

文章编号:1674-599X(2022)04-0065-07

新建隧道斜交下穿既有隧道变形预测模型研究

蔡光伟¹,刘振兴¹,钟可¹,宾彬¹,胡江锋²

(1. 长沙市轨道交通集团有限公司,湖南 长沙 410000;2. 中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075)

摘 要:为探究新建隧道斜交下穿既有隧道施工所引起的地层沉降变形规律,避免施工中既有隧道产生较大的沉降变形,影响正常的交通运营。根据沉降槽宽度的修正公式,推导出正常地层下新建隧道开挖引起的地层变形曲线,并基于当层法原理,考虑既有结构的刚度和既有隧道与新建隧道的夹角对沉降槽曲线的影响,推导出隧道斜交下穿既有隧道情况下任意地层沉降变形曲线的预测公式。通过工程实例分析,验证了该计算公式的可靠性,为类似的隧道斜交下穿既有隧道工程提供参考。

关键词:新建隧道;斜交下穿;既有隧道;Peck公式;当层法

中图分类号:U452

文献标志码:A

Study on deformation prediction model of the existing tunnel obliquely crossed by new tunnel

CAI Guangwei¹, LIU Zhenxing¹, ZHONG Ke¹, BIN Bin¹, HU Jiangfeng²

(1. Changsha Metro Group Co., Ltd., Changsha 410000, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: This paper aims to explore the rule of formation settlement induced by the construction of new tunnel obliquely passing underneath an existing tunnel, and to avoid the large settlement of the existing tunnel affecting the normal traffic operation. The deformation curve of normal strata caused by the excavation of the new tunnel is derived based on the modified formula for the width of settlement groove. Then, based on the equivalent layered principle, considering the effects of structure stiffness and the angle between two tunnels on the curve of settlement groove, the prediction formula is deduced for the deformation curve of arbitrary strata caused by the excavation of the new tunnel under an existing tunnel. The reliability of the prediction formula is verified by the analysis of engineering examples. This study can provide a reference for similar cases.

Key words: new tunnel; oblique underpass; existing tunnel; Peck formula; equivalent layered method

随着城市地下空间的发展,轨道交通运营管理的路径日益完善,新建地铁隧道会有与既有隧道近接施工的情况。由于地层及设计等多种因素的影响,新旧隧道间交叠情况的复杂性,新建盾构隧道施工会对地层土体产生扰动,引起地层土体和既有隧道的沉降变形,对既有隧道的安全运营产生隐

患。因此,研究新建隧道斜交下穿既有隧道的变形计算与预测具有重要意义。

目前,国内外学者对新建地铁隧道穿越既有隧道工程方面展开大量研究。主要研究方法有:①经验公式法。韩焯等人^[1]从国内外地铁下穿的典型案例入手,基于刚度修正法和实测数据对既有沉降

收稿日期:2021-05-10

基金项目:2021年长沙市住房和城乡建设局项目“盾构隧道长距离交叠、并行近接下穿运营地铁隧道施工安全控制技术研究”

作者简介:蔡光伟(1975—),男,长沙市轨道交通集团有限公司高级工程师。

变形进行分析,提出了预测既有线沉降变形的简便方法。王剑晨等人^[2-3]通过实际工程数据对文献[1]提出的预测计算公式的参数进行拟合,提高准确率。②解析法。通常是基于Mindlin经典解计算新建隧道开挖作用于既有隧道的附加应力。张琼方等人^[4-6]分别将既有隧道简化为Euler-Bernoclli梁、Winkler梁和Timoshenko梁,再建立变形平衡微分方程,求解出既有隧道的变形数值解。③数值模拟法。汪洋等人^[7]采用相似模型试验和有限元模型分析相结合的方法,得到在围岩条件、隧道净距等影响下盾构隧道正交下穿施工时既有隧道的变形规律。张孟喜等人^[8]采用PFC^{2D}模拟隧道正交下穿施工,总结出沿开挖纵向开挖面塌陷变形规律。张建等人^[9]结合现场实测数据和数值模拟,得出盾构近接下穿施工引起的地层变形规律。④模型试验法。黄德中等人^[10-11]采用离心模型试验分别对盾构上穿、下穿既有隧道施工进行了模拟研究,通过实测数据分析了既有隧道的纵向变形规律。

从以上的研究成果看,应用解析法公式预测新建隧道下穿施工引起既有隧道沉降变形较多,应用经验公式法也较少。由于解析法计算公式的复杂性,需采用MATLAB软件进行求解,在工程应用中并不方便。经验公式法因其简单,应用最广,但是由于既有隧道的存在,增大了地层的复杂性,其预测变形的难度显著增加。本研究先根据实际工程案例,参考魏纲^[12]提出的沉降槽宽度的修正公式,推导出新建隧道引起的地层沉降变形曲线。借鉴周中等人^[13]提出新建隧道正交下穿既有隧道引起的既有隧道底板处变形预测曲线公式。结合当层法原理,推导出新建地铁隧道斜交下穿既有隧道的变形计算与预测理论模型,并与工程实例进行对比验证。

1 地表沉降变形计算

1969年PECK通过分析隧道开挖引起地表沉降的实测数据发现,地表沉降槽曲线近似于正态分布的形式,地表沉降槽曲线如图1所示,其中 W 为隧道中心至地表沉降区边缘水平距离, β 为土体内摩擦角, h 为隧道轴线埋深。地表的沉降槽曲线预测公式为:

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

$$S_{\max} = \frac{V_s}{i\sqrt{2\pi}} = \frac{AV_1}{i\sqrt{2\pi}} \approx \frac{0.313V_1D^2}{i} \quad (2)$$

式中: x 为横截面上的点到隧道中心线的水平距离, m ; S_x 为该点的地沉降值, m ; $S_{\max}$ 为地表横向沉降槽最大值, m ; V_s 为单位长度的沉降槽体积; V_1 为地层损失率; A 为隧道开挖面积, m^2 ; D 为隧道直径, m ; i 为沉降槽宽度, m 。

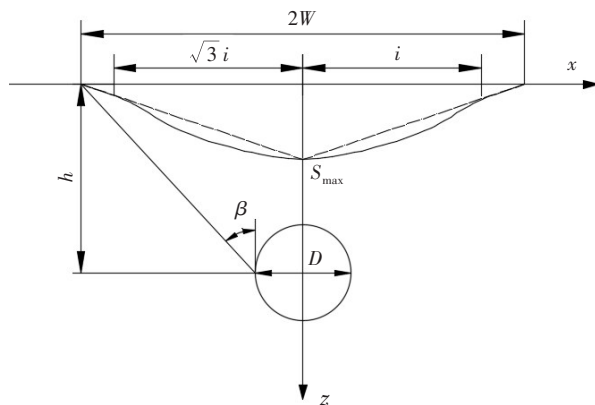


图1 Peck公式预测地表沉降曲线

Fig. 1 Surface settlement predicted by the Peck formula

Peck公式中,地层损失率 V_1 和沉降槽宽度 i 属于两个重要参数。地层损失率 V_1 决定了沉降曲线的极值大小;沉降槽宽度 i 决定宽而浅或窄而深的曲线形态。由于实际工程的具体情况不同,这两个参数的取值也相差较大。O'REILLY等人^[14]通过分析英国伦敦地区隧道施工所引起地表沉降位移的实测数据,提出沉降槽宽度 i 和隧道轴线埋深 h 满足线性相关,相应的沉降槽宽度系数为 K ,计算式为:

$$i = Kh \quad (3)$$

当分析地层内部沉降规律时,地层内部沉降仍近似服从高斯分布^[14]。韩焱^[15]在Mair公式基础上对地表以下的沉降槽宽度进行修正,计算式为:

$$K^d = \eta^d K_0 \quad (4)$$

$$\eta^d = \frac{1 - a(z/h)}{1 - z/h} \quad (5)$$

式中: K^d 为距地表高度为 z 的地层沉降槽宽度系数; K_0 为地表沉降槽宽度系数; η^d 为考虑隧道埋深和计算地层深度的沉降槽宽度影响系数; a 为考虑地层情况的参数,黏性土内可取0.65,砂类土内为0.50。

2 新建隧道下穿既有隧道的地层沉降变形计算

目前,有两种比较简便的预测新建隧道下穿既有隧道的地层沉降变形计算方法:

1) 韩煊^[1]通过分析国内外地铁下穿既有隧道的典型案例,基于刚度修正法,结合实测数据,对既有线路的变形进行预测,其计算式为:

$$S_x = \frac{A \cdot V_1^t}{\sqrt{2\pi} K^t (h - z)} \exp\left[-\frac{x^2}{2K^t (h - z)^2}\right] \quad (6)$$

$$V_1^t = \lambda^\alpha \lambda^\varepsilon V_1 \quad (7)$$

$$K^t = \eta^d \eta^M K_0 \quad (8)$$

式中: S_x 为既有隧道变形, m; A 为新建隧道开挖面积, m^2 ; h 为新建盾构隧道埋深, m; z 为地层内计算平面到地表的竖向距离, 这里指既有隧道底板到地表的竖向距离, m; V_1^t 为修正后的地层损失率; λ^α 为斜交新建隧道轴线偏离一般正交情况下夹角 α 对地层损失率的修正系数, 取 $\lambda^\alpha = 1/\cos \alpha$, α 取值 $(-90^\circ, 90^\circ)$; λ^ε 为地层损失率的修正系数; K^t 为修正后的沉降槽宽度系数; η^M 为既有隧道刚度对沉降槽宽度的影响系数。

新建隧道斜交下穿既有隧道施工导致既有隧道变形如图2所示, x_0 轴为既有隧道与新建隧道正交时既有隧道轴线; x 轴为既有隧道与新建隧道一般斜交时既有隧道轴线; y 轴为新建隧道轴线; α 为 x_0 轴与 x 轴的偏转角度; S_{x_0} 为正交下穿时既有隧道位移变形量; S_x 为一般斜交时既有隧道变形量。由式(6)~(8)可知, 该方法考虑了新建隧道与既有隧道斜交时既有隧道的角度、刚度、地层加固措施及地层埋深对既有隧道沉降变形的影响, 但根据文献[1], 刚度修正系数是根据北京地区的某工程拟合而来, 适用性难以确定, 因此需要进一步研究。

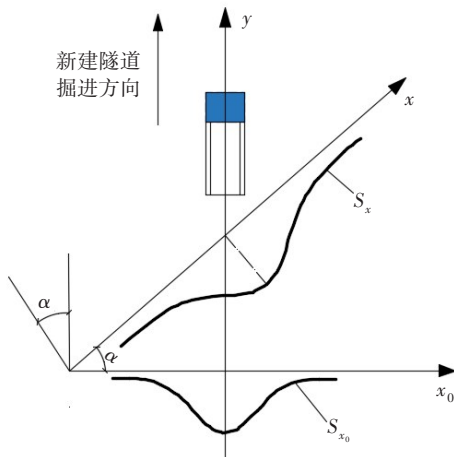


图2 既有隧道与新建隧道斜交

Fig. 2 The existing tunnel intersects diagonally with the new tunnel

2) 周中^[13]基于当层法原理, 新建地铁隧道与既有隧道在三层材料复杂地层下, 近似正交时, 推导出既有隧道底板在任意深度的位移变形预测表达式为:

$$S(x) = \frac{0.313 V_1 D^2}{K_0 (0.35 h_1' + 0.35 h_2' + h_3)} \times \exp\left[\frac{-x^2}{2K_0^2 (0.35 h_1' + 0.35 h_2' + h_3)^2}\right] \quad (9)$$

式中: D 为新建隧道直径, m; h_1' 和 h_2' 为经过当层法转换后的两层上覆土层厚度, m; h_3 为本层土层覆盖厚度, m。

该方法可进一步完善既有隧道刚度对沉降槽曲线影响的研究, 将“刚度修正”巧妙转化为“深度修正”, 适用于新建隧道与既有隧道正交的情况。由于该方法未考虑新建隧道与既有隧道斜交等其他情况, 因此需要进一步研究。

3 新建隧道斜交下穿既有隧道变形预测模型研究

3.1 天然土层沉降变形预测计算

魏纲^[12]对现有学者的计算公式进行修正, 使 Peck 公式中重要参数 i 适用性更广, 且对姜忻良等人^[16-17]的沉降槽宽度曲线修正公式进行拟合, 其效果较好, 计算式为:

$$i(z) = i_0 (1 - z/h)^n \quad (10)$$

其中, $i_0 = K_0 h$ 。

式中: n 为隧道半径和土层条件的影响系数, 对于黏性土层中 n 的取值范围在 $[0.35, 0.85]$, 对于砂土层中 n 的取值范围在 $[0.85, 1.00]$; i_0 为地表沉降槽宽度; z 为预测地层距离地表的竖向距离; K_0 为地表沉降槽宽度系数; h 为新建隧道轴线距地表的竖向距离。

根据式(1)~(3)和式(9), 可得地层任意深度处无既有隧道情况下, 新建隧道开挖所引起距离隧道轴线 x 的地层沉降曲线:

$$S(x) = \frac{0.313 V_1 D^2}{K_0 h (1 - z/h)^n} \times \exp\left[\frac{-x^2}{2K_0^2 h^2 (1 - z/h)^{2n}}\right] \quad (11)$$

式中: h 为新建隧道的埋深。

3.2 隧道斜交下穿既有隧道沉降变形预测计算

当层法原理最早是由前苏联学者帕克斯洛夫提出, 不少学者结合实际工程验证其可行性后, 广

泛应用于预测地表沉降及既有结构变形。其原理是将双层材料中的上层土体材料换算成与下层土体同等性质的材料,通过计算改变上层材料厚度的方式得以实现。

具体换算方式为:上层土的厚度、弹性模量、泊松比、摩擦角分别为 h_1 、 E_1 、 μ_1 、 φ_1 ;下层土的厚度、弹性模量、泊松比、摩擦角分别为 h_2 、 E_2 、 μ_2 、 φ_2 。换算后,上层土的厚度变为 h_1' ,其他物理力学参数与下层土一致。

$$h_1' = h_1 \left(\frac{\rho_1 E_1}{\rho_2 E_2} \right)^a \quad (12)$$

当上、下土层密度近似时:

$$h_1' = h_1 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^a \quad (13)$$

欧阳文彪等人^[18]推导新建隧道下穿既有建筑的计算公式时,取 $a=0.33$ 。王剑晨等人^[19]推导新建隧道下穿既有隧道的计算公式时,取 $a=0.50$ 。本研究推导新建隧道斜交下穿既有隧道沉降变形预测计算式时,取 $a=0.50$ 。

以三层复杂地层为例,如图3所示^[14]。基于当层法原理,对三层复杂地层的坐标系进行转换,其转换后的坐标系为:

$$x' = x \quad (14)$$

$$z' = \begin{cases} z \left(\frac{E_1}{E_3} \right)^\alpha, & z \leq h_1 \\ (z - h_1) \left(\frac{E_2}{E_3} \right)^\alpha + h_1 \left(\frac{E_1}{E_3} \right)^\alpha, & h_1 \leq z \leq h_1 + h_2 \\ (z - h_1 - h_2) + h_1 \left(\frac{E_1}{E_3} \right)^\alpha + h_2 \left(\frac{E_2}{E_3} \right)^\alpha, & h_1 + h_2 \leq z \end{cases} \quad (15)$$

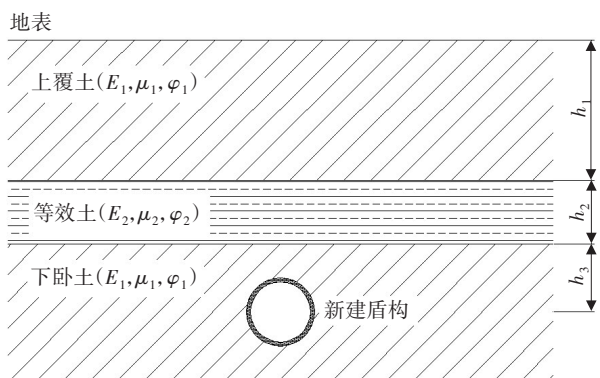


图3 既有隧道等效土层示意

Fig. 3 Equivalent soil layer diagram of existing tunnel

根据式(13),以第三层土为转换基础,经当层法转换的新建隧道埋深高度为:

$$h' = h_1 \left(\frac{E_1}{E_3} \right)^\alpha + h_2 \left(\frac{E_2}{E_3} \right)^\alpha + h_3 \quad (16)$$

$$= h_1' + h_2' + h_3$$

考虑到任意土层深度 z 经当层法转换后的深度 z' 存在3种工况,见式(15)。现仅以 z' 代替,再结合式(11)、(15)、(16),得到不考虑地层加固时新建隧道正交下穿既有隧道的地层沉降曲线计算式:

$$S(x) = \frac{0.313 D^2 V_1}{K_0 (h_1' + h_2' + h_3) \left(1 - \frac{z'}{h_1' + h_2' + h_3} \right)^n} \times \exp \left[\frac{-x'^2}{2 K_0^2 (h_1' + h_2' + h_3)^2 \left(1 - \frac{z'}{h_1' + h_2' + h_3} \right)^{2n}} \right] \quad (17)$$

当新建隧道斜交下穿既有隧道时,考虑到斜交角度及穿越前地层预加固的影响,结合式(7)、(17),可得到地层任意深度处新建隧道斜交下穿既有隧道的地层沉降曲线计算式:

$$S(x) = \frac{0.313 D^2 \lambda^{\frac{V_1}{\cos \alpha}}}{K_0 (h_1' + h_2' + h_3) \left(1 - \frac{z'}{h_1' + h_2' + h_3} \right)^n} \times \exp \left[\frac{-x'^2}{2 K_0^2 (h_1' + h_2' + h_3)^2 \left(1 - \frac{z'}{h_1' + h_2' + h_3} \right)^{2n}} \right] \quad (18)$$

既有隧道底板处位移曲线计算式为:

$$S(x) = \frac{0.313 D^2 \lambda^{\frac{V_1}{\cos \alpha}}}{K_0 (h_1' + h_2' + h_3) \left(1 - \frac{h_1' + h_2'}{h_1' + h_2' + h_3} \right)^n} \times \exp \left[\frac{-x'^2}{2 K_0^2 (h_1' + h_2' + h_3)^2 \left(1 - \frac{h_1' + h_2'}{h_1' + h_2' + h_3} \right)^{2n}} \right] \quad (19)$$

4 实例验证

本研究选取南宁市轨道交通2号线^[20]玉岭路站—那福路站区间新建隧道斜交下穿新村停车场出入场线区间既有隧道作为工程实例进行计算分析。既有隧道与新建隧道截面相同,均为圆形,管片外径均为6.00 m,厚0.30 m,C50混凝土;下穿段处,新建隧道埋深21.93 m,既有隧道与新建隧道竖向间距为2.26 m,斜交夹角为23.2°。两隧道平面相

对位置及既有线隧道监测点布置如图4所示。下穿段主要位于含砾(卵)石黏性土地层,根据现场勘察结果,其压缩模量为14 MPa,泊松比为0.35,内摩擦角为 21° ,黏聚力为25 kPa。两隧道纵向相对位置如图5所示。

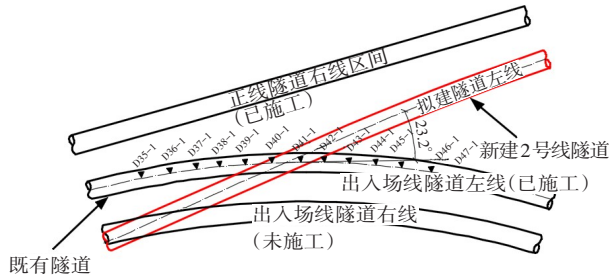


图4 既有隧道与新建隧道平面相对位置

Fig. 4 Relative position in plane of the existing tunnel to the new tunnel

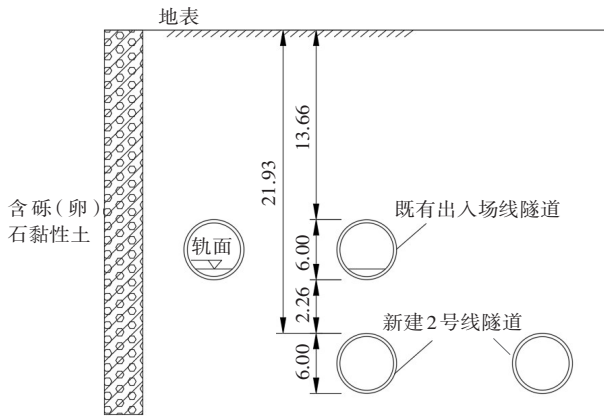


图5 既有隧道与新建隧道纵向相对位置(单位:m)

Fig. 5 Longitudinal relative position

of the existing tunnels to the new tunnels(unit:m)

由于既有隧道截面为圆环形断面,管片外径为 D ,厚度为 r 。根据材料力学,可将既有隧道按抗弯刚度等效为实心圆梁,直径仍为 D ,即等效后的截面弹性模量计算式为:

$$E \frac{\pi D^4}{64} = E' \frac{\pi}{64} [D^4 - (D - r)^4] \quad (20)$$

通过将既有出入场线隧道的截面带入式(20),得到等效弹性模量6.40 GPa。通过将等效后的弹性模量带入公式(16)中,当层指数 a 取0.50,计算得到既有隧道转换土层后的厚度为128.28 m。由于土层为含砾(卵)石黏性土地层,土层影响系数 $n=0.50$,将换算后的坐标系带入(10)中,取 $K_0=0.50$,得到沉降槽宽度 $i=13.92$ m。根据南宁地区砾石黏性土地层经验取 $V_1=0.77\%$ ^[21],新建隧道与既有隧道的夹角为 23.2° ,即 $\alpha = 90^\circ - 23.2^\circ = 66.8^\circ$ 。不考虑土层

加固的影响,取 $\lambda^* = 1$ 。这些参数带入式(19)计算,得到新建隧道斜交下穿既有隧道底板处位移变形量,并与本研究预测曲线进行对比,如图6所示。

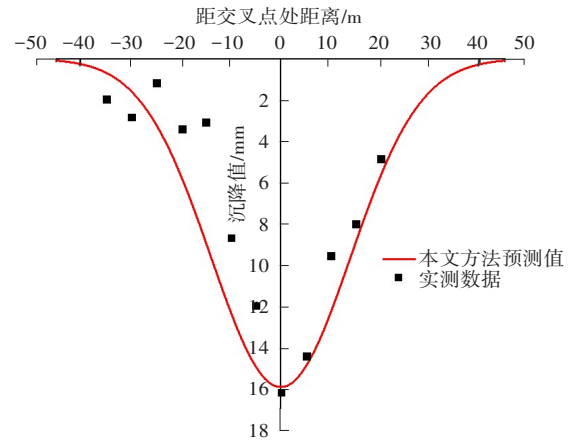


图6 预测与实际既有隧道变形沉降对比

Fig. 6 Comparison of predicted and actual settlements of the existing tunnel

从图6可以看出,既有隧道底板处预测变形与实测值形状相似,预测最大沉降变形为15.82 mm,实测最大沉降变形为16.07 mm,二者相差1.58%。误差产生的原因包括地层岩性、施工质量、施工方法以及测量误差等。预测沉降变形曲线与实测数据接近,满足施工要求。因此,本研究建议的既有隧道底部变形预测计算公式可为类似盾构隧道斜交下穿工程提供参考。

5 结论

本研究根据经典Peck公式,基于当层法原理,结合沉降槽宽度修正的计算公式及地层损失率的修正系数,推导出新建地铁隧道斜交下穿既有隧道的变形计算与预测理论模型。得到结论为:

1) 既有隧道的刚度和既有隧道与新建隧道的夹角对地层变形均产生了影响,但二者的影响机理不同。既有隧道的刚度通过改变沉降槽宽度,会改变沉降槽曲线窄而深的形态;既有隧道与新建隧道的夹角通过改变地层损失率,而改变沉降槽的极值。

2) 本研究以Peck公式为出发点,基于当层法原理,结合现有学者对Peck公式中重要参数进行研究,可推导出隧道斜交下穿既有隧道情况下任意地层的沉降变形曲线计算公式,具有良好的工程适用性。

3) 依托实际工程案例,用本研究提出的公式对既有隧道底板位移变形进行预测,得到预测结果与实测值的误差均在工程允许范围内,验证了该计算公式的可靠性。

参考文献(References):

- [1] 韩煊,刘赅炜,STANDING J R.隧道下穿既有线的案例分析与沉降分析方法[J].土木工程学报,2012,45(1): 134-141. (HAN Xuan, LIU Chengwei, STANDING J R. Structural settlement of existing tunnel caused by new tunnel excavated underneath[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 134-141. (in Chinese))
- [2] 王剑晨,张顶立,张成平,等.北京地区浅埋暗挖法下穿施工既有隧道变形特点及预测[J].岩石力学与工程学报,2014,33(5):947-956. (WANG Jianchen, ZHANG Dingli, ZHANG Chengping, et al. Deformation characteristics of existing tunnels induced by excavation of new shallow tunnel in Beijing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 947-956. (in Chinese))
- [3] 刘士海,贺美德,刘继尧.新建隧道斜交下穿既有盾构隧道的变形分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(1):263-272. (LIU Shihai, HE Meide, LIU Jiyao. Deformation analysis on the existing shield tunnel obliquely crossed by new tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 263-272. (in Chinese))
- [4] 张琼方,林存刚,丁智,等.盾构近距离下穿引起已建地铁隧道纵向变形理论研究[J].岩土力学,2015,36(S1):568-572. (ZHANG Qiongfang, LIN Cungang, DING Zhi, et al. Theoretical analysis of vertical deformation of existing metro tunnel induced by shield tunneling under-passing in a short distance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 568-572. (in Chinese))
- [5] 梁荣柱,夏唐代,胡军华,等.新建隧道近距离上穿对既有地铁隧道纵向变形影响分析[J].岩土力学,2016,37(S1):391-399. (LIANG Rongzhu, XIA Tangdai, HU Junhua, et al. Analysis of longitudinal displacement of existing metro tunnel due to construction of above-crossing new tunnel in close distance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 391-399. (in Chinese))
- [6] 梁荣柱,宗梦繁,康成,等.考虑隧道剪切效应的隧道下穿对既有盾构隧道的纵向影响[J].浙江大学学报(工学版),2018,52(3):420-430,472. (LIANG Rongzhu, ZONG Mengfan, KANG Cheng, et al. Longitudinal impacts of existing shield tunnel due to down-crossing tunnelling considering shield tunnel shearing effect[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(3): 420-430, 472. (in Chinese))
- [7] 汪洋,何川,曾东洋,等.盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J].铁道学报,2010,32(2):79-85. (WANG Yang, HE Chuan, ZENG Dongyang, et al. Model test and numerical simulation of influence of perpendicular undercross shield tunnel construction on existing tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(2): 79-85. (in Chinese))
- [8] 张孟喜,张梓升,王维,等.正交下穿盾构开挖面失稳的离散元分析[J].上海交通大学学报,2018,52(12):1594-1602. (ZHANG Mengxi, ZHANG Zisheng, WANG Wei, et al. Discrete element analysis for instability of undercrossing shield tunnel face[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2018, 52(12): 1594-1602. (in Chinese))
- [9] 张健,周中,邢凯.盾构隧道近接施工对地层变形的影响[J].交通科学与工程,2019,35(4):63-70. (ZHANG Jian, ZHOU Zhong, XING Kai. The influence of shield tunnel construction adjacent to the existing structure on deep soil displacement[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4): 63-70. (in Chinese))
- [10] 黄德中,马险峰,王俊淞,等.软土地区盾构上穿越既有隧道的离心模拟研究[J].岩土工程学报,2012,34(3):520-527. (HUANG Dezhong, MA Xianfeng, WANG Junsong, et al. Centrifuge modelling of effects of shield tunnels on existing tunnels in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 520-527. (in Chinese))
- [11] 马险峰,何蔺荞,王俊淞.软土地区新建盾构隧道下穿越既有隧道的离心模拟研究[J].长江科学院院报,2012,29(1):79-84. (MA Xianfeng, HE Linqiao, WANG Junsong. Centrifuge modeling on the effects of shield tunnel crossing below the existing tunnels in soft clay[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(1): 79-84. (in Chinese))
- [12] 魏纲.盾构隧道深层土体沉降槽宽度系数计算方法研究[J].公路交通科技,2010,27(4):110-115. (WEI Gang. Study on calculation method of width coefficient of subsurface settlement trough in shield tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(4): 110-115. (in Chinese))
- [13] 周中,陈云,缪林武.基于当层法的新建隧道下穿既有隧道引起的变形预测模型研究[J].现代隧道技术,

- 2020, 57(5): 99-103, 135. (ZHOU Zhong, CHEN Yun, MIAO Linwu. Study of equivalent layered method based prediction model for deformations caused by construction of new tunnels undercrossing existing tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(5): 99-103, 135. (in Chinese))
- [14] O'REILLY M P, NEW B M. Settlement above tunnels in the United Kindom-their magnitude and prediction [C]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1982(82): 173-181.
- [15] 韩焯. 隧道施工引起地层位移及建筑物变形预测的实用方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007. (HAN Xuan. The analysis and prediction of tunnelling-induced building deformations [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [16] 姜忻良, 赵志民, 李园. 隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1542-1544. (JIANG Xinliang, ZHAO Zhimin, LI Yuan. Analysis and calculation of surface and subsurface settlement trough profiles due to tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1542-1544. (in Chinese))
- [17] 孙玉永, 周顺华, 宫全美. 软土地区盾构掘进引起的深层位移场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 500-506. (SUN Yuyong, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei. Distribution of deep displacement field during shield tunneling in soft-soil areas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 500-506. (in Chinese))
- [18] 欧阳文彪, 丁文其, 谢东武. 考虑建筑刚度的盾构施工引致沉降计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 155-160. (OUYANG Wenbiao, DING Wenqi, XIE Dongwu. Calculation method for settlement due to shield tunnelling considering structure stiffness [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 155-160. (in Chinese))
- [19] 王剑晨, 刘运亮, 张顶立, 等. 下穿施工影响下既有隧道和地层的位移解析解[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S2): 678-683. (WANG Jianchen, LIU Yunliang, ZHANG Dingli, et al. The displacement solution of existing tunnel and ground by traversing construction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S2): 678-683. (in Chinese))
- [20] 于群. 盾构隧道近距离下穿既有隧道影响规律的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020. (YU Qun. Study on the influence law of shield tunnel under-passing the existing tunnel at short distance [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese))
- [21] 张盛红. 盾构隧道下穿施工对上部既有隧道的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. (ZHANG Sheng hong. Study on the effect of shield tunnel undercrossing construction on the upper existing tunnel [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese))

(责任编辑: 罗容; 校对: 欧兆虎; 英文编辑: 陈璐)

(上接第64页)

- Static elastic stability of long-span railway steel truss flexible arch bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(4): 16-21. (in Chinese))
- [10] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (CCCC Highway consultants Co., Ltd.. General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [11] 吴海军, 唐海陶, 何立. 大内倾角钢箱提篮拱几何非线性稳定性分析[J]. 公路与汽运, 2021(1): 95-98, 103. (WU Haijun, TANG Haitao, HE Li. Geometric nonlinear stability analysis of steel box basket arch with large inclination angle [J]. Highways & Automotive Applications, 2021(1): 95-98, 103. (in Chinese))
- [12] 邓安泰. 铜瓦门大桥稳定性分析与研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003. (DENG Antai. On the stability of tongwamen bridge [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003. (in Chinese))

(责任编辑: 罗容; 校对: 李脉 欧兆虎; 英文编辑: 陈璐)