

基于COMSOL的背负式隧道开挖有限元仿真

张景娴, 余本辉, 张皓

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年5月9日; 录用日期: 2023年5月29日; 发布日期: 2023年6月14日

摘要

隧道开挖过程中, 双隧道开挖应根据两洞的轴线间距、洞口里程距离、地质条件以及其他自然条件, 选择适当的开挖方法, 确定好两洞开挖的时间差和距离差, 并采取措施防止后行洞开挖对先行洞周壁产生不良影响。故此, 以背负式双隧道模式为基础, 以COMSOL软件为有限元仿真工具, 研究背负式双隧道开挖过程中不同中心距所造成的影响。对隧道开挖具有重要意义。

关键词

隧道开挖, 有限元仿真, COMSOL

Finite Element Simulation of Backpack Tunnel Excavation Based on the COMSOL

Jingxian Zhang, Benhui Yu, Hao Zhang

School of Architecture and Construction, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: May 9th, 2023; accepted: May 29th, 2023; published: Jun. 14th, 2023

Abstract

In the process of tunnel excavation, the proper excavation method should be selected according to the axis distance between the two holes, the mileage distance between tunnel entrances, geological conditions and other natural conditions, and the time difference and distance difference between the two holes should be determined, and measures should be taken to prevent the bad influence of the later tunnel excavation on the surrounding wall of the leading tunnel. Therefore, based on the knapsack double tunnel model, COMSOL software was used as the finite element simulation tool to study the influence of different center distances in the process of knapsack double tunnel excavation. It is of great significance to tunnel excavation.

Keywords

Tunnel Excavation, Finite Element Simulation, COMSOL

Copyright © 2023 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

背负式隧道是一种应用广泛的地下工程结构，常用于城市地下交通、水利工程等领域。然而，隧道开挖会产生大量的土体变形和应力集中，对隧道的安全性和稳定性带来威胁。因此，采用数值模拟方法研究隧道开挖的力学行为，对于提高隧道工程的质量和安全性具有重要意义。本研究旨在采用 COMSOL 有限元软件，对背负式隧道开挖进行数值模拟，分析土体变形和应力分布情况，并评估隧道的稳定性。具体的研究方法包括对隧道开挖过程进行有限元分析、对比不同径距对应力应变的影响，从而对后续地下结构设计、施工方法改进等研究提供模拟数值依据。

2. 国内外研究现状

2.1. 背负式隧道的特点和研究现状

背负式隧道是一种较新型的隧道结构形式，它的主要特点是利用自重和土压力来稳定隧道结构，减少对地层的破坏和对周围建筑的影响。背负式隧道在隧道工程中的应用越来越广泛，已经成为了隧道工程领域的研究热点之一。

目前，背负式隧道在国内外的研究和实践中取得了一定的成果，涉及到隧道的设计、施工、监测和维护等多个方面。国内外的研究成果表明，背负式隧道具有较好的经济效益和环境效益，在实际应用中具有广阔的前景。

2.2. 双隧道开挖的研究现状

双隧道开挖是指在同一地点同时开挖两个或多个隧道，它在隧道工程中的应用越来越广泛，可以提高隧道开挖的效率和质量，减少对周围环境的影响。目前，国内外在双隧道开挖方面的研究主要集中在以下方面：

1) 双隧道开挖的施工技术：随着双隧道开挖技术的不断改进和创新，出现了很多新的双隧道开挖技术和方法。张立业在 2010 年，以重庆某区间隧道工程开挖施工为例，重点介绍了在不同围岩级别中，小净距隧道采用错位开挖法，从而满足小净距隧道中夹岩层及隧道回填埋深层的稳定，确保隧道施工安全[1]。焦武阳等人在 2020 年针对既有建筑物复杂，开挖跨度大且距离长的近接施工环境，采用了分区开挖法，表明在软土地区进行深大基坑开挖，分区开挖是控制变形的有效方法[2]。樊嘉琦等人在 2020 年的研究中采用基于有限元方法的数值模拟，对小径距双隧道开挖进行了模拟分析，并探讨了该方法的应用效果[3]。

2) 隧道开挖的地质环境影响：邓青海等人在 2007 年论述了隧道开挖对地下水和地表水环境的影响，为进一步解决特长隧道施工过程中的突水、涌水等问题提供了可靠的基础性资料，加深了对河北、山西两省交界处水文地质条件薄弱地带的了解[4]。

3) 隧道开挖的安全监测和管理：崔晨秋在 2022 年依托下北山浅埋超大跨四线高铁隧道受到台州市

域 S1 线隧道近接工程案例,综合运用理论分析、数值模拟和现场监测等方法与手段对浅埋超大跨隧道受到近接施工的影响进行了深入的研究[5]。

综上所述,双隧道开挖在隧道工程中的研究和应用得到了广泛的关注,其涉及到施工技术、设计支护技术、地质环境影响和安全监测等多个方面的内容。未来,随着科技的不断进步和实践经验的积累,双隧道开挖领域的研究和应用将进一步深入和拓展。

2.3. 有限元仿真在隧道工程中的应用

有限元仿真是一种计算机模拟技术,能够模拟物理现象和工程问题的复杂行为,已经在隧道工程中得到广泛应用。有限元仿真技术可以帮助工程师预测隧道结构在不同工况下的行为,从而优化设计方案、改进施工方法、提高工程质量和安全性。

在地下结构设计方面,张瑶在 2022 年以超大断面地下试验大厅为工程背景,采用数值模拟等方法,对超大断面地下硐室的断面优选、围岩压力、支护参数优化和开挖工法等展开研究,并对应用效果进行了分析[6]。朱晓章等人在 2022 年的研究中,依托有限元软件,搭建某全地下污水处理厂整体模型,结合实际工程中的荷载工况,对全地下式污水处理厂进行整体受力分析[7]。

在施工方法改进方面,余成在 2020 年的研究中,以甬临线岔路桐洲至麻岙岭段改道工程桑洲岭隧道浅埋段施工工程实例为基础,对隧道浅埋段施工进行了有限元分析,提供浅埋段围岩及初期支护变形控制及后续仰拱开挖的方法,并取得了较好的效果[8]。陈辉在 2018 年以高土石坝坝体结构性态为研究对象,系统研究了考虑压实质量与本构模型参数相关性,以及实际试坑压实质量约束作用下的随机模拟方法,并深入探究了能客观反映实际施工质量情况的高土石坝结构性态精细数值模拟方法,为高土石坝结构性态分析提供了一条新的途径[9]。

在地质灾害预测方面,张蕾在 2019 年基于有限元法建立评估模型,对工业园区在后期施工建设过程中的地质灾害危险性进行预测评估[10],徐超在 2015 年以甘青地区最为典型的黑方台黄土滑坡灾害为例,利用有限元数值模拟法研究了黄土滑坡失稳破坏的机制,获得了滑坡各阶段变形情况,初步获得灌溉型黄土滑坡失稳普遍规律,加深了对滑坡灾害演化的理解[11]。

在环境影响评估方面,根据张玉娥等人[12]的研究,采用弹塑性本构关系和摩尔-库仑屈服准则,用有限元法分析由于列车振动造成的对地面环境的影响。并且在地下隧道工程中,有限元仿真被广泛用于研究隧道开挖过程中的地表沉降和周围建筑物的影响。例如,苟凌云通过有限元数值模拟,研究了隧道开挖对地表沉降和周围建筑物的影响[13]。

综上所述,有限元仿真技术在隧道工程中的应用非常广泛,可以帮助工程师分析和预测隧道结构在不同工况下的行为,优化设计方案,改进施工方法,提高工程质量和安全性。

3. 背负式双隧道理论模型

3.1. COMSOL 软件介绍

COMSOL 是一种基于有限元分析方法的多物理场仿真软件,可以模拟多种物理现象和工程问题的复杂行为。软件具有较高的计算精度和稳定性、能够模拟多种物理场和复杂工程问题、具有友好的用户界面和易于使用的工具。研究使用 COMSOL 模拟背负式双隧道开挖过程中不同中心距所造成的影响,得出能够应用于实际工程的模拟数据。

3.2. 模型建立

隧道开挖是一个三维的施工过程,在实际的工作中,尽管人们已经认识到三维模拟实际工程正在成为可能,但二维模拟仍然是占据着主导地位。这是因为包括经费和计算机资源等实际因素的限制,要想得到

足够精确的分析以及得到各种复杂的地表因素,这些限制就促使我们采用二维有限元的方式进行模拟仿真。

背负式双隧道的理论模型通常是基于弹性力学理论和岩土力学原理,通过建立隧道周围土体和支护结构的有限元模型进行分析。

隧洞开挖模型采用二维建模,采用平面求解方法。在不受荷载作用的自由岩土体中挖出两条背负式排列的圆形隧洞,土体为边长 60 m,第一个隧道中心距土体上端 10 m,距土体左端 25 m,另一个隧道中心距土体下端 20 m,距土体左端 25 m,两条隧道的半径均为 5 m。线弹性材料为各向同性,土体力学参数分别为杨氏模量取 12 e6Pa ,泊松比为 0.495,密度为 2000 kg/m^3 ,内聚力为 130 kPa,内摩擦角为 30° ,建立模型如图 1 所示。

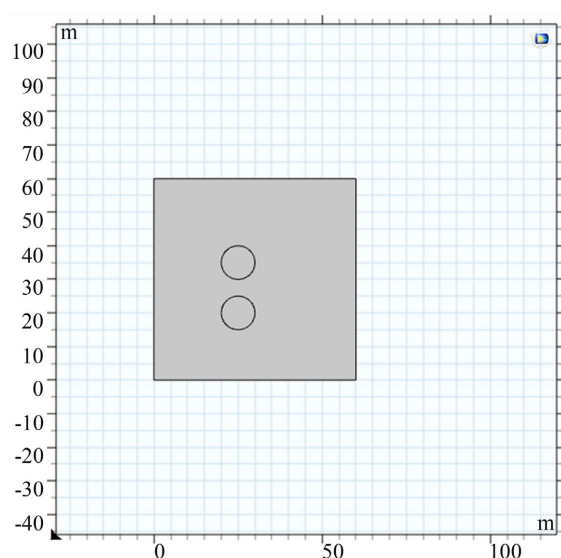


Figure 1. Diagram of backpack tunnel model
图 1. 背负式隧道模型图

3.3. 网格划分

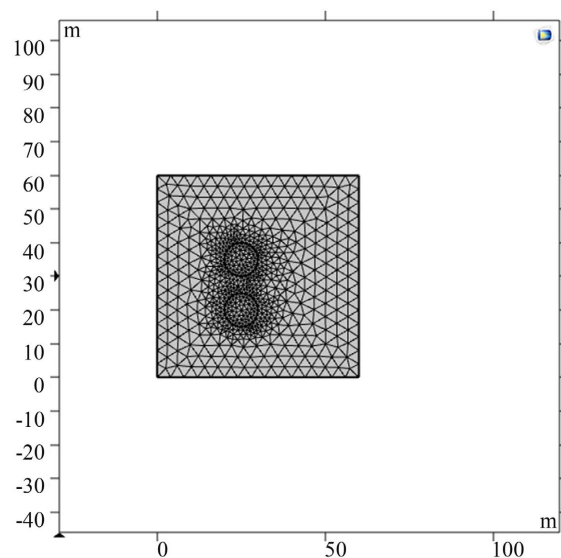


Figure 2. Grid map
图 2. 网格分布图

COMSOL 提供了便捷的网格划分工具, 通过 COMSOL 网格自动生成器可以划分三角形和四面体以及动网格的网格单元。自适应网格划分可以自动提高网格质量, 也可以人工参与网格的生成从而达到更精确的结果。在本研究中 COMSOL 自动生成的网格能够满足求解的要求, COMSOL 自动划分网格形式如图 2 所示。

3.4. 计算结果及分析

两条隧道背负式挖掘方式, 在 15 m、17.5 m、20 m、22.5 m 的中心距下双隧道挖掘后的管道周围应力的变化, 如图 3 所示。

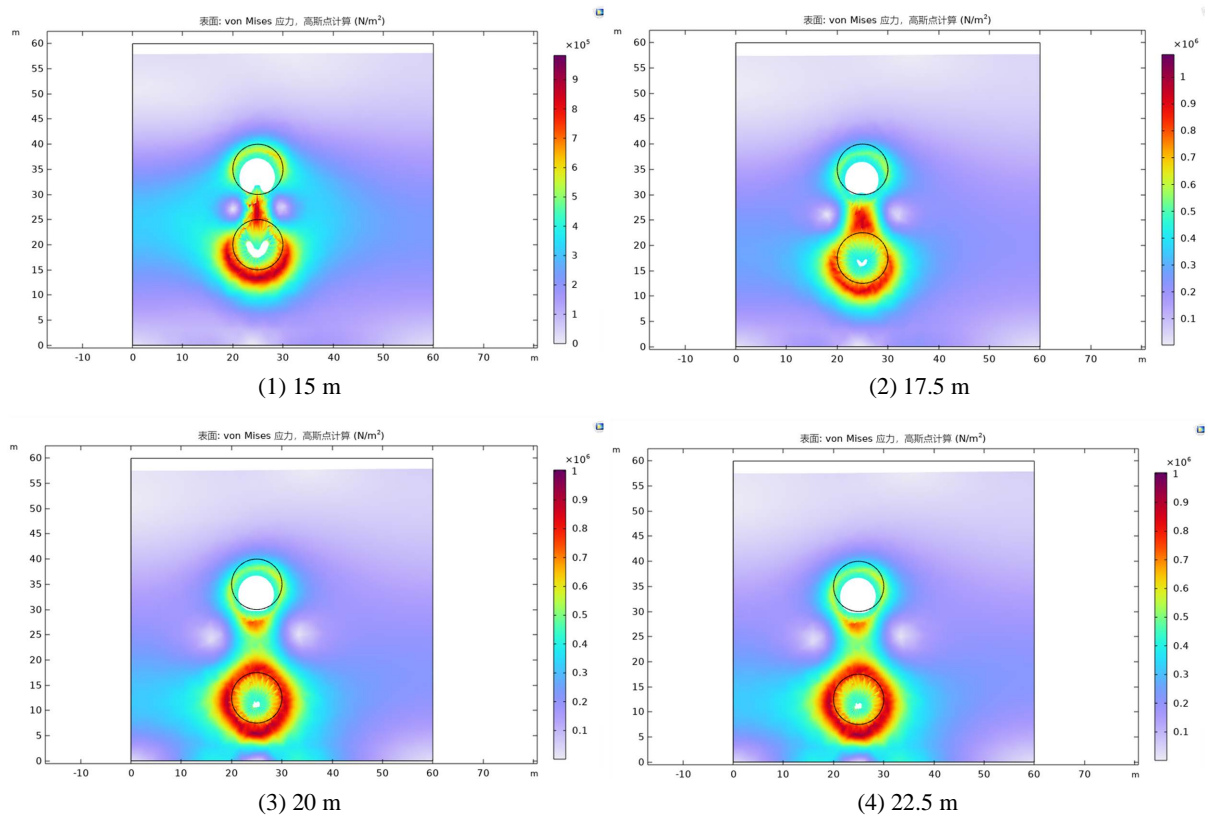


Figure 3. Mises stress profile
图 3. Mises 应力分布图

由图可知: (1) 随着两隧道的中心距逐渐增加, 最大应力也呈逐渐减小的趋势; (2) 在各种不同的中心距条件下, 最大应力值都出现在两隧道中间或者就是隧道最底部; (3) 在两隧道的中心距越来越大的情况下, 不管是应力逐渐减小还是最大应力的位置的移动, 这都是因为随着两隧道的中心距加大, 其两隧道之间的相互影响和相互干涉的作用越来越小。

两条隧道背负式挖掘方式, 在 15 m、17.5 m、20 m、22.5 m 的中心距下双隧道挖掘后的管道周围应变的变化, 如图 4 所示。

由图可知: (1) 在隧道挖掘的过程中, 应变的变化范围都是围绕着隧道周围产生变化; (2) 随着两隧道的中心距越来越大, 应变的变化范围也逐渐减小; (3) 在隧道挖掘过程中, 应变变化范围最大是在两隧道之间, 但是随着两隧道的中心距的增加, 这种变化的范围也逐渐地减小, 其原因为, 随着两隧道的中心距的增加, 其两隧道之间的相互影响和相互干涉的作用越来越小。(4) 在实际工况中, 我们先可以根据

数值模拟出来的相互干涉的影响, 来设置合适的两隧道之间的相互距离, 对隧道开挖起着重要的意义。

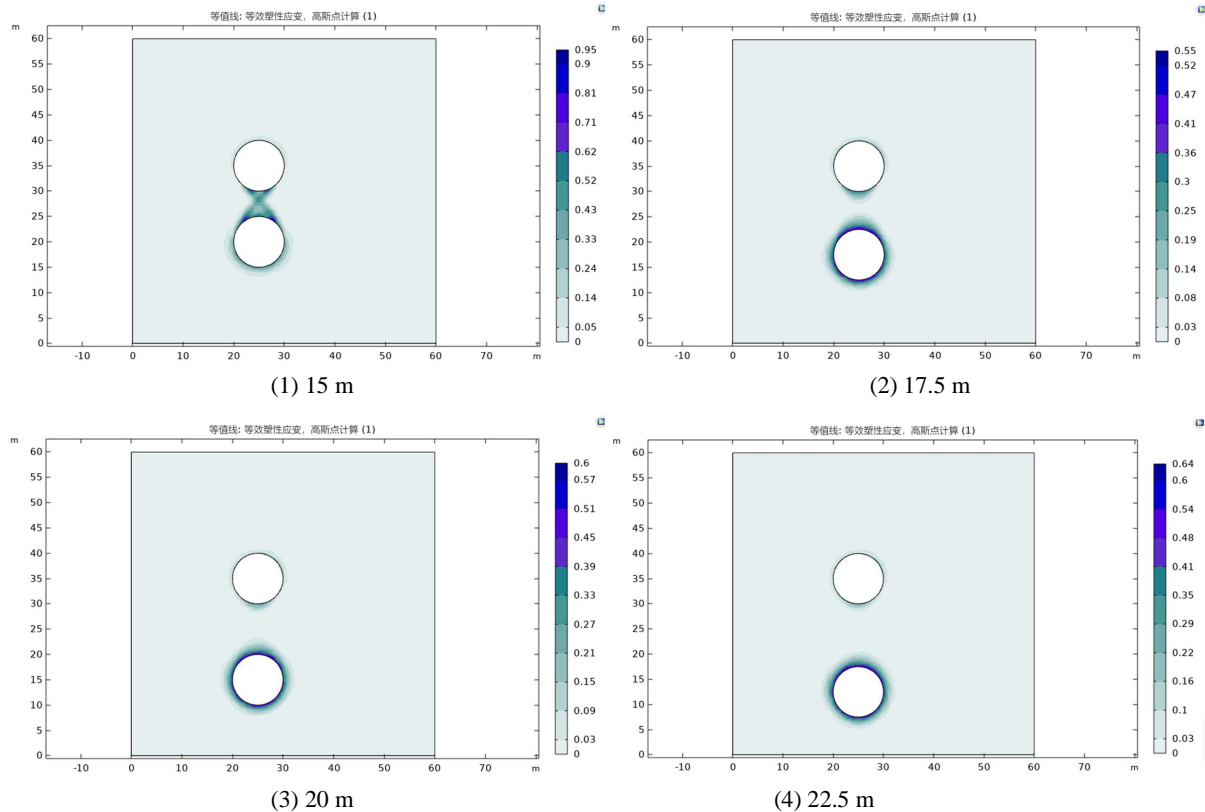


Figure 4. Equivalent plastic strain distribution diagram

图 4. 等效塑性应变分布图

3.5. 结论

基于土体力学中的应力传递和土体变形特性。当隧道开挖时, 土体周围的应力状态和变形特性会发生明显变化, 其中包括土体应力分布和土体变形形态等方面的变化。

在两个相邻隧道开挖的情况下, 由于土体的弹性和塑性特性, 挖掘后的土体会受到相互作用力的影响, 这些力包括水平作用力、垂直作用力等, 会导致土体应力分布的变化。随着隧道中心距的增大, 土体的相互作用效应逐渐减弱, 土体的应力分布逐渐向远离隧道中心的方向转移, 从而导致挖掘后土体最大应力值的逐渐减小。

同时, 随着隧道中心距的增大, 土体的应变范围也会发生变化。当隧道中心距较小时, 两隧道之间的相互作用效应较强, 土体的应变范围较大, 主要集中在两隧道之间的区域。随着隧道中心距的增大, 土体的相互作用效应逐渐减弱, 土体的应变范围逐渐向两隧道中心的方向转移, 从而导致两隧道距离越近产生的应变范围逐渐减小的过程。

因此, 根据土体力学和隧道开挖原理的理论依据, 可以得出随着隧道中心距的增大, 挖掘后的土壤最大应力值逐渐减小, 并且最大应力值大概出现在两隧道中心位置处, 同时随着中心距的增大, 两隧道的应变变化呈现出影响范围逐渐减小的过程, 也就是两隧道距离越近产生的应变范围越大。

4. 总结

经过对国内外隧道开挖理论和方法的研究, 采用有限元软件 COMSOL 仿真计算背负式双隧道开挖,

得出的结论为：随着隧道中心距的增大，挖掘后的土壤最大应力值逐渐减小，并且最大应力值大概出现在两隧道中心位置处。同时随着中心距的增大，两隧道的应变变化呈现出影响范围逐渐减小的过程，也就是两隧道距离越近产生的应变范围越大。因此，控制隧道中心距的大小对于保证隧道的稳定性和减小地质灾害的风险具有重要作用。研究结果对于背负式隧道的设计、施工和安全性评估具有重要的理论和实践价值。

参考文献

- [1] 张立业. 小净距双隧道开挖施工方法[J]. 山西建筑, 2010, 36(23): 311-312.
<https://doi.org/10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2010.23.042>
- [2] 焦武阳, 周东波. 软土地区深大基坑开挖变形控制关键技术[J]. 施工技术, 2020, 49(16): 100-102.
- [3] 樊嘉琦, 沈松霖, 吕媛媛. 小净距双隧道开挖有限元仿真研究[J]. 科学技术创新, 2020(32): 143-144.
- [4] 邓清海, 马凤山, 袁仁茂, 等. 石太客运专线特长隧道地区水文地质研究及隧道开挖环境影响效应[C]//中国科学院地质与地球物理研究所(Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences). 中国科学院地质与地球物理研究所 2006 年论文摘要集. 2007: 1.
- [5] 崔辰秋. 近接施工对浅埋超大跨隧道影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2022.
<https://doi.org/10.26944/d.cnki.gbfju.2022.001582>
- [6] 张瑶. 高边墙超大断面地下硐室结构设计与优化研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
<https://doi.org/10.27334/d.cnki.gstdy.2022.000417>
- [7] 朱晓章, 董静祎, 王舸. 有限元整体计算在某全地下污水处理厂结构设计中的应用[C]//中冶建筑研究总院有限公司. 2022 年工业建筑学术交流会议论文集(下册). 2022: 6. <https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2022.043430>
- [8] 余成. 浅埋隧道施工力学响应规律和伞型钢支撑技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
<https://doi.org/10.27662/d.cnki.gznlc.2020.000572>
- [9] 陈辉. 考虑实际施工质量的高土石坝结构精细数值模拟研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
<https://doi.org/10.27356/d.cnki.gtjdu.2018.000178>
- [10] 张蕾. 基于有限元法的某工业园区建设用地地质灾害危险性预测评估[J]. 广东水利水电, 2019(4): 79-83.
- [11] 徐超. 基于有限元法的区域构造活动与地质灾害数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [12] 张玉娥, 白宝鸿, 潘昌实. 地铁列车振动对周围环境影响评估[J]. 噪声与振动控制, 1997(2): 37-41.
- [13] 苟凌云. 盾构法隧道施工引起地表沉降规律研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
<https://doi.org/10.27334/d.cnki.gstdy.2020.000369>