

《隧道及地下工程建维》专栏

[编者按]在当今城市化进程加快、基础设施日新月异的时代背景下,隧道及地下工程作为城市脉络的桥梁与拓展城市空间的重要基石,其战略地位与核心作用愈发显著。它们不仅承载着缓解地面交通压力、优化城市布局的重任,还深刻影响着城市的可持续发展与居民生活质量的提升。然而,随着工程规模的日益庞大及建设环境复杂性的急剧增加,隧道及地下工程的修建与运维工作正面临着前所未有的严峻挑战。

在此背景下,本刊特辟《隧道及地下工程建维》专栏,分别从盾构施工对上覆管线竖向位移的影响、水下隧道过断层施工稳定性、灌浆槽钢加固盾构隧道衬砌管片力学性能、基于随机场理论的岩溶区顶管施工地表变形、融合自注意力机制的PSO-LSTM地下管线沉降预测等方面对复杂环境下隧道及地下工程修建与运维关键技术进行了研究,旨在汇聚行业精英的智慧与力量,深入探讨并展示在复杂多变的地质条件、环境约束及技术要求下,隧道及地下工程领域的最新理论进展、技术创新成果与实践应用经验。

本刊专栏负责人简介:黄戡,长沙理工大学教授,深圳大学兼职教授,澳大利亚新南威尔士大学客座教授,博士生导师,中国城市地下空间学会理事,广东省城市轨道交通学会理事,湖南省岩石力学与工程学会理事,湖南省工程管理学会理事,湖南省公路学会评审专家,中南公路建设及养护技术重点实验室学术带头人,国家公派留学基金、自然科学基金和省部级科技奖励项目评审专家。主持国家公派留学基金项目、国家自然科学基金项目、湖南省自然科学基金项目和国际合作组织项目等纵向科研项目10余项,横向科研项目20余项。发表高水平学术论文70余篇,出版中英文专著2部,主编规划教材1部,荣获国家级奖励1项、省部级一等奖2项。

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20240911001

文章编号:1674-599X(2025)01-0041-10

引用格式:陆小烽,黄戡,傅铁军,等.盾构施工对上覆管线竖向位移的影响分析[J].交通科学与工程,2025,41(1):41-50.

Citation: LU Xiaofeng, HUANG Kan, FU Tiejun, et al. Influence of shield construction on vertical displacement of overlying pipelines [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(1): 41-50.

盾构施工对上覆管线竖向位移的影响分析

陆小烽¹,黄戡^{1,2,3},傅铁军¹,刘挺¹

(1.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114; 2.广州交通大学(筹)/广州航海学院 智能交通与工程学院,广东 广州 510725; 3.深圳大学 土木与交通工程学院,广东 深圳 518060)

摘要:【目的】研究多因素影响下盾构隧道施工对上覆既有管线竖向位移的影响。【方法】第一阶段基于Mindlin解与盾构法隧道统一土体移动模型三维解,考虑盾构隧道施工过程中盾构正面顶推力、盾壳摩阻力、盾尾注浆压力及地层损失率四种因素对既有地铁隧道管线竖向位移的影响,得到土体竖向位移;第二阶段基于Pasternak地基模型,结合有限差分法,提出盾构隧道开挖引起的上覆地铁隧道管线竖向位移的计算公式,分析隧道开挖面距管线水平距离12、0、-12 m三种工况下盾构正面顶推力、盾尾注浆压力及盾壳摩阻力对既有地铁隧道管线竖向位移的影响,及不同地层损失率和管线刚度对既有地铁隧道管线竖向位移的影响;最后将数值模拟结果与现场实测结果进行对比,分析在盾构开挖施工上下覆管线竖向位移的变化规律。【结果】盾构隧道施工引起的上覆既有管线的竖向位移曲线大致呈“V”形,最大竖向位移始终位于管线的中间位置。【结论】盾构掘进过程中盾构正面顶推力、盾尾注浆压力对既有管线竖向位移影响较小;地层损失率与盾壳摩阻力对既有管线竖向位移影响较大,其中盾壳摩阻力是引起既有管线两端向上微隆起的主要因素;地层损失率越大,盾构开挖引起的管线竖向沉降越显著;管线抗弯刚度越大,盾构开挖引起的竖向沉降越小。

关键词:盾构开挖;竖向位移;地层损失率;数值模拟;盾构隧道;管线保护

中图分类号:U45

文献标志码:A

收稿日期:2024-09-11

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3800905);国家自然科学基金资助项目(52078060)

通信作者:黄戡(1979—),教授,主要从事岩土工程、隧道工程和城市轨道交通等方面的研究工作。E-mail:hk_616@csust.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

Influence of shield construction on vertical displacement of overlying pipelines

LU Xiaofeng¹, HUANG Kan^{1,2,3}, FU Tiejun¹, LIU Ting¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Intelligent Transportation and Engineering, Guangzhou Transportation University (under preparation)/Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to study the influence of multiple factors on the vertical displacement of existing overlying pipelines under shield tunnel construction. [Methods] Based on the Mindlin solution and the three-dimensional solution of the unified soil movement model for shielded tunneling, in the first stage, this paper considered the effects of four factors including the frontal jacking force of the shield, friction between the shield and the soil, grouting pressure at the shield tail, and soil loss rate on the vertical displacement of the existing subway pipelines during shield tunnel construction. As a result, the vertical soil displacement was obtained. The second stage combined the Pasternak foundation model with the finite difference method to propose a calculation formula for the vertical displacement of the existing overlying subway pipelines caused by shield tunnel excavation. Moreover, this paper analyzed both the effects of the frontal jacking force of the shield, grouting pressure at the shield tail, and friction between the shield and the soil on the vertical displacement of the existing subway pipelines in the three working conditions of 12, 0, and -12 m between the tunnel excavation face and the pipeline, and the influence of different soil loss rates and pipeline rigidity on the vertical displacement of the existing subway pipelines. Finally, the numerical simulation results were compared with the measured data to analyze the variation laws in the vertical displacement of the overlying pipelines under shield excavation construction. [Findings] The vertical displacement curve of the existing overlying pipelines under shield tunnel excavation generally presents a “V” shape, with the maximum vertical displacement always located in the middle of the pipelines. [Conclusions] During shield tunnel construction, the influence exerted by the frontal jacking force of the shield and grouting pressure at the shield tail on the vertical displacement of the existing pipelines is relatively less. Additionally, the soil loss rate and friction between the shield and the soil have a greater effect on the vertical displacement of the existing pipelines, with the friction between the shield and the soil as the main factor causing the slight upward bulging at both ends of the existing pipelines. As the soil loss rate increases, the vertical settlement of the pipelines caused by shield excavation becomes more significant. The greater flexural rigidity of pipelines leads to smaller vertical settlements caused by shield excavation.

Key words: shield excavation; vertical displacement; soil loss rate; numerical simulation; shield tunnel; pipeline protection

随着城市的不断发展,地下空间的开发显得格外重要。城市地铁隧道的区间开挖方法主要是盾构法。盾构施工下穿既有构筑物地基时产生的施工扰动会引起地表沉降,使既有结构承载力降低,影响结构的安全和使用寿命。在城市地下空间中,

各种管线、管廊分布复杂,盾构施工过程中的卸荷效应不可避免地扰动周围地层,使其发生不均匀沉降,进而影响邻近地下管线,严重时会导致管线发生开裂和破坏。因此,在盾构隧道施工时考虑其对周围管线产生的影响,认识盾构施工诱发地

下管线力学响应规律并准确预估盾构开挖对邻近地下管线的影响具有重要的现实意义。

当前,预测盾构施工引起的地表沉降与管线变形的的方法主要有:经验法、理论分析法^[1-3]、数值分析法^[4-6]、模型试验法^[6-7]。研究盾构施工对管线影响的理论分析方法大多采用的是两阶段法,即在第一阶段考虑隧道施工引起的地层沉降,进而推导出土体自由位移场函数,在第二阶段考虑土体与管线的相互作用,引入基本假定,通过弹性地基梁模型将土体自由位移转化为等效荷载作用于管线上,求得管线的变形量。张桓等^[8]基于两阶段法,采用LOGANATHAN等^[9-10]提出的解析方法以及Pasternak弹性地基梁模型^[11],推导出了管线竖向位移和内力的解析解,并在求解管线的平衡微分方程时考虑了侧向土体的作用。程霖等^[12]建立了考虑管土脱空的双层弹簧弹性地基梁理论模型,推导出了管线变形的控制微分方程,并基于有限元和离心模型试验验证了采用传递矩阵法进行求解的可靠性。周先成^[13]基于改进的Winkler地基模型,考虑接头偏移距离,得到了可考虑任意接头位置及不同土体沉降的非连续管线控制方程。Pasternak弹性地基梁模型考虑了土体剪切变形的影响,并主要应用于土与结构相互作用的研究中。研究者们基于三参数Kerr地基模型^[14-16],通过考虑侧向土体和管线剪切变形的影响,进一步获得管-土相互作用简化解析解。冯国辉等^[17]将管线简化成Euler-Bernoulli梁并将其搁置在Kerr地基模型上,利用差分法得到盾构隧道开挖所引起的上覆管线竖向位移的半解析解。学者们对Kerr地基模型的研究也有了一定的进展,但Kerr地基模型的计算参数较多且难以确定,计算过程也较复杂,该模型不适合工程技术人员使用。

上述研究没有考虑盾构正面顶推力、盾壳摩阻力及盾尾注浆压力等施工因素对土体及管线竖向位移的影响,使得理论值与实际值偏差过大。

本文在文献^[18]的基础上,基于Mindlin解^[19],充分考虑盾构正面顶推力、盾壳摩阻力、盾尾注浆压力及地层损失率对管线竖向位移的影响,采用两阶段分析方法对盾构隧道施工引起的上覆管线的竖向位移进行计算,将四种因素作用下的计算结果进行叠加得到总的管线竖向位移。最后,将数值模拟结果与现场实测结果进行对比,验证本文方法的可行性。

1 土体位移场求解

1.1 基本假定

- 1) 土体是各向同性和均质的,计算区域为线弹性半无限空间。
- 2) 不考虑施工期间土体排水和固结的影响,且不考虑刀盘正面摩擦的影响。
- 3) 盾构掘进只发生空间位置的变化,不考虑时间效应。
- 4) 盾构外壳与土壤之间的摩擦力分布均匀。
- 5) 不考虑盾构机偏斜,假定其沿直线推进。

1.2 基于Mindlin解的土体位移场

由于Mindlin解是半无限空间内任意水平和竖直方向的荷载在该空间内任意点产生的应力和位移的解析解^[19],故此解可用于计算盾构施工影响下的土体自由位移场。本文所采用的考虑多因素作用的土体自由位移场能够全面反映盾构施工对上覆管线产生的影响。

$$S = \frac{Px}{16\pi G(1-\mu)} \left[\frac{z-c}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z-c)}{R_2^3} - \frac{6cz(z+c)}{R_2^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+c)} \right] \quad (1)$$

式中: S 为盾构施工导致的邻近土体位移; $R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-c)^2}$; $R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+c)^2}$; x 、 y 、 z 为土体内任意一点的坐标; G 为剪切模量; c 为集中力到地表的距离; μ 为泊松比; P 为作用在盾构机上的力。

图1为盾构开挖计算模型简图,图中 h 为地表至隧道中心轴线的距离。本文分别考虑各因素对土体位移场的影响,即考虑各影响因素在盾构开挖过程中作用位置的不同,选取不同微元进行积分计算,得出各影响因素在土体周围产生的附加应力。

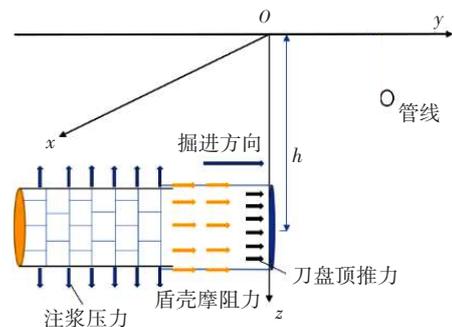


图1 盾构开挖计算模型

Fig. 1 Calculation model of shield excavation

1.2.1 盾构正面顶推力引起的土体沉降

图2为正面顶推力计算模型简图,图2中 P_1 为作用于盾构机刀盘上的盾构推进力; r 为从微元到刀头中心点的距离; θ 为微元与 x 轴之间的夹角; R 为盾壳半径。在盾构开挖的圆形面域内选取任意微元 dA_1 ,则 $dP_1=P_1dA_1$, $dA_1=rdrd\theta$ 。由此,可根据Mindlin解推导出半无限空间中顶推力作用下任意一点 (x, y, z) 处土体的竖向位移。

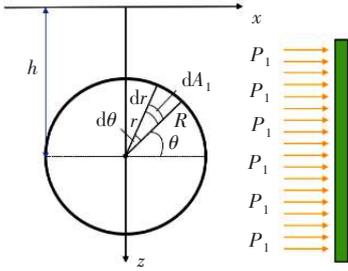


图2 正面顶推力计算模型

Fig. 2 Calculation model of frontal jacking force

$$S_{Z1} = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{P_1 y}{16\pi G(1-\mu)} \left[\frac{z-c}{R_{11}^3} + \frac{(3-4\mu)(z-c)}{R_{21}^3} - \frac{6cz(z+c)}{R_{21}^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_{21}(R_{21}+z+c)} \right] r dr d\theta \quad (2)$$

式中： $R_{11} = \sqrt{(y-y_0)^2 + (x-r\cos\theta)^2 + (z-c)^2}$;

$R_{21} = \sqrt{(y-y_0)^2 + (x-r\cos\theta)^2 + (z+c)^2}$; $c = h - r\sin\theta$; S_{Z1} 为盾构顶推力引起的土体竖向位移。

1.2.2 盾壳摩阻力引起的土体沉降

图3为盾壳摩阻力计算模型简图,图中 P_2 为作用于盾壳外表面上的盾壳摩阻力; L_s 为盾构主机的长度; dA_2 为盾壳外表面上的任意微元面积, $dA_2=Rdsd\theta$; s 为盾构机微元长度。当不考虑刀盘厚度时,可得在盾壳摩阻力作用下土体的竖向位移。

$$S_{Z2} = \int_0^{2\pi} \int_0^{L_s} \frac{P_2(y+s)}{16\pi G(1-\mu)} \left[\frac{z-c}{R_{12}^3} + \frac{(3-4\mu)(z-c)}{R_{22}^3} - \frac{6cz(z+c)}{R_{22}^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_{22}(R_{22}+z+c)} \right] R ds d\theta \quad (3)$$

式中： $R_{12} = \sqrt{(y+s)^2 + (x-R\cos\theta)^2 + (z-c)^2}$;

$R_{22} = \sqrt{(y+s)^2 + (x-R\cos\theta)^2 + (z+c)^2}$; $c = h - R\sin\theta$; S_{Z2} 为盾壳摩阻力引起的土体竖向位移。

1.2.3 盾尾注浆压力引起的土体沉降

在盾尾同步注浆后,管片周围的部分土体在注浆压力的作用下将产生挤压变形。图4为盾尾注浆

压力计算模型简图,图4中 P_3 为盾尾管片注浆对周围土体产生的压力。选取任意微元 $dA_3=Rdsd\theta$ (s 为所选盾构机微元体长度),则管片外表面微元土体所受的力为 $dP=P_3Rdsd\theta$,进而可得在管片壁后注浆压力作用下土体的竖向位移。

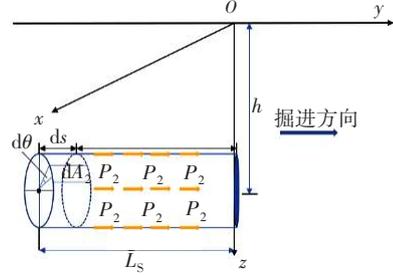


图3 盾壳摩阻力计算模型

Fig. 3 Calculation model of friction between shield and soil

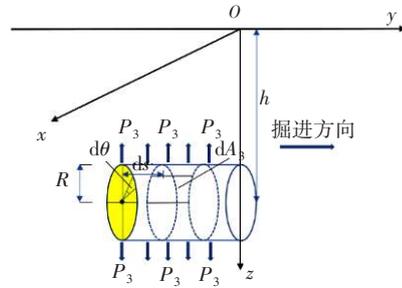


图4 盾尾注浆压力计算模型

Fig. 4 Calculation model of grouting pressure at shield tail

$$w_h = \int_0^{2\pi} \int_0^B \frac{P_3(y-R\cos\theta)}{16\pi G(1-\mu)} \left[\frac{z-c}{R_{13}^3} + \frac{(3-4\mu)(z-c)}{R_{23}^3} - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_{23}(R_{23}+z+c)} - \frac{6cz(z+c)}{R_{23}^5} \right] R \cos\theta ds d\theta$$

$$w_v = \int_0^{2\pi} \int_0^B \frac{P_3}{16\pi G(1-\mu)} \left[\frac{(z-c)^2(3-4\mu)}{R_{13}^3} + \frac{(3-4\mu)(z-c)^2 - 2cz}{R_{23}^3} + \frac{8(1-\mu)^2 - (3-4\mu)}{R_{23}} + \frac{6cz(z+c)^2}{R_{23}^5} \right] R \sin\theta ds d\theta \quad (4)$$

$$S_{Z3} = w_h + w_v \quad (5)$$

式中： $R_{13} = \sqrt{(y-s)^2 + (x-R\cos\theta)^2 + (z-c)^2}$;

$R_{23} = \sqrt{(y-s)^2 + (x-R\cos\theta)^2 + (z+c)^2}$; $c = h - R\sin\theta$; S_{Z3} 为管片壁后注浆压力引起的土体总的竖向位移; B 为管片环宽; w_h 、 w_v 均为注浆压力的分量

引起的土体竖向位移。

1.3 盾构法隧道统一土体移动模型三维解

盾构法隧道统一土体移动模型主要针对的是地层损失引起的土体位移。在目前的主要研究方法中,常采用 Loganathan 土体沉降公式来计算土层位移,但其存在一定的缺陷,仅适用于土质较差的情况^[18]。魏纲^[20]基于各地区土质的差异,通过引入焦点到隧道中心点的距离 d ,采用两圆相切的土体损失模型,将所有可能的土体移动模型统一起来,建立了统一土体移动模型。当 $d = 0$ 时,此模型即为 Peck 模型;当 $d = g/2$ (g 为等效土体损失参数)时,此模型等于 Loganathan 模型。该模型的三维解^[21]展示了地层损失随掘进方向的变化,能更准确地计算土层及管线的变形。

$$d = \beta R \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{1}{4} - \frac{g(y)}{\pi R \eta(y)} \left[\arcsin\left(\frac{k}{R - g(y)/2}\right) + \sqrt{1 - \left(\frac{k}{R - g(y)/2}\right)^2} - 1 \right] \quad (7)$$

$$\delta = \frac{1}{2} - \frac{g(y)}{\pi R^2 \eta(y)} \left(R - \frac{g(y)}{4} \right) \arcsin\left(\frac{k}{R - g(y)/4}\right) \quad (8)$$

$$S_{z4} = \frac{B\eta R^2}{4} \left\{ \frac{h-z}{x^2 + (h-z)^2} + \frac{h+z}{x^2 + (h+z)^2} - \frac{2z[x^2 - (h+z)^2]}{[x^2 + (h+z)^2]^2} \right\} \exp\left[\frac{x^2 \ln \lambda}{(h+d)^2} + \frac{z^2(\ln \lambda - \ln \delta)}{(h+d)^2} \right] \left(1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + h^2}} \right) \quad (9)$$

式(6)~(9)中: $g(y) = 2R(1 - \sqrt{1 - \eta(y)})$; $B = \frac{4h[h+k - \sqrt{(h+d)^2 - \eta(y)(R+d)^2}]}{R\eta(y)(R+d)}$; $\eta(y) =$

$\frac{\eta}{2} \left(1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + h^2}} \right)$; S_{z4} 为地层损失引起的土体竖向位

移; β 为移动焦点与隧道轴线间的距离与隧道外半径的比; δ 为均匀径向移动模型填充部分以外的土体损失量; λ 为统一土体移动模型填充部分以外的土体损失量与总土体损失量之比; k 为移动焦点与隧道中心轴线之间的距离。

综上所述,运用叠加原理,可得到盾构正面顶推力、盾壳摩擦力、管片注浆压力和地层损失共同作用下的土体竖向位移 S_z 。

$$S_z = S_{z1} + S_{z2} + S_{z3} + S_{z4} \quad (10)$$

2 管线竖向位移的求解

本文采用 Pasternak 双参数模型来模拟盾构施工过程中土体和管线之间的相互作用。基本假设:1) 不考虑管线轴向力的作用,且半无限空间内的土体为均质土体,变形为弹性变形。2) 侧向土体作用力通过土体剪切层附加在管线两侧。3) 管线为刚性管线,不考虑管线非线性变形。4) 管-土协调变形,两者无间隙。

本文在考虑附加位移后,得到了管线扰度微分方程,并采用有限差分法求解该微分方程。

$$q(y) = -G \frac{d^2 S_z}{dy^2} + k_w S_z \quad (11)$$

式中: $q(y)$ 为盾构隧道在管线处的地基反力; k_w 为地基反力系数。

按 Tanahashi 建议,本文选取 G 值为:

$$G = \frac{E_0 t}{6(1 + \mu)} \quad (12)$$

$$k_w = \frac{1.3E_0}{D(1 - \mu^2)} \left(\frac{D^4 E_0}{EI} \right)^{\frac{1}{12}} \quad (13)$$

通过微单元受力分析可得管线的扰度方程为:

$$EI \frac{d^4 w(y)}{dx^4} + p(y) = q(y) \quad (14)$$

式(12)~(13)中: E_0 为土的变形模量; $t=2.5D$, D 为管线直径; $w(y)$ 为管线扰度; $p(y)$ 为土体反力; E 为管线弹性模量; I 为管线截面惯性矩; EI 为管线抗弯刚度。

整理上式可得:

$$EI \frac{dw(y)}{dx^4} + kDw(y) - GD \frac{dw(y)}{dy^2} = kDS_z - GD \frac{dS_z}{dy^2} \quad (15)$$

假设管线总长度为 L ,将管线划分成 n 段微元体,则每段微元体的长度为 $\Delta L = L/n$ 。运用差分法的中心差分思想可得(以中心节点 i 为例):

$$\begin{cases} \left(\frac{dw(y)}{dy} \right)_i \approx \frac{w_{(i+1)} - w_{(i-1)}}{2\Delta L} \\ \left(\frac{d^2 w(y)}{dy^2} \right)_i \approx \frac{w_{(i+1)} - 2w_{(i)} + w_{(i-1)}}{2\Delta L^2} \\ \left(\frac{d^3 w(y)}{dy^3} \right)_i \approx \frac{w_{(i+2)} - 4w_{(i+1)} + 6w_{(i)} + 4w_{(i-1)} + w_{(i-2)}}{\Delta L^3} \end{cases} \quad (16)$$

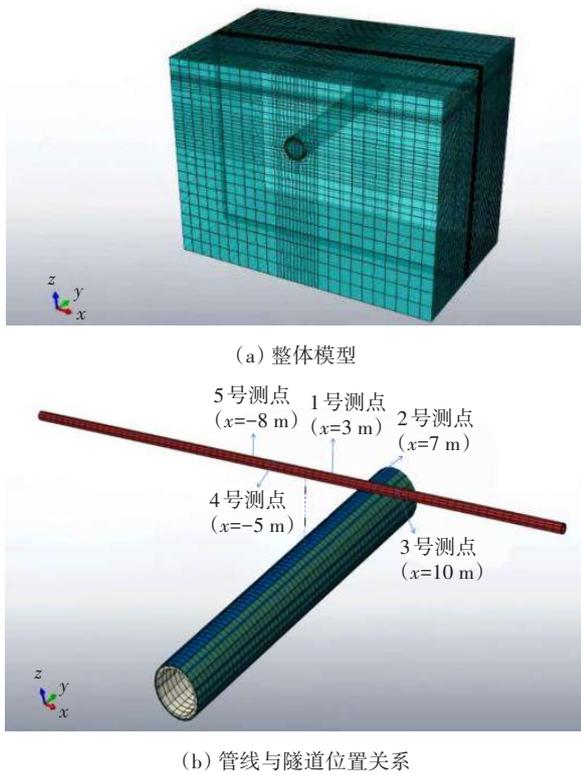


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite element model

4 多因素影响下的管线沉降

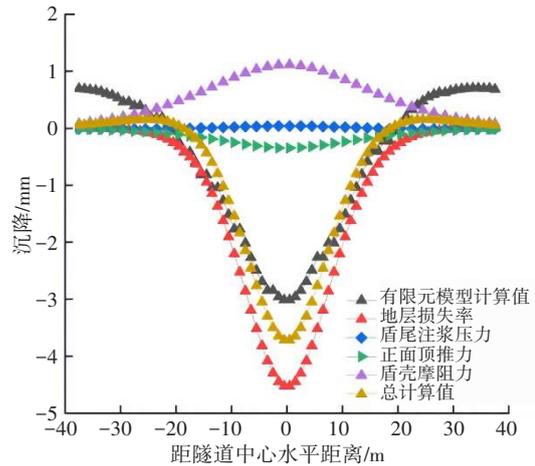
本文分别选取隧道开挖面到管线的水平距离 y 为 12、0、-12 m 三种工况对管线的竖向位移进行计算和对比分析。图 6 所示为多因素影响下管线竖向位移的计算结果。由图 6 可知,管线的竖向位移曲线大致呈“V”形,最大竖向位移始终位于管线的中间位置,符合管、隧正交时管线的竖向变形规律。四种因素叠加后管线竖向位移总曲线呈沉降状态,地层损失率与盾壳摩阻力对管线竖向位移的影响最为显著,而盾构正面顶推力与盾尾注浆压力对管线竖向位移的影响较小。

由图 6(a)可知,当隧道开挖面到管线的水平距离为 12 m 时,四种因素叠加后的管线最大竖向沉降值为 3.71 mm(总计算值),管线两端出现明显隆起。在各影响因素中,地层损失率导致的管线最大竖向沉降值最大,为 4.52 mm,故地层损失率是管线产生竖向沉降的主要原因;盾壳摩阻力导致管线产生了 1.11 mm 的最大竖向隆起值;盾构正面顶推力导致的管线最大竖向沉降值为 0.37 mm;盾尾注浆压力导致的管线最大竖向隆起值为 0.07 mm。

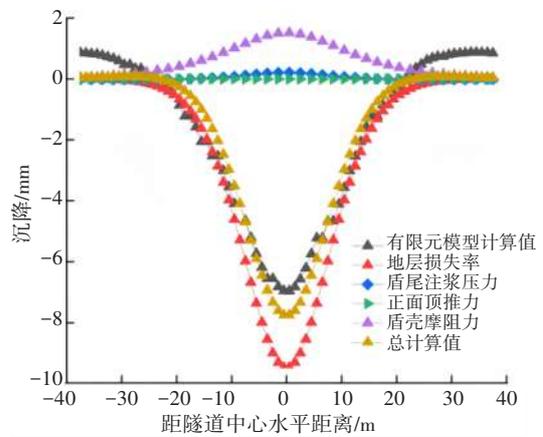
由图 6(b)可知,当盾构机刀盘到达管线正下方

(隧道开挖面到管线的水平距离为 0)时,管线的最大竖向沉降值为 7.74 mm。其中,盾壳摩阻力对管线竖向隆起的影响最大,最大竖向隆起值为 1.51 mm。四种因素叠加后的管线最大竖向沉降值为 7.74 mm(总计算值),与图 6(a)相比,该值增加了 4.03 mm。

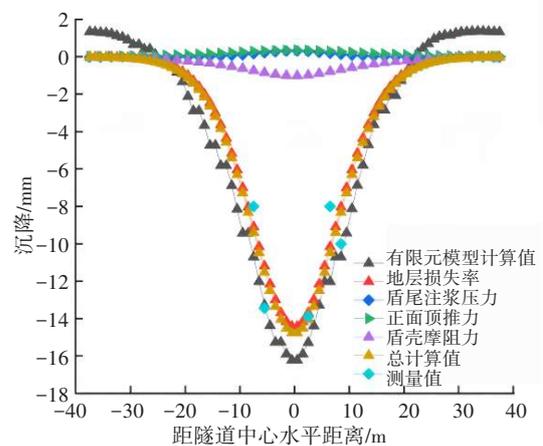
由图 6(c)可知,当隧道开挖面到管线的水平距离为 -12 m 时,四种因素叠加后的管线最大竖向沉



(a) $y=12$ m 时管线竖向位移曲线



(b) $y=0$ m 时管线竖向位移曲线



(c) $y=-12$ m 时管线竖向位移曲线

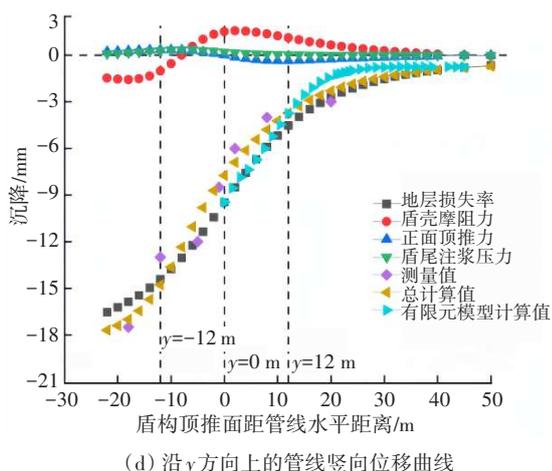


图6 多因素影响下管线竖向位移曲线

Fig. 6 Vertical displacement curves of pipelines under the influence of multiple factors

降值为 14.70 mm,与盾构机刀盘到达管线正下方的工况相比增长了 90%,这是因为盾尾脱离管片后形成的盾尾空隙使管线轴线处土体的地层损失率增大,从而缓解了管线竖向位移的增大。由图 6(d)可知,随着盾构机不断地向前掘进,管线的沉降值也越来越大,但最终趋于稳定。这一现象与盾构开挖时地层的三维沉降特性^[18]一致。在盾壳摩擦力的影响下,管线竖向位移随着顶推面与管线之间水平距离的减小而增大,在顶推面到达管线时达到最大,在顶推面离开管线后逐渐减小,并最终趋于稳定,整体上呈“S”形变化。

5 影响因素分析

5.1 地层损失率 η 对管线竖向位移的影响

为研究不同地层损失率对管线竖向位移的影响,本文分别取地层损失率为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0% 四种情况进行分析。计算得到的土体损失率与管线最大竖向位移的关系如图 7 所示。在盾构穿越上软下硬的复合地层时,掘进推力、同步注浆压力、土舱压力造成的地层损失率依次变大^[22]。分析图 7 可知,随着土体损失率的增大,管线最大竖向位移逐渐增大,且增大较为明显。因此,在盾构掘进的过程中,须优化掘进参数,控制土体损失率,以减小对地层的扰动。

5.2 管线抗弯刚度的影响

在实际工程中,管线的材质繁多,其抗弯刚度也有所不同。为分析不同管线抗弯刚度对管线竖向位移的影响,本文分别取三种不同管材所对应的

抗弯刚度 4.8×10^5 、 3.5×10^4 、 2.5×10^3 kN/m^2 进行计算,其他参数均与前文一致。在盾构开挖 8 环后,采用本文方法计算上述三种抗弯刚度下管线的竖向位移,结果如图 8 所示。由图 8 可知,当管线抗弯刚度为 4.8×10^5 、 3.5×10^4 、 2.5×10^3 kN/m^2 时,管线的最大竖向沉降值分别为 14.77、15.90、16.59 mm。由此可见,随着管线抗弯刚度的增大,最大竖向位移有减小的趋势。

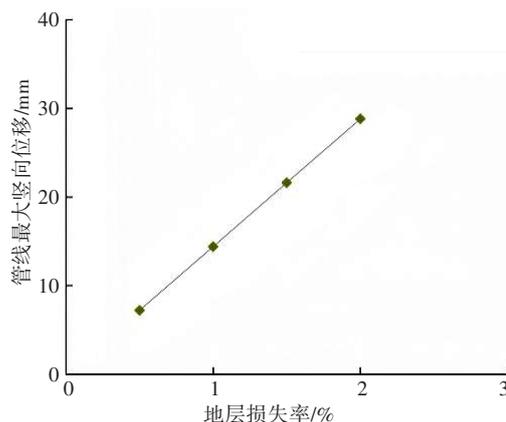


图7 土体损失率与管线最大竖向位移的关系

Fig. 7 Relationship between soil loss rate and vertical settlement of pipelines

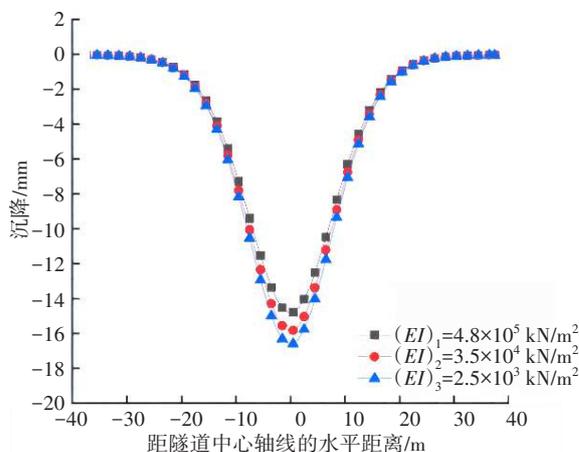


图8 管线抗弯刚度与管线竖向位移的关系

Fig. 8 Relationship between flexural rigidity and vertical displacement of pipelines

5.3 数值模拟结果与工程测量结果的对比

由图 6(c)可知,当盾构开挖至 $y = -12$ m 时,开挖所导致的管线竖向位移总计算值与测量值曲线都大致呈“V”形,两者之间有一定偏差,在距离隧道最近处偏差最大,但偏差基本控制在 ± 1 mm 以内,总体上两者吻合较好。

由图 6(d)中在测点 1 处测得的开挖面掘进过程中 $y = -18$ 、 -12 、 -5 、 0 、 2 、 8 、 12 、 20 m 处上覆管线竖向

位移的8组数据可知,随着盾构开挖的进行,在开挖面到达管线 $y=0$ 时,测量值与模拟值的偏差超过1 mm,但在开挖面经过管线 $y=0$ 后,测量值与模拟值的偏差在1 mm以内。

综上所述,开挖产生的总位移模拟值与测量值吻合较好,说明本文所建模型的计算结果与工程实际情况较吻合。

6 讨论

1) 在实际工程中盾构施工所处地层一般是由多种土体组成的复合地层,盾构机掘进过程中所开挖的土体也是不一样的。本文为简化计算把复合地层等效成了一种土体,而盾构开挖计算采用复合地层可能会使结果更加精确。

2) 盾构开挖过程中水对施工的影响也很显著,本文未考虑地下水的影响,属于一种理想情况,而基于渗流-应力耦合的计算模型更贴合工程实际。

7 结论

1) 本文采用比Loganathan公式适用范围更广的盾构法统一土体移动模型三维解计算地层损失率造成的管线竖向位移,考虑了地层损失率沿盾构掘进方向的变化;结合Mindlin解考虑盾构施工过程中盾构正面顶推力、盾壳摩阻力、盾尾注浆压力、地层损失率四种因素叠加后对管线竖向位移的影响。计算结果与现场实测值、有限元分析值均较吻合。

2) 盾构隧道垂直下穿上覆管线引起的管线竖向位移曲线大致呈“V”形。地层损失率与盾壳摩阻力对管线竖向位移的影响最为显著,随着地层损失率与盾壳摩阻力的增大,管线竖向位移明显增大,盾构正面顶推力与盾尾注浆压力对管线竖向位移的影响较小。

3) 在盾构施工过程中,在盾壳摩阻力作用下沿 y 方向的管线竖向位移曲线呈“S”形,当顶推面到达管线正下方时管线竖向位移最大,当顶推面离开管线后管线竖向位移逐渐减小,并最终趋于稳定。该结论可为实际施工时提前开展的注浆隔离保护提供参考依据。

4) 通过参数分析发现,地层损失率对管线竖向位移的影响最明显,且两者成正相关关系;可以忽略不同材质的抗弯刚度对管线竖向位移的影响。

参考文献(References):

- [1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City:[s. n.],1969: 225-290.
- [2] 王春梅,何越磊,汪磊,等.隧道下穿引起地下管线竖向位移的计算方法研究[J].隧道建设,2016,36(2): 186-192. DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2016.02.010. WANG Chunmei, HE Yuelei, WANG Lei, et al. Calculation method for settlement of underground pipelines induced by shield undercrossing [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(2): 186-192. DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2016.02.010.
- [3] 魏纲,崔程虹,许讯,等.基于能量法的双圆盾构施工引起管线沉降计算[J].地下空间与工程学报,2019,15(4): 1106-1111. WEI Gang, CUI Chenghong, XU Xun, et al. Calculation of pipeline settlement induced by double-O-tube shield tunneling based on energy method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(4): 1106-1111.
- [4] 柳程柱,苏永华.盾构施工引起的管线变形规律及安全风险评估[J].铁道科学与工程学报,2020,17(11): 2882-2891. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200087. LIU Chengzhu, SU Yonghua. Pipeline deformation laws and safety risk assessments caused by shield construction [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(11): 2882-2891. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200087.
- [5] 毕继红,刘伟,江志峰.隧道开挖对地下管线的影响分析[J].岩土力学,2006,27(8): 1317-1321. DOI: 10.16285/j.rsm.2006.08.017. BI Jihong, LIU Wei, JIANG Zhifeng. Analysis of effects of tunnel excavation on underground pipeline [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1317-1321. DOI: 10.16285/j.rsm.2006.08.017.
- [6] 王正兴,缪林昌,王冉冉,等.砂土隧道施工对下卧管线影响的试验和数值模拟分析[J].岩土工程学报,2014,36(1): 182-188. DOI: 10.11779/CJGE201401019. WANG Zhengxing, MIAO Linchang, WANG Ranran, et al. Physical model tests and PFC^{3D} modeling of soil-pipe interaction in sands during tunnelling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 182-188. DOI: 10.11779/CJGE201401019.
- [7] 朱叶艇,张桓,张子新,等.盾构隧道推进对邻近地下管线影响的物理模型试验研究[J].岩土力学,2016,37(增刊2): 151-160. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S2.018. ZHU Yeting, ZHANG Huan, ZHANG Zixin, et al. Physical model test study of influence of advance of shield tunnel on adjacent underground pipelines [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(sup 2): 151-160. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S2.018.
- [8] 张桓,张子新.盾构隧道开挖引起既有管线的竖向变形

- [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 1172-1178. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2013.08.009.
- ZHANG Huan, ZHANG Zixin. Vertical deflection of existing pipeline due to shield tunnelling [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(8): 1172-1178. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2013.08.009.
- [9] LOGANATHAN N, POULOS H G, XU K J. Ground and pile-group responses due to tunnelling [J]. Soils and Foundations, 2001, 41(1): 57-67. DOI: 10.3208/sandf.41.57.
- [10] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846-856. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(1998)124: 9(846).
- [11] PASTERNAK P L. Fundamentals of a new method of analyzing structures on an elastic foundation by means of two foundation constants [M]. Moscow: Gosudarstvennoe Izdatelstvo Libieraturi Po Stroitelstvui Arkhitekture, 1954.
- [12] 程霖, 杨成永, 马文辉, 等. 地铁隧道开挖引起的管线变形计算与试验研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 7-13. DOI: 10.13245/j.hust.220405.
- CHENG Lin, YANG Chengyong, MA Wenhui, et al. Deformation calculation and experimental study on buried pipes induced by subway tunnel excavation [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(4): 7-13. DOI: 10.13245/j.hust.220405.
- [13] 周先成. 隧道下穿既有地理管线响应分析及评估方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2022. DOI: 10.27372/d.cnki.gtjsu.2022.000833.
- ZHOU Xiancheng. Response analysis and evaluation method of existing buried pipelines due to tunneling underneath [D]. Shanghai: Tongji University, 2022. DOI: 10.27372/d.cnki.gtjsu.2022.000833.
- [14] 冯国辉, 肖明清, 倪建中, 等. 盾构下穿引起上覆管线变形的简化计算方法 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(5): 68-75. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2024048.
- FENG Guohui, XIAO Mingqing, NI Jianzhong, et al. Simplified calculated method for pipeline deformation induced by shield tunneling [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(5): 68-75. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2024048.
- [15] 冯国辉, 徐长节, 郑茗旺, 等. 新建隧道下穿既有隧道引起的隧-土相互作用研究 [J]. 工程力学, 2023, 40(5): 59-68. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.10.0828.
- FENG Guohui, XU Changjie, ZHENG Mingwang, et al. Study of tunnel-soil interaction induced by tunneling underlying [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(5): 59-68. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.10.0828.
- [16] 冯国辉, 徐长节, 郑茗旺, 等. 考虑剪切变形下盾构隧道引起上覆管线变形分析 [J]. 工程科学与技术, 2023, 55(3): 100-109. DOI: 10.15961/j.jsuese.202101185.
- FENG Guohui, XU Changjie, ZHENG Mingwang, et al. Deformation analysis of shield tunnel undercrossing existing pipeline considering shear deformation [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(3): 100-109. DOI: 10.15961/j.jsuese.202101185.
- [17] 冯国辉, 徐长节, 郑茗旺, 等. 侧向土体影响下盾构隧道引起上覆管线变形 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(8): 1453-1463. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2021.08.006.
- FENG Guohui, XU Changjie, ZHENG Mingwang, et al. Deflection of overlying pipeline induced by shield tunneling considering effect of lateral soil [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(8): 1453-1463. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2021.08.006.
- [18] 魏纲, 王彬, 许讯. Pasternak地基中盾构隧道穿越引起地下管线竖向位移 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(33): 158-165.
- WEI Gang, WANG Bin, XU Xun. Vertical displacement of underground pipeline caused by shield tunnel crossing in Pasternak foundation [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(33): 158-165.
- [19] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid [J]. Physics, 1936, 7(5): 195-202. DOI: 10.1063/1.1745385.
- [20] 魏纲. 盾构法隧道统一土体移动模型的建立 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 554-559. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2007.04.014.
- WEI Gang. Establishment of uniform ground movement model for shield tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 554-559. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2007.04.014.
- [21] 魏纲. 盾构法隧道施工引起的土体变形三维解 [C]// 第2届全国工程安全与防护学术会议论文集(下册). 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2010: 19-24.
- WEI Gang. 3-D analytical solution of ground deformation induced by shield tunneling construction [C]// Proceedings of the 2nd National Conference on Engineering Safety and Protection (Vol 2). Beijing: Chinese Rock Mechanics and Engineering Society, 2010: 19-24.
- [22] 李宇健, 黄戡, 孙逸玮. 盾构参数对复合地层损失率和地表沉降的影响 [J]. 交通科学与工程, 2022, 38(1): 70-78. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.01.010.
- LI Yujian, HUANG Kan, SUN Yiwei. Effect of shield parameters on formation loss rate and surface subsidence in composite strata [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(1): 70-78. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.01.010.

(责任编辑:石月珍)