

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.061

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



盾构隧道下穿管道施工引起的管道水平位移研究

管凌霄¹, 徐长节^{1,2}, 可文海¹, 丁海滨¹, 张高锋³, 虞巍巍⁴

- (1. 华东交通大学 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 南昌 330013; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058; 3. 浙江航海城际铁路有限公司, 浙江 嘉兴 314000; 4. 中交一公局集团有限公司, 北京 100037)

摘要:采用两段法研究了盾构隧道下穿管道施工引起的管道水平变形特性, 在第1阶段改进了Loganathan公式, 求得盾构隧道以任意角度下穿管道施工引起的管道轴线处土体水平位移, 第2阶段采用Vlasov模型模拟管-土相互作用, 并求得管道水平位移解析解。通过与工程监测数据及有限元计算结果的对比, 验证了方法的正确性, 并进一步分析了管道与隧道夹角、管道直径以及隧道埋深对管道变形的影响。结果表明: 盾构隧道斜下穿管道施工时, 隧道与管道相交角度的大小对管道水平位移造成的影响显著, 随着夹角的减小, 管道的水平位移逐渐增加; 当管道与隧道相交角度较小时, 盾构隧道开挖引起的管道水平位移相对管道竖向沉降不可被忽略; 随着管道直径的增大、隧道埋深的增加, 盾构隧道斜交下穿管道施工引起的邻近管道变形均减弱。

关键词:盾构隧道; 管道位移; 管道; 两阶段方法; 相互作用

中图分类号: U455.43; TU433 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2020)06-0054-09

Analysis of horizontal pipeline deformation caused by shield tunnelling

Guan Lingxiao¹, Xu Changjie^{1,2}, Ke Wenhai¹, Ding Haibin¹, Zhang Gaofeng³, Yu Weiwei⁴

- (1. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China; 3. Zhejiang Hanghai Intercity Railway Co., Ltd., Jiaxing 314000, Zhejiang, P. R. China; 4. CCCC First Highway Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100037, P. R. China)

Abstract: The two-stage method is used for analyzing the pipeline deformation caused by the underneath shield tunneling. In the first stage, the Loganathan formula is modified for studying the ground loss when the tunnel axis intersection with the pipeline axis is not orthogonal. The soil-pipeline interaction is studied based on the Vlasov model in the second stage, and the pipeline deformation is also obtained. Then, through comparison with the finite element results, the proposed method was verified to be correct. The

收稿日期: 2020-03-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB057801); 国家杰出青年科学基金(51725802); 浙江省自然科学基金委员会-华东院联合基金(LHZ19E080001)。

作者简介: 管凌霄(1996-), 男, 主要从事土与结构相互作用研究, E-mail: glx1392@163.com。

徐长节(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xucj@zju.edu.cn。

Received: 2020-03-06

Foundation items: Major State Basic Research Development Program of China (973 Program) (No. 2015CB057801); National Science Found for Distinguished Young Scholars (No. 51725802); Joint Fund of the Natural Science Foundation of Zhejiang Province and Huadong Engineering Corporation Limited (No. LHZ19E080001)

Author brief: Guan Lingxiao (1996-), main research interest: soil interacts with structure, E-mail: glx1392@163.com. Xu Changjie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xucj@zju.edu.cn.

influences of pipeline diameter; tunnel depth and intersection between the tunnel and pipeline on pipeline deformation have been further studied. The parametric study shows that the intersection angle of the tunnel and the pipeline significantly influences the pipeline horizontal displacement, and the pipeline deformation increases remarkably as the intersection angle decreasing. The parametric study indicates: a. the pipeline horizontal displacement can't be ignored compared to the pipeline vertical displacement when the intersection angle of the tunnel and the pipeline is relatively small; b. the pipeline deformation is weakening as the pipeline diameter and tunnel depth increasing.

Keywords: shield tunnelling; displacement of pipe; pipe; two-stage method; interaction

盾构隧道在掘进过程中会引起地层损失^[1],使邻近管道产生变形甚至破坏。城市地下管道是城市的生命线,如何全面分析盾构隧道开挖对邻近管道变形的影响,成了城市地铁工程中亟待解决的热点问题^[2-3]。

目前,在盾构隧道下穿管道施工引起的管道变形理论研究中,两段法是常用方法^[4],即将盾构隧道开挖对邻近管道变形的影响研究分为两个阶段^[5]:第1阶段分析盾构隧道开挖引起的管道轴线处土体位移;第2阶段将管道位置处的土体位移转化为荷载施加到管道上,再采用合理的弹性地基梁模型模拟管-土相互作用求解出管道变形的解析解。第1阶段中,Loganathan等^[6]提出盾构隧道开挖引起邻近土体位移的计算公式因其具有良好的计算精度被广泛应用^[7-8];在第2阶段中,通常采用弹性地基梁理论分析管-土相互作用,而地基模型以Winkler地基模型和Pasternak地基模型为主^[9-10]。张治国等^[7]采用Loganathan公式研究了邻近盾构隧道开挖对既有软土隧道的影响;魏纲等^[9]利用可考虑土中剪力的Pasternak模型研究了双线隧道开挖引起的管道竖向位移。虽然Pasternak模型在Winkler模型的基础上计入了土中剪力传递,被广泛应用于研究土-结构相互作用问题^[11-12],但Pasternak模型的缺点在于其关键参数只能采用试验或经验公式估算,无法通过准确的数理推导求得,而考虑地基土沿变形方向衰减变形的Vlasov地基模型能在理论上更好地解决这个问题^[13]。施成华等^[14]采用Vlasov地基模型分析基坑开挖对邻近单桩的影响;刘建文等^[15]采用Vlasov地基模型计算了基坑开挖引起下卧地铁隧道的隆起变形量。除了理论研究之外,在试验研究方面,Vorster等^[16]进行了隧道开挖对邻近地理管道影响的离心模型试验;在数值分析方面,张治国等^[17]采用两阶段解析方法并结合有限元数值模拟了类矩形盾构隧道开挖对邻近管线竖向位移

的影响;在工程实例研究方面,孙宇坤等^[18]对某沿海城市盾构隧道下穿管道施工引起管道沉降的监测数据进行了分析。

众多学者对盾构隧道开挖引起邻近管道竖向位移的问题进行了大量分析,但对于盾构隧道开挖引起管道水平位移的研究还鲜有学者涉及。根据Deane等^[19]对Heathrow Express Trial Tunnel的监测结果,土体的水平位移最大可达22.5 mm,Plamer等^[20]对Thunder Bay隧道的监测结果显示,土体最大水平位移可达34 mm。如此大的土体水平位移会引起显著的水平向管-土相互作用,此时,只考虑竖向管-土相互作用无法真实模拟管道的变形情况。因此,有必要针对盾构隧道开挖引起的邻近管道水平位移进行相关研究。笔者拟采用两段法,在第1阶段改进Loganathan公式求取了隧道与管道以任意夹角相交情况下盾构隧道开挖引起邻近管道轴线位置处的土体水平位移;第2阶段采用Vlasov弹性地基梁模型模拟水平向管-土相互作用并求解盾构隧道下穿邻近管道施工引起的管道水平位移解析解。随后,将计算结果与工程实测值及有限元模拟结果进行对比验证,并深入分析了隧道与管道夹角、管道直径及隧道埋深等因素对管道水平位移的影响。

1 水平向管-土相互作用分析

盾构隧道开挖时,邻近土体自由场会产生竖向及水平向位移,由于已有研究多是隧道轴线与管道轴线垂直相交的工况,该工况下盾构隧道开挖引起的土体水平位移对管道的作用转化成了管道的轴力,以至于盾构隧道开挖对邻近管道的影响可忽略。但隧道轴线与管道轴线以非垂直方式相交时,盾构隧道开挖引起的土体水平位移对管道产生的作用为具有一定角度的水平力,具体管道的受力模式见图1。

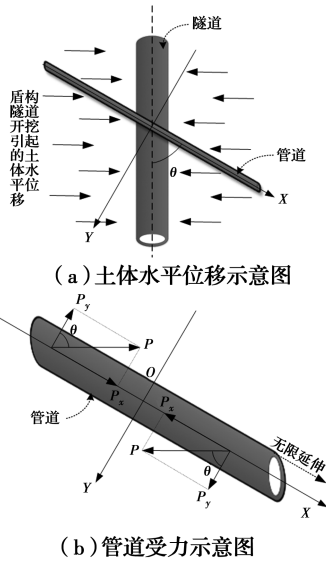


图 1 考虑土体水平位移作用的管道受力示意图
Fig. 1 Schematic diagram of forces on the pipeline considering horizontal displacement of the soil

图 1(a)为盾构隧道开挖引起的土体水平位移示意图。从图 1 中可以看出,管道与隧道以非垂直的角度相交时,隧道开挖引起的土体水平位移以一定的角度作用在管道上。图 1(b)为管道受力示意图,图中 P 为土体水平位移对管道造成的外力, P_x 为外力 P 在 X 轴方向上的分力(平行于管道), P_y 为外力 P 在 Y 轴方向上的分力(垂直于管道)。从图中可看出,当隧道与管道以非垂直的方式相交时,盾构隧道开挖引起的土体水平位移对管道造成的外力可分解为垂直和平行于管道轴线方向的两个分力,其中,垂直于管道轴线的分力 P_y 会使管道产生水平向的位移。基于此,采用两阶段法对盾构隧道下穿管道施工引起的管道水平位移进行求解。

2 土体水平位移求解

2.1 盾构隧道开挖引起的土体水平位移

1998 年 Loganathan 提出了盾构隧道开挖引起邻近土体位移的解析解,其计算结果与实测值十分吻合。根据 Loganathan 公式,盾构隧道开挖引起邻近的土体水平位移可以表示为^[6]

$$U_x(x, z) = -R^2 \varepsilon_0 e^{-\left[\frac{1.38x^2 + 0.69z^2}{(H+R)^2 + H^2} \right]} \cdot \left\{ -\frac{1}{x^2 + (z-H)^2} + \frac{4z(z+H)}{[x^2 + (z+H)^2]^2} + \frac{(3-4\nu)}{x^2 + (z+H)^2} \right\} \quad (1)$$

式中: R 为盾构隧道开挖半径; x 为距隧道中心线的

水平距离; ε_0 为盾构隧道开挖引起的周围土体平均损失率; H 为隧道轴线埋深; z 为距地表的垂直距离; ν 为土体泊松比。

2.2 邻近管道轴线位置的土体水平位移

图 2 为简化计算模型, D 为管道外径, z_0 为管道轴线埋深。隧道开挖引起 $z = z_0$ 处的土体水平位移为 $U_x(x)$ 。

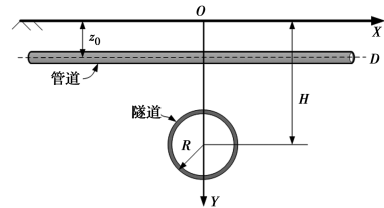


图 2 盾构隧道开挖对既有管线影响模型
Fig. 2 Simplified model for the influence of the shield tunneling on the existing pipeline

如图 3 所示,隧道与管道可以以任意角度相交,管道轴线上任意点到隧道轴线的距离为 $\sin \theta \cdot x$, 因此,管道轴线位置的土体水平位移公式需要将隧道与管道的夹角 θ 引入式(1),得

$$U_x(x) = -R^2 (x \sin \theta) \varepsilon_0 \cdot \left\{ -\frac{1}{(x \sin \theta)^2 + (z_0 - H)^2} - \frac{4z_0(z_0 + H)}{[(x \sin \theta)^2 + (z_0 + H)^2]^2} + \frac{(3-4\nu)}{(x \sin \theta)^2 + (z_0 + H)^2} \right\} e^{-\left[\frac{1.38(x \sin \theta)^2 + 0.69z_0^2}{(H+R)^2 + H^2} \right]} \quad (2)$$

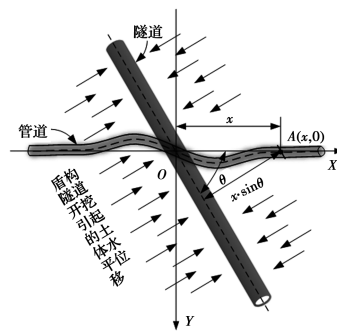


图 3 管道与隧道相交示意图
Fig. 3 Diagram of relative position between the tunnel and pipeline

3 管道水平位移的求解

3.1 管道水平位移控制方程

图 4 为 Vlasov 地基模型。该模型与 Pasternak 模型同为双参数模型,但该模型的土体参数可以通

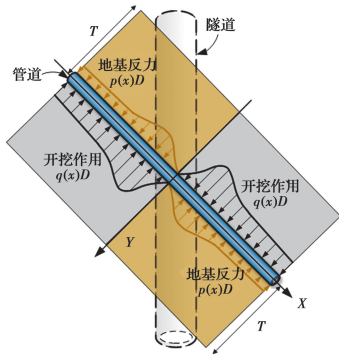


图 4 Vlasov 地基模型

Fig. 4 Vlasov foundation model

过具体的数学公式求得,并且考虑了地基土沿着变形方向上的衰减变形。其中地基水平反力 $p(x)$ 与管道水平位移 $u(x)$ 的关系为

$$p(x) = ku(x) - 2t \frac{d^2 u(x)}{dx^2} \quad (3)$$

式中: k 为地基反力系数; t 为土层剪切系数。根据 Vlasov 公式, k 和 t 可采用如下式(4)计算。

$$k = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \int_0^T \left(\frac{dh(y)}{dz} \right)^2 dy \quad (4a)$$

$$2t = \frac{E}{2(1+\nu)} \int_0^T h^2(y) dy \quad (4b)$$

式中: E 土体弹性模量; T 为地基弹性层厚度,取 $T=2.5D$ [21]; $h(y)$ 为土体水平位移沿 y 方向的衰减函数,一般可为线性或指数函数,参考文献[14],采用线性函数的形式。

此时,管道受盾构隧道开挖影响的水平向变形平衡方程为

$$E_p I_p \frac{d^4 u(x)}{dx^4} + p(x)D = q(x)D \quad (5)$$

整理可得

$$\frac{d^4 u(x)}{dx^4} - \gamma \frac{d^2 u(x)}{dx^2} + \lambda^4 u(x) = \frac{q(x)D}{E_p I_p} \quad (6)$$

式中: $\gamma=2tD/E_p I_p$, $E_p I_p$ 为管道弯曲刚度,其中 E_p 管道弹性模量, I_p 为管道横截面惯性矩; $\lambda = \sqrt[4]{kD/E_p I_p}$; $q(x)$ 为管道所受到的外荷载。

3.2 管道水平位移控制方程的求解

为求解式(6),可先令 $q(x)=0$ 求其通解,得

$$u(x) = e^{\alpha x} [A_1 \cos(\beta x) + A_2 \sin(\beta x)] + e^{-\alpha x} [A_3 \cos(\beta x) + A_4 \sin(\beta x)] \quad (7)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为待定系数; $\alpha = \sqrt{\lambda^2/2 + \gamma/4}$; $\beta = \sqrt{\lambda^2/2 - \gamma/4}$ 。

由文献[22]、文献[8]可知,为求解管道受分布力作用下的控制方程式(6),可先求解集中力作用下的管道控制方程。即假设无限长管道在 $x=0$ 的点上受到集中荷载 Q ,可以得到此时管道的边界条件为

$$u(\pm \infty) = 0 \quad (8)$$

$$\left. \frac{du(x)}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad (9)$$

$$E_p I_p \left. \frac{d^3 u(x)}{dx^3} \right|_{x=0} = Pb/2 \quad (10)$$

将上述边界条件代入通解式(7)中,可以解得集中荷载作用下无限长管道的位移方程为

$$u(x) = \frac{QD}{4E_p I_p \alpha \beta (\alpha^2 + \beta^2)} e^{-\alpha x} (\beta \cos \beta x + \alpha \sin \beta x) \quad (11)$$

由图 1 可知,在盾构隧道开挖的影响下,管道所受到的水平外荷载为土体水平位移在垂直于管道方向产生的作用力,基于 Vlasov 地基模型得到

$$q(x) = -2t \frac{d^2 [U_x(x) \cos \theta]}{dx^2} + k [U_x(x) \cos \theta] \quad (12)$$

在管道轴线任意点 η 受到土体位移产生的附加荷载 $Q=q(\eta)d\eta$,根据式(11),可得出该荷载在管道轴线上任意点上引起的管道水平位移 $du(x)$

$$du(x) = \frac{q(\eta)D}{4E_p I_p \alpha \beta (\alpha^2 + \beta^2)} e^{-\alpha |x-\eta|} \cdot \quad (13)$$

$$[\beta \cos(\beta |x-\eta|) + \alpha \sin(\beta |x-\eta|)] d\eta$$

对式(13)在管道附加荷载分布范围内积分,即可求得由于隧道开挖而引起的管道水平位移

$$u(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} du(x) \quad (14)$$

4 管道竖向位移的求解

在研究盾构隧道下穿管道施工引起的管道竖向位移时,根据 Loganathan 公式、管道埋深 z_0 、隧道与管道夹角 θ 同样可以得出盾构隧道开挖引起管道轴线位置的土体竖向位移 $U_z(x)$ [23]

$$U_z(x) = R^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \left\{ \frac{2z_0 [(x \cdot \sin \theta)^2 - (z_0 + H)^2]}{[(x \cdot \sin \theta)^2 + (z_0 + H)^2]^2} + (3-4\nu) \frac{z_0 + H}{(x \cdot \sin \theta)^2 + (z_0 + H)^2} - \frac{z_0 - H}{(x \cdot \sin \theta)^2 + (z_0 - H)^2} \right\} e^{-\left[\frac{1.38(x \cdot \sin \theta)^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69z_0^2}{H^2} \right]} \quad (15)$$

当隧道与管道夹角 $\theta=90^\circ$ 时,式(15)退化成原始的 Loganathan 公式。

将式(15)的土体竖向位移代入式(12)得到土体竖向位移对管道造成的竖向外荷载 $q_z(x)$

$$q_z(x) = -2t \frac{d^2 U_z(x)}{dx^2} + k U_z(x) \quad (16)$$

令 $Q=q_z(\eta) d\eta$, 并将 Q 代入式(13), 再按照式(13)与式(14)的计算步骤, 便可得出盾构隧道下穿管道施工引起的管道竖向位移 $u_z(x)$ 。

5 算例验证

目前, 由于尚没有分析盾构隧道下穿管道施工引起管道水平位移的工程实例, 因此, 以分析管道竖向位移的工程实例结合有限元模拟来验证所提出的计算方法。

首先, 以深圳地铁一期工程益田站至香蜜湖站盾构隧道上方的电缆管道竖向位移监测数据对本文计算管道竖向位移的方法进行验证^[24]。该地铁区间盾构隧道施工过程中垂直下穿一条半径 $r=1.5\text{ m}$ ($D=3\text{ m}$) 的混凝土电缆管道, 管道壁厚为 0.12 m , 弹性模量为 $E_p=2.5 \times 10^4\text{ MPa}$, 管道轴线埋深 $z_0=8.7\text{ m}$ 。其中管道竖向位移实测值取管道内东西两排测线的平均值。该实例中其他参数取值参考文献[8], 如表 1。

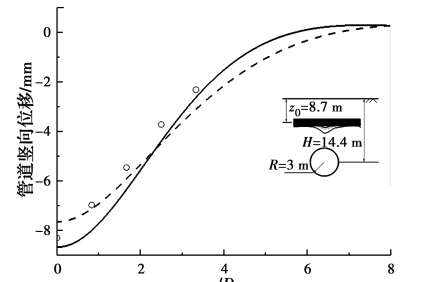
表 1 管道计算参数

Table 1 Parameters for the pipeline

R/m	H/m	z_0/m	$\epsilon_0/\%$	E/MPa	ν
3.0	14.4	8.7	0.84	8.2	0.3

从图 5 中可以看出, 该计算方法所得到的曲线与工程实测值所呈现的规律接近、结果较为一致, 证明了计算管道竖向位移所用方法的准确性。此外, 图 5 中虚线为采用 ABAQUS 软件的模拟结果, 将管道模拟为欧拉-伯努利梁, 采用的管道截面及弹性模量皆与工程实例一致。再利用式(15)与式(16)将土体竖向位移转化为作用于管道上的荷载, 同时为管道设置弹簧刚度为 k 的接地弹簧 (k 的值采用式(4a)进行计算)。有限元模拟得出的结果略小于理论计算结果以及工程实测值, 但曲线变化规律一致, 证明有限元模拟具有一定的准确性。

采用式(12)计算土体水平位移产生的荷载, 并



注: \circ 实测值 — 本文计算值 - - 有限元计算值

图 5 管道竖向位移

Fig. 5 Vertical displacement of pipeline

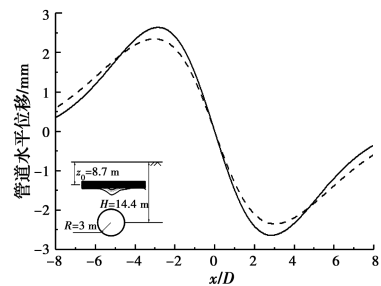
施加到管道模式上, 以此模拟管道受盾构隧道开挖影响而引起的管道水平位移。考虑到管道与隧道之间夹角较小, 可能会产生明显的水平向管-土相互作用, 故选取角度为 30° 时的土体水平位移转化成荷载作用在管道上。表 2 为有限元模型中采用的参数, 其中 ν_p 为管道泊松比。

表 2 管道模型计算参数

Table 2 Parameters for the pipeline model

r/m	壁厚/m	总长/m	E_p/MPa	ν_p	$k/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$
1.5	0.12	200	2.5×10^4	0.2	1.472×10^6

图 6 为计算结果与有限元模拟结果的对比如。从图 6 可看出, 计算得到的管道最大水平位移值为 2.64 mm , 略大于有限元模拟的 2.35 mm , 且两条水平位移曲线基本吻合、曲线变化规律相似, 证明了所提出的盾构隧道开挖引起的管道水平变形计算方法的正确性。



注: — 本文计算值 - - 有限元计算值

图 6 管道水平位移

Fig. 6 Horizontal deformation of pipeline

6 参数分析

为研究管道水平位移与各因素之间的关系, 假设地铁盾构隧道以 30° 夹角下穿地下管道, 其中隧道的计算参数为: $H=14\text{ m}$ 、 $R=3\text{ m}$; 管道计算参数

为: $D=0.5\text{ m}$ 、 $t=30\text{ mm}$ 、 $z_0=6\text{ m}$ 、 $E_p=2.6\times 10^4\text{ MPa}$;土体计算参数为: $E=5.2\text{ MPa}$ 、 $\nu=0.3$ 、 $\varepsilon_0=1\%$ 。在研究某一参数对管道水平位移的影响时,其余参数不变。

6.1 不同管道-隧道夹角下管道水平位移

为研究管道与隧道夹角变化对管道位移的影响,分别取夹角为 75° 、 60° 、 45° 、 30° 及 15° 进行分析。

当管道以不同角度与隧道相交时,其轴线位置处的土体水平位移如图 7 所示。由图 7 可知,管道轴线位置上发生土体水平位移最大的点随着夹角的减小而逐渐远离隧道与管道的交点($x=0$),但土体水平位移的最大值并没有改变。这是因为土体最大水平位移值只与隧道的参数有关。

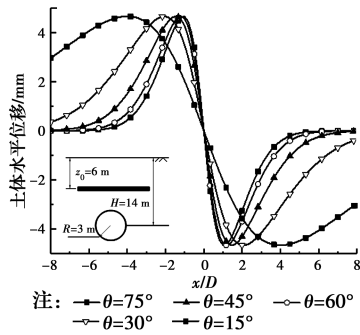


图 7 不同夹角的土体水平位移

Fig. 7 Soil horizontal deformation at different intersection angles

图 8 为管道与隧道以不同夹角相交时的管道水平位移曲线。由图 8 可知,管道与隧道的夹角从 75° 逐渐减小至 15° 时,管道水平位移值随之增大,同时发生最大位移的点逐渐远离隧道与管道的交点。其原因是,管道与隧道的夹角减小时,隧道开挖引起的土体水平位移对垂直于管道轴线方向产生的作用力增加(由图 1 可知, $P_y=P \cdot \cos \theta$, 当 θ 减小时, $\cos \theta$ 增大),因此,管道水平位移值随之增大。结合图 8 可看出,管道发生最大位移的点与土体位移最大值位置的变化规律一致。

同时,从图 8 可以看出,管道水平位移关于原点($x=0$)对称,原点两侧的管道最大水平位移大小相等但方向相反,所以,此时应该以这两点的相对水平位移来判定管道是否处于安全状态。

表 3 列出了不同夹角下管道发生的最大相对位移(包括水平与竖向)。结合表 3 可以看出,随着夹角的减小,管道水平与竖向的最大相对位移值都在增

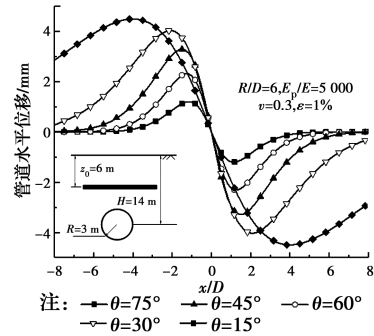


图 8 不同夹角的管道水平位移

Fig. 8 Pipeline horizontal deformation at different intersection angles

大,但水平最大相对位移值增大的比较明显,说明管道的水平位移受隧道与管道夹角的影响较大。在 $\theta=15^\circ$ 时管道水平最大相对位移值达到了 8.988 mm ,此时,竖向最大相对位移与它的比值为 2.16 ,即水平位移为竖向位移的 46.28% ,说明在管道与隧道夹角较小时,盾构隧道开挖引起的管道变形中水平位移不应被忽略。

表 3 不同夹角下的管道最大相对位移

Table 3 The maximum pipeline relative displacement at different intersection angles

夹角 $\theta/(^\circ)$	相对水平位移 最大值/mm	相对竖向位移 最大值/mm	竖向位移/ 水平位移
75	2.408	18.972	7.87
60	4.622	19.095	4.13
45	6.576	19.25	2.93
30	8.052	19.365	2.40
15	8.988	19.421	2.16

6.2 不同直径管道水平位移

为研究管道直径变化对管道水平位移的影响,取 $D=0.5\text{ m}$ ($t=30\text{ mm}$)、 $D=1\text{ m}$ ($t=60\text{ mm}$)、 $D=1.5\text{ m}$ ($t=90\text{ mm}$) 及 $D=2\text{ m}$ ($t=120\text{ mm}$) 5 组管道直径进行分析。

当盾构隧道下穿不同直径管道时,引起的管道水平位移曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出,直径更大的管道产生的水平位移更小,原因是管道直径变大引起了管道弯曲刚度的增大,使得土体位移对管道的影响程度减弱。除此之外,随着管道半径增加,管道上产生最大水平位移的位置逐渐远离原点,但此时土体产生最大水平位移的位置是没有变化。分析认为,由于管道的水平位移关于原点对称,当两

个最大水平位移点靠得更近时,管道的变形程度更加剧烈。而在管道直径增加引起管道弯曲刚度增加时,增大的弯曲刚度必然会使得这样的变形程度减弱,所以,管道直径的增加不仅会使管道产生的水平位移减小,还会使最大水平位移产生的位置远离原点($x=0$),即管道的水平变形程度减弱。

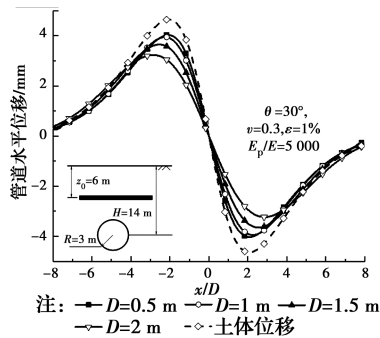


图 9 不同直径管道的水平位移

Fig. 9 Pipeline horizontal deformation with different pipeline diameter

表 4 列出了不同直径管道在盾构隧道斜下穿施工时所产生的相对位移最大值。从表 4 可以看出,随着管道直径的增大,管道的竖向最大相对位移与水平最大相对位移变化一致,都呈逐渐减小的趋势。

表 4 不同直径管道的最大相对位移

Table 4 The maximum pipeline relative displacement with different pipeline diameter

管道直径/m	相对水平位移最大值/mm	相对竖向位移最大值/mm	竖向位移/水平位移
0.5	8.052	19.365	2.40
1	7.89	18.877	2.39
1.5	7.304	17.92	2.45
2	6.468	16.722	2.59

6.3 不同隧道埋深下管道水平位移

为研究在盾构隧道开挖过程中隧道轴线埋深不同的情况下管道的水平位移,取 5 组隧道轴线埋深进行分析,分别为 14、15、16、17、18 m。

图 10 为不同轴线埋深的盾构隧道施工时所引起的管道水平位移曲线。从图 10 可以看出,随着隧道轴线埋深的增加,管道产生的最大水平位移逐渐减小,且管道的变形程度也逐渐减弱。这是因为管道轴线埋深一定时,隧道埋深的增加会使得隧道与管道的距离逐渐增加,这时盾构隧道的施工对管道

的影响减弱,即引起的管道水平变形程度减弱。

表 5 列出了轴线埋深不同的盾构隧道施工时所引起的管道相对位移最大值。从表 5 可以看出,随着隧道的埋深逐渐增加,管道的竖向最大相对位移也逐渐减少,说明对于同一管道隧道与其相对距离的增加,可以减弱隧道施工对管道的影响。

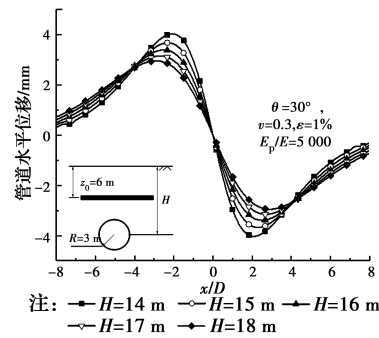


图 10 不同隧道半径的管道水平位移

Fig. 10 Pipeline horizontal deformation with different tunnel depth

表 5 不同埋深隧道引起的管道最大相对位移

Table 5 The maximum pipeline relative displacement with different tunnel depth

隧道轴线埋深/m	相对水平位移最大值/mm	相对竖向位移最大值/mm	竖向位移/水平位移
14	8.052	19.365	2.40
15	7.352	18.022	2.45
16	6.782	16.853	2.48
17	6.306	15.829	2.51
18	5.904	14.924	2.53

6.4 盾构隧道开挖引起的管道应变分析

取初始计算模型,分别计算出盾构隧道下穿管道施工引起的管道水平向应变及竖向应变,并进行比较分析。

图 11 为盾构隧道开挖引起的管道应变曲线图,图中正、负值分别对应管道的拉应变及压应变。其中,水平向最大拉、压应变皆为 $15.533\mu\epsilon$,竖向最大拉应变为 $34.249\mu\epsilon$,竖向最大压应变为 $9.007\mu\epsilon$ 。对比可知,管道的水平向最大拉应变达到了竖向最大拉应变的 45.4%,而且水平向最大压应变超过了竖向最大压应变,达到了 1.72 倍。当管道材质对压应变非常敏感时,便可能由于水平向压应变过大而导致管道破坏。由此进一步说明了盾构隧道斜下穿管道施工时,管道的水平变形特性不应被忽略。

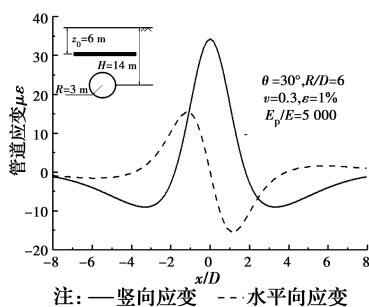


图 11 管道应变

Fig. 11 Strain induced in the pipeline

7 结论

改进 Loganathan 公式计算了盾构隧道开挖引起邻近管道轴线位置处的土体水平位移,基于考虑土中剪力传递的 Vlasov 模型得出了土体自由场中管道的水平位移解析解,经过分析得出以下结论:

1) 盾构隧道开挖方向与管道轴线的夹角对管道水平位移的影响比较显著。随着夹角角度的逐渐减小,盾构隧道开挖引起的水平位移逐渐增大。

2) 在 $\theta=15^\circ$ 时管道水平最大相对位移值可达到了 8.988 mm,为竖向最大相对位移的 46.28%,说明在管道与隧道相交角度较小时,盾构隧道开挖引起的管道水平位移不应被忽略。

3) 控制其余参数不变,管道直径的增加会导致管道的变形程度减弱、相对位移(包括竖向及水平)最大值的减小;隧道埋深的增加会减弱盾构施工对管道造成的影响。

4) 从管道的弯曲应变来看,盾构隧道下穿管道施工时,引起的管道水平向最大压应变超过了竖向最大压应变。因此,对于极限压应变较小的管道,更应关注管道的水平向变形特性。

参考文献:

[1] XIANG Y Z, LIU H L, ZHANG W G, et al. Application of transparent soil model test and DEM simulation in study of tunnel failure mechanism [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 74: 178-184.

[2] KLAR A, MARSHALL A M. Linear elastic tunnel pipeline interaction: the existence and consequence of volume loss equality [J]. Géotechnique, 2015: 1-5.

[3] 马少坤, 刘莹, 邵羽, 等. 盾构双隧道不同开挖顺序及不同布置形式对管线的影响研究[J]. 岩土工程学报,

2018, 40(4): 689-697.

MA S K, LIU Y, SHAO Y, et al. Effects of twin shield tunneling with different construction sequences and different relative locations on adjacent pipelines [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 689-697. (in Chinese)

[4] KLAR A, VORSTER T E B, SOGA K, et al. Soil-pipe interaction due to tunnelling: comparison between Winkler and elastic continuum solutions [J]. Géotechnique, 2005, 55(6): 461-466.

[5] 张治国, 徐晨, 宫剑飞. 考虑桩侧土体三维效应和地基剪切变形的隧道开挖对邻近桩基影响分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 846-856.

ZHANG Z G, XU C, GONG J F. Influence of tunneling on deflection of adjacent piles considering shearing deformation of foundation and 3D effects of lateral soils beside piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 846-856. (in Chinese)

[6] 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.

[7] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 邻近开挖对既有软土隧道的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1373-1380.

ZHANG Z G, HUANG M S, WANG W D. Responses of existing tunnels induced by adjacent excavation in soft soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1373-1380. (in Chinese)

[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.

ZHANG H, ZHANG Z X. Vertical deflection of existing pipeline due to shield tunneling [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(8): 1172-1178. (in Chinese)

[9] 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 G, WANG B, XU X. Vertical displacement of underground pipeline caused by shield tunnel crossing in Pasternak foundation [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(33): 158-165. (in Chinese)

[10] 王雨, 陈文化, 王锦华. 隧道开挖引起邻近单桩水平反

- 应分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 819-826, 841.
- WANG Y, CHEN W H, WANG J H. Lateral response of adjacent single pile due to tunneling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(3): 819-826, 841. (in Chinese)
- [11] KE W H, LIU Q J, ZHANG C. Kinematic bending of single piles in layered soil [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(1): 101-110.
- [12] ZHANG C, DENG P, KE W H. Assessing physical mechanisms related to kinematic soil-pile interaction [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 114: 22-26.
- [13] VLASOV V Z, LEONTIEV U N. Beams, plates and shells on elastic foundations [M]. *Israel Program for Scientific Translations*, 1966, 67: 14238.
- [14] 施成华, 刘建文, 王祖贤, 等. 基坑开挖对邻近单桩影响的改进计算方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(10): 105-113.
- SHI C H, LIU J W, WANG Z X, et al. Improved method of calculating the influence of foundation pit excavation on adjacent single pile [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(10): 105-113. (in Chinese)
- [15] 刘建文, 施成华, 雷明锋, 等. 基坑开挖对下卧地铁隧道影响的解析计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9): 2215-2225.
- LIU J W, SHI C H, LEI M F, et al. Analytical method for influence analysis of foundation pit excavation on underlying metro tunnel [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(9): 2215-2225. (in Chinese)
- [16] VORSTER T E B, MAIR R J, SOGA K, et al. Centrifuge modelling of the effects of tunneling on buried pipelines: Mechanisms observed [C]// *Proceedings of the 5th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Amsterdam, the Netherlands, 2005: 27-33.
- [17] 张治国, 师敏之, 张成平, 等. 类矩形盾构隧道开挖引起邻近地下管线变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 852-864.
- ZHANG Z G, SHI M Z, ZHANG C P, et al. Research on deformation of adjacent underground pipelines caused by excavation of quasi-rectangular shields [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 852-864. (in Chinese)
- [18] 孙宇坤, 吴为义, 张土乔. 软土地区盾构隧道穿越地下管线引起的管线沉降分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 80-85.
- SUN Y K, WU W Y, ZHANG T Q. Analysis on the pipeline settlement in soft ground induced by shield tunneling across buried pipeline [J]. *China Railway Science*, 2009, 30(1): 80-85. (in Chinese)
- [19] DEANE A P, BASSETT R H. The heathrow express trial tunnel [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(8): A411.
- [20] PALMER J H L, BELSHAW D J. Deformations and pore pressures in the vicinity of a precast, segmented, concrete-lined tunnel in clay [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1980, 17(2): 174-184.
- [21] LIANG R Z, XIA T D, HUANG M S, et al. Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect [J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 81: 167-187.
- [22] 塞尔瓦杜雷. 土与基础相互作用弹性分析[M]. 范文田, 等. 译. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- SELVADURALA P S. Elastic analysis of soil-foundation interaction [M]. Translated by FAN W T, et al. Beijing: China Railway Publishing House, 1984. (in Chinese)
- [23] 可文海, 管凌霄, 刘东海, 等. 盾构隧道下穿管道施工引起的管-土相互作用研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 221-228, 234.
- KE W H, GUAN L X, LIU D H, et al. Research on upper pipeline-soil interaction induced by shield tunnelling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(1): 221-228, 234. (in Chinese)
- [24] 吴为义, 孙宇坤, 张土乔. 盾构隧道施工对邻近地下管线影响分析 [J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3): 58-62.
- WU W Y, SUN Y K, ZHANG T Q. Analysis of the effects on the adjacent underground pipelines by shield tunneling construction [J]. *China Railway Science*, 2008, 29(3): 58-62. (in Chinese)