

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240412001

## 顾及硬化路面厚度的盾构施工地面沉降预测方法\*

廖孟光<sup>1</sup>, 李贤琪<sup>1</sup>, 戴华阳<sup>2</sup>, 魏绍军<sup>3</sup>, 李艳发<sup>4</sup>

(1. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 3. 青岛市地铁规划设计院有限公司, 山东 青岛 266000; 4. 神木市润邦矿业有限公司, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 城市地铁盾构施工易造成地面沉降, 针对硬化路面层与土体层力学性质的差异性, 提出一种顾及路面厚度的 peck 公式修正方法。首先, 对经典 peck 公式的隧道埋深进行修正, 提出等价埋深的函数关系; 其次, 采用 ANSYS 数值模拟分析不同路面层厚度对地铁盾构施工地面沉降规律, 结果表明: (1) 路面层对地表沉降影响明显, 最大沉降量由无路面层的 -29.38 mm 减小至路面厚度 0.5 m 的 -23.27 mm; (2) 相同土体层厚度和相同隧道埋深条件下, 沉降槽宽度系数及最大沉降量均随路面层厚度增加呈线性正相关, 相关系数达 0.972 以上; (3) 模拟结果对 peck 公式修正, 确定等价埋深中路面层、土体层厚度等价参数分别为 2.55、1.00。最后, 应用于苏州地铁 S1 号线和北京地铁 7 号线, 结果发现: 两地区预测结果评价指标均减小, 苏州地区平均绝对百分误差 MAPE 降低 5% 和 19%, 北京两区间均方根误差 RMSE 分别降低 0.97 及 0.53 以上。两个不同地质环境及设计准则下的不同路面厚度应用证明顾及路面层厚度沉降预测方法的多地区适用性。

**关键词:** peck 公式修正; 盾构施工; 地表沉降; 城市路面; 预测

中图分类号: P208 文献标识码: A 文章编号: 1672-2132(2025)04-0784-12

## Ground Settlement Prediction Method for Shield Tunneling Considering Rigid Pavement Thickness

LIAO Mengguang<sup>1</sup>, LI Xianqi<sup>1</sup>, DAI Huayang<sup>2</sup>, WEI Shaojun<sup>3</sup>, LI Yanfa<sup>4</sup>

(1. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Qingdao Metro Planning & Design Institute Co., Ltd., Qingdao 266000, China; 4. Shenmu Runbang Mining Co., Ltd., Yulin 719000, China)

**Abstract:** Shield tunneling in urban metro systems often causes ground settlement. To address the differences in the mechanical properties between the rigid pavement layer and the soil layer, a modified Peck formula that considers pavement thickness was proposed. First, the tunnel depth in the classical Peck formula was modified, and a functional relationship for the equivalent burial depth was proposed. Then, ANSYS numerical simulation was employed to analyze the influence of different pavement layer thicknesses on the ground settlement during shield tunneling. The results showed that: (1) the pave-

\* 收稿日期: 2024-04-12; 修回日期: 2024-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51604108)、湖南省自然科学基金项目(2022JJ30254)资助

作者简介: 廖孟光(1985—), 男, 副教授, 博导, 博士。主要从事变形监测与开采沉陷。E-mail: liaomengguang@163.com

ment layer had a significant impact on surface settlement, with the maximum settlement decreasing from  $-29.38$  mm without a pavement layer to  $-23.27$  mm when the pavement thickness was  $0.5$  m. (2) Under identical soil layer thickness and tunnel depth, both the settlement trough width coefficient and the maximum settlement exhibited a linear positive correlation with pavement thickness, with correlation coefficients exceeding  $0.972$ . (3) Based on the simulation results, the Peck formula was modified, and the equivalent parameters for pavement layer and soil layer thicknesses were  $2.55$  and  $1.00$ , respectively. Finally, the method was applied to Suzhou Metro Line S1 and Beijing Metro Line 7. The results showed that the evaluation indicators of the prediction results in both regions decreased. The Mean Absolute Percentage Error (MAPE) in Suzhou was reduced by  $5\%$  and  $19\%$ , while the Root Mean Square Error (RMSE) in the two sections of Beijing was reduced by over  $0.97$  and  $0.53$ , respectively. The application with different pavement thicknesses under two different geological conditions and design standards confirms the multi-regional adaptability of the settlement prediction method considering pavement layer thickness.

**Keywords:** Peck formula modification; shield tunneling; surface settlement; urban pavement; prediction

## 0 引言

近年来,城市地下轨道交通建设随着我国经济高速发展迎来了建设高潮,但地铁施工在众多因素综合影响下,不可避免的对周围土体产生扰动,造成地层损失,引起地层移动和变形,威胁周边安全<sup>[1]</sup>。因此,简单、适应性高、相对准确的预测方法应用到盾构施工地表沉降研究是必要的。经验公式法<sup>[2]</sup>基于传统统计理论,结合实践经验推断,量化形成综合考虑实际工程情况的计算方法,其简单易操作且具有科学和逻辑性的综合分析和归纳,peck法是预测盾构施工地表沉降中最经典、应用最广的方法之一。

首先,在peck公式相关计算参数初步建议值<sup>[3]</sup>基础上,针对确定地区施工经验及土体特性总结,对peck公式预测模型参数进行反演分析,获得相应区域地质条件下的经验参数并验证<sup>[4]</sup>。其次,众多学者通过对地区大量地表沉降实测数据引入系数修正<sup>[5-6]</sup>,包括地表最大沉降量修正系数 $\alpha$ 和沉降槽宽度修正系数 $\beta$ 进行针对性的修正<sup>[7-8]</sup>,以提高peck公式的预测精度并验证<sup>[9]</sup>。但鉴于不同地区地质环境差异,peck公式尚无与具体施工的岩土体性质密切结合,修正后只能对某特定地区实现准确预测,适用性不强。盾构穿越不同地区的不同性质土体

时导致地面沉降不同<sup>[10]</sup>,针对各地区土体性质及厚度差异,采用Peck公式进行反分析,得到了不同地区的地表沉降特性参数及其变化规律<sup>[11]</sup>,进而提出考虑地层空间分布的盾构掘进模拟方法<sup>[12]</sup>,推导多种性质土体情况下盾构沉降的计算方法及理论公式<sup>[13]</sup>;宋战平等<sup>[14]</sup>在考虑各地层土性质、厚度等,基于修正peck法与随机介质理论提出对沉降槽宽度影响表达式。此外,考虑土层性质的同时,隧道所处地层条件,包括土体变形与周边结构失效机理<sup>[15]</sup>,复合地层中隧道埋深<sup>[16]</sup>、路面覆土厚度<sup>[17-18]</sup>等变化均对地面沉降影响明显。考虑到地铁施工环境基本处于城市核心城区且盾构线路普遍沿城市道路走向设计施工,同时,城市路面均为人为维护后路面而非纯土体<sup>[19]</sup>,对于盾构施工路面的沉降难免存在相应影响。

鉴于此,在对不同土体性质的peck公式基本预测方法前提下,针对不同城市道路路面铺设差异,提出综合考虑路面与土体厚度的沉降影响计算埋深 $Z$ ,路面层与土体层参数取值差异明显,建立顾及路面层和土体层厚度的三维有限元模型,通过对路面厚度差异引起相同隧道埋深及土层厚度的地面沉降影响规律研究,确定适应不同路面厚度计算埋深 $Z$ 表达式,实现顾及路面厚度的peck公式修正,更为准确的实现对沉降影响预测,对盾构区间路面安全起到预警作用,对市政道路施工设计提供参考。

# 1 研究方法与技术路线

## 1.1 peck 公式回归拟合

### (1) 经典 peck 公式

peck 提出设想, 在施工过程中土体地层不排水情况下, 认为地表沉降是由盾构推进时引起地层损失导致, 其地表沉降槽的体积等于地层损失土体体积。地层损失体积可以根据沉降槽体积反算, 隧道地表横向沉降曲线接近于正态分布曲线(图 1)<sup>[3]</sup>。

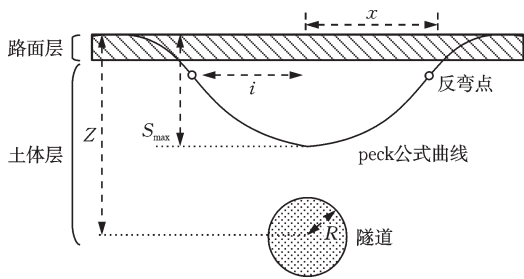


图 1 盾构施工地表沉降

Fig.1 Surface settlement caused by shield tunneling

peck 对地表横向沉降曲线进行拟合得到 peck 经验公式, 表达如式(1)所示。

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

peck 公式中的两个关键参数  $S_{\max}$  及沉降槽宽度  $i$  的取值见式(2):

$$\begin{cases} S_{\max} = \frac{V_s}{i\sqrt{2\pi}} = \frac{\eta\pi R^2}{i\sqrt{2\pi}} \\ i = \frac{Z}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $S(x)$  为测点距隧道轴线距离  $x$  的地表沉降 (mm);  $S_{\max}$  为隧道中心处的最大沉降量 (mm);  $i$  为曲线反弯点距隧道中心的距离 (m);  $x$  为隧道两侧距隧道中心的水平距离 (m);  $Z$  为隧道中线至地表的距离 (m);  $V_s$  为单位长度地层损失 ( $\text{m}^3/\text{m}$ );  $\phi$  为土体内摩擦角 ( $^\circ$ );  $\eta$  为地层损失率 (%);  $R$  为隧道半径 (m)。

### (2) 线性回归拟合

对 peck 公式进行线性回归分析, 以  $\ln S(x)$  和  $-x^2/2$  为回归变量进行求解, 令  $\ln S(x)$  为回归后的常数项  $\hat{a}$ ,  $-x^2/2$  为回归后线性系数  $\hat{b}$ , 将式(2)进行转换可得式(3):

$$\begin{cases} \ln S(x) = \hat{a} + \hat{b} \times \left(-\frac{x^2}{2}\right) \\ S_{\max} = \exp(\hat{a}); i = \frac{1}{(\hat{b})^{\frac{1}{2}}} \end{cases} \quad (3)$$

代入 peck 公式即可得到数据线性回归后的 peck 曲线, 且 peck 公式线性回归能较好的实现沉降曲线拟合<sup>[7-8]</sup>。

## 1.2 顾及路面厚度的 peck 公式修正

经典 peck 公式预测地面沉降主要考虑研究区地质结构环境及盾构施工设计方案, 结合大量研究区实测数据, 确定 peck 公式关键参数  $S_{\max}$  及沉降槽宽度系数  $i$ , 进而对地层损失率  $\eta$ , 土体内摩擦角  $\phi$  进行求参, 而  $\eta$  和  $\phi$  参数的取值与地质条件有关, 最终实现对目标区域盾构横断面的沉降进行准确预测。

考虑到地铁盾构隧道大多位于繁华的城市区域, 且与道路走向相同。而城市路面属于人工维护路面, 其路面层与土体层的力学参数不同, 不同厚度的路面层必然会导致的地面沉降不同, 进而影响 peck 公式的预测精度。因此, 考虑硬化路面层对减缓路面沉降的影响, 将路面层和土体层分开考虑, 通过式(4)可知,  $Z_{\text{实际}}$  与经典 peck 公式反算所得的  $Z_{\text{计算}}$  是不相等的。

$$\begin{cases} Z_{\text{实际}} = H_1 + H_2 \\ Z_{\text{计算}} = \frac{\eta\pi R^2 \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)}{S_{\max}} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $H_1$  为路面层厚度;  $H_2$  为土体层厚度。

为确定路面层厚度  $H_1$  及土体层厚度  $H_2$  与地表最大沉降计算埋深关系, 分别引入等效参数  $K_1, K_2$  表示路面及土体厚度对计算埋深的影响情况, 建立路面层及土体层厚度对计算埋深  $Z_{\text{计算}}$  的等价函数关系式(5), 求取参数的最优取值, 达到适应不同地区隧道埋深差异及路面层厚度差异的目的, 结合目标地区相关设计参数即可实现该地区 peck 公式的修正。

$$Z_{\text{计算}} = K_1 H_1 + K_2 H_2 \quad (5)$$

## 1.3 技术路线

(1) 基于经典 peck 公式预测方法, 引入硬化路面层对 peck 公式进行修正, 不同厚度路面层情况下的计算埋深  $Z_{\text{计算}}$  与实际埋深  $Z_{\text{实际}}$  存在差异, 通过引入  $K_1, K_2$  两个等效参数, 实现路面层的等价埋深, 得出基于路面及土体厚度的计算埋深  $Z_{\text{计算}}$  表达式。

(2) 确定土体性质前提下,考虑硬化路面层对盾构施工路面沉降的影响,采用ANSYS软件构建三维数值有限元模型,区分路面层与土体层的差异性,分析不同路面厚度导致地面沉降变化的影响规

律,通过数值模拟结果确定参数 $K_1$ 、 $K_2$ 。

(3) 将修正后的peck公式应用于苏州、北京地区的三个工程实例,并评价其预测精度。具体技术路线如图2所示。

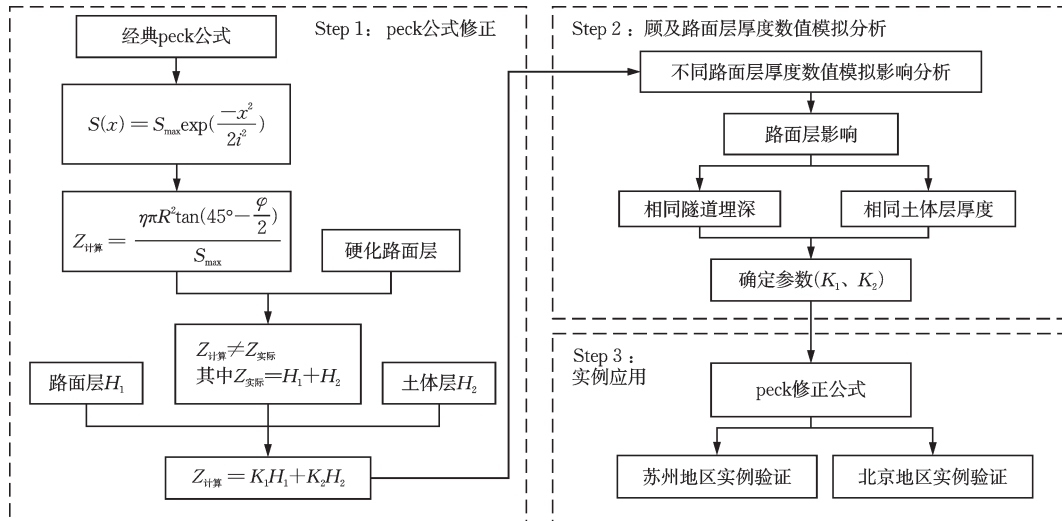


图2 顾及路面层厚度的沉降预测技术路线

Fig.2 Technical route for settlement prediction considering pavement layer thickness

### 1.4 评价指标

在考虑路面层厚度构建的预测表达式及经验公式预测时,往往预测值 $\hat{y}_i$ 与真实值 $y_i$ 间不可避免的存在误差,通过MAE体现相同现象的成对观察之间的误差,MAPE避免数据范围太小的影响, RMSE判断模型预报值与实测值之间的差异,三个指标越小,预测值准确性越高,如式(6)所示。

$$\begin{cases} MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \\ MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \\ RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $n$ 表示断面测点数; $y_i$ 表示原始监测数据; $\hat{y}_i$ 表示预测数据。

## 2 顾及硬化路面厚度的数值模拟分析

### 2.1 模型的建立

以苏州轨道交通S1号线为例,利用ANSYS有限元软件三维建模,采用Mechanical APDL求解器模拟;采用Drucker-Prager本构模型按点到线、线到

面方式, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 轴按 $63 \times 38.8 \times 60$  m尺寸建立,如图3所示,由SOLID45定义实体单元,MASH200定义非求解单元,模型按四边形单元划分网格,共包含12 747个NODE,11 360个ELEMENT;隧道埋深为12.9 m;顶面为自由边界,模型底部设置法向位移约束,模型边界设置水平位移约束;接触面间不存在切向的相对滑动或者法向的相对分离;模拟过程设置开挖步为1.2 m,挖掘6 m为一个计算工况,采用单元“生死”来实现材料消除与添加,通过施加掌子面支护力和注浆压力实现开挖和支护过程模拟,达到隧道连续施工至挖通。

硬化路面层由面层、基层和垫层组成,建模时详细分层会导致模型网格划分复杂,与土体层相比,路面层各层的力学参数较为接近<sup>[19-20]</sup>,在建模时

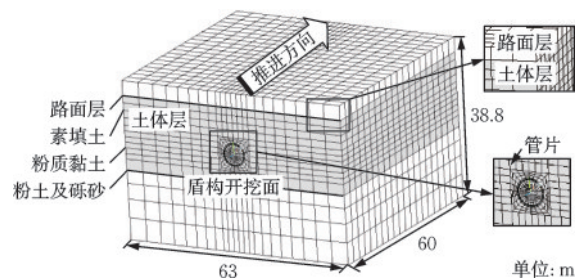


图3 三维模型建模

Fig.3 3D modeling

性质相近地层归为同类型地层,参数为3层结构参数近似取值,厚度为路面层厚度;盾构管片为浇筑的强度较大的建筑结构材料,其结构力学参数对粘

聚力和内摩擦角的取值忽略不计<sup>[1,17,21]</sup>。文章参考相关资料<sup>[22]</sup>与文献[23-24],综合确定苏州地区路面结构材料及地层相关参数取值,见表1。

表1 有限元模型材料参数<sup>[22-24]</sup>  
Table 1 Material parameters of finite element model<sup>[22-24]</sup>

结构	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
硬化路面层	面层、基层和垫层	1 400	0.25	2 350	30
	素填土	15	0.3	1 860	9
土体层	粉质黏土	18	0.29	2 026	33.8
	粉土及砾砂	18	0.25	1 990	24
盾构管片	(高强抗渗混凝土)	2.76e <sup>4</sup>	0.25	2 500	\

数值模型建立旨在确定考虑不同地层厚度差异对地面沉降的影响规律,确定数值模型模拟方案如下:①纯土体层与存在路面层对盾构施工导致的地面沉降影响。②固定土体层厚度,研究通过增加路面厚度导致覆土变厚对地面沉降造成影响。③隧道埋深固定,综合考虑路面层及土体层厚度的取值变化,明确路面厚度变化所导致的地面沉降规律。

## 2.2 不同路面层厚度模拟结果分析

### 2.2.1 路面厚度变化对地表沉降的影响

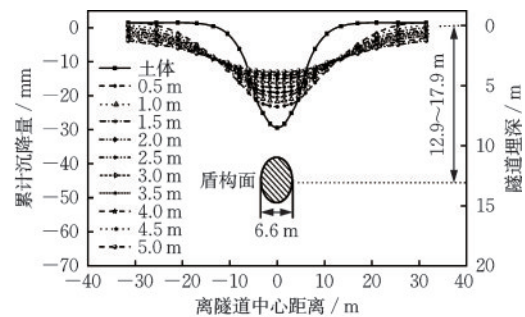
为确定相同土体层厚度和隧道埋深下路面层厚度变化对盾构施工导致地面沉降的影响规律,路面层厚度按单位厚度0.5 m增量,依次从0.5 m增加至5.0 m,确定相同土体层厚度为12.4 m时,模拟曲线如图4所示。当隧道埋深不变,即隧道埋深为12.9 m时,土体层厚度相应的从12.4 m依次减小至7.9 m,模拟曲线如图5所示。结果发现:

①相同土体层厚度下路面厚度增加导致地面沉降逐渐减小,沉降槽曲线明显平缓,变化规律基本符合高斯分布曲线;沉降槽宽度系数*i*逐随厚度的增加逐渐增大,呈线性关系变化,相关系数分别为0.983;最大沉降量*S<sub>max</sub>*从-23.27 mm呈线性相关趋势数值增大至-13.01 mm,且相关系数达0.972。

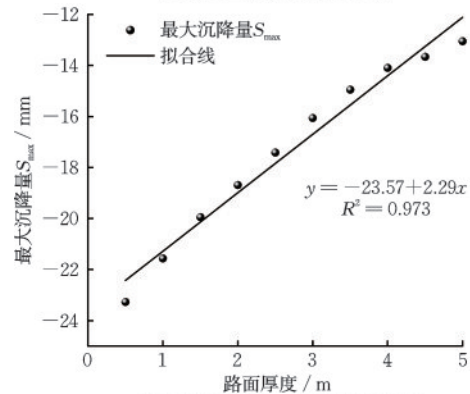
②隧道埋深不变情况下,沉降量随厚度增加逐渐减小,幅度略小于相同土体层厚度变化;最大沉降量*S<sub>max</sub>*及沉降槽宽度系数*i*均随路面厚度增加呈线性正相关关系变化,相关系数分别为0.972、0.999。

### 2.2.2 硬化路面层对地表沉降的影响

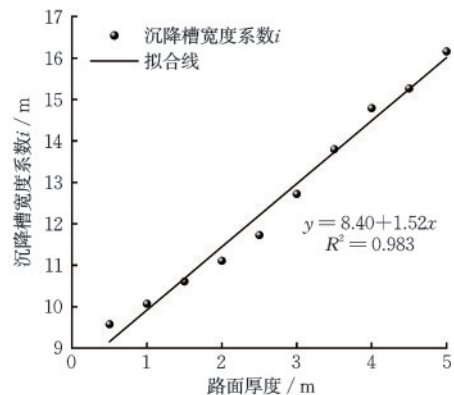
通过改变面层参数取值,达到路面层与土体层



(a) 相同土体层厚度地表沉降



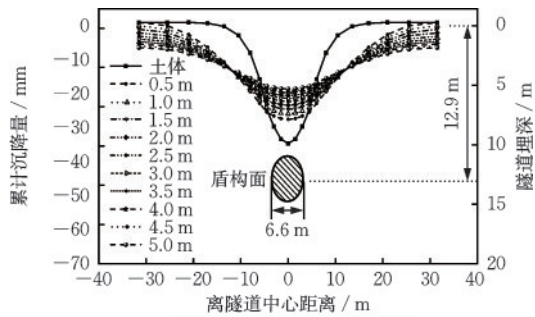
(b) 最大沉降量*S<sub>max</sub>*与路面厚度关系



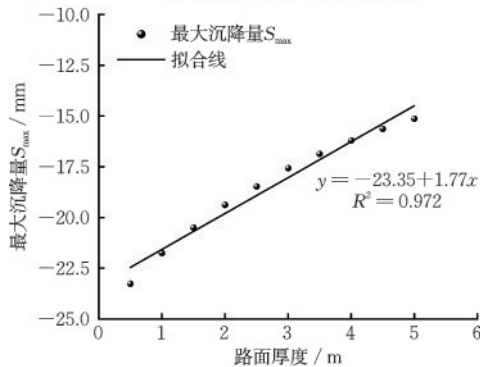
(c) 沉降槽宽度系数*i*与路面厚度关系

图4 相同土体厚度下路面厚度模拟曲线及参数关系

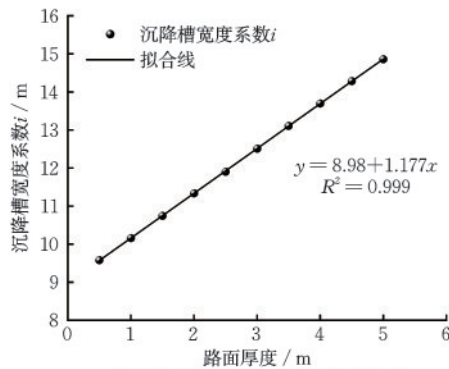
Fig.4 Simulation curves and parameter relationships of pavement thickness under identical soil thickness



(a) 相同隧道埋深地表沉降模拟



(b) 最大沉降量 $S_{max}$ 与路面厚度关系



(c) 沉降槽宽度系数 $i$ 与路面厚度关系

图5 相同隧道深度下路面厚度模拟曲线及参数关系

Fig.5 Simulation curves and parameter relationships of pavement thickness under identical tunnel depth

转换,控制单一变量,模拟得到纯土体及区分路面层与土体层情况下的地面沉降曲线如图5所示,结

果发现:土体状态沉降曲线明显内凹,路面层的存在导致最大沉降值减少,沉降曲线平缓;土体状态转换为路面层厚度为0.5 m时,引起的最大沉降量 $S_{max}$ 从-29.38 mm变为-23.27 mm;沉降槽宽度系数 $i$ 由4.43变为9.58,说明路面层存在对地面沉降的影响明显。

### 2.3 顾及路面厚度的 peck 公式修正表达式求取

根据三维模型数值模拟分析得到不同路面层厚度时地面的沉降数据,进行 peck 公式线性拟合得到各厚度曲线的关键参数 $S_{max}$ 及沉降槽宽度 $i$ 取值,代入式(4)得到不同厚度情况下的计算埋深 $Z_{埋深}$ ;由于路面层厚度的影响,计算埋深 $Z_{计算}$ 与实际埋深 $Z_{实际}$ 存在差异。

首先,根据城市道路实际路面层厚度在80 cm左右,以路面层厚度为0.5 m和1.0 m为例,分2个工况求取路面层和土体层的等效系数 $K_1$ 、 $K_2$ 。工况1:当隧道埋深不变(埋深12.9 m),路面层厚度分别为0.5 m和1.0 m,建立方程组如式(7),可联立求解得 $K_1=2.88$ 、 $K_2=0.98$ ;工况2:当土体层厚度不变(厚度为12.4 m)时,同理可求得 $K_1=2.16$ 、 $K_2=1.01$ 。通过上述计算结果可知,土体层厚度等效参数 $K_2$ 取值接近1,硬化路面层厚度等效系数 $K_1$ 为路面层厚度的2倍以上。

$$\begin{cases} 0.5K_1 + 12.4K_2 = 13.62 \\ 1.0K_1 + 11.9K_2 = 14.57 \end{cases} \quad (7)$$

其次,为确定参数 $K_1$ 、 $K_2$ 参数的最优值,在理论层面上,对不同的路面层厚度(0.5~5 m)的模拟结果进行分析,见表2,对相同土体层厚度及隧道埋深条件下分别对应的10种路面厚度自由组合的方程组,联立计算可得45组 $K_1$ 、 $K_2$ 取值,如图6所示,统计结果可知:

表2 相同隧道埋深拟合关键参数及计算埋深

Table 2 Fitted key parameters and calculated burial depths under identical tunnel burial depth

条件	参数	0.5 m	1.0 m	1.5 m	2.0 m	2.5 m	3.0 m	3.5 m	4.0 m	4.5 m	5.0 m
相同 隧道 埋深	$a$	3.15	3.08	3.02	2.96	2.92	2.87	2.83	2.79	2.75	2.72
	$b$	0.010 9	0.009 7	0.008 7	0.007 8	0.007 1	0.006 4	0.005 8	0.005 3	0.004 9	0.004 5
	$S_{max}/mm$	23.27	21.76	20.5	19.38	18.47	17.57	16.86	16.2	15.64	15.14
	$i$	9.58	10.16	10.75	11.34	11.9	12.51	13.11	13.7	14.29	14.86
	$Z_{计算}/m$	13.62	14.57	15.46	16.36	17.17	18.04	18.8	19.56	20.27	20.94
相同 土体层 厚度	$a$	3.15	3.07	2.99	2.93	2.86	2.78	2.7	2.65	2.62	2.57
	$b$	0.010 9	0.009 9	0.008 9	0.008 1	0.007 3	0.006 2	0.005 3	0.004 6	0.004 2	0.003 8
	$S_{max}/mm$	23.27	21.56	19.95	18.69	17.41	16.06	14.95	14.1	13.68	13.01
	$i$	9.58	10.07	10.61	11.11	11.73	12.72	13.8	14.79	15.43	16.22
	$Z_{计算}/m$	13.62	14.7	15.89	16.96	18.21	19.73	21.21	22.49	23.18	24.36

(1)路面厚度参数 $K_1$ 取值集中于2.35~2.75,其分布符合正态分布曲线,得到位置参数 $\mu$ 及尺度参数 $\sigma$ 分别为2.55,0.2,确定路面厚度参数 $K_1$ 取值为2.55,如图6(a)所示。

(2)土体厚度参数 $K_2$ 取值集中于0.95~1.05,通过正态分布统计确定位置参数 $\mu$ 及尺度参数 $\sigma$ 分别为1.00,0.05,确定路面厚度参数 $K_2$ 取值为1.00,如图6(b)所示。

最后,通过数值模拟结果确定 $Z_{\text{计算}}$ 的表达式见式(8),参数取值结果均符合95%置信区间范围。

$$Z_{\text{计算}} = 2.55H_1 + H_2 \quad (8)$$

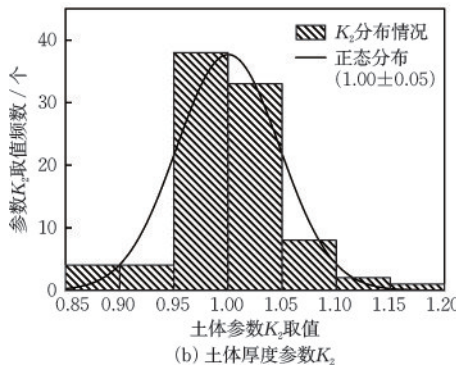
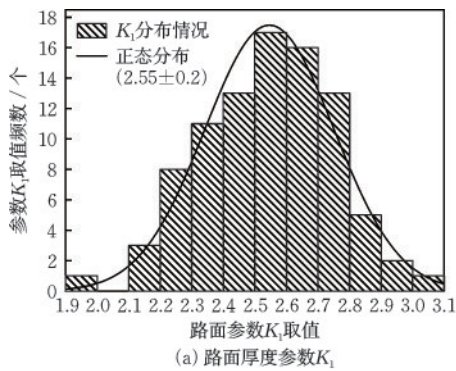


图6 厚度差异预测表达式参数确定

Fig.6 Determination of parameters for thickness difference prediction expression

### 3 实例应用

#### 3.1 苏州莲祖区间隧道施工地表沉降预测

##### 3.1.1 工程概况

苏州轨道交通S1号线工程起于苏州市工业园区,终点位于昆山市花桥经济开发区,线路全长约41.5 km。莲湖公园站—祖冲之路站区间采用盾构法施工,线间距为14~15 m,盾构半径3.3 m,综合区间线路埋深范围约9.5~15.9 m。根据区间地质勘察资料,对江苏地区盾构掘进涉及的主要土层地

层损失率 $\eta$ 给出取值建议范围为0.5%~3.0%<sup>[8,13]</sup>,结合文献及施工方法综合取值,确定苏州地区地层损失率为1.4%,土体内摩擦角 $\varphi$ 为23°。

苏州市住房和城乡建设局发文<sup>[25]</sup>明确规定苏州地区道路设计标准参考现行上海地方标准<sup>[26]</sup>,并结合江苏地方标准<sup>[27]</sup>,根据祖莲区间盾构路线经过城市主干道所处的工作环境条件,采用路面结构层总厚度为0.76 m。

##### 3.1.2 苏州莲祖区间地表沉降预测

苏州轨道交通S1号线莲湖公园站—祖冲之路站区间前进西路盾构隧道埋深为12.9 m,地层损失率 $\eta$ 取值1.4%,土体内摩擦角 $\varphi=23^\circ$ ,可确定该地区经典peck公式预测表达式。修正peck公式对隧道埋深12.9 m详细划分路面层厚度 $H_1$ 为0.76 m,土体层厚度 $H_2$ 为12.14 m,代入顾及路面厚度的修正表达式(8)中得到计算埋深 $Z_{\text{计算}}$ 为14.33 m,代入式(3)计算得到苏州祖莲区间路段的peck公式关键参数取值 $S_{\text{max}}$ , $i$ 分别为22.51 mm、8.49 m,求得顾及路面层厚度的peck公式修正表达式为(9)。

$$S(x) = 22.51 \exp\left(-\frac{x^2}{2} \times 8.49^2\right) \quad (9)$$

将苏州祖莲区间经验公式及顾及路面厚度的peck修正公式与实测监测断面沉降值绘图比较如图7所示,可发现peck修正公式与实测数据更为贴合,实测沉降曲线左右二侧存在不对称现象,考虑由于断面位于桥梁首尾处,断面两侧支护结构及桥梁本身基础影响或路面所受荷载及土方压实情况导致,测量精度及左右线间影响也可造成此现象。利用指标评价见表3:peck修正公式预测较经验公式在断面700+和500+拟合的各项指标均降低,其中平均绝对误差MAE分别降低0.41和1.08,平均绝对百分误差MAPE分别降低5%及19%,均方根误差RMSE分别降低0.67、1.03。综合表明顾及路面厚度的peck修正公式预测拟合结果更佳。

#### 3.2 北京广广区间隧道施工地表沉降预测

##### 3.2.1 工程概况

北京地铁7号线广渠门内站—广渠门外站区间为盾构法施工区间,盾构半径3.3 m,区间线路主要沿城市区现状道路布置,呈东西走向,区间隧道埋深10~19 m;根据隧道洞身主要穿过土层,根据隧道洞身主要穿过土层,参考北京地区相关文献<sup>[17]</sup>确定地层损失率 $\eta$ 和土体内摩擦角 $\varphi$ 取值分别为2%、25°。周边环境如图8所示。

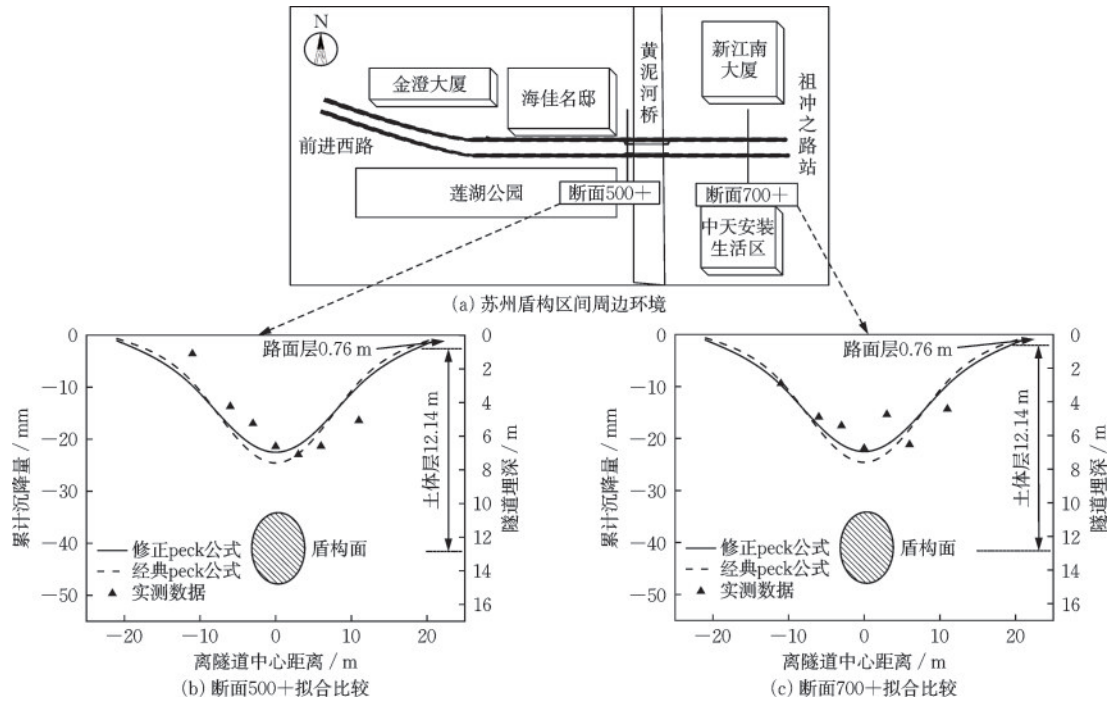


图7 苏州地区莲祖区间路面沉降预测结果比较

Fig.7 Comparison of pavement settlement prediction results in Lianzu section in Suzhou

表3 实例1~3预测精度对比分析

Table 3 Comparative analysis of prediction accuracy for examples 1 to 3

评价指标	实例1:苏州莲祖区间				实例2:北京广广区间				实例3:北京崇磁区间			
	断面700+		断面500+		主测断面2		主测断面1		主测断面1		主测断面2	
	修正 peck	经典 peck	修正 peck	经典 peck	修正 peck	经典 peck	修正 peck	经典 peck	修正 peck	经典 peck	修正 peck	经典 peck
MAE/m	2.94	3.36	3.07	4.14	4.83	6.24	3.5	5.16	3.67	4.77	1.77	2.45
MAPE/%	0.15	0.16	0.15	0.19	0.19	0.22	0.11	0.18	0.44	0.69	0.06	0.13
RMSE/m	3.19	3.86	3.54	4.57	5.48	6.45	4.32	6.16	4.76	5.62	3.10	3.63

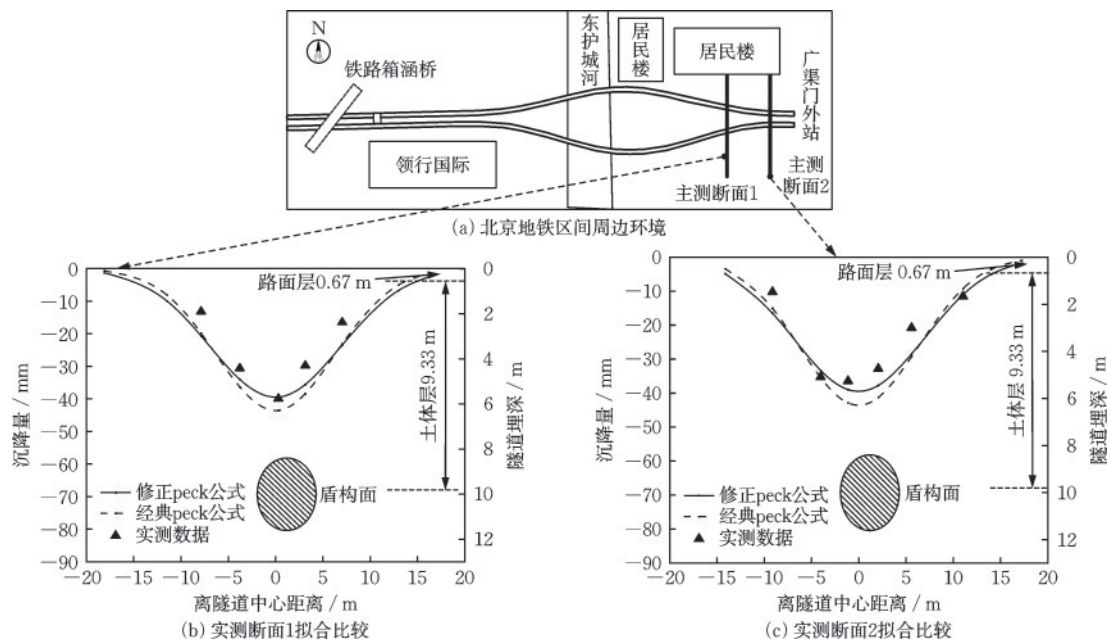


图8 北京地区广广区间路面沉降预测结果比较

Fig.8 Comparison of pavement settlement prediction results in Guangguang section in Beijing

北京市道路设计标准参照北京地方标准及相关修订文件说明<sup>[28]</sup>,依北京区间路基所处工作环境条件确定路面层总厚度为0.67 m。

### 3.2.2 北京广广区间地表沉降预测

根据北京区间路段地层损失率 $\eta$ 及土体内摩擦角 $\varphi$ 取值,确定经典peck公式预测表达式。广广区间修正peck公式顾及北京地区路面层厚度 $H_1$ 为0.67 m,隧道埋深为10 m,则 $H_2$ 取值为9.33 m,得计算埋深 $Z_{\text{计算}}$ 为11.23 m,确定广广区间路面层厚度的peck修正公式预测曲线表达式为式(10)。

$$S(x) = 39.48 \exp\left(-\frac{x^2}{2} \times 6.91^2\right) \quad (10)$$

将北京广广区间经验公式拟合和peck修正公式与实测监测断面比较如图8所示,peck修正公式预测曲线明显贴合实测数据,各项评价指标比较发现在北京地区应用效果明显,广广区间顾及路面厚

度的预测结果较经验公式预测在平均绝对误差MAE分别降低1.41和1.67,平均绝对百分误差MAPE分别降低14%及37%,均方根误差RMSE分别降低0.97及1.84。综合评价结果表明在北京地区广广区间顾及路面厚度的peck修正公式预测结果更准确。

### 3.3 北京崇磁区间隧道施工地表沉降预测

#### 3.3.1 工程概况

北京地铁7号线崇文三里河站—磁器口站区间线路主要沿珠市口东大街道正下方行进,盾构半径3.3 m,区间隧道埋深11~19 m;根据区间隧道洞身主要穿过土层,同样参考北京地区相关文献<sup>[17]</sup>确定地层损失率 $\eta$ 和土体内摩擦角 $\varphi$ 取值分别为2%、25°。周边环境如图9所示,根据区间路基所处工作环境条件确定路面层总厚度为0.67 m。

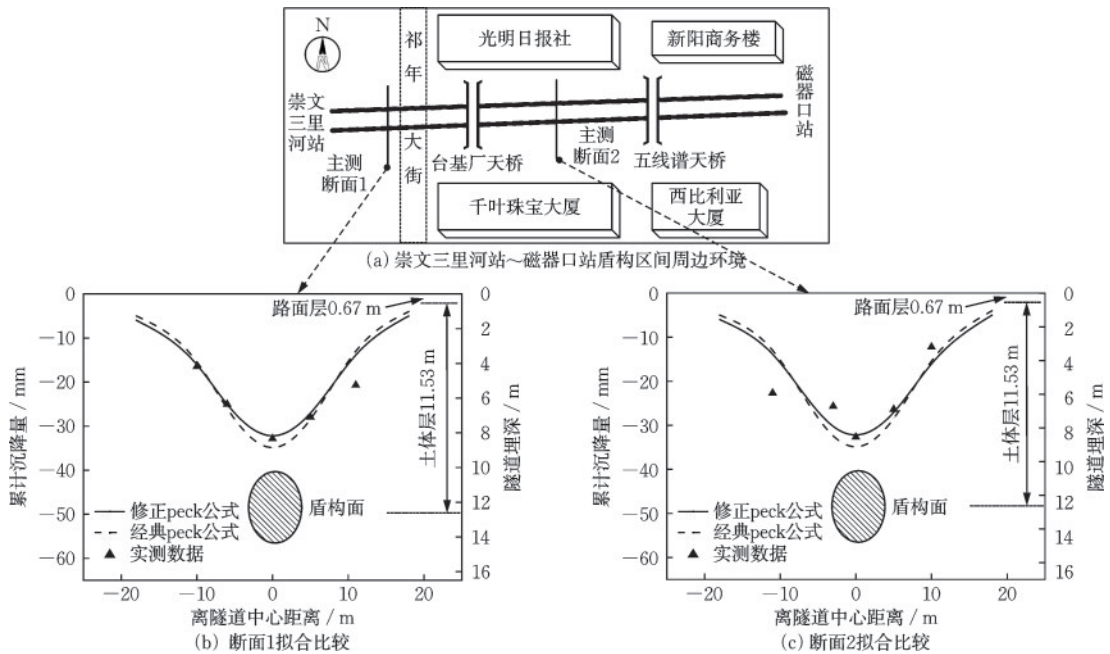


图9 北京地区崇磁区间路面沉降预测结果比较

Fig.9 Comparison of pavement settlement prediction results in Chongci section in Beijing

#### 3.3.2 北京崇磁区间地表沉降预测

根据北京崇磁区间路段地层损失率 $\eta$ 及土体内摩擦角 $\varphi$ 取值,确定经典peck公式预测表达式。崇磁区间修正peck公式顾及北京地区路面层厚度 $H_1$ 为0.67 m,隧道埋深为12.5 m,则 $H_2$ 取值为11.83 m,得计算埋深 $Z_{\text{计算}}$ 为13.54 m,确定崇磁区间路面层厚度的peck修正公式预测曲线表达式为:

$$S(x) = 32.19 \exp\left(-\frac{x^2}{2} \times 8.48^2\right) \quad (11)$$

北京崇磁区间经验公式拟合和peck修正公式与实测监测断面比较如图9发现,各项评价指标比较在北京崇磁区间应用效果显著,顾及路面厚度的peck公式修正预测得到的平均绝对误差MAE分别降低1.1和0.69,平均绝对百分误差MAPE分别降低36%及50%,均方根误差RMSE分别降低0.86及0.53,综合评价结果表明在北京崇磁区间顾及路面厚度的peck修正公式预测结果更准确。

## 4 结 论

(1) 针对路面层与土体层力学性质差异,通过数理推演方法明确传统 peck 公式预测关键参数  $S_{\max}$  及沉降槽宽度系数  $i$  与隧道埋深  $Z$  取值关系,对路面厚度  $H_1$  及土体厚度  $H_2$  引入参数  $K_1$ 、 $K_2$ ,提出了等价埋深  $Z_{\text{计算}}$  的函数关系。

(2) 通过构建涵盖路面层与土体层三维数值模型模拟,分析不同硬化路面层厚度对地铁盾构施工的地面沉降规律,模拟结果发现:路面层存在对地面沉降影响明显;相同土体层厚度和相同隧道埋深情况下,地面沉降槽宽度系数  $i$  及最大沉降量  $S_{\max}$  均随路面层厚度增加呈线性正相关,相关系数达 0.97 及以上;通过模拟结果分析并确定等价埋深表达式  $Z_{\text{计算}} = 2.55H_1 + H_2$ ,取值结果均符合 95% 置信区间范围,实现顾及路面厚度的 peck 公式修正。

(3) 顾及路面厚度的 peck 公式修正表达式对不同地区的地层损失率及土体内摩擦角取值差异区分,实现应用于苏州、北京地区不同土体层及路面层厚度下的实际案例,通过精度评定可知,顾及路面厚度 peck 修正公式曲线与实测数据更为贴合;两地区预测结果评价指标均降低,苏州地区平均绝对百分误差 MAPE 降低 5% 和 19%,北京两区间平均绝对误差 MAE 分别降低 1.41 及 0.69 以上,均方根误差 RMSE 分别降低 0.97 及 0.53 以上。实现不同地区 peck 公式修正目的,与实测数据比较所得评价指标均变优,证明了顾及路面层厚度的 peck 公式修正预测方法的准确性与多地区适用性。

考虑路面层研究尚未涉及路基加固层的详细模拟,后续研究加固层物理力学性质,可更准确地预测不同条件下的路面响应,提高路面设计的科学性和准确性。

### 参考文献:

[1] 江帅,朱勇,栗青,等. 隧道开挖地表沉降动态预测及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 195-204.  
Jiang S, Zhu Y, Li Q, et al. Dynamic prediction and influence factors analysis of ground surface settlement during tunnel excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(1): 195-204. (in Chinese)

[2] Gong C J, Xie C R, Lin Z Q, et al. Ground deformation prediction induced by shield tunnelling considering

existing multi-story buildings [J]. Journal of Central South University, 2023, 30(4): 1373-1387.

- [3] 韩焯,李宁,J.R.Standing. Peck公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 23-28,35.  
Han X, Li N, Standing J R. An adaptability study of Gaussian equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 23-28,35. (in Chinese)
- [4] 吴锋波,郑卫强,齐剑峰,等. 地铁双线盾构区间地表横向沉降槽参数分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(5): 1653-1663.  
Wu F B, Zheng W Q, Qi J F, et al. The ground transverse settlement tank parameters analysis of subway double line shield section[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(5): 1653-1663. (in Chinese)
- [5] 李琳,崔惟超,董光辉,等. 盾构施工引起周围土体位移的数值研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(5): 755-763.  
Li L, Cui W C, Dong G H, et al. Numerical study on ground displacement induced by shield tunneling [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(5): 755-763. (in Chinese)
- [6] 张红军,张太平,王奎峰,等. 上覆富水砂层地铁隧道掌子面变形特征数值试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(6): 1454-1462.  
Zhang H J, Zhang T P, Wang K F, et al. Numerical experimental study on deformation characteristics of metro tunnel excavation surface with overlying water-rich sand layer [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1454-1462. (in Chinese)
- [7] 谭文辉,于江,孙宏宝,等. 地铁7号线车站地表施工沉降的 Peck 公式修正[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增1): 200-204.  
Tan W H, Yu J, Sun H B, et al. Modified peck formula for daguanying station tunneling of subway line No.7 in Beijing [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(Sup 1): 200-204. (in Chinese)
- [8] 陈亦轩,李筱艳,陈松. 基于 Peck 公式的隧道盾构施工引起的地表沉降预测研究[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(2): 79-83,91.  
Chen Y X, Li X Y, Chen S. Prediction of surface settlement caused by shield construction in tunnel based on peck formula [J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(2): 79-83,91. (in Chinese)

- [9] 李娟,王思瑶,张标,等.双孔隧道的地表沉降预测及其可靠度分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(增1):428-435.  
Li X, Wang S Y, Zhang B, et al. Ground surface settlement prediction and reliability analysis of twin tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(Sup 1): 428-435. (in Chinese)
- [10] 于德海,张涛,姜谔男.复杂条件下地铁盾构施工过程的影响因素分析[J].铁道工程学报,2015,32(5):86-91.  
Yu D H, Zhang T, Jiang A N. Analysis of influencing factors of metro shield construction under complicated conditions[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(5): 86-91. (in Chinese)
- [11] 孙捷城,王国富,路林海,等.厚冲积地层盾构掘进参数设定及地表变形规律研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(3):487-497.  
Sun J C, Wang G F, Lu L H, et al. Study on parameters setting of EPB shield driving and laws of surface deformation in thick alluvial clay [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(3): 487-497. (in Chinese)
- [12] 张超,徐智文,刘飞香,等.考虑地层三维空间分布的盾构掘进模拟[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(1):144-151.  
Zhang C, Xu Z W, Liu F X, et al. Numerical simulation of shield tunneling incorporating 3D spatial distribution of strata[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(1): 144-151. (in Chinese)
- [13] 张运强,曹文贵,周苏华,等.基于Peck公式的盾构隧道施工引起的地层三维沉降预测[J].铁道科学与工程学报,2021,18(1):153-161.  
Zhang Y Q, Cao W G, Zhou S H, et al. Prediction of three-dimensional subsurface and subsurface settlement caused by shield tunnelling based on Peck formula [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(1): 153-161. (in Chinese)
- [14] 宋战平,李世豪,张学钢,等.基于修正Peck法的隧道施工全地层变形规律研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2018,50(2):190-195.  
Song Z P, Li S H, Zhang X G, et al. Study on strata settlement regular pattern induced by tunnel construction based on Peck formula [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2018, 50(2): 190-195. (in Chinese)
- [15] 李炜明,李正明,任虹,等.地铁盾构施工土体变形与临近结构失效机理研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(3):472-479.  
Li W M, Li Z M, Ren H, et al. Soil settlements and surrounding structure failure mechanism due to shield tunneling in metro construction [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(3): 472-479. (in Chinese)
- [16] 宋伟涛,张佩,杜修力.含石量对砂卵石地层隧道开挖地表沉降影响研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(增1):359-366,374.  
Song W T, Zhang P, Du X L. Research on the influence of stone content on surface settlement caused by tunnel excavation in sandy cobble stratum [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(Sup 1): 359-366,374. (in Chinese)
- [17] 伍毅敏,刘延安,王恒,等.北京市隧道下穿施工引起城市路面沉降的影响规律回归分析[J].交通运输工程学报,2022,22(2):176-186.  
Wu Y M, Liu Y A, Wang H, et al. Regression analysis of influence law of urban pavement settlement caused by underpass tunnel construction in Beijing [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(2): 176-186. (in Chinese)
- [18] 高洪吉,谢文达,孙正阳,等.浅覆土盾构隧道施工引起地表沉降规律研究[J].科学技术与工程,2020,20(29):12143-12149.  
Gao H J, Xie W D, Sun Z Y, et al. Analysis on surface subsidence by shallow buried shield tunneling [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(29): 12143-12149. (in Chinese)
- [19] 李宏波,于广云,柏永生.采动区设缝沥青路面结构力学性能研究[J].土木工程学报,2008,41(4):100-105.  
Li H B, Yu G Y, Bai Y S. A study on the mechanical property of asphalt pavement with deformation joints in subsidence area [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(4): 100-105. (in Chinese)
- [20] 张宇宁.大直径盾构隧道施工对城市主干道路面沉降影响分析[J].铁道勘察,2020,46(1):73-78.  
Zhang Y N. Analysis of the influence of large diameter shield tunneling on pavement settlement of major urban roadways [J]. Railway Investigation and Surveying, 2020, 46(1): 73-78. (in Chinese)
- [21] 朱正国,黄松,朱永全.铁路隧道下穿公路引起的路面沉降规律和控制基准研究[J].岩土力学,2012,33(2):558-563,576.  
Zhu Z G, Huang S, Zhu Y Q. Study of road surface settlement rule and controlled criterion for railway tunnel undercrossing highway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 558-563,576. (in Chinese)

- [22] 公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S]. 北京:人民交通出版社,2017.
- [23] 张嘉. 基于数值模拟的沥青路面内部裂缝的扩展规律研究[D]. 北京:北京工业大学,2023.  
Zhang J. Research on crack propagation inside asphalt pavement based on numerical simulation [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [24] 邓声君,何杨,陈浩林,等. 复杂环境软土地层盾构隧道推进实时动态仿真及变形预测研究——以苏州地铁S1号线盾构区间为例[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(12): 2024-2035.  
Deng S J, He Y, Chen H L, et al. Real-time dynamic simulation and deformation prediction of shield tunneling through soft soil layer in complex environment: a case study of Suzhou metro line S1 shield section [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(12): 2024-2035. (in Chinese)
- [25] 苏州市城市道路精细化建设导则(苏住建城[2023]7号)[EB/OL]. 2023-4-18. <https://www.suzhou.gov.cn/szsrnzf/bmwj/202304/a9a224cc60184efaacf5713520932d8.shtml>.
- [26] 路面设计标准:DG/TJ08-2131—2022[S]. 上海:同济大学出版社.
- [27] 高速公路沥青路面施工技术规范:DB32T 1087—2022[S]. 北京:中国标准出版社.
- [28] 城市道路工程施工技术规程:DB11/T 1834—2021[S]. 北京:中国建筑工业出版社.
- (本文编辑:周小潭)



(上接第 753 页)

- [20] 吕康玄,刘章军. 随机波浪力连续场的降维模拟[J]. 水利水运工程学报, 2020, (5): 9-15.  
Lyu K X, Liu Z J. Dimension-reduction simulation for continuous random wave force field [J]. Hydro-Science and Engineering, 2020, (5): 9-15. (in Chinese)
- [21] Fatigue design of offshore steel structures: DNV-RP-C203[S]. Høvik: Det Norske Veritas As, 2012.
- [22] 孟繁星. 风浪联合作用下的海上风机支撑结构时域疲劳分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.  
Meng F X. Fatigue performance of offshore wind turbine support structure under wave and wind loads in time domain [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017. (in Chinese)
- [23] 蔡新,常鹏举,郭兴文,等. 基于Ansys与nCode联合仿真的风力机叶片疲劳分析[J]. 可再生能源, 2021, 39(10): 1342-1346.  
Cai X, Chang P J, Guo X W, et al. Fatigue analysis of wind turbine blade based on Ansys and nCode co-simulation [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(10): 1342-1346. (in Chinese)