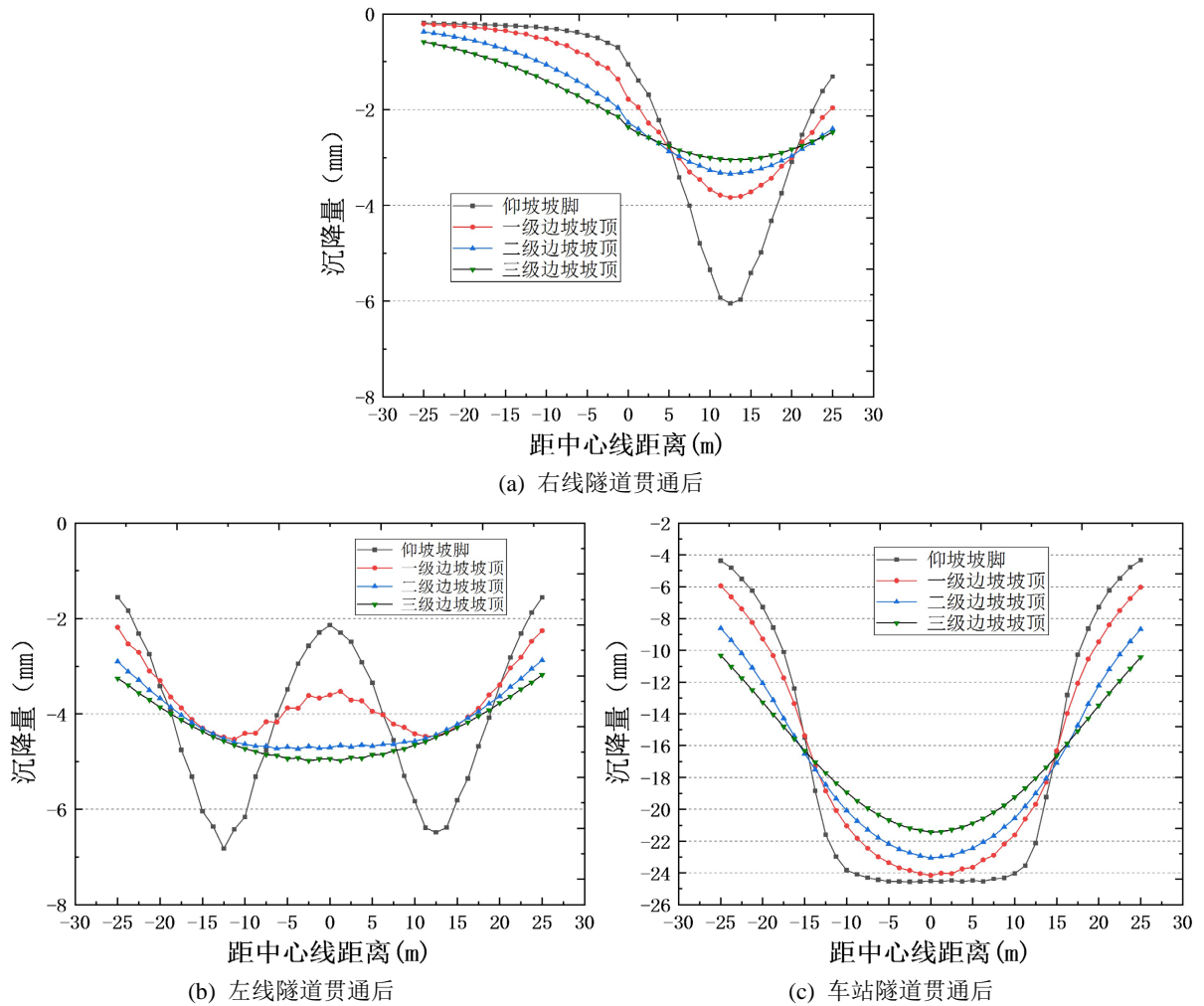


Figure 9. Lateral settlement curve of the vertical slope of each tunnel in Scheme 3
 图 9. 方案三各隧道贯通后仰坡横向沉降曲线图

4.3. 方案三：最后开挖车站隧道

由图 9(a), 右线隧道开挖完成后, 在右线隧道处形成了一个“V”形沉降槽, 最大沉降量达到了 6 mm 左右, 位于仰坡坡脚处。

由图 9(b), 左线隧道开挖完成后, 断面 1 和断面 2 上的仰坡横向沉降曲线呈“W”型, 左右线隧道间距较远, 因此会形成了各自的沉降槽, 其中心即为左右线隧道的中心线位置。

由图 9(c)在车站隧道开挖完成后, 最终沉降曲线图与方案一形态相似, 但是最大沉降值达到 24.56 mm, 大于方案一。坡脚线上的沉降曲线呈“凹”形, 从左线隧道右拱腰上部至右线隧道左拱腰上部沉降较为接近。仰坡后缘沉降曲线呈“V”形, 中心线处沉降量大于两侧。

4.4. 方案比选

由以上的分析结果可得, 方案三在各个横断面上的整体仰坡沉降量均大于方案一与方案二, 方案一下仰坡沉降量最小。可见, 方案一下隧道群的开挖对仰坡的影响程度最小, 方案二其次, 方案三影响最大。

5. 结语

本文采用数值模拟方法, 分别对“车站隧道、右线隧道、左线隧道”、“右线隧道、车站隧道、左线隧道”和“右线隧道、左线隧道、车站隧道”三种开挖顺序进行了模拟, 分析了隧道群开挖后的仰坡、隧道拱顶沉降, 得出以下结论:

1) 隧道群开挖后, 车站隧道左右两侧各 15 米左右的范围内, 仰坡前缘的沉降值大于后缘的沉降值, 在此范围外, 仰坡前缘的沉降量小于仰坡后缘的沉降量。在同一横断面上, 距洞口 7.5 米前的仰坡沉降量在中心线左右 10 米范围内沉降量接近; 距洞口 7.5 米后, 车站隧道拱顶上部的仰坡沉降量最大。同一横断面上, 仰坡后缘各部位沉降量差值较仰坡前缘更小。

2) 在方案一下, 各隧道开挖对仰坡的影响程度相对接近; 在方案二与方案三下, 车站隧道作为后行洞时其开挖对仰坡的影响程度远大于左右隧道的开挖。对比三方案在各观测断面上的仰坡沉降量, 方案一最小, 方案三最大。

参考文献

- [1] 杨举. 地下水封油库洞室群应力应变规律与设计优化研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2011.
- [2] 刘会波, 肖明, 陈俊涛. 复杂地下洞室围岩开挖扰动空间效应参数化研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(3): 47-54.
- [3] Rousset, H.W.G. (1994) Thermoplastic Behavior of Deep Tunnels. *Journal of Thermal Stresses*, **17**, 337-359. <https://doi.org/10.1080/01495739408946265>
- [4] Rinne, M., Shen, B. and Backers, T. (2013) Modelling Fracture Propagation and Failure in a Rock Pillar under Mechanical and Thermal Loadings. *Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering*, **5**, 73-83. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2012.10.001>
- [5] 万涛, 林刚, 习淑娟. 超小净距地铁三洞隧道群施工动态数值模拟[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(12): 93-98.
- [6] 李为洁. 小净距隧道断面施工过程的数值分析[J]. 广东建材, 2012, 28(7): 72-75.
- [7] 王腊梅, 段方情, 张可能. 某隧道偏压段初期施工出现的问题及分析、处理[J]. 岩体工程界, 2007, 10(10): 71-73.
- [8] 李伟, 杨琨, 施劲矗, 李弘毅, 俞凡. 四洞并行公路隧道群开挖稳定性影响因素研究[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(1): 195-199.
- [9] 李涵宇. 小净距大型洞室群稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 贵州: 贵州大学, 2021. <https://doi.org/10.27047/d.cnki.ggudu.2021.000250>