

考虑上浮效应的顶管施工引起下方盾构隧道 响应简化分析方法

姚言¹, 王奎华¹, 应宏伟^{1,2*}, 朱成伟¹, 张昌桔³, 李冰河⁴

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 3. 杭州市市政工程集团有限公司, 浙江 杭州 310014; 4. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310005)

摘要: 新建顶管上穿施工会引起下方既有盾构隧道纵向隆起位移, 影响地铁的正常运行。大直径顶管在注浆充足或在地下水位以下顶进时上浮效应不可忽略, 而目前的简化分析方法尚未考虑此效应。采用两阶段法, 将既有隧道视为 Pasternak 地基上的 Euler-Bernoulli 梁, 提出考虑上浮影响的土体非均匀收敛模式下, 新建顶管上穿施工引起下方既有隧道响应的简化计算方法。研究表明, 均匀土体收敛模式、下沉的非均匀土体收敛模式会低估顶管下方的土体自由位移、既有隧道的纵向位移响应, 与工程实测数据的对比验证了所提方法的合理性。进一步参数分析表明, 降低土体损失率能有效减少既有隧道竖向位移与弯矩, 且土体损失率与既有隧道最大竖向位移和最大弯矩呈线性关系; 既有隧道与土体的管土刚度比的增大可减小既有隧道竖向位移, 但也会增大隧道管片弯矩; 增大顶管与既有隧道竖向净距有利于既有隧道竖向位移与弯矩的控制, 实际工程应根据既有隧道的保护要求和顶管的上覆土厚度要求选择合理的净距。

关键词: 新建顶管; 上浮效应; 土体收敛; 上穿施工; 既有隧道隆起; 两阶段法

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)02-0116-09

A simplified analysis method for the response of existing shield tunnels underneath pipe jacking construction considering uplift effect

YAO Yan¹, WANG Kui-hua¹, YING Hong-wei^{1,2*}, ZHU Cheng-wei¹, ZHANG Chang-ju³, LI Bing-he⁴

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Educational for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, Jiangsu, China; 3. Hangzhou Municipal Engineering Group Co., Ltd., Hangzhou 310014, Zhejiang, China;

4. Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310005, Zhejiang, China)

Abstract: The construction of the new pipe jacking will cause the longitudinal uplift displacement of the existing shield tunnel below, affecting the normal operation of the subway. However, the current simplified analysis methods have not yet considered the significant floating effect that occurs during large-diameter pipe jacking with sufficient grouting or jacking under groundwater level. This study proposed a simplified calculation method, utilizing the two-stage method and treating the existing tunnel as an Euler-Bernoulli beam on the Pasternak foundation, to assess the impact of new pipe jacking on the response of the underlying existing tunnel. The calculation method considered the floating effect and accounted for the non-uniform convergence mode of soil. It is shown that both the uniform soil convergence mode and the non-uniform soil convergence mode of pipe tunnel sinking will underestimate the free displacement of the soil under the new pipe jacking and the longitudinal displacement response of the existing tunnel below. The rationality of the proposed method was verified by the measured data. Additional parametric analysis reveals that decreasing the ground loss rate can effectively reduce the vertical displacement and bending moment of the existing tunnel. Moreover, increasing the pipe-soil stiffness ratio between the existing tunnel and the soil reduces the vertical displacement of the existing tunnel but increases the bending moment of the tunnel segment. Furthermore, increasing the vertical clear distance between the pipe jacking and the existing tunnel

收稿日期: 2023-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678523); 浙江省建设科研项目(2018K025); 杭州市建设科研项目(2018027)。

作者简介: 姚言(1997—), 男, 浙江象山人, 硕士研究生, 主要从事地下工程施工环境影响方面的研究工作。E-mail: yaoyan2010@126.com。

*通信作者: 应宏伟(1971—), 男, 江西萍乡人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程的教学和科研工作。E-mail: ice898@zju.edu.cn。

is conducive to the control of the vertical displacement and bending moment of the existing tunnel.

Key words: new pipe jacking excavation; floating effect; soil convergence; above-crossing tunnelling; existing tunnels uplift; two-stage method

0 引言

城市地下管线、隧道等建(构)筑物纵横交错,新建隧道近距离穿越既有管线施工已成为常态。顶管法作为目前重要的非开挖施工技术之一在城市地下空间开发中发挥了越来越重要的作用。由于顶管法施工逐渐向着大直径、近接既有敏感地下结构的方向发展,其带来的不利影响也日趋严重,研究其对于周围建(构)筑物的影响具有重要意义。目前,在新建隧道穿越施工引起既有隧道响应的研究中,常采用实测分析^[1]、室内试验^[2]、数值模拟^[3-4]、理论计算等方法。

两阶段法是研究新建隧道对既有隧道影响的常用理论计算方法^[5-8]。第一阶段分析邻近开挖引起的周围土体的附加应力/位移场,对于附加应力场常采用 Mindlin 解,对于位移场的计算有 Peck 经验公式法、Sagasetta 源汇法^[9]、Loganathan-Poulos 自由土体位移公式^[10]等方法。第二阶段将应力/位移场施加于隧道以分析既有隧道的变形与内力响应,此时常将既有隧道简化为搁置在地基上的梁。

在上述两阶段法理论研究中,不论是顶管法施工还是盾构法施工,常采用隧道周围土体均匀径向收敛或者隧道开挖完成后衬砌下沉于开挖面底部土体非均匀径向收敛的假定,在不考虑地下水位的条件下这个假定是合理的。但根据近年来的施工监测资料^[11-13]及现场试验研究^[14]表明,在富水地层中盾构隧道管片的上浮问题就成为了一个比较普遍的现象。究其原因,管片与盾构机的管径差、施工过程中超挖形成的建筑空隙为管片上浮提供了外部条件,脱离盾尾的管片在周围水体和未硬化浆液的包裹下受到大于管片自重的浮力作用产生上浮。

顶管所受浮力特点与盾构相似但有不同。在管片结构形式上,顶管每段管节都是一个独立封闭圆筒,接缝数量远小于盾构隧道,大大减少了施工及运行过程中发生渗漏的可能,相比于盾构,其受到的浮力也比较完整,不会因渗漏而产生较大的衰减。在注浆方式上,为减小顶进期间管壁摩阻力,顶管每段管节上都设置有若干注浆孔,施工全过程持续注入触变泥浆,不同于盾构仅在盾尾部分的管片受到浆液浮力,顶管管节在施工全过程都受到浆液的浮力作用。

有学者从理论与实测的角度对顶管上浮问题进行了研究。王双等^[15]、张鹏等^[16]认为当注浆量较充足时,顶管管节所受浮力大于重力,顶管管节将逐渐上浮,直至管顶与隧洞顶部发生接触,并分别推导了该模式下的管周摩阻力公式。牛国伦等^[17]基于佛山市某大直径电力顶管某环的实测数据,认为顶管顶进结束一段时间后,管底水土压力小于管顶的原因是由于管节受到了浮力作用。张云龙等^[18]分析了苏州某矩形顶管工程多环实测数据,结果表明顶管管节底部压力普遍小于管顶是受到了浮力的作用,并据此提出了考虑上浮效应的顶管与隧洞顶部接触的模式。

综上所述,当注浆较为充足或在富水地层中时,顶管施工阶段管节的上浮效应是客观存在且不可忽略的,在该条件下现有的管节周围土体均匀收敛或如图 1(a)所示“下沉”收敛的假定将不再适用。因此本文提出了考虑上浮效应的、顶管管节与隧洞拱顶接触条件下的土体非均匀径向收敛模式(简称为“上浮”收敛),如图 1(b)所示,并采用两阶段方法,提出了该收敛模式下,大直径顶管上穿施工对下方既有地铁盾构隧道影响的简化分析方法,应用于杭州某电力顶管工程实际案例中,验证了所提方法的合理性,并进一步探讨了顶管顶进对下方既有隧道的影响规律。

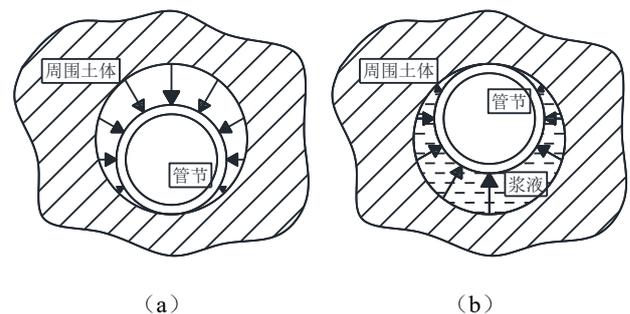


图1 “下沉”与“上浮”收敛模式

Fig. 1 Convergence modes of “sinking” and “floating up”

1 两阶段分析法

如图 2 所示为新建顶管上穿施工引起下方既有地铁盾构隧道响应的计算模型。顶管施工产生土体损失,周围土体在“上浮”收敛模式下的自由位移引起既有盾构隧道竖向位移以及内力响应。

为简化研究,突出重点,本文计算方法中假定:
 (1) 只考虑新建顶管在上浮条件下非对称收敛造成的自由位移场,不考虑施工过程中的其他力学效应及时间效应;(2) 既有隧道考虑为搁置于 Pasternak 地基上的具有等效抗弯刚度的 Euler-Bernoulli 梁;(3) 土体为连续均匀弹性体;(4) 既有隧道的存在不影响新建顶管产生的自由位移场及该处土体的受力响应^[7,19]。

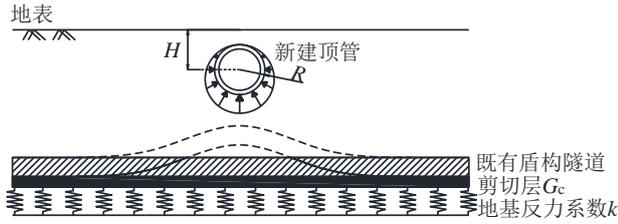


图2 新建顶管上穿既有盾构计算模型

Fig. 2 Calculation model of new pipe jacking crossing existing shield from above

1.1 顶管顶进引起的自由位移

为了得到新建顶管周围土体在“上浮”收敛模式下的地层竖向自由位移解,采用文献[20]提出的基于影像源法的、考虑非均匀收敛系数的圆孔非均匀收敛模式下的地层自由位移公式。

如图3(a)所示,以顶管轴线与地面交点为原点建立坐标系,在土体非均匀收敛模式下,圆心 o_1 处的小圆孔完全收敛时,周围半径为 r 处土体以收敛中心 o_2 为圆心发生非均匀收敛,顶部收敛位移为 u_1 、底部收敛位移为 u_2 。非均匀收敛系数 $n=u_1/u_2$,为顶部收敛位移与底部收敛位移之比。则新建顶管周围土体的“上浮”收敛模式如图3(b)所示,此时非均匀收敛系数 $n=0$ 。

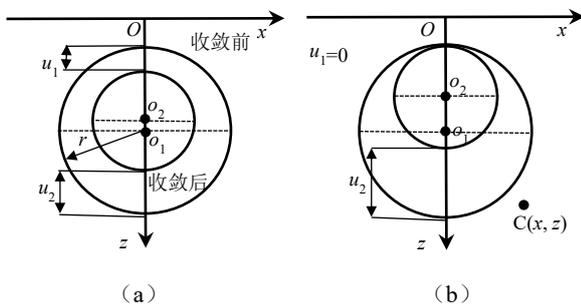


图3 非均匀收敛系数及考虑上浮效应的管土接触示意图
 Fig. 3 Diagram of non-uniform convergence coefficient and pipe-soil contact considering uplift effect

该方法是基于影像源法提出的,其位移场解答如图4所示由三部分组成,分别为源产生的位移 U_1 、负镜像产生的位移 U_2 、源与像在原地表处引起的剪力产生的位移 U_3 。当考虑圆孔面积为顶管施工引起

的土体损失 $\varepsilon\pi R^2$ 、非均匀收敛系数 $n=0$ 时, $C(x, z)$ 处竖向位移分量分别如式(1)~(3)所示:

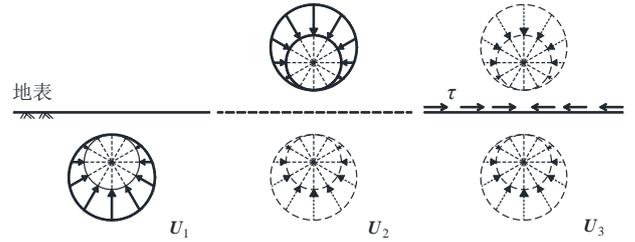


图4 位移场组成部分图示

Fig. 4 Diagram of displacement field components

$$u_{1z} = -\frac{\varepsilon R^2 (z-H)^2}{2r_1 r_1^2} - (z-H) \left[1 - \sqrt{\frac{\varepsilon^2 R^4}{4r_1^4} \left[1 - \frac{x^2}{r_1^2} \right] - \frac{\varepsilon R^2}{r_1^2} + 1} \right] \quad (1)$$

$$u_{2z} = -\frac{\varepsilon R^2 (z+H)^2}{2r_2 r_2^2} + (z+H) \left[1 - \sqrt{\frac{\varepsilon^2 R^4}{4r_2^4} \left[1 - \frac{x^2}{r_2^2} \right] - \frac{\varepsilon R^2}{r_2^2} + 1} \right] \quad (2)$$

$$u_{3z} = \int_{-\infty}^{+\infty} -\frac{3\varepsilon R^2}{2\pi} \frac{\xi H^2}{(\xi^2 + H^2)^{2.5}} \left[\frac{(x-\xi) \cdot z}{(x-\xi)^2 + z^2} - (1-2\nu) \arctan \frac{z}{x-\xi} \right] d\xi \quad (3)$$

式中: ε 为土体损失率,%; R 为顶管半径,m; H 为顶管轴线到地表的距离,m; ν 为泊松比; $r_1^2 = x^2 + (z-H)^2$, $r_2^2 = x^2 + (z+H)^2$, r_1 、 r_2 分别为源与像收敛中心到 $C(x, z)$ 的距离。

将上述位移分量叠加后可得半无限空间中任意一点 $C(x, z)$ 处,新建顶管在周围土体“上浮”收敛模式假定下的地层竖向自由位移解 U_z :

$$U_z = u_{1z} + u_{2z} + u_{3z} \quad (4)$$

Sagaseta 解假定土体均匀收敛、Loganathan 解假定土体“下沉”收敛,常用以计算新建隧道引起的地表沉降或当新建隧道下穿既有建(构)筑物时计算隧道轴线上方的地层自由位移,并能够取得较好的计算结果。但如前文所述,如果环境条件满足,顶管上浮效应不可忽略时,继续采用这两种土体收敛模式的假定则会低估顶管下方土体的自由位移场,以至于低估上穿工况下既有隧道的上浮隆起位移与内力响应。

图5给出了3种收敛模式下新建隧道(顶管)

下方 $2R$ 处垂直于轴线方向的土体竖向自由位移(正值表示隆起、负值表示沉降)。可见由 Loganathan 解得到的隧道轴线下方的位移极小, 最大值仅为 0.29 mm 。由 Sagasetta 解得到的竖向自由位移解最大值也仅为 6.4 mm 左右, 远小于本文提出的上浮收敛模式假定下的竖向自由位移最大值 16.9 mm 。

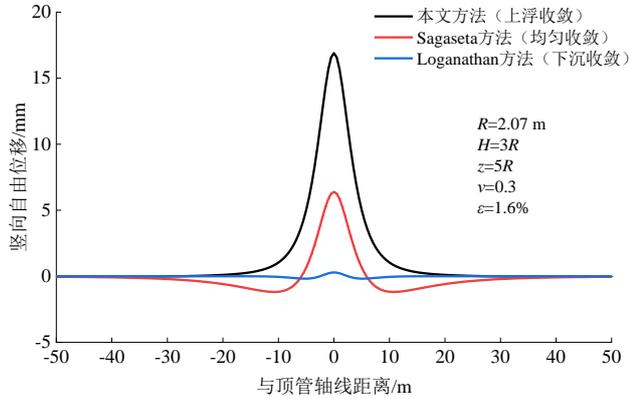


图 5 不同收敛模式下新建隧道下方土体自由位移
Fig. 5 Free displacement of soil under new tunnel under different convergence modes

可见顶管上浮效应对地层自由位移场的影响不可忽略, 后文将该自由位移场作为两阶段法中第一阶段中的位移输入计算既有隧道的响应。

如图 6 所示, 上述公式在坐标系 xoy 中得到, 而新建顶管与既有隧道并非完全正交。为得到既有隧道的竖向位移, 以其轴线为 x' 轴建立坐标系 $x'oy'$, 以角度 α 描述两隧道间的平面位置关系, 两坐标系间的关系为:

$$x' = x \cos \alpha \quad (5)$$

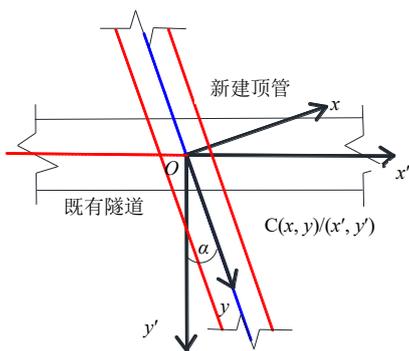


图 6 新建顶管与既有盾构隧道相对位置平面图
Fig. 6 Relative position of the new pipe jacking and the existing shield tunnel

1.2 既有隧道位移

假定下方既有隧道为搁置在 Pasternak 地基上的 Euler-Bernoulli 梁, 其挠曲微分方程为:

$$(EI)_{eq} \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + kDw(x) - G_c D \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = q(x) \quad (6)$$

$$q(x) = kDU_z(x) - G_c D \frac{d^2 U_z(x)}{dx^2} \quad (7)$$

式中: $w(x)$ 为既有隧道竖向位移, m ; $U_z(x)$ 为新建顶管顶进引起的土体竖向自由位移, m ; $q(x)$ 为新建顶管自由位移在既有盾构隧道上引起的附加荷载, MN/m ; $(EI)_{eq}$ 为隧道等效抗弯刚度, $MN \cdot m^2$; k 为地基基床反力系数, 采用 Vesic 地基基床系数法

$$k = \frac{0.65 E_s}{D(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{E_s D^4}{EI}}$$

不考虑刚度随埋深的变化,

MN/m^3 ; D 为既有隧道外径, m ; G_c 为剪切层参数, 取文献[21-22]的建议值, $G_c = 2.5 E_s D / 6(1 + \nu)$, MN/m , E_s 为土的弹性模量, MPa , ν 为泊松比。

采用有限差分法计算既有隧道位移。如图 7 所示, 将既有隧道离散为 n 个单元, 并产生 $n+1$ 个节点, 每个单元长度为 l (m), 同时在隧道两端各增加两个虚单元, 则可以得到式 (6) ~ (7) 的有限差分形式。

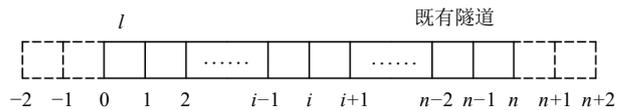


图 7 既有隧道离散示意图
Fig. 7 Discrete sketch of existing tunnel

$$(EI)_{eq} \frac{w_{i-2} - 4w_{i-1} + 6w_i - 4w_{i+1} + w_{i+2}}{l^4} + kDw_i - G_c D \frac{w_{i-1} - 2w_i + w_{i+1}}{l^2} = kDU_{z(i)} - G_c D \frac{U_{z(i-1)} - 2U_{z(i)} + U_{z(i+1)}}{l^2} \quad (8)$$

假定既有隧道两端自由, 则既有隧道两端 ($i=0$ 、 $i=n$ 处) 弯矩与剪力为 0, 可得 4 个虚拟节点位移, 分别可以表示为: $w_2 = 4w_0 - 4w_1 + w_2$ 、 $w_{-1} = 2w_0 - w_1$ 、 $w_{n+1} = 2w_n - w_{n-1}$ 、 $w_{n+2} = 4w_n - 4w_{n-1} + w_{n-2}$ 。

将所有节点的差分方程联立后, 式 (8) 可进一步写为矩阵形式:

$$[K_t]\{w\} + [K_s]\{w\} - [G]\{w\} = [K_s]\{U_z\} - [G]\{U_z\} \quad (9)$$

并可以简化为:

$$\{w\} = ([K_t] + [K_s] - [G])^{-1} \cdot ([K_s] - [G]) \cdot \{U_z\} \quad (10)$$

式中: $\{w\}$ 为既有隧道竖向位移列向量; $\{U_z\}$ 为土体竖向自由位移列向量; $[K_t]$ 为隧道刚度矩阵; $[K_s]$ 为土体刚度矩阵; $[G]$ 为剪切刚度矩阵。刚度矩阵具体形式如下:

泥浆以控制结构变形与沉降, 取土体损失率 ϵ 为 0.8% 进行计算。

同理, 本案例中顶管管节单位长度自重 $G=\pi/4\times(4.64^2-4^2)\times 26\approx 113\text{ kN}$, 所受浮力 $F=\pi/4\times 4.64^2\times 10\approx 169\text{ kN}$, $F>G$ 满足顶管管节产生上浮的条件。如图 9 所示为计算结果与顶进结束后地铁隧道竖向位移实测值的对比。

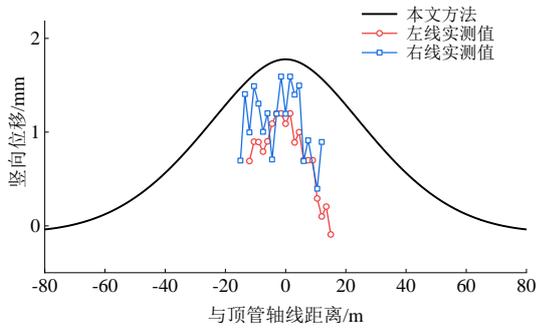


图 9 案例 2 地铁隧道实测竖向变形与计算结果对比

Fig. 9 Case 2: comparison between measured and calculated vertical deformation of the subway tunnel

可见计算结果在数值上接近实测值, 说明本文方法能够较好地预测由顶管上穿施工引起的下方既有隧道位移响应, 验证了本文方法的合理性。

3 参数分析

在前文案例 1 其他参数不变的基础上进行参数分析, 研究顶管施工引起的土体损失率 ϵ 、既有隧道与土体的管土刚度比 $\lambda=(EI)_{eq} / E_s D^4$ 、顶管与既有隧道间的竖向净距 L 对既有隧道竖向位移和弯矩的影响。

3.1 土体损失率

图 10~11 给出了土体损失率 $\epsilon=0.8\%$ 、1.6%、2.4%、3.2% 情况下既有隧道的纵向竖向位移与弯矩分布, 并且在图 12 中给出了上述土体损失率与既有隧道竖向位移最大值和弯矩最大值的关系。随着土体损失率的增大, 既有隧道竖向隆起最大值逐渐由 1.6 mm 线性增大到 6.5 mm, 但在纵向隆起的影响范围基本保持不变。由新建顶管上穿引发的既有隧道弯矩在轴线上的分布呈明显的“W”型, 随着土体损失率的增大, “W”型弯矩分布逐渐显著, 根据弹性地基梁竖向位移与弯矩的关系, 弯矩最大值由 0.8 MN·m 线性增大至 3.2 MN·m。

土体损失率对既有隧道竖向位移与弯矩最大值的影响趋势一致, 在实际施工过程中应严格控制施工参数以减少对周围土体的扰动, 将土体损失率

控制在较小的范围内, 以减少既有隧道竖向位移和弯矩。

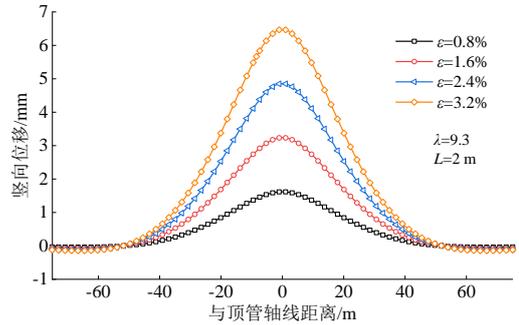


图 10 不同土体损失率时既有隧道竖向位移的对比

Fig. 10 Comparison of vertical displacement of the existing tunnel with different soil loss rates

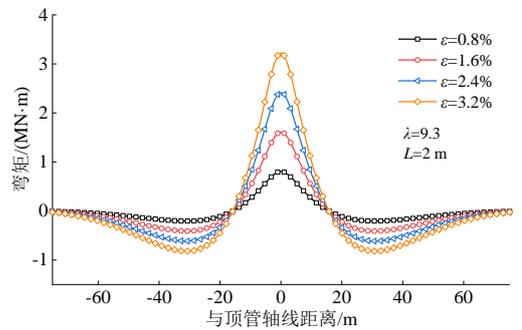


图 11 不同土体损失率时既有隧道弯矩的对比

Fig. 11 Comparison of existing tunnel bending moments with different soil loss rates

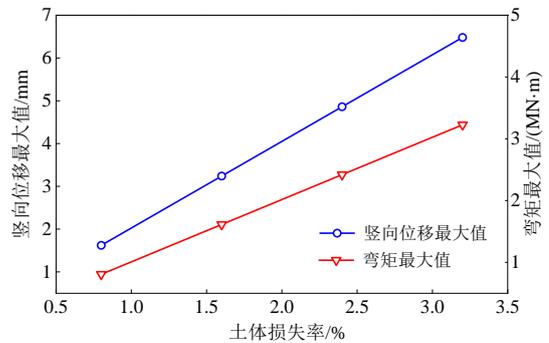


图 12 既有隧道竖向位移和弯矩最大值与土体损失率关系

Fig. 12 Relationship between maximum vertical displacement and bending moment of existing tunnel and soil loss rate

3.2 隧道管土刚度比

图 13~14 给出了隧道管土刚度比 $\lambda=1$ 、10、100、1 000 情况下既有隧道的竖向位移和弯矩分布对比。随着管土刚度比的增大, 既有隧道竖向位移最大值逐渐由 4.7 mm 减小到 1.0 mm, 同时在隧道纵向隆起的影响范围逐渐增大。通过增大既有隧道刚度来增大管土刚度比, 在此条件下随着管土刚度比增大, 既有隧道弯矩由 0.79 MN·m 增大到 6.35 MN·m, 其影响范围也逐渐增大。

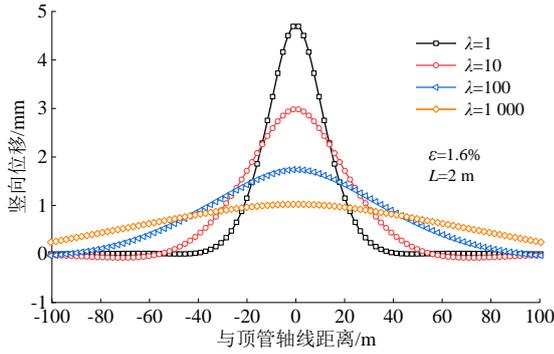


图 13 不同管土刚度比时既有隧道竖向位移的对比

Fig. 13 Comparison of vertical displacement of the existing tunnel with different pipe-soil stiffness ratios

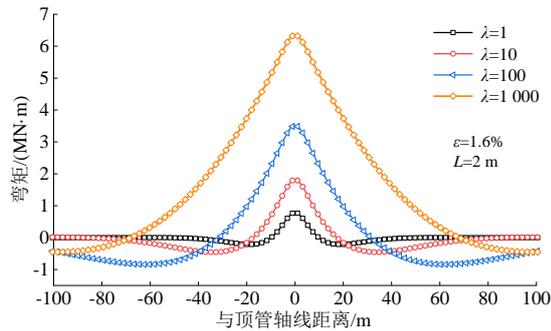


图 14 不同管土刚度比时既有隧道弯矩的对比

Fig. 14 Comparison of bending moment of the existing tunnel with different pipe-soil stiffness ratios

图 15 给出了管土刚度比 (对数坐标) 与竖向位移最大值和弯矩最大值的关系。管土刚度比对既有隧道竖向位移与弯矩最大值的影响趋势相反。竖向位移最大值与管土刚度比呈非线性负相关, 初期增大管土刚度比能够有效减少既有隧道竖向位移, 继续增大管土刚度比后减少的趋势变缓。弯矩最大值与管土刚度比呈非线性正相关, 增大管土刚度比的同时将增大隧道管片弯矩。

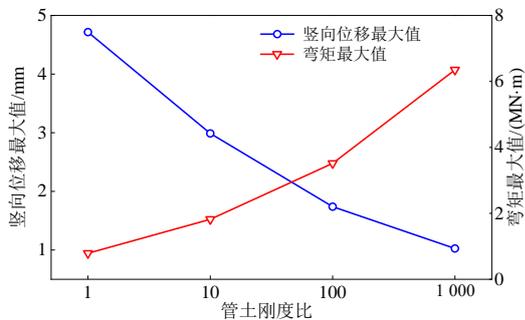


图 15 竖向位移最大值和弯矩最大值与管土刚度比的关系

Fig. 15 Variation of the maximum vertical displacement and the maximum bending moment of the existing tunnel against increasing pipe-soil stiffness ratios

3.3 顶管与既有隧道竖向净距

图 16~17 给出了新建顶管与既有隧道间竖向

净距 $L=0.25D\sim 5D$ 情况下既有隧道的纵向竖向位移与弯矩分布。可见增大顶管与既有隧道竖向净距有利于既有隧道竖向位移与弯矩的控制, 同时既有隧道隆起的影响范围也稍有增大, 弯矩的分布形式保持“W”型不变。图 18 给出了竖向位移最大值和弯矩最大值与净距的关系, 如图 18 所示, 随着既有隧道与顶管净距的增大, 顶管施工引起下方既有隧道竖向位移最大值、弯矩最大值随顶管与隧道净距的变化曲线的斜率逐渐减小, 继续增大净距对竖向位移与弯矩最大值的减少作用趋小, 实际工程中应根据既有隧道的保护要求和顶管的上覆土厚度要求选择合理的净距。

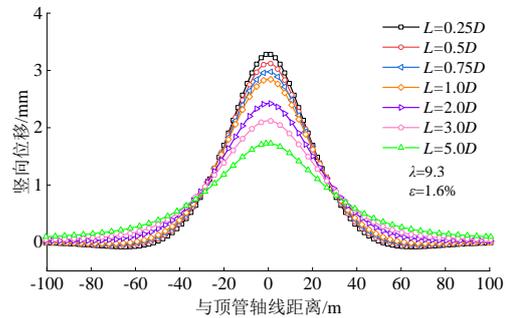


图 16 不同净距时既有隧道竖向位移的对比

Fig. 16 Comparison of vertical displacement of the existing tunnel with different clear distances

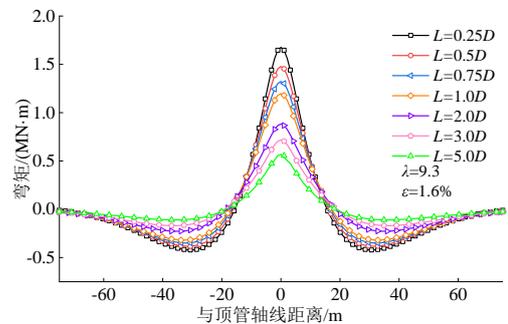


图 17 不同净距时既有隧道弯矩的对比

Fig. 17 Comparison of existing tunnel bending moments with different clear distances

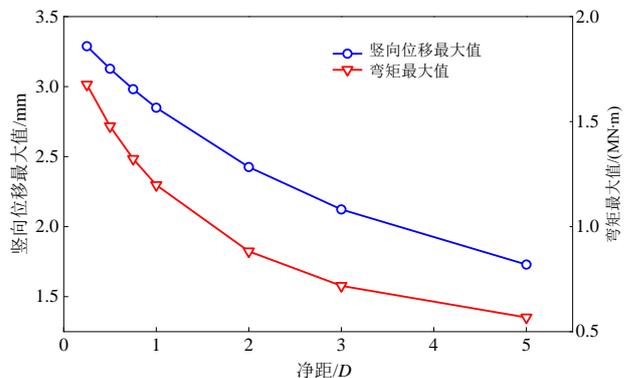


图 18 竖向位移最大值和弯矩最大值与净距的关系

Fig. 18 Maximum vertical displacement and maximum bending moment in relation to the clear distances

4 结 论

(1) 大直径顶管在注浆充足或在地下水位以下顶进时,上浮效应不可忽略,采用均匀土体收敛模式、顶管下沉的非均匀土体收敛模式将低估新建顶管施工引起的下方土体自由位移、既有隧道的纵向位移响应。

(2) 采用两阶段位移法,提出考虑上浮效应的土体非均匀收敛模式下,新建顶管施工引起下方既有隧道纵向位移与弯矩响应的简化计算方法。两个工程案例的应用分析验证了本文方法的合理性。

(3) 参数分析表明:降低土体损失率能有效减少既有隧道的竖向位移与弯矩,且土体损失率与既有隧道最大竖向位移与最大弯矩呈线性关系;既有隧道与土体的管土刚度比增大可减小既有隧道竖向位移,但也会增大隧道管片弯矩;增大顶管与既有隧道竖向净距有利于既有隧道竖向位移与弯矩的控制,实际工程应根据既有隧道的保护要求和顶管的上覆土厚度要求选择合理的净距。

参考文献

[1] 朱蕾,黄宏伟. 盾构近距离上穿运营隧道的实测数据分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1962-1966, 2004.
ZHU Lei, HUANG Hong-wei. Monitoring data analysis of disturbing effect caused by shield-driven over operating tunnel[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(10): 1962-1966, 2004.

[2] 黄德中,马险峰,王俊淞,等. 软土地区盾构上穿越既有隧道的离心模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 520-527.
HUANG De-zhong, MA Xian-feng, WANG Jun-song, et al. Centrifuge modelling of effects of shield tunnels on existing tunnels in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 520-527.

[3] 刘波,章定文,刘松玉,等. 大断面顶管通道近接穿越下覆既有地铁隧道数值模拟与现场试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2850-2860.
LIU Bo, ZHANG Ding-wen, LIU Song-yu, et al. Numerical simulation and field monitoring on a large cross-section pipe-jacking underpass traversing existing metro tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(11): 2850-2860.

[4] 张治成,林思,王金昌,等. 矩形管廊顶管施工对邻近管线的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 2): 244-249.
ZHANG Zhi-cheng, LIN Si, WANG Jin-chang, et al. Influences of pipe-jacking of rectangular utility tunnels on adjacent pipelines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 244-249.

[5] 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.
FENG Guo-hui, XU Chang-jie, ZHENG Ming-wang, 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.

[6] 甘晓露,俞建霖,龚晓南,等. 新建双线隧道下穿对既有盾构隧道影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 2): 3586-3594.
GAN Xiao-lu, YU Jian-lin, GONG Xiao-nan, et al. Effects of twin tunneling underneath on existing shield tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2): 3586-3594.

[7] 梁荣柱,宗梦繁,康成,等. 考虑隧道剪切效应的隧道下穿对既有盾构隧道的纵向影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(3): 420-430, 472.
LIANG Rong-zhu, ZONG Meng-fan, KANG Cheng, et al. Longitudinal impacts of existing shield tunnel due to down-crossing tunnelling considering shield tunnel shearing effect[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(3): 420-430, 472.

[8] 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 Zhi-guo, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong. Responses of existing tunnels induced by adjacent excavation in soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1373-1380.

[9] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Géotechnique, 1987, 37(3): 301-320.

[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.

[11] 沈征难. 盾构掘进过程中隧道管片上浮原因分析及控制[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(6): 51-56.

- SHEN Zheng-nan. Analysis and control of the upward moving of tunnel segments in the process of shield excavation[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2004, 41(6): 51-56.
- [12] 舒瑶, 周顺华, 季昌, 等. 多变复合地层盾构隧道施工期管片上浮实测数据分析与量值预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(增刊 1): 3464-3474.
- SHU Yao, ZHOU Shun-hua, JI Chang, et al. Analysis of shield tunnel segment uplift data and uplift value forecast during tunnel construction in variable composite formation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(S1): 3464-3474.
- [13] 董赛帅, 杨平, 姜春阳, 等. 盾构隧道管片上浮机理与控制分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(1): 49-54.
- DONG Sai-shuai, YANG Ping, JIANG Chun-yang, et al. Analysis of mechanism and controls of segment floating of shield tunnels[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(1): 49-54.
- [14] 季昌, 周顺华, 许恺, 等. 盾构隧道管片施工期上浮影响因素的现场试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增刊 2): 3619-3626.
- JI Chang, ZHOU Shun-hua, XU Kai, et al. Field test research on influence factor of upward moving of shield tunnel segments during construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(S2): 3619-3626.
- [15] 王双, 夏才初, 葛金科. 考虑泥浆套不同形态的顶管管壁摩擦阻力计算公式[J]. *岩土力学*, 2014, 35(1): 159-166, 174.
- WANG Shuang, XIA Cai-chu, GE Jin-ke. Formulae of lateral friction resistance for pipe-jacking considering different forms of mud screen[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(1): 159-166, 174.
- [16] 张鹏, 谈力昕, 马保松. 考虑泥浆触变性和管土接触特性的顶管摩擦阻力公式[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(11): 2043-2049.
- ZHANG Peng, TAN Li-xin, MA Bao-song. Formulae for frictional resistance considering mud thixotropy and pipe-soil contact characteristics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(11): 2043-2049.
- [17] 牛国伦, 马保松, 张鹏, 等. 大直径顶管施工管土相互作用实测分析: 以佛山市电力隧道顶管工程为例[J]. *隧道建设(中英文)*, 2021, 41(8): 1353-1360.
- NIU Guo-lun, MA Bao-song, ZHANG Peng, et al. Measurement analysis of pipe-soil interaction in large-diameter pipe jacking project of a power tunnel in Foshan, China[J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(8): 1353-1360.
- [18] 张云龙, 张鹏, 马保松, 等. 砂层矩形顶管施工中管周压力时空分布规律及预测模型[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(6): 1171-1179.
- ZHANG Yun-long, ZHANG Peng, MA Bao-song, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and prediction model of pressures around rectangular pipe jacking in sand layer[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(6): 1171-1179.
- [19] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 层状地基中隧道开挖对临近既有隧道的影响分析[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(4): 600-608.
- ZHANG Zhi-guo, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong. Analysis on response of existing tunnels due to adjacent tunneling in multi-layered soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(4): 600-608.
- [20] 徐日庆, 程康, 应宏伟, 等. 基于影像源法的基坑开挖引起的土体水平位移预测[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(增刊 1): 17-20, 72.
- XU Ri-qing, CHENG Kang, YING Hong-wei, et al. Prediction of horizontal displacement of soils caused by excavation of foundation pits based on virtual mirror technology[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(S1): 17-20, 72.
- [21] TANAHASHI H. Formulas for an infinitely long bernoulli-euler beam on the Pasternak model[J]. *Soils and Foundations*, 2004, 44(5): 109-118.
- [22] 徐凌. 软土盾构隧道纵向沉降研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- XU Ling. Study on the longitudinal settlement of shield tunnel in soft soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [23] 孙中伟. 大直径长距离曲线顶管近距离上穿地铁隧道施工技术[J]. *市政技术*, 2022, 40(9): 137-141, 148.
- SUN Zhong-wei. Construction technology of large diameter long distance curved pipe jacking through adjacent subway tunnel[J]. *Journal of Municipal Technology*, 2022, 40(9): 137-141, 148.
- [24] 姚燕明, 黄毅, 周俊宏, 等. 宁波轨道交通 4 号线盾构隧道联络通道多种工法实践研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2021, 41(6): 1007-1014.
- YAO Yan-ming, HUANG Yi, ZHOU Jun-hong, et al. Construction methods for connecting passages in shield tunnel of Ningbo rail transit line 4[J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(6): 1007-1014.
