

地面堆载下考虑盾构施工开挖效应的隧道内力研究

项鹏飞¹, 齐永洁², 姜海波^{*1, 3}, 魏纲⁴, 张军⁵, 王海娟¹

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 2. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 3. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 4. 浙大城市学院浙江省城市盾构隧道安全建造与智能养护重点实验室, 浙江 杭州 310015; 5. 新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 为研究地面堆载对隧道围压及内力的影响, 推导了考虑隧道开挖应力释放作用的环向荷载计算公式, 将堆载对隧道的影响简化为应力重分布和横椭圆化两阶段, 引入剪切错台和刚体转动协同变形模型对任一管片的内力计算公式进行了推导, 搜集并分析了国内共 34 组隧道水土压力实测数据并提出了应力释放率 σ 的经验公式, 结合室内模型试验进行了隧道围压、内力的计算及可靠性验证。结果表明: 理论方法得到堆载下隧道围压大小及分布规律与试验结果相接近; 考虑应力释放作用得到的围压值更接近实测值, 各内力值均随 σ 的减小而减小; 中心处管片受附加围压影响最大, 偏向两侧逐渐减小, 而附加弯矩、轴力、剪力会在堆载中心点和隧道位移反弯点附近出现极大值。

关键词: 地面堆载; 隧道围压; 内力分析; 应力释放; 围压重分布

中图分类号: TU43 文献标识码: A

作者简介: 项鹏飞 (1992-), 男, 博士研究生在读, 主要从事地下隧道和岩土工程的方向的研究工作。E-mail: z20120190803@zjtongji.edu.cn。

Study on tunnel internal forces considering the excavation effect of shield tunneling during ground loading

XIANG Pengfei¹, QI Yongjie², JIANG Haibo^{1, 3}, WEI Gang⁴, ZHANG Jun⁵, WANG Haijuan¹

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agriculture University, Urumqi 830052, China; 4. Key Laboratory of Safe Construction and Intelligent Maintenance for Urban Shield Tunnels of Zhejiang Province, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China; 5. Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey Design Institute Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

Abstract: In order to study the influence of ground loading on tunnel confining pressure and internal force, several circumferential load calculation formulas considering the stress release effect of tunnel excavation are derived. The influence of ground loading on tunnel is simplified into two stages: stress redistribution and transverse elliptization. The internal force calculation formulas of any ring segment are derived by introducing the shear dislocation and rigid body rotation collaborative deformation model. 34 groups of measured water and soil stress data of tunnels at home and abroad are collected and analyzed, and the empirical formula of stress release rate (σ) is proposed. Combined with indoor model test, the confining pressure and internal force of the tunnel are calculated and the reliability is verified. The results show that the magnitude and distribution of tunnel confining pressure under surcharge load obtained by the theoretical method are close to the experimental results. The confining pressure obtained by considering the stress release effect are closer to the measured values, and each internal force value decreases with the decrease of σ . The effect of the additional confining pressure on the segment at the center of the ground loading is the largest, and it gradually decreases on both sides. While the additional bending moment, axial force and shear force will have maximum values near the central point of ground load and the reverse bending point of tunnel displacement.

Key words: ground loading; tunnel confining pressure; internal force analysis; stress release; redistribution of confining pressure

0 引言

隧道上方大面积堆载会破坏原有隧道的围压平

基金项目: 国家自然科学基金项目(52369021; 52178399); 天山英才——优秀工程师培养计划项目

收稿日期: 2024-08-02

*通讯作者 (E-mail: klaud_123@163.com)

衡,严重时甚至导致接缝张开、管片开裂、螺栓失效等问题。因此,开展地面堆载对隧道围压的影响规律研究具备一定的工程意义。

针对堆载引起的隧道围压变化及横向变形问题,主要的研究方法包括实测数据分析^[1]、模型试验^[2,3]、数值模拟^[4]及理论研究^[5]。总的来说,隧道横向变形及受力研究主要包含管片横纵向收敛、围压、管片内力等多块内容,其中关于堆载引起的围压理论研究相对较少。而在现有研究中仍然存在下列问题:(1)参照章定文等^[6]的研究,其将管片围压实测数据与采用上覆土柱法、太沙基松弛土压力法计算得到的理论计算值进行了对比,发现稳定后的土压实测值约为理论计算值的48%~60%,因此,若围压分析时仍采用常规理论方法计算,将会产生较大误差;(2)堆载产生的影响将会导致管片产生较大横椭圆变形^[1],而现有研究大多忽略了横椭圆变形产生的影响^[7,8];(3)目前堆载引起的隧道围压研究忽略了围压重分布过程^[7,8],在已有围压重分布研究中,分析的管片均是中心环(指隧道发生最大位移处的管片),并将此处环间剪切力和环间拉力视为0,不具有普遍性。因此,完善并提出一种适用于堆载工况下隧道围压的计算方法并做深入分析是十分必要的。

本文推导了隧道开挖应力释放作用下隧道环向附加荷载计算公式,引入剪切错台和刚体转动协同变形模型^[9](下文简称为协变模型)对任一环管片的内力计算公式进行了推导,提出了应力释放率经验公式,依托室内模型试验实测数据进行了围压及内力的计算及可靠性验证,进一步分析了不同应力释放率 σ 、不同 x 处附加围压、弯矩、轴力和剪力的变化规律。

1 本文方法

1.1 力学计算模型及本文假设

如图 1 所示为本文计算模型图。由图可知, 外径为 D_0 的盾构隧道左上方存在一个矩形堆载区域, 堆载大小为 P , 其中平行于隧道一侧边长为 L , 另一边长为 B , 以堆载中心为原点建立坐标系, 平行隧道方向建立 x 轴。 s 为堆载中心距隧道轴线水平距离; H 为隧道上覆土厚度; H_w 为地下水高度。

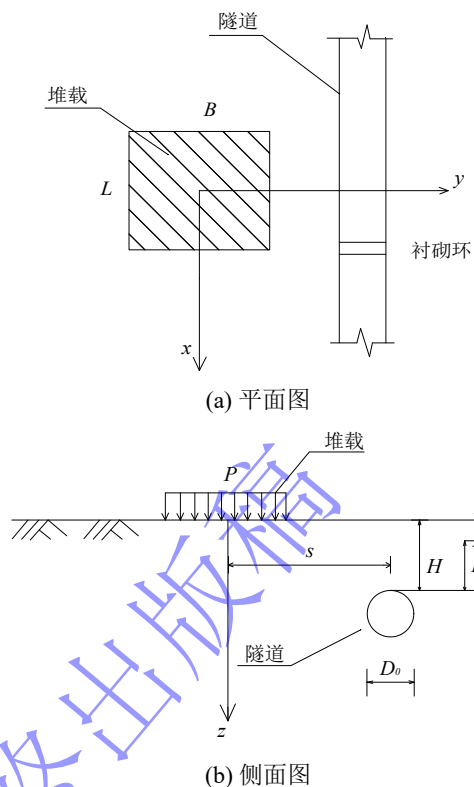


图 1 计算模型图

Fig. 1 Calculation model diagram

本文作如下简化与假设：(1) 假设地基土为各向同性、均匀连续的半无限弹性体；(2) 计算堆载引起的附加荷载时忽略隧道的存在。

1.2 计算公式

1.2.1 考虑应力释放作用下隧道环向初始荷载计算

取隧道任一片管环进行分析,如图2所示为未考虑应力释放作用下的环向初始应力状态。在盾构施工前,欲修建隧道处的水土压力可以通过水土分算法或水土合算法计算,前者适用于砂土,后者适用于黏土。图2符号意义详见论文[5]。

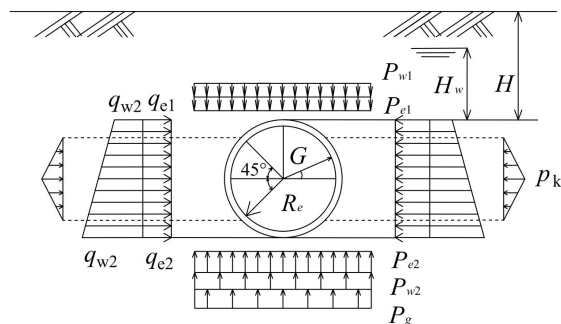


图 2 隧道初始应力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of initial stress in tunnel

本文引入应力释放率 σ 来表示应力释放前后荷载的比值, 则应力释放后的竖向荷载 P' 和水平荷载 q' 为:

$$P' = \sigma P \quad (1)$$

$$q' = \sigma q \quad (2)$$

式中：\$P\$ 和 \$q\$ 为不考虑应力释放作用的竖向荷载及水平荷载，荷载 \$P\$、\$P'\$ 包括图 2 中所有的竖向荷载，荷载 \$q\$、\$q'\$ 包括图 2 中所有的水平荷载，各个荷载的计算公式可参看论文[5]，本文不再赘述。

1.2.2 堆载作用下附加荷载计算

如图 3 所示为地面堆载作用下隧道所受附加荷载作用示意图。由图可知，假设堆载位于隧道左上方，则受到堆载引起的附加应力影响，隧道的左侧会产生水平力 \$q_{p1}\$，\$q_{p2}\$，隧道上侧会产生竖向力 \$P_{p1}\$，\$P_{p2}\$。

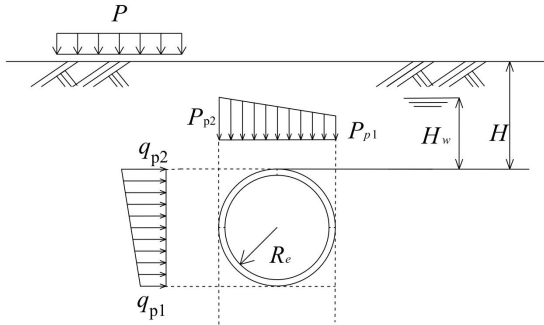


图 3 堆载引起的附加荷载示意图

Fig. 3 Diagram of additional load caused by stacking load

取堆载处任一点的力为 \$Pd\alpha d\beta\$，根据 Boussinesq 解积分可求出 \$P_{p1}\$、\$P_{p2}\$、\$q_{p1}\$、\$q_{p2}\$ 为：

$$P_{p1} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \frac{3P}{2\pi} \frac{H^3}{R_1^5} d\alpha d\beta \quad (3)$$

$$P_{p2} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \frac{3P}{2\pi} \frac{H^3}{R_2^5} d\alpha d\beta \quad (4)$$

$$q_{p1} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \frac{3P}{2\pi} \left\{ \frac{(s-0.5D_0-\beta)^2(H+D_0)}{R_3^5} + \frac{1-2\mu}{3} \left[\frac{R_3^2-H(R_3+H+D_0)}{R_3^3(R_3+H+D_0)} - \frac{(s-0.5D_0-\beta)^2(2R_3+H+D_0)}{R_3^3(R_3+H+D_0)^2} \right] \right\} d\alpha d\beta \quad (5)$$

$$q_{p2} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \frac{3P}{2\pi} \left\{ \frac{(s-0.5D_0-\beta)^2 H}{R_4^5} + \frac{1-2\mu}{3} \left[\frac{R_4^2-H(R_4+H)}{R_4^3(R_4+H)} - \frac{(s-0.5D_0-\beta)^2(2R_4+H)}{R_4^3(R_4+H)^2} \right] \right\} d\alpha d\beta \quad (6)$$

$$\text{式中：} \quad R_1 = \sqrt{(s+0.5D_0-\beta)^2 + H^2 + (x-\alpha)^2} \quad ,$$

$$R_2 = \sqrt{(s-0.5D_0-\beta)^2 + H^2 + (x-\alpha)^2} \quad ,$$

$$R_3 = \sqrt{(s-0.5D_0-\beta)^2 + (H+D_0)^2 + (x-\alpha)^2} \quad ,$$

$$R_4 = \sqrt{(s-0.5D_0-\beta)^2 + H^2 + (x-\alpha)^2} \quad .$$

在左侧及顶部附加荷载的作用下，隧道会发生

横椭圆变形及整体的位移，这两个影响是共同发生的。本文为了简化分析，将上述过程简化为如图 4 所示两个阶段：（1）衬砌形状始终保持圆形，隧道整体发生偏移，并在移动过程中发生围压应力重分布；（2）隧道中心位置不变，隧道发生横椭圆变化。

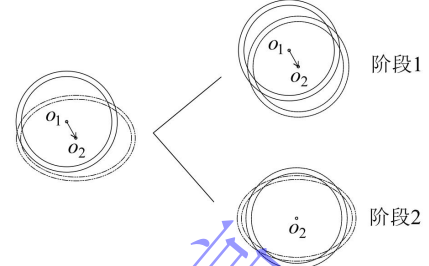


图 4 管片围压重分布及横椭圆化过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the distribution of confining pressure and transverse ellipticization process of pipe segments

（1）阶段 1

如图 5 所示，为了便于分析，左侧及上部荷载统一由 \$p_{ax}\$ 和 \$p_{az}\$ 表示，在 \$p_{ax}\$ 和 \$p_{az}\$ 的作用下，附加荷载首先会克服管片环间拉力及环间剪切力的影响，使隧道发生整体偏向右下方的局部位移，在衬砌移动过程中，衬砌会挤压右侧及下方土体，从而产生抵抗该变形的附加荷载，设该附加荷载在水平及竖直方向的增量为 \$\Delta p_{ax}\$ 和 \$\Delta p_{az}\$；同时衬砌左侧及上部应力得到释放。由于假设衬砌的形状在该阶段中保持不变，故左侧及上部衬砌的附加荷载减小量应与右侧和下部的附加荷载增大量相同，且最终附加荷载将实现平衡，故水平及竖向的附加荷载满足：

$$\begin{cases} p_{ax} - \Delta p_{ax} = \frac{F_{tx} + F_{px}}{D_0 D_t} + \Delta p_{ax} \\ p_{az} - \Delta p_{az} = \frac{F_{tz} + F_{pz}}{D_0 D_t} + \Delta p_{az} \end{cases} \quad (7)$$

式中：\$F_{tx}\$ 和 \$F_{tz}\$ 分别为管片环间剪切力在 \$x\$ 轴和 \$z\$ 轴方向分力；\$F_{px}\$ 和 \$F_{pz}\$ 分别为管片环间拉力在 \$x\$ 轴和 \$z\$ 轴方向分力；\$D_t\$ 为管片环宽度。

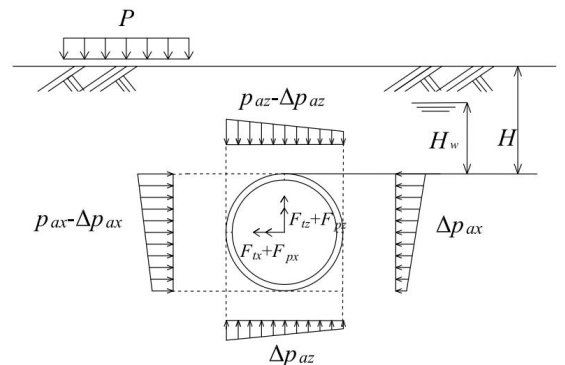


图 5 管片附加荷载重分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of additional load redistribution on pipe segments

根据协变模型^[9], 可以求得任一环衬砌的水平位移 $w_x(m)$ 及竖向位移 $w_z(m)$, 则环间相对水平、竖向位移 Δw_x 、 Δw_z 为:

$$\Delta w_x = w_x \left[(m+1)D_t \right] - w_x (mD_t) \quad (8)$$

$$\Delta w_z = w_z \left[(m+1)D_t \right] - w_z (mD_t) \quad (9)$$

式中: m 和 $m+1$ 为管片环数。

如图 6(a)所示, 以隧道竖向位移引起的错台及相对转角变形为例, 对于变形中间环, 左右两侧相邻管片作用于中间环的环间剪切力为 F_{tz-l} 和 F_{tz-r} , 方向均竖直向上, 故中间环受到的总的剪切力 F_{tz} 为:

$$F_{tz} = F_{tz-l} + F_{tz-r} \quad (10)$$

环间剪切力 F_{tz-l} 和 F_{tz-r} 分别为:

$$F_{tz-l} = \Delta w_{z-l} j k_t \quad (11)$$

$$F_{tz-r} = \Delta w_{z-r} j k_t \quad (12)$$

式中: k_t 为环间剪切刚度, Δw_{z-l} 、 Δw_{z-r} 分别为中间管片与左侧和右侧管片环间位移差, j 为剪切变形占总变形的比例系数。

环间拉力 F'_{pz-l} 、 F'_{pz-r} 指向圆心方向的分力分别为 F_{pz-l} 、 F_{pz-r} , 有:

$$F_{pz-l} = F'_{pz-l} \sin \left(\frac{\theta_{z-l}}{2} \right) \quad (13)$$

$$F_{pz-r} = F'_{pz-r} \sin \left(\frac{\theta_{z-r}}{2} \right) \quad (14)$$

$$F_{pz} = F_{pz-l} + F_{pz-r} \quad (15)$$

式中: θ_{z-l} 、 θ_{z-r} 分别为中间环与左侧、右侧相邻管片的相对转角。

θ_{z-l} 、 θ_{z-r} 分别为:

$$\theta_{z-l} = \frac{j \Delta w_{z-l}}{D_t} \quad (16)$$

$$\theta_{z-r} = \frac{j \Delta w_{z-r}}{D_t} \quad (17)$$

环间拉力 F'_{pz-l} 、 F'_{pz-r} 可表示为:

$$F'_{pz-l} = k_T \theta_{z-l} D_0 \quad (18)$$

$$F'_{pz-r} = k_T \theta_{z-r} D_0 \quad (19)$$

式中: k_T 为环间抗拉刚度。

如图 6(b)所示, 对于非中心处的管片, 左右环间剪切力 F_{tz-l} 、 F_{tz-r} 方向相反, 故管片受到的总的剪切力 F_{tz} 为:

$$F_{tz} = F_{tz-l} - F_{tz-r} \quad (20)$$

由于隧道位移区段的长度要远远大于隧道位移值, 故环间拉力仍可按公式(13)~(19)进行计算。隧道水平位移引起的错台及相对转交变形与竖向相类似, 不再赘述。

取任一管片进行受力分析, 可得应力平衡方程:

$$\begin{cases} \Delta p_{ax} = \frac{1}{2} p_{ax} - \frac{F_{tx} + F_{px}}{2D_0 D_t} \\ \Delta p_{az} = \frac{1}{2} p_{az} - \frac{F_{tz} + F_{pz}}{2D_0 D_t} \end{cases} \quad (21)$$

则围压重分布后的左侧及上侧附加水平力 q_{p1} ,

q_{p2} 均将减小 Δp_{ax} , 右侧附加水平力将从 0 增大为 Δp_{ax} ; 顶部附加竖向力 P_{p1} , P_{p2} 均将减小 Δp_{az} , 底部附加竖向力将从 0 增大为 Δp_{az} 。

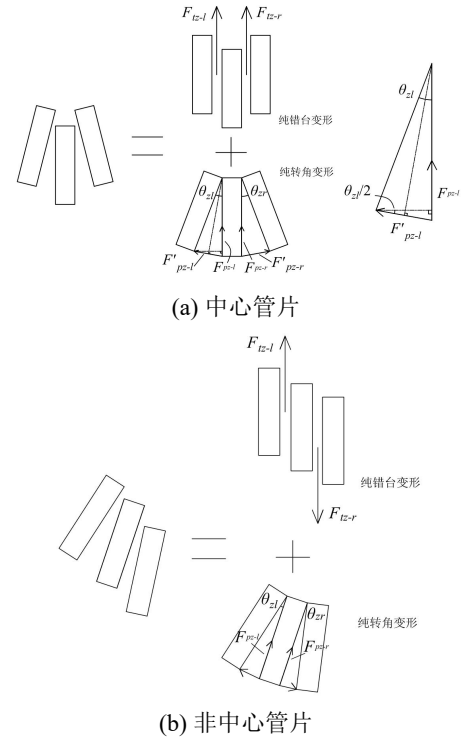


图 6 受相邻管片环间作用原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the principle of interaction between adjacent pipe segments

(2) 阶段 2

在该阶段中, 隧道中心位置不变, 受堆载附加应力影响, 管片由圆形变为横椭圆。在该阶段中, 将竖向地层抗力视为与地层位移无关, 通过竖向力平衡求得, 把作用在衬砌侧面的水平地层抗力看成是衬砌向地层方向位移而产生的反力。

地层抗力 q_k 的大小与管片水平向的横椭圆变形量有关, 分布范围为衬砌环水平直径上下 45° , 中心最大值 q_h 可表示为:

$$q_h = K\delta \quad (22)$$

式中: δ 为水平直径处最大横向变形量, K 为地层抗力系数。

δ 由四部分组成, 水土压力引起的 δ_1 , 地面堆载引起的 δ_2 , 环间轴力引起的 δ_3 和环间剪切力引起的 δ_4 , 即有:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 \quad (23)$$

式中: δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 的计算公式详见论文[5]。

通过环向各点的附加应力值, 可以求得沿隧道环向的附加围压 P_{ar} 为:

$$P_{ar} = \begin{cases} \Delta p_{ax} \cos \theta + (p_{az} - \Delta p_{az}) \sin \theta, & 0 \leq \theta < \pi/2 \\ (p_{ax} - \Delta p_{ax}) \cos \theta + (p_{az} - \Delta p_{az}) \sin \theta, & \pi/2 \leq \theta < \pi \\ (p_{ax} - \Delta p_{ax}) \cos \theta + \Delta p_{az} \sin \theta, & \pi \leq \theta < 1.5\pi \\ \Delta p_{ax} \cos \theta + \Delta p_{az} \sin \theta, & 1.5\pi \leq \theta < 2\pi \end{cases} \quad (24)$$

初始围压的计算亦可参照上述公式, 将附加围压与初始围压相加即可得到堆载后的围压计算公式。

1.2.3 衬砌内力计算

由于篇幅限制, 各个力引起管片环的弯矩 M 、轴力 N 、剪力 Q 的计算公式可参照论文[5]。

2 应力释放率 σ 的取值分析

本文收集了国内外共 34 组现场监测数据, 包括黏土、砂土及砾石地层, 盾构隧道直径为 3.95~15m, 深径比的取值区间为 0.49~5.57。以隧道拱顶处水土压力为研究对象, 利用上覆土柱法或太沙基松弛土压力法求得拱顶水土压力理论值, 再将实测值与理论值进行比较, 求得应力释放率。在计算理论值时, 当隧道深径比不大于 1 时, 地层没有土拱效应, 宜采用上覆土柱法计算; 当深径比大于 1 时, 对于砂土及硬质黏土宜采用太沙基法, 对于较软的黏土宜采用全土柱法。本文在计算过程中参照上述建议执行, 部分工程因缺少参数故选择全土柱法进行计算。具体参数及地层情况详见表 1。

土柱法计算垂直土压时采用全部覆盖土的压力, 即隧道顶部压力 p_v 为:

$$p_v = \gamma H \quad (25)$$

式中: γ 为土体重度。

采用太沙基法计算时, 顶部压力 p_v 可表示为:

$$p_v = \frac{B_1(\gamma - c/B_1)}{K_0 \tan \varphi} (1 - e^{-K_0 \tan \varphi \cdot H/B_1}) + p_0 e^{-K_0 \tan \varphi \cdot H/B_1} \quad (26)$$

式中: B_1 为滑落土体宽度的一半, 对于圆形隧道, 有 $B_1 = R_0 \cot\left(\frac{\pi/4 + \varphi/2}{2}\right)$; c 、 φ 为土的粘聚力和内摩擦角; p_0 为上覆荷重。

如图 7 所示为应力释放率随隧道深径比的变化关系。由图可知, 不同工程中应力释放率差别较大, 样本深径比区间为 0.49~5.57。在总体变化趋势上, 应力释放率随着深径比的增大而逐渐减小, 并逐渐趋向于稳定值。采用幂函数对数据点进行拟合, 得到拟合公式, 可作为实际工程中初步预测隧道环向应力释放率的经验公式, 即:

$$\sigma = 0.7133 \left(\frac{H}{D_0} \right)^{-0.399} \quad (27)$$

对比章定文等[6]的数据点可知, 其变化规律与本文预测曲线相类似, 从侧面验证了所提经验公式的合理性。

将该公式应用到公式(1)、(2)中, 即可求得考虑应力释放作用的隧道环向荷载。

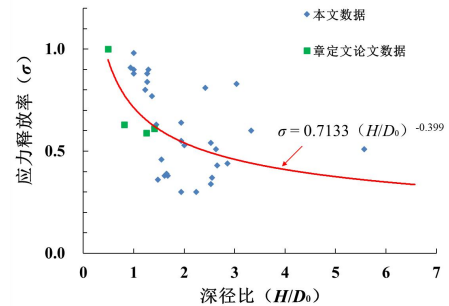


图 7 应力释放率随深径比的变化规律

Fig. 7 The variation law of stress release rate (σ) with parameter H/D_0

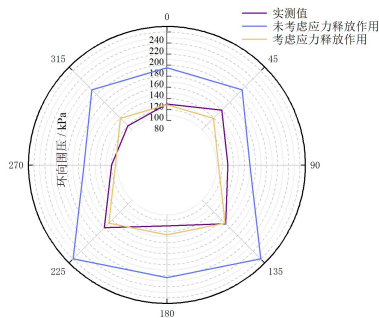


图 8 考虑应力释放作用前后的环向围压与实测值对比

Fig. 8 Comparison of measured and theoretical values of

circumferential confining pressure before and after considering the effect of stress release

如图 8 所示，基于论文[6]的工程案例进行围压计算，对比考虑应力释放作用前后的环向围压与实测数据值。由图可知：考虑应力释放作用求得的隧道环向围压与实测数据更加接近，而未考虑应力释放作用求得的环向围压大于实测围压值，误差率最大值为 91.9%，位于 315° 处。总体上，考虑应力释放作用能够有效提高盾构隧道围压计算的准确性。

表 1 国内外盾构开挖前后应力释放率及相关参数统计表

Table 1 Statistical table of stress release rate and related parameters before and after shield tunneling excavation at home and abroad

序号	隧道及研究断面	主要地层	覆土层厚度/m	管片直径/m	深径比	实测值/kPa	计算值/kPa	应力释放率
1	上海某隧道 ^[11]	砂土	4	4	1	60.6	62	0.98
2	南京地铁某区间隧道，断面 A ^[11]	砂土	15	6.2	2.42	152	188	0.81
3	南京地铁某区间隧道，断面 B ^[11]	黏土	12	6.2	1.94	118	216	0.55
4	上海打浦路隧道 ^[11]	黏土	14	11	1.27	206	245	0.84
5	南京长江隧道 ^[11]	黏土	17.9	14.5	1.23	256	320	0.8
6	南京某越江隧道 ^[12]	砂土	34	11.2	3.04	543	650	0.83
7	隧道 A ^[13]	砾石	9.6	6.2	1.55	75	164	0.46
8	隧道 B ^[13]	砾石	12.1	4.75	2.55	88	234	0.37
9	日本川崎某隧道 ^[14]	黏土	22	3.95	5.57	217	429	0.51
10	日本东京某隧道 ^[14]	黏土	13	4.95	2.63	130	254	0.51
11	日本某隧道 A ^[14]	砂土	17	5.1	3.33	200	332	0.6
12	日本某隧道 B ^[14]	砂土	19	9.8	1.94	110	371	0.3
13	日本某隧道 C ^[14]	砾石	10	6.2	1.61	75	195	0.38
14	日本某隧道 D ^[14]	砾石	12	4.75	2.53	80	234	0.34
15	南京地铁 1 号线，YK13+372 ^[15]	砂土	12	6.2	1.94	150	234	0.64
16	南京地铁 1 号线，YK13+872 ^[15]	黏土	9	6.2	1.45	110	175.5	0.63
17	西安地铁 2 号线，断面 A ^[15]	黏土	12	6	2	105	199	0.53
18	西安地铁 2 号线，断面 B ^[17]	黏土	10	6	1.67	74	195	0.38
19	上海长江隧道，985 环 ^[18]	黏土	20.4	15	1.36	-	-	0.77
20	上海长江隧道，2986 环 ^[18]	黏土	19.05	15	1.27	-	-	0.88
21	上海长江隧道，3430 环 ^[18]	黏土	24.75	15	1.65	-	-	0.39
22	国内某隧道 C ^[19]	-	6	6	1	-	-	0.9
23	国内某隧道 D ^[19]	-	10	10	1	-	-	0.88
24	台山核电站取水隧道，断面 1 ^[20]	黏土	20	8.7	2.53	190	350	0.54
25	台山核电站隧道测试，断面 2 ^[21]	黏土	19.46	8.7	2.24	109	362	0.3
26	台山核电站隧道测试，断面 3 ^[21]	黏土	23.06	8.7	2.65	199	459	0.43
27	台山核电站隧道测试，断面 4 ^[21]	黏土	24.84	8.7	2.86	191	429	0.44
28	清华园隧道 ^[22]	黏土	18	12.2	1.48	125	351	0.36
29	江阴市澄江西路隧道，断面 A	黏土	14.69	11.36	1.29	191	213	0.9
30	江阴市澄江西路隧道，断面 B	黏土	10.7	11.36	0.94	152	168	0.91
31	扬州瘦西湖隧道，断面 1 ^[6]	黏土	7.1	14.5	0.49	-	-	1.0
32	扬州瘦西湖隧道，断面 2 ^[6]	黏土	11.8	14.5	0.81	-	-	0.63
33	扬州瘦西湖隧道，断面 3 ^[6]	黏土	18.1	14.5	1.25	-	-	0.59
34	扬州瘦西湖隧道，断面 4 ^[6]	黏土	20.4	14.5	1.41	-	-	0.61

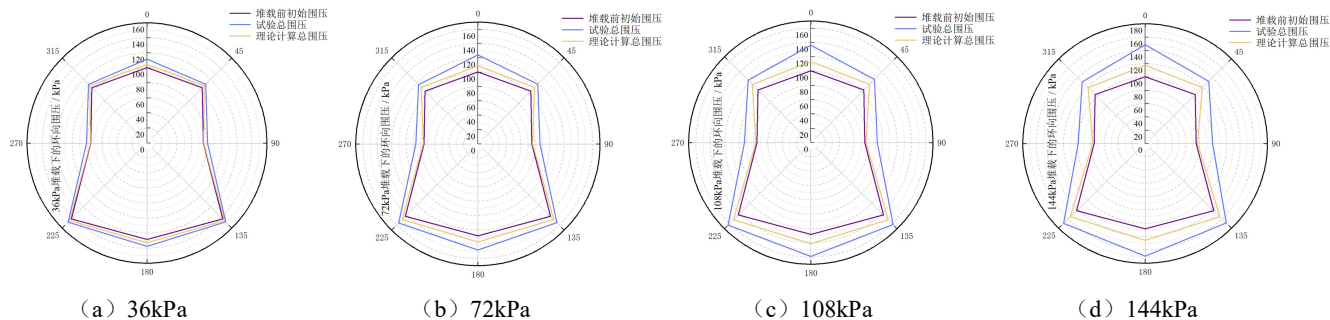


图 9 试验及理论所得围压值对比

Fig. 9 Comparison of confining pressure values obtained from experimental and theoretical methods

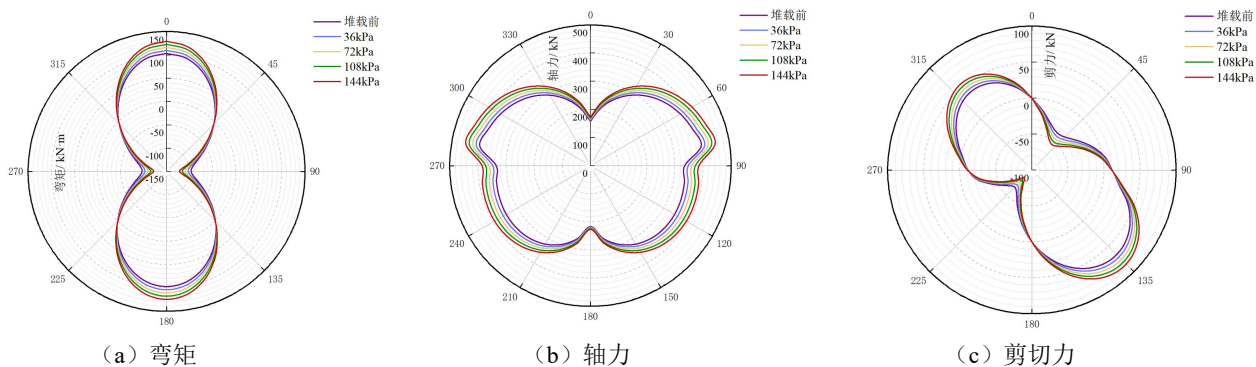


图 10 不同堆载大小下管片内力分布图

Fig. 10 Internal force distribution diagram of pipe segments under different ground loads

3 案例分析

3.1 试验工况

由于堆载引起的隧道围压实测数据的缺乏，本文以室内模型试验所得实测围压值对本文研究方法进行可靠性验证。模型试验采用尺寸为 $1.8\text{m} \times 1.8\text{m} \times 1.5\text{m}$ 的室内模型箱，试验土体材料为干细砂，具体模型试验介绍详见论文[3]，本文涉及的计算参数如下： $\varphi=29^\circ$ 、 $\gamma=16.2\text{kN/m}^3$ 、 $k_T=2.413 \times 10^6\text{kN/m}$ 、 $k_t=7.45 \times 10^5\text{kN/m}$ 、 $j=0.3$ 、几何相似比 $C_L=15$ ，对应的实际工程中隧道外直径 D_0 为 6.2m ，管片环宽 1.2m ，厚度 0.348m 。试验中千斤顶分别施加 34.4kg 、 68.8kg 、 103.2kg 、 137.6kg 的压力，对应实际工程中堆载大小为 36kPa 、 72kPa 、 108kPa 、 144kPa 。隧道模型表面贴有 BWM 型应变式土压力计，用于测量隧道表面的围压变化。

3.2 理论计算结果分析及可靠性验证

本文选取堆载偏心距为 0m ，隧道轴线埋深为 0.6m 的试验工况对应的实际工况为背景进行理论计算。试验中隧道模型采用埋入式、干砂分层填筑，故 σ 暂取 1。

如图 9 所示为不同堆载大小下 $x=0$ 处的隧道围压试验值及理论计算值的对比图。由图可知：(1) 在正上方堆载工况下，试验及理论计算所得隧道围压在堆载前后整体呈现“上小下大，两侧内收”的“葫芦形”分布；(2) 试验数据显示围压最大值位于 225° 处，试验所得围压左右略有差别，但差值较小，可能是由于试验中千斤顶加载偏心导致；(3) 理论计算围压呈对称分布，围压最大值出现在 135° 及 225° 处，依次为 146.0kPa 、 149.2kPa 、 152.3kPa 、 155.5kPa ；(4) 对比试验数据与理论计算值，两者分布形式类似，大小接近，试验数据要略大于理论值，且差值随堆载的增大而增大，其原因在于砂土试验基坑应力集中以及模型箱的尺寸效应[3]。

综上所述，本文理论方法在计算软土地层中隧

道堆载引起的隧道围压上具备一定的准确性，能够用于初步估算不同堆载方案引起的隧道围压值，对实际工程设计施工具有一定指导意义，且能够进一步采用本文方法分析隧道内力规律。本文方法适用于不含硬岩层的软土地层，直接适用于矩形堆载和堆载边平行于隧道及其类似的工况，而对堆载区域形状与矩形相差甚远或堆载边与隧道存在夹角的工况，本文方法将不再直接适用，需要对附加荷载计算公式进行调整。

进一步分析堆载引起的隧道内力变化规律。如图 10(a)所示为不同堆载大小下隧道弯矩变化图。由图可知：(1) 各堆载工况下弯矩曲线总体大致呈现“8”字形；(2) 随着堆载值逐渐增大，隧道上下端正弯矩及两侧负弯矩的大小均有所增大，且为线性增长，管片底部及两侧变化规律类似；(3) 最大正弯矩值出现在管片顶端，略大于隧道底部，最大负弯矩位于管片两侧 90° 及 270° 处。

如图 10(b)所示为不同堆载大小下隧道轴力变化图。由图可知：(1) 轴力沿隧道左右对称分布，分布形式类似“蝴蝶形”，轴力皆为压应力，最大值出现在 80° 和 280° 处，最小值位于 0° 处；(2) 堆载后隧道轴力整体增大，且增长量随着堆载大小的变大而变大，沿隧道环向来看，相同堆载增加量下，隧道顶部及底部左右各 30° 范围内，轴力增长幅度较小，而两侧其他区域增长幅度更明显。

如图 10(c)所示为不同堆载大小下隧道剪切力变化图。由图可知：(1) 环向剪切力大致关于 135° 与 315° 连线呈对称分布，但 225° 处的负剪切力在数值绝对值上明显大于 45° 处；(2) 不同堆载工况下，正剪切力最大值均大致出现在 140° 处，负剪切力最大值出现在 220° 处，两者在绝对值大小上相等。

4 单因素分析

4.1 不同应力释放率 σ 的影响

依托试验对应工况，取 $P=144\text{kPa}$ ， $s=0\text{m}$ ， $x=0$ ，依次取 $\sigma=1$ 、0.8、0.6、0.4。

如图 11 所示为 σ 变化对附加围压、弯矩、剪力、轴力的影响。由图可知：(1) 随着 σ 的减小，上下端的附加围压值出现大幅下降， 0° 处的附加围压分别为 17.3kPa、13.8kPa、10.4kPa、6.9kPa，下降率依次为 20.2%、40.0%、60.1%，大致表现为线性减小；(2) 随着 σ 的减小，隧道上下端附加正弯矩线性减小，而 90° 及 270° 位置附加负弯矩线性增大，整体趋向于均匀化；(3) 随着 σ 的减小，环向附加轴力均等比例减小，减小率依次为 20%、40%、60%；(4) 随着 σ 的减小， 135° 和 315° 的正剪切力值逐渐线性减小， 45° 和 225° 的负剪切力值逐渐线性增大。总的来说，考虑应力释放率 σ 后，隧道整体围压、弯矩、剪力和轴力均会减小，且减小量随着 σ 的减小而线性增大。

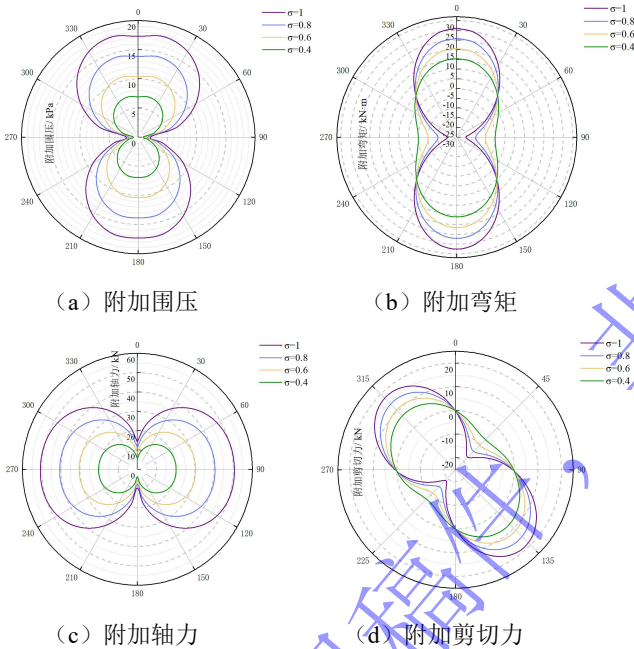


图 11 不同 σ 下管片附加内力分布图

Fig. 11 Distribution diagram of additional internal forces on pipe segments at different σ

4.2 不同 x 处断面的变化规律

如图 12 所示为隧道竖向位移及环间剪切力分布图。由图可知：隧道竖向最大位移发生在堆载中心对应位置处，为 5.99mm，在靠近中心两侧 3.6m、7.2m 处的位移相对也较大，为 5.92mm、5.74mm；环间剪切力最大值发生在 $x=-21.6\text{m}$ 处，为 81.0kN，为隧道位移反弯点，同时也是环间拉力最大位置处。上述四个位置是对隧道围压影响较大的典型断面，故本文选取作为研究断面，另外取 $P=144\text{kPa}$ ， $s=6.2\text{m}$ ， $\sigma=1$ ，

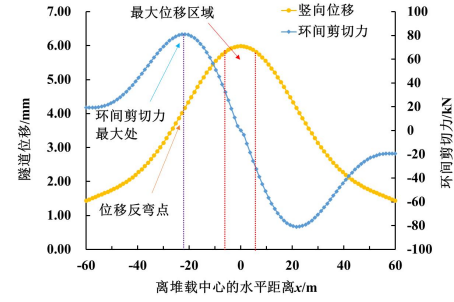


图 12 隧道竖向方向位移及环间剪切力分布规律

Fig. 12 Distribution law of vertical displacement and inter ring shear stress of tunnel

如图 13(a)所示为不同 x 断面处附加围压的变化规律。由图可知：(1) 受到左侧偏心堆载的影响下，不同断面附加围压大致呈现偏向于堆载侧的“歪 8”形，其中上下端附加围压较大，最大值大致位于 330° 附近；(2) 随着 x 的增大，由于受到堆载附加应力的影响逐渐减小，隧道环向附加围压逐渐减小，当 $x=21.6\text{m}$ 时，附加围压值趋向于 0。

如图 13(b)所示为不同 x 断面处附加弯矩的变化规律。由图可知：(1) 随着 x 从 0 增大到 7.2m，隧道拱顶和拱底处的附加弯矩逐渐下降，而两侧拱腰处则逐渐增大；(2) 当取 $x=21.6\text{m}$ (18 环) 时，该断面拱顶处的附加弯矩值要比 $x=0$ 处还大，且环向弯矩呈现对称分布，受偏心堆载影响较小，原因在于该断面位于隧道位移曲线的反弯点处，环间剪切力及环间拉力均达到最大值，横椭圆变形大，故环向附加弯矩较大。

如图 13(c)所示为不同 x 断面处附加轴力的变化规律。由图可知：(1) 在左侧偏心堆载作用下，中间环、第 3 环及第 6 环拱顶和拱底处的附加应力值最小， 90° 拱腰处附加应力最大，而 270° 处附加应力曲线向内凹陷，整体要小于右侧值；(2) 随着 x 的增大，隧道整体附加轴力逐渐减小，且远离堆载一侧的附加轴力减小幅度较大，但当 $x=21.6\text{m}$ 时，隧道所受附加轴力会变大，左侧附加轴力甚至超过 $x=0$ 处，产生该现象的原因主要是受环间作用力的影响。

如图 13(d)所示为不同 x 断面处附加剪切力的变化规律。由图可知：随着 x 由 0 增到为 3.6m 和 7.2m 时，各处附加剪切力的绝对值均有所减小，有趋向于均匀化的趋势，但当 $x=21.6\text{m}$ 时，附加剪切力又开始增大，与 $x=0$ 处附加剪切力值大小相近。

总的来说，附加围压随着 x 的增大而逐渐减小并趋于均匀化，在 $x=0\sim 7.2\text{m}$ 范围内，附加弯矩、轴力及剪切力总体随着 x 的增大而逐渐减小，但当 $x=21.6\text{m}$ 时，三者的值又开始变大，主要原因是受到环间剪切力和环间拉力的影响，故分析堆载引起的隧

道环向内力最大值时，需要同时选取隧道最大位移断面及位移反弯点断面。

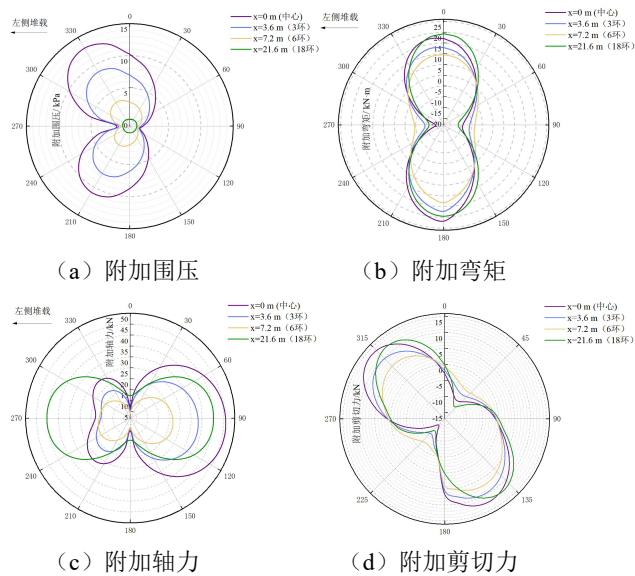


图 13 不同 x 处管片附加内力分布图

Fig. 13 Distribution diagram of additional internal forces on pipe segments at different x

5 结 论

(1) 本文方法所得隧道围压值及分布规律与室内试验实测数据相吻合，验证了方法的可靠性，通过对比，发现考虑应力释放作用求得的隧道围压要更接近工程实测数，可采用本文提出的经验公式对应力释放率进行估算。

(2) 地面堆载会导致隧道环向围压、轴力增大，导致正弯矩、正剪力更大，负弯矩、负剪力更小，从而恶化管片受力环境；考虑应力释放率 σ 后，隧道整体围压、弯矩、剪力和轴力均会减小，且减小量随着 σ 的减小而线性增大。

(3) 偏心堆载作用下，远离中心管片附加围压要更小，而附加弯矩、轴力和剪力在中心及位移反弯点位置处均会达到一个极值，故实际工程中需重点关注这两个位置的管片内力变化。

由于所依托工程相关资料的缺乏，本文仅建立了应力释放率与深径比之间的关系，后续研究可继续考虑地层损失率等其他因素对应力释放率的影响。

参考文献:

[1] 邵华, 黄宏伟, 张东明, 等. 突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1036-1043. (SHAO Hua, HUANG Hongwei, ZHANG Dongming, et al. Case study on repair work for excessively deformed shield tunnel under accidental surface surcharge in soft clay[J].

Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1036-1043. (in Chinese))

[2] 魏纲, 张书鸣, 余剑英, 等. 地面堆载对盾构隧道围压影响的模型试验与理论分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1789-1798. (WEI Gang, ZHANG Shuming, YU Jianying, et al. Model test and theoretical analysis of the influence of ground surcharge on the confining pressure of shield tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(10): 1789-1798. (in Chinese))

[3] 梁发云, 方衍其, 袁强, 等. 软、硬地层中局部堆载对隧道横向变形影响的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 322-331, 430. (LIANG Fayun, FANG Yanqi, YUAN Qiang, et al. Experimental study of the influence of surface surcharge on tunnel lateral deformation in soft and hard soil[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(3): 322-331, 430. (in Chinese))

[4] 赖浩然, 黄常元, 刘学增, 等. 超载对淤泥质地层隧道结构受力性能影响分析—以苏通 GI 综合管廊越江盾构隧道为例[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 88-96. (LAI Haoran, HUANG Changyuan, LIU Xuezheng, et al. Analysis on the effects of overloading on the mechanical properties of tunnel structures in the silty ground [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(5): 88-96. (in Chinese))

[5] 魏纲, 洪文强, 魏新江, 等. 偏心堆载引起的盾构隧道横向受力理论计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(7): 1645-1654. (WEI Gang, HONG Wenqiang, WEI Xinjiang, et al. Theoretical calculations of transverse force on shield tunnel caused by eccentric load[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(7): 1645-1654. (in Chinese))

[6] 章定文, 刘志祥, 沈国根, 等. 超大直径浅埋盾构隧道土压力实测分析及其计算方法适用性评价[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 91-98. (ZHANG Dingwen, LIU Zhixiang, SHEN Guogen, et al. Measurement of earth pressure of shallow buried tunnel with super large diameter and applicability evaluation of calculation method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 91-98. (in Chinese))

[7] 魏纲, 齐永洁, 吴华君, 等. 盾构下穿既有地铁隧道环向围压及受力变化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(12): 3515-3527. (WEI Gang, QI Yongjie, WU Huajun, et al. Changes in circumferential pressure and stresses in existing tunnels caused by tunnel crossing[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(12): 3515-3527. (in Chinese))

- [8] 魏纲, 冯非凡, 齐永洁, 等. 盾构隧道全过程穿越对下方既有隧道的影响研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊2): 69-79. (WEI Gang, FENG Feifan, QI Yongjie, et al. Influence of shield tunneling on existing shield tunnel below[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S2): 69-79. (in Chinese))
- [9] 魏新江, 洪文强, 魏纲. 堆载引起临近地铁隧道的转动与错台变形计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1281-1289. (WEI Xinjiang, HONG Wenqiang, WEI Gang, et al. Rotation and shearing dislocation deformation of subway tunnels due to adjacent ground stack load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1281-1289. (in Chinese))
- [10] 肖中平, 何川, 林刚, 等. 粘性地层地铁盾构隧道管片结构力学特征研究[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(6): 18-22. (XIAO Zhongping, HE Chuan, LIN Gang, et al. Study on the mechanical behavior of segmental structure of metro shield tunnels in viscous stratum[J]. Modern Tunneling Technology, 2006, 43(6): 18-22. (in Chinese))
- [11] 孙文昊. 土质地层中盾构隧道垂直荷载计算方法探讨[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(10): 69-73. (SUN Wenhao. Research on the calculation method for vertical earth pressure of shield tunnel in soil layer[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(10): 69-73. (in Chinese))
- [12] 李雪, 周顺华, 宫全美, 等. 大断面深埋高水压地铁盾构隧道周边土压力作用模式评价[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1415-1420, 1427. (LI Xue, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei, et al. Evaluation of earth pressure around a deeply buried metro shield tunnel with a large cross-section under high water pressure conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1415-1420, 1427. (in Chinese))
- [13] MASHIMO H, ISHIMURA T. Evaluation of the load on a shield tunnel lining in gravel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(2/3): 233-241.
- [14] KOYAMA Y. Present status and technology of shield tunneling method in Japan[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(2/3): 145-159.
- [15] 何川, 曾东洋. 砂性地层中地铁盾构隧道管片结构受力特征研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 909-914. (HE Chuan, ZENG Dongyang. Research on mechanical characteristics of metro shield tunnel segment in sandy strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 909-914. (in Chinese))
- [16] 周济民, 何川, 方勇, 等. 黄土地层盾构隧道受力监测与荷载作用模式的反演分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 165-171. (ZHOU Jimin, HE Chuan, FANG Yong, et al. Mechanical property testing and back analysis of load models of metro shield tunnel lining in loess strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 165-171. (in Chinese))
- [17] 江英超, 何川, 方勇, 等. 盾构施工对黄土地层的扰动及管片衬砌受荷特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 2934-2941. (JIANG Yingchao, HE Chuan, FANG Yong, et al. Soil disturbance caused by shield tunneling and segment lining loading characteristics in loess strata[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(7): 2934-2941. (in Chinese))
- [18] LI X J, TIAN Z, YANG Z H, et al. Observed ground pressures and internal forces of the Shanghai Yangtze River Tunnel[J]. Tunneling and Underground Construction, 2014: 984-992.
- [19] 孙钧, 侯学渊. 地下结构(上、下)[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [20] 郑俊. 水下盾构隧道管片力学特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013. (ZHENG Jun. Research on structural mechanics characteristics of segment of underwater shield tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese))
- [21] 邹志林. 海底取水盾构隧道双层衬砌结构受力特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013. (ZOU Zhilin. Study of mechanical characters of subsea water-intaken shield tunnel with double lining[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese))
- [22] 李建业. 新建隧道下穿既有大直径盾构隧道力学响应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2020. (LI Jianye. Mechanical behaviors of existing large diameter shield tunnel due to new tunnels construction below[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese))