

[21DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1201

隧道开挖地表沉降动态预测及影响因素分析

江 帅^{1,2}, 朱 勇^{2,3}, 栗 青¹, 周 辉^{2,3}, 涂洪亮^{2,3}, 杨凡杰^{2,3}

(1. 沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 城市地铁隧道施工不可避免地对围岩产生扰动引起地表沉降, 动态预测隧道开挖引起的地表沉降是确保地表建筑物与隧道施工安全的重要基础。针对隧道施工过程中地表沉降难以准确动态预测的问题, 在定义纵向开挖度系数 γ 的基础上, 建立横向地表沉降动态预测模型。该模型能够描述同一监测位置沉降曲线随掌子面推进而不断变化的规律, 实现施工现场沉降动态预测。结果表明: 在特定约束条件下, 该模型能够退化为 Peck 模型以及随机介质理论预测模型; 通过现场施工验证了该动态预测模型的准确性与适用性; 基于纵向开挖度系数 γ 将隧道沿纵向分为强烈、中度和轻度共 3 个影响段, 较好地反映了开挖掌子面在不同位置对同一监测截面的影响程度; 通过分析建筑物和隔离桩对地表沉降曲线的影响可知, 建筑物与其附近地层呈现出协同变形、共同承载的特征, 在隧道一侧添加地质钻隔离桩对该侧地表沉降值的减小程度可达 71.9%。研究成果对滇中引水工程现场施工与类似工程具有一定指导和借鉴意义。

关 键 词: 沉降预测模型; 动态预测; 纵向开挖度系数; 随机介质理论; 影响分段; 现场监测

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 01-0195-10

Dynamic prediction and influence factors analysis of ground surface settlement during tunnel excavation

JIANG Shuai^{1,2}, ZHU Yong^{2,3}, LI Qing¹, ZHOU Hui^{2,3}, TU Hong-liang^{2,3}, YANG Fan-jie^{2,3}

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The construction of urban subway tunnel inevitably produces disturbance to surrounding rock and causes ground surface settlement. Dynamic prediction of ground surface settlement caused by tunnel excavation is an important method to ensure the safety of above-ground buildings and tunnel construction. In view of the difficulty of accurate dynamic prediction of ground surface settlement during tunnel construction, based on the definition of longitudinal excavation coefficient γ , a dynamic prediction model of lateral ground surface settlement is established. The model can accurately describe the variation of the settlement of the same monitoring location with the advancement of the tunnel face, and then realize the dynamic prediction of the ground surface settlement at the construction site. The results show that under certain constraints, this model can be degenerated into Peck model and stochastic medium theory prediction model. The accuracy and applicability of the dynamic prediction model are verified by on-site construction. The tunnel can be divided into three affected segments longitudinally (i.e., intense influence, moderate influence, and mild influence) based on the obtained γ , which well reflected the influence degree of the excavated tunnel face on the same monitoring section at different positions. Through the analysis of the influence of the buildings and isolation piles on the ground surface settlement curve, it can be found that the building and its adjacent ground surface present the characteristics of cooperative deformation and joint bearing. Moreover, installing geological drill isolation piles on the side of the tunnel can reduce the ground surface settlement of that side up to 71.9%. The research results have a certain guiding and reference significance for the on-site construction of the Central Yunnan Water Diversion Project and similar projects.

收稿日期: 2021-08-03

修回日期: 2021-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2019YFC0605104, No. 2019YFC0605103); 国家自然科学基金专项项目 (No. 41941018); 中国科学院科技服务网络计划 (STS 计划) 项目 (No. KFJ-STIS-QYZD-174)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (2019YFC0605104, 2019YFC0605103), the National Natural Science Foundation of China (41941018) and the Science and Technology Service Network Initiative of the Chinese Academy of Sciences (KFJ-STIS-QYZD-174).

第一作者简介: 江帅, 男, 1995 年生, 硕士研究生, 主要从事隧道及地下空间稳定性分析方面的研究。E-mail: 17854114851@163.com

通讯作者: 周辉, 男, 1972 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石力学试验、理论、数值分析与工程安全性分析方面的研究。

E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

Keywords: settlement prediction model; dynamic prediction; longitudinal excavation coefficient; stochastic medium theory; affected segmentation; on-site monitoring

1 引言

城市地铁隧道施工不可避免地会引起地层变形,隧道开挖对围岩产生扰动,传递至地表引起地表沉降变形,进而影响地表建筑物、路面结构以及地下管线的正常使用和结构安全,准确预测隧道开挖引起的地表沉降是确保地表构筑物与隧道施工安全的重要基础。

国内外学者在隧道开挖引起的地表沉降变形方面取得了丰硕的成果。通常情况下,建立地表沉降模型都是在大量的实际监测数据和考虑影响地表沉降的外界因素的基础上,通过软件拟合得到的经验公式^[1-3]。目前,计算地表沉降时使用最为广泛的方法主要有两种:Peck 经验公式法^[4]和随机介质理论法^[5-7]。国内外学者对两种计算方法进行了多方面改进与研究。卢健等^[8]对 Peck 计算模型进行改进,得到计算双线地铁隧道开挖引起地表沉降的方法;吴昌胜等^[9]在分析国内盾构隧道地表沉降实测数据的基础上,利用 Peck 公式反推得到不同直径盾构隧道地层损失率的取值范围;朱才辉^[10]、O'Reilly^[11]等基于 Peck 公式分析了地表最大沉降量 $S_{\max}$ 、沉降槽宽度 i 和地层损失率 V_1 等参数的变化规律;Wang^[12]、魏纲^[13]等基于随机介质理论采用理论推导得到适用于不同环境下的隧道二维沉降预测模型;韩焯^[14]、刘波^[15]等对 Peck 经验公式法和随机介质理论法的应用条件、理论联系、计算结果等方面进行了对比分析,发现随机介质理论得到的地表沉降曲线与 Peck 法具有相同的形式。综上所述,对 Peck 计算模型的改进大多数研究都只是在考虑地表最终变形,不重视反映在同一位置地表沉降随掌子面推进的动态变化规律。另外,很多文献都指出,用随机介质理论得到的沉降分布形态和 Peck 法获得的结果相似,两种计算理论是否能够用同一种表达形式进行表示值得研究。

目前,围绕隧道横向地表沉降曲线进行影响区划分已有大量研究^[16-18],但鲜有研究依据隧道轴线不同位置开挖造成地表沉降量的不同,在隧道轴线上隧道进行影响段划分,以判定最不利隧道开挖位置,为现场及时调整开挖方案以及其他加固应对措施提供依据。因此,本文基于 Peck 计算模型的引入能够反映地表动态变化规律的纵向开挖度参数 γ ,进而建立隧道开挖地表沉降动态预测模型,并给出约束条件,实现该动态模型向 Peck 计算模型和随机

介质理论模型的退化。在动态预测模型基础上提出纵向开挖影响段的概念,按照隧道在不同区段开挖对同一监测截面的影响程度进行影响段划分。最终,通过现场监测数据、数值计算结果对动态沉降预测模型的准确性与适用性进行了验证,并对建筑物和隔离桩两种影响地表沉降的因素进行探究。研究成果对滇中引水工程现场施工与类似工程具有一定指导和借鉴意义。

2 考虑纵向开挖度系数的动态沉降预测模型及开挖影响段划分

2.1 Peck 经验公式

在分析大量隧道开挖引起地表沉降工程监测数据的基础上,Peck^[4]认为隧道开挖时横向地表变形规律近似高斯分布,如图 1 所示。图中, W 为地表沉降槽总宽度的一半; $S_{\max}$ 为沉降槽对应的最大沉降值; α 为与地层条件有关的影响范围角; R 为隧道半径; h 地表至隧道中心深度。

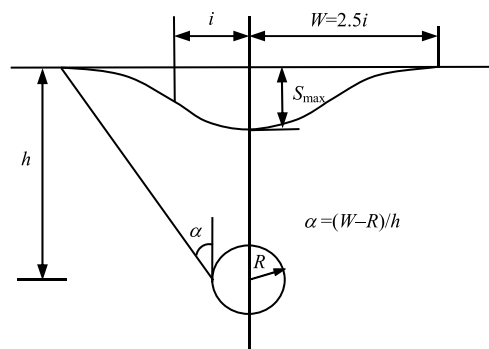


图 1 Peck 公式沉降槽分布曲线

Fig.1 Settlement tank distribution curve determined by Peck formula

隧道开挖引起地表沉降 Peck 经验公式为

$$S(x) = \frac{AV_1}{\sqrt{2\pi}i} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

式中: x 为地表距隧道轴线水平距离; $S(x)$ 为距隧道轴线距离为 x 处的地表沉降量; A 为隧道截面面积。文献[9]对不同直径隧道地层损失率 V_1 取值进行了研究认为:中小直径隧道地层损失率一般在 0%~2.0%之间,大直径隧道地层损失率一般在 0%~0.5%之间,对中小直径隧道而言,隧道地层损失率随着地层条件变好而减小。

式(1)中 i 可表示为^[11]

$$i = Kh \quad (2)$$

式中： K 为沉降槽宽度参数，无黏性土沉降槽宽度参数 K 在 0.2~0.3 之间；对于硬黏土，其值为 0.4~0.5；而对于软的粉质黏土，则可高达 0.7。

2.2 隧道开挖三维动态沉降预测模型推导

式 (1) 只能够预测隧道开挖后地表的最终横向沉降曲线 (不考虑施工过程)，实际工程中同一地表监测位置沉降曲线在掌子面开挖推进过程中是不断变化的。隧道开挖过程中引起的地表沉降三维图如图 2 所示。图中， D 为隧道洞径。

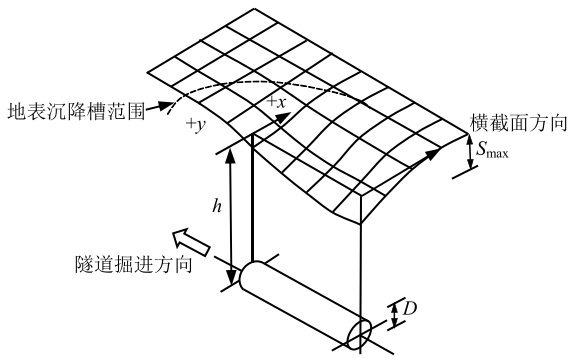


图 2 隧道开挖过程中引起的地表沉降三维图
Fig.2 Three-dimensional map of ground surface settlement caused by tunnel excavation

为了反映同一地表监测截面横向沉降曲线随掌子面推进的动态变化规律，基于 Peck 公式引入表征沉降曲线受纵向开挖长度影响规律的纵向开挖度系数 γ ，得到

$$S(x) = \gamma \frac{AV_1}{\sqrt{2\pi i}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (3)$$

根据随机介质理论可知，隧道开挖岩土体可视为无数个开挖微单元组成如图 3 所示。隧道开挖在地表引起的沉降变形为每个开挖单元对地表影响的叠加。

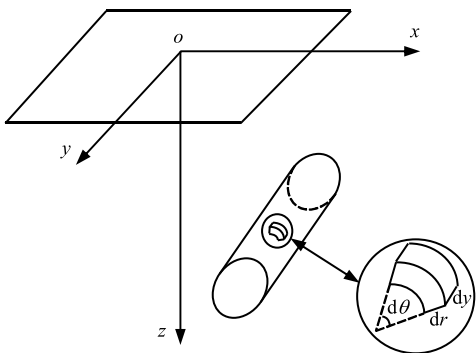


图 3 微单元开挖示意图
Fig.3 Schematic diagram of micro-cell excavation

由随机介质理论得到隧道开挖引起地表沉降曲线与 Peck 模型得到的地表沉降曲线具有相同的

分布形式^[14-15]，将开挖微单元 δ 在地表引起的沿 y 方向的沉降 Q_δ 用 Peck 模型表达形式进行表述，即

$$Q_\delta = \frac{V_\delta}{\sqrt{2\pi j}} \exp\left(-\frac{y^2}{2j^2}\right) \quad (4)$$

式中： y 为隧道纵向监测位置距开挖微单元的距离； V_δ 为隧道开挖卸载平均到每个微单元的地层损失，其取值与地层条件、隧道开挖工法和支护加固方法等因素有关； j 为隧道纵向影响曲线宽度因子。

其中， j 可以表示为

$$j = \lambda i = \lambda K h \quad (5)$$

式中： λ 为纵向宽度比例系数，表征横向沉降槽宽度 i 与纵向影响曲线宽度因子 j 量值关系的比例系数。

将式 (4) 开挖微单元地表沉降在隧道纵向任一开挖区段 (y_1, y_2) 内积分，得到该区段开挖引起的纵向地表沉降 $G(y_1, y_2)$ 为

$$G(y_1, y_2) = \int_{y_1}^{y_2} \int_0^{2\pi} \int_0^R Q_\delta r dr d\theta dy \quad (6)$$

式中： y_1 为隧道纵向开挖前掌子面距监测位置的距离； y_2 为隧道纵向开挖结束掌子面距监测位置的距离； r 为隧道半径； θ 为旋转角度。

将式 (4) 代入式 (6) 整理得

$$G(y_1, y_2) = \int_{y_1}^{y_2} \frac{V_\delta}{\sqrt{2\pi j}} \exp\left(-\frac{y^2}{2j^2}\right) dy \int_0^{2\pi} \int_0^R r dr d\theta \quad (7)$$

当隧道处于极限开挖工况 (完全贯通) 时，纵向积分上下限 (y_1, y_2) 取为 $(-\infty, +\infty)$ ，对应的地表沉降 G_T 为

$$G_T = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{V_\delta}{\sqrt{2\pi j}} \exp\left(-\frac{y^2}{2j^2}\right) r dr d\theta dy = \quad (8)$$

$$V_\delta \int_0^{2\pi} \int_0^R r dr d\theta$$

定义任一纵向开挖区间 (y_1, y_2) 沉降值与极限开挖工况时极限沉降的比值为纵向开挖度系数 γ 。该纵向开挖度系数 γ 可以表示为

$$\gamma = \frac{\int_{y_1}^{y_2} \frac{V_\delta}{\sqrt{2\pi j}} \exp\left(-\frac{y^2}{2j^2}\right) dy \int_0^{2\pi} \int_0^R r dr d\theta}{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{V_\delta}{\sqrt{2\pi j}} \exp\left(-\frac{y^2}{2j^2}\right) dy \int_0^{2\pi} \int_0^R r dr d\theta} \quad (9)$$

结合式 (8) 和式 (9) 整理，得

$$\gamma = \int_{y_1}^{y_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi j}} \exp\left(-\frac{y^2}{2j^2}\right) dy \quad (10)$$

将式 (10) 代入到式 (3) 得到隧道开挖地表横截面沉降动态预测模型为

$$S(x) = \frac{AV_1}{\sqrt{2\pi i}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \int_{y_1}^{y_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi j}} \exp\left(-\frac{y^2}{2j^2}\right) dy \quad (11)$$

式中: AV_1 的物理意义是隧道开挖后的收敛面积(即隧道断面面积的减小)。

2.3 动态预测模型向 Peck 模型和三维随机介质理论模型退化

当隧道处于极限开挖工况(完全贯通)时, 式(10)中纵向积分上下限(y_1, y_2)应取为 $(-\infty, +\infty)$, 此时纵向开挖度系数 γ 的计算结果为 1, 式(11)动态预测模型退化为式(1)经典 Peck 预测模型。

式(11)中, 假定一个微型隧道用微元 $d\xi d\eta d\zeta$ 表示(且完全塌陷), 则在隧道断面平面内收敛的面积应为 $d\xi d\eta$, 如图 4 所示。图中, ξ 、 η 为微单元相对于隧道中心上方地表在 x 方向和 z 方向的位置; Ω 为收敛前隧道断面; ω 为收敛后隧道断面。将其代替式(11)中的 AV_1 ; 而 dy 指的是开挖微单元在 y 方向的长度, 若其用同样表示开挖微单元在 y 方向的长度的量值 $d\zeta$ 表示可得

$$S(x) = \iint_{\Omega-\omega} \frac{1}{\sqrt{2\pi i}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) d\xi d\eta \int_{y_1}^{y_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi j}} \exp\left(-\frac{y^2}{2j^2}\right) d\zeta \quad (12)$$

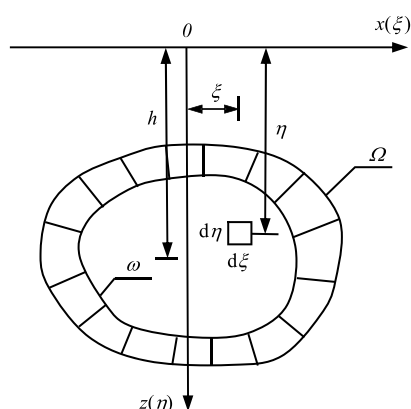


图 4 隧道任意断面开挖示意图

Fig.4 Schematic diagram of excavation of any cross section of tunnel

假设以下条件成立, 即

$$\sqrt{2\pi i} = \frac{z}{\tan \beta} \quad (13)$$

式中: z 为隧道深度方向; β 为取决于地层条件的主要影响角。

式(12)在式(13)条件下, 可转化为下式:

$$S(x) = \iint_{\Omega-\omega} \frac{\tan \beta}{z} \exp\left(-\frac{x^2 \pi \tan^2 \beta}{z^2}\right) d\xi d\eta \cdot \int_{y_1}^{y_2} \frac{\tan \beta}{\lambda z} \exp\left(-\frac{y^2 \pi \tan^2 \beta}{\lambda^2 z^2}\right) d\zeta \quad (14)$$

此时所得式(14)形式与文献[19]通过随机介

质理论所得隧道纵向沉降预测模型具有相同的形式, 但区别在于纵向方向上本文动态预测模型比文献[18]计算模型多一个修正系数 λ , 使本文模型更接近现场施工工况。主要原因是隧道纵向开挖推进过程中对掌子面的扰动与横向围岩不同, 例如: 挤压(盾构施工)、开挖震动等一系列因素, 使得纵向沉降与横向不完全相同。

2.4 隧道开挖动态沉降预测模型反演

由式(10)可知, 纵向开挖度系数 γ 与开挖前掌子面距监测位置的距离 y_1 , 开挖后掌子面距监测位置的距离 y_2 以及纵向影响曲线宽度因子 j 有关。纵向影响曲线宽度因子 j 由式(5)计算, 为了得到纵向宽度比例系数 λ 的取值, 本文通过建立地层参数分别为无黏性土、硬黏性土和软黏性土的数值模型, 采用三台阶法开挖, 模型尺寸如图 5 所示。计算开挖掌子面起始位置距地表沉降监测截面纵向距离分别为 100、15、10、5、0 m 工况下地表横截面沉降分布曲线; 其中, 当开挖起始位置距离监测截面距离为 100 m 时, 纵向开挖度系数 γ 计算结果接近于 1。因此, 该工况可认为是监测截面最大沉降工况(全挖)。

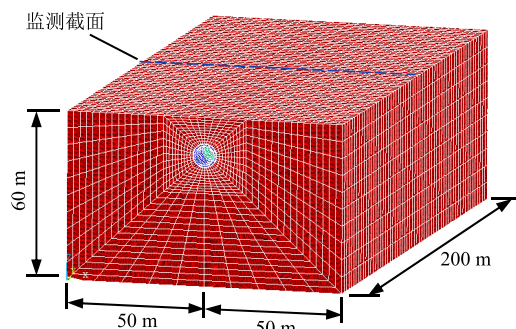


图 5 反演计算模型

Fig.5 Inversion calculation model

结合数值模拟所得分布曲线反演得到纵向宽度比例系数 λ 按以下取值: 对于粉质黏土取值 3.0, 对于无黏性土取值为 0.9, 其余地层在 0.9~3.0 之间取值, 地层条件越好取值越小。

数值模型各材料参数见表 1 所示。

表 1 各材料物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of each material

材料类型	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)
黏土 Clay	1 860	11	0.35	34	10
衬砌	2 602	3.0×10^4	0.20	—	—

所得不同开挖工况下同一监测位置横向地表沉降曲线如图 6(a)所示。取沉降槽宽度系数 $K=0.5$ ，地层损失率 $V_1=1.7\%$ ，反演所得纵向宽度比例系数 $\lambda=1.2$ ，动态沉降预测模型所得横向地表沉降曲线如图 6(b)所示。

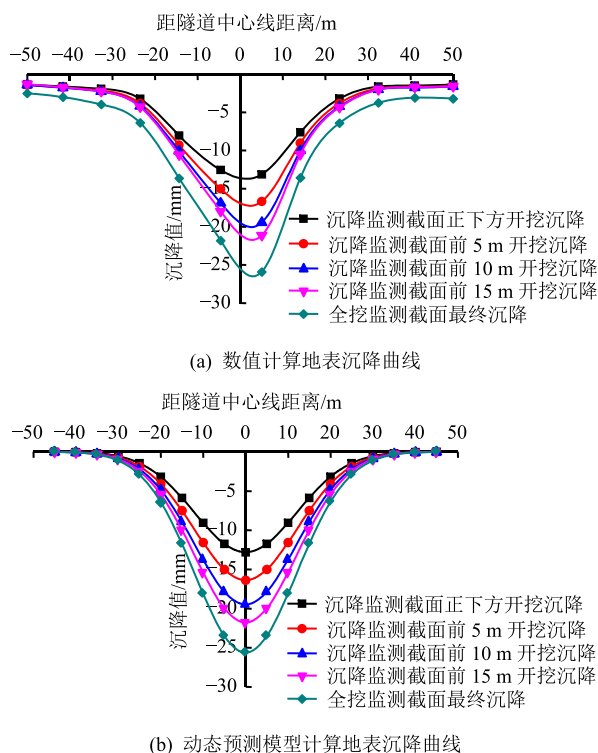


图 6 隧道开挖起点与监测截面不同距离时地表沉降曲线
Fig.6 Surface settlement curves at different distances between the starting point of tunnel excavation and the monitored cross section

由图 6 可知，沉降动态预测模型曲线与数值模拟的沉降动态曲线具有良好的吻合度，这说明了隧道开挖动态预测模型具有较好的适用性与准确性，也证明了沉降动态预测模型得到沉降曲线的变化规律更加贴合实际情况。但是当距隧道中线距离大于 $2.5i$ 时，模型曲线在地表位置处的沉降值接近于 0，这与数值模拟结果存在一定误差，这主要是由于预测模型地表沉降曲线是按照高斯分布条件拟合得到，而当 $x > 2.5i$ 时高斯分布函数值近似为 0^[20]，这就导致了计算结果与实际监测数据的误差。

2.5 隧道纵向开挖影响分段

为满足施工现场对监测范围的需求和为现场监测工作提供依据。基于纵向开挖度系数提出纵向开挖影响段的概念，依据开挖掌子面在不同位置开挖造成地表同一监测截面沉降值增量的不同进行影响段划分，共分为开挖强烈影响段、开挖中度影响段和开挖轻度影响段 3 个影响段。根据式 (10)，以

横向监测截面为中心。在隧道纵向上，当开挖掌子面距离监测截面 1.0 个 j 范围内时 γ 约为 0.68；当开挖掌子面距离监测截面 2.5 个 j 范围内时 γ 约为 0.99^[20]。由此作为隧道纵向影响分段的依据，最终影响段划分如表 2 所示。

表 2 隧道纵向影响段划分

Table 2 Division of longitudinal affected section of tunnel

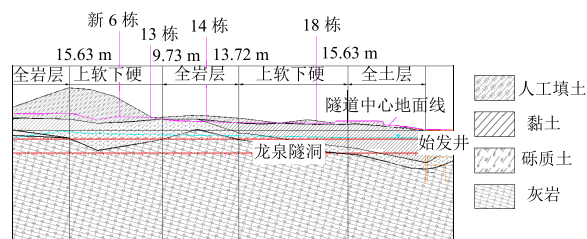
隧道纵向影响分段	范围
开挖强烈影响段	隧道纵向距离监测截面 j 范围内
开挖中度影响段	隧道纵向距离监测截面 $j \sim 2.5j$ 范围内
开挖轻度影响段	隧道纵向距离监测截面 $2.5j$ 范围之外

由表 2 可知，纵向开挖影响段划分范围主要取决于隧道纵向影响曲线宽度因子 j 。而由式 (5) 知， j 不仅与隧道埋深 h 有关，还与围岩条件有关，不同围岩条件下沉降槽宽度参数 K 值和宽度比例系数 λ 值的大小也不同，围岩条件越好(内摩擦角 φ 大)， K 值与 λ 值越小，隧道开挖强烈影响段与隧道开挖中度影响段的长度也就越小。

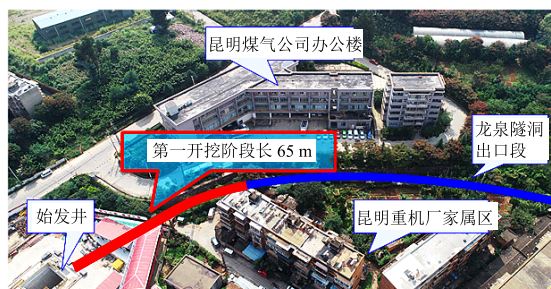
3 工程应用与验证

3.1 工程概况

云南省滇中引水龙泉隧道出口段系第四系地层，地层从地表向下依次为人工填土、红黏土层、砾质土层和下卧层灰岩。模拟段隧道最大埋深为 18.3 m，最小埋深仅为 7.0 m，隧道依次穿越全土层、土岩接触带和全岩层如图 7(a)所示。该段隧道大部分位于土岩接触带附近，围岩稳定性极差。



(a) 地层结构划分图



(b) 侧穿建筑物相对位置示意图

图 7 工程场地环境
Fig.7 Construction site

3.2 监测方案

第一开挖阶段隧道长 65 m, 现场共设置 4 个监测横截面 (I-I 截面、II-II 截面、III-III 截面和 IV-IV 截面) 和 1 个施工过程监测点 (监测点 V)。IV-IV 监测截面位于近接左侧昆明煤气公司办公楼处 (图 7(b)), 其余 3 监测截面之间间距为 10 m, I-I 截面距隧道始发井为 10 m, 施工过程监测点 V 位于 II-II 截面与隧道轴线交点位置, 如图 8 所示。

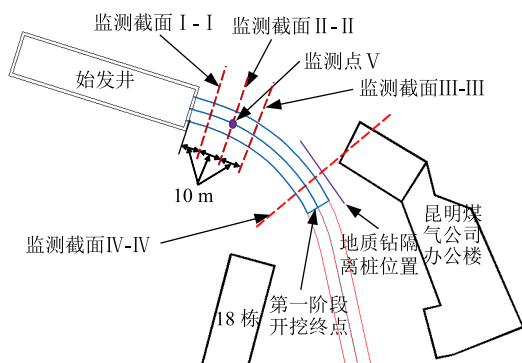


图 8 监测点位置布置图

Fig.8 Layout of monitoring points

3.3 模型网格划分及材料参数设定

3.3.1 模型尺寸及网格划分

为了消除计算模型边界影响, 计算模型采用宽度为隧道轴线左右各 100 m, 约 12 倍洞径 (8.48 m); 纵向长度为 300 m, 隧道起点与终点距离地层边界前后边界各 50 m; 高度方向上取从隧道底向下 100 m, 约 11 倍洞高 (9.02 m), 隧道上方土体取为隧道实际埋深。由于不考虑隧道开挖对建筑物结构的破坏, 因此将建筑物等效为具有一定质量的弹性模型。所构建的数值计算模型如图 9 所示。

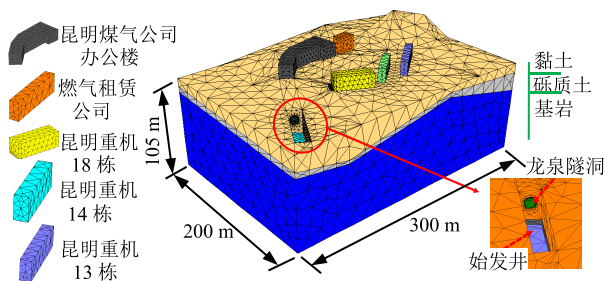


图 9 数值计算模型

Fig.9 Numerical calculation model

施工现场采用 3 台阶预留核心土法开挖, 左右循环进尺为 1 m。考虑到数值模拟侧重于对地表沉降的研究, 因此数值模拟将开挖工法简化为: 3 台

阶形状的掌子面平行向前推进, 每步开挖推进长度为 1 m。为了后期分析对比方便, 将区间隧道开挖划分为 3 个开挖阶段进行分析, 第一阶段开挖包括 65 个开挖步共 65 m, 第二、第三开挖阶段依次为 45 m 和 90 m。

3.3.2 模型材料参数设定

本构模型选择修正摩尔-库仑本构模型, 初支及二衬结构采用板单元建立, 弹性模量根据等效法^[21]确定, 建筑物重度根据《建筑结构荷载规范》(GB 5009—2012)^[22]确定, 根据监测报告确定其余材料物理力学参数见表 3 所示。

表 3 各结构物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of each structural material

材料类型	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
初支	2 602	2.72×10 ⁴	0.20
二衬	2 390	3.0×10 ⁴	0.20
建筑物	500	2.33×10 ⁴	0.30
隔离桩	2 250	3.0×10 ³	0.25

按照地质勘察资料确定土层物理力学参数见表 4 所示。

表 4 土层物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of soil layer

材料类型	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
黏土	1 860	11	0.35	34	10
砾质土	1 910	15	0.32	30	16
灰岩	2 610	180	0.24	851	45

3.4 隧道开挖地表沉降历时曲线

为了验证隧道纵向开挖影响分段方法的适用性和数值模拟结果的正确性, 绘制监测位置 V 处沉降值随隧道掘进的变化规律, 如图 10 所示。

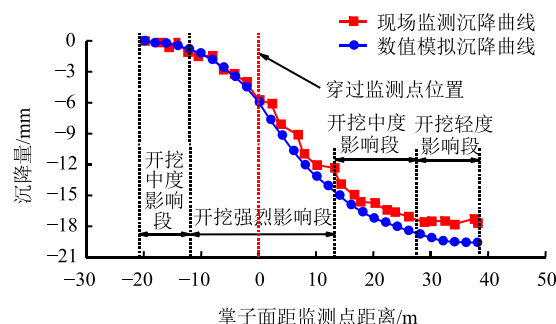


图 10 沉降随掌子面推进变化曲线

Fig.10 Variation of ground surface settlement with the advancement of tunnel surface

由图 10 可知,在隧道掘进过程中,地表沉降量的变化规律呈现先增大后减小的趋势。隧道从监测点 V 前方 20 m 处开挖,地表开始产生沉降变形。随着隧道掘进长度的增加,该监测点沉降变形速率持续增大,当掌子面穿过监测点时沉降变形速率达到最大。当掌子面穿过监测断面约 13 m 处后,沉降变化开始缓慢;当掌子面穿过隧道监测点约 28 m 后,地表沉降趋于稳定。将沉降历时曲线根据沉降速率进行影响区域划分,该曲线穿过影响段依次为:开挖强烈影响段、开挖中度影响段、开挖轻度影响段,符合上述的纵向开挖分段方法。在试验段,偏于安全,考虑最终沉降数值模拟结果略大于监测结果 1.9 mm,数值模拟计算结果与现场监测结果基本一致,从而证明了数值模型材料参数的正确性以及后续开挖预测的适用性。

3.5 地表沉降曲线特征分析

为了验证本文提出沉降动态预测模型的可靠性,对比分析了第一开挖阶段 I-I~III-III 截面现场监测沉降曲线与数值模拟沉降曲线如图 11 所示。以监测截面为起始位置,隧道掘进方向为正向,则第一阶段隧道开挖掌子面起始位置与开挖结束掌子面位置相对于监测截面 I-I 的距离分别为 -10 m 和 55 m,因此对应动态沉降预测模型计算区间为 $(-10, 55)$ 。同理,II-II 截面和 III-III 截面对应的动态预测模型计算区间分别为 $(-20, 45)$ 和 $(-30, 35)$ 。由于该段隧道位于土岩接触带附近,地层条件极差。因此,动态预测模型宽度比例系数 λ 取为最大值 3,沉降槽宽度系数 K 取 0.6,地层损失率 V_1 取 0.9%,埋深取平均埋深 13 m。

由图 11 可知,将三维开挖沉降动态预测模型所得结果与现场实测沉降数据和数值计算沉降结果进行对比,3 种结果得到沉降曲线较为一致,这说明了所建立的沉降动态预测模型是合理的,可以对不同相对位置的隧道纵向开挖掌子面与监测面进行地表沉降动态预测。数值模拟结果在距离隧道中心大于 2 倍洞径范围后,右侧地表沉降大于左侧对称位置的沉降。其主要原因为开挖隧道具有一定曲率,隧道开挖对曲率内侧围岩有扰动集中现象,造成对隧道右侧围岩扰动累加大于左侧,原理如图 12 所示。本动态预测模型所得沉降曲线在距隧道中线距离大于 $2.5i$ 时,地表沉降预测值接近于 0,与数值模拟及现场监测结果具有一定误差,这主要是由于当隧道掌子面距离监测截面 $2.5j$ 范围之外开挖时 γ 仅约为 0.01。

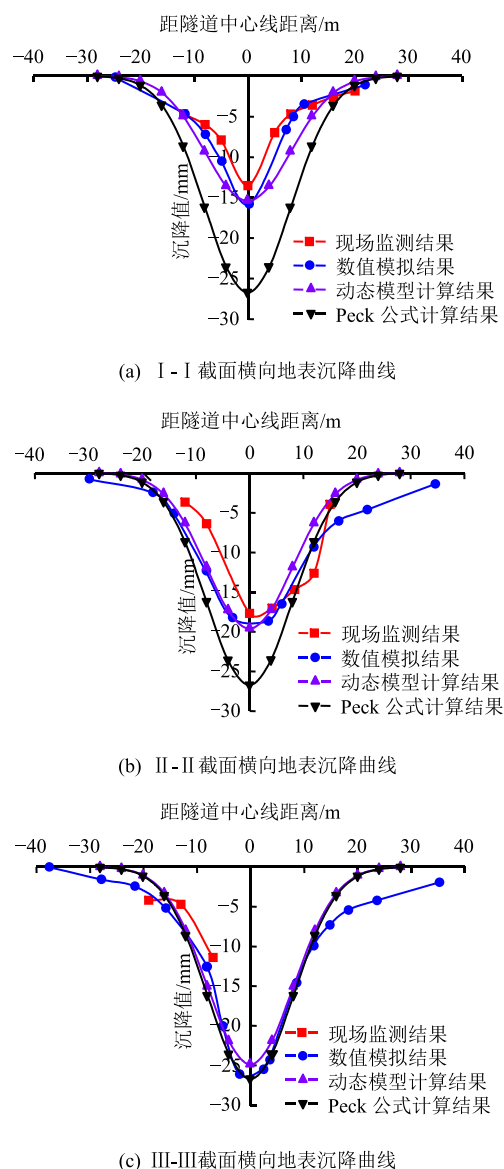


图 11 不同监测截面横向地表沉降曲线
Fig.11 Lateral surface settlement curves of different monitoring sections

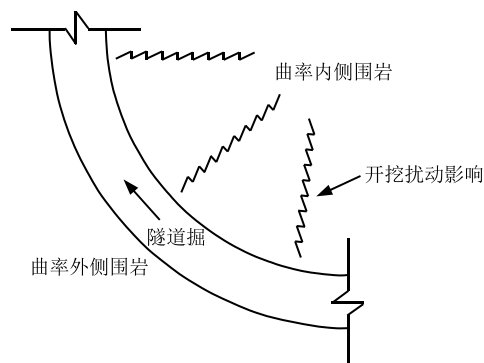


图 12 隧道开挖曲率内侧围岩受扰动示意图
Fig.12 Schematic diagram of surrounding rock disturbance on the inner side of tunnel excavation curvature

相比于 Peck 计算模型所得结果,本动态预测模型所得沉降曲线更贴合隧道开挖地表实际沉降曲

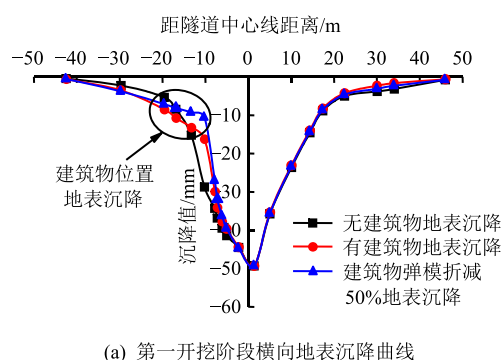
线, 且该模型能够反映监测截面随着隧道开挖位置改变引起的地表沉降的变化过程, 进而可实现地表沉降动态预测的目的。

4 建筑物和隔离桩加固对地表沉降曲线影响

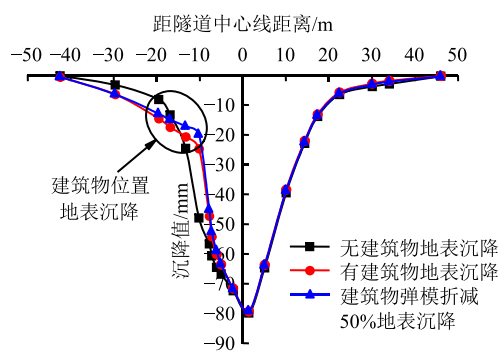
沉降动态预测模型反映了隧道施工过程中地表沉降的演化规律, 此外影响地表沉降曲线形状的因素还有建筑物和隔离桩等。本文在沉降动态预测模型的基础上, 依托工程进一步分析隧道一侧建筑物和施加隔离桩支护对地表沉降曲线的影响。

4.1 近接建筑物地表横向沉降曲线特征

当隧道近距离侧穿地表建筑物施工时, 该处地表横向沉降曲线势必会受到建筑物的影响。为了探究建筑物对地表横向沉降曲线的影响规律, 对依托工程现场建筑物进行分析, 该建筑物距离隧道边缘 9.43 m。对比无建筑物、有建筑物和建筑物弹性模量折减 50% 三种工况下隧道侧穿开挖引起 IV-IV 截面地表沉降曲线如图 13 所示。



(a) 第一开挖阶段横向地表沉降曲线



(b) 第二开挖阶段横向地表沉降曲线

图 13 不同建筑物工况 IV-IV 截面地表沉降对比

Fig.13 Comparison of surface settlement of Section IV-IV under different building conditions

由图 13 可知, 第一阶段开挖中有建筑物和建筑物弹性模量折减 50% 两种工况在 IV-IV 截面上相比无建筑物工况, 其地表沉降值降低幅度分别为

44% 和 63%, 建筑物远离隧道一侧地表沉降值增幅分别为 59% 和 34%; 同理, 在第二阶段两工况下地表沉降降低幅度分别为 49% 和 58%, 另一侧增幅为 78% 和 59%。建筑物的存在使得地表曲线变得平缓, 其主要是由于建筑物的存在使得建筑物处地表刚度局部增大, 使得建筑物与其附近地表协同变形共同承载造成的。

此外, 当隧道在距离 IV-IV 截面较远段开挖时, 地表沉降受建筑物材料参数的影响在削弱, 且隧道一侧建筑物对地表沉降曲线的影响范围主要在靠近建筑物一侧, 对隧道另一侧及开挖隧道正上方位置处地表沉降影响微弱。

4.2 隔离桩加固地表横向曲线特征

在昆明煤气公司办公楼与隧道之间施加两排梅花形布置地质钻隔离桩进行模拟分析, 共 65 根, 桩径为 200 mm, 桩长入岩 3 m, 隔离桩布置如图 14 所示。

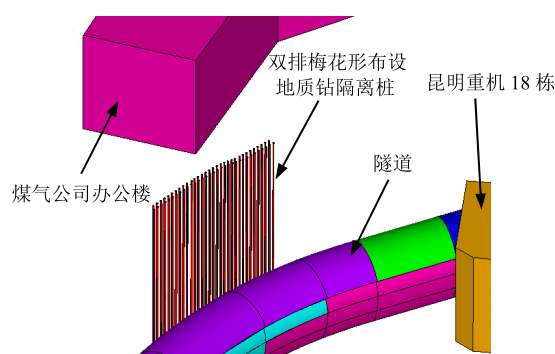


图 14 隔离桩布置图

Fig.14 Layout of isolation pile

为分析隔离桩加固对地表沉降曲线的影响, 提取第一阶段以及后续施工阶段有无施加隔离桩工况下 IV-IV 截面地表沉降曲线如图 15 所示。

图 15 所得结果与文献[23]研究结论一致, 小转弯半径隧道的地表沉降最大值不再位于拱顶正上方, 而是偏向于隧道中心线右侧 (即曲率内侧) 1 倍洞径范围内。对比有无隔离桩两种工况, 在 IV-IV 监测断面第二阶段开挖与第三阶段开挖在施加隔离桩的工况下较不施加隔离桩沉降最大减小了 14.78 mm 与 15.36 mm, 减小比例分别为 71.9% 和 71.1%。由此可知, 隔离桩的添加对 IV-IV 监测断面的拱顶地表沉降的隔离效果明显。在第二阶段开挖造成该监测断面沉降量最大, 后续开挖段随着距该监测断面距离的增加, 对地表沉降影响逐渐减弱。

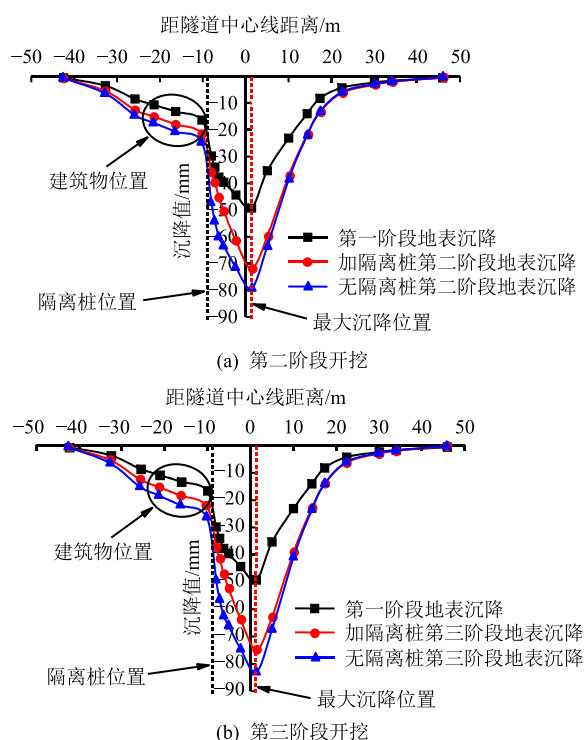


图 15 不同隔离桩工况IV-IV截面地表沉降对比

Fig.15 Comparison of surface settlement of Section IV-IV under different isolation pile conditions

5 结 论

(1) 建立了一套适用于隧道开挖的地表沉降动态预测模型,该模型基于 Peck 经验公式引入纵向开挖度系数,来表征同一位置地表沉降曲线受开挖掌子面位置改变而变化的规律,且该模型可以准确地实现隧道动态开挖实时预测的目的。

(2) 通过对沉降动态预测模型施加一定的约束条件,可以实现模型向 Peck 计算模型和随机介质理论模型的退化。

(3) 在隧道纵向上引入纵向开挖影响段的概念,表征隧道纵向开挖段对某一横向地表沉降影响程度的物理量,基于纵向开挖度系数将隧道在纵向上依次分为开挖强烈影响段、开挖中度影响段和开挖轻度影响段,为现场掘进及监测工作提供依据。

(4) 建筑物对横向地表沉降曲线的影响表现在:建筑物的存在使得地表曲线变得平缓,建筑物与其附近地层表现出协同变形共同承载特性;隧道一侧建筑物对地表沉降曲线的影响范围主要在靠近建筑物一侧,对另一侧以及隧道中线正上方位置处地表沉降影响微弱。

(5) 由于隔离桩对地层变形的控制作用,横向地表沉降曲线在隔离桩施加一侧沉降值坐标上移,隔离桩的存在使得第二阶段开挖与第三阶段开挖地表沉降值在隔离桩位置处减小比例分别为 71.9%和

71.1%, 隔离效果明显。

参 考 文 献

- [1] JIN D L, YUAN D J, LI X G, et al. Analysis of the settlement of an existing tunnel induced by shield tunneling underneath[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81(11): 209-220.
- [2] FU J Y, YANG J S, ZHANG X M, et al. Response of the ground and adjacent buildings due to tunnelling in completely weathered granitic soil[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 43(7): 377-388.
- [3] 李方明, 陈国兴. 南京江漫滩区间隧道盾构施工地表沉降变形特性研究[J]. *铁道学报*, 2020, 42(7): 155-160.
LI Fang-ming, CHEN Guo-xing. Study on deformation characteristics of ground surface settlement during shield tunnel construction of river floodplain in Nanjing[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2020, 42(7): 155-160.
- [4] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of 7th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: [s. n.], 1969: 225-290.
- [5] 曾彬, 黄达, 彭念, 等. 单圆和异形盾构隧道施工引起土体位移计算的类随机介质理论方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(增刊 2): 4356-4366.
ZENG Bin, HUANG Da, PENG Nian, et al. Analogous stochastic medium theory method(ASMTM) for predicting soil displacement induced by general and special-section shield tunnel construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(Suppl. 2): 4356-4366.
- [6] LITWINSZYN J. The theories and model research of movements of ground masses[C]//Proceedings of the European Congress Ground Movement. Leeds: [s. n.], 1957: 202-209.
- [7] 傅鹤林, 李鲇, 王洪涛, 等. 基于随机介质理论的浅埋偏压隧道沉降预测[J]. *铁道工程学报*, 2017, 34(9): 70-76.
FU He-lin, LI Jie, WANG Hong-tao, et al. Research on the ground settlement prediction in shallow tunnel under unsymmetrical pressure based on stochastic medium theory[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(9): 70-76.
- [8] 卢健, 姚爱军, 郑轩, 等. 地铁双线隧道开挖地表沉降规律及计算方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 34(9): 70-76.
LU Jian, YAO Ai-jun, ZHENG Xuan, et al. Study on the law and computational method of ground surface

- settlement induced by double-line tunnel excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl. 2): 3735-3747.
- [9] 吴昌胜, 朱志铎. 不同直径盾构隧道地层损失率的对比研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2257-2265.
WU Chang-sheng, ZHU Zhi-duo. Comparative study on ground loss ratio due to shield tunnel with different diameters[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(12): 2257-2265.
- [10] 朱才辉, 李宁. 隧道施工诱发地表沉降估算方法及其规律分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 533-542.
ZHU Cai-hui, LI Ning. Estimation method and laws analysis of surface settlement due to tunneling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl. 2): 533-542.
- [11] O'REILLY M P, NEW B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom—their magnitude and prediction[C]// *Proceedings of Tunnelling 82*. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1982: 173-181.
- [12] WANG X D, TAN W J, NI P P, et al. Propagation of settlement in soft soils induced by tunneling[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2020, 99: 103378.
- [13] 魏纲, 周杨侃. 随机介质理论预测近距离平行盾构引起的地表沉降[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 113-119.
WEI Gang, ZHOU Yang-kan. A simplified method for predicting ground settlement caused by adjacent parallel twin shield tunnel construction based on stochastic medium theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl. 2): 113-119.
- [14] 韩焱, 李宁. 隧道施工引起地层位移预测模型的对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 594-600.
HAN Xuan, LI Ning. Comparative analysis of strata prediction models for ground movement induced by tunnel construction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(3): 594-600.
- [15] 刘波, 陶龙光, 叶圣国, 等. 地铁隧道施工引起地层变形的反分析预测系统[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3): 227-282.
LIU Bo, TAO Long-guang, YE Sheng-guo, et al. Back analysis prediction system for ground deformation due to subway tunneling excavation[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2004, 33(3): 227-282.
- [16] 易立. 城市新建隧道下穿既有道路影响分区研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(5): 1490-1497.
YI Li. Study on the influence zoning of the new urban tunnel under the existing road[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2020, 16(5): 1490-1497.
- [17] 杨小龙, 房有亮, 吕志洲. 昆明软土地区双孔隧道地表沉降预测及影响分区[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(增刊 2): 347-354.
YANG Xiao-long, FANG You-liang, LÜ Zhi-zhou. Surface settlement prediction and impact zone division for double tube tunnel in Kunming soft soil area[J]. **Modern Tunneling Technology**, 2019, 56(Suppl. 2): 347-354.
- [18] 仇文革, 孙克国, 郑强, 等. 隧道上方挖填方受初始埋深的影响分区研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 1): 8-13.
QIU Wen-ge, SUN Ke-guo, ZHENG Qiang, et al. Study on influence division of fill and excavation above tunnel by the initial depth[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2017, 50(Suppl. 1): 8-13.
- [19] 施成华, 彭立敏. 随机介质理论在盾构法隧道纵向地表沉降预测中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 320-323.
SHI Cheng-hua, PENG Li-min. Application of stochastic medium theory to predicting settlement in longitudinal surface due to tunnel construction by shield[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 320-323.
- [20] 盛骤, 谢式签, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020.
SHENG Zhou, XIE Shi-qian, PAN Cheng-yi. Probability and mathematical statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2020.
- [21] 李春清, 梁庆国, 吴旭阳, 等. 复合式衬砌初期支护刚度及影响因素分析[J]. 隧道建设, 2014, 34(8): 754-759.
LI Chun-qing, LIANG Qing-guo, WU Xu-yang, et al. Analysis on rigidity of primary support of composite lining and its influencing factors[J]. **Tunnel Construction**, 2014, 34(8): 754-759.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [23] 邓皇适, 傅鹤林, 史越. 小转弯半径曲线盾构隧道开挖引发地表沉降计算[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 165-173.
DENG Huang-shi, FU He-lin, SHI Yue. Calculation of surface settlement caused by excavation of shield tunnels with small turning radius[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(1): 165-173.