

【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

考虑非极限土压力的基坑开挖对邻近隧道水平变形的影响

董雅丞¹, 陕耀¹, 韩学芳², 李晓龙³, 宋福贵⁴, 严博翀²

1) 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804; 2) 中国铁路上海局集团有限公司, 上海 200071; 3) 上海东华地方铁路开发有限公司, 上海 200071; 4) 上海同济工程咨询有限公司, 上海 200092

摘 要: 基坑卸荷开挖诱发的附加应力场分布形式及“隧-土”间相互作用机理尚不明确, 卸荷开挖过程有可能诱发邻近既有盾构隧道的水平变形超限, 进而威胁隧道服役安全. 为完善基坑开挖导致的邻近隧道水平变形计算理论, 解决传统计算理论中围护结构位移、非极限土压力以及开挖深度等影响因素考虑不全的难题, 提出两阶段开挖法. 第1阶段利用Mindlin公式计算坑壁与坑底卸荷应力诱发的隧道轴线上水平总附加应力; 第2阶段将隧道假设为Winkler弹性地基模型上的Euler梁, 建立对应微分方程, 通过加权残值法获得隧道水平位移解析解. 研究表明: 隧道最大水平位移、弯矩以及剪力随基床系数、隧道与基坑间水平距离的增大而减小, 随基坑开挖深度的增加而增大; 隧道最大水平位移量及最大弯矩值出现在隧道轴线中心位置, 隧道最大剪力值出现在基坑长边两侧; 考虑非极限土压力后, 相同位置处的隧道水平位移更加贴合工程实际, 忽略非极限土压力的理论值偏大. 研究成果可为实际工程中隧道的变形评估提供理论参考.

关键词: 岩土工程; 基坑开挖; 非极限状态土压力; 隧道水平位移; Mindlin解; 邻近隧道

中图分类号: TU43

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2025.06696

Influence of foundation pit excavation on the horizontal deformation of adjacent shield tunnels considering non-limit earth pressure

DONG Yacheng¹, SHAN Yao¹, HAN Xuefang², LI Xiaolong³, SONG Fugui⁴, and YAN Bochong²

1) Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China

2) China Railway Shanghai Group Co. Ltd., Shanghai 200071, P. R. China

3) Shanghai Donghua Local Railway Development Co. Ltd., Shanghai 200071, P. R. China

4) Shanghai Tongji Engineering Consulting Co. Ltd., Shanghai 200092, P. R. China

Abstract: Foundation pit excavation can induce significant horizontal deformation in adjacent shield tunnels, potentially threatening their structural and operational safety. However, the distribution of the excavation-induced additional stress field and the underlying tunnel-soil interaction mechanisms remain unclear. To improve the

Received: 2025-07-10; **Accepted:** 2025-09-19; **Online (CNKI):** 2025-10-21

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52378458)

Corresponding author: Researcher SHAN Yao (shanyao@tongji.edu.cn)

Citation: DONG Yacheng, SHAN Yao, HAN Xuefang, et al. Influence of foundation pit excavation on the horizontal deformation of adjacent shield tunnels considering non-limit earth pressure [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(6): 696-705. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<http://journal.szu.edu.cn>



theoretical framework for predicting the horizontal deformation of adjacent tunnels during foundation pit excavation, this study proposes a two-stage approach to address the limitations of traditional computational theories such as incomplete consideration of factors like retaining structure displacement, non-limit soil pressure, and excavation depth. In the first stage, the Mindlin formula is used to calculate the total additional horizontal stress along the tunnel axis induced by unloading stresses at the pit wall and pit bottom. In the second stage, the tunnel is assumed to be an Euler beam on a Winkler elastic foundation model, and the corresponding differential equations are established. The weighted residual method is used to solve these equations and derive the analytical solution for the horizontal displacement of the tunnel. The research results indicate that the maximum horizontal displacement, bending moment, and shear force of the tunnel decrease with increasing subgrade coefficient and horizontal distance between the tunnel and the excavation pit, while increasing with greater excavation depth. The maximum horizontal displacement and bending moment of the tunnel occur at the center of the tunnel axis, while the maximum shear force occurs near the two ends along the long side of the excavation pit. When non-limit soil pressure is considered, the calculated tunnel horizontal displacement at the same location better aligns with actual engineering behavior, whereas neglecting it yields overly conservative results. The proposed method provides a useful theoretical reference value for evaluating tunnel deformation induced by foundation pit excavation in actual engineering projects.

Key words: geotechnical engineering; foundation pit excavation; non-limit state earth pressure; tunnel horizontal deformation; Mindlin solution; adjacent tunnel

盾构隧道是中国综合立体交通网络建设的重要组成部分,同时也是实现中国《交通强国建设纲要》战略决策的重要通道,承担着加速地下空间集群发展、缓解城市交通拥堵以及提高城市综合承载能力的重要使命。随着城市地下空间开发的日益推进,邻近既有隧道进行基坑开挖的实际工程日益增多。本质为卸荷过程的基坑开挖工况将改变周边土体的应力状态,容易诱发邻近既有盾构隧道水平变形超限,进而威胁隧道服役安全^[1-2]。由于基坑围护结构与周围土体的相对位移方向在开挖过程中将发生改变,侧墙所受土压力将处于“静止-极限”过程中的任意非极限状态,基于主动极限状态土压力理论计算所得的土压力结果对于该工况下的荷载评估显然并不适合^[3-4]。因此,确定基坑开挖导致邻近既有盾构隧道水平变形响应是保证地下空间开发和周边环境安全性、可靠性、可持续性的前提条件,同时也是岩土工程领域的基础科学问题之一^[5]。

针对基坑卸荷开挖对邻近既有隧道影响的问题,学界已开展了广泛研究。在现场试验方面,魏纲等^[6-8]依据11个存在实测数据的基坑开挖对周边已有隧道产生影响的工程案例展开研究,建立了隧道水平位移、卸载率、基坑与隧道间净距离和基坑沿隧道轴向开挖尺寸间的数学表征,且大多为经验公式。针对中国杭州某大型基坑工程,许四法等^[9]基于现场监测数据,系统研究了基坑围护施工至开挖全过程中邻近地铁隧道的变形响应。在模型试验

方面,陈仁朋等^[10]基于三维离心模型试验研究了干砂地层中基坑开挖对旁侧隧道的影响,分析了隧道内力及变形等响应与基坑开挖卸荷间的相互作用机理。在理论计算方面,两阶段法是常用于分析基坑开挖引起邻近隧道变形的的方法,姜峥^[11]基于两阶段法思想,采用弹性地基梁模型推导了基坑开挖诱发既有管线的变形及内力解析式,并完善了弹性地基梁解答;魏纲等^[12]考虑盾构隧道剪切错台的影响,结合最小势能原理建立了盾构隧道的位移方程并求得对应解析解;冯国辉等^[13]基于Kerr地基模型,研究了基坑开挖引起下卧既有隧道的受力变形特点,利用有限差分法并结合隧道两端的边界条件,得到隧道纵向变形差分解;许四法等^[14]考虑非极限土压力,建立了基坑单一侧壁卸荷时引起隧道变形的计算方法,但并未充分考虑坑底与四周侧壁的同时卸荷效应,理论结果仍需进一步扩展;黄明华等^[15]基于非连续地基梁模型,建立了考虑盾构隧道管片环间接头影响的基坑开挖诱发下卧盾构隧道变形的计算方法,与现场实测数据具有良好一致性。现有研究主要基于Mindlin解和弹性地基梁理论,通常将坑壁土压力简化为特定开挖深度处的静止土压力,鲜有考虑围护结构变形导致的非极限土压力,现有的基坑开挖导致的邻近隧道水平变形计算理论仍需进一步完善。本研究基于两阶段法,第1阶段应用Mindlin公式计算基坑侧壁与基坑底部卸荷时在邻近隧道轴线处诱发的水平总附加应力,第2阶段将

隧道简化为文克尔地基上的 Euler 梁, 建立相应微分方程, 通过加权残值法求解, 获得隧道水平位移的近似解, 并对理论模型参数展开分析, 为实际工程设计提供思路与建议。

1 考虑非极限土压力的基坑开挖卸荷计算

基坑开挖过程围护结构向坑内发生位移, 侧壁水平向压力进一步减小, 导致邻近隧道受到水平与竖直方向的附加应力。既有研究表明, 基坑开挖卸荷主要引起侧方邻近盾构隧道的水平向位移^[6,14], 而侧方盾构隧道的竖向位移并不显著, 因此本研究不考虑影响较小的竖向位移。采用两阶段法^[11-13]的理论思想, 首先计算基坑开挖过程中坑底与侧壁卸荷综合作用下盾构隧道轴线上产生的水平附加应

力, 然后将其作为输入条件, 通过建立土体与隧道相互影响作用的微分方程, 计算盾构隧道的水平位移响应。

1.1 考虑非极限土压力的坑壁卸荷应力计算

传统计算方法忽略了围护结构位移的影响, 将围护结构后半无限空间内土体内摩擦角及黏聚力视为常数, 未能反映土体强度参数随位移逐渐发展的特性。事实上, 当围护结构位移发展导致围护结构后土体处于中间非极限状态时, 土体内摩擦角(φ)与黏聚力(c)处于初始值和极限值之间的某个非极限状态^[16-18]。因此, 需要研究土体强度参数在非极限状态下随围护结构位移的变化关系, 以满足计算精度要求, 提高对邻近隧道水平位移的准确评估, 进一步保障结构服役安全。

徐日庆等^[16]指出, 围护结构后土体内摩擦角发挥值 φ_m 与围护结构水平位移比的关系为

$$\varphi_m = \frac{180}{\pi} \arcsin \left\{ \frac{(1 - K_0)(1 + \sin \varphi)[1 - (1 - \eta)R_f] + \eta[K_0 - 1 + (K_0 + 1)\sin \varphi]}{(1 + K_0)(1 + \sin \varphi)[1 - (1 - \eta)R_f] - \eta[K_0 - 1 + (K_0 + 1)\sin \varphi]} \right\} \quad (1)$$

其中, K_0 为静止侧土压力系数; R_f 为破坏比, 通常可按 0.85 进行估算; η 为围护结构水平位移比, 即非极限状态下围护结构墙体水平位移与主动极限状态下围护结构水平位移的比值。

假设非极限状态下土体黏聚力发挥规律与内摩擦角相同, 根据应力 Mohr 圆即可得到土体黏聚力发挥值 c_m 为

$$c_m = c \tan \varphi_m / \tan \varphi \quad (2)$$

进一步分析土体内摩擦角与黏聚力的渐进发挥

规律。图 1(a)和(b)分别为土体内摩擦角与黏聚力随 η 的变化。取 $K_0 = 0.5 \sim 0.7$, $R_f = 0.85$, $\varphi = 20^\circ$ 、 30° , $c = 5 \sim 15$ kPa。 $\eta = 0$ 表示墙体没有发生位移的工况; $\eta = 1$ 表示墙体水平位移达到主动极限状态时的工况。由图 1 可见, 随着 η 增加, φ_m 逐渐增大, 当墙体水平位移达到主动极限状态($\eta = 1$)时, 土体内摩擦角完全发挥; c_m 随 η 的增加逐渐增大, 与内摩擦角渐进发挥规律相同。由此可见, 不考虑土体非极限状态时, 理论计算会高估土体的强度参数。

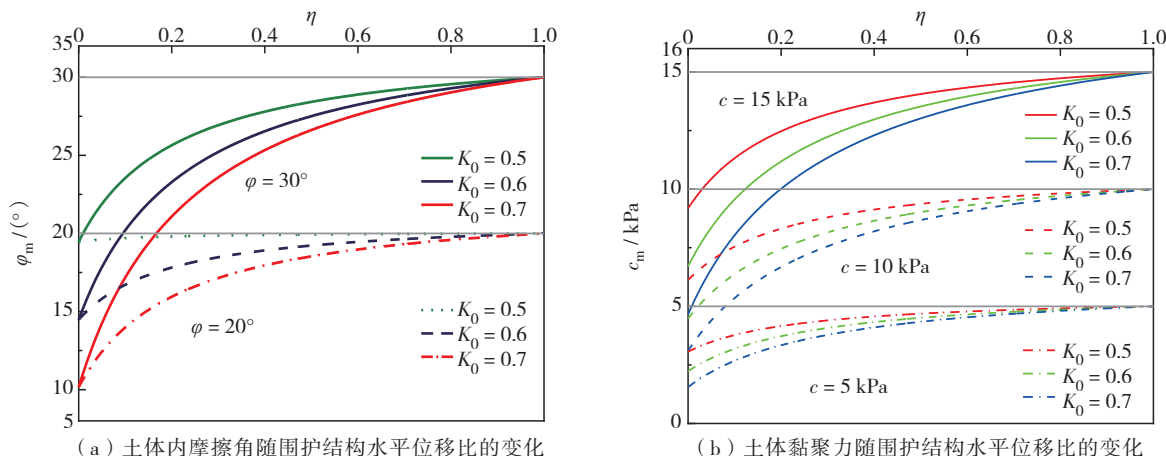


图 1 土体内摩擦角与黏聚力随围护结构水平位移比的变化

Fig. 1 Variation of soil internal friction angle and cohesion with horizontal displacement ratio of retaining structure.

考虑土体强度参数渐进发挥规律后, 基坑围护结构上非极限土压力^[19]为

$$p_m = \frac{(\gamma z + q_0) \tan \theta}{\tan(\theta + \varphi_m)} - c_m \frac{1 + \tan \theta \tan(\theta + \varphi_m)}{\tan(\theta + \varphi_m)} \quad (3)$$

其中, γ 为土体重度; z 为土体到地表深度; $\theta = 45^\circ - \varphi_m/2$. 因此, 基坑开挖过程导致的实际卸荷土压力为

$$p = K_0 \gamma z - p_m \quad (4)$$

由式(4)可以计算围护结构位移发展至任意状态时的实际卸荷土压力. 已有研究指出, 远离盾构隧道的基坑长边侧壁卸荷对隧道水平位移无明显影响^[6,15], 因此, 本研究计算坑壁卸荷应力时仅考虑靠近盾构隧道的1面基坑长边侧壁以及垂直盾构隧道的2面基坑短边侧壁的影响, 其实际卸荷土压力分别表示为 p_1 、 p_2 和 p_3 .

为了进一步明确物理模型几何关系, 定义半无限空间中基坑长度为 L , 宽度为 B , 基坑围护结构底面到基坑开挖面及地表的高度分别为 d_0 与 H , 基坑开挖深度为 d ; 邻近盾构隧道轴线平行于基坑长边, 且与基坑侧壁间的距离为 s , 盾构隧道外径为 D . 以基坑顶面矩形所在中点为原点, 建立半无限空间中的三维坐标系, 基坑和隧道的相对空间位置见图2.

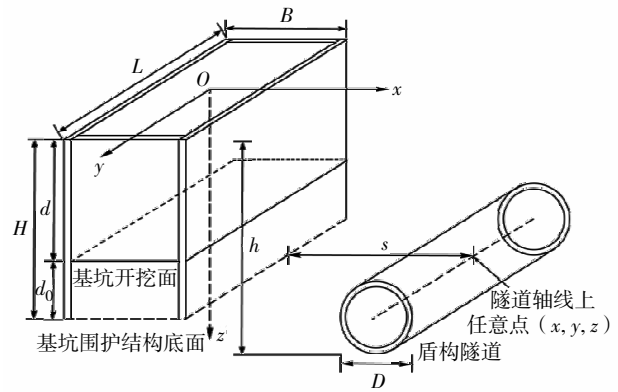


图2 基坑和盾构隧道示意图

Fig. 2 Schematic diagram of excavation pit and shield tunnel.

考虑非极限主动土压力作用后, 邻近隧道的基坑长边侧壁卸荷引起的隧道轴线上某点 (x, y, z) 的水平附加应力为

$$\sigma_{h1} = -\frac{p_1(x - B/2)}{8\pi(1 - \mu)} \int_0^d \int_{-L/2}^{L/2} f(N_1, N_2) \tau d\chi d\tau \quad (5)$$

邻近盾构隧道轴线上点 (x, y, z) 受到基坑两侧壁的水平附加应力 σ_{h2} 和 σ_{h3} 分别为

$$\sigma_{h2} = \frac{p_2(y - L/2)}{8\pi(1 - \mu)} \int_0^d \int_{-B/2}^{B/2} f(N_3, N_4) \tau d\xi d\tau \quad (6)$$

$$\sigma_{h3} = -\frac{p_3(y + L/2)}{8\pi(1 - \mu)} \int_0^d \int_{-B/2}^{B/2} f(N_5, N_6) \tau d\xi d\tau \quad (7)$$

$$f(N_1, N_2) = \frac{1 - 2\mu}{N_1^3} - \frac{(1 - 2\mu)(5 - 4\mu)}{N_2^3} + \frac{3(x - B/2)^2}{N_1^5} + \frac{3(3 - 4\mu)(x - B/2)^2}{N_2^5} + \frac{4(1 - \mu)(1 - 2\mu)}{N_2(N_2 + z + \tau)^2} \times$$

$$\left[3 - \frac{(x - B/2)^2(3N_2 + z + \tau)}{N_2^2(N_2 + z + \tau)} \right] - \frac{6\tau}{N_2^5} \left[3d - (3 - 2\mu)(z + \tau) + \frac{5(x - B/2)^2 z}{N_2^2} \right] \quad (8)$$

$$f(N_3, N_4) = \frac{2\mu - 1}{N_3^3} - \frac{(1 - 2\mu)(3 - 4\mu)}{N_4^3} + \frac{3(y - L/2)^2}{N_3^5} + \frac{3(3 - 4\mu)(y - L/2)^2}{N_4^5} + \frac{4(1 - \mu)(1 - 2\mu)}{N_4(N_4 + z + \tau)^2} \times$$

$$\left[1 - \frac{(y - L/2)^2(3N_4 + z + \tau)}{N_4^2(N_4 + z + \tau)} \right] - \frac{6\tau}{N_4^5} \left[\tau - (1 - 2\mu)(z + \tau) + \frac{5(y - L/2)^2 z}{N_4^2} \right] \quad (9)$$

$$f(N_5, N_6) = \frac{2\mu - 1}{N_5^3} - \frac{(1 - 2\mu)(3 - 4\mu)}{N_6^3} + \frac{3(y + L/2)^2}{N_5^5} + \frac{3(3 - 4\mu)(y + L/2)^2}{N_6^5} + \frac{4(1 - \mu)(1 - 2\mu)}{N_6(N_6 + z + \tau)^2} \times$$

$$\left[1 - \frac{(y + L/2)^2(3N_6 + z + \tau)}{N_6^2(N_6 + z + \tau)} \right] - \frac{6\tau}{N_6^5} \left[\tau - (1 - 2\mu)(z + \tau) + \frac{5(y + L/2)^2 z}{N_6^2} \right] \quad (10)$$

其中, N_1 和 N_2 分别为基坑长边侧壁点 $(B/2, \chi, \tau)$ 及其关于地表的对称点 $(B/2, \chi, -\tau)$ 到点 (x, y, z) 的距离; N_3 和 N_4 分别为基坑侧壁点 $(\xi, L/2, \tau)$ 及其关于地表的对称点 $(\xi, L/2, -\tau)$ 到点 (x, y, z) 的距离; N_5 和 N_6 分别为基坑侧壁点 $(\xi, -L/2, \tau)$ 及其关于地表的

对称点 $(\xi, -L/2, -\tau)$ 到点 (x, y, z) 的距离; μ 为土体泊松比; 函数 $f(N_1, N_2)$ 、 $f(N_3, N_4)$ 和 $f(N_5, N_6)$ 可分别通过式(8)、式(9)和式(10)计算.

1.2 基坑底部卸荷应力计算

由于基坑底部释放的应力在向下传递时会受到

基坑侧向围护结构的影响,按照徐国元等^[20]的建议,荷载为

$$q = \frac{\gamma d(1 - \alpha)BL - q_s \gamma d_0(2B + 2L)}{BL} \quad (11)$$

$$q_s = c + \gamma(d + H)/2 + K_0 \tan \varphi \quad (12)$$

其中, q_s 为平均侧摩阻力; α 为残余应力系数^[21], 可通过经验公式(13)计算.

$$\alpha = \begin{cases} 0.3 + 0.65h_0^2/h_r^2, & 0 \leq h_0 \leq h_r \\ 1.0, & h_0 > h_r \end{cases} \quad (13)$$

其中, h_0 为计算位置至开挖面的距离; h_r 为残余应

力场的特征深度, $h_r = d/(0.612d + 0.190)$.

此时, 盾构隧道轴线点 (x, y, z) 的水平附加应力 σ_{h4} , 来源于基坑底部卸荷等效荷载对围护结构底面的作用, 其计算式为

$$\sigma_{h4} = -\frac{q}{8\pi(1 - \mu)} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-B/2}^{B/2} f(N_7, N_8) d\xi d\chi \quad (14)$$

其中, N_7 和 N_8 分别为基坑底面的点 (ξ, χ, H) 及其关于地表的对称点 $(\xi, \chi, -H)$ 到点 (x, y, z) 的距离, 函数 $f(N_7, N_8)$ 可通过式(15)计算.

$$\begin{aligned} f(N_7, N_8) = & -\frac{(2\mu - 1)(H - z)}{N_7^3} + \frac{3(x - \xi)^2(z - H)}{N_7^5} - \frac{(1 - 2\mu)[3(z - H) - 4\mu(z + H)]}{N_8^3} + \\ & \frac{3(3 - 4\mu)(x - \xi)^2(z - H)}{N_8^5} - \frac{6H(z + H)[(1 - 2\mu)z - 2\mu H]}{N_8^5} + \\ & \frac{4(1 - \mu)(1 - 2\mu)}{N_8(N_8 + z + H)} \left[1 - \frac{(x - \xi)^2}{N_8(N_8 + z + H)} - \frac{(x - \xi)^2}{N_8^2} \right] + \frac{30(x - \xi)^2 z H(z + H)}{N_8^7} \end{aligned} \quad (15)$$

综上, 盾构隧道轴线点 (x, y, z) 的水平总附加应力可由基坑卸荷产生的各水平附加应力分量叠加得到:

$$q' = \sum_{i=1}^4 \sigma_{hi} \quad (16)$$

2 隧道水平变形理论

已有研究计算基坑附近的盾构隧道水平变形时常按照弹性地基梁求解^[11-14], 本研究沿用前人假设, 将隧道视为 Winkler 弹性地基模型上的 Euler 梁, 以此建立土体与隧道相互影响作用的微分方程:

$$EI \frac{d^4 s(x)}{dx^4} + kDs(x) = q(x) \quad (17)$$

其中, E 为隧道弹性模量; I 为隧道截面惯性矩; $s(x)$ 为隧道横向水平位移; k 为地基基床系数; $q(x)$ 为基坑开挖引起的隧道水平附加应力.

本研究 k 选用 Vesic 基床系数^[11], k 值可由式(18)进一步确定.

$$k = 0.65 \frac{E_s}{1 - \mu^2} \sqrt[4]{\frac{E_s D^4}{4EI}} \quad (18)$$

其中, E_s 为土体弹性模量.

将 k 随 D 的变化规律绘制于图 3. 由图 3 可知, k 随 D 的增大而线性增加; D 相同时, k 也随 E_s 的增大而线性增大.

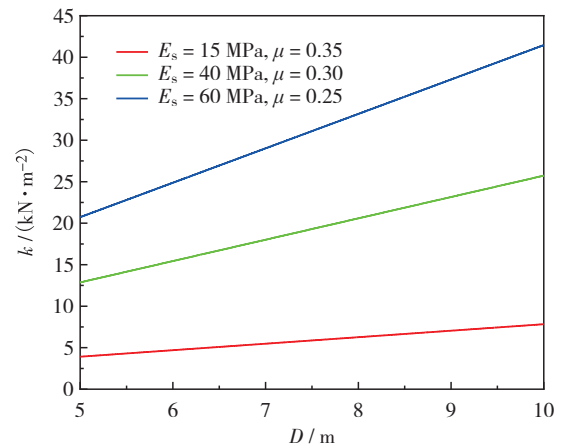


图 3 基床系数随隧道外径的变化规律

Fig. 3 Variation of base bed coefficient with tunnel outer diameter.

求解微分方程(17)即可得到 Euler 梁中点处的隧道水平变形, 可解析为:

$$S(x) = \frac{q'\lambda}{2kD} e^{-\lambda x} [\cos(\lambda x) + \sin(\lambda x)] \quad (19)$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{kD}{4EI}} \quad (20)$$

以基坑地表中点作为坐标原点, 将隧道所受分布荷载进行离散化处理. 为了获得更简便的 $S(x)$ 、水平弯矩 $M(x)$ 以及剪力 $Q(x)$ 表达式, 本研究采用姜峥^[11]提出的加权残值法进行数值计算, 隧道水平位移的加权残值法解可表示为

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\sqrt{\frac{q'_{\max} - S_{\max} kD}{12S_{\max} EI}} x^2\right) \quad (21)$$

其中, $S_{\max}$ 为隧道水平变形的最大值; $q'_{\max}$ 为水平总附加应力的最大值, 通过式(16)计算.

弯矩和剪力的加权残值法解可表示为

$$M(x) = 2EI \sqrt{\frac{q'_{\max} - S_{\max} kD}{12S_{\max} EI}} S(x) \times \left(1 - 2 \sqrt{\frac{q'_{\max} - S_{\max} kD}{12S_{\max} EI}} x^2\right) \quad (22)$$

$$Q(x) = 4EI \sqrt{\frac{q'_{\max} - S_{\max} kD}{12S_{\max} EI}} S(x) \times \frac{q'_{\max} - S_{\max} kD}{12S_{\max} EI} x \left(2 \sqrt{\frac{q'_{\max} - S_{\max} kD}{12S_{\max} EI}} x^2 - 3\right) \quad (23)$$

3 模型验证及参数分析

3.1 模型验证

3.1.1 算例1

徐国元等^[20]采用Midas/GTS有限元程序, 计算了基坑开挖条件下既有邻近盾构隧道水平变形的变化规律, 主要计算参数包括: 基坑长度为15 m, 基坑宽度为10 m, 开挖面到地表高度为6 m, 基坑围护结构(地连墙)底部到地表高度为10 m, 盾构隧道轴线与基坑侧壁间距为6 m; 地基土体的重度为21 kN/m³, 土体弹性模量为15 MPa, 泊松比为0.35, 土体内摩擦角为24°, 土体黏聚力为12.8 kPa, $EI = 1.52 \times 10^8$ kN·m², 隧道外径为6.0 m. 数值模拟计算时土体、隧道管片及地下连续墙分别采用MC本构以及板壳单元. 图4给出了相同参数下3类计算结果的对比, 分别为本研究理论计算结果、徐国元等^[20]有限元计算结果和Pasternak模型计算结果的对比. 由图4可见, 本研究提出的理论计算结果与有限元数值模拟结果吻合较好, 隧道水平位移整体呈现凸型分布, 正对基坑中心位置处水平位移达到最大值; Pasternak模型的地基梁模型理论计算未考虑非极限状态土压力特点, 因此偏于保守, 导致附加应力计算结果偏大, 使得隧道水平位移增大.

3.1.2 算例2

杭州某工程^[12]监测了基坑开挖条件下邻近既有盾构隧道水平变形变化规律, 该工程基坑开挖长度为68 m, 基坑开挖宽度为72 m, 开挖面到地表高

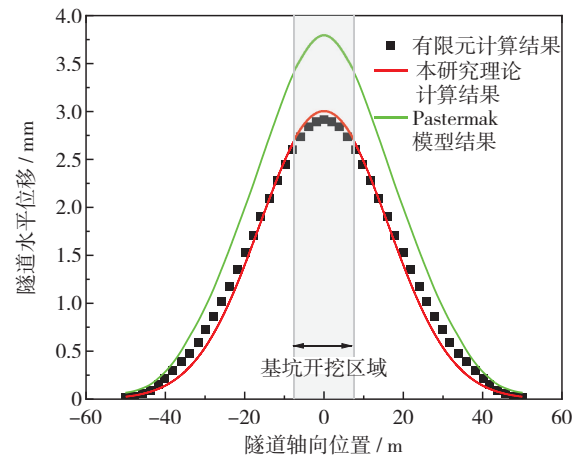


图4 理论计算与数值模拟结果对比

Fig. 4 Comparison between theoretical calculation and numerical simulation results. Black scatter points, red solid line, and green solid line represent finite element calculation results, theoretical calculation results from this study, and Pasternak model calculation results, respectively. Black double arrows indicate the length of the excavation area.

度为16.4 m, 盾构隧道轴线与基坑侧壁间距为13 m, 地基土体的重度为18.5 kN/m³, 土体弹性模量为25 MPa, 泊松比为0.35, 土体内摩擦角为28.5°, 土体黏聚力为4.5 kPa, $EI = 1.09 \times 10^8$ kN·m², 隧道外径为6.2 m, 静止土压力系数为0.53. 为进一步验证本研究计算方法的有效性, 图5对比了采用相同参数条件下本研究理论计算值与工程实测水平位移结果.

由图5可见, 在现有参数设定下, 本研究的理论计算结果与现场实测结果吻合较好, 隧道水平位移分布基本符合现场实测所得的隧道水平位移变化趋势. 分析结果表明, 本研究结果考虑了静止状态到主动极限状态间不同位移量下的非极限土压力, 可以更精确地预测基坑开挖时邻近既有盾构隧道的位移状态.

3.2 影响因素分析

对水平位移、弯矩以及剪力等隧道响应进行分析, 采用与徐国元等^[20]工况相同的基本数据.

3.2.1 基床系数的影响

为探究基床系数对水平位移、弯矩及剪力等隧道响应的的影响, 图6中绘制了不同基床系数下隧道的不同响应. 由图6可知, 隧道最大水平位移、弯矩以及剪力随基床系数的增大而减小, 基床系数由5 kN/m²依次增大至10、15、20和25 kN/m²时, 将导致隧道水平位移最大值由4.29 mm依次减小

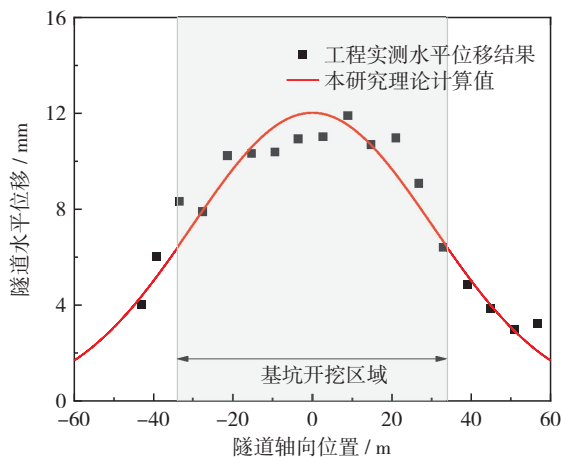


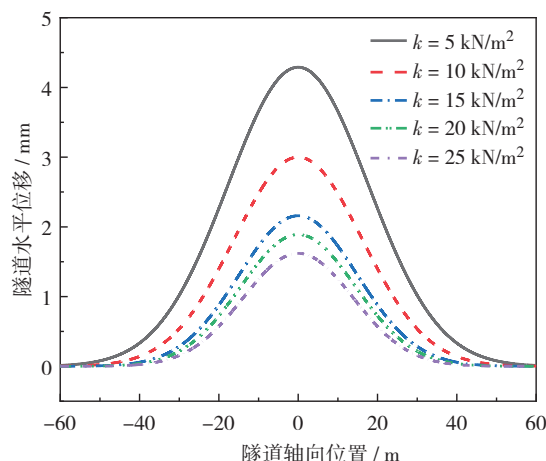
图5 理论计算与工程实测结果对比

Fig. 5 Comparison of theoretical calculations and engineering test results. Black scatter points and red solid line represent the measured horizontal displacement results and theoretical calculation values of this study, respectively. Black double arrows indicate the length of the excavation area.

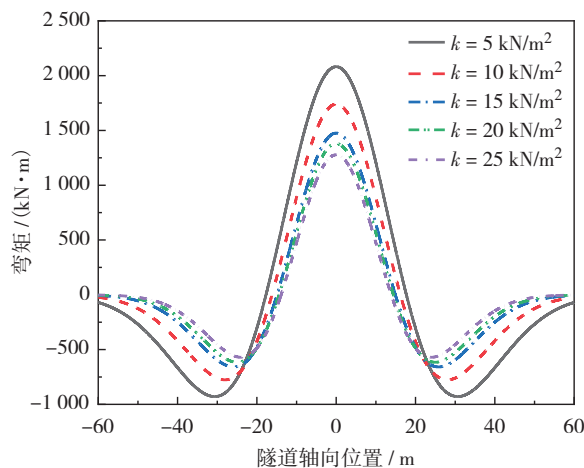
为 3.00、2.15、1.89 和 1.62 mm, 弯矩最大值由 2 082 kN·m 依次减小为 1 740、1 476、1 380 和 1 278 kN·m, 剪力最大值由 441 kN 依次减至 281、180、150 和 122 kN. 其他条件相同时, 由式(18)可知, 基床系数越大, 表明土体压缩模量越高, 土体抵抗隧道发生水平变形的能力越强, 因此隧道水平位移减小. 弯矩最大值出现在隧道轴线中心位置, 且在两侧出现最大负弯矩. 剪力最大值出现在隧道轴线约 10 m, 这表明相关位置处管片将受到更大的拉压作用, 需要关注其服役状态, 以免出现相关损坏.

3.2.2 基坑开挖深度的影响

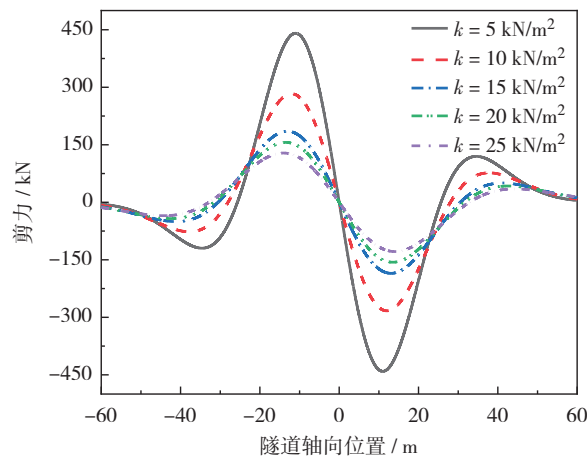
图7绘制了基坑开挖深度对隧道水平位移、弯矩及剪力的影响曲线. 由图7可知, 隧道最大水平位移、弯矩以及剪力均随基坑开挖深度的增大而非线性增加. 基坑开挖深度由 2 m 依次增大至 4、6 和 8 m 时, 隧道水平位移最大值由 1.26 mm 依次增大至 1.95、3.00 和 3.96 mm, 弯矩最大值由 676 kN·m 依次增大至 1 174、1 740 和 2 279 kN·m, 剪力最大值由 98 kN 依次增大至 202、283 和 366 kN. 随着基坑开挖深度的增加, 邻近盾构隧道受扰动范围随之增大, 当距隧道中心轴线位置超过 3 倍基坑长度 ($3L = 45$ m) 时, 隧道变形几乎无明显变化. 隧道弯矩最大值出现在隧道轴线中心位置, 且在距隧道中心轴线位置约为 2 倍基坑长度 ($2L = 30$ m) 两侧将出现最大负弯矩, 实际工程中应关注该位置附



(a) 隧道水平位移随隧道轴向位置的变化



(b) 弯矩随隧道轴向位置的变化



(c) 剪力随隧道轴向位置的变化

图6 基床系数对隧道响应的影响

Fig. 6 Effect of subgrade coefficient on tunnel response.

近盾构隧道受力状态. 隧道剪力最大值出现在距隧道轴线约 1 倍基坑长度 ($L = 15$ m) 两侧, 且相同位置处的剪力随基坑开挖深度的增加而增大.

3.2.3 隧道与基坑水平距离的影响

为探究隧道与基坑水平距离变化对隧道水平位

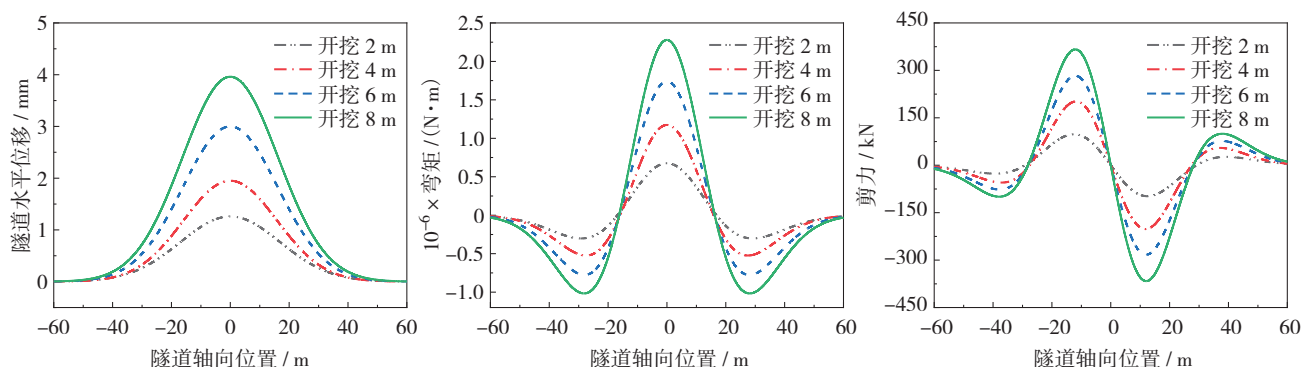


图7 基坑开挖深度对隧道响应的影响

Fig. 7 Effect of excavation depth on tunnel response. Black dashed line, red dashed line, blue dashed line, and green solid line represent the tunnel response calculation results for excavation depths of 2, 4, 6, and 8 m, respectively.

移、弯矩以及剪力的影响,在图8中绘制了不同水平距离条件下隧道响应与水平距离关系的计算结果.由图8可知,隧道最大水平位移、弯矩及剪力随水平距离的增大呈非线性减小,且降低幅值先增大后减小.基坑水平距离由6 m依次增大为12 m和18 m时,将导致隧道水平位移最大值由3.0 mm分别减小为1.3 mm和0.3 mm,弯矩最大值由1 740 kN·m分别降低为928 kN·m和322 kN·m,剪力最

大值由283 kN分别降低为206 kN和104 kN.结果表明,实际工程中在保证工程安全的前提下,可通过增加基坑与隧道的距离,有效减少隧道的整体位移、弯矩及剪力.针对地质与环境敏感的近接工程,若水平距离受限且变形控制要求严格,建议优先采用隔离桩^[22]或注浆加固隧道周边土体,进而保障盾构隧道服役安全.

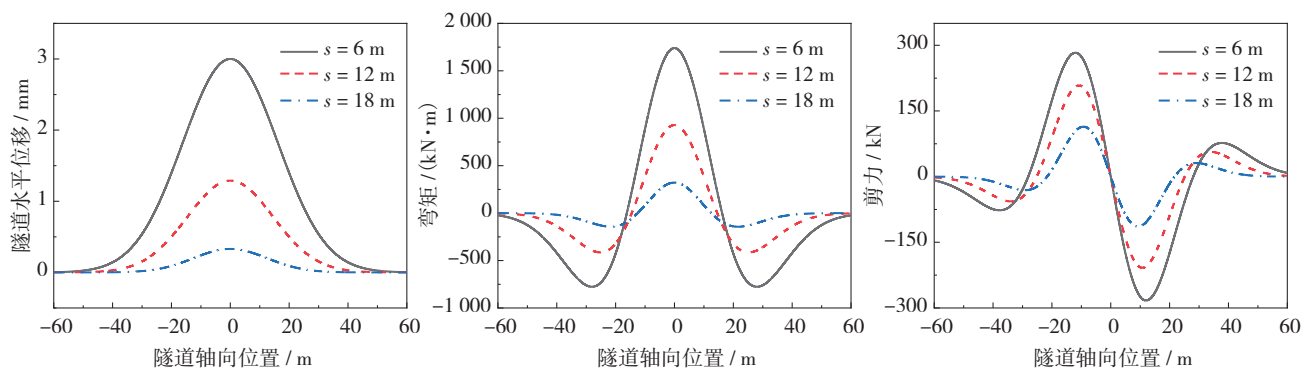


图8 水平距离对隧道响应的影响

Fig. 8 Effect of horizontal distance on tunnel response.

结 语

利用Mindlin解计算考虑非极限土压力后坑壁与坑底卸荷应力诱发的隧道轴线上水平总附加应力,然后引入Winkler弹性地基上的Euler梁模型,推导得出附加应力作用下盾构隧道水平变形、弯矩及剪力近似解,建立了盾构隧道变形与力学响应的计算方法.考虑非极限土压力后,隧道轴线所受水平附加应力解析结果将更加贴合工程实际,不考虑非极限土压力的计算结果将高估附加荷载大小,进

而导致隧道水平变形偏大.隧道最大水平位移、弯矩及剪力会因基床系数或隧道-基坑水平距离的增大而降低,但会随基坑开挖深度的加深而升高.隧道最大水平位移量及最大弯矩值出现在隧道轴线中心位置,隧道最大剪力值出现在基坑长边两侧.

本研究理论结果为半解析解,计算结果与实际情况更贴近,工程应用更加简单.但仍未考虑实际隧道管片环向接头的刚度非连续性,采用加权平均法对实际成层地层进行简化时也未考虑分层地基的非均质特性,存在一定的局限性,后续研究中可以引入非连续地基梁模型以使理论计算结果更加精

准, 并建立荷载作用于不同地层时的 Mindlin 解修正方法进而理论框架可更贴合复杂地层工况。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378458)

作者简介: 董雅丞(2310809@tongji.edu.cn), 同济大学博士研究生。研究方向: 城市地下空间开发建设。

引文: 董雅丞, 陕耀, 韩学芳, 等. 考虑非极限土压力的基坑开挖对邻近隧道水平变形的影响[J]. 深圳大学学报理工版, 2025, 42(6): 696-705.

参考文献 / References:

- [1] 诸葛绪松, 周进威, 祁文睿, 等. 盾构始发软土深基坑的变形及加固[J]. 深圳大学学报理工版, 2024, 41(3): 387-394.
ZHUGE Xusong, ZHOU Jinwei, QI Wenrui, et al. Deformation and reinforcement effects of soft soil deep foundation pits for shield tunnel launching [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(3): 387-394. (in Chinese)
- [2] HU Botao, SHAN Yao, ZHAO Yu, et al. Tunneling beneath the pile-raft foundations of high-speed railways: progressive arching deformation and pile settlement behavior [J/OL]. Underground Space. (2025-03-04)[2025-08-01]. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2024.12.004>.
- [3] 陕耀, 董雅丞, 张旭辉, 等. 双层地下连续墙土压力的现场实测研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(增刊1): 507-516.
SHAN Yao, DONG Yacheng, ZHANG Xuhui, et al. Field measurement study of earth pressure on a double-layered diaphragm wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45 (Suppl. 1): 507-516. (in Chinese)
- [4] 陕耀, 董雅丞, 吴遥杰, 等. 渗流条件下盾构隧道松动区非极限状态水土压力研究[J]. 天津大学学报自然科学与工程技术版, 2025, 58(8): 822-833.
SHAN Yao, DONG Yacheng, WU Yaojie, et al. Non-limit state water and soil pressure in loosening zone of shield tunnel under seepage conditions [J]. Journal of Tianjin University Science and Technology, 2025, 58(8): 822-833. (in Chinese)
- [5] 李文乾, 吴云桓, 吴兢业, 等. 基于多层感知机技术的地铁盾构施工参数预测[J]. 深圳大学学报理工版, 2024, 41(1): 50-57.
LI Wenqian, WU Yunhuan, WU Jingye, et al. Prediction of subway shield construction parameters based on multi-layer perceptron [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(1): 50-57. (in Chinese)
- [6] WEI Gang, FENG Feifan, CUI Yunliang, et al. Research on the influence of foundation pit excavation on the lateral force and deformation of side shield tunnels based on full-scale experiments [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 140: 105236.
- [7] 魏纲, 厉京, 宣海力, 等. 大型深基坑开挖对旁边地铁盾构隧道影响的实测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(3): 718-726.
WEI Gang, LI Jing, XUAN Haili, et al. Monitoring data analysis on the influence of large deep foundation pit excavation on nearby metro shield tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(3): 718-726. (in Chinese)
- [8] 魏纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1421-1428.
WEI Gang. Measurement and analysis of impact of foundation pit excavation on below existed shield tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1421-1428. (in Chinese)
- [9] 许四法, 周奇辉, 郑文豪, 等. 基坑施工对邻近运营隧道变形影响全过程实测分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 804-812.
XU Sifa, ZHOU Qihui, ZHENG Wenhao, et al. Influences of construction of foundation pits on deformation of adjacent operating tunnels in whole process based on monitoring data [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 804-812. (in Chinese)
- [10] 陈仁朋, MADHAGIASHRAF A L, 孟凡衍. 基坑开挖对旁侧隧道影响及隔断墙作用离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊2): 6-11.
CHEN Renpeng, MADHAGIASHRAF A L, MENG Fanyan. Three-dimensional centrifuge modeling of influence of nearby excavations on existing tunnels and effects of cut-offwalls [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(Suppl. 2): 6-11. (in Chinese)
- [11] 姜峥. 基坑开挖引起邻近管线变形的理论解析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 362-368.
JIANG Zheng. Theoretical analysis on deformation of pipeline caused by adjacent foundation pit excavation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 362-368. (in Chinese)
- [12] 魏纲, 洪文强, 魏新江, 等. 基坑开挖引起邻近盾构隧道转动与错台变形计算[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1251-1259.
WEI Gang, HONG Wenqiang, WEI Xinjiang, et al. Calculation of rigid body rotation and shearing dislocation deformation of adjacent shield tunnels due to excavation of

- foundation pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1251-1259. (in Chinese)
- [13] 冯国辉, 徐兴, 侯世磊, 等. 基于Kerr地基模型的基坑开挖引起下卧既有隧道受力变形[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(4): 474-485.
- FENG Guohui, XU Xing, HOU Shilei, et al. Deflections of adjacent underground tunnel induced by excavation based on Kerr foundation model [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(4): 474-485. (in Chinese)
- [14] 许四法, 于均辉, 王哲, 等. 基于非极限土压力的基坑开挖引起隧道变形的计算方法[J]. 浙江工业大学学报, 2024, 52(3): 312-318.
- XU Sifa, YU Junhui, WANG Zhe, et al. A computational method for the lateral displacement of tunnels caused by foundation pit excavation based on non-limit earth pressure [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2024, 52(3): 312-318. (in Chinese)
- [15] 黄明华, 钟煜轩, 陆锦斌, 等. 基于非连续地基梁模型的基坑开挖诱发下卧盾构隧道变形分析[J]. 岩土力学, 2025, 46(2): 492-504.
- HUANG Minghua, ZHONG Yuxuan, LU Jinbin, et al. Deformation analysis of underlying shield tunnel induced by foundation pit excavation based on discontinuous foundation beam model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(2): 492-504. (in Chinese)
- [16] 徐日庆, 徐叶斌, 程康, 等. 有限土体下考虑土拱效应的非极限主动土压力解[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 362-371.
- XU Riqing, XU Yebin, CHENG Kang, et al. Method to calculate active earth pressure considering soil arching effect under nonlimit state of clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 362-371. (in Chinese)
- [17] NI Pengpeng, MANGALATHU S, SONG Linhui, et al. Displacement-dependent lateral earth pressure models [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2018, 144(6): 04018032.
- [18] NI Pengpeng, MEI Guoxiong, ZHAO Yanlin. Displacement-dependent earth pressures on rigid retaining walls with compressible geofoam inclusions: physical modeling and analytical solutions [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(6): 04016132.
- [19] 徐日庆, 廖斌, 吴渐, 等黏性土的非极限主动土压力计算方法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 148-154.
- XU Riqing, LIAO Bin, WU Jian, et al. Computational method for active earth pressure of cohesive soil under nonlimit state [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 148-154. (in Chinese)
- [20] 徐国元, 黄思源. 基坑开挖对下卧盾构隧道变形影响的计算分析[J]. 重庆交通大学学报自然科学版, 2021, 40(9): 78-85.
- XU Guoyuan, HUANG Siyuan. Calculation and analysis of the influence of foundation pit excavation on the deformation of the underlying shield tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University Natural Science, 2021, 40(9): 78-85. (in Chinese)
- [21] 刘国彬, 侯学渊. 软土基坑隆起变形的残余应力分析法[J]. 地下工程与隧道, 1996(2): 2-7.
- LIU Guobin, HOU Xueyuan. Residual stress method of rebound deformation of foundation pit in soft soil area [J]. Underground Engineering and Tunnels, 1996 (2): 2-7. (in Chinese)
- [22] 郑镇迹, 曹利强, 苏栋, 等. 隔离桩对隧道开挖引起沉降的控制效能分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2022, 39(6): 615-621.
- ZHENG Zhenji, CAO Liqiang, SU Dong, et al. Efficiency investigation of mitigation effect of isolation piles on tunneling-induced ground settlements [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(6): 615-621. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之聿】