

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.084



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起的地表沉降预测模型

王超, 邹金锋

(中南大学 土木工程学院, 长沙 410075)

摘要: 为探究双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起的地表沉降规律, 需建立相关理论预测模型。考虑地层土体损失率和收敛模式的影响, 以圆形隧道为例, 通过引入等效土体损失参数, 以求得隧道收敛后的实际埋深, 改进经典二维 Peck 模型。综合考虑隧道轴心连线与水平面夹角 α 、双线隧道半径(r_1, r_2)和隧道轴心间距 D 等 3 种主要影响因素, 建立双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起的地表沉降预测模型, 通过实际工程的现场监测结果和数值模拟结果验证预测模型的工程适用性, 并对双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起地表沉降的主要影响因素进行分析。结果表明: 预测模型可用于解决双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起的地表沉降问题, 且满足 20% 的工程精度要求; 地表沉降曲线从“V”形至“W”形间变化的临界参数值 [$\alpha, r_2/r_1, D/H'$] 为 [60°, 2.0, 1.0], 可据此初步判断地表沉降曲线形状并检验地表沉降计算结果的合理性, 为类似隧道工程建设中的地表沉降变形预测及控制提供参考。

关键词: 双线平行盾构隧道; 布置方式; 地表沉降; 预测模型

中图分类号: U455.43 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2025)03-0113-13

Prediction model of ground settlement caused by construction of double track parallel shield tunnels under arbitrary layout

WANG Chao, ZOU Jinfeng

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, P. R. China)

Abstract: In order to investigate the surface settlement pattern caused by construction of a twin parallel shield tunnels in an arbitrary arrangement, a relevant theoretical prediction model needs to be established. Considering the effects of ground soil loss rate and convergence pattern, the classical two-dimensional Peck model is improved by introducing equivalent soil loss parameters to find the actual burial depth after tunnel convergence, taking circular tunnel as an example. Based on this, a prediction model for surface settlement due to construction of the twin parallel shield tunnels in any arrangement is established by considering three main influencing factors, including the angle α between the tunnel axis and the horizontal plane, the radius of the two-lane tunnel

收稿日期: 2022-12-18

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1201200); 南昌轨道交通集团 2020 年度科研计划(2020HGKYB002)

作者简介: 王超(1994-), 男, 博士生, 主要从事岩土与地下工程稳定性分析方法与加固关键技术研究, E-mail: wangchao214801069@yeah.net。

Received: 2022-12-18

Foundation items: National Key Research and Development Program (No. 2017YFB1201200); Nanchang Rail Transit Group 2020 Annual Research Program (No. 2020HGKYB002)

Author brief: WANG Chao (1994-), PhD candidate, main research interests: stability analysis methods and reinforcement key technology of geotechnical and underground engineering, e-mail: wangchao214801069@yeah.net.

(r_1, r_2) and the tunnel axis distance D . The applicability of the proposed model is verified by the field monitoring and numerical simulation results from engineering practice, and predictive model for surface settlement due to construction of the twin parallel shield tunnels in any arrangement is established. The main influencing factors of surface settlement caused by construction under arbitrary arrangement of the twin parallel shield tunnels are analyzed. The results show that the prediction model could be used to solve the surface settlement problem caused by the construction of a two-line parallel shield tunnel in any arrangement, and it meets the engineering accuracy requirement of 20%. The critical parameter values $[\alpha, r_2/r_1, D/H']$ for the variation of the surface settlement curve from "V" to "W" are $[60^\circ, 2.0, 1.0]$, which can be used to make a preliminary judgment on the shape of the surface settlement curve and check the rationality of the surface settlement results. It provides reliable guidance for prediction and control of surface settlement deformation in similar tunnel construction.

Keywords: twin parallel shield tunnel; layout mode; surface settlement; prediction model

随着盾构施工水平不断提升,越来越多的城市轨道交通工程采用盾构法施工。因盾构施工质量高、速度快、适应性强等多方面优点,其在地铁隧道的建设过程中发挥越来越重要的作用。但受其施工工艺特点的影响,在双线平行隧道掘进开挖过程中,其中一条线路遇到不良地质或盾构姿态向上坡倾斜等问题而导致左右线隧道在该区域成为双线非水平隧道时,将导致盾构施工过程中的地表产生不均匀沉降变形^[1-2],若不能合理预测并采取合适的控制措施,将严重影响盾构隧道的施工质量和安全性。因此,双线非水平隧道盾构掘进时的地表沉降变形是施工安全性的首要问题,为确定合理的施工参数并制定有效的沉降控制措施提供科学依据,对城市轨道交通建设意义重大。

截至目前,学者们考虑盾构施工特点,已在双线隧道盾构施工引起地表沉降的预测和规律等方面取得了较为丰硕的成果。丁智等^[3]利用半无限饱和土初值解修正了现有土体变形公式,建立了先行、后行盾构任意空间位置动态施工的修正力学模型。张治国等^[4]利用位移控制 Schwarz 交替法和复变函数理论,提出了任意布置方式下双线盾构隧道开挖引起周围地层变形的计算方法。魏纲等^[5]建立修正的随机介质理论简化计算公式,并提出了近距离双线水平平行盾构施工引起地表总沉降曲线符合正态分布规律的观点。Feng 等^[6]采用解析计算、数值模拟和现场监测相结合的方法,建立了小半径曲线隧道盾构施工引起地表沉降的预测模型,并提出了小半径曲线隧道盾构施工引起地面沉降的变形规律。Li 等^[7]利用三维图像理论分析了地面损失引起的地面沉降,并推导得到了修正 Mindlin 解的曲线隧道施工荷载引起地面沉降的解析解。Luo 等^[8]利用 FORTRAN 语言编制了盾构隧道施工引起的地面沉降三维流土全耦合模型的数值计算程序,采用数值模拟方法建立了地下水影响下盾构隧道施工引起的地面沉降三维土体流固耦合数学模型。

Wang 等^[9]考虑到盾构隧道在施工过程中无法规避施工和开挖引起的地面变形,采用理论分析和数值模拟相结合的方法,建立了土岩复合地层条件下双盾构隧道施工引起的地面沉降预测模型。纵观现有研究成果,不难发现,其中关于双线隧道盾构施工引起地表沉降的研究大多建立在双线水平隧道这一类常规布置方式的基础上,对于左右线隧道半径不相等、左右线隧道轴心连线与水平面存在夹角等布置方式的情况则涉及较少,但此时由于隧道埋深不同、施工扰动荷载等多种因素的综合作用,将极易引起左右线隧道上部地表的不均匀沉降,从而给盾构隧道施工的安全性带来极大挑战。因此,有必要针对任意布置方式下双线平行隧道施工引起的地表沉降问题开展相关研究,保证盾构隧道工程建设的安全性。

基于此,笔者依托南昌市轨道交通 1 号线东延工程,开展双线平行盾构隧道在任意布置方式下施工引起的地表沉降预测研究。在经典 Peck 模型的基础上,考虑隧道盾构施工扰动造成的地层土体损失率和收敛模式的影响,通过引入等效土体损失参数,以求得隧道收敛后的实际埋深;考虑任意半径的双线平行圆形隧道在任意布置方式时隧道轴心连线与水平面夹角的影响,改进经典二维 Peck 模型,构建双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起的地表沉降预测模型,并对隧道轴心连线与水平面夹角、双线隧道半径和隧道轴心间距等 3 种因素对双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起地表沉降的影响规律加以分析。

1 经典 Peck 模型及相关参数

目前,在隧道施工中常用的地表沉降预测方法是经典 Peck 模型^[10]。通过现场试验的方法,测得不排水条件下隧道开挖所产生的土体变形量,并对大量实测数据进行筛选分析,根据统计分析结果,不排水条件下隧道开挖所产生的土体变形量应等于

地层损失量,并且地表受到隧道开挖影响而产生的沉降在横向近似呈正态分布形式。基于此,Peck提出了隧道开挖施工引起地表沉降的预测公式,也即经典Peck公式,如式(1)所示。

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

式中: $S(x)$ 为横断面上与隧道中心轴线相距 x 位置处的地表沉降; S_{\max} 为横断面上处于隧道中心轴线处的地表沉降最大值,如式(2)所示; x 为横断面上与中心轴线原点处的位置坐标; i 为沉降槽宽度,如式(3)所示。

$$S_{\max} = \frac{AV_i}{i\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

$$i = \frac{H+R}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (3)$$

式中: A 为开挖隧道的横断面面积; V_i 为隧道开挖土体引起的地层损失率; H 为隧道拱顶至地表的垂直距离(即隧道埋深); R 为隧道开挖半径; φ 为地层土体的内摩擦角,当隧道处于单一地层时,即为该地层土体的内摩擦角;当隧道处于复合地层时,则为各地层土体按照各自地层厚度的内摩擦角加权平均值。

由Peck公式可知,经典Peck模型曲线近似呈V形,如图1所示。但随着工程建设要求和技术的不断提升,以盾构隧道为例,在城市地铁建设中往往较多地采用双线平行盾构隧道的形式,此时盾构掘进开挖过程中产生的地表沉降曲线将不能完全呈V形,受到双线隧道水平间距、施工工法、相对埋深以及与水平面的倾角等多种因素的影响,将会呈W形,如图2所示,此时,经典Peck模型已无法适用于双线平行隧道工程中的地表沉降预测。基于此,在经典Peck公式的基础上Suwansawat等^[11]考虑隧道埋深、水平间距、施工工法以及双线隧道间的相互作用等因素的影响,利用叠加原理建立了适用于双

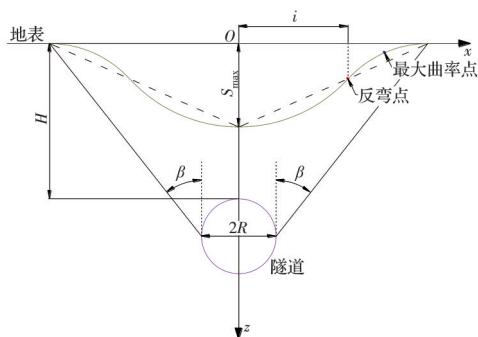


图1 经典Peck模型的典型沉降槽横向分布图

Fig. 1 Transverse distribution of typical settlement trough of classical Peck model

线平行隧道施工引起地表沉降预测的二维Peck公式,如式(4)所示。

$$S(x) = S_{\max} \left\{ \exp\left[-\frac{\left(x - \frac{D}{2}\right)^2}{2i^2}\right] + \exp\left[-\frac{\left(x + \frac{D}{2}\right)^2}{2i^2}\right] \right\} \quad (4)$$

式中: $S(x)$ 为等圆双线隧道与水平面平行时施工引起的地表沉降量; D 为左、右线隧道间距,见图2; S_{\max} 为横断面上处于双线平行隧道各自中心轴线处的地表沉降最大值,如式(5)所示。

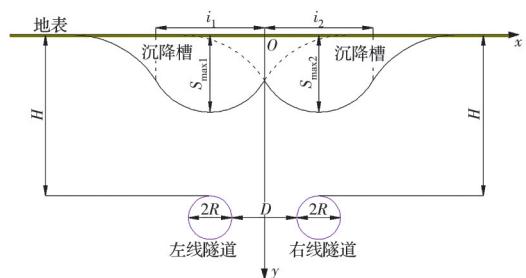


图2 二维Peck模型的隧道沉降槽分布示意图

Fig. 2 Distribution diagram of tunnel settlement trough of 2D Peck model

$$S_{\max} = \frac{AV_i}{i\sqrt{2\pi}} \quad (5)$$

式中: A 为圆形隧道横截面的开挖面积; i 为双线平行隧道各自的沉降槽宽度,如式(6)所示。

$$i = \frac{H+R}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (6)$$

式中: H 为双线隧道埋深; R 为未收敛变形时的隧道半径; φ 为地层土体内摩擦角。

2 双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起地表沉降预测模型的建立

由于实际工程中的上覆地层多为复合地层,因此在计算盾构开挖引起的地表沉降问题时,不仅要考虑地层整体的力学参数影响,还应考虑地层土体按照各层厚度进行加权所得平均值的影响。由此,在O'Reilly等^[12]研究成果的基础上,利用开挖断面各土层弹性模量的算术平均值 \bar{E} 和以地层厚度为权重的加权平均值 \hat{E} 的比值与各土层内摩擦角的算术平均值 $\bar{\varphi}$ 和以地层厚度为权重的加权平均值 $\hat{\varphi}$ 的比

值进行拟合求解,得到复合地层条件下盾构施工引起地表沉降槽宽度 i 的计算方法,如式(7)所示。

$$i = h \left(\frac{\bar{E}}{4\hat{E}} + \frac{\bar{\varphi}}{2\hat{\varphi}} \right) \quad (7)$$

式中: h 为隧道轴线埋深。

基于此,以左线隧道先开挖为例,由于双线隧道开挖引起的地表沉降与左右线隧道各自开挖引起的地表沉降叠加后的情况相符合,且由文献[13-14]可知,如某一断面上的单线隧道开挖引起的地面沉降范围为 $5i$,则由极限平衡原理可得复合地层主要影响角与左线隧道开挖引起的地表沉降槽宽度间的函数关系,如式(8)所示。

$$\tan \theta = \frac{h}{2.5i_1 - b} \quad (8)$$

式中: θ 为复合地层主要影响角,取各层地层主要影响角关于各地层厚度的加权平均值,如式(9)所示; i_1 为左线隧道开挖引起的地表沉降槽宽度; b 为隧道开挖断面宽度。

$$\theta = \frac{\theta_1 h_1 + \theta_2 h_2 + \dots + \theta_n h_n}{h} \quad (9)$$

式中: $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 为从上至下第 n 层地层的主要影响角; h_1, h_2, \dots, h_n 为从上至下第 n 层地层的厚度; h 表示从地表至隧道轴线各地层的总厚度,也即隧道轴线埋深,如式(10)所示。

$$h = \sum_{n=1}^{\infty} h_n, n \in N^+ \quad (10)$$

综上所述,联立式(7)、式(8)可得左线隧道先行开挖情况下考虑复合地层主要影响角修正后的左线隧道轴线埋深 H_1 ,如式(11)所示。

$$H_1 = \frac{b_1 \tan \theta_1}{2.5 \tan \theta_1 \left(\frac{\bar{E}}{4\hat{E}} + \frac{\bar{\varphi}}{2\hat{\varphi}} \right) - 1} \quad (11)$$

式中: b_1 为左线隧道开挖断面宽度; θ_1 为左线隧道上覆地层主要影响角。

同时,考虑到相同区间内双线隧道盾构施工过程中的先后行隧道在同一开挖断面的地质情况大致相同,但由于布置方式的不同可能导致左右线隧道的开挖半径和埋深不同,由此,按照上述的推导过程,可得右线隧道后行开挖情况下考虑复合地层主要影响角修正后的右线隧道轴线埋深 H_2 ,如式(12)所示。

$$H_2 = \frac{b_{\parallel} \tan \theta_{\parallel}}{2.5 \tan \theta_{\parallel} \left(\frac{\bar{E}}{4\hat{E}} + \frac{\bar{\varphi}}{2\hat{\varphi}} \right) - 1} \quad (12)$$

式中: b_{\parallel} 为右线隧道开挖断面宽度; θ_{\parallel} 为右线隧道上覆地层主要影响角。

由此,根据 Suwansawat 等^[11]建立的二维 Peck 模型,进一步考虑隧道开挖过程中围岩收敛变形的影响,按照均质等圆收敛来考虑,则可得此时的地层土体损失量 V_{loss} 为

$$V_{\text{loss}} = \pi R^2 - \pi (R - 0.5g)^2 \quad (13)$$

式中: g 为等效土体损失参数,如图 3 所示。

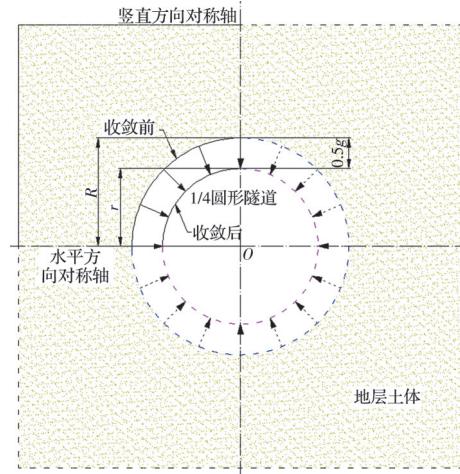


图 3 圆形隧道开挖面收敛模式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of convergence mode of circular tunnel excavation surface

同时,根据地层土体损失量的定义可得

$$V_{\text{loss}} = A \epsilon = \epsilon \pi R^2 \quad (14)$$

式中: ϵ 为隧道施工引起的地层土体损失率。

由式(13)和式(14)可得

$$\epsilon \pi R^2 = \pi R^2 - \pi (R - 0.5g)^2 \quad (15)$$

求解式(15)可得地层土体损失率 ϵ ,如式(16)所示。

$$\epsilon = \frac{R^2 - \pi (R - 0.5g)^2}{R^2} \quad (16)$$

由图 3 可得圆形隧道收敛变形前后的隧道半径 R, r 满足式(17)所示关系。

$$r = R - 0.5g \quad (17)$$

则由图 4 可知, Δ 为隧道衬砌环顶部与隧道实际开挖顶部间距的 $1/2$,由此可得 Δ 为

$$\Delta = 0.5g = \epsilon \cdot \frac{r}{2} = \frac{R^2 - \pi (R - 0.5g)^2}{R^2} \times \frac{R - 0.5g}{2} = \frac{R^3 - 0.5R^2 g - \pi (R - 0.5g)^3}{2R^2} \quad (18)$$

由图 4 中隧道收敛变形前后的位置关系可得隧道收敛后的埋深,如式(19)所示。

$$H' = H + 2\Delta = (h - R) + 2\epsilon \cdot \frac{r}{2} = \frac{(h - R)R^2 + R^3 - 0.5R^2 g - \pi (R - 0.5g)^3}{R^2} \quad (19)$$

式中: H' 为收敛变形后的隧道拱顶埋深; H 为收敛变形前的隧道拱顶埋深; h 为考虑双线隧道施工顺序和土层变化影响而修正的隧道轴线埋深,先行开挖

$$I = \frac{H' + r}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{\frac{(h - R)R^2 + R^3 - 0.5R^2g - \pi(R - 0.5g)^3}{R^2} + (R - 0.5g)}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (20)$$

综上所述,由Peck公式^[15-17]可进一步求得考虑隧道收敛变形影响的隧道施工引起的地表沉降表达式为

$$S'(x) = \frac{A'\epsilon}{I\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2I^2}\right) = \frac{\pi(R - 0.5g)^2 [R^2 - \pi(R - 0.5g)^2]}{IR^2\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2I^2}\right) \quad (21)$$

式中: $S'(x)$ 为隧道收敛变形后施工引起的地表沉降量; x 为隧道开挖断面地表上任一点与隧道中心点间的水平坐标,如图5所示,沿 x 轴方向为正,反方向为负。图5中, β 为隧道施工影响角; W 为隧道开挖断面的影响范围; O 为隧道收敛变形前的圆心; O' 为隧道收敛变形后的圆心。

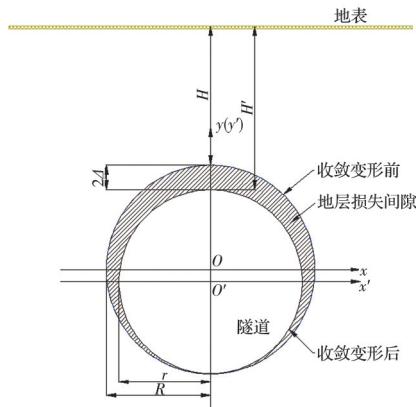


图4 隧道收敛变形引起的地层损失间隙

Fig. 4 Stratum loss gap caused by tunnel convergence deformation

综上所述,引入叠加原理,进一步考虑双线隧道施工引起的地表沉降问题。当左、右线隧道为等圆情况时,考虑隧道轴线与水平线间的夹角 α 在双线隧道施工过程中对地表沉降的影响,以地表所在水平直线为 x 轴,并以过左线隧道轴心与 x 轴的垂线为纵轴,表示地表沉降量,如图6所示。图中, D 为左、右线平行隧道与水平面呈任意角度时的隧道间距; D' 为双线平行隧道与水平面呈任意夹角时投影在 x 轴上的左、右线隧道间距; r 为隧道收敛后的半径; H' 为双线平行隧道与水平面夹角为零时的左、右线隧道埋深; H'' 为双线隧道与水平面夹角非零时的右线隧道埋深。

按式(11)计算,后行开挖则按式(12)计算。

由式(19)可得隧道收敛变形后的沉降槽宽度 I 为

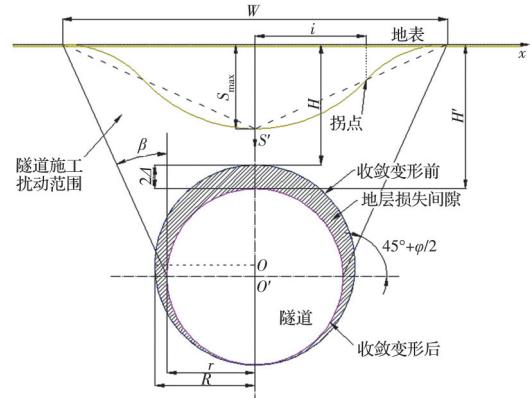


图5 考虑隧道收敛变形影响的地表沉降槽示意图

Fig. 5 Schematic diagram of surface settlement trough considering the influence of tunnel convergence deformation

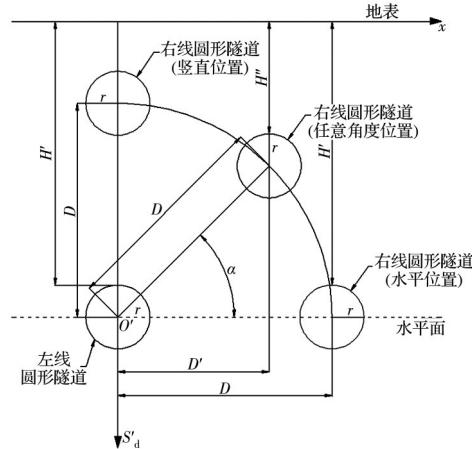


图6 双线平行等圆隧道与水平面任意夹角的位置分布图

Fig. 6 Location distribution of double track parallel isocircular tunnel at any angle with horizontal plane

此时可得,左、右线隧道等圆情况下,双线平行隧道与水平面呈任意夹角时施工引起的地表沉降量为

$$S'_d(x) = \frac{A'\epsilon}{I'_1\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2I'_1^2}\right) + \frac{A'\epsilon}{I'_2\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x + D\cos\alpha)^2}{2I'_2^2}\right] \quad (22)$$

式中: $S'_d(x)$ 为双线平行等圆隧道与水平面呈任意夹角

角时施工引起地表沉降量; A' 为隧道收敛变形后横截面的开挖面积; ϵ 为左、右线隧道等圆情况下的地层土体损失率; I_1' 、 I_2' 分别为双线平行隧道与水平面呈任意夹角时施工引起地表沉降槽宽度, 如式(23)、式(24)所示。

$$I_1' = \frac{H' + r}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{(H_1 + R - g)R^2 - \pi(R - 0.5g)^3}{R^2 \sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (23)$$

$$I_2' = \frac{H'' + r}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{H' - D \sin \alpha + r}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{(H_2 + R - g - D \sin \alpha)R^2 - \pi(R - 0.5g)^3}{R^2 \sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (24)$$

式中: H' 、 H'' 分别为等圆双线平行隧道与水平面呈任意夹角时的左、右线隧道的埋深, 如式(25)所示; H_1 为左线隧道先行开挖情况下考虑复合地层主要影响角修正后的左线隧道轴线埋深; H_2 为右线隧道后行开挖情况下考虑复合地层主要影响角修正后的右线隧道轴线埋深; r 为等圆双线平行隧道收敛变形后的隧道半径, 如式(25)所示。

$$\begin{cases} H' = \frac{(H_1 - R)R^2 + R^3 - 0.5R^2g - \pi(R - 0.5g)^3}{R^2} \\ H'' = \frac{(H_2 - 0.5g - D \sin \alpha)R^2 - \pi(R - 0.5g)^3}{R^2} \\ r = R - 0.5g \end{cases} \quad (25)$$

综上所述, 进一步考虑左、右线隧道不等圆情况下, 在双线隧道施工过程中对地表沉降的综合影响, 仍旧以左、右线隧道等圆时的坐标轴设置方式构建左、右线隧道不等圆情况时的直角坐标系, 表征双线隧道引起的地表沉降量, 如图7所示。图中, H' 为左、右线隧道不等圆情况下的左线隧道埋深, 即与左、右线隧道等圆情况下的左线隧道埋深相同, 因为此时假定 $r_1 = r$, 且 r_1 为左、右线隧道不等圆情况时的左线隧道收敛后的半径; h' 为左、右线隧道不等圆情况下的右线隧道埋深; h'' 为双线不等圆隧道与水平面夹角非零时的右线隧道埋深; r_2 为右线隧道收敛后的半径, 且 $r_2 \neq r_1$ 。

此时可得左、右线隧道不等圆情况下双线平行隧道轴心连线与水平面呈任意夹角时施工引起的地表沉降量为

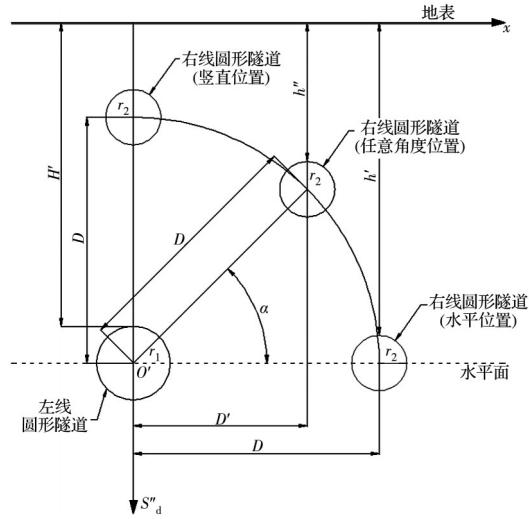


图7 双线平行不等圆隧道与水平面任意夹角的位置分布图

Fig. 7 Location distribution of double track parallel unequal circular tunnel at any angle with horizontal plane

$$S''_d(x) = \frac{A'_1 \epsilon_1}{I''_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2I''_1^2}\right) + \frac{A'_2 \epsilon_2}{I''_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x + D \cos \alpha)^2}{2I''_2^2}\right] \quad (26)$$

式中: $S''_d(x)$ 为双线平行不等圆隧道轴心连线与水平面呈任意夹角施工引起的地表沉降量; ϵ_1 、 ϵ_2 分别为左、右线隧道不等圆情况下的地层土体损失率; I''_1 、 I''_2 分别为不等圆双线平行隧道轴心连线与水平面呈任意夹角时施工引起的地表沉降槽宽度, 如式(27)、式(28)所示。

$$I''_1 = I'_1 = \frac{H' + r_1}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{(H_1 + R - g)R^2 - \pi(R - 0.5g)^3}{R^2 \sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (27)$$

$$I''_2 = \frac{h'' + r_2}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{h' - D \sin \alpha + r_2}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{(H_2 + R - 0.5g_2 - D \sin \alpha)R_2^2 - \pi(R_2 - 0.5g_2)^3}{R_2^2 \sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (28)$$

式中: h' 为双线平行不等圆隧道中右线隧道收敛变形后的埋深; h'' 为双线平行不等圆隧道轴心连线与水平面呈任意夹角时的右线隧道的埋深; R_2 为双线

平行不等圆隧道中右线隧道收敛变形前的半径; r_2 为双线平行不等圆隧道中右线隧道收敛变形后的半径,均如式(29)所示。

$$\begin{cases} h' = \frac{(H_2 - R_2 + R - 0.5g)R_2^2 - \pi(R_2 - 0.5g_2)^3}{R_2^2} \\ h'' = h' - D \sin \alpha \\ r_2 = R_2 - 0.5g_2 \end{cases} \quad (29)$$

综上所述,式(26)即为双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起的地表沉降预测模型。在实际工程应用中,可通过选取不同隧道施工过程中的开挖断面,按照图7建立该断面中任意半径的双线平行圆形隧道在任意布置方式下盾构施工引起地表沉降的坐标轴,等距选取地表所在x轴的坐标值,结合工程现场资料提供的相关参数信息,依次代入式(26)~式(28),求得该隧道开挖断面上左、右线隧道所对应的地表沉降最大值 $S''_{d1\max}$ 和 $S''_{d2\max}$ 、沉降槽宽度 I''_1 和 I''_2 以及地表沉降函数曲线 $S''_d(x)$ 。

3 模型验证

3.1 工程概况

以南昌市轨道交通1号线东延工程瑶湖东站—麻丘站区间双线盾构隧道工程为例,如图8所示,区间整体走向由西向东,沿线地面高程在15.72~22.69 m之间,高差约6.97 m。左右线隧道间距在12~16 m左右,且该区间为双线单洞隧道,采用盾构法施工。受地层土体不良性质的影响,为规避右线隧道在瑶湖东站—麻丘站区间施工过程中在YDK31+587.6~YDK31+725.8里程范围内遇到的一段土体性质很差的地层,在设计时减小右线隧道掘进至该区段时的埋深,以盾构上坡方式有效跨越这一区间里程范围内不良地层的影响。由规划设计要求和工程现场资料可知,瑶湖东站—麻丘站区间线路平面主要包括直线、曲线以及缓和曲线等3类路段,线路最大曲线半径为300 m,右线为8.127‰的上坡段,隧道拱顶覆土厚度为11.4~17.7 m左右,盾构施工过程中的隧道开挖直径为6.0 m,内部直径为5.4 m,管片厚度为0.3 m。拟建场地地层土体自上而下依次为:①素填土,层厚约1.82 m;②粉质黏土,层厚约8.39 m;③细砂,层厚约2.80 m;④中砂,层厚约4.58 m;⑤砾砂,层厚约10.82 m,各地层土体的主要物理力学参数如表1所示。

由工程现场的勘察资料可知,隧道标准设计断面的形状为圆形,且双线盾构隧道在YDK31+587.6~YDK31+725.8里程范围内施工时,双线隧



图8 南昌市城市轨道交通1号线东延工程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of east extension project of Nanchang Urban Rail Transit Line 1

表1 土层土体物理力学参数统计表

Table 1 Statistics of mechanical parameters of the soil

土体类型	地层代号	天然重度 $\gamma/(kN/m^3)$	内摩擦角 $\varphi/(\text{度})$	黏聚力 c/kPa	压缩模量 E_s/MPa	泊松比 ν
素填土	①2	18.4	14	15	5.56	0.35
粉质黏土	③1	19.9	21.4	34.8	8.88	0.34
细砂	③2	19.5	20	0	9.21	0.30
中砂	③3	19.6	24	0	10.36	0.28
砾砂	③5	22.5	42	0	56	0.18

道轴心连线与水平面的夹角约为10°,左、右线隧道间距为14.2 m,该区域左、右线隧道埋深分别为15.6、12.1 m,且右线隧道相比左线隧道的埋深减小3.5 m。该区域场地地下水位埋深约21.20~23.00 m,因此,盾构掘进范围处于地下水位线以上,在该区域里程范围内的双线隧道盾构掘进过程中主要穿越的地层为砾砂层。

3.2 数值模拟及现场监测

在建立双线平行盾构隧道任意布置方式下施工的数值模型之前,为简化模型建立过程并提升数值模拟计算速率,结合需要及ABAQUS有限元软件的特点,对建立的数值模型提出3点基本假定:1)模型关于自重应力构造初始地应力平衡,不考虑构造应力等其他因素的影响;2)盾构掘进范围处于地下水位以上,因此,在模型建立时可忽略地下水的影响;3)盾构掘进范围内的上部建(构)筑物及其他因素对在建隧道产生的荷载作用在建立模型的过程中均视为地面均匀分布的堆载作用。由此,根据工程现场施工情况及资料,已确定隧道管片外径为6 000 mm,管片内径为5 400 mm,管片厚度为300 mm。考虑地层的无限性及施工扰动影响范围,以过左线隧道圆心且与地表相交点为坐标原点,以该线为z轴,地表所在水平直线为x轴,构建双线平行盾构隧道任意布置方式下施工的数值模型,如图9所示。采用实体单元建模,整体模型共有140 283

个节点、124 470 个单元,且为保证计算模型网格划分质量和计算收敛性,以中性轴算法来控制网格划分,并在计算时采用C3D8R单元来模拟双线非水平隧道盾构掘进过程中横断面上的隧道与地层结构。其中,左线隧道埋深为15.6 m,右线隧道埋深为12.1 m,双线隧道轴心连线与水平面的夹角为10°,间距为14.2 m,右线隧道相比左线隧道的埋深减小3.5 m,且右线隧道主要穿越地层为中砂层,而左线隧道主要穿越地层则为砾砂层,具体的地层土体物理力学参数见表1。

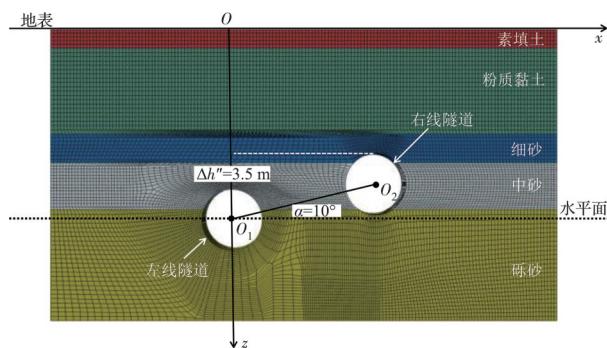


图9 双线平行盾构隧道任意布置方式下施工数值模型图

Fig. 9 Numerical model of double track parallel shield tunnels under arbitrary layout

为更好地验证建立的双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起的地表沉降预测模型的工程适用性,在数值模拟验证的基础上,采用现场监测的方式,实时监测双线非水平隧道盾构施工过程中地表的累积沉降情况,保证隧道盾构施工的安全性。由于依托工程中隧道施工里程范围内地层分布情况较稳定,且无地层分布起伏较大的情况出现,因此,选取该里程范围内的任一断面作为监测断面,仍以过左线隧道圆心且垂直地表的直线(z轴)与地表(x轴)的交点为坐标原点,建立直角坐标平面,并在该平面上沿地表布设沉降监测点,如图10所示,相邻监测点的间距为5 m,共布设17个监测点,沿地表依次水平排开。根据双线非水平隧道盾构施工进程,测量获得该断面位置处的地表沉降

实测值。

3.3 对比分析及验证

根据依托工程及数值模拟的实际情况,此时左、右线隧道轴心连线与水平面间的夹角 α 为10°,且左、右线隧道为等圆隧道。基于此,根据文献[18]设定地层损失率值为1.00%,由此选取依托工程中断面的现场监测结果以及利用ABAQUS有限元软件计算的数值模拟结果,分别与建立的双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起的地表沉降预测模型按照依托工程的现场地质资料得出的预测结果相比较,如图11所示。图中“—”表示方向,且规定竖直向上为正方向,水平沿x轴方向为正方向。

由于沉降曲线两侧沉降值普遍较小或接近于零,不便于测量,容易造成实测结果与实际情况相差较大,从而导致理论预测和数值模拟的结果均与该区域现场监测结果之间的误差过大^[19-20],因此,该区域的误差统计结果不具有参考价值,应当忽略。由此,在对比验证和误差分析时需要排除 $x=-25$ 、 -20 、 50 、 55 m四个位置区域的较大曲线误差的影响,仅对其余有效位置处地表沉降数据的统计结果进行分析和判断。由图11可知,数值模拟计算结果与现场监测结果拟合效果良好,数值模拟结果与现场监测结果的最大误差和平均误差分别为16.77%、8.44%,均处于工程经验允许的20%合理误差范围内,证明了数值模拟结果的合理性。进一步将建立预测模型的计算结果分别与现场监测结果和数值模拟结果进行对比分析,则由图11可知,理论预测结果与数值模拟结果和现场监测结果均拟合良好,且理论预测结果与数值模拟结果和现场监测结果之间的最大误差和平均误差分别为(4.08%, 0.72%),(16.53%, 8.87%),均小于20%,满足工程经验允许的合理误差。也说明建立的双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起的地表沉降预测模型适用于预测双线非水平隧道盾构施工引起的地表沉降。

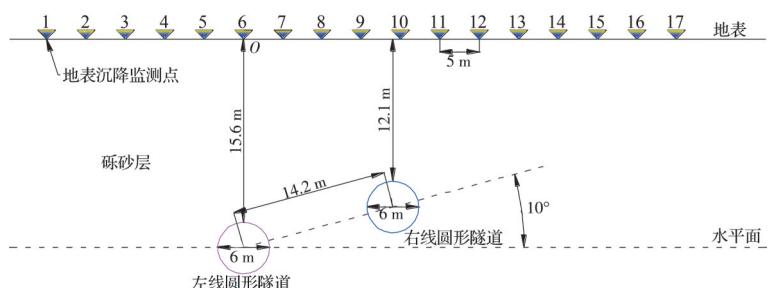


图10 双线非水平隧道盾构施工引起地表沉降监测点布置示意图

Fig. 10 Layout of monitoring points for surface settlement caused by shield construction of double track non horizontal tunnel

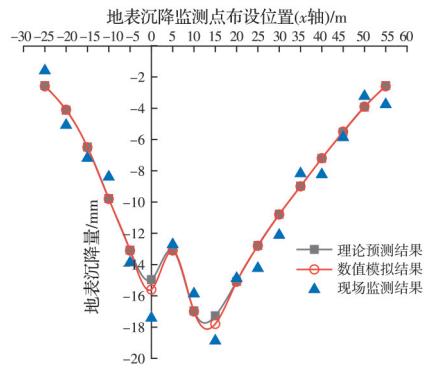


图11 双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起的地表沉降曲线对比图

Fig. 11 Comparison chart of surface settlement curves caused by construction of double track parallel shield tunnels in any layout

4 主要影响因素分析

4.1 隧道轴心连线与水平面夹角 α 变化的影响

通过建立的双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起的地表沉降预测模型可知,隧道轴心连线与水平面夹角 α 对双线非水平隧道盾构施工的地表沉降存在影响,由此采用控制变量法研究隧道轴心连线与水平面夹角 α 对地表沉降的影响规律。基于工程案例,分别利用预测模型计算 α 为 0° 、 10° 、 30° 、 60° 、 90° 时的地表沉降量,共分为5种工况,如表2所示,其对应的计算结果如图12所示。

表2 不同隧道轴心连线与水平面夹角 α 的工况统计表

Table 2 Working condition statistics of the angle (α) between different tunnel axis lines and horizontal plane

工况	隧道轴心连线与	隧道轴心	左线隧道	右线隧道
	水平面夹角 α /(°)	间距 D /m	半径 r_1 /m	半径 r_2 /m
①	0			
②	10			
③	30	14.2	3	3
④	60			
⑤	90			

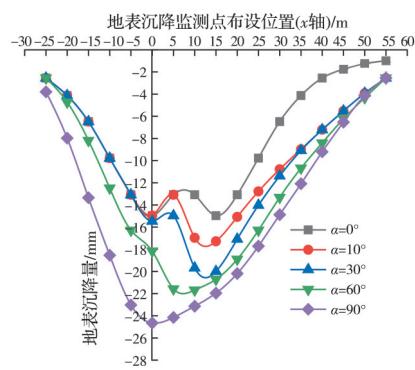


图12 不同隧道轴心连线与水平面夹角 α 的地表沉降曲线图

Fig. 12 Surface settlement curves for different tunnel axis lines with horizontal angle α

由图12可知,当 α 为 0° 时,双线隧道上方地表变形呈现对称的“中间低、两边高”的标准“W”形,而随着 α 逐渐增大至 60° 时,左、右线隧道上方各点处的地表沉降值均随之逐渐增大,且左、右线隧道拱顶上方各自对应的地表沉降最大值也随之改变,呈现出右线隧道拱顶的最大沉降逐渐大于左线隧道,从而导致双线隧道上方地表变形从最初的标准“W”形逐渐变为“左高右低”的非标准“W”形,且左、右线隧道拱顶所对应各自地表沉降最大值的产生位置在 x 轴方向逐渐靠近,两个峰值点有逐渐融合的趋势,这是由于 α 增大过程中双线隧道之间的实际水平距离在逐渐减小所致。当 α 从 60° 增大至 90° 的过程中,双线隧道上方地表的“左高右低”非标准“W”形沉降变形逐渐转变为仅有1个沉降最大值点的“中间低、两边高”的“V”形,地表沉降曲线也由“双峰”变为“单峰”,且此时的地表最大沉降值大于上述各种工况中的地表最大沉降值。这是由于 α 达到 90° 时相当于双线隧道处于上下重叠的状态,此时已无双线隧道的实际水平间距,可完全按照叠加原理对双线隧道盾构施工产生的地表沉降进行叠加,因此,此时的地表沉降最大值是各种工况中最大的。由此可确定,隧道轴心连线与水平面夹角 α 是双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起地表沉降变形的主要影响因素。从沉降曲线形状变化的角度考虑,可根据沉降曲线在 $\alpha=60^\circ$ 时由“双峰”开始变为“单峰”,确定隧道轴心连线与水平面夹角 α 影响下的地表沉降变形临界参数值为 60° ,据此预判双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起的地表沉降变形的大致形状。

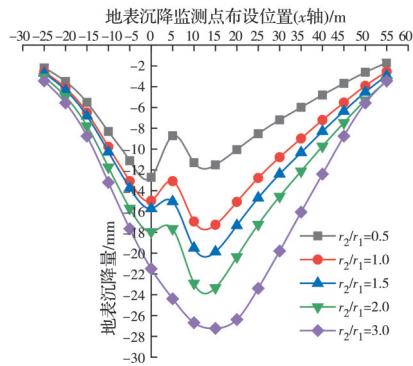
4.2 双线隧道半径比 r_2/r_1 变化的影响

采用无量纲参数分析方法探明双线隧道半径比的变化对双线非水平隧道盾构施工地表沉降的影响规律。基于工程案例,为便于不同工况之间的有序对比,规定左线隧道的半径保持不变,即 r_1 始终为 3.0 m ,而仅改变每组工况中右线隧道的半径,以达到双线隧道半径及其对应比值变化的效果。由此,分别取收敛变形后的右线隧道半径 r_2 为 1.5 、 3.0 、 4.5 、 6.0 、 9.0 m ,并利用预测模型依次计算双线隧道半径比 r_2/r_1 为 0.5 、 1.0 、 1.5 、 2.0 、 3.0 时的地表沉降量,共分为5种工况,如表3所示,其对应的计算结果如图13所示。

由图13可知,在无量纲参数 r_2/r_1 从 0.5 增大至 2.0 的过程中,左、右线隧道拱顶处的地表最大沉降值均随之增大,但左线隧道拱顶处的地表最大沉降值的增加幅度小于右线隧道拱顶处地表最大沉降值的增加幅度,从而使得双线隧道上方地表变形从

表3 不同双线隧道半径比 r_2/r_1 的工况统计表Table 3 Statistics of working conditions with different twin tunnels radius ratio r_2/r_1

工况	隧道轴心连线与水平面夹角 $\alpha/(\circ)$	隧道轴心间距 D/m	左线隧道半径 r_1/m	右线隧道半径 r_2/m	双线隧道半径比 r_2/r_1
①				2	0.5
②				3	1.0
③	10	14.2	3	4	1.5
④				6	2.0
⑤				8	3.0

图13 不同双线隧道半径比 r_2/r_1 的地表沉降曲线图Fig.13 Surface settlement curves for different two-lane tunnel radius ratio r_2/r_1

$r_2/r_1=0.5$ 时的“左低右高”非标准“W”形逐渐转变为 $r_2/r_1=2.0$ 时的“左高右低”非标准“W”形。这表明隧道半径是影响地表沉降的主要因素之一,且双线隧道半径比增大将在一定程度上引起地表沉降值的增大。同时,当 r_2/r_1 从0.5增大至2.0的过程中,虽然左、右线隧道拱顶上部地表出现最大沉降值的位置并未发生较大变化,但左、右线隧道地表沉降曲线的峰值存在逐渐融合的趋势,这是由于右线隧道半径 r_2 的增大过程,相当于逐渐减小了双线隧道间距,导致双线隧道间的相互作用逐渐增大,致使左、右线隧道上方地表沉降变化情况趋向于融合。因此,在 r_2/r_1 从2.0增大至3.0的过程中,双线隧道上方地表的“左高右低”非标准“W”形沉降变形逐渐转变为仅有一个沉降最大值点的“中间低、两边高”的“V”形,地表沉降曲线也完成了由“双峰”曲线向“单峰”曲线的融合,且当 $r_2/r_1=3.0$ 时,的地表最大沉降值及其他位置处的地表沉降值均大于其他工况时的地表沉降值。这是由于在左线隧道半径保持不变的情况下,右线隧道半径 r_2 从6 m增大至8 m的过程中,双线隧道间的相互影响不可忽略且影响程度逐渐增大,致使双线隧道盾构施工扰动对地表的影响从相对独立到趋于统一,且影响程度也相应地逐渐增大,从而使得 $r_2/r_1=3.0$ 时的双线隧道盾构施工产生的地表沉降值及其最大值均大于前述其他工况中。由此,可确定双线隧道半径(r_1, r_2)是双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引

起地表沉降变形的主要影响因素,则从沉降曲线形状变化的角度考虑,可根据沉降曲线在 $r_2/r_1=2.0$ 时由“双峰”开始变为“单峰”,确定双线隧道半径比 r_2/r_1 影响下的地表沉降变形临界参数比值范围为 $r_2/r_1>2.0$,据此预判双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起地表沉降变形的大致形状。

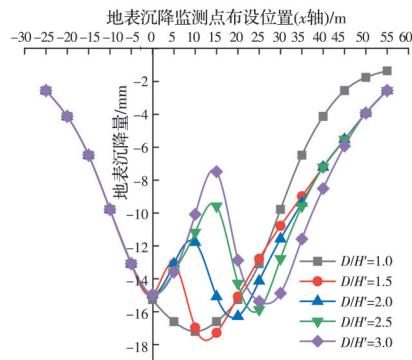
4.3 隧道轴心距与埋深比 D/H' 变化的影响

采用无量纲参数分析方法探明隧道轴心距与埋深的变化对双线非水平隧道盾构施工地表沉降的影响。由于隧道轴线连线与水平面夹角 α 和双线隧道半径(r_1, r_2)均为不变量,因此,双线隧道轴心间距 D 的变化将引起右线隧道埋深 h'' 的变化,即 h'' 可由 D 确定,但左线隧道埋深 H' 则不受 D 的影响,为保证无量纲参数能反映地表沉降曲线的变化规律,选取双线隧道轴心间距 D 与左线隧道收敛变形后的埋深 H' 之比 D/H' 作为无量纲参数,研究 D/H' 对地表沉降的影响规律。基于前述工程案例,分别利用预测模型计算隧道轴心距与埋深比 D/H' 为1.0、1.5、2.0、2.5、3.0时的地表沉降量,共分为5种工况,如表4所示,其对应的计算结果如图14所示。

表4 不同隧道轴心距与埋深之比 D/H' 的工况统计表Table 4 Statistics of working conditions for different tunnel axis distance and burial depth ratio D/H'

工况	隧道轴心连线与水平面夹角 $\alpha/(\circ)$	隧道轴心距与埋深比 D/H'	左线隧道半径 r_1/m	右线隧道半径 r_2/m
①	10	1.0	3	3
②	10	1.5	3	3
③	10	2.0	3	3
④	10	2.5	3	3
⑤	10	3.0	3	3

由图14可知,当 $D/H'=1.0$ 时,双线隧道上方地表变形呈现为仅有一个沉降最大值点的“中间低、两边高”的“V”形;而当 D/H' 从1.0逐渐增大至1.5时,双线隧道上方地表变形开始变化,从“中间低、两边高”的“V”形逐渐转变为“左高右低”的“W”形,且地表沉降曲线也由“单峰”变为“双峰”;而随着 D/H' 继续增大,从1.5逐渐增大至3.0时,双线隧道上方地表变形也继续发生变化,从“左高右低”的

图14 不同隧道轴心距与埋深之比 D/H' 的地表沉降曲线图Fig.14 Surface settlement curves for different tunnel axis distance and burial depth ratio D/H'

“W”形逐渐转变为“左低右高”的“W”形,且地表沉降曲线仍保持“双峰”,但至此地表沉降变形逐渐趋于稳定形态。这一点可根据陈春来等^[21]的研究成果解释:双线盾构隧道施工过程中,地表沉降曲线形状受隧道轴心间距的影响,且由于控制左线隧道收敛变形后的埋深 H' 为不变量,因此,当隧道轴心间距增大时, D/H' 也随之增大,故使得沉降曲线由 V 形转变为 W 形。同时,在 D/H' 从 1.5 增大至 3.0 过程中,每种工况对应的沉降曲线“双峰”之间的沉降最小值以及沉降曲线的整体沉降值却均逐渐减小,表明随着隧道轴心距与埋深之比 D/H' 的逐渐增大,左、右线隧道之间的相互影响及其对上部地表沉降的影响均不断减小。又因为在讨论 D/H' 对地表沉降的影响规律时,根据控制变量法的基本原理控制双线隧道轴心间距 D 为单一变量,因此,可确定隧道轴心间距 D 是双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起地表沉降变形的主要影响因素。基于此,从沉降曲线形状变化的角度考虑,可根据沉降曲线在 $D/H' = 1.0$ 时由“单峰”开始变为“双峰”,确定隧道轴心距与埋深之比 D/H' 影响下的地表沉降变形临界参数比值范围为 $D/H' < 1.0$,据此预判双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起地表沉降变形的大致形状。

综上所述,根据双线平行盾构隧道任意布置方式下的施工特点,结合上述主要影响因素的无量纲参数分析结果,确定双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起地表沉降曲线形状发生变化时的临界参数值为 $[\alpha, r_2/r_1, D/H'] = [60^\circ, 2.0, 1.0]$,据此可初步判断任一工况下的地表沉降曲线形状呈“V”形或“W”形,即当 $\alpha > 60^\circ$ 且 $r_2/r_1 > 2.0$ 和 $D/H' < 1.0$ 同时成立时,可判定此时的地表沉降曲线形状呈“V”形,除此之外,任何情况下地表沉降曲线形状将近似呈“W”形,从而为双线平行盾构隧道任意布置

方式下施工引起地表沉降计算结果的合理性初步检验提供一种快捷有效的方法,保证了双线平行盾构隧道任意布置方式下施工的安全性。

5 结论

1)改进经典二维 Peck 模型,建立的双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起的地表沉降预测模型能够考虑隧道轴心连线与水平面夹角、双线隧道半径、隧道轴心间距、双线隧道埋深等双线隧道布置因素以及隧道盾构施工扰动造成的地层土体损失率和收敛模式等施工因素对地表变形的影响。

2)基于依托工程对比现场监测和数值模拟的结果可知,预测模型计算结果与现场监测和数值模拟结果均拟合良好,且与地表沉降现场监测结果的整体变化趋势一致,可有效揭示双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起地表沉降的变化规律,具有良好的工程适用性。

3)双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起地表沉降变形的主要影响因素包括隧道轴心连线与水平面夹角 α 、双线隧道半径(r_1, r_2)和隧道轴心间距 D ,且地表沉降曲线形状从“V”形至“W”形间变化的临界参数值 $[\alpha, r_2/r_1, D/H']$ 为 $[60^\circ, 2.0, 1.0]$,则据此可预判双线平行盾构隧道任意布置方式下施工引起地表沉降变形的大致形状,并可初步检验地表沉降计算结果的合理性,在实际工程中应注意这 3 种因素对地表沉降变形的影响。

4)建立的预测模型尚未考虑任意布置方式下双线隧道盾构施工先后顺序的时效性影响,也未考虑地下水渗流、隧道椭圆化收敛等在内的其他类型收敛模式以及地层土体损失率过大而导致开挖过程中地层土体塑性变形的影响,在后续研究中将更全面地考虑这些因素的影响,以构建精度更高的地表沉降预测模型。

参考文献

- [1] 肖红菊,孙玉永.上软下硬复合地层中盾构隧道开挖面稳定性分析[J].中国铁道科学,2022, 43(5): 70-77
XIAO H J, SUN Y Y. Stability analysis of excavation surface of shield tunnel in upper-soft and lower-hard composite strata [J]. China Railway Science, 2022, 43 (5): 70-77 (in Chinese)
- [2] 邱明明,杨果林,段君义,等.近距双线盾构隧道开挖诱发地层变形演变规律及数值模拟[J].自然灾害学报,2021, 30(1): 60-69
QIU M M, YANG G L, DUAN J Y, et al. Evolution

- rules and numerical simulation of stratum deformation induced by close-spaced twin tunnels shield construction [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(1): 60-69 (in Chinese)
- [3] 丁智, 冯丛烈, 董毓庆, 等. 先行、后行盾构不同位置施工对土体变形影响研究[J]. *铁道学报*, 2022, 44(3): 158-170.
- DING Z, FENG C L, DONG Y Q, et al. Effect of twin-tunnel shield tunnelling on ground movement: Various relative positions between two shield machines [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(3): 158-170 (in Chinese)
- [4] 张治国, 张成平, 奚晓广. 双线隧道不同布置方式下相互作用影响的地层位移解析[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(2): 262-271.
- ZHANG Z G, ZHANG C P, XI X G. Closed solutions to soil displacements induced by twin-tunnel excavation under different layout patterns [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(2): 262-271. (in Chinese)
- [5] 魏纲, 周杨侃. 随机介质理论预测近距离平行盾构引起地表沉降[J]. *岩土力学*, 2016, 37(Sup2): 113-119.
- WEI G, ZHOU Y. 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(Sup2): 113-119. (in Chinese)
- [6] FENG X J, WANG P, LIU S F, et al. Mechanism and law analysis on ground settlement caused by shield excavation of small-radius curved tunnel [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(6): 3473-3488.
- [7] LI S H, ZHANG M J, LI P F. Analytical solutions to ground settlement induced by ground loss and construction loadings during curved shield tunneling [J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2021, 22(4): 296-313.
- [8] LUO Z J, LI Z, TAN J Z, et al. Three-dimensional fluid-soil full coupling numerical simulation of ground settlement caused by shield tunnelling [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020, 24(8): 1261-1275.
- [9] WANG X T, VON SCHMETTOW T, CHEN X S, et al. Prediction of ground settlements induced by twin shield tunnelling in rock and soil-A case study[J]. *Underground Space*, 2022, 7(4): 623-635.
- [10] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground. State of the art report [C]//ISSMFE. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London: ISSMFE, 1969: 225-290.
- [11] 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): 445-468.
- [12] O' REILLY M P, NEW B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction [C]// Proceedings of the Tunnelling 82, 1982: 173-181.
- [13] 师刚, 袁浩旭, 张澄玄, 等. 基于 Peck 公式的双线隧道地面沉降模型及参数研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2022, 25(1): 161-165.
- SHI G, YUAN H X, ZHANG C X, et al. Study on ground settlement model and parameters of twin-line tunnel based on peck formula [J]. *Urban Mass Transit*, 2022, 25(1): 161-165 (in Chinese)
- [14] 张忠苗, 林存刚, 吴世明, 等. 泥水盾构施工引起的地面固结沉降实例研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46(3): 431-440.
- ZHANG Z M, LIN C G, WU S M, et al. Case study on ground consolidation settlement caused by slurry shield construction [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, 46(3): 431-440. (in Chinese)
- [15] 尹光明, 傅鹤林, 侯伟治, 等. Peck 公式参数的几种取值方法研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(7) 2015-2022.
- YIN G M, FU H L, HOU W Z, et al. Introduction of several methods of value of Peck formula parameters [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(7): 2015-2022. (in Chinese)
- [16] 张继超, 曾垂刚, 崔乐健, 等. 基于 Loganathan & Poulos、Clough 修正公式的浅埋超大直径盾构隧道地面沉降预测[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(Sup1): 274-280.
- ZHANG J C, ZENG C G, CUI L J, et al. Ground settlement prediction of shallow-buried super-large-diameter shield tunnel based on Loganathan & Poulos and Clough modified formulas [J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(Sup1): 274-280. (in Chinese)
- [17] 贾宝新, 高宗贤, 惠鹏飞. 上软下硬地层隧道盾构施工引起的地表沉降研究[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(3): 1083-1088.
- JIA B X, GAO Z X, HUI P F. A proper approach to the surface settlement induced by the shield tunneling through the upper-soft and lowerhard ground[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(3): 1083-1088. (in Chinese)
- [18] 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(Sup 1): 3543-3560.

- ZHU C H, LI N. Estimation and regularity analysis of maximal surface settlement induced by subway construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Sup 1): 3543-3560. (in Chinese)
- [19] 刘鹏. 城市地铁隧道沉降预测及变形分析[D]. 西安: 西安科技大学: 35-44.
- LIU P. Settlement prediction and deformation analysis of urban subway tunnel [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology: 35-44. (in Chinese)
- [20] 穆继立, 许英姿. 盾构施工引起的地表横向沉降槽分析 [J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 313-316, 322.
- QU J L, XU Y Z. Analysis of ground traverse settle-
ment trough caused by shield construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 313-316, 322. (in Chinese)
- [21] 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 C L, ZHAO C L, WEI G, 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. (in Chinese)

(编辑 胡玲)