

文章编号:1673-2049(2019)04-0112-08

基于DEM的双线隧道地表沉降规律

芮 瑞¹, 王 磊¹, 涂树杰¹, 王康宇²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要:为研究隧道开挖引起的地表沉降规律,运用PFC2D软件模拟Trapdoor试验,通过沉陷门下沉对双线隧道开挖引起的地表沉降规律及影响因素进行了系统研究。基于休止角试验和单Trapdoor模型试验得到数值模型的计算参数,通过开展单Trapdoor数值试验获取地表沉降曲线,拟合得到单线隧道开挖引起的地面沉降Peck公式参数。开展同时开挖的双Trapdoor数值试验,利用单Trapdoor参数叠加得到双线隧道开挖引起的地表沉降预测公式,并与简单叠加公式的拟合结果进行对比。最后进行先后开挖的双Trapdoor数值试验,揭示了隧道间距、埋深和双线隧道开挖顺序对地表沉降的影响规律。结果表明:随着隧道埋深的增加和隧道间距的减小,地表沉降曲线由“W”形态向“V”形态过渡;先后开挖工况下双线隧道引起的地表沉降曲线呈非对称分布,地表沉降量最大值出现在先行隧道一侧,且随着隧道埋深的增加,地表沉降曲线两侧最大值的差异有增加趋势;Peck公式拟合结果与离散单元法(DEM)数值模型和模型试验结果吻合较好,可用于双线隧道开挖引起的地表沉降预测,具有重要的理论指导和工程意义。

关键词:双线隧道;地表沉降;DEM;Trapdoor试验;Peck公式

中图分类号:TU478 **文献标志码:**A

Surface Settlement Law of Double-line Tunnel Based on DEM

RUI Rui¹, WANG Lei¹, TU Shu-jie¹, WANG Kang-yu²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: In order to study the law of surface settlement caused by tunnel excavation, the Trapdoor test was simulated using PFC2D software, and the surface settlement law and its influencing factors caused by double-line tunnel excavation were systematically studied by subsidence door sinking. The calculating parameters of numerical model were gotten based on repose angle test and single Trapdoor model test. The surface settlement curve was obtained by carrying out single Trapdoor numerical test, and Peck formula parameters of surface settlement caused by single-line tunnel excavation were fitted. The double Trapdoor numerical experiment of simultaneous excavation was carried out. The prediction formula of surface settlement caused by double-line tunnel excavation was obtained by superposition of single Trapdoor parameters, and the fitting results were compared with those of simple superposition formula. Finally, the double Trapdoor numerical experiments of excavation were carried out, and the influences of tunnel

收稿日期:2018-07-09

基金项目:武汉市城建委科技计划项目(201639);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017-zy-053);

武汉理工大学自主创新研究基金本科生项目(2017-TJ-B1-12)

作者简介:芮 瑞(1981-),男,安徽黄山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:r. rui@whut. edu. cn。

通信作者:王康宇(1988-),男,河南永城人,副教授,工学博士,E-mail:kangyu02@163. com。

spacing, depth and excavation sequence of double-line tunnels on surface settlement were revealed. The results show that with the increase of tunnel depth and the decrease of tunnel spacing, the surface settlement curve transits from “W” shape to “V” shape. The surface settlement curves caused by double-line tunnels under excavation conditions are asymmetrical, and the maximum surface settlement occurs on the side of the first tunnel. With the increase of tunnel burial depth, the difference of maximum value between two sides of surface settlement curve tends to increase. The fitting results of Peck formula are in good agreement with DEM numerical model and model test results. It can be used to predict surface settlement caused by double-track tunnel excavation, and has important theoretical guidance and engineering significance.

Key words: double-line tunnel; surface settlement; DEM; Trapdoor test; Peck formula

0 引言

近年来中国城市建设正在快速推进,为了缓解城市空间日趋紧张的压力,地下空间开发特别是地铁建设如火如荼,城市地铁隧道和周边环境的相互作用及安全影响评价成为了城市建设中亟待深入研究的重要课题。地铁隧道的施工将不可避免引起地层应力的变化,使原有地层土体出现较大的变形,严重的可能引起塌方,并且这种影响在双线隧道的建设中更为明显,因此,双线隧道开挖引起的地层位移规律尤其是地表沉降是国内外学者一直关注的热点问题^[1-2]。

地表沉降是地下隧道开挖引起围岩或土体松动的宏观表现,准确获得地铁隧道开挖引起的地表沉降是隧道设计与施工过程中的技术难题^[3]。基于Peck公式的经验方法和叠加方法^[4-8],由于含义明确、涉及参数少、计算简便等优势,得到了较为广泛的应用。然而,Peck公式是基于某一地区工程实践的经验公式,由于各地区地层差异,地表沉降的实测值与Peck公式的预测值相差较大,解析方法存在一定的使用条件,基于工程实际的归纳分析显得更为重要。鉴于此,国内外学者针对不同区域的地铁隧道施工沉降数据进行回归分析,进而对Peck沉降预测公式进行了不同程度的修正^[9-13]。Trapdoor(陷阱门)试验^[14-17]解释了土体与邻近刚性边界之间的应力传递现象,在隧道工程中得到了应用^[18-20],为明确隧道开挖引起的地表沉降规律研究提供了有效的方法。数值分析方法作为复杂岩土工程问题研究的高效手段,常被用于隧道施工对地面或既有建筑物影响问题的研究中^[21-23],但由于数值模拟的结果很大程度上取决于材料本构关系的选取、材料参数和边界条件等的确定,在应用时需对数值分析方法进

行合理的验证。

双线隧道开挖引起的地层变形相对于单线隧道更为复杂,沉降预测更为困难,由于双线隧道的相互影响,简单的叠加计算并不能准确地预测地表沉降的变形规律。浅埋隧道的开挖将在隧道周围形成扰动区,且双线隧道的开挖往往具有一定的时间间隔,若后施工的隧道开挖处于先施工隧道开挖的影响范围内,将导致较大的叠加地表沉降。针对双线隧道开挖引起的地层变形机理及规律已有相关的研究成果,但双线隧道开挖顺序及其他影响因素对地表沉降曲线分布形态的研究相对较少。本文在已有研究的基础上,采用PFC2D软件建立Trapdoor试验的离散单元方法(DEM)模型,并基于模型试验结果对数值模型的准确性进行了验证。结合Peck公式及其叠加方法,通过分析地表沉降曲线的分布特点,揭示双线隧道开挖顺序及隧道埋深等因素影响下的地表沉降规律。

1 现有计算方法

1.1 单线Peck公式

Peck^[4]基于大量工程实测结果,认为地表沉降由地层损失引起,且地层损失沿隧道长度均匀分布,假定土体不排水,沉降槽体积等于土体损失体积,提出地表沉降槽呈正态分布,则单线隧道开挖引起的地表沉降预测方法为^[24]

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) = \frac{V_1}{i\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

式中: S 为地面任一点的沉降量; S_{\max} 为隧道轴线上地表最大沉降量; i 为沉降曲线对称中心到曲线拐点的距离,一般称为沉降槽宽度; x 为从对称中心到计算点的水平距离; V_1 为单位长度上地层的损失率。

1.2 双线 Peck 叠加公式

对于距离较近的 2 条平行隧道,开挖顺序不同,双线隧道往往相互影响,且随着隧道间距的增大,其相互影响逐渐减小,直至忽略不计。基于叠加原理,双线隧道开挖引起的地表沉降计算方法为^[19]

$$S(x)=S_{1\max}\exp\left[-\frac{(x-D/2)^2}{2i_1^2}\right]+S_{2\max}\exp\left[-\frac{(x+D/2)^2}{2i_2^2}\right] \tag{2}$$

式中: D 为双线隧道中轴线的距离; $S_{1\max}$, $S_{2\max}$ 分别为 2 条隧道单独开挖引起的最大沉降量; i_1 , i_2 分别为 2 条隧道单独开挖引起的沉降槽宽度。

2 数值建模及参数选取

2.1 模型试验概述

图 1 为设计制作的多沉陷门模型试验装置,填料箱尺寸为 1 200 mm×300 mm×800 mm。填料箱下部由 16 块钢质活动板(板宽 75 mm)组成,每块钢制挡板均可以通过与下方位移控制系统相连接,独立成为一个活动 Trapdoor,或者固定在试验箱外框上,可以精确地控制 Trapdoor 下沉量。采用图像采集与粒子图像测速(PIV)技术获取颗粒全场位移。试验仪器详细情况见文献[25]。

试验采用退火 201 号椭圆形棒材,其洁净干燥表面的摩擦因数约为 0.78,与石英砂的表面摩擦因数较为接近。分别制作了 3 种不同尺寸椭圆形钢棒:3 mm×6 mm,4 mm×8 mm,5 mm×10 mm。每 25 mm 填土高度按大、中、小 3 种钢棒各 594,334,214 根混合均匀,使得 3 种钢棒质量比大约等于 1:1:1。

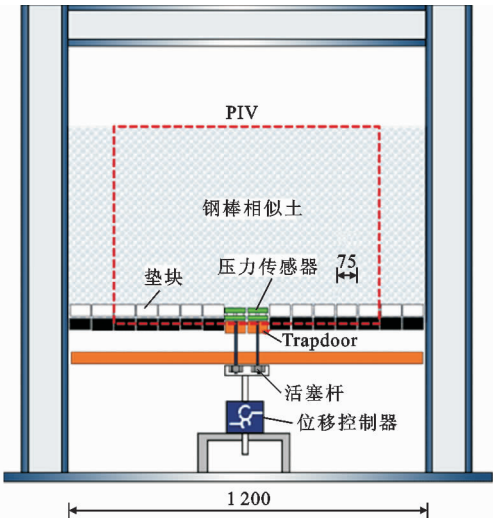


图 1 模型试验装置(单位:mm)

Fig. 1 Model Test Apparatus (Unit:mm)

2.2 模型建立及 DEM 参数选取

颗粒离散元是离散单元法的一种,将圆形颗粒体视为离散单元,颗粒单元的运动遵循牛顿第二定律,通过接触处力与位移的本构关系表征颗粒单元之间的相互作用。在交替应用运动定律和力-位移本构关系的过程中,不断更新颗粒体的受力与位置。PFC 软件基于颗粒离散元理论,以圆形颗粒作为基本模型,同时应用墙体限制颗粒体的运动。本文基于 PFC2D 软件建立 Trapdoor 模型的离散元数值分析模型,重点研究隧道开挖引起的地表沉降规律。

基于 Trapdoor 模型试验尺寸,建立隧道开挖引起地表沉降的离散元数值分析模型。为了准确模拟隧道开挖引起的地表沉降规律,数值分析步骤与 Trapdoor 模型试验完全一致。Trapdoor 模型槽、隧道、活动板采用墙体单元模拟,通过墙体的移动来模拟隧道开挖。以单 Trapdoor 装置为例(图 2),单 Trapdoor 装置由 7 面墙体组成,其中编号 1,2,4,5,6,7 的墙体固定不动,编号 3 的墙体可以下移,使得墙体内部的颗粒簇产生变形,进而引起地表沉降。

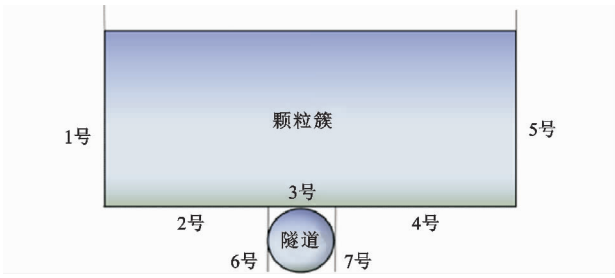


图 2 单 Trapdoor 试验的 DEM 模型

Fig. 2 DEM Model for Single Trapdoor Test

在墙体之内随机生成颗粒,用以模拟 Trapdoor 模型试验的钢棒相似土填料。颗粒采用椭圆形颗粒簇,基于模型试验中钢棒相似土填料的规格,DEM 模型中采用 3 种不同尺寸的颗粒:3 mm×6 mm,4 mm×8 mm,5 mm×10 mm,如图 3 所示。3 种颗粒均匀分布,每种颗粒的总质量近似相等,则其颗粒数目的比例为 594:334:241。

颗粒摩擦因数 μ 取值通过休止角试验确定,当 $\mu=0.54$ 时,休止角平均值为 27.9°,与模型试验中钢棒材料的休止角(28.2°)较为接近。DEM 数值试验的主要材料参数见表 1。

2.3 DEM 模型验证

采用单 Trapdoor 试验对 DEM 模型进行验证,共安排 3 组试验(试验 S1,S2,S3),填料高 h 分别为 150,300,450 mm。将 Trapdoor 顶面看作与圆形隧道的拱顶相切,隧道埋深 $H=h+R/2$ (R 为 Trap-

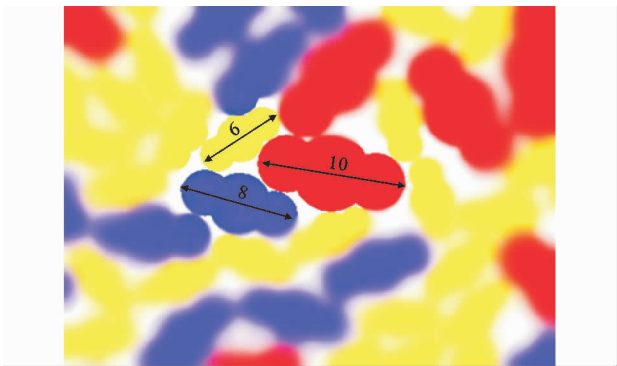


图 3 颗粒尺寸(单位:mm)
Fig. 3 Particles Size (Unit:mm)
表 1 DEM 模型主要材料参数
Tab. 1 Main Material Parameters of DEM Model

颗粒及墙体参数	参数值
颗粒法向接触刚度 $k_n/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	2.06×10^{11}
颗粒切向接触刚度 $k_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	5.15×10^{10}
颗粒间摩擦因数	0.40
墙体法向接触刚度 $k_n/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.00×10^{20}
墙体切向接触刚度 $k_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.00×10^{20}
墙体摩擦因数	0.54

door 宽度,取 $R=150\text{ mm}$),则 H 分别为 225,375,525 mm,Trapdoor 宽度取为 150 mm。

实际工程中,盾构法开挖引起的地层损失率一般不超过 1%^[26]。如将 Trapdoor 宽度当作圆形隧道直径,据此假设估算 Trapdoor 下移量约为 1.2 mm。各试验下移量 $\Delta=1\text{ mm}$ 时模型试验和数值试验结果对比如 4 所示,图中实线为基于公式(1)对 Trapdoor 模型试验的拟合结果。对比结果表明:同一工况条件下,单 Trapdoor 数值试验和模型试验的地表沉降曲线较为接近,验证了数值模型选用参数的合理性及数值结果的可靠性。Peck 公式对单 Trapdoor 模型试验地表沉降值的拟合结果较为理想,拟合结果的总体误差较小,表面沉降符合正态分布规律,可认为拟合公式与实际地表沉降形式相符。

2.4 单 Trapdoor 试验的 Peck 公式参数拟合

选取单 Trapdoor 试验中下移量 $\Delta=1\text{ mm}$ 时的表面沉降数据进行拟合分析,计算沉降槽宽度,并由式(3)确定实际的地层损失率 V_1 ,即

$$V_1=\frac{S_{\max}\sqrt{2\pi}i}{A}$$

(3)

式中: A 为盾构法开挖面积。

3 组试验的 Peck 公式参数见表 2,其中 r^2 为修正的判定系数,反映 Peck 公式对样本的拟合程度。

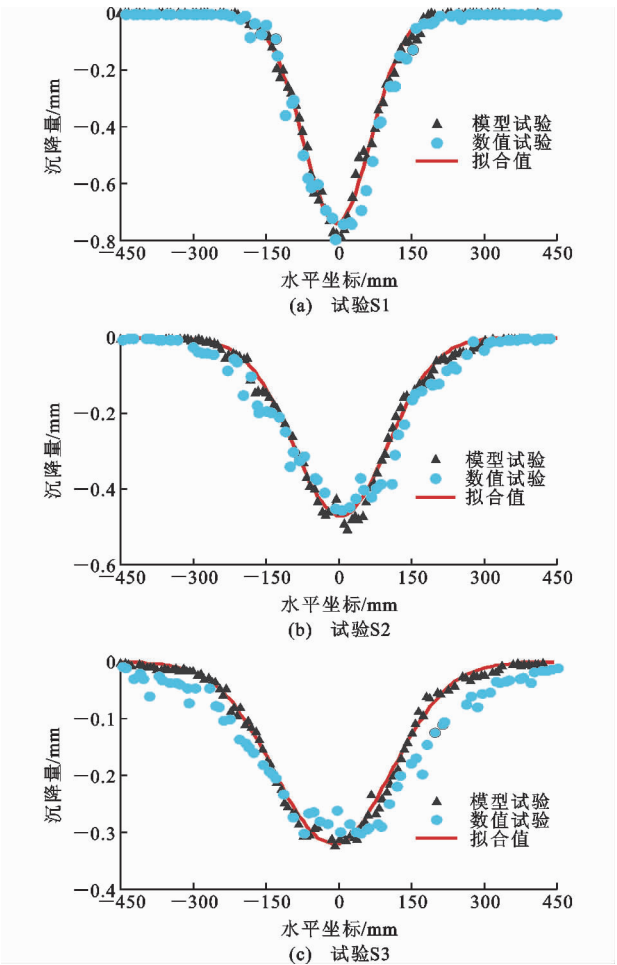


图 4 单 Trapdoor 试验沉降曲线实测值、模拟值和拟合值
Fig. 4 Measured,Simulation and Fitting Surface Settlement Curves of Single Trapdoor Tests

表 2 单 Trapdoor 试验拟合参数

拟合参数		H/mm	S_{\max}/mm	i/mm	$V_1/\%$	r^2
S1	模型	225	0.74	69.6	0.73	0.993
	数值	225	0.77	73.7	0.80	0.988
S2	模型	375	0.47	97.7	0.65	0.991
	数值	375	0.44	118.9	0.74	0.981
S3	模型	525	0.32	119.7	0.54	0.992
	数值	525	0.30	156.6	0.67	0.984

3 双 Trapdoor 数值试验分析

3.1 双 Trapdoor 数值试验

选择隧道埋深 H 、隧道间距 D 以及不同开挖工况作为影响参数,进行双 Trapdoor 试验,见表 3。DEM 计算值、预测值、拟合值见图 5。

3.2 同时开挖工况下地表沉降计算结果分析

同时开挖工况下地表沉降曲线呈对称分布,可由式(2)计算得到。将表 1 中单 Trapdoor 参数代入

表 3 双 Trapdoor 试验方案

Tab. 3 Scheme of Double Trapdoor Tests

试验编号	开挖工况	H/mm	D/mm	R/mm
D1	同时开挖	225	225	150
D2		375	225	150
D3		525	225	150
D4		225	300	150
D5		375	300	150
D6		525	300	150
XH1	先后开挖	225	225	150
XH2		375	225	150
XH3		525	225	150
XH4		225	300	150
XH5		375	300	150
XH6		525	300	150

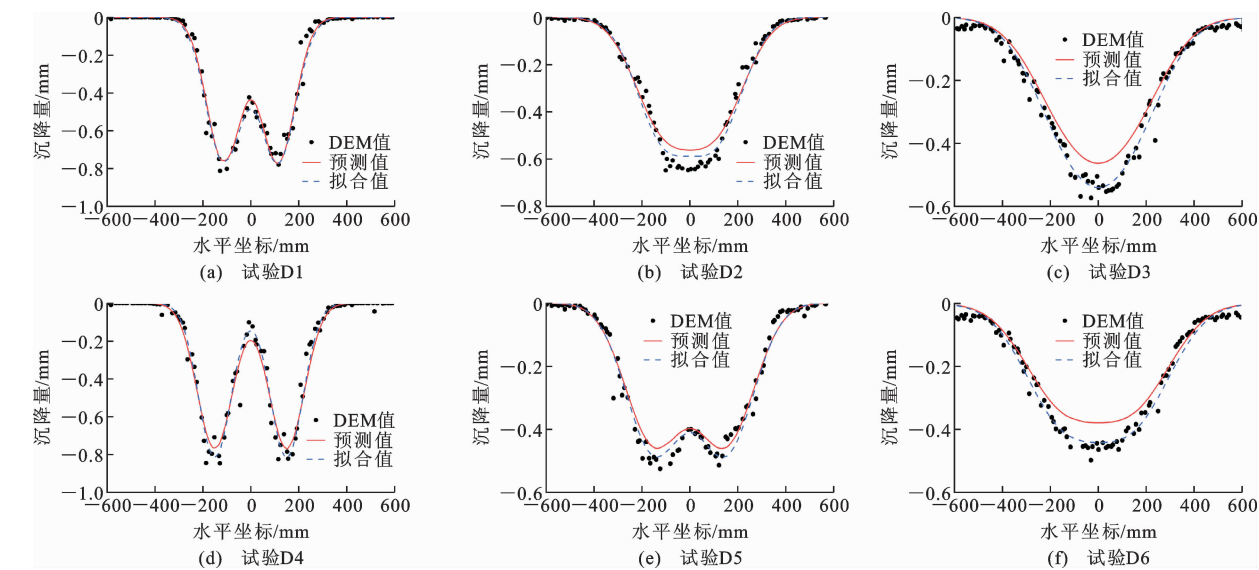


图 5 同时开挖双 Trapdoor 试验地表沉降 DEM 计算值、拟合值与预测值

Fig. 5 DEM Calculated, Fitting and Predicted Surface Settlement of Simultaneous Excavation Double Trapdoor Tests

下,由于相互影响而形成一个面积更大的压力拱,且随着隧道间距的减小和埋深的增大,地表沉降曲线由“W”形向“V”形过渡。这主要是因为:双线隧道的间距越小,其相互扰动作用就越强,在共同扰动区沉降变形加剧,使得地表沉降曲线呈现“V”形;随着隧道间距的增大,施工相互扰动影响程度减弱,可以认为是 2 条单线隧道沉降变形的叠加,进而使得地表沉降曲线呈现“W”形。由此可以预测,当双线隧道的间距足够大时,可以认为是 2 个单独的隧道开挖,将不会形成一个整体稳定的压力拱。

3.3 先后开挖工况下地表沉降计算结果分析

隧道同时开挖与先后开挖工况下所引起地表沉降规律如图 6 所示,其中同时开挖引起地表沉降拟合曲线由公式(2)拟合得到,先后开挖工况下的

叠加式(2)中,得地表沉降预测值,用叠加式(2)与实测值进行曲线拟合得地表沉降拟合值(图 5)。

由图 5 可知:地表沉降的预测曲线和拟合曲线形态一致。随着隧道埋深的增加和隧道间距的减小,双线隧道引起地表沉降范围扩大,地表沉降曲线外移,且逐渐由“W”形态向“V”形态转化。随着隧道间距的增大,双线隧道在地表叠加的区域减小,形成的“W”形沉降曲线特征更加明显。试验 D1 和 D4 中地表沉降的预测曲线和拟合曲线差异较小,试验 D2,D3,D5 和 D6 中地表沉降的预测曲线和拟合曲线差异较大。基于图 5 的数据结果,可以推测 Peck 公式预测地表沉降的规律:单线隧道开挖后形成了稳定压力拱,使得沉降曲线满足高斯曲线;双线隧道开挖后在各单线隧道形成稳定压力拱的条件

拟合曲线由公式(3)拟合得到,拟合参数见表 4。

由图 6 可知:在先后开挖工况下双线隧道引起地表沉降曲线呈非对称分布,地表沉降最大值出现在先行隧道一侧。这表明后行隧道的施工使得隧道周围地层应力进一步释放,进而使得地表沉降及扰动范围增大。随着隧道埋深的增大,地表沉降曲线由“W”形向“V”形过渡。引起该现象的原因为:当隧道埋深较浅时,先行和后行隧道施工各形成沉降槽,在地表沉降变形相互叠加后,即表现为“W”形分布;当隧道埋深较深时,由于土拱作用的发挥,地层沉降变形减小,而地表沉降变形叠加效应相应减弱,即呈“V”形分布。在隧道埋深较浅时先后开挖工况和同时开挖工况引起地表沉降曲线较为接近。在隧道埋深较大时,先后开挖工况下先行隧道

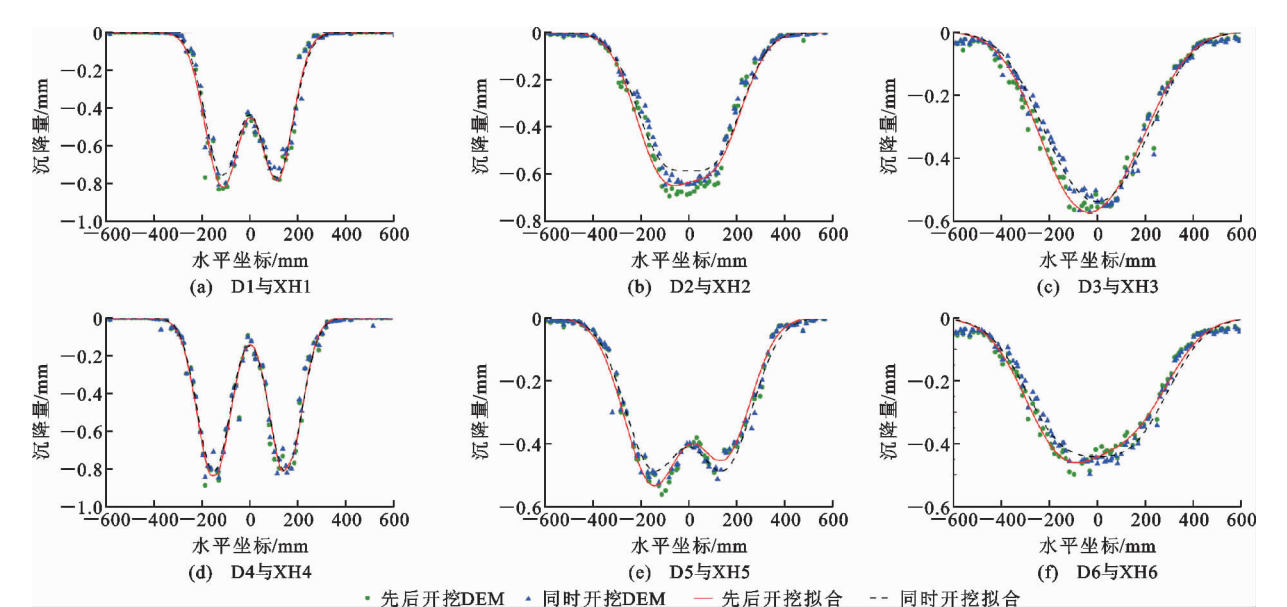


图 6 不同开挖工况下的地表沉降对比

Fig. 6 Comparison of Surface Settlement Under Different Excavation Conditions

表 4 双 Trapdoor 试验拟合参数

试验 编号	i_1/mm	i_2/mm	$S_{1\max}/\text{mm}$	$S_{2\max}/\text{mm}$	$\frac{S_{1\max}-S_{2\max}}{(S_{1\max}+S_{2\max})/2}\times 100\%$
D1	70.6	70.6	0.77	0.77	
XH1	72.8	68.5	0.82	0.79	3.7
D2	111.3	111.3	0.49	0.49	
XH2	111.3	111.3	0.56	0.50	11.3
D3	156.6	156.6	0.35	0.35	
XH3	156.7	156.7	0.42	0.31	30.1
D4	67.8	67.8	0.82	0.82	
XH4	68.5	65.6	0.86	0.85	1.2
D5	116.4	116.4	0.47	0.47	
XH5	118.1	109.5	0.52	0.43	18.9
D6	156.6	156.6	0.35	0.35	
XH6	156.7	156.7	0.39	0.31	22.9

一侧的最大沉降量大于同时开挖的地表沉降最大值,而后行隧道一侧的最大沉降量小于同时开挖的地表沉降最大值。由此表明,对于先后开挖的双线隧道,隧道间距的不同会导致两隧道施工过程中的相互作用机理不同,从而引起地表沉降曲线分布特征也有差异。

由表 4 可知,先后开挖工况的拟合参数 $S_{1\max}>S_{2\max}$,叠加式(2)的最大值(总沉降的最大值)对应的位置在先行隧道一侧。随着隧道埋深的增加,叠加式(2)中的 $S_{1\max}$ 和 $S_{2\max}$ 相对差异越大,说明双线隧道开挖顺序对地表沉降的影响随着隧道埋深的增加而增大。

4 结 语

(1)采用 Trapdoor 试验可以较好地模拟隧道开挖所引起的地表沉降规律,且单 Trapdoor 数值试验与模型试验的曲线形态均与 Peck 公式相吻合。

(2)双线隧道开挖引起的地表沉降呈现出“W”和“V”两种曲线形态,且随着隧道中心间距的减小和隧道埋深的增大,曲线由“W”形态向“V”态形演变。

(3)先后开挖工况下双线隧道引起的地表沉降曲线呈非对称分布,地表沉降量最大值出现在先行隧道一侧,且随着隧道埋深的增加,地表沉降曲线两侧的最大值的差异有增加的趋势。

参考文献:

References:

[1] 台启民,张顶立,房 倩,等. 暗挖重叠地铁隧道地表变形特性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(12):2472-2480.
TAI Qi-min, ZHANG Ding-li, FANG Qian, et al. Analysis of Ground Surface Deformation Induced by Excavation of Crossing Metro Tunnels in Urban Underground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2472-2480.

[2] 魏 纲,叶 琦,虞兴福. 杭州地铁盾构隧道掘进对建筑物影响的实测分析[J]. 现代隧道技术,2015,52(3):150-159.
WEI Gang, YE Qi, YU Xing-fu. Field Monitoring and Analysis of the Influence of Shield Tunnelling for the

- Huangzhou Metro on Existing Buildings[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 150-159.
- [3] 王 帅, 孙少锐, 舒 杨, 等. 双线浅埋隧道近距离界定及地表沉降机理研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(9): 115-121.
- WANG Shuai, SUN Shao-rui, SHU Yang, et al. Critical Distance of Shallow Twin Tunnels and Ground Surface Settlements Caused by Tunneling[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(9): 115-121.
- [4] PECK R B. Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground[C]//MORETTO O, PECK R B, ALBERRO J, et al. Proceedings of the 7th International Conference of Soil Mechanics & Foundation Engineering. Mexico City; Balkema A A, 1969: 225-290.
- [5] 方恩权, 杨玲芝, 李鹏飞. 基于 Peck 公式修正的盾构施工地表沉降预测研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1): 143-149, 162.
- FANG En-quan, YANG Ling-zhi, LI Peng-fei. Prediction of Ground Settlement Induced by Metro Shield Construction Based on the Modified Peck Formula[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(1): 143-149, 162.
- [6] SUWANSAWAT S, EINSTEIN H H. Describing Settlement Troughs over Twin Tunnels Using a Superposition Technique[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(4): 445-465.
- [7] 陈春来, 赵城丽, 魏 纲, 等. 基于 Peck 公式的双线盾构引起的土体沉降预测[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2212-2218.
- CHEN Chun-lai, ZHAO Cheng-li, WEI Gang, et al. Prediction of Soil Settlement Induced by Double-line Shield Tunnel Based on Peck formula[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2212-2218.
- [8] 吴华君, 魏 纲. 近距离双线平行盾构施工引起的土体沉降计算[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(2): 63-69, 75.
- WU Hua-jun, WEI Gang. The Calculation of Soil Settlement Induced by Construction of Twin Parallel Shield Tunnels with a Small-interval[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(2): 63-69, 75.
- [9] CORDING E J, HANSMIRE W H. Displacements Around Soft Ground Tunnels [C]//GIULIANI F, RODRIGUEZ M, ARCHILLA F. Proceedings of the 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Buenos Aires; Argentine Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1975: 517-632.
- [10] 韩 焯, 李 宁, STANDING J R. 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 Xuan, LI Ning, 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.
- [11] 胡 斌, 刘永林, 唐辉明, 等. 武汉地铁虎泉——名都区间隧道开挖引起的地表沉降研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 908-913.
- HU Bin, LIU Yong-lin, TANG Hui-ming, et al. Research on Ground Subsidence Due to Tunnel Excavation in Huquan — Mingdu Section of Wuhan Subway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 908-913.
- [12] 虞兴福, 任 辉, 胡向东. 杭州地铁 1 号线盾构掘进对周围土体扰动分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 166-173.
- YU Xing-fu, REN Hui, HU Xiang-dong. Analysis of the Disturbance to Surrounding Soils During Shield Driving for the Hangzhou Metro Line 1 Project[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 166-173.
- [13] 朱才辉, 李 宁. 地铁施工诱发地表最大沉降量估算及规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增 1): 3543-3560.
- ZHU Cai-hui, LI Ning. Estimation and Regularity Analysis of Maximal Surface Settlement Induced by Subway Construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3543-3560.
- [14] TERZAGHI K. Stress Distribution in Dry and in Saturated Sand Above a Yielding Trap-door [C]//TERZAGHI K. Proceeding of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Boston; Harvard University, 1936: 307-311.
- [15] COSTA Y D, ZOMBERG J G, BUENO B S, et al. Failure Mechanisms in Sand over a Deep Active Trap-door[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(11): 1741-1753.
- [16] RUI R, VAN TOL F, XIA Y Y, et al. Evolution of Soil Arching, 2D Analytical Models[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(6): 04018056.
- [17] RUI R, HAN J, VAN EEKELEN S J M, et al. Experimental Investigation of Soil-arching Development in Unreinforced and Geosynthetic-reinforced Pile-supported Embankments[J]. Journal of Geotechnical and

- Geoenvironmental Engineering, 2019, 145 (1): 04018103.
- [18] ADACHI T, KIMURA M, KISHIDA K. Experimental Study on the Distribution of Earth Pressure and Surface Settlement Through Three-dimensional Trapdoor Tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(2/3): 171-183.
- [19] THONGPRAPHA T, FUENKAJORN K, DAEMEN J J K. Study of Surface Subsidence Above an Underground Opening Using a Trap Door Apparatus[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 46: 94-103.
- [20] 徐路畅, 芮 瑞, 张 龙, 等. 基于 Trapdoor 试验的双线隧道地表沉降预测公式探讨[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1470-1476.
- XU Lu-chang, RUI Rui, ZHANG Long, et al. Prediction Formula for Surface Settlement in Double-line Tunnel Based on Trapdoor Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1470-1476.
- [21] 林 志, 朱合华, 夏才初. 双线盾构隧道施工过程相互影响的数值研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 85-89, 132.
- LIN Zhi, ZHU He-hua, XIA Cai-chu. Numerical Modeling Study on Interaction Between Twin Shields Tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 85-89, 132.
- [22] NG C W W, BOONYARAK T, MASIN D. Three-dimensional Centrifuge and Numerical Modeling of the Interaction Between Perpendicularly Crossing Tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(9): 935-946.
- [23] 任 强, 杨春英, 徐 薇. 地表沉降的双洞体叠加 Peck 公式及数值分析[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2013, 33(4): 78-82.
- REN Qiang, YANG Chun-ying, XU Wei. The Peck Formula and Numerical Analysis of Surface Subsidence Caused by Tunnel Excavation[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2013, 33(4): 78-82.
- [24] 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.
- LIU Bo, TAO Long-guang, DING Cheng-gang, et al. Prediction for Ground Subsidence Induced by Subway Double Tube Tunneling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(3): 356-361.
- [25] RUI R, VAN TOL A F, XIA Y Y, et al. Investigation of Soil-arching Development in Dense Sand by 2D Model Tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 2016, 39(3): 415-430.
- [26] MAIR R J, TAYLOR R N. Bored Tunnelling in the Urban Environment [C]//International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering. Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam; Balkema A A, 1998: 2353-2385.