

DOI: 10.7672/sgjs2026130160

基于地层损失参数改进的顶管施工地表 变形解析解研究*

姚耀龙¹, 顾玉仑¹, 晏 勤², 黄钰翔²

(1. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014; 2. 太原理工大学土木工程学院, 山西 太原 030024)

[摘要] 为研究顶管施工过程中各施工因素对地层及地表变形的影响,以某输水管道顶管施工工程为背景,综合考虑掌子面顶推力及注浆压力等因素,基于弹性力学中的 Mindlin 解,提出了改进的间隙参数 g ; 基于修正的地层损失参数,结合 Loganathan 土体变形公式,建立了考虑施工因素影响下隧道不均匀收敛的地表变形解析公式,并对该方法进行了验证。研究表明:理论公式计算得到的地表沉降曲线呈“V”形,沉降值由顶管轴线位置向两侧逐渐减小,与现场监测数据及数值模拟结果基本一致,且沉降曲线形态与经典解相似。对比分析显示,理论公式计算所得地表最大沉降值与现场监测数据最为接近,仅相差 5.7%;而经典解计算结果与监测数据差异较大,相差约 37.7%。解析解得到的沉降槽宽度与经典解相近,约为 $5D$,略小于实测值,数值模拟计算得到的沉降槽宽度约为 $6D$,与监测数据吻合良好,验证了该数值模拟的正确性。综上,推导的理论解综合考虑了多种施工因素的影响,为顶管施工引起的土体变形预测提供了更为精准的计算方法。

[关键词] 地下工程;输水管道;地层损失;间隙参数;Mindlin 解;沉降;监测

[中图分类号] U25 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2026)13-0160-07

Research on the Improved Analytical Solution for Ground Deformation Induced by Pipe Jacking Based on Ground Loss Parameter

YAO Yaolong¹, GU Yulun¹, YAN Qin², HUANG Yuxiang²

(1. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China;

2. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: To investigate the influence of various construction factors on ground and surface deformation during pipe jacking, this study, based on a water pipeline pipe jacking project, proposes an improved gap parameter g by incorporating construction factors such as face jacking force and grouting pressure, using the Mindlin solution from elasticity theory. An analytical formula for surface deformation considering the effect of construction factors on non-uniform tunnel convergence is established by combining the modified ground loss parameter with the Loganathan soil deformation formula, and the method is validated. The results show that The theoretically calculated surface settlement curve exhibits a “V” shape, with settlement values gradually decreasing from the axis of the pipe jacking toward both sides, which is generally consistent with on-site monitoring data and numerical simulation results, and the shape of the settlement curve is similar to that of the classical solution. Comparative analysis shows that the maximum surface settlement calculated by the theoretical formula is closest to the on-site monitoring data, with a difference of only 5.7%, whereas the results of the classical solution differ significantly from the monitoring data, with a discrepancy of approximately 37.7%. The settlement trough width obtained by the analytical solution in this paper is similar to the classical solution, approximately $5D$, slightly smaller than the measured value. The numerical simulation yields a settlement trough width of about $6D$,

* 中央引导地方科技发展资金资助项目(YDZJSX20231A021);山西省基础研究计划(自由探索类)(202103021223057)

[作者简介] 姚耀龙,助理工程师,E-mail:1522926592@qq.com

[通信作者] 晏 勤,博士,讲师,E-mail:yanqin@tyut.edu.cn

[收稿日期] 2026-02-20

consistent with the monitoring data, verifying the correctness of the numerical simulation. In conclusion, the theoretical solution derived in this paper comprehensively considers the influence of multiple construction factors and provides a more accurate calculation method for predicting soil deformation caused by pipe jacking construction.

Keywords: underground engineering; water pipeline; formation loss; gap parameters; Mindlin solution; settlement; monitoring

0 引言

顶管法因其施工扰动较小,综合成本低,无需开挖地表,不影响地面交通等特点,在地下空间开发领域展现出广泛的应用潜力^[1]。目前,为了分析研究顶管施工过程对周边环境的影响及变形控制措施,学者们采用经验公式^[2]、理论分析法^[3]、数值模拟^[4]以及人工智能分析^[5]等方法,围绕顶管施工对地表变形的影响开展了广泛研究。魏纲等^[6]考虑顶管施工中各施工因素引起的挤土效应,基于小应变假定,提出了考虑空间效应的土体位移计算公式。朱新鹏^[7]结合理论分析与数值模拟方法,研究了大断面顶管施工引起的地层变形特性,探讨了施工参数、地质条件、埋深及管道形状尺寸等因素对变形规律的影响。许有俊等^[8]建立了矩形顶管施工对地层扰动的力学模型,基于随机介质理论和 Mindlin 解分析了地表沉降规律。王焱等^[9]基于顶推力理论公式,分析了顶进参数对地表沉降的影响,并对顶进速度、刀盘扭矩等提出了优化建议。李文江等^[10]基于软黏土固结沉降机理,结合数值模拟与模型试验,研究了黏土地层中顶管施工引起的工后长期沉降问题,并对土仓压力、渗透系数、埋深和注浆压力等因素进行了敏感性分析。Rowe 等^[11]提出了隧道周围土体非均匀移动的概念,并定义了间隙参数 g 。肖旦强等^[12]采用数值模拟方法对矩形顶管施工过程中的土仓压力及注浆压力等参数进行了分析,结果表明地表沉降对土仓压力和注浆压力比的变化较为敏感,并得到了对地表影响最小的注浆压力比与土仓压力优化值。Lee 等^[13]进一步扩展了间隙参数 g 的物理含义,考虑了开挖面土体的三维弹塑性变形及施工条件的影响。徐强等^[14]基于随机介质理论与 Peck 经验公式,在考虑隧道断面的非均匀收敛情况下,应用当层法改进了传统随机介质理论。Loganathan 等^[15]在此基础上提出了考虑土体非均匀移动的等效地层损失比 ε_0 。邵珠山等^[16]推导了不同隧道断面形式下的非均匀收敛预测模型。景路等^[17]为考虑顶管施工的动态过程,基于 Mindlin 解提出了考虑管土摩擦阻力的间隙参数,并在修正的 Loganathan 公式基础上建立了

预测顶管施工全过程土体变形的计算方法。

上述研究表明,顶管施工引起的地表变形控制问题已引起广泛关注。然而,现有研究多借鉴盾构施工的相关经验与理论成果,国内尚未形成完善的顶管施工与设计理论体系。经验公式法通常仅适用于特定工程与地质条件,难以广泛推广。理论分析方法则鲜有同时考虑顶推力、管壁摩阻力及注浆压力等因素的共同作用。为此,本研究以 Mindlin 解为基础,综合考虑顶推力、注浆压力及摩擦力的作用,修正地层损失参数,并结合 Loganathan 土体位移公式,构建了一种融合多施工要素的地表位移解析模型,旨在为顶管工程中的变形预测提供更为准确的理论方法。

1 地层损失参数

1.1 间隙参数 g

间隙参数 g 是表征地层损失程度的重要指标,与土体移动模式密切相关。Lee 等^[13]于 1992 年对其进行了重新定义,指出 g 主要由三部分组成:掘进机与衬砌之间的物理间隙、开挖面土体与三维弹塑性变形引起的空隙,以及因施工纠偏、姿态调整等工艺因素造成的额外间隙。在不排水条件下,隧道开挖间隙参数可表示为:

$$g = G_p + u_{3D} + w \tag{1}$$

式中: g 为间隙参数; G_p 为物理间隙; u_{3D} 为开挖面土体的三维弹塑性移动引起的间隙; w 为施工工艺间隙。

间隙参数反映了隧道施工中各类间隙的综合效应,如图 1 所示。理想情况下,由于掘进机尺寸略大于管节,会在衬砌外围形成物理间隙 G_p ,如图 1a 所示。实际施工中,开挖面应力释放会导致土体向掌子面移动,形成变形间隙 u_{3D} ,如图 1b 所示。此外,施工中的纠偏、叩头等现象也会引起工艺间隙 w ,如图 1c 所示。

由于顶管机与管节直径通常较为接近,因此物理间隙 G_p 可忽略。若假设施工过程为理想状态,无工艺误差,则 $g = u_{3D}$ 。同时考虑注浆填充效应,间隙参数可简化为:

$$g = (1 - n)u_{3D} \tag{2}$$

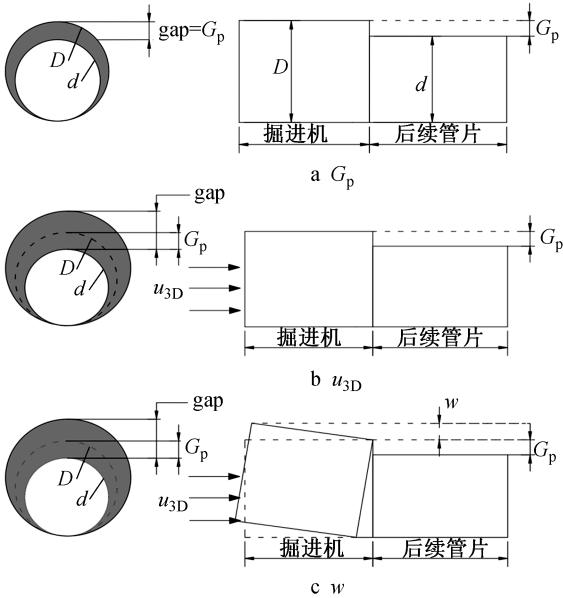


图 1 顶进过程中产生的施工间隙

Fig. 1 Construction gaps caused by pipe jacking

式中: n 为注浆率。

掘进机向前推进时,开挖面应力释放会使土体向隧道内移动。当顶管机提供的开挖面支护力低于原始地应力时,土体发生向内的位移,从而在开挖面周围形成间隙。假设该位移为均匀三维变形,如图 2 所示。

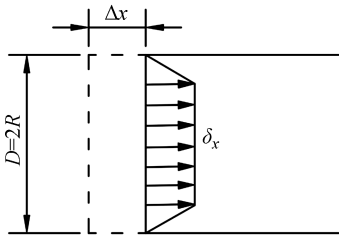


图 2 开挖面土体位移

Fig. 2 Soil movement of excavation face

则开挖面应力释放导致的土体位移为:

$$V_f = (\pi R^2) \frac{\delta_x}{\Delta x} \tag{3}$$

式中: δ_x 为开挖面土体位移; Δx 为掘进机推进长度。

设计上 Δx 取值:

$$\Delta x = D = 2R \tag{4}$$

将三维土体移动体积等效为二维平面内的间隙,如图 3 所示。

根据面积等效原则有:

$$V_f = (\pi R^2) \frac{\delta_x}{\Delta x} = \left[\pi \left(R + \frac{u_{3D}}{2} \right)^2 - \pi R^2 \right] \tag{5}$$

忽略二次项,可得:

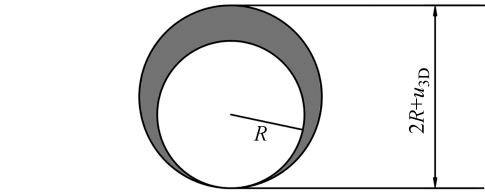


图 3 等效平面间隙参数

Fig. 3 Gap parameters of equivalent cross-section

$$u_{3D} = R \frac{\delta_x}{\Delta x} = 0.5 \delta_x \tag{6}$$

δ_x 可由下式计算:

$$\Omega = \frac{\delta_x E}{p_0 R} \tag{7}$$

$$p_0 = k_0 \delta_{cz} - p_i \tag{8}$$

式中: Ω 为无量纲位移因子,弹性阶段取 1.12; E 为土体弹性模量; p_0 为开挖面附加应力; k_0 为有效静止土压力系数; δ_{cz} 为隧道轴线处有效竖向应力; p_i 为隧道支护力。

1.2 等效地层损失参数

间隙参数 g 虽能量化地层损失,但不同损失模式对应的土体位移分布不同。Lee 假设隧道收敛为均匀模式(见图 4a),而 Loganathan 等指出实际收敛更接近卵圆形(见图 4b)。

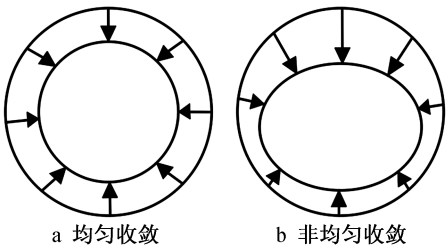


图 4 隧道断面收敛模式

Fig. 4 Convergence modes of tunnel cross-section

针对均匀收敛情况,Loganathan 提出了不排水条件下的等效地层损失参数 ε_0 ,计算公式为:

$$\varepsilon_0 = \frac{\pi \left(R + \frac{g}{2} \right)^2 - \pi R^2}{\pi R^2} \times 100\% = \frac{4gR + \frac{g^2}{4}}{4R^2} \times 100\% \tag{9}$$

进一步考虑非均匀收敛,土体内任意点处的等效地层损失参数 ε_1 可表示为:

$$\varepsilon_1 = \frac{4gR + \frac{g^2}{4}}{4R^2} \exp \left\{ - \left[\frac{1.38x^2}{(h+R)^2} + \frac{0.69z^2}{h^2} \right] \right\} \times 100\% \tag{10}$$

式中: h 为隧道埋深; x, z 为计算点坐标。

2 各施工因素对间隙参数的修正

本文在传统土体变形理论基础上,进一步探讨

施工过程中的动态因素影响。隧道施工引起的地层损失是多种施工因素共同作用的结果。为量化这一影响,引入掌子面顶推力、顶管机及管节外表面的摩擦力以及注浆压力,重点研究这3种施工因素对间隙参数 g 的综合影响,提出地层损失参数修正计算方法,并在此基础上推导相应的三维弹塑性移动解析解。

本文分析中采用以下基本假定:①土体为均质各向同性的半无限弹性体;②不考虑地下水及固结过程;③掌子面顶推力简化为圆形均布荷载;④机头及管片摩擦力沿管线均匀分布;⑤注浆压力为沿管道均匀分布的径向压力;⑥施工推进仅与空间位置有关,与时间无关。

2.1 Mindlin 通用解

Mindlin^[18]给出了弹性半无限空间内作用集中力 P 时任意点 (x,y,z) 的位移解,如图5所示。 x 方向位移分量为:

$$u = \frac{P}{16\pi G(1-\mu)} \left\{ \frac{3-4\mu}{M} + \frac{1}{N} + \frac{x^2}{M^3} + \frac{(3-4\mu)x^2}{N^3} + \frac{2cz}{N^3} \left(1 - \frac{3x^2}{N^2} \right) + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N+z+c} \left[1 - \frac{x^2}{N(N+z+c)} \right] \right\} \quad (11)$$

式中: $M = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-c)^2}$, $N = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+c)^2}$; P 为作用力; G 为剪切模量; μ 为泊松比; c 为力作用点距地表的深度。

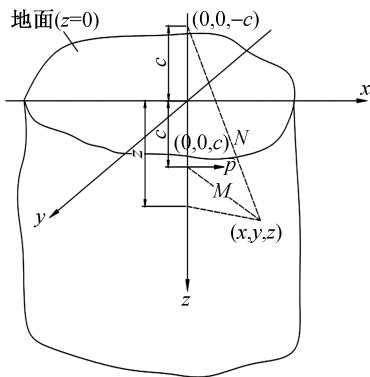


图5 Mindlin 解计算简图

Fig. 5 The calculation of Mindlin solution

实际顶管施工荷载分布复杂,直接采用集中力形式的 Mindlin 解存在局限,需根据荷载分布形式进行积分求解。

2.2 顶推力对间隙参数的修正 u_1

Lee 等在计算 u_{3D} 时未考虑顶推力、摩擦力及注浆压力的影响。实际上,间隙参数 g 与开挖面土体轴向挤入量 δ_x 直接相关,修正 g 需先确定各施工因

素对轴向挤入量 δ_x 的贡献。顶推力对土体轴向挤入量的影响如图6所示。

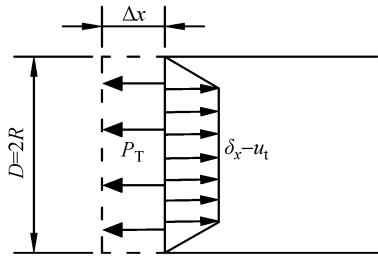


图6 顶推力引起的土体移动

Fig. 6 Soil movement considering jacking force

考虑顶推力后,实际挤入量为 $\delta^* = \delta_x - u_1$ 。为计算顶推力引起的位移,建立如图7所示的荷载模型。

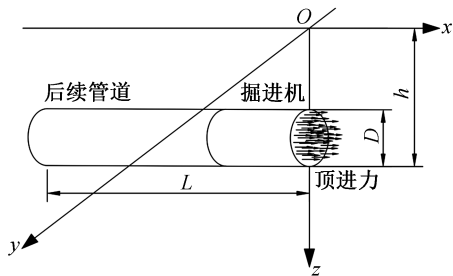


图7 顶推力作用下的土体受力

Fig. 7 Soil force under jacking force

在圆形荷载面内取微元 $rdrd\theta$, 利用 Mindlin 解积分可得 x 方向位移:

$$u_1 = \frac{P_T}{16\pi G(1-\mu)} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{D}{2}} \left\{ \frac{3-4\mu}{M_1} + \frac{1}{N_1} + \frac{x^2}{M_1^3} + \frac{(3-4\mu)x^2}{N_1^3} + \frac{2z(h-r\sin\theta)}{N_1^3} \left(1 - \frac{3x^2}{N_1^2} \right) + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N_1+z+h-r\sin\theta} \left[1 - \frac{x^2}{N_1(N_1+z+h-r\sin\theta)} \right] \right\} rdrd\theta \quad (12)$$

式中: P_T 为顶推力荷载; h 为顶管中心轴线到地表的垂直距离; D 为顶管外径; r 为顶管半径; $M_1 = \sqrt{x^2 + (y + r\cos\theta)^2 + (z - h + r\sin\theta)^2}$; $N_1 = \sqrt{x^2 + (y + r\cos\theta)^2 + (z + h - r\sin\theta)^2}$ 。

该积分直接求解困难,本文假设不排水条件(即 $\mu = 0.5$), 并采用五点 Gauss-Legendre 数值积分。

$$\int_{-1}^1 f(x) dx \approx 0.2369 f(0.9062) + 0.4786 f(0.5385) + 0.5689 f(0) + 0.4786 f(-0.5385) + 0.2369 f(-0.9062) \quad (13)$$

令 $\theta = \pi + \pi t$, 将积分区间变换为 $[-1, 1]$, 得:

$$\int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta = \pi \int_{-1}^1 f(\pi + \pi t) dt \tag{14}$$

式(12)可转化为:

$$u_t = \frac{P_f}{8G} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{-1}^1 \left\{ \frac{1}{M_1} + \frac{1}{N_1} + \frac{x^2}{M_1^3} + \frac{x^2}{N_1^3} + \frac{2z[h + r\sin(\pi t)]}{N_1^3} \left[1 - \frac{3x^2}{N_1^2} \right] \right\} r dt dr \tag{15}$$

式中:

$$M_1 = \sqrt{x^2 + [y - r\cos(\pi t)]^2 + [z - h - r\sin(\pi t)]^2};$$
$$N_1 = \sqrt{x^2 + [y - r\cos(\pi t)]^2 + [z + h - r\sin(\pi t)]^2}.$$

由此可得顶推力在任意点引起的 x 向位移。

2.3 摩擦力对间隙参数的修正 u_f

摩擦力引起的土体轴向挤入如图 8 所示。

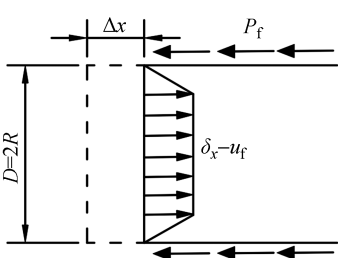


图 8 考虑摩擦力的土体移动
Fig.8 Soil movement considering friction

摩擦力作用下实际挤入量为 $\delta^* = \delta_x - u_f$, 摩擦力 P_f 的荷载模型如图 9 所示。

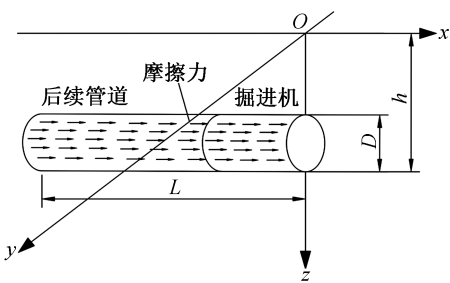


图 9 摩擦力下的土体受力
Fig.9 Soil force under friction

在圆柱面上取微元 $rdld\theta$, 积分得 x 方向位移:

$$u_f = \frac{P_f}{16\pi G(1-\mu)} \int_0^{2\pi} \int_0^L \left\{ \frac{3-4\mu}{M_1} + \frac{1}{N_1} + \frac{(x+l)^2}{M_1^3} + \frac{(3-4\mu)(x+l)^2}{N_1^3} + \frac{2z(h-r\sin\theta)}{N_1^3} \left[1 - \frac{3(x+l)^2}{N_1^2} \right] + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N_1 + z + h - r\sin\theta} \left[1 - \frac{(x+l)^2}{N_1(N_1 + z + h - r\sin\theta)} \right] \right\} dl d\theta \tag{16}$$

$$P_f = 2\pi r L f \tag{17}$$

式中: P_f 为摩阻力集度; L 为已进入土体但未通过监测面的管段长度(通过监测面则为负); f 为摩阻系数;

$$M_1 = \sqrt{(x+l)^2 + (y+r\cos\theta)^2 + (z-h+r\sin\theta)^2};$$
$$N_1 = \sqrt{(x+l)^2 + (y+r\cos\theta)^2 + (z+h-r\sin\theta)^2}.$$

令 $\mu = 0.5$, 同样采用五点 Gauss-Legendre 积分, 式(16)转化为:

$$u_f = \frac{P_f}{8G} \int_0^L \int_{-1}^1 \left\{ \frac{1}{M_1} + \frac{1}{N_1} + \frac{(x+l)^2}{M_1^3} + \frac{(x+l)^2}{N_1^3} + \frac{2z[h + r\sin(\pi t)]}{N_1^3} \left[1 - \frac{3(x+l)^2}{N_1^2} \right] \right\} dt dl \tag{18}$$

式中:

$$M_1 = \sqrt{(x+l)^2 + [y-r\cos(\pi t)]^2 + [z-h-r\sin(\pi t)]^2};$$
$$N_1 = \sqrt{(x+l)^2 + [y-r\cos(\pi t)]^2 + [z+h-r\sin(\pi t)]^2}.$$

由此可得摩擦力引起的 x 向位移。

2.4 注浆压力对间隙参数的修正 δ_z

注浆压力沿管线分布如图 10 所示。

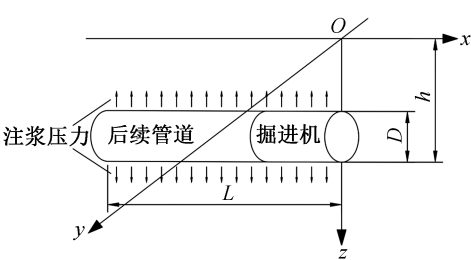


图 10 注浆压力下的土体受力
Fig.10 Soil force under grouting force

注浆压力对土体挤入有抑制作用, 其作用机制如图 11 所示。

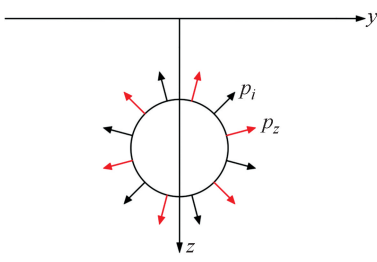


图 11 注浆压力作用
Fig.11 Grouting pressure action

注浆压力引起的等效轴向挤入量 δ_z 可计算如下:

$$\delta_z = \frac{p_0^* R \Omega}{E} \tag{19}$$

$$p_0^* = k_0 \delta_{cz} - p_i - p_z \tag{20}$$

式中: p_z 为注浆压力值。

综合各因素影响,修正后的间隙参数为:

$$g = (1 - n)u_{3D} = 0.5(1 - n)(\delta_z - u_t - u_l)$$

(21)

3 Loganathan 土体变形公式

Loganathan 等基于椭圆形非均匀径向移动模式,重新定义了不排水条件下的地层损失,并将其引入 Verruijt^[19]的变形公式中,得到土体中任意点的竖向位移:

$$u_z = -\varepsilon R^2 \left(\frac{z}{r_1^2} + \frac{z}{r_2^2} \right) + \delta R^2 \left[\frac{(z-h)ky^2 - (z-h)^2}{r_1^4} + \frac{(z-h)ky^2 - (z+h)^2}{r_2^4} \right] + \frac{2\varepsilon R^2}{m} \left\{ \frac{(m+1)(z+h)}{r_2^2} - \frac{mz[y^2 - (z+h)^2]}{r_2^4} \right\} - 2\delta R^2 h \left\{ \frac{y^2 - (z+h)^2}{r_2^2} + \frac{m}{m+1} \frac{2z(z+h)[3y^2 - (z+h)^2]}{r_2^6} \right\}$$

(22)

本文针对短期不排水条件,忽略衬砌长期椭圆化变形($\delta = 0$),得到地表竖向位移公式:

$$z = 0, u_z = 4(1 - \mu)R^2 \frac{h}{h^2 + y^2} \frac{4gR + g^2}{R^2} \exp \left[-\frac{1.38y^2}{(h + R)^2} \right]$$

(23)

4 算例分析

为验证本文公式的可靠性,以某地铁通道顶管工程为例,将本文解析解、经典 Loganathan 解、数值模拟结果及现场监测数据进行对比。计算参数如下:隧道直径 $D=5.53\text{m}$,埋深 $h=7.97\text{m}$,隧道长度 $L=39\text{m}$ 。土体参数: $E=9.5\text{MPa}$, $\mu=0.3$, $c=15\text{kPa}$, $\theta=20^\circ$, $\gamma=20\text{kN/m}^3$,施工参数:顶推力 $P_T=350\text{kPa}$,摩阻力 $P_f=330\text{kPa}$,注浆压力 $P_z=200\text{kPa}$ 。地表沉降对比曲线如图 12 所示。

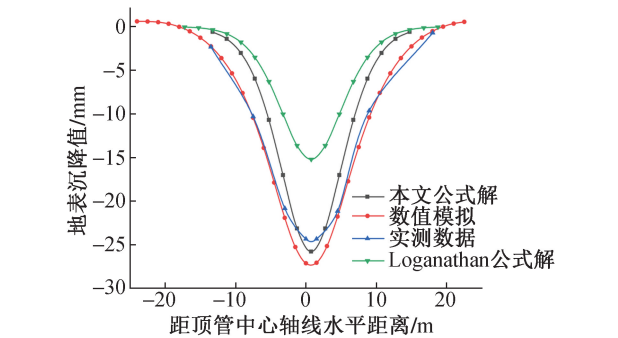


图 12 地表沉降对比曲线

Fig. 12 Comparison curves of ground surface settlement

由图 12 可知,本文计算所得地表沉降曲线与数

值模拟、现场监测及 Loganathan 公式预测的沉降曲线形态基本一致,均在顶管轴线正上方取得最大沉降值。所有曲线均呈现典型的“V”形沉降槽形态,沉降槽半宽度约为隧道直径的 2~3 倍(2D~3D)。沉降值自轴线位置向两侧逐渐衰减,至距离轴线约 3D 以外区域,地表变形趋于稳定。本文公式计算得到的最大地表沉降值为 25.8mm,数值模拟结果为 27.1mm,而现场监测结果为 24.4mm。本文计算值与监测值相对误差约为 5.7%;而 Loganathan 公式所得最大沉降值为 15.2mm,较监测结果偏低约 37.7%。

从沉降槽宽度来看,数值模拟解与现场监测数据最为吻合,约为 6D,即顶管施工影响范围为 3D;而本文计算公式与 Loganathan 计算公式得到的地表沉降槽宽度约为 5D,即顶管施工影响范围约为 2.5D。数值模拟结果显示较远距离处地表出现轻微隆起,与现场观测情况相符。

由此可见,本文建立的计算方法在最大沉降预测方面与实测结果最为接近。该精度的提升主要源于本文解析方法与颗粒流数值模拟均系统考虑了顶推力、摩擦力及注浆压力的综合影响。经典 Loganathan 公式基于均匀收敛假设,未动态纳入施工荷载,难以准确反映开挖面三维弹塑性响应,因而偏差较大。本文方法在考虑施工因素后,能较好地描述地表沉降分布规律,具有一定的可靠性。

5 结语

1) 本文所建立的理论公式计算得到的地表沉降曲线与现场监测数据及数值模拟结果基本吻合。该公式综合考虑了顶管施工中多种施工因素的耦合作用:通过将 Mindlin 解中的集中力替换为圆形与圆柱形均布荷载,从而推导出顶推力及摩擦力所诱发的土体位移表达式;运用弹性理论解析注浆压力作用,修正间隙参数后引入 Loganathan 公式,最终建立了综合施工影响的地表变形解析解。结果表明,从理论层面系统考虑顶管施工过程中的多因素作用是可行且有效的。

2) 在沉降量预测方面,本文理论公式计算得到的最大地表沉降值为 25.8mm,与现场监测结果 24.4mm 较为接近,相对误差约为 5.7%;而经典解析方法所得最大沉降值为 15.2mm,较监测结果偏小约 37.7%。由此可见,本文所推导的理论解能够更准确地预测顶管施工引起的地表沉降变形,具备良好的工程适用性与可靠性。

参考文献:

[1] 马鹏,岛田英树,马保松,等. 矩形顶管关键技术研究现状及

- 发展趋势探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(10): 1677-1692.
- MA P, SHIMADA HIDEKI, MA B S, et al. Research status and development trends of key technologies of rectangular pipe jacking[J]. Tunnel construction, 2022, 42(10): 1677-1692.
- [2] 宋方方. 盾构双线隧道不同步施工对地表沉降的影响效应研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(9): 40-44, 74.
- SONG F F. Study on the effect of asynchronous construction of double-track shield tunnel on ground subsidence[J]. Railway construction technology, 2020(9): 40-44, 74.
- [3] 李超凡. 大断面矩形顶管施工力学行为与变形特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- LI C F. Study on construction mechanical behavior and deformation characteristics of large section rectangular pipe jacking[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [4] 胡长明, 冯超, 梅源, 等. 西安富水砂层盾构施工 Peck 沉降预测公式改进[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1): 176-181.
- HU C M, FENG C, MEI Y, et al. Modifying of Peck's settlement calculation formula related to metro tunnel construction in Xi'an water-rich sand[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2018, 14(1): 176-181.
- [5] 孙钧, 温海洋. 人工智能科学在软土地下工程施工变形预测与控制中的应用实践——理论基础、方法实施、精细化智能管理(示例)[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(1): 1-8.
- SUN J, WEN H Y. Application of artificial intelligence science to construction deformation prediction and control of underground engineering in soft soil: cases study on theoretical foundation, method application and fine intelligent technical management[J]. Tunnel construction, 2020, 40(1): 1-8.
- [6] 魏钢, 魏新江, 徐日庆. 顶管施工引起的挤土效应研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 717-722.
- WEI G, WEI X J, XU R Q. Study on soil-compacting effects induced by pipe jacking construction[J]. Rock and soil mechanics, 2006, 27(5): 717-722.
- [7] 朱新鹏. 砂层大直径顶管施工引起的土体变形规律研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.
- ZHU X P. Analysis of soil deformation caused by large diameter pipe jacking construction in sand stratum[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019.
- [8] 许有俊, 史明, 李育发, 等. 大断面土压平衡矩形顶管施工引起地表竖向变形研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(7): 597-604.
- XU Y J, SHI M, LI Y F, et al. Study on vertical deformation of ground surface caused by construction of large section soil pressure balanced rectangular pipe jacking[J]. Engineering journal of Wuhan University, 2020, 53(7): 597-604.
- [9] 王焱, 杜守继, 王振智, 等. 大断面长距离矩形顶管顶进参数分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(7): 826-834.
- WANG Y, DU S J, WANG Z Z, et al. Analysis on jacking parameters of large cross-sectional long-distance rectangular pipe jacking[J]. Engineering journal of Wuhan University, 2023, 56(7): 826-834.
- [10] 李文江, 王用波, 阎伟龙, 等. 软黏土顶管工后沉降数值模拟与模型试验[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 710-716.
- LI W J, WANG Y B, YAN W L, et al. Numerical simulation and model test of post construction settlement of soft clay pipe jacking[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17(S2): 710-716.
- [11] ROWE R K, KACK G J. A theoretical examination of the settlements induced by tunnelling: four case histories[J]. Canadian geotechnical journal, 1983, 20(2): 299-314.
- [12] 肖旦强, 张仕超, 胡智, 等. 大断面矩形顶管施工对近接斜交既有隧道影响研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1): 441-447.
- XIAO D Q, ZHANG S C, HU Z, et al. Research on the influence of construction of large-section rectangular pipe jacking on adjacent obliquely intersected existing tunnel[J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(S1): 441-447.
- [13] LEE K M, ROWE R K, LO K Y. Subsidence owing to tunnelling I Estimating the gap parameter[J]. Canadian geotechnical journal, 1992, 29(6): 929-940.
- [14] 徐强, 朱永全, 雷升祥, 等. 隧道下穿施工引起既有隧道及地层变形预测的改进随机介质理论模型[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(2): 301-309.
- XU Q, ZHU Y Q, LEI S X, et al. Improved stochastic medium theoretical model for predicting deformation of existing tunnels and strata caused by excavation of new undercrossing tunnels[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2023, 45(2): 301-309.
- [15] 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.
- [16] 邵珠山, 赵鑫. 基于隧道施工诱发地表沉降随机介质理论预测模型的拓展[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(6): 73-81.
- SHAO Z S, ZHAO X. Based on extension of stochastic medium theory prediction model for surface subsidence induced by tunnel construction[J]. Journal of Chang'an University (natural science edition), 2021, 41(6): 73-81.
- [17] 景路, 袁聚云, 袁勇. 顶管工程中的地层损失参数和土体变形计算[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 173-178.
- JING L, YUAN J Y, YUAN Y. Ground loss parameter and soil deformation in pipe jacking[J]. Rock and soil mechanics, 2013, 34(S1): 173-178.
- [18] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics, 1936, 7(5): 195-202.
- [19] VERRUIJT A, BOOKER J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane[J]. Géotechnique, 1996, 46(4): 753-756.