

基于修正 Loganathan 公式的非水平布置双线平行盾构隧道施工引起土体位移计算方法^{*}

王超¹ 邹金锋¹ 李方² 刘波³ 饶兵兵⁴ 舒丹¹

(1. 中南大学土木工程学院, 410075, 长沙; 2. 中铁一局集团有限公司, 710054, 西安;

3. 中铁上海设计院集团有限公司, 200040, 上海; 4. 江西中昌工程咨询监理有限公司, 330038, 南昌)

摘要 [目的] 为研究双线平行盾构隧道非水平布置方式下, 由施工引起的周围土体位移规律, 提出一种基于修正 Loganathan 公式的土体位移计算方法。[方法] 介绍了 Loganathan 公式及相关假设; 考虑盾构隧道开挖扰动引起的地层损失、土体卸荷回弹和土体损失率沿掘进路径变化的综合影响, 修正 Loganathan 公式并建立单线盾构隧道周围土体位移解; 建立双线平行盾构隧道非水平布置方式下, 由施工引起的土体位移计算方法; 通过实际工程的现场监测和数值模拟结果, 验证所提计算方法的工程适用性。[结果及结论] 所提计算方法能够考虑隧道轴线连线与水平面夹角、双线隧道半径、隧道轴间距、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损失、土体卸荷回弹和土体损失率沿掘进路径变化等施工因素对土体位移的影响。地面沉降及土体水平位移的理论计算结果同现场监测结果和数值模拟结果之间的平均误差分别为 5.6%、0.6% 和 5.5%、5.3%, 均满足工程经验规定的 20% 的精度要求, 说明所提计算方法能够有效解决双线平行盾构隧道非水平布置方式下施工引起的土体位移计算问题, 具有良好的工程适用性。

关键词 双线平行盾构隧道; 修正 Loganathan 公式; 非水平布置

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.001

Calculation Method for Soil Displacement Caused by Non-horizontal Parallel Double-line Shield Tunnel Construction Based on Modified Loganathan Formula

WANG Chao¹, ZOU Jinfeng¹, LI Fang², LIU Bo³, RAO Bingbing⁴, SHU Dan¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, 410075, Changsha, China; 2. China Railway First Group Co., Ltd., 710054, Xi'an, China; 3. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., 200040, Shanghai, China; 4.

Jiangxi Zhongchang Engineering Consulting & Supervision Co., Ltd., 330038, Nanchang, China)

Abstract [Objective] To investigate the law of surrounding soil displacement induced by construction under the arrangement of non-horizontal parallel double-line shield tunnels, a soil displacement calculation method based on modified Loganathan formula is proposed. [Method] The Loganathan formula and its relevant assumptions are introduced. Considering the comprehensive effects of ground loss, soil unloading rebound, and variation of soil loss rate along the excavation path caused by shield tunnel excavation disturbance, the Loganathan formula is modified, and a solution for soil displacement around a single-line shield tunnel is established. Then, a calculation method for soil displacement induced by construction in the case of non-horizontal parallel double-line shield tunnels is developed. The engineering applicability of the proposed method is validated through field monitoring and numerical simulation results of actual projects. [Result & Conclusion] The proposed calculation method can account for factors such as the angle (θ) between the tunnel axis line and the horizontal plane, the radius (R_1, R_2) of double-line tunnels, the spacing (D) between tunnel axes, and the buried depth (H_1, H_2) of double-line tunnels, and the influence of construction factors such as ground loss, soil unloading rebound, and variation of soil loss rate along the excavation path caused by shield tunnel construction disturbance on soil displacement. The average errors between theoretical calculation and field monitoring/numerical simulation results for land subsidence and horizontal soil displacement are 5.6% and 0.6%, and 5.5% and 5.3%, respectively. These errors all meet the 20% accuracy requirement specified by engineering experience, demonstrating that the proposed calculation method can effectively address the soil displacement calculation problem induced by the construction of non-horizontal parallel double-line shield tunnels and has good

^{*} 南昌轨道交通集团 2020 年度科研计划项目 (2020HGKYB002)

engineering applicability.

Key words double-line parallel shield tunnel; modified Loganathan formula; non-horizontal arrangement

盾构法是城市地铁隧道工程建设中重要的施工方法,其具有施工质量高、施工速度快、适应性强等优点,获得了广泛的应用。但对于双线非水平隧道等特殊工程条件下的盾构隧道而言,盾构法施工将诱发施工过程中地面的不均匀沉降变形,因此对非水平布置双线平行盾构隧道施工引起的土体位移(以下简称“双线平行隧道施工引起的土体位移”)进行合理计算是隧道工程施工安全性方面的研究重点。

已有学者基于理论方法,对双线隧道盾构施工引起的地面沉降影响规律等方面开展了相关研究。文献[1]利用极限平衡原理,考虑土体内摩擦角的影响,修正了 Loganathan 公式,并提出了隧道在盾构施工过程中剪切扰动区域分布范围的计算公式。文献[2]利用数值模拟和现场监测相结合的方法,引入 Clough 修正公式计算沉降槽宽度系数,并对 Loganathan 公式、Celestino 公式进行了修正和非线性拟合分析。文献[3]基于改进的 Loganathan 公式和弹性等效理论,建立了多层黏性土中隧道开挖引起地面位移的半解析计算方法。文献[4]基于 Loganathan 公式、Peck 公式等半经验法,计算并分析了软土盾构隧道施工过程中的地面沉降发展规律。基于上述研究成果,不难发现 Loganathan 公式在盾构施工引起的土体及地面位移的计算方法中具有优势,但其往往应用于单线隧道,较少应用于双线或多线隧道。因此,有必要基于修正 Loganathan 公式开展双线平行隧道盾构施工引起土体位移问题的相关理论研究,以弥补 Loganathan 公式在理论与工程实践中的研究空缺,保证盾构隧道工程建设的安全性。

本文以南昌轨道交通 1 号线(以下简称“1 号线”)北延伸段工程为例,基于修正的 Loganathan 公式,开展双线平行隧道施工引起的土体位移计算方法研究。考虑地层损失、土体卸荷回弹和土体损失率沿掘进路径变化等因素的影响,同时结合双线平行盾构隧道非水平布置参数修正 Loganathan 公式,构建基于修正 Loganathan 公式的双线平行隧道施工引起的土体位移计算方法,并依托实际工程验证

所提计算方法的工程适用性。本文研究可为类似隧道工程建设中的施工变形控制提供理论指导与借鉴。

1 Loganathan 公式及相关假设

Loganathan 公式通常适用于计算不排水条件下软土地层损失引起的土体位移,且其是根据椭圆形土体移动平面进行分析的。在 Loganathan 公式中,地层土体中任一点的水平位移 $U(x, z)$ 和竖向位移 $S(x, z)$ 的解析表达式为^[1,5]:

$$U(x, z) = -\frac{(4Rg + g^2)x}{4} \left\{ \frac{1}{x^2 + (H - z)^2} + \frac{3 - 4\nu}{x^2 + (H + z)^2} - \frac{4z(H + z)}{[x^2 + (H + z)^2]^2} \right\} \exp \left[\frac{-1.38x^2}{(H + R)^2} - \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \quad (1)$$

$$S(x, z) = \frac{4Rg + g^2}{4} \left\{ \frac{H - z}{x^2 + (H - z)^2} + \frac{(3 - 4\nu)(H + z)}{x^2 + (H + z)^2} - \frac{2z[x^2 - (H + z)^2]}{[x^2 + (H + z)^2]^2} \right\} \exp \left[\frac{-1.38x^2}{(H + R)^2} - \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \quad (2)$$

式中:

x ——与隧道中心线的水平距离,单位 m;

z ——与地面的垂直距离,单位 m;

ν ——泊松比;

R ——隧道开挖半径,单位 m;

H ——隧道中心埋深,单位 m;

g ——地层土体损失的间隙参数,单位 mm。

Loganathan 公式将隧道周围土体产生的变形视为椭圆形非等量径向位移,因此在利用 Loganathan 公式计算土体位移时应满足以下假定:① 本文中的土体位移为某一断面的二维平面位移,即在开挖面被掘进一段时间后,受盾构施工扰动造成地层损失而引起的土体最大位移;② 假设地层土体为理想弹性体,符合不排水条件,且土质均匀、各向同性,土体位移仅由地层损失引起,不考虑其他因素的影响;③ 假设泊松比为 0.5,可使土体损失体积等于地面沉降槽体积。

基于此,采用 g 定义等量不排水土体损失率 ε_0 为:

$$\varepsilon_0 = \frac{4gR + g^2}{4R^2} \quad (3)$$

将 ε_0 以指数函数的形式拟合盾构隧道周围土

体的非等量变形,则有:

$$\varepsilon_{z=0} = \varepsilon_0 B e^{-\xi x^2} \quad (4)$$

式中:

ξ, B ——常数,可由边界条件求解获得;

$\varepsilon_{z=0}$ ——等量土体损失参数分量。

综上所述, $\varepsilon_{z=0}$ 可以进一步表示为:

$$\varepsilon_{z=0} = \varepsilon_0 \exp \left[\frac{-1.38x^2}{(H+R)^2} \right] \quad (5)$$

2 修正 Loganathan 公式及建立单线盾构隧道周围土体位移解

隧道开挖过程中,受土体回弹的影响,地层土体将会产生回弹变形。当土体卸荷回弹后,其地层损失将会有所减小,相应的,其引起的土体位移也随之减小。本节以单线盾构隧道为例,考虑土拱效应影响,根据土体卸荷回弹变形量,建立考虑土体回弹后修正的地层损失 $V_{\text{loss},1}$:

$$V_{\text{loss},1} = V_{\text{loss}} - \frac{2c(H-R)^2 + K\gamma \tan \varphi (H-R)^3}{E} \quad (6)$$

式中:

V_{loss} ——未考虑土体回弹变形影响的地层损失,单位 m^2 ;

c ——地层土体黏聚力,单位 kPa ;

K ——地层土体的主动土压力系数, $K = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$, φ 为地层土体内摩擦角,单位 $(^\circ)$;

γ ——地层土体重度,单位 kN/m^3 ;

E ——隧道拱顶地层土体回弹模量,单位 MPa 。

地层损失量通常同开挖面积和土体损失率有关,可以表示为^[6]:

$$V_{\text{loss}} = A \varepsilon_1 \quad (7)$$

式中:

A ——单线盾构隧道开挖面的横截面积, $A = \pi R^2$,单位 m^2 ;

ε_1 ——纵断面上考虑土拱效应影响的土体损失率。

联立式(6)和式(7),可以获得土拱效应影响下的地层纵断面土体损失率为:

$$\varepsilon_1 = \frac{V_{\text{loss},1}}{A} = \frac{V_{\text{loss}} E - 2c(H-R)^2 - K\gamma(H-R)^3 \tan \varphi}{\pi E R^2} \quad (8)$$

将盾构掘进过程中的土体损失假定为圆柱体,且沿掘进方向(y 轴)均匀分布,在已知土拱效应影响的条件下,可进一步获得沿盾构掘进方向(y 轴)土体卸荷回弹影响的土体损失率 ε_y ,则有:

$$\varepsilon_y = \frac{\varepsilon_1}{2} \left(1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + H_q^2}} \right) = \frac{V_{\text{loss}} E - 2c(H-R)^2 - K\gamma(H-R)^3 \tan \varphi}{2\pi E R^2} \times \left(1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + H_q^2}} \right) \quad (9)$$

式中:

y ——沿盾构掘进方向的坐标值,单位 m ;

H_q ——地层土体损失区域的形心至地面的距离,单位 m 。

由以往的文献研究结果可知,传统 Loganathan 公式中水平仰角 β 被设为 45° 的结论存在不足之处, β 应考虑隧道周围剪切扰动区中剪切扰动与开挖卸载的综合影响。根据文献[7-8]的研究结果,本文将 β 修正为 $45^\circ + \varphi/2$,修正后 β 所在的边界线与地面相交处的地面沉降量为 0。修正后,隧道施工过程中的 $\varepsilon_{z=0}$ 可以表示为:

$$\varepsilon_{z=0} = \frac{V_{\text{loss}} E - 2c(H-R)^2 - K\gamma(H-R)^3 \tan \varphi}{2\pi E R^2} \times \left(1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + H_q^2}} \right) \exp \left\{ \frac{-1.38x^2}{\left[R + \frac{H}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} \right\} \quad (10)$$

由式(8)可进一步求得盾构施工影响范围内,地层土体任一点 (x, y, z) 位置处受开挖影响而产生的地层土体损失率为:

$$\varepsilon_{(x,y,z)} = \varepsilon_y \exp \left\{ \frac{-1.38x^2}{\left[R + \frac{H}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} - \frac{0.69z^2}{H^2} \right\} \quad (11)$$

将式(11)分别代入式(1)和式(2)可实现对 Loganathan 公式在水平和竖直方向的修正。基于修正的 Loganathan 公式,考虑沿 y 轴土体损失率变化的影响,建立考虑土拱效应和掘进方向土体损失率变化的单线隧道盾构施工引起的土体位移解析计算式:

$$\begin{aligned}
U_{\text{双线}}^*(x, y, z) &= U_{\text{左}}^*(x, y, z) + U_{\text{右}}^*(x, y, z) = \\
& -\frac{R^2}{2} \left\{ \left[\varepsilon_2 x - \frac{\varepsilon_2 xy}{\sqrt{y^2 + H_{q_1}^2}} \right] \left\{ \frac{1}{x^2 + (H_1 - z)^2} + \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{3 - 4\nu}{x^2 + (H_1 + z)^2} - \frac{4z(H_1 + z)}{[x^2 + (H_1 + z)^2]^2} \right\} \times \right. \\
& \left. \exp \left\{ \frac{-1.38x^2}{\left[R_1 + \frac{H_1}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} - \frac{0.69z^2}{H_1^2} \right\} + \right. \\
& \left. \left[\varepsilon_3(x - L) - \frac{\varepsilon_3(x - L)y}{\sqrt{y^2 + H_{q_2}^2}} \right] \left\{ \frac{1}{(x - L)^2 + (H_2 - z)^2} + \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{3 - 4\nu}{(x - L)^2 + (H_2 + z)^2} - \frac{4z(H_2 + z)}{[(x - L)^2 + (H_2 + z)^2]^2} \right\} \times \right. \\
& \left. \exp \left\{ \frac{-1.38(x - L)^2}{\left[R_2 + \frac{H_2}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} - \frac{0.69z^2}{H_2^2} \right\} \right\} \quad (12) \\
S^*(x, y, z) &= \frac{\varepsilon_1 R^2}{2} \left[1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + H_q^2}} \right] \left\{ \frac{H - z}{x^2 + (H - z)^2} + \right. \\
& \left. \frac{(3 - 4\nu)(H + z)}{x^2 + (H + z)^2} - \frac{2z[x^2 - (H + z)^2]}{[x^2 + (H + z)^2]^2} \right\} \times \\
& \exp \left\{ \frac{-1.38x^2}{\left[R + \frac{H}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} - \frac{0.69z^2}{H^2} \right\} \quad (13)
\end{aligned}$$

式中：

H_1 、 H_2 ——左线、右线隧道中心埋深,单位 m;

ε_2 、 ε_3 ——土拱效应影响下,左线和右线隧道周围地层纵断面的土体损失率;

$U_{\text{左}}^*(x,y,z)$ 、 $U_{\text{右}}^*(x,y,z)$ ——左线和右线隧道盾构施工引起的土体内任一点的水平位移,单位 m;

$U_{\text{双线}}^*(x,y,z)$ ——双线平行盾构隧道非水平施工引起的土体内任一点的水平位移,单位 m;

H_{q_1} ——左线隧道周围土体损失区域的形心至地面的距离,单位 m;

H_{q_2} ——右线隧道周围土体损失区域的形心至地面的距离,单位 m;

$S^*(x,y,z)$ ——Loganathan 公式修正后地层土体中任一点的竖向位移,单位 m。

3 建立基于修正 Loganathan 公式的双线平行隧道施工引起的土体位移计算方法

多线隧道盾构施工引起的土体位移可视为多

单线隧道盾构施工引起土体位移相叠加的结果,以过左线隧道中心直线与地面交点为坐标原点,以该隧道中心直线为 z 轴,以地面所在直线为 x 轴,构建非水平布置双线平行盾构隧道的全局坐标系,其示意图如图 1 所示。其中:水平位移以 x 轴水平向右为正,竖向位移以 z 轴竖直向下为正。 y 轴以盾构掘进方向为正方向,则对于双线平行盾构隧道而言,由左右线隧道盾构施工引起的地层土体位移的修正 Loganathan 公式可以表示为:

$$\begin{cases} U_{\text{左}}^*(x, y, z) = U^*(x, y, z) \\ S_{\text{左}}^*(x, y, z) = S^*(x, y, z) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} U_{\text{右}}^*(x,y,z) = U^*(x-L,y,z) \\ S_{\text{右}}^*(x,y,z) = S^*(x-L,y,z) \end{cases} \quad (15)$$

式中:

$S_{\text{左}}^*(x,y,z)$ 、 $S_{\text{右}}^*(x,y,z)$ ——左线和右线隧道盾构施工引起的土体内任一点的竖向位移,单位 m;

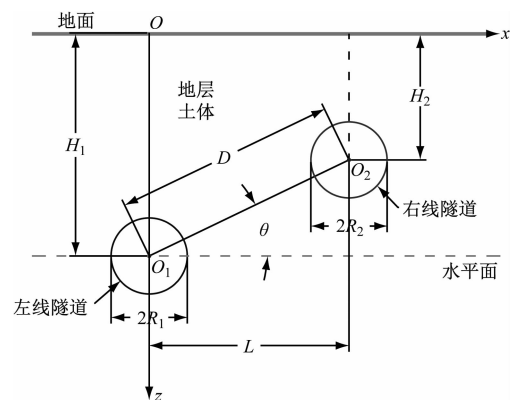
L ——双线平行盾构隧道中心间的水平距离, 单位 m。

L 可以表示为:

$$L = \sqrt{D^2 - (H_1 - H_2)^2} \quad (16)$$

式中:

D ——双线平行盾构隧道中心间距,单位 m。



注: O 为非水平布置双线平行盾构隧道所在全局坐标系的坐标原点;
 O_1 为左线隧道中心点; O_2 为右线隧道中心点; R_1 为左线隧道的开挖半径; R_2 为右线隧道的开挖半径; θ 为双线平行盾构隧道中心连线与水平面间的夹角。

图1 非水平布置双线平行盾构隧道示意图

Fig. 1 Diagram of non-horizontal parallel double-line shield tunnel

θ 可以表示为:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{H_1 - H_2}{D}\right) \quad (17)$$

將式(14)~(16)代入式(12)和式(13),可以

获得左线和右线隧道盾构施工引起的土体位移表达式分别为:

$$U_{\text{左}}^*(x, y, z) = -\frac{\varepsilon_2 R_1^2 x}{2} \left[1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + H_{q1}^2}} \right] \times \left\{ \frac{1}{x^2 + (H_1 - z)^2} + \frac{3-4\nu}{x^2 + (H_1 + z)^2} - \frac{4z(H_1 + z)}{[x^2 + (H_1 + z)^2]^2} \right\} \times \exp \left\{ \frac{-1.38x^2}{\left[R_1 + \frac{H_1}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} - \frac{0.69z^2}{H_1^2} \right\} \quad (18)$$

$$S_{\text{左}}^*(x, y, z) = \frac{\varepsilon_2 R_1^2}{2} \left[1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + H_{q1}^2}} \right] \left\{ \frac{H_1 - z}{x^2 + (H_1 - z)^2} + \frac{(3-4\nu)(H_1 + z)}{x^2 + (H_1 + z)^2} - \frac{2z[x^2 - (H_1 + z)^2]}{[x^2 + (H_1 + z)^2]^2} \right\} \times \exp \left\{ \frac{-1.38x^2}{\left[R_1 + \frac{H_1}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} - \frac{0.69z^2}{H_1^2} \right\} \quad (19)$$

$$U_{\text{右}}^*(x, y, z) = -\frac{\varepsilon_3 R_2^2 (x-L)}{2} \left[1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + H_{q2}^2}} \right] \times \left\{ \frac{1}{(x-L)^2 + (H_2 - z)^2} + \frac{3-4\nu}{(x-L)^2 + (H_2 + z)^2} - \frac{4z(H_2 + z)}{[(x-L)^2 + (H_2 + z)^2]^2} \right\} \times \exp \left\{ \frac{-1.38(x-L)^2}{\left[R_2 + \frac{H_2}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} - \frac{0.69z^2}{H_2^2} \right\} \quad (20)$$

$$S_{\text{右}}^*(x, y, z) = \frac{\varepsilon_3 R_2^2}{2} \left[1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + H_{q2}^2}} \right] \times \left\{ \frac{H_2 - z}{(x-L)^2 + (H_2 - z)^2} + \frac{(3-4\nu)(H_2 + z)}{(x-L)^2 + (H_2 + z)^2} - \frac{2z[(x-L)^2 - (H_2 + z)^2]}{[(x-L)^2 + (H_2 + z)^2]^2} \right\} \times \exp \left\{ \frac{-1.38(x-L)^2}{\left[R_2 + \frac{H_2}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} - \frac{0.69z^2}{H_2^2} \right\} \quad (21)$$

由于本文研究的非水平布置双线平行盾构隧道为等圆隧道,故 $R_1 = R_2 = R$ 。引入叠加原理,将式(18)~(21)进行线性叠加,可以获得双线平行隧道施工引起的土体位移表达式为:

$$U_{\text{双线}}^*(x, y, z) = U_{\text{左}}^*(x, y, z) + U_{\text{右}}^*(x, y, z) =$$

$$-\frac{R^2}{2} \left\{ \left[\varepsilon_2 x - \frac{\varepsilon_2 xy}{\sqrt{y^2 + H_{q1}^2}} \right] \left\{ \frac{1}{x^2 + (H_1 - z)^2} + \frac{3-4\nu}{x^2 + (H_1 + z)^2} - \frac{4z(H_1 + z)}{[x^2 + (H_1 + z)^2]^2} \right\} \times \exp \left\{ \frac{-1.38x^2}{\left[R_1 + \frac{H_1}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} - \frac{0.69z^2}{H_1^2} \right\} + \left[\varepsilon_3 (x-L) - \frac{\varepsilon_3 (x-L)y}{\sqrt{y^2 + H_{q2}^2}} \right] \left\{ \frac{1}{(x-L)^2 + (H_2 - z)^2} + \frac{3-4\nu}{(x-L)^2 + (H_2 + z)^2} - \frac{4z(H_2 + z)}{[(x-L)^2 + (H_2 + z)^2]^2} \right\} \times \exp \left\{ \frac{-1.38(x-L)^2}{\left[R_2 + \frac{H_2}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} - \frac{0.69z^2}{H_2^2} \right\} \right\} \quad (22)$$

$$S_{\text{双线}}^*(x, y, z) = S_{\text{左}}^*(x, y, z) + S_{\text{右}}^*(x, y, z) =$$

$$\frac{R^2}{2} \left\{ \left[\varepsilon_2 - \frac{\varepsilon_2 y}{\sqrt{y^2 + H_{q1}^2}} \right] \left\{ \frac{H_1 - z}{x^2 + (H_1 - z)^2} + \frac{(3-4\nu)(H_1 + z)}{x^2 + (H_1 + z)^2} - \frac{2z[x^2 - (H_1 + z)^2]}{[x^2 + (H_1 + z)^2]^2} \right\} \times \exp \left\{ \frac{-1.38x^2}{\left[R_1 + \frac{H_1}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} - \frac{0.69z^2}{H_1^2} \right\} + \left[\varepsilon_3 - \frac{\varepsilon_3 y}{\sqrt{y^2 + H_{q2}^2}} \right] \left\{ \frac{H_2 - z}{(x-L)^2 + (H_2 - z)^2} + \frac{(3-4\nu)(H_2 + z)}{(x-L)^2 + (H_2 + z)^2} - \frac{2z[(x-L)^2 - (H_2 + z)^2]}{[(x-L)^2 + (H_2 + z)^2]^2} \right\} \times \exp \left\{ \frac{-1.38(x-L)^2}{\left[R_2 + \frac{H_2}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} - \frac{0.69z^2}{H_2^2} \right\} \right\} \quad (23)$$

式中:

$S_{\text{双线}}^*(x, y, z)$ ——双线平行盾构隧道非水平施工引起的土体内任一点的竖向位移,单位 m。

由图1中的全局坐标系 xOz 可知,盾构隧道开挖断面上地面各点的纵坐标 $z=0$ 。当研究某一断面上地面各点的位移变化时,沿掘进方向的地层土体损失率变化可以不考虑。由式(9)可知,此时 $y =$

0,故由式(22)和式(23)可知,本文所提的基于修正 Loganathan 公式的双线平行隧道施工引起的土体位移也可用于计算地面位移,则有:

$$U_{\text{双线}}^*(x) = -\frac{R^2}{2} \left\{ \frac{(4-4\nu)\varepsilon_2 x}{x^2 + H_1^2} \exp \times \left[\frac{-1.38x^2}{\left[R_1 + \frac{H_1}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} \right] + \frac{(4-4\nu)\varepsilon_3(x-L)}{(x-L)^2 + H_2^2} \times \exp \left\{ \frac{-1.38(x-L)^2}{\left[R_2 + \frac{H_2}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} \right\} \right\} \quad (24)$$

$$S_{\text{双线}}^*(x) = \frac{R^2}{2} \left\{ \frac{(4-4\nu)\varepsilon_2 H_1}{x^2 + H_1^2} \exp \times \left[\frac{-1.38x^2}{\left[R_1 + \frac{H_1}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} \right] + \frac{(4-4\nu)\varepsilon_3 H_2}{(x-L)^2 + H_2^2} \times \exp \left\{ \frac{-1.38(x-L)^2}{\left[R_2 + \frac{H_2}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right]^2} \right\} \right\} \quad (25)$$

式中:

$U_{\text{双线}}^*(x)$ ——双线平行盾构隧道非水平施工引起的地面上任一点的水平位移,单位 m;

$S_{\text{双线}}^*(x)$ ——双线平行盾构隧道非水平施工引起的地面上任一点的竖向位移,单位 m。

在实际工程应用中,可通过选取不同隧道施工过程中开挖断面,建立该断面中等圆的双线平行隧道在非水平布置方式下盾构施工引起地面沉降的坐标轴,等距选取地面所在 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(22)~(25),求得该双线隧道开挖断面上周围地层土体及地面的水平位移和竖向位移。

4 模型验证

4.1 工程概况

1 号线北延工程南齿站—冠山站区间隧道全长约 1.48 km,设置 2 个联络通道,穿越老旧住宅、高速公路、桥梁、京九铁路等既有建构(筑)物,沿线施工风险源较多,施工难度大。1 号线左、右线隧道间距约为 11.36~15.72 m,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,为规避右线隧道在南齿站—冠山站区间施工过程中,在 YDK29+485—YDK29+728 里程范围内遇到的地下构筑物,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的既有地下构筑物。由规划设计要求和工程现场资料可知,南齿站—冠山站区间线路平面主要包括直线、曲线及缓和曲线这三类路段,区间右线最大纵坡坡度为 29.951‰,隧道拱顶覆土厚为 4.6~20.6 m,盾构施工过程中的隧道开挖直径为 6.2 m。拟建场地地层土体自上而下依次为:①素填土,层厚约为 2.82 m;②粉质黏土,层厚约为 7.39 m;③强风化千枚岩,层厚约为 19.79 m。地层土体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 地层土体物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of geological strata

名称	天然重度/(kN/m ³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	压缩模量/MPa	泊松比
①2 素填土	18.4	14	15.0	5.56	0.35
③1 粉质黏土	19.9	22	34.8	8.88	0.34
③3 强风化千枚岩	26.5	42	26.5	35.80	0.28

由工程现场的勘察资料可知,隧道标准设计断面形状为圆形,且双线盾构隧道在 YDK29+485—YDK29+728 里程范围内施工时, θ 约为 15°,左、右线隧道间距为 13.6 m,该区域左、右线隧道埋深分别为 17.8 m 和 14.3 m,右线隧道相比于左线隧道的埋深减小了 3.5 m。该区域地下水位埋深约为 22.5~24.3 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强风化千枚岩层。

4.2 数值模拟及现场监测

本文对非水平布置的双线平行盾构隧道模型提出 4 点基本假设:①考虑自重应力的影响,模型构建时保证初始地应力平衡,不考虑构造应力等其他因素的影响;②由于盾构掘进范围处于地下水位

以上,在建立模型时可忽略地下水的影响;③假设地层与管片以摩擦接触的方式直接接触,不考虑壁后注浆浆液等其他因素的作用,即模型中不设置等代层,且建模时将隧道管片视为混凝土结构部件;④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均视为地面均匀分布堆载作用。

根据工程现场施工情况及相关资料,隧道管片外径为 6 200 mm,管片内径为 5 600 mm,管片厚为 300 mm。非水平布置的双线平行盾构隧道模型示意图如图 2 所示。采用实体单元进行建模,整体模型共有 20 370 个节点、16 356 个单元。为保证计算模型网格划分质量和计算收敛性,以中性轴算法控制网格划分,并在计算时采用 C3D8R 单元模拟非水平布置的双线隧道盾构掘进过程中横断面上的隧道与地层结构,模型的相对位置关系及参数均依托本文实际工程资料进行取值。

基于上述数值模拟试验结果,采用现场监测方法验证本文所提计算方法的合理性,土体位移监测

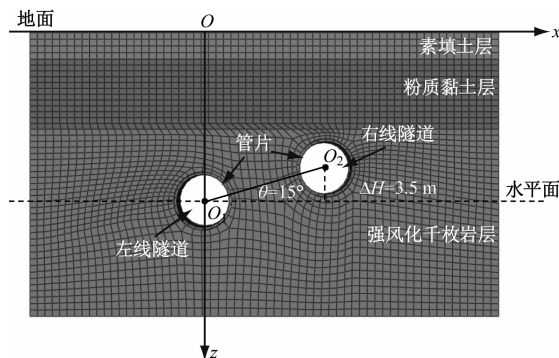
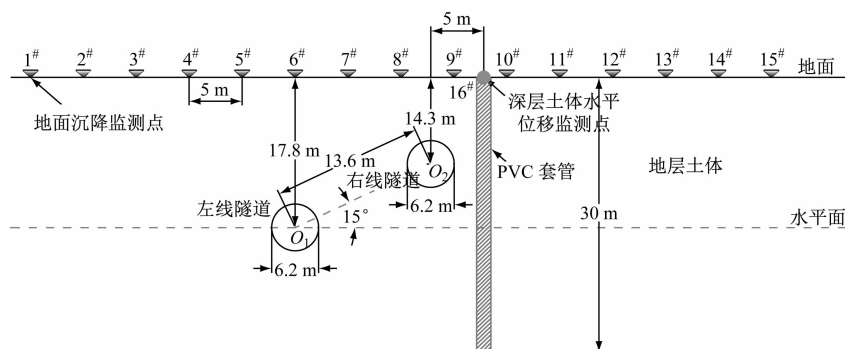


图2 非水平布置的双线平行盾构隧道模型示意图

Fig. 2 Diagram of non-horizontal parallel double-line shield tunnel model

点布置示意图如图 3 所示。相邻地面沉降监测点的间距为 5 m,共布设 15 个监测点(1#—15#),沿地面依次水平排开,同时在距离右线隧道中心水平距离 5 m 位置处,布设 1 个深层土体水平位移监测点(16#),测点底部埋深为 30 m,由此获得该断面位置处的地面沉降和距离右线隧道中心 5 m 处的土体水平位移实测值。



注:PVC为聚氯乙烯。

图3 土体位移监测点布置示意图

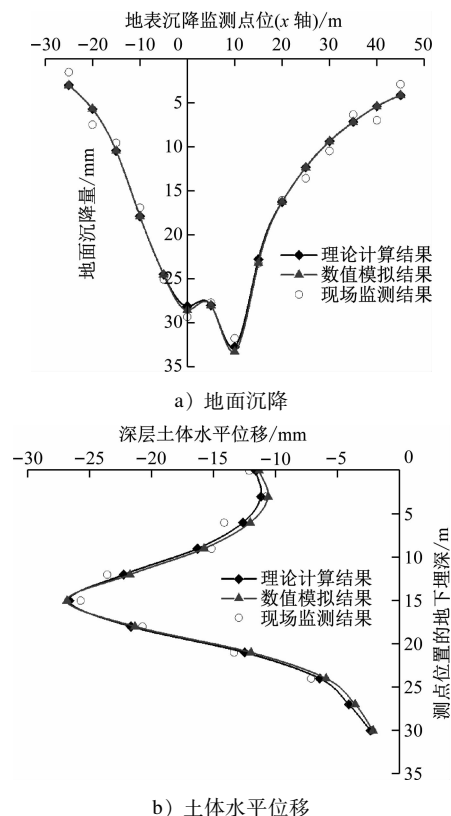
Fig. 3 Diagram of soil displacement monitoring point layout

4.3 对比分析及验证

选取所选断面的现场监测结果及利用 ABAQUS 有限元软件计算的数值模拟结果,分别与本文所建立的双线平行隧道施工引起的土体位移计算方法所得的地面沉降,以及距离右线隧道中心 5 m 纵向断面处各点土体水平位移的理论结果进行比较,结果如图 4 所示。

在实地测量过程中,沉降槽范围内曲线两端的沉降值普遍趋于 0,且往往不易测量,容易产生较大的测量误差^[9],因此该区域的误差统计结果不具有参考价值,应当忽略。因此,对于图 4 的对比验证和误差分析需排除 $x = -25$ m、 -20 m、 40 m、 45 m 这

4 个位置区域的较大曲线误差的影响,仅对剩余测点位置的地面沉降误差情况进行分析。由图 4 可知:①数值模拟结果与现场监测结果拟合效果较好,地面沉降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 13.5% 和 5.5%,土体水平位移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 17.0% 和 7.9%,均在工程经验允许的 20% 合理误差范围内,验证了本文数值模拟结果的合理性。②所提双线平行隧道施工引起的土体位移计算方法结果同数值模拟结果与现场监测结果均拟合较好,且地面沉降和土体水平位移的理论计算结果曲线与现场监测结果曲线变化趋势相



注:水平位移以水平向右为正,以水平向左为负。

图4 地面沉降量及深层土体水平位移的理论计算、数值模拟和现场检测结果对比

Fig.4 Comparison of land subsidence amount and deep soil horizontal displacement results by theoretical calculation, numerical simulation and field monitoring

一致,地面沉降和土体水平位移的理论计算结果同数值模拟结果与现场监测结果之间的最大误差分别为 1.9%、13.3% 和 14.4%、10.7%,均在工程经验允许的 20% 合理误差范围内,验证了本文所提双线平行隧道施工引起的土体位移计算方法的工程适用性。

5 结论

1) 修正了传统 Loganathan 公式,所建立的双线平行隧道施工引起的土体位移计算方法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损失、土体卸荷回弹和土体损失率沿掘进路径变化等施工因素对土体位移的影响。

2) 本文所提双线平行隧道施工引起的土体位移计算结果同数值模拟结果与现场监测结果均拟

合良好,且与地面沉降和土体水平位移现场监测结果的整体变化趋势相一致,可有效揭示非水平布置方式下,双线平行盾构隧道由施工引起的土体位移变化规律,具有良好的工程适用性。

3) 本文所提双线平行隧道施工引起的土体位移计算方法尚未考虑非水平布置方式下双线平行隧道盾构施工工序、地下水渗流等隧道工程中可能出现的其他因素影响,在后续研究中将逐一分析这些因素的影响规律,以提升本文所提计算方法的计算精度。

参考文献

- [1] 魏纲,魏新江,龚慈,等. 软土中盾构法隧道引起的土体移动计算研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 995.
WEI Gang, WEI Xinjiang, GONG Ci, et al. Study on calculation for shield tunneling-induced ground movements in clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 995.
- [2] 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(增刊1): 274.
ZHANG Jichao, ZENG Chuigang, CUI Lejian, 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(S1): 274.
- [3] CAO L, ZHANG D, FANG Q. Semi-analytical prediction for tunnelling-induced ground movements in multi-layered clayey soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2020, 102: 103446.
- [4] HUANG R, ZHU J X, ZHU X J, et al. Analysis of ground settlement during shield tunnel construction in soft soil[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2023, 60(2): 134.
- [5] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846.
- [6] 魏纲,张鑫海,徐银锋. 考虑多因素的类矩形盾构施工引起土体竖向位移研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 199.
WEI Gang, ZHANG Xinhai, XU Yinfeng. Deriving vertical displacement of ground due to quasi-rectangular shield tunneling considering multiple factors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 199.
- [7] 李涛,崔远,曹英杰,等. 岩-土复合地层暗挖隧道施工引起地表沉降计算方法[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(2): 73.
LI Tao, CUI Yuan, CAO Yingjie, et al. Calculation method of surface settlement caused by construction of mining tunnel in rock-soil composite strata[J]. China Railway Science, 2020, 41(2): 73.

(下转第 15 页)

表3 不同计算方法及载荷工况下A点和C点的力与弯矩

Tab.3 Force and bending moment at points A and C under different calculation methods and load working conditions

计算方法	极限载荷工况			疲劳载荷工况		
	F_3/N	F_2/N	$M/(Nm)$	F_3/N	F_2/N	$M/(Nm)$
有限元法	816.52	59 183.48	4 375.70	476.30	34 523.70	2 556.30
解析法	815.49	59 184.51	4 383.55	475.70	34 524.30	2 557.07

法所得结果,分析结果偏于安全。

分析表2可知:采用解析法与有限元法计算得到的抗侧滚扭杆装置扭转刚度和扭杆轴垂向位移的相对误差绝对值均小于1%。由此可见,解析法具备准确性和可靠性。

分析表3可知:采用解析法与有限元法得出的力和力矩的相对误差绝对值均小于1%。

3 结语

1) 基于材料力学原理、外侧支撑抗侧滚扭杆装置结构的对称性及承担载荷的反对称特性,以抗侧滚扭杆装置1/2结构为研究对象,采用力法原理,引入结构变形协调条件,求解一次超静定系统的未知力和力矩,获得扭杆轴的剪力、弯矩和扭矩的分布情况,推导出抗侧滚扭杆装置扭转刚度和强度的计算公式。

2) 基于扭杆轴的剪力、弯矩和扭矩分布,通过解析法得到扭杆轴不同截面位置的工作应力水平和应力状态,为确定扭杆轴的截面几何参数、不同危险截面的等效应力计算方法和扭杆轴的疲劳失效提供了一种较为便捷的计算方法。

3) 与有限元法相比,本文所提计算方法具有计算原理简单、扭杆轴受力状态清晰,易于在数据处理软件中实现参数化等特点。采用所提计算方法

获得的计算结果具有计算精度高、计算速度快等优点,可以显著提高轨道交通列车扭杆轴的设计效率,降低设计分析成本。

参考文献

- [1] 段金兰,袁文辉. 轨道车辆转向架抗侧滚扭杆系统刚度和强度分析的工程方法[J]. 现代制造工程, 2019(7): 49.
DUAN Jinlan, YUAN Wenhui. Project method of stiffness and strength analysis about anti-rolling torsion bar system of rail vehicle bogie[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(7): 49.
- [2] 杜方孟,霍艳霞,汤腾,等. 地铁车辆用新型整体式抗侧滚扭杆装置研制[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(9): 142.
DU Fangmeng, HUO Yanxia, TANG Teng, et al. Research and manufacture of integral anti-roll torsion bar device for metro vehicle [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(9): 142.
- [3] Herausgeber FKM (Forschungskuratorium Maschinenbau). Analytical strength assessment of components in mechanical engineering [M]. 7th ed. Frankfurt: Herausgeber FKM, 2020:38.

· 收稿日期:2022-12-28 修回日期:2023-05-29 出版日期:2024-07-10
Received:2022-12-28 Revised:2023-05-29 Published:2024-07-10
· 第一作者:陆军,高级工程师,010200022353@crregc.cc
通信作者:罗征志,讲师,zhzhluo@swjtu.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第8页)

- [8] 魏纲,徐日庆,屠玮. 顶管施工引起的土体扰动理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 476.
WEI Gang, XU Riqing, TU Wei. Testing study and analysis on soil disturbance induced by pipe jacking construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 476.
- [9] 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, 2019: 35.
LIU Peng. Settlement prediction and deformation analysis of urban shield tunnel[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Tech-

nology, 2019: 35.

· 收稿日期:2022-10-31 修回日期:2023-10-16 出版日期:2024-07-10
Received:2022-10-31 Revised:2023-10-16 Published:2024-07-10
· 通信作者:王超,博士研究生,wangchao214801069@yeah.net
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license