

# 双隧道开挖有限元模拟

李灵杰\*, 倪鹏飞, 侯锡康

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年7月26日; 录用日期: 2023年8月23日; 发布日期: 2023年8月30日

## 摘要

隧道开挖将不可避免地对其邻近建筑物产生影响, 利用有限元COMSOL软件建立双连拱隧道的二维模型, 通过建立空间有限元模型, 对双隧道开挖的空间效应的变形和稳定性进行了分析。需考虑两个隧道之间的稳定性, 确保隧道施工的安全。通过对应力应变以及内力的变化规律分析, 了解开挖过程采用的结构以及开挖方式的安全性及可靠性, 从而提高施工的安全性, 分析后给出了土体开挖前后的应力云图、塑性区示意图。为控制地表沉降、保护地面建筑物和确定隧道衬砌或支护方案提供了重要的参考依据, 研究结果为双隧道的设计和施工提供了很好的参考价值。

## 关键词

双隧道, 有限元, COMSOL

# Finite Element Simulation of Twin Tunnel Excavation

Lingjie Li\*, Pengfei Ni, Xikang Hou

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 26<sup>th</sup>, 2023; accepted: Aug. 23<sup>rd</sup>, 2023; published: Aug. 30<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Tunnel excavation will inevitably have an impact on adjacent buildings. A two-dimensional model of a double arch tunnel was established using the finite element COMSOL software. By establishing a spatial finite element model, the deformation and stability of the spatial effect of double tunnel excavation were analyzed. It is necessary to consider the stability between two tunnels to ensure the safety of tunnel construction. By analyzing the changes in stress, strain, and internal force, we

\*通讯作者。

aim to understand the safety and reliability of the structure and excavation method used during the excavation process, in order to improve the safety of construction. After analysis, we provide stress cloud maps and plastic zone diagrams of the soil before and after excavation. This provides an important reference basis for controlling surface settlement, protecting ground buildings, and determining tunnel lining or support plans. The research results provide good reference value for the design and construction of double tunnels.

## Keywords

Double Tunnel, Finite Element Analysis, 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

近年来,我国高速公路建设蓬勃发展,其中高速公路隧道的兴建对交通基础设施的提升起到了巨大的推动作用。然而,由于不良的地质条件,特别是在浅埋、围岩软弱且流变性强的地区,修建近距离双隧道时[1] [2] [3],如何确保围岩与支护体系的稳定性成为了设计与施工部门面临的难题。

### 1.1. 研究目的及意义

随着我国山区公路和铁路隧道的增多,施工中遇到的地质问题也日益复杂。隧道开挖会改变土体的形态,引起土体的扰动和变形,进而改变土体的应力分布,对隧道周围的地表沉降和周边建筑物产生影响[4] [5] [6]。

在双隧道开挖中,为了更好地预测和了解其影响,有限元模拟成为一种重要的工具。有限元模拟通过将复杂的物理问题分解为有限数量的小元素,并对每个小元素进行求解,从而解决整个系统的问题[7] [8]。在双隧道开挖中,有限元模拟可以用来模拟土体的变形和应力分布,以及隧道结构的受力情况。

### 1.2. 研究内容

本研究旨在进行平面弹塑性有限元计算,以确保近距离双隧道的开挖与支护体系的稳定性。通过有限元模拟,可以对不同的隧道开挖方案进行比较和评估,确定最优方案。同时,有限元模拟还可以预测隧道开挖对周围环境的影响,并探索减少这些影响的方法。

### 1.3. 研究现状

Zhou [9]等人使用基于 Peck 公式的方法,深入研究了双线隧道开挖导致的地层变形。研究结果显示,由于复杂的耦合作用,准确预测变得困难。传统方法无法考虑第一条隧道开挖对第二条隧道附近土壤变形的影响,导致计算结果与实测存在较大差异。研究在武汉市双隧道实际数据的基础上校准模型,引入扰动修正因子,推导出更精准的地表变形预测公式。通过长沙地铁 2 号线实例验证,为解决双线隧道施工地层变形问题提供新方法。Zheng [10]等人采用数值模型和离心机试验相结合的方法,深入研究了双隧道引发的沉降行为。研究指出,在平行双隧道布置中,随着土壤软化,第二条隧道的沉降比第一条更为显著。此外,对不同覆盖深度的双隧道布置,沉降模式更复杂,受建造顺序影响。研究通过多种情况的数值分析,如倾斜和重叠布置,揭示了土体刚度变化与沉降行为之间的关系。实验证实了第一条隧道对

第二条隧道沉降的机制。Feng [11]等人通过实验和数值模拟,研究了高主动应力下双圆隧道连续开挖过程中硬岩的岩爆特征。研究表明,卸荷速率、埋深和双隧道间结构面对岩爆的影响显著。随着隧道卸荷率的增加,破坏强度和动力响应逐渐聚合。岩爆破坏程度随埋深增加而加剧,双隧道岩石对动力扰动更敏感。双隧道之间结构面对围岩稳定性的影响复杂,取决于其与最大切向应力的关系。

综上所述,双隧道开挖有限元模拟是一种非常有价值的工具,可以更好地理解和预测隧道开挖的影响,从而制定更好的施工方案和保障工程安全。在未来的研究中,需要进一步完善土体模型和隧道结构模型,同时探索如何减少隧道开挖对周围环境的影响,以促进该领域的发展和应用。在前人研究的基础上,本研究利用 COMSOL 有限元软件对双连拱隧道进行了二维模型建立和分析。通过考虑双隧道之间的稳定性,确保施工过程的安全性。通过分析应力、应变和内力的变化规律,研究采用的结构和开挖方式的安全性和可靠性。为控制地表沉降、保护地面建筑物以及确定隧道衬砌或支护方案提供重要的参考依据并对双隧道的设计和施工提供重要参考价值。

## 2. 有限元模拟

### 2.1. 模型建立

本次模拟旨在研究不同位置挖掘的双隧道对土体的影响,采用平面应变有限单元法对自由岩土体进行了模拟,模型中土体高度为 50 m,宽度为 100 m。左隧道位于土体下端 15 m 处,距离土体左侧 40 m,右隧道位于土体上端 15 m 处,距离土体右侧 40 m。所选材料为各向同性的线弹性材料,土体参数如表 1 所示。

Table 1. Soil parameters

表 1. 土体参数

密度/(kg/m <sup>3</sup> )	杨氏模量/Pa	泊松比	内聚力/Pa	内摩擦角/°
2000	$1.2 \times 10^7$	0.495	$1.3 \times 10^5$	30

通过模拟,我们可以对隧道开挖对周围环境及土体变形的影响进行准确预测,从而为工程提供更为安全的施工方案。

### 2.2. 网格划分

在模拟过程中,网格划分采用了 COMSOL 软件自动生成的三角形网格单元,以提高计算效率。由于计算机存储空间有限且计算量要求较高,因此选择较多的三角网格和节点数。这种自动生成网格的方法能够自动适应土体的复杂形状,并在保持较高计算精度的同时节约计算资源,并且在解决平面问题时表现良好。

为了更好地反映土体的复杂结构,本次模拟在隧洞周围采用了密集的三角网格,以确保对应力和变形的准确捕捉。在其他区域,为了节约计算资源采用了较为疏松的网格,使计算过程更加高效。这样的网格划分策略能够在保证计算精度的同时,有效地提高计算速度和效率。

通过采用这种网格划分方法,我们能够更准确地模拟隧道开挖前后土体的应力状态和弹塑性行为。这对于工程设计和分析非常重要,可以为工程项目提供可靠的预测和评估,从而确保工程的安全性和可靠性。图 1 展示了使用该网格划分方法进行仿真计算时的示意图,可见在隧洞周围的区域有更密集的网格分布,而其他区域的网格则相对疏松。

综上所述,采用 COMSOL 软件自动生成的三角形网格单元进行网格划分是一种高效且有效的方法,

能够提高计算效率和精度。这种网格划分策略可以更好地反映土体的复杂结构，为工程项目提供可靠的预测和分析结果。

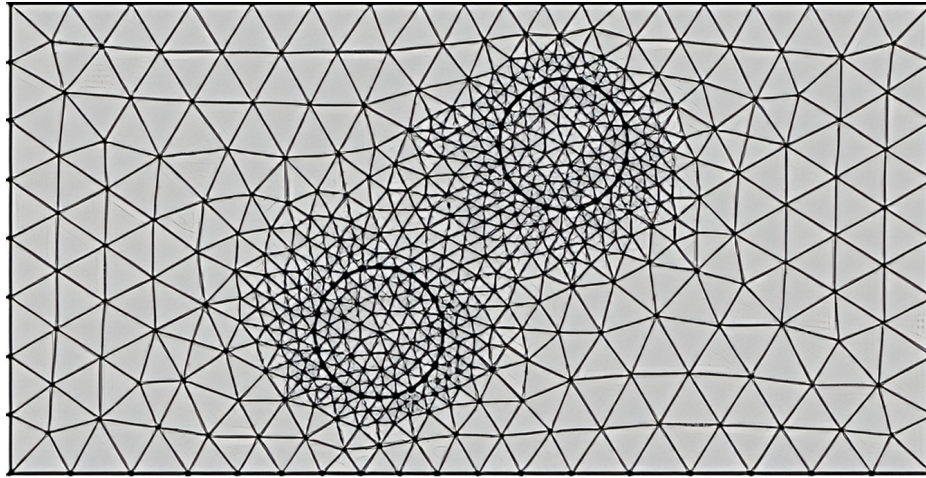


Figure 1. Finite element mesh of double tunnels

图 1. 双隧道的有限元网格

### 2.3. 计算内容

本仿真计算分两个步骤进行。首先模拟并计算出隧道开挖前土体的初始地应力，即由于其自重的作用而产生的应力状态。然后模拟隧道开挖后土体的弹塑性力学行为。此时，第一步中获得的应力场是分析第二步中的初始值。第二步是模拟隧道开挖后土体的弹塑性力学行为。在这一步骤中，我们使用第一步中获得的应力场作为初始值，进行隧道开挖后的应力状态和弹塑性曲线的计算。通过应用弹塑性本构模型，我们可以考虑土体的非线性行为，包括弹性应变、塑性应变和剪切变形等。

这两个步骤之间存在相互关系，第一步中获得的应力场是分析第二步中土体行为的基础。通过综合考虑土体的物理力学特性和开挖过程中的变形行为，通过进行这两个步骤的仿真计算，我们可以更好地理解隧道开挖对土体力学行为的影响。这种模拟计算可以更好地评估隧道开挖的稳定性和安全性，从而指导实际工程设计和施工过程。同时，通过对不同参数和条件的敏感性分析，我们还可以优化隧道设计方案，提高工程效率和可持续性。

### 3. 计算结果分析

在实际的岩土工程开挖中，初始应力参数的准确计算和数值模拟对正式开挖工程的成功至关重要。在本次研究中，我们使用 COMSOL 软件进行了隧洞开挖的数值模拟，得出了开挖前和开挖后土体的等效应力分布云图，如图 2 和图 3 所示。

在进行仿真计算后，我们观察到土体开挖后的应力分布主要集中在左下方隧道周围以及两个隧道之间的区域。这些区域受到开挖过程中的剧烈变形和土体重新分布的影响，导致应力集中。在这些区域内，应力水平相对较高，可以达到  $9 \times 10^5$  Pa 的最大值。

这种应力分布的特点对于工程设计和施工具有重要意义。首先，了解应力分布的区域可以帮助我们识别潜在的高风险区域，从而采取相应的支护和加固措施，确保隧道的稳定性和安全性。其次，对于隧道之间的区域，我们需要考虑其对结构的影响，例如地下水流、土体沉降等。因此，对应力分布的准确预测和分析对于工程决策具有重要价值。

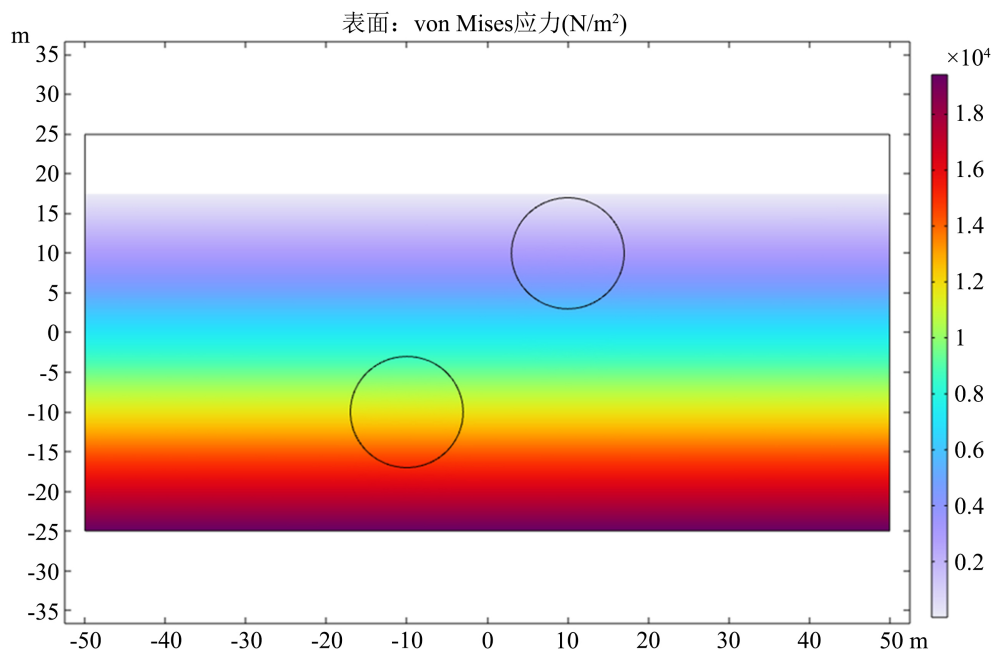


Figure 2. Stress distribution diagram of soil before excavation

图 2. 土体开挖之前应力分布图

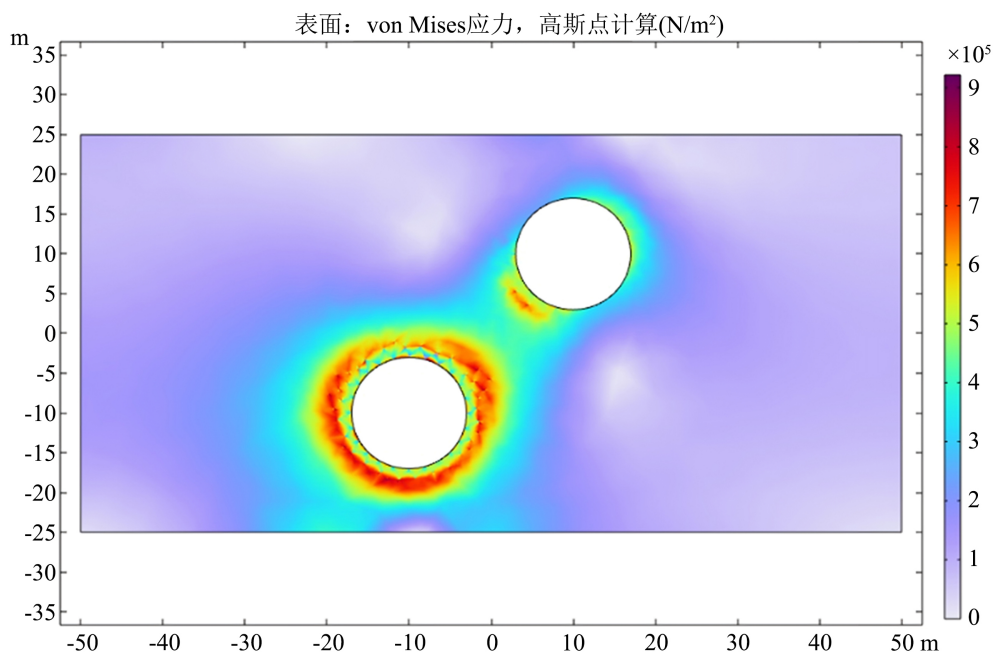


Figure 3. Stress distribution diagram of soil after excavation

图 3. 土体开挖之后应力分布图

这些不仅可以用来评估开挖过程中的各种变化, 还可以帮助设计人员做出更加准确的结构决策。数值模拟在提供精细细节和数据的同时, 需要结合实际场地情况、工程应力和土体力学特性等因素进行综合考虑, 才可以得出最佳的工程结构方案。因此, 在岩土工程实践中, 准确计算初始应力参数并进行数值模拟分析具有很高的实用价值。

在隧道开挖过程中，土体的塑性区是岩土工程中的一个关键区域。塑性区是指在土体受到应力作用时发生塑性变形的区域，其形状和大小对施工中的隧道支护方案会产生直接的影响。

隧道开挖时，土体受到剧烈的变形和应力重新分布的影响，特别是在初始开挖阶段。这导致土体中形成了塑性区，即超过了其弹性极限而产生可持续的塑性变形的区域。塑性区的形状和大小取决于多种因素，包括土体的物理性质、地质条件、开挖方式和支护措施等。

对于隧道工程来说，准确识别和评估塑性区的形状和大小至关重要。这是因为塑性区的存在会对隧道的稳定性和安全性产生直接影响，尤其是在没有适当支护措施的情况下。塑性区的扩展和变形可能会导致土体沉降、隧道变形、结构破坏等问题，甚至危及施工人员和周围环境的安全。

在本次研究中，图4展示了开挖后的塑性区，该区域主要分布在左下方隧道周围以及两条隧道之间。随着挖掘深度的不断加深，塑性区也会逐渐扩大。在实际工程中，设计人员需要考虑诸如隧道固结量、土体力学参数、应力水平等因素，以有效地控制塑性区的大小和形状。同时，隧道施工中的支护方案也必须与塑性区的形状相匹配，以确保隧道的稳定性和安全性。因此，准确描述和控制塑性区的大小和形状对于隧道工程具有极其重要的意义。

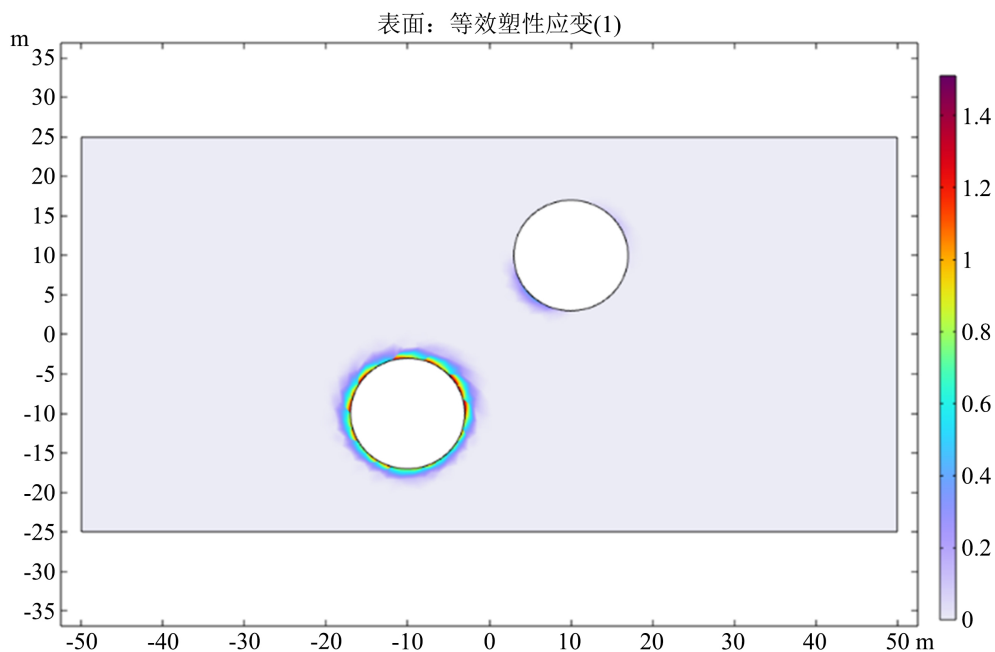


Figure 4. Equivalent plastic strain map after double tunnel excavation

图4. 双隧道开挖后的等效塑性应变图

#### 4. 结论

本研究通过平面弹塑性有限元计算，针对近距离双隧道的开挖与支护体系的稳定性问题进行了深入研究。主要研究内容包括土体模型的选择和参数确定、隧道结构模型的分析、以及隧道开挖对周围环境的影响等方面。基于有限元模拟的计算结果和分析，得出以下结论：

1) 有限元模拟是研究近距离双隧道开挖与支护体系稳定性的有效工具。通过模拟计算，可以准确预测隧道开挖前后土体的应力分布和变形情况，为工程提供可靠的预测和评估。

2) 在双隧道开挖有限元模拟中，土体模型的选择和参数的确定对模拟结果具有重要影响。弹性模量和泊松比等参数的选取需要根据具体的地质条件进行合理确定，以确保模拟结果的准确性和可靠性。

3) 双隧道开挖对周围环境的影响是重要的研究方向。通过模拟计算,可以评估隧道开挖对周围建筑物的影响,并探讨采用合适的支护方式和施工方法来降低影响的方法。

综上所述,本研究证明了有限元模拟在近距离双隧道开挖与支护体系稳定性研究中的价值和前景。通过对土体模型、隧道结构模型和环境影响的综合分析,可以指导工程设计和施工过程,提高工程的安全性和可靠性。未来的研究可以进一步完善模型的精细化和参数的准确性,探索更多有效的支护措施和环境保护方法,推动该领域的发展和应用。

## 参考文献

- [1] 王晓川. 我国大城市静态交通的可持续发展研究——兼论利用地下空间缓解北京静态交通问题[J]. 北京工业大学学报, 2003(4): 73-78.
- [2] 赵晓萍, 高翔. 水泥搅拌桩重力式挡土墙变形的有限元分析[J]. 天津建设科技, 2010(4): 46-49.
- [3] Lewis, B.A. (2004) Manual for LS-DYNA Soil Material Model 147. Department of transportation, Federal Highway Administration, USA.
- [4] 蒙国往, 周佳媚, 高波, 等. 地铁盾构掘进引起的软弱地层沉降分析[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(6): 117-125.
- [5] 滕海文, 王涛, 霍像慧, 等. 基于 FLAC<sup>3D</sup> 的沈阳地铁隧道开挖三维稳定性分析[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(8): 1074-1079.
- [6] 刘波, 陶龙光, 丁城刚, 等. 地铁双隧道施工诱发地表沉降预测研究与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 356-361.
- [7] 华薇. 隧道开挖施工过程的有限元动态模拟研究[J]. 四川建筑, 2014, 34(6): 91-93.
- [8] 魏纲, 王霄, 姜婉青, 等. 盾构隧道施工引起建筑物沉降的实用预测方法[J]. 科技通报, 2018, 34(6): 148-153, 158.
- [9] Zhou, Z., Ding, H., Miao, L., *et al.* (2021) Predictive Model for the Surface Settlement Caused by the Excavation of Twin Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **114**, 104014. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104014>
- [10] Zheng, G., Wang, R., Lei, H., *et al.* (2023) Relating Twin-Tunnelling-Induced Settlement to Changes in the Stiffness of Soil. *Acta Geotechnica*, **18**, 469-482. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01541-5>
- [11] Feng, F., Li, X., Luo, L., *et al.* (2021) Rockburst Response in Hard Rock Owing to Excavation Unloading of Twin Tunnels at Great Depth. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **80**, 7613-7631. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02377-1>