

基于有限元小净距双隧洞开挖模拟

高帅锋*, 倪鹏飞, 刘俊

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年11月20日; 录用日期: 2022年12月10日; 发布日期: 2022年12月22日

摘要

最小净差隧道又称近接隧道、最近间距隧道等, 是指当双线或分离型隧洞中的最大净距差小于或等于一点五倍洞径, 或双隧洞中围岩厚度等于独立双隧洞最小净差的特殊隧洞布置。隧洞施工不可避免地会危害邻近建筑, 小净距隧洞也应该充分考虑两个隧洞间的稳定性, 以保证隧洞施工的安全性。利用有限元COMSOL软件仿真隧洞施工变形, 构建隧洞施工变形二维有限元模型加以研究分析。地表沉降和隧道周围的塑性区域是预测开挖过程所必需的重要参数。经过分析, 得出了土体开挖前的应力云图分析、地表沉降曲线和塑性区图。为遏制地面沉降、防护地基建物、制定隧洞衬砌及保护方法提供了重要依据, 对隧洞施工有着重要性。

关键词

小净距, 地表沉降, 应力云图, COMSOL

Excavation Simulation of Double Tunnels with Small Clear Distance Based on Finite Element Method

Shuifeng Gao*, Pengfei Ni, Jun Liu

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

Received: Nov. 20th, 2022; accepted: Dec. 10th, 2022; published: Dec. 22nd, 2022

Abstract

The minimum net difference tunnel is also called proximity tunnel, nearest distance tunnel, etc. It

*通讯作者。

refers to the special tunnel layout when the maximum net distance difference in the double track or separated tunnel is less than or equal to one point five times the tunnel diameter, or the thickness of surrounding rock in the double tunnel is equal to the minimum net difference of independent double tunnels. The tunnel construction will inevitably endanger the adjacent buildings, and the stability between the two tunnels should also be fully considered for the small clearance tunnel to ensure the safety of tunnel construction. By using the finite element COMSOL software to simulate the tunnel construction deformation, a two-dimensional finite element model of tunnel construction deformation is constructed for research and analysis. The surface settlement and the plastic zone around the tunnel are important parameters for predicting the excavation process. Through analysis, the stress nephogram analysis, surface settlement curve and plastic zone diagram before soil excavation are obtained. It provides an important basis for controlling ground settlement, protecting foundation buildings, and formulating tunnel lining and protection methods, which is important for tunnel construction.

Keywords

Small Clear Distance, Surface Subsidence, Stress Nephogram, COMSOL

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

在水利、高速公路建设以及地下水工程建设中,由于多方面的因素问题,往往要求开凿各种形式的隧洞以适应施工要求。隧道开挖的模拟技术主要有间隙法、Rowe 给出的收敛极限法、Swoboda 给出的逐步软化方法、以及体积损失控制法等[1]和应力释放法[2]。在小净差双线隧道实施工程中,两个隧洞彼此独立、互相联系,小净差的双线隧洞较一般双线的隧洞实施困难要大。正确判断隧洞施工时土壤的应力情况及其塑性区将对隧洞施工质量和隧洞支护起到重要的保障。

隧道开挖的分析方法包括数值分析方法和非数值分析方法。虽然数值分析方法包含有限元法、有限差分法、边界元法等,但也证明了该方法更经济,应用速度更快。由于现代计算机技术的迅速发展,它在岩土施工分析中获得了普遍的运用,并获得了长足的发展。近年来,不少研究者对构建各种程度的隧洞施工数值模拟加以深入研究,并通过计算分析了在隧洞施工过程中岩石材料的热力学特征。比如,使用了岩石工程应用软件 FLAC-3D,张献才[3]使用大型普通有限元软件系统 ANSYS、肖明[4]、刘佳[5]等也开展了相应仿真分析工作,并获得了若干令人满意的结果。目前,世界上广泛应用于岩土工程方面的商用有限元软件系统,一般包括 COMSOL、SAP5、ANSYS、ABAQUS、FLAC、FLAC3D、MARC、ADINA 等。对隧道开展仿真研究以前,必须正确判断地下构造的初始地应力。因为 COMSOL Multiphysics 软件[6]完全植根于现代数学物理技术,直接面向了现代的数学物理过程,从基本理论上阐述了物理现象的实质,很适合于进行更多物理场的研究。滕海文[7]等,分析两者对土体竖向位移的影响,建立了隧道开挖进度和土体沉降之间的关系,同时得出喷射混凝土预支护和混凝土衬砌厚度变化对支护拱顶和地面沉降量敏感度不同的结论。齐得旭[8],以双向双洞公路单拱长隧道为例,利用 COMSOL 有限元软件,对隧道进口段一处剖面建立二维的有限元模型,研究在上覆层为软岩的情况下,半圆拱隧道进口段开挖过程中岩体的力学响应情况。漆泰岳[9],通过对某工程的实例分析,表明数值模拟与实测结果具有较好

的一致性,为地铁隧道施工的安全评价提供了技术支持。顾少波[10],在小型水利工程中,隧洞开挖施工技术合理应用不仅能对隧洞开挖质量进行提升,还具备较强的安全性特点,是一项具备较强参考价值的技术手段。它的全耦合方式,给物理空间的相互作用问题带来了一个全新的方便的解决办法。根据上述特征,本章将采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件的结构力学模型对隧洞施工过程进行解析,以理解隧洞施工过程中的岩土动力反应。

2. 有限元分析模型的建立

2.1. 建立模型

首先,建立几何模型。土体高 60 m,宽 95 m。第一条隧洞的中部距砗体下部约 42 m,距砗体左端约 32 m。另一个隧洞的中心距混凝土体下一端 30 m,距混凝土体左一端 60 m。两个隧洞的零点五径都是 6 m。其次,设置材质参数。线弹性材料是各向同性的。土壤力学数据为杨氏模量为 $12e6\text{Pa}$,泊松比为 0.495,最大压力约为 2000 kg/m^3 ,最大黏结力为 130 kPa,最内摩擦角约为 30° 。最后,设置边界条件。土地的下界设置为固定界,而土地的左右界设置为滚动轴界。挖掘后的圆柱形表面,和隧道上边界的自由表面。由于隧洞开挖模拟均采用二维建模技术,本研究中的问题都属于平面应变问题(见图 1)。

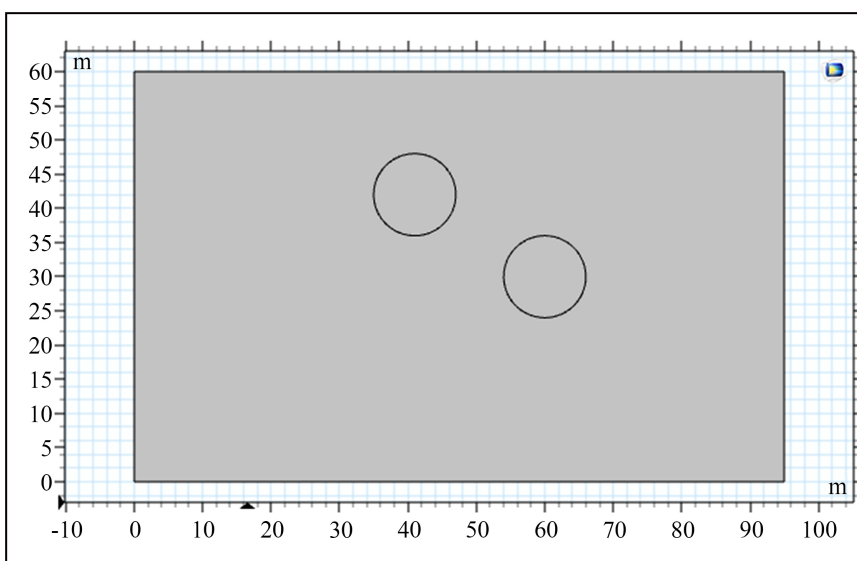


Figure 1. Schematic diagram of double tunnel in soil

图 1. 土体中双隧道示意图

2.2. 构建网格

通过网络图的方法,将网格以自由三角形分隔。还可发现,隧道周围的网格比较稠密,而其他地方的网格则稀少(见图 2)。

2.3. 研究计算

建立网格后,分别建立了稳态一和稳态二,稳态一设置固体力学一计算,稳态二设置固体力学二计算,并得出了如下结论,开挖前后土体的 von mises 应力云曲线(见图 3,图 4)。施工中的最大初始内应力为 19.6 kPa,主要发生于混凝土体的最低点。在施工后,隧洞附近结构中的应力逐渐增大,其最大内部应力约为 890 kPa,主要发生在两个隧洞中心点附近的地方。

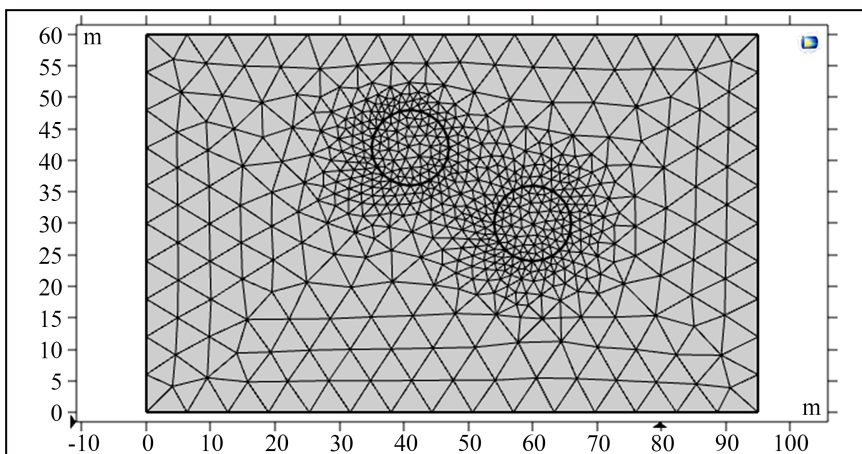


Figure 2. Grid diagram of double tunnel in soil

图 2. 土体中双隧道的网格图

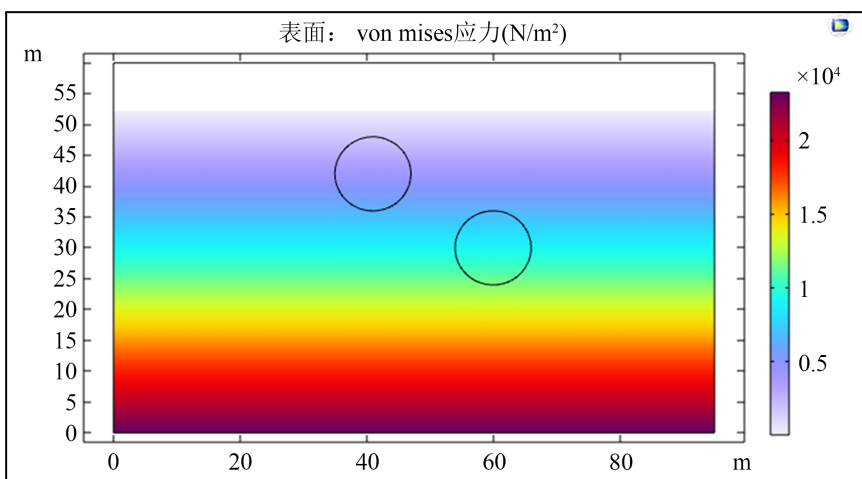


Figure 3. Cloud chart of von mises stress of initial in-situ stress of excavation in soil mass

图 3. 土体中为开挖初始地应力 von mises 应力云图

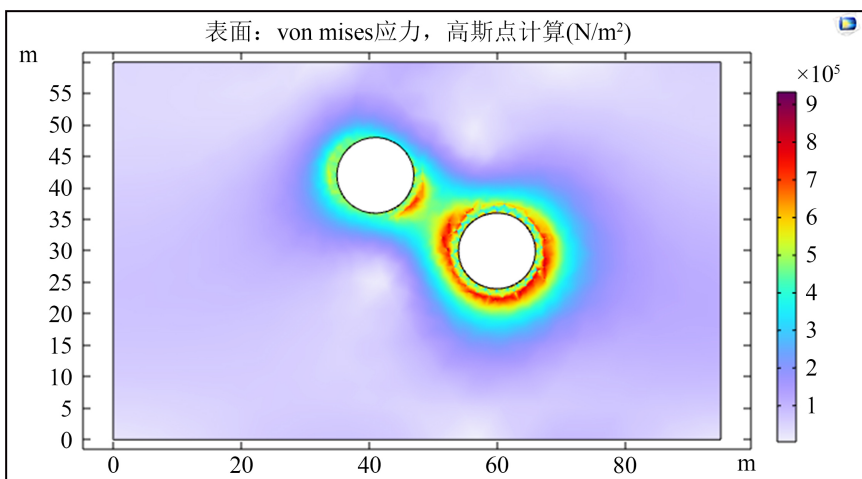


Figure 4. Cloud chart of in-situ stress von mises stress in soil mass after excavation

图 4. 土体中为开挖后地应力 von mises 应力云图

等效塑性应力是一种物理量，可以用来判断经过加固的钢材屈服面的大小位移。该计算结果方法和第四强度方法测定等效应力大小的方法一样，只是应力变为应变。在实验中，得到了塑料在单轴拉伸时的高弹塑性应力 - 应变曲线。在工程实践中，建筑构件的极限状况一般为空气极限状况，在屈服时又是空气屈服。透过统计等效塑性应力，人们能够发现极限状况和塑性屈服后的极限之间的等效应力和此时构造的空间极限状况。

隧洞施工中的塑性区直间接影响了隧洞施工过程中的支护方法，所以塑性区的形式与尺度也必不可少。开挖后的塑性区域，出现在两个隧洞的边界以及两个隧洞中间的地方(见图 5)。

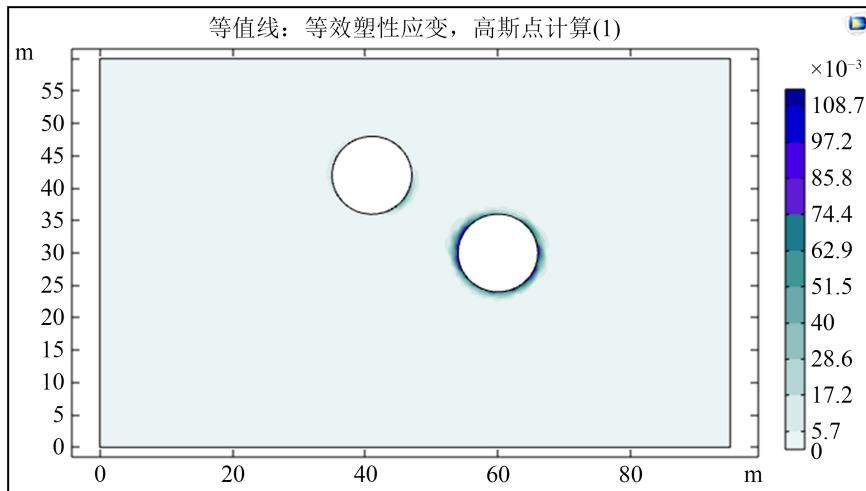


Figure 5. Equivalent plastic strain diagram after tunnel excavation

图 5. 隧道开挖后的等效塑性应变图

从以上操作，计算结果看来，隧洞开挖一维线结果图位移图(见图 6)。可以分析出，一维线结果图均以波浪形式产生，以弧长为横坐标，位移大小为纵坐标，当弧长为 10 m 时，位移大小处于最低点，当弧长处于 28 m 时，位移大小处于最高点。

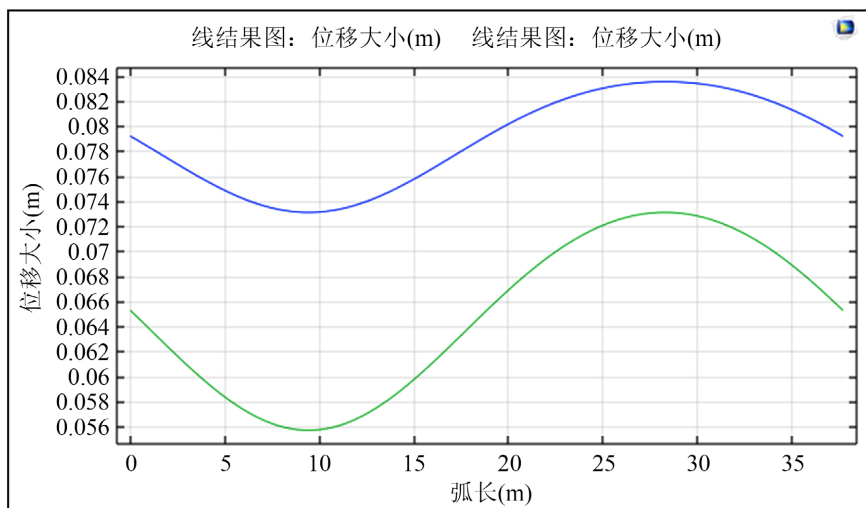


Figure 6. One dimensional line displacement diagram of tunnel excavation

图 6. 隧道开挖一维线结果图位移图

3. 结论

利用有限元 COMSOL 软件建立小净距双隧洞开挖的二维模型,并对平行双隧洞开挖期间的岩土力学承载力进行数值模拟,在隧洞开挖过程中,临近开挖区的塑性区形状和地表沉降量等重要参数的获取,对整个隧洞开挖地区的设计与施工具有重要的指导意义。该模型计算了隧道开挖过程中土壤的受力和变形。隧道周围塑性区域的地表沉降和宽度,是预测开挖过程中加固材料用量的重要参数。模型中使用两个研究步骤:第一个步骤计算隧道开挖前土壤的应力状态;第二个步骤计算去除隧道内土壤后的弹塑性,并使用第一步计算得出的原地应力。在第一步中,土壤视为弹性,在第二步中,添加了基于德鲁克-普拉格准则的土壤塑性特征。研究内容成果如下:

1) 通过网络图的方法,将网格以自由三角形分隔。还可发现,隧道周围的网格比较稠密,而其他地方的网格则稀少。

2) 分析开挖前后土体的 von mises 应力云曲线,得出施工中的最大初始内应力为 19.6 kPa,主要发生于混凝土体的最低点。在施工后,隧洞附近结构中的应力逐渐增大,其最大内部应力约为 890 kPa,主要发生在两个隧洞中心点附近的地方。

3) 经过研究,得出了土体施工前的应力云图数据、地表沉降曲线、塑性分区曲线和一维线结果图。对防止地面沉降、维护基础结构、制定隧洞衬砌及养护计划提供了依据,对隧洞施工有着重大价值。在自由土上进行间距较小的双向隧洞后,隧洞附近的内应力相对增大,并形成塑性分区,其内应力发生于两条隧洞中间。

参考文献

- [1] (英)波茨,斯察维奇,著. 岩土工程有限元分析: 应用[M]. 谢新宁, 周建, 胡敏云, 应宏伟, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2010: 37-39.
- [2] 颜旭文. 隧洞开挖数值模拟及运用[J]. 山西建筑, 2010, 36(6): 359-361.
- [3] 张献才, 沈长松, 黄景忠. 隧洞开挖应力重分布三维有限元模拟及研究[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(10): 680-682.
- [4] 肖明, 叶超, 傅志浩. 地下隧洞开挖和支护的三维数值分析计算[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2501-2505.
- [5] 刘佳, 徐连民. 某水工隧洞开挖与支护的数值模拟[J]. 土工基础, 2009, 23(1): 54-57.
- [6] 王刚, 安琳. COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 1-2.
- [7] 滕海文, 王涛, 霍豫慧, 等. 基于 FLAC3D 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.
- [8] 齐得旭, 傅荣华. 某隧道进口段开挖的力学响应分析[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2015, 34(1): 91-93.
- [9] 漆泰岳. 地铁施工引起地层和建筑物沉降特征研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1283-1290.
- [10] 顾少波. 小型水利工程隧洞开挖施工技术[J]. 居舍, 2022(11): 55-57.