doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.04.013

非饱和黏土中双线平行盾构施工引起的地表位移

李学刚[1]，陈晓飞[1]，温小东[1]，王超伟[2]
（1. 中铁隧道股份有限公司，郑州 450003；2. 河南工业大学土木工程学院，郑州 450001）

摘 要：为解决非饱和黏土中双线平行盾构施工引起的地层位移相互作用效应难以预测、易引发地表沉降风险的问题，本研究提出一种针对非饱和土三维位移解析方法。基于非饱和半空间初值解，并采用叠加原理推导出双线平行盾构施工引起的地表位移三维解答，同时充分考虑各施工荷载和土体损失等多种影响因素。通过与实际工程案例结果对比，验证了本文解析解的有效性和合理性。结果表明：双线盾构的纵向距离和轴线横向距离对其引起土体位移有显著影响；当双线纵向间距从 120 m 缩小至 0 m，地表总沉降峰值从 6.08 mm 增至 9.10 mm，增幅 50.0%。双线隧道轴线间距从 1*D* 增至 9*D*，地表水平位移降幅达 49.2%；埋深比 *Z*/*D* 从 3 降至 1，沉降峰值从 15.9 mm 激增至 49.4 mm，增幅 210.7%，使得地表沉降槽更深、更窄。研究表明，在双线平行盾构施工过程中，合理控制开挖面纵向距离、盾构轴线间距和埋深比是降低地表沉降风险的关键措施。本文方法可为双线盾构施工参数优化与沉降风险防控提供理论依据。

关键词：地铁；双线平行盾构；初值解；非饱和土；土层损失；地表位移
中图分类号：U231；TU43　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)04-0098-07

Surface Displacement Induced by Double-Line Parallel Shield Tunneling in Unsaturated Clay

LI Xuegang[1], CHEN Xiaofei[1], WEN Xiaodong[1], WANG Chaowei[2]
(1. China Railway Tunnel Co., Ltd., Zhengzhou 450003;
2. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001)

Abstract: To address the challenges of predicting the interaction effects of ground displacement and mitigating surface subsidence risks in double-line parallel shield tunneling, this study proposes a three-dimensional analytical method for displacement in unsaturated soil. Based on the initial solution for unsaturated soil under buried-depth loading, a three-dimensional analytical solution for ground displacement induced by double-line parallel shield tunneling is derived using the superposition principle, while comprehensively accounting for multiple influencing factors such as construction loads and soil loss. The validity and reliability of the proposed solution are verified through comparisons with real-world engineering cases. The results indicate that the longitudinal distance between tunnels and the transverse spacing of their axes significantly influence soil displacement: reducing the longitudinal spacing from 120 m to 0 m increases the peak total surface subsidence from 6.08 mm to 9.10 mm (a

收稿日期：2024-12-10　修回日期：2025-03-03
第一作者：李学刚，男，本科，高级工程师，从事城市轨道交通工程盾构施工研究和隧道暗挖施工研究工作，2412313852@qq.com
通信作者：王超伟，男，硕士研究生，从事隧道工程方面的研究，wangcv19456@163.com
基金项目：国家自然科学基金项目(U2039209，41874067)；河南工业大学创新基金支持计划专项资助(2022ZKCJ07)；河南工业大学高层次人才科研启动基金项目(31401175)
引用格式：李学刚，陈晓飞，温小东，等. 非饱和黏土中双线平行盾构施工引起的地表位移[J]. 都市快轨交通，2025，38(4)：98–104.
LI Xuegang, CHEN Xiaofei, WEN Xiaodong, et al. Surface displacement induced by double-line parallel shield tunneling in unsaturated clay[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(4): 98–104.

50.0% increase); decreasing the transverse axis spacing from 1*D* to 9*D* reduces horizontal ground displacement by 49.2%; and lowering the depth-to-diameter ratio *Z*/*D* from 3 to 1 causes the peak subsidence to surge from 15.9 mm to 49.4 mm (a 210.7% increase), resulting in a deeper and narrower settlement trough. The study highlights that rational control of the longitudinal spacing of excavation faces, transverse axis spacing, and depth-to-diameter ratio is key to reducing surface subsidence risks during double-line parallel shield tunneling. The proposed analytical method offers a theoretical basis for optimizing construction parameters and mitigating subsidence risks.

Keywords: subway; double-line parallel shield; initial solution; unsaturated soil; soil layer loss; surface displacement

在地铁隧道建设中，盾构法因其施工速度快且对环境影响较小的特点成为主流施工方法。在盾构施工过程中会对周围土体产生一定的扰动，进而导致土体变形产生环境危害，这种影响在双线平行盾构施工中尤为显著，两条隧道之间相互作用产生的土层位移比单线施工更为复杂。

目前，国内外对于双线平行盾构施工引起土体位移的研究方法主要有：经验公式、数值模拟和理论解析。经验公式方面：ZHU[1]通过大量的实测数据分析，验证了地表沉降槽符合正态分布理论。数值模拟方面：李然等[2]分析多孔隧道小净距隧道开挖顺序对围岩稳定性的影响。理论解析方面：魏纲等[3]基于 Mindlin 解[4]推导出盾构掘进引起的土体变形三维解；丁智等[5]将陈振建[6]提出的饱和土初值解应用于分析盾构施工导致的软土层变形计算中，结果显示计算结果与实测值符合良好，验证了初值解分析盾构施工问题的有效性。

当前大多数研究将土体假设为单相或双相模型，较少考虑土体的非饱和性。实际上，天然土体多为非饱和状态。非饱和土层中的基质吸力有利于减小地层因外部扰动而产生的变形[7]，但基质吸力易受外界环境如降雨、水位升降和渗漏等因素的影响，若未能及时调整参数设置和施工策略，将会对盾构掘进安全构成潜在的隐患。针对非饱和地层中双线平行盾构掘进引起的地层变形问题，本文基于非饱和半空间在埋置荷载作用下的初值解[10]，充分考虑施工荷载和土体损失等影响因素，采用叠加原理推导获得双线盾构掘进引起的非饱和地层位移三维解答，并进一步分析双线盾构开挖面纵向距离、隧道轴线横向距离和埋深比等参数对土体位移的影响。

1　盾构施工计算模型和假定

图 1 为双线平行盾构掘进示意，设定左右线盾构均平行于 *y* 轴掘进。图 1 中 *H* 为隧道中心埋深；*R* 为隧道半径；*L* 为两隧道轴线的水平距离。掘进是动态变化的施工过程，为便于理论公式推导和计算，作以下假定：

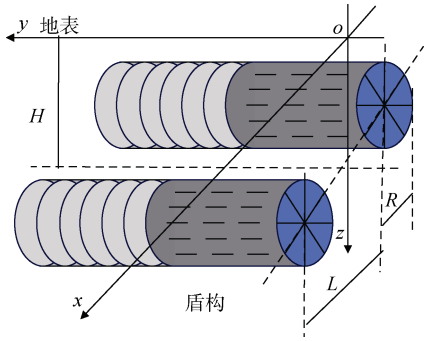


图 1　双线平行盾构掘进示意

Figure 1　Double-line parallel shield tunneling diagram

①土体均质且各向同性；②先后行线盾构始终水平掘进；③盾构掘进中主要考虑盾构推力、盾壳摩擦力、盾尾注浆压力和土体损失等影响；④盾构推力、盾壳摩擦力均匀作用在工作面和盾壳表面；⑤盾尾注浆压力沿盾尾环向作用。

2　双线盾构施工引起的非饱和地层位移解

2.1　盾构施工导致非饱和地层变形的理论解

非饱和半空间受埋置荷载集中力作用如图 2 所示。图中 *h* 为荷载埋深，半空间内部分别作用竖向集中力 P_v 和水平集中力 P_h。*r* 为荷载作用位置与土单元体的距离。θ 为 *r* 与 *y* 轴的夹角。

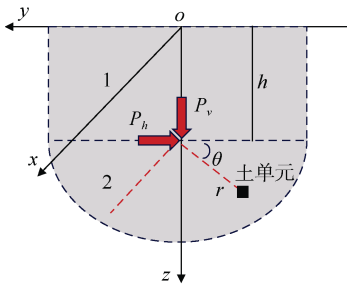


图 2　非饱和半空间土体受竖向和水平集中力作用

Figure 2　Unsaturated half-space soil subjected to vertical and horizontal concentrated forces

基于赵云等[8]给出的非饱和半空间初值解答，拓展得到双线平行盾构施工引起的三维地层变形计算公式。在图 2 直角坐标系下，竖向和水平集中力下土体

竖向位移的表达式分别为：

$$u_v=-\frac{P_v}{8\pi\mu}\left(\frac{2h^2+x^2+y^2-4hz+2z^2}{R_1^3}+\frac{z(h+z)}{R_2^3}+\frac{1}{R^2}+\frac{h\left(h^3+7h^2z-(x^2+y^2)z+5z^3+h\left(x^2+y^2+11z^2\right)\right)}{R_2^5}\right) \tag{1}$$

$$u_h=\frac{P_h y}{8\mu\pi}\left(\frac{z-h}{R_1^3}+\frac{-6hz(h+z)}{R_2^5}+\frac{z-h}{R_2^3}\right) \tag{2}$$

式中，u_v 和 u_h 分别为竖向和水平集中力引起的土单元体竖向位移；μ 为土体剪切弹性模量；$R_1=(x^2+y^2+(h-z)^2)^{1/2}$，$R_2=(x^2+y^2+(h+z)^2)^{1/2}$。

魏纲等[3]在双线平行盾构引起三维土体变形的研究中，采用叠加法计算得到预测值与实测值比较吻合，验证了该计算方法的合理性。鉴于此，本文利用叠加法得到双线平行盾构施工引起的总土体竖向位移 U_z 公式为：

$$U_z=U_{z1}(x,y,z)+U_{z2}(x,y,z) \tag{3}$$

2.2 盾构推力导致的地层位移解

盾构推力 q 导致的土体竖向位移计算结果 u_q 可由式(2)积分所得到。为简化计算难度，如图 3 所示，设定全局坐标系 xyz 与局部坐标系 $x'y'z'$ 平行，经过变换，有以下关系：

$$\begin{cases}x'=x-m\\y'=y-n\\z'=z\end{cases} \tag{4}$$

式中，m 和 n 分别为全局坐标系与局部坐标系在 x 轴和 y 轴方向上的位移差。

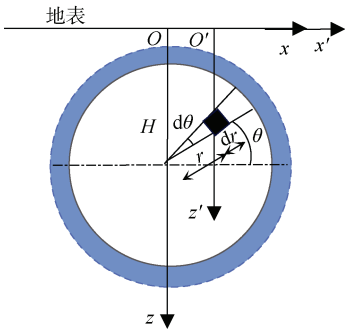


图 3 盾构推力积分示意

Figure 3 Diagram of shield thrust integration

图 3 中，对任一微元 dA，其所受集中力为 dF=qdrdθ，其位于坐标系 $o'x'y'z'$ 内，受力点的埋深为 h=H–r sinθ，m=r cosθ，n=0，代入式(2)积分可得：

$$u_q=\int_0^{2\pi}\int_0^{R}\frac{qyr}{8\pi\mu}\left(\frac{z-H+r\sin\theta}{R_1^3}+\frac{z-H+r\sin\theta}{R_2^3}-\frac{6(H-r\sin\theta)z(z+H-r\sin\theta)}{R_2^5}\right)\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta \tag{5}$$

式中，

$$R_1=\sqrt{(x-r\cos\theta)^2+y^2+(z-H+r\sin\theta)^2}$$

$$R_2=\sqrt{(x-r\cos\theta)^2+y^2+(z+H-r\sin\theta)^2}$$

考虑式(5)不易进行直接积分计算，可令 θ=π+πt，$t\in[-1,1]$，对式(5)运用积分变换处理，结合定积分理论与 Gauss–Legendre 数值积分[9]共同求解。

2.3 非均匀分布盾壳摩擦力导致的地层位移解

盾壳摩擦力 f 与切口推力 q 同为水平作用力，故求解方法一致，盾壳摩擦力导致的土体竖向位移 u_f 可由式(2)积分得到，积分示意如图 4 所示。

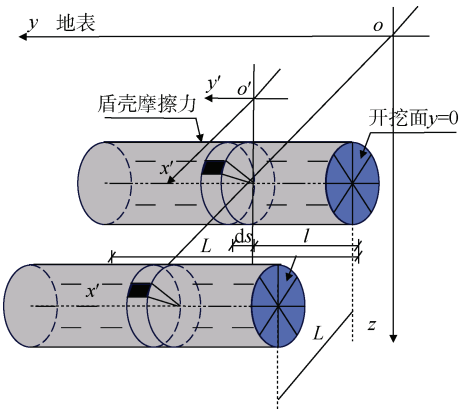


图 4 双线隧道位置和盾壳摩擦力积分示意

Figure 4 Schematic diagram of the position of the double-line tunnel and the friction integration of the shield

图 4 中，对任一微元 dA，其所受集中力为 dF=$f$$Rdsd\theta$，其位于坐标系 $o'x'y'z'$ 内，受力点的埋深为 h=H–R sinθ，m=R cosθ，n=l，代入式(2)积分可得：

$$u_f=\int_0^{2\pi}\int_0^{L}\frac{fr(y-s)}{8\pi\mu}\left(\frac{z-H+R\sin\theta}{R_1^3}+\frac{z-H+R\sin\theta}{R_2^3}-\frac{6(H-R\sin\theta)z(z+H-R\sin\theta)}{R_2^5}\right)\mathrm{d}l\mathrm{d}\theta \tag{6}$$

式中，

$$R_1=\sqrt{(x-R\cos\theta)^2+(y-l)^2+(z-H+R\sin\theta)^2}$$

$$R_2=\sqrt{(x-R\cos\theta)^2+(y-l)^2+(z+H-R\sin\theta)^2}$$

Potyondy[10]的试验结果表明，桩-土界面摩擦力并不随正压力无限增长，而是达到某一特定值后趋于稳定。同时，张乾青等[11]在分析桩土相对位移特性时得出当桩土相对位移超过某个临界值后，侧摩阻力会呈现出软化现象，此时残余摩阻力 τ_{sr} 与极限摩阻力 τ_u 比值为 β_s。鉴于盾壳与地层之间的摩擦特性和桩土界面摩擦行为具有相似性，基于 Alonso 等[12]提出桩-土界面剪力计算公式，得出盾壳任意位置摩擦力 f 及分量表达式如下：

$$\begin{aligned} f &= \tau_{sr} = \beta_s \sigma_\theta \tan\delta \\ \sigma_\theta &= \sigma_v \sin^2\theta + \sigma_h \cos^2\theta \\ \sigma_v &= \sigma - \gamma R \sin\theta \\ \sigma_h &= K\sigma_v \end{aligned} \tag{7}$$

式中，β_s 值为 0.83～0.97；σ_θ 为盾壳径向作用力；σ_v 和 σ_h 分别为竖向和水平向应力分量；σ 为隧道轴线处土体自重应力；γ 为土体重度；K 为侧向土压力系数；Potyondy[10]通过界面剪切实验给出黏土与钢材质间摩擦角 δ 介于 6.5°至 9°之间。

2.4 盾尾注浆压力导致的地层位移解

盾尾注浆浆体沿着盾尾圆周径向分布，盾尾注浆压力 p 可以分解为水平分力和竖直分力。文献[5]计算验证表明，盾尾注浆压力水平分力引起的竖向位移较小，本文仅考虑盾尾注浆压力竖直分力的作用。盾尾注浆压力作用下引起的地层竖向位移 u_p 可由式(1)积分得到。

图 5 为盾尾注浆压力积分示意，对任一微元 dA，其所受集中力为 $\mathrm{d}F = p\sin\theta \mathrm{d}s\mathrm{d}\theta$，其位于坐标系 $o'x'y'z'$ 内，受力点的埋深为 $h=H-R\sin\theta$，$m=R\cos\theta$，$n=L+s$，代入式(1)积分可得：

$$\begin{aligned} u_p = \int_0^{2\pi}\int_0^S \frac{pr\sin\theta}{8\pi\mu}\Big(&\frac{1}{R_1^3}(2(h+\sin\theta)^2+(x-R\sin\theta)^2 \\ &+(y-L-s)^2-4(H-R\sin\theta)z+2z^2)+\frac{1}{R_2^3} \\ &+\frac{1}{R_2^5}(H-R\sin\theta)((H-R\sin\theta)^3+7(H-R\sin\theta)^2 z \\ &-((x-R\sin\theta)^2+(x-L-s)^2)z+5z^3+(H-R\sin\theta) \\ &((x-R\sin\theta)^2+(x-L-s)^2+11z^2))\Big)\mathrm{d}s\mathrm{d}\theta \end{aligned} \tag{8}$$

式中，S 为盾尾注浆长度，其设为单环管片的宽度；R_1 和 R_2 分别表示为：

$$R_1 = \sqrt{(x-R\cos\theta s)^2+(y-L-S)^2+(z-H+r\sin\theta)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{(x-R\cos\theta)^2+(y-L-S)^2+(z+H-r\sin\theta)^2}$$

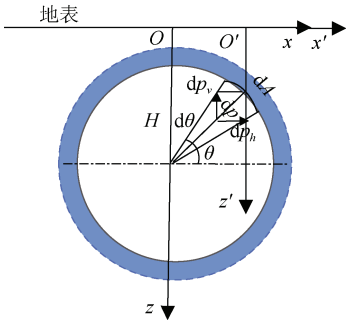


图 5　盾尾注浆压力积分示意

Figure 5　Grouting pressure integration diagram.

2.5 土体损失导致的地层三维位移解

由于刀盘超挖等施工因素引起土层损失，导致隧道周边土体向开挖面移动，产生收缩位移。Pinto 和 Whittle[13]假设该收缩位移沿径向均匀分布，如图 6(a)所示。

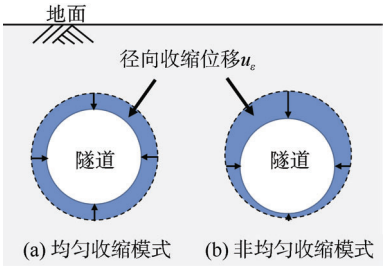


图 6　隧道径向收缩模式

Figure 6　Tunnel radial contraction mode

在此基础上，Pinto 和 Whittle[13]给出土体损失引起的三维位移解竖向分式如下：

$$\begin{aligned} u_z = \frac{V_{2D}}{4\pi}\Bigg(&\frac{(z+H)(R_1+y)}{r_1^2 R_1}-\frac{[(3-4v)(z-H)-2z](R_2+y)}{r_2^2 R_2} \\ &+\frac{2z(z-H)^2[-y(3R_2^2-y^2)-2R_2^3]}{r_2^4 R_2^3}\Bigg) \end{aligned} \tag{9}$$

$$V_{2D} = 2\pi R u_\varepsilon \tag{10}$$

式中，u_z 为竖向位移；v 为土体泊松比；V_{2D} 为单位长度的土体损失量；u_ε 为径向收缩位移；$R_1 = \sqrt{x^2+(L-y)^2+(z+H)^2}$，$R_2 = \sqrt{x^2+(L-y)^2+(z-H)^2}$，$r_1 = \sqrt{x^2+(z+H)^2}$，$r_2 = \sqrt{x^2+(z-H)^2}$。

Loganathan 和 Polous[14]结合试验结果指出该收缩位移实际上是非均匀收缩模式，如图 6(b)所示。基于该非均匀分布模式，提出等效地层损失参数 ε：

$$\varepsilon=\frac{4gR+g^2}{4R^2}\exp\left(-\frac{1.38x^2}{(H+R)^2}-\frac{0.69z^2}{H^2}\right) \tag{11}$$

$$u_\varepsilon=R\varepsilon \tag{12}$$

式中，g 为 Lee 等[15]给出的参数。

Loganathan 和 Polous[16]结合试验证明了该解的正确性。考虑本文研究的是盾构施工引起的地表位移，即 z=0，将式(10)代入式(9)，可推导出双线盾构施工中土体损失引起的地表竖向位移表达式：

$$u_l=2(1-v)R^2\varepsilon\frac{H}{x^2+H^2}\left(2+\frac{y}{\sqrt{x^2+l^2+H^2}}+\frac{y}{\sqrt{x^2+(l-y)^2+H^2}}\right)\exp\left(-\frac{1.38x^2}{(H+R)^2}\right) \tag{13}$$

2.6 双线盾构施工引起地层总位移

考虑各施工荷载与土体损失导致的地层位移，利用叠加法得到双线平行盾构施工引起土体竖向位移 u 表达式为：

$$u=u_q+u_f+u_p+u_l \tag{14}$$

3 算例验证

目前针对非饱和地层中盾构施工引起的地层变形问题未有相关解答，故通过退化性检验进行处理。当饱和度 S_r 为 1 时，初值解[10]可用于饱和土施工问题。选取英国伦敦黏土中双线平行盾构隧道工程实例，左线为先行线。隧道位于地下 34.5 m，施工使用土压平衡盾构机，机身 L_S 为 11 m，直径 D 为 7.1 m；隧道衬砌管片外径和内径尺寸分别为 6.8 m 和 6.2 m，而单块管片宽度则为 1.6 m。在施工过程中，现场土层侧向土压力系数 K 设定为 0.6，抗剪切刚度 G 为 10.7 MPa，而残余摩阻力与极限摩阻力之比 β_s 为 0.9，地层与盾壳间有效内摩擦角 δ 为 6.5°。双线隧道施工参数见表 1[17]。

表 1 双线平行盾构掘进时施工参数

Table 1 Construction parameters during doubleline parallel shield tunneling

土层名称	盾构推力/kPa	盾尾注浆压力/kPa	上覆土层压力/kPa	内摩擦角 φ/(°)	土体损失/%
先行线	200	160	340	6.5	0.8
后行线	150	200	340	6.5	0.6

图 7 展示了本文计算方法在双线盾构施工中的应用效果。坐标原点对应的是监测面的位置，无论是在开挖面前还是开挖面后，双线盾构地面沉降的规律在量级和分布上均表现一致。由图 7 可知，先行线盾构通过监测面后实测沉降峰值 5.8 mm，计算沉降峰值为 5.9 mm，最大相对误差为 1.7%；而后行线盾构通过监测面后实测沉降峰值 10.0 mm，计算沉降峰值 10.3 mm，最大相对误差为 3.0%。先行线和双线累积监测值与实际测量值最大相对误差均≤3.0%，验证了本文方法的有效性。此外，后行线盾构通过时引起的累积土体竖向位移显著大于先行线，约为其 2 倍。此现象表明，在双线盾构施工过程中，相互作用导致的土体沉降叠加效应使得双线盾构通过时产生了更大的土体损失。

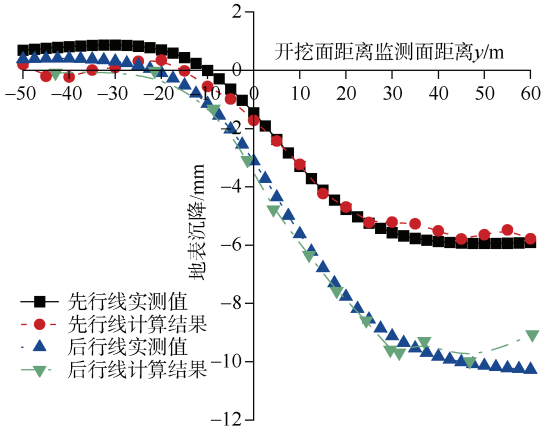


图 7 双线平行盾构先后通过引起的地表沉降

Figure 7 Ground subsidence induced by the successive passage of double-line parallel shields

图 8 展示了双线隧道施工过程中地表沉降沿横向分布计算结果与实测值对比。从图中可以看出，先行线盾构机穿越监测面后，其独立引起的沉降曲线呈对称分布，沉降峰值为 5.9 mm。随着后行线盾构机的通过，由于先行线已形成沉降槽，土体刚度降低导致沉降峰值出现了向先行线方向偏移，双线盾构施工造成的地表总沉降峰值为 10.2 mm，后行线自身引发的

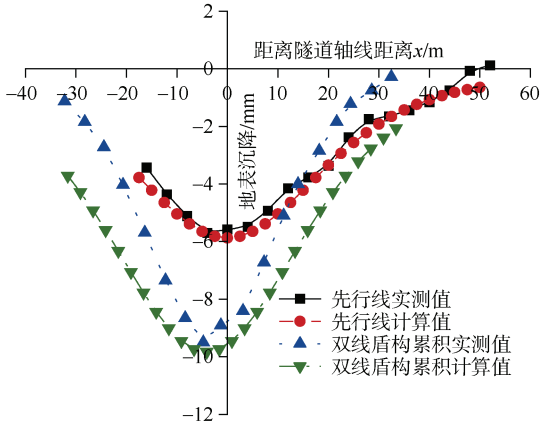


图 8 双线平行盾构推进引起的地表沉降沿横向分布

Figure 8 Lateral distribution of surface settlement induced by the advancement of double-line parallel shields

沉降为 4.3 mm，这一现象充分说明，先行线施工贡献了 58%的沉降主导效应，先行线施工对地表沉降的影响比后行线更为显著。此外，根据图 8 分析，采用本文提出的方法计算得到的沉降值普遍高于实际测量值。这种保守估计在工程实践中有助于确保施工的安全性和可靠性。

4 参数分析

4.1 双线盾构开挖面纵向距离影响

采用第 3 章算例工程参数，隧道轴线水平间距和隧道埋深分别为 2D 和 z=34.5 m。以双线盾构纵向距离为变量，先行线盾构开挖面位于 y=–60 m 处保持不动，图 9 展示了双线盾构在不同前后开挖距离下施工引起的地表沉降沿横向分布。当后行线开挖面位于 y=60 m 时，前后行线纵向距离较大，沉降峰值由先行线单独作用的 5.91 mm 分别增加至 6.08 mm，改变比例为 2.87%。两条线间的最大相对误差和平均相对误差分别为 5.45%和 4.47%。此时后行线的作用较小。随着后行线盾构开挖面逐渐接近，双线盾构引起的总体沉降量及其沉降槽宽度均显示出增加的趋势，最大增加至 9.10 mm。同时，监测点测得的沉降峰值显示出向后行线方向的偏移。这表明，后行线引起的土体损失叠加了先行隧道引起的土体损失，导致地面总沉降量增大，且最大沉降值倾向于后行线一侧。这表明在进行双线平行盾构施工过程中，应当重视控制两个开挖面之间的距离，以减小地层变形。

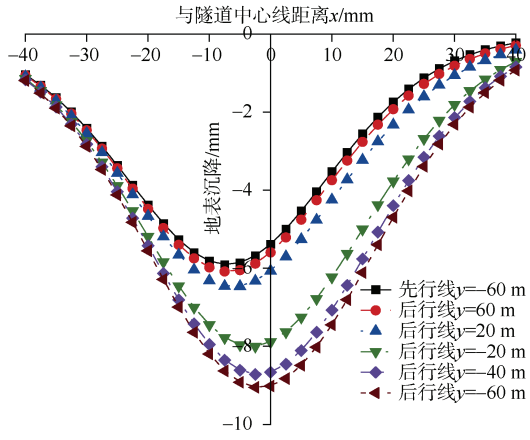


图 9 不同纵向距离引起的地表总沉降沿横向分布

Figure 9 Total settlement distribution along the transverse direction caused by different longitudinal distances

4.2 双线隧道中心轴线横向距离影响

采用第 3 章算例工程参数，开挖面位置和隧道埋深分别为 y=–60 m 和 z=34.5 m。以隧道间距 L(分别为 D、3D、5D、9D)为变量，图 10 揭示了双线盾构在不同中心轴线间距下的地表沉降沿横向分布。结果显示，当 L 较小时，双线盾构施工相互作用引起的沉降剧烈，形成一个更大的沉降槽。当 L 值由 1D 增大到 9D 时，最大沉降值从 9.8 mm 降低至 5.0 mm，降幅约 49.2%。沉降槽形态转变为马鞍形，表明隧道相互作用减弱，单线沉降的独立性增强。这说明双线盾构施工时，横向距离不宜过近。

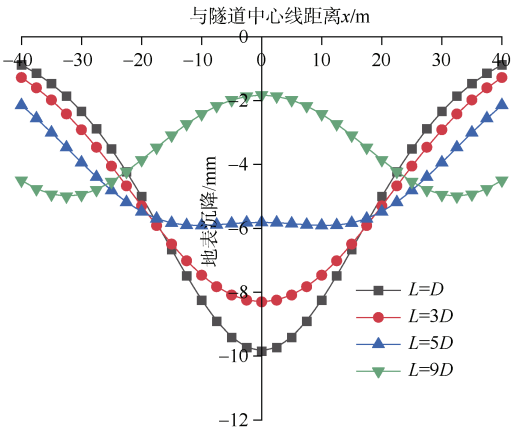


图 10 不同盾构轴线距离的地表沉降沿横向分布

Figure 10 Surface settlement distribution along the transverse direction at different distances from the tunnel axis

4.3 埋深比影响

采用第 3 章算例工程参数，隧道轴线水平间距和开挖面距离分别为 2D 和 y=–60 m。图 11 给出了不同埋深比下双线盾构施工引起的总沉降沿横向分布曲线。设定埋深比 Z/D 分别为 1～3，从图中可以明显看

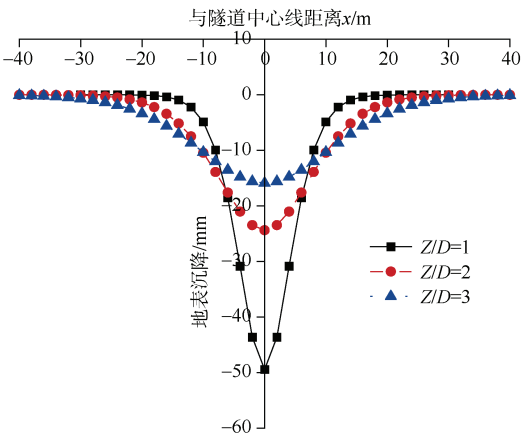


图 11 不同埋深比下地表沉降沿横向分布

Figure 11 Surface settlement distribution along the transverse direction under different burial depth ratios

出，随着埋深比 *Z*/*D* 从 3 减小至 1，土体沉降峰值从 15.9 mm 激增至 49.4 mm，沉降槽转变为出深而窄的形态。

5 结论

本文针对非饱和土中双线盾构施工引起的地表位移预测问题，提出一种基于非饱和半空间在受埋置集中作用力初值解的三维解析方法，通过工程实测验证了模型的可靠性，并研究双线盾构施工参数的影响。主要结论如下。

1) 基于本文方法计算，先行线和双线累积监测值与实际测量值最大相对误差均≤3.0%，验证了本文方法的准确性。先行线施工贡献了 58%的沉降主导效应，先行线施工对地表沉降的影响显著大于后行线；后行线施工导致总沉降峰值向后行线方向偏移。

2) 双线盾构施工过程中，应严格控制纵向距离、轴线横向距离。当双线纵向间距从 120 m 缩小至 0 m，地表总沉降峰值从 6.08 mm 增至 9.10 mm，增幅 50.0%；双线隧道轴线间距从 1*D* 增大至 9*D*，地表水平位移降幅达 49.2%。

3) 埋深比 *Z*/*D* 从 3 降至 1，沉降峰值从 15.9 mm 激增至 49.4 mm，增幅 210.7%，沉降槽转变为深而窄的形态。

参考文献

[1] ZHU Binbin, ZHANG Peng, LEI Mingfeng, et al. Improved analytical solution for ground movements induced by circular tunnel excavation based on ground loss correction[J]. Tunnelling and underground space technology, 2023, 131: 104811.

[2] 李然, 陈平, 张顶立, 等. 大断面三孔小净距隧道围岩稳定性数值研究及工程实践[J]. 土木工程学报, 2022, 55(11): 83-95.
LI Ran, CHEN Ping, ZHANG Dingli, et al. Numerical study and engineering practice for surrounding rock stability of large cross-sectional triple tunnels[J]. China civil engineering journal, 2022, 55(11): 83-95.

[3] 魏纲, 朱德涵, 赵得乾麟, 等. 基于统一解的重叠盾构隧道施工土体变形研究[J]. 浙江工业大学学报, 2023, 51(5): 489-496.
WEI Gang, ZHU Dehan, ZHAO D, et al. Research onthe soil deformation of overlapped shield tunneling based on unified solution[J]. Journal of Zhejiang university of technology, 2023, 51(5): 489-496.

[4] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics, 1936, 7(5): 195-202.

[5] 丁智, 冯丛烈, 张霄, 等. 考虑多因素影响的饱和土盾构施工引起土体变形理论研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 4110-4123.
DING Zhi, FENG Conglie, ZHANG Xiao, et al. Theoretical research on soil deformation caused by shield tunneling in saturated soil considering influence of multiple factors[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11): 4110-4123.

[6] 陈振建. 半无限饱和土内部作用集中力的初值解[J]. 水利水运科学研究, 2000(2): 33-38.
CHEN Zhenjian. Initial solution of semi-infinite saturated soil loaded by internal concentrated force[J]. Journal of Nanjing hydraulic research institute, 2000(2): 33-38.

[7] LI T Z, DIAS D, LI Z W. Failure potential of a circular tunnel face under steady-state unsaturated flow condition[J]. Computers and geotechnics, 2020, 117: 103231.

[8] 赵云, 王超伟, 陈樟龙, 等. 非饱和半空间受埋置集中力作用初值解[J]. 土木工程学报, 2024, 57(5): 76-85.
ZHAO Yun, WANG Chaowei, CHEN Zhanglong, et al. Analytical initial solution of unsaturated half space under buried concentrated force[J]. China civil engineering journal, 2024, 57(5): 76-85.

[9] 沈永欢. 实用数学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
SHEN Yonghuan. Handbook of practical mathematics[M]. Beijing: Science Press, 1992.

[10] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Géotechnique, 1961, 11(4): 339-353.

[11] 张乾青, 李术才, 李利平, 等. 考虑侧阻软化和端阻硬化的群桩沉降简化算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 615-624.
ZHANG Qianqing, LI Shucai, LI Liping, et al. Simplified method for settlement prediction of pile groups considering skin friction softing and end resistance hardening[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(3): 615-624.

[12] ALONSO E E, JOSA A, LEDESMA A. Negative skin friction on piles: a simplified analysis and prediction procedure[J]. Géotechnique, 1984, 34(3): 341-357.

[13] PINTO F, WHITTLE A J. Ground movements due to shallow tunnels in soft ground. I: analytical solutions[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2014, 140(4): 04013040.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] WAN M S P, STANDING J R, POTTS D M, et al. Measured short-term ground surface response to EPBM tunnelling in London Clay[J]. Géotechnique, 2017, 67(5): 420-445.

（编辑：傅依萱）