Modeling and Simulation 建模与仿真, 2024, 13(4), 4549-4557
Published Online July 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mos
https://doi.org/10.12677/mos.2024.134412

Hans汉斯

基于数值模拟的双隧道净距对地表沉降的影响分析

王　帅，苏哲阳，于王成，李佩青

上海理工大学环境与建筑学院，上海

收稿日期：2024年6月20日；录用日期：2024年7月14日；发布日期：2024年7月22日

摘　要

为了解决设计施工不当引发的地表沉降过大、上方路面塌陷、构筑物沉降等问题。利用MIDASGTSNX软件建立隧道三维数值模型，通过研究双隧道的隧道净距对地表沉降的影响情况。结果表明：双隧道净距较小时，地表沉降曲线呈“V”型，最大沉降位于两隧道中间；当两隧道净距不断增大，地表沉降曲线形状发生改变，逐渐转变为“W”型，地表最大沉降值随着净距增大而减小，且位于先行隧道上方，为保证工程安全，选择双隧道净距为15 m的工况。

关键词

地表沉降，数值模拟，双线隧道

Analysis of the Effect of the Clear Distance between Two Tunnels on Surface Subsidence Based on Numerical Simulation

Shuai Wang, Zheyang Su, Wancheng Yu, Peiqing Li

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 20th, 2024; accepted: Jul. 14th, 2024; published: Jul. 22nd, 2024

Abstract

In order to solve the problems caused by improper design and construction, such as excessive surface subsidence, upper road collapse and structure settlement. The tunnel three-dimensional numerical model is setup by using MIDAS GTSNX software, through changing the clear distance

文章引用: 王帅, 苏哲阳, 于王成, 李佩青. 基于数值模拟的双隧道净距对地表沉降的影响分析[J]. 建模与仿真, 2024, 13(4): 4549-4557. DOI: 10.12677/mos.2024.134412

between two tunnels to show the influence on surface subsidence. The results show that: when the clear distance between the two tunnels is small, the surface settlement curve is "V", and the maximum settlement is located in the middle of the two tunnels; when the clear distance between the two tunnels is increasing, the shape of the surface settlement curve changes, gradually transforming into a "W", the maximum surface settlement value decreases with the increase of the clear distance, and is located above the first tunnel. The maximum settlement value decreases with the increase of the clear distance, and it is located above the first tunnel, to ensure the safety of the project, choose the working condition that the clear distance between the two tunnels is 15 m.

Keywords

Surface Subsidence, Numerical Simulation, Double-Track Tunnels

Copyright © 2024 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

截止到 2020 年 7 月底，国内高速铁路营业里程已达到 3.6 万公里，居于世界第一位。我国人口数量众多，地上可利用空间有限，为了缓解城市交通、满足生活需要，人们越来越注重地下空间的开发和利用。隧道工程中，土体的开挖卸载会引起围岩发生应力重分布，进而引起地层损失和地层位移，使得地表发生沉降和变形[1]。超过安全限制的地表沉降和变形不仅会引发隧道安全事故，危害施工人员的安全，给人民生活和经济造成巨大的影响和损失。

自 19 世纪末以来，国内外学者将地表沉降及变形规律进行了总结和对比分析。1969 年，Peck [2]通过对大量的实测数据进行分析，以此为基础，提出用地层损失的概念来计算隧道施工引起的地表沉降。Peck 认为在不排水的情况下，隧道施工引起的地表沉降槽体积等于地层损失的体积，且沉降槽曲线近似满足正态分布规律。1982 年，O'Reilly 和 New [3]研究了盾构法施工时导致的地表沉降，利用大量实测数据结果进行对比，分析了沉降槽宽度受隧道埋深和隧道半径等因素的影响情况，提出了沉降槽宽度和地层损失率公式。国内学者刘建航[4]结合上海地区隧道工程的实测数据，以 Peck 公式为基础，提出"负地层损失"的概念。公式(1.1)即为 Peck 提出的地表沉降分布公式。

$$S_{(x)} = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \tag{1.1}$$

WeiGang [5]对深层土体沉降的计算进行了研究，改进了姜忻良[6]和孙玉永等[7]的计算公式，得到沉降槽宽度与深度之间的关系，提出计算双线盾构隧道引起不同深度处的沉降公式。

郭社军等[8]将 Peck 公式应用于小半径曲线隧道情况，Peck 公式仍具有较好的可靠性和工程适用性；依据曲线几何不对称条件提出修正 Peck 公式，其沉降预测结果与实际监测结果较吻合。

数值模拟法可以设置材料的各种属性，选择合适的计算理论，还能对复杂的地质条件、边界条件以及衬砌等进行模拟，更能反映实际工程情况。目前常用的数值模拟软件有 ANSYS、FLAC^{3D}、MIDASGTS NX、ABAQUS 等，利用软件进行三维模型的建立，能观察到隧道开挖的过程及各个阶段的沉降，因此成为近年来常用的分析方法。

赵菁菁等[9]结合深圳地铁情况，运用 FLAC^{3D} 有限差分软件模拟了不同开挖工序下地表沉降的分布

规律。Salvatore [10]以罗马地铁开挖的实际工程为背景，建立数值模型分析了影响地层沉降的几个重要因素，结果表明在地质条件相对简单的情况下，数值模拟的结果与实际情况更加吻合。鲍先凯等人[11]采用三维有限元数值模拟软件 MIDASGTS 对花椒箐隧道的实际情况进行了模拟，并分析了 3 种不同施工工法的地表沉降情况，将其结果与现场监测结果进行比对，为今后类似情况的隧道工程提供一定的参考价值。Zude 等人[12]通过数值模拟分析了下穿已有建筑物的地基基础形式、建筑物刚度、建筑物与隧道之间的角度、建筑物中轴线到隧道中轴线之间的距离在隧道施工中所造成的对路面沉降的影响。

董立朋等[13]结合北京地铁 19 号线某盾构工程的现场检测结果，运用皮尔逊相关系数法对盾构掘进参数对地表沉降影响进行线性回归的相关性分析，结果表明皮尔逊相关系数在本工程应用是可靠的，影响地表沉降的两个关键控制参数为注浆量和土压力。

樊虎等[14]针对车辆荷载作用下隧道拱顶不同深度覆土层会发生沉降这一问题提出一种盾构过程中拱顶覆土两阶段沉降分析模型，结果表明对 Peck 公式中土体体积损失参量进行修正并有效预测车辆循环荷载在隧道耦合作用下盾尾拱顶覆土沉降发展规律。

宫志群等[15]结合徐州地铁彭城广场站工程为背景，对地铁车站开挖施工引起的地表变形规律进行研究，并与单一形式的明挖与暗挖引起的地表沉降特征进行对比，结果表明明暗挖施工引起的地表沉降叠加效应与两者的先后开挖顺序及基坑与隧道间距相关。地表沉降叠加形态随基坑与隧道间距变化，随着基坑与隧道间距的增加地表沉降形态从单凹槽形变为双凹槽形；先明挖后暗挖顺序下暗挖隧道施工引起的最大地表沉降增加，先暗挖后明挖顺序下明挖基坑施工引起的最大地表沉降减小。

本文运用有限元数值分析软件 MIDAS GTS NX 建立相应的三维隧道模型，对不同施工方式、不同埋深等情况下地表沉降的变化进行数值模拟，对比单隧道与双隧道两种不同情况，分析两条隧道间净距分别为 5 m、10 m、15 m 对地表沉降的影响规律，确定合理的设计值，为今后的工程情况提供重要的参考价值。

2. MIDAS GTS NX 数值模型

MIDASGTS NX (Newexperienceof Geo-Technicalanalysis System)是一款通用岩土领域有限元分析软件，它能够最大化地反映现场实际情况且支持静力分析、动力分析、施工阶段分析等多种分析类型。根据经验，为减小模型边界对模拟结果的影响，通常数值模型边界距离隧道中线取 3~5 倍洞径，结合隧道断面尺寸，选取单线隧道模型尺寸为 100 m × 70 m × 35 m，适当增大双线隧道模型尺寸长度，选为 150 m × 70 m × 35 m。设置边界约束条件：模型上顶面自由，下底面为固定面，其余四个面限制其水平方向位移，保证情况与实际工程相符。模拟过程中土体采用摩尔－库伦模型，支护结构采用弹性模型。为了便于模拟计算，简化选取支护结构参数和各土层土体力学参数如表 1 和表 2 所示。

Table 1. Supporting structure parameters
表 1. 支护结构参数

结构名称	弹性模量(kN/m^2)	泊松比	重度(kN/m^3)	粘聚力(kPa)	摩擦角(˚)
超前支护	133056.8	0.17	24.62	0.68	46.93
初期支护	23000000	0.2	22		
二次衬砌	32500000	0.2	25		
临时支撑	23000000	0.2	22		
仰拱填充	28000000	0.2	23		
封闭掌子面	23000000	0.2	22		
锚杆	210000000	0.3	78.5		

Table 2. Soil mechanical parameter
表 2. 土体力学参数

土层编号	土层名称	土层厚度(m)	弹性模量 (kN/m^2)	泊松比	重度 (kN/m^3)	粘聚力 (kPa)	摩擦角(°)	静止侧压力系数	渗透系数 (m/d)	初始孔隙比
1-2	素填土	3	6630	0.3	19.71	5	6	0.43	1.74E-07	0.67
1-5	碎石土	4	34500	0.2	19.61	0.5	25	0.25	0.00058	0.5
9-2	强风化泥质砂岩	8	93085	0.17	23.63	0.58	45.6	0.2	0.000463	0.42
9-3	中风化泥质砂岩	55	138000	0.17	24.03	1.07	37.3	0.2	1.62E-06	0.5

3. 双隧道净距对地表沉降影响研究

3.1. 双隧道净距 5 m 引起的地表沉降

双隧道施工过程中，存在交叉扰动的情况，施工条件更加复杂，因此除了单隧道中需要考虑的开挖工法和隧道埋深的影响外，还需要考虑双隧道之间的净距对隧道施工及地表沉降的影响。研究过程中保证 CRD 开挖工法、隧道埋深 10 m 不变。当双隧道净距为 5 m 时，建立数值模型的网格划分图如图 1，图中红线所示位置为地表沉降曲线选取位置。

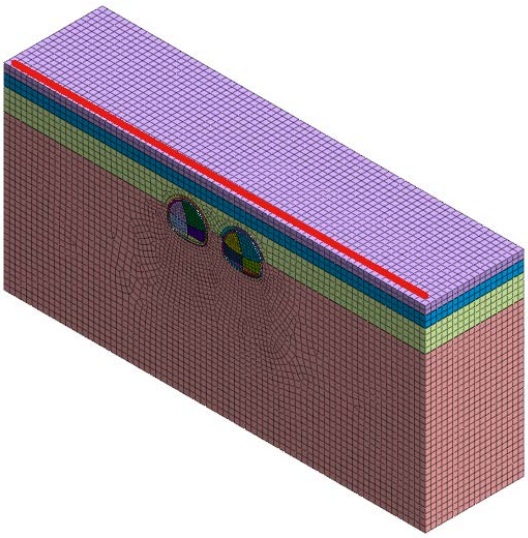

Figure 1. Grid division and surface settlement curve of double tunnel clear distance 5 m
图 1. 双隧道净距 5 m 模型网格划分及地表沉降曲线

图 2 为该工况下三维沉降位移云图，从图中可以看出位于左侧先行隧道起始开挖面的拱顶位置处存在最大沉降值，且相比于右侧隧道，左侧先行隧道上方的沉降更明显。同时由于两隧道相距较近，相互之间开挖的交叉影响较大，导致两隧道中间的沉降加大。地表沉降值最大值接近 35 mm，位于两隧道中间，整体的沉降曲线呈“V”型，两隧道上方的沉降量也较大，均超过 25 mm，因此当两隧道相距 5 m 时，相互间的影响较大，不利于工程安全。

3.2. 双隧道净距 10 m 引起的地表沉降

双隧道净距为 10 m 时，模型的网格划分图如图 3 所示，图中红线所示位置为地表沉降曲线选取位置。

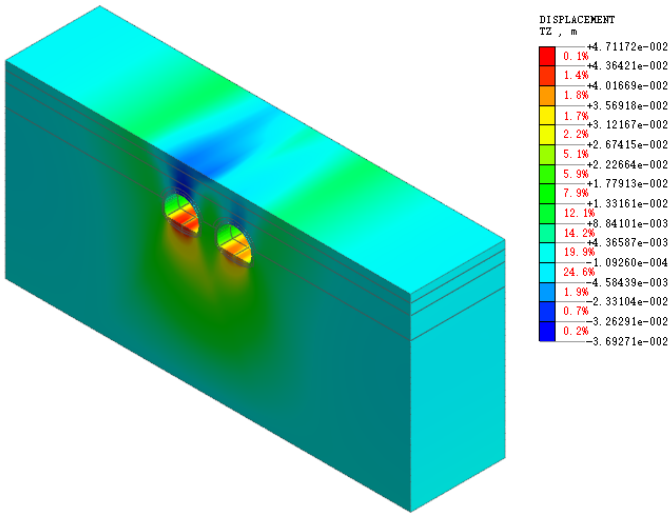

Figure 2. Three-dimensional settlement displacement of double tunnel clear distance 5 m
图 2. 双隧道净距 5 m 三维沉降位移

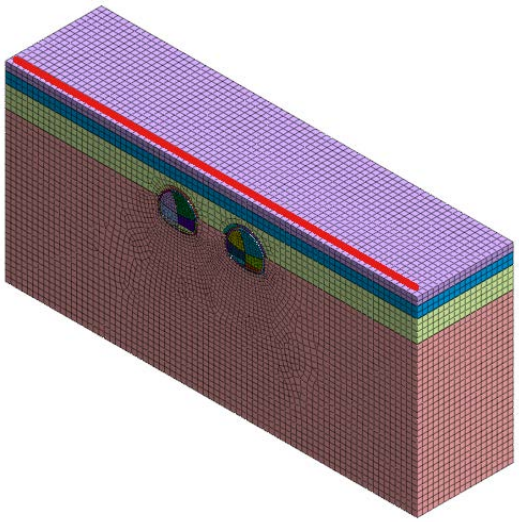

Figure 3. Grid division and surface settlement curve of double tunnel clear distance 10 m
图 3. 双隧道净距 10 m 模型网格划分示意图及地表沉降曲线

图 4 为双隧道净距 10 m 时三维沉降位移云图，可以看出最大地表沉降仍位于左侧先行隧道起始开挖面的拱顶位置处约为 28.1 mm，且左侧先行隧道上方的沉降情况也大于右侧隧道上方。隧道中部同样受两侧隧道开挖的交叉影响，产生较大的沉降，结合地表沉降曲线图，相比于两侧隧道上方，中线位置上方沉降值略小，表明其受两侧隧道的影响小于净距为 5 m 时的情况。同时最大沉降位于左侧先行隧道上方，且沉降值小于 30 mm，相比于净距 5 m 减小约 5 mm。

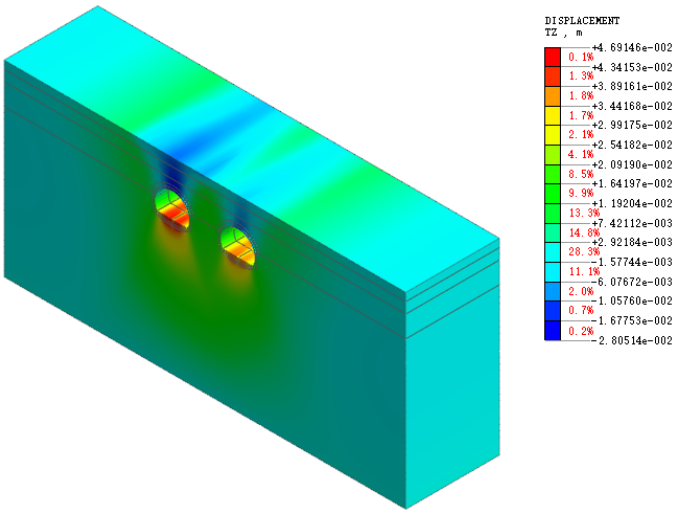

Figure 4. Three-dimensional settlement displacement of double tunnel clear distance 10 m
图 4. 双隧道净距 10 m 三维沉降

3.3. 双隧道净距 15 m 引起的地表沉降

图 5 为双隧道净距为 15 m 时模型的网格划分图，图中红线所示位置即为地表沉降曲线选取位置。

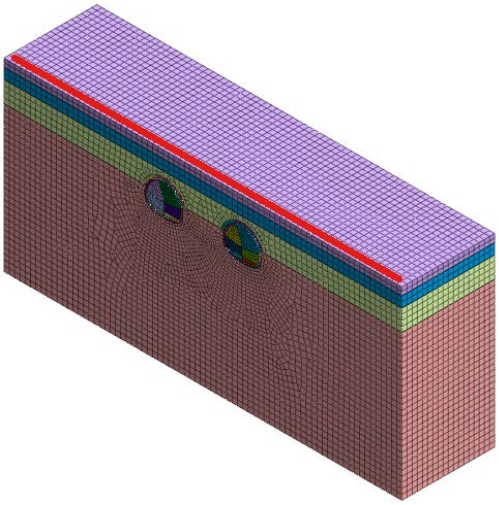

Figure 5. Grid division and surface settlement curve of double tunnel clear distance 15 m
图 5. 双隧道净距 15 m 模型网格划分示意图及地表沉降曲线

当双隧道净距为 15 m 时，所产生的三维沉降位移云图如图 6 所示，与净距为 5 m 和 10 m 相比，最大沉降值有所减小，约为 26.8 mm，位于左侧先行隧道起始开挖面拱顶位置处，相对减小 27.4%和 4.6%，说明此时两隧道净距的增大使得交叉影响作用变小，因双隧道叠加影响引起的附加沉降值减小。结合地表沉降曲线图，最大地表沉降值约为 24 mm，位于左侧先行隧道正上方，相比于双隧道净距 10 m 时减小 4 mm，且右侧隧道上方的沉降小于 20 mm，中间地表沉降较小，沉降曲线呈“W”型，满足施工安全要求。

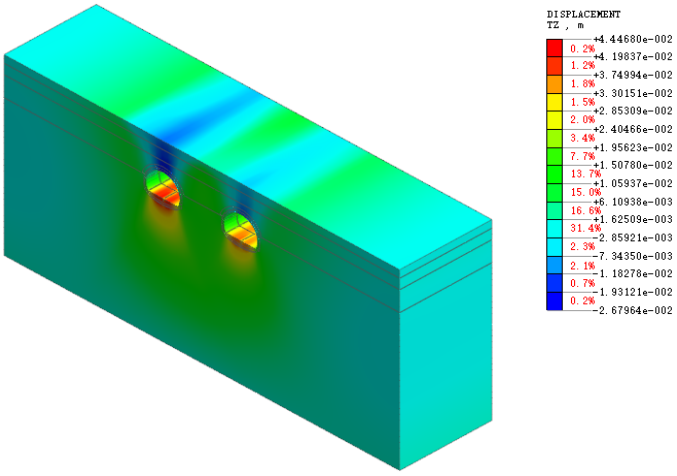

Figure 6. Three-dimensional settlement displacement of double tunnel clear distance 15 m
图 6. 双隧道净距 15 m 三维沉降

3.4. 不同隧道净距引起的地表沉降对比分析

图 7 为三种不同隧道净距情况下地表沉降对比图，由图可知，当隧道处于同一埋深时，地表沉降曲线趋势因隧道净距的不同而不同。当双隧道净距 5 m 时，地表沉降曲线呈“V”型，在隧道中线位置取得最大沉降值 35 mm，影响较大，不利于施工安全；当双隧道净距增加至 10 m 时，地表最大沉降值位于左侧先行隧道正上方约为 27 mm，地表沉降曲线在两隧道中间区域沉降值相对减小且变化较为平缓，表明虽受两隧道开挖的交叉扰动影响，但其影响有所减小；而当双隧道净距为 15 m 时，地表沉降曲线呈“W”型，最大沉降值为 24 mm 左右，位于左侧先行隧道上方，隧道中线位置的沉降较小，表明此时两隧道开挖对中间土体的交叉影响大幅降低，可忽略交叉效应对地表沉降的影响。因此在施工过程中，应适当控制双线隧道净距，减小其影响，保证施工安全，本文选择双隧道净距 15 m 的情况进行研究。

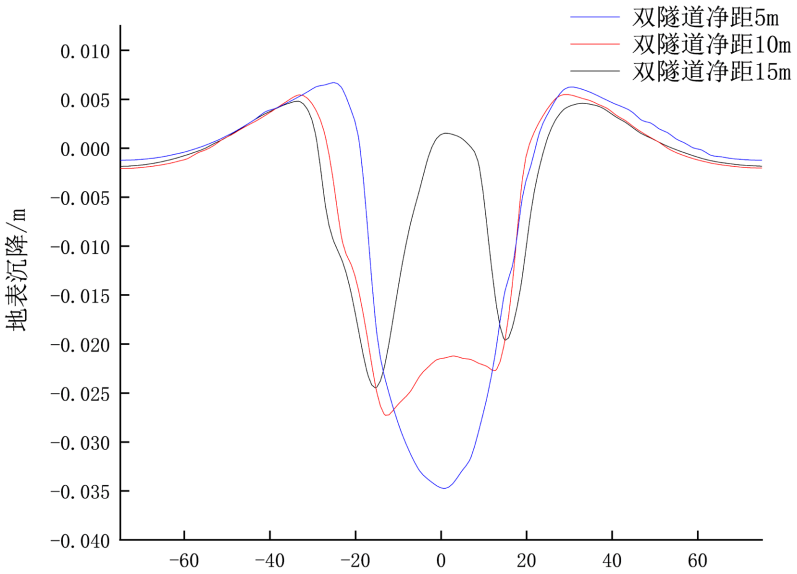

Figure 7. Comparison of surface settlement under different tunnel clearances
图 7. 不同隧道净距情况下地表沉降对比图

3.5. Peck 公式计算结果与数值模拟结果比较

为验证数值模拟合理性，选取埋深 10 m 时的 CRD 工法隧道施工情况进行 Peck 公式理论计算。由表 1 和表 2 中的各土层厚度和摩擦角，得到摩擦角的加权平均值 $\bar{\varphi}=32.2°$，隧道的等效半径等于隧道断面高度与断面宽度之和的四分之一，故 $R=6\ \text{m}$。李世豪在太沙基极限平衡理论的基础上，计算处了地表沉降槽宽度系数的计算公式，即

$$i=\frac{R}{\cos\left(45°-\frac{\varphi}{2}\right)}+\frac{z}{\tan\left(45°+\frac{\varphi}{2}\right)}=12.37\ \text{m} \tag{2.1}$$

地层损失率 $\eta=0.51\%$，则地层最大沉降值 $S_{\max}=\frac{\pi R^2\eta}{2.5i}=18.65\ \text{m}$，将上述理论值代入到式子(1.1)可得 Peck 公式的计算结果，其沉降曲线与相同情况下数值模拟曲线如图 8 所示。

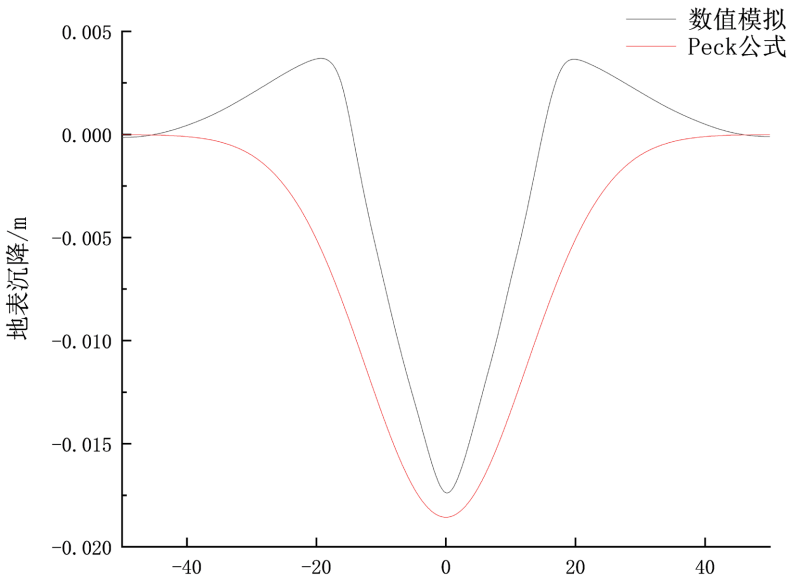

Figure 8. Comparison of settlement curve by Peck formula and numerical simulation
图 8. Peck 公式计算与数值模拟沉降曲线对比图

由图 8 可以看出，两种方法下沉曲线趋势相似，最大沉降值均出现在隧道中线正上方，且地表沉降值向两侧逐渐减小，但 Peck 公式计算方法得到的沉降曲线中无地表隆起现象，主要是由于 Peck 公式理论计算中没有考虑拱肩两侧因衬砌变形造成的地表隆起，且由于衬砌的存在，数值模拟得到的地表沉降量略小于理论计算结果，因此本文模型合理且能反应真实施工情况。

4. 结论

1) 地表沉降值随着隧道埋深的增加而逐渐减小，当隧道埋深较小时，隧道两侧拱肩处有一定的隆起量，主要是由于衬砌支护变形的挤压；

2) 当隧道埋深达到一定深度后，隧道埋深对地表沉降影响较小，可以忽略。但隧道埋深越大，施工难度越大，因此在满足施工需要的情况下，可适当减小隧道埋深，降低施工难度，本文选用隧道埋深 10 m；

3) 双隧道之间的净距同样会影响地表沉降且改变沉降曲线形状。双隧道净距较小时，地表沉降曲线呈“V”型，最大沉降位于两隧道中间，表明两隧道开挖的相互扰动大；当两隧道净距不断增大，地表沉降曲线形状发生改变，逐渐转变为“W”型，地表最大沉降值随着净距增大而减小，且位于先行隧道上方，表明两隧道之间的影响减小，为保证工程安全，选择双隧道净距为 15 m 的工况。

参考文献

[1] 杨福麟, 刘永林, 胡斌. 武汉地铁隧道开挖引起地表沉降的数字模拟研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 85-91.

[2] Peck, R.B. (1969) Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, 225-290.

[3] O'Reilly, M.P. and New, B.M. (1982) Settlement above Tunnels in the United Kingdom—Their Magnitude and Prediction. In: Jones, M.J., Ed., *Tunnelling* '82, Institution of Mining and Metallurgy, London, 173-181.

[4] 刘建航, 侯学渊. 盾构隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.

[5] Wei, G. (2013) Prediction of Soil Settlement Caused by Double-Line Parallel Shield Tunnel Construction. *Disaster Advances*, **6**, 23-27.

[6] 姜忻良, 赵志民, 李园. 隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算[J]. 岩土力学, 2004(10): 1542-1544.

[7] 孙玉永, 周顺华, 宫全美. 软土地区盾构掘进引起的深层位移场分布规律[J]. 岩土力学与工程学报, 2009, 28(3): 500-506.

[8] 郭社军, 郝晓龙, 舒国明. Peck 公式在小半径曲线隧道沉降分析的应用[J]. 公路, 2020, 65(8): 405-408.

[9] 赵菁菁, 宿文姬. 深圳地铁近接隧道暗挖施工地表沉降控制[J]. 隧道建设, 2014, 34(11): 1055-1061.

[10] Miliziano, S. and Lillis, A.D. (2019) Predicted and Observed Settlements Induced by the Mechanized Tunnel Excavation of Metro Line C near S. Giovanni Station in Rome. *Tunneling and Underground Space Technology*, **86**, 236-246. https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.01.022

[11] 鲍先凯, 曹嘉星, 段东明, 等. Midas/GTS 在软岩隧道施工设计中的应用[J]. 公路, 2019, 7(7): 321-325.

[12] Ding, Z., Ji, X., Lin, X., *et al*. (2019) Numerical Investigation of 3D Deformations of Existing Buildings Induced by Tunneling. *Geotech Geology*, **37**, 2611-2623. https://doi.org/10.1007/s10706-018-00781-1

[13] 董立鹏, 聂清浩, 孙晓坤, 曹伍富, 寇鼎涛, 白志强, 杨陕南. 基于皮尔逊相关系数法的盾构掘进参数对地表沉降影响分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(1): 116-123.

[14] 樊虎, 庄妍, 宋相伟. 运营期浅埋公路隧道拱顶覆土层力学分析模型及沉降规律研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(1): 20-241.

[15] 宫志群, 王永志, 廖少明, 唐聪. 地铁车站明暗挖施工引起的地表沉降叠加效应研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(3): 6-13.