

# 既有结构基础下方隧道开挖扰动破坏 及其所需支护力预测<sup>\*</sup>

王 策

(中铁十一局集团城市轨道交通工程有限公司, 430074, 武汉)

**摘 要** [目的] 新建隧道或其他地下工程不可避免地会穿越一些既有建筑结构, 对既有结构基础产生一定的扰动影响, 因此需研究既有结构基础下方隧道开挖所需支护力及其在不同情况下的支护力变化规律。[方法] 考虑既有结构基础下方新建隧道正穿与侧穿两种情形, 分别构造隧道下穿既有结构基础力学分析模型, 利用上限法推导得到新建隧道所需支护力与既有结构基础临界基底压力理论计算式, 分析了不同穿越位置、土体力学参数及基底压力大小等因素对新建隧道所需支护力的影响。[结果及结论] 新建隧道与既有结构基础的相对位置会对隧道的安全及所需支护力产生较为显著的影响。相较于侧穿情形, 新建隧道正穿既有结构基础对隧道结构产生的危害更大。隧道所需支护力同隧道与基础埋深差、土体黏聚力、土体内摩擦角呈负相关, 与土体重度、基础临界基底压力呈正相关。

**关键词** 隧道; 既有结构基础; 支护力

**中图分类号** U455.4; U231.3

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.02.024

bound theorem, theoretical formulas for calculating the required support force and critical foundation base pressure are derived. The impact of factors such as crossing position, soil mechanics parameters, and foundation pressure on the required support force for new tunnel excavation is analyzed. [Result & Conclusion] The relative position between the new tunnel and the existing structural foundation significantly influences the safety of the tunnel and the required support force. Compared to lateral crossing scenarios, tunnels directly under-passing existing structural foundations pose a greater risk to tunnel structural integrity. The required support force of the tunnel is negatively correlated with the tunnel-foundation burial depth difference, soil mass cohesion and internal friction angle, and positively correlated with soil mass weight and critical foundation base pressure.

**Key words** tunnel; existing structural foundation; support force

## Prediction of Excavation Disturbance and Required Support Force for Tunnel beneath Existing Structural Foundations

WANG Ce

(China Railway 11th Bureau Group City Rail Engineering Co., Ltd., 430074, Wuhan, China)

**Abstract** [Objective] It is inevitable that construction of new tunnels or other underground engineering projects will pass through some building structures, causing disturbances to the existing structural foundations. Therefore, it is essential to study the required support force for tunnel excavation beneath existing structural foundations and its variation under different conditions. [Method] Considering two scenarios of tunnels directly beneath and laterally passing existing structural foundations, mechanical analysis models for tunneling beneath existing structural foundations are constructed. Using the upper-

在密集城区, 受施工场地及周边环境的限制, 新建隧道或其他地下工程不可避免地会穿越一些既有建筑结构, 对既有结构基础产生一定的扰动影响, 进而可能造成既有建筑的基础结构开裂破坏, 影响其正常使用。

目前, 已有较多学者对既有结构基础周边隧道开挖引起的扰动影响进行了研究。文献[1]通过离心试验分析了桩基础承载过程中, 其对近距离地铁隧道的影响机制。文献[2]开展了不同影响条件下, 桩基对近距离隧道的离心模型试验。文献[3]构建了桩-隧有限元模型, 通过分析桩-隧相对位置、隧道埋深等参数的影响, 研究了在软土地基中静压桩对既有隧道的影响。文献[4]采用 FLAC 3D 有限元软件, 模拟分析了隧道密贴下穿施工引起既有地铁车站结构沉降的规律。文献[5]基于 Pasternak

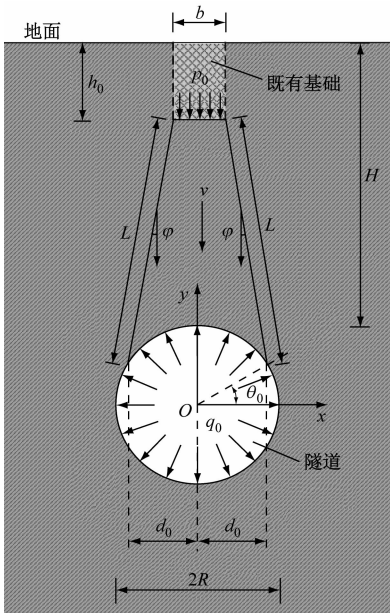
<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51704177); 山东省高等学校青年创新团队发展计划项目(2019KJG015); 山东省高等学校科技计划项目(J16LG04); 山东省高等学校土木结构防灾减灾协同创新中心项目(XTP201911); 山东建筑大学博士科研基金项目(XNBS1501)

地基模型,推导了隧道开挖与邻近桩基相互作用的简化理论解。文献[6]采用两阶段法,分析预测了不同因素影响条件下既有地下结构的力学响应。文献[7]分析了隔离桩及盾构近接施工对高铁桩基的影响。文献[8]依托盾构隧道穿越桥桩的工程实例,通过数值模拟与现场实测对比验证了数值模拟结果的可靠性。

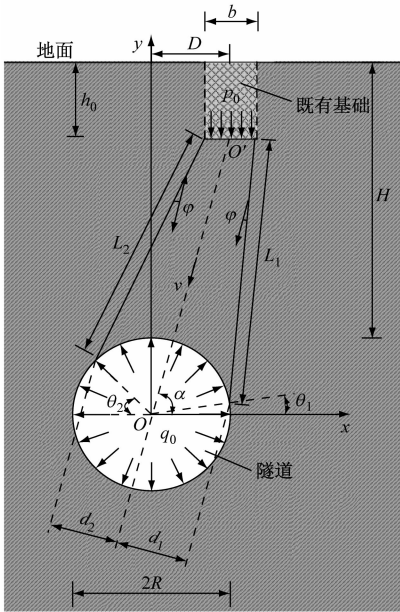
由于新建隧道引起既有结构扰动的影响因素众多,盾构隧道近距离穿越既有结构基础的问题尚需进一步研究。在现有研究基础上,本文分别考虑隧道正穿与侧穿既有结构基础两种情况,建立了在既有结构基础影响下,隧道开挖扰动破坏的力学分析模型;基于塑性力学极限分析理论,推导得出既有结构基础下方隧道开挖所需支护力与隧道上方基底临界破坏荷载的理论计算公式,分析揭示了不同工况因素对隧道所需支护力的影响规律。本文研究可为隧道穿越既有结构基础变形破坏模式预测与风险防控提供一定的理论参考。

### 1 建立隧道下穿既有结构基础的破坏分析模型

当隧道下穿既有结构基础时,受到既有结构基础传来的基底附加压力与隧道开挖卸荷等因素的影响,隧道与既有结构基础之间会产生一定的扰动影响范围,影响新建隧道的安全施工。考虑正穿与侧穿两种情况,建立隧道下穿既有结构基础力学分析模型,如图 1 所示。其中: $b$  为既有结构基础宽度; $p_0$  为基底附加压力; $h_0$  为基础埋深; $L$  为两侧开挖扰动破坏范围边界土体破裂面的长度; $R$  为既有结构基础下方隧道开挖半径; $q_0$  为隧道内部支护力; $d_0$  为土体破裂底部半宽度; $O'$  为既有基础底部中心点; $L_1$  右侧开挖扰动破坏范围边界土体破裂面的长度; $L_2$  左侧开挖扰动破坏范围边界土体破裂面的长度; $\theta_1$  为右侧底部破裂范围与隧道边界处交点对应的角度; $\theta_2$  为左侧底部破裂范围与隧道边界处交点对应的角度; $d_1$  为土体破裂底部右侧宽度; $d_2$  为土体破裂底部左侧宽度; $D$  为既有基础底部中心至新建隧道中心水平距离(以下简称“水平距离”), $D=0$  即为正穿情况,其余为侧穿情况; $H$  为隧道埋深; $v$  为滑动土体沿位移方向的速度; $\alpha$  为桩底中心点与隧道中心点连线的倾角; $\varphi$  为土体内摩擦角; $\theta_0$  为正穿情况下,底部破裂范围与隧道边界处交点对应的角度。



a) 正穿情况



b) 侧穿情况

图 1 隧道下穿既有结构基础力学分析模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical analysis model for tunnel under-passing existing structure foundation

所建立的隧道下穿既有结构基础力学分析模型将隧道及周边地层岩土体视为理想刚塑性材料,在扰动影响范围内,土体以速度  $v$  向新建隧道开挖范围内滑落。据此,可建立隧道下穿既有结构基础机动许可速度场,利用极限分析中的上限理论对其进行分析。

## 2 隧道下穿既有结构基础临界破坏荷载与所需支护力预测

### 2.1 正下方穿越情形

根据图 1 a) 所示力学模型对应的几何关系,  $\theta_0$  可通过以下关系式求得:

$$-\cot \varphi = \frac{R \sin \theta_0 - H + h_0 - R}{R \cos \theta_0 - \frac{b}{2}} \quad (1)$$

$L$  可以表示为:

$$L = (H - h_0 + R - R \sin \theta_0) / \cos \varphi \quad (2)$$

破裂面处的土体内部能量耗散率为  $W_D$ 、外力对破坏范围土体做功功率  $W_{\text{外}}$ 、开挖扰动破坏范围土体的自重做功功率  $W_G$ 、基底附加压力对破坏范围土体做功功率  $W_{p_0}$ 、隧道支护力对破坏范围土体做功功率  $W_{q_0}$ , 以及正穿情形下的开挖扰动破坏范围土体体积  $V_{\text{正}}$  可以表示为:

$$W_D = 2cvL \cos \varphi \quad (3)$$

$$W_{\text{外}} = W_{p_0} + W_G - W_{q_0} \quad (4)$$

$$W_{p_0} = p_0 b v \quad (5)$$

$$W_G = \gamma V_{\text{正}} v \quad (6)$$

$$V_{\text{正}} = \left( \frac{b}{2} + R \cos \theta_0 \right) (H - h_0 + R - R \sin \theta_0) - R^2 \left( \frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) + R^2 \sin \theta_0 \cos \theta_0 \quad (7)$$

$$W_{q_0} = 2v \int_{\theta_0}^{\frac{\pi}{2}} q_0 d s \sin \theta = 2v q_0 R \cos \theta_0 \quad (8)$$

式中:

$s$ ——隧道周长;

$c$ ——土体黏聚力;

$\gamma$ ——土体重度。

根据虚功率原理, 令图 1 破坏模型对应的内部能量耗散率与总的外力功率相等, 即  $W_{\text{外}} = W_D$ , 代入式(3)和式(4), 当既有结构基础传来的基底附加压力一定时, 为保证新建隧道穿越施工安全, 隧道内部所需提供的临界支护力  $q_{0,L}$  为:

$$q_{0,L} = \frac{p_0 b + \gamma V_{\text{正}} - 2cL \cos \varphi}{2R \cos \theta_0} \quad (9)$$

当新建隧道内部所需提供的支护力一定时, 为防止既有结构基础土体的破坏, 既有结构基础对应的临界基底附加压力的大小  $p_{0,L}$  为:

$$p_{0,L} = \frac{2cL \cos \varphi - \gamma V_{\text{正}} + 2q_0 R \cos \theta_0}{b} \quad (10)$$

### 2.2 侧下方穿越情形

根据图 1 b) 所示力学模型对应的几何关系,  $\alpha$

可以表示为:

$$\alpha = \arctan \frac{H - h_0 + R}{D} \quad (11)$$

$L_1, L_2$  可以表示为:

$$L_1 = \frac{H - h_0 + R - R \sin \theta_1}{\sin(\alpha + \varphi)} \quad (12)$$

$$L_2 = \frac{H - h_0 + R - R \sin \theta_2}{\sin(\alpha - \varphi)} \quad (13)$$

破裂面处土体内部能量耗散率  $W_{D,C}$ 、外力对破坏范围土体做功功率为  $W_{\text{外},C}$ 、基底附加压力对破坏范围土体做功功率  $W_{p_0,C}$ 、开挖扰动破坏范围土体的自重做功功率为  $W_{G,C}$ 、隧道支护力对破坏范围土体做功功率  $W_{q_0,C}$ , 以及侧穿情形下的开挖扰动破坏范围土体体积  $V_{\text{侧}}$  可以表示为:

$$W_{D,C} = cL_1 v \cos \varphi + cL_2 v \cos \varphi = cv(L_1 + L_2) \cos \varphi \quad (14)$$

$$W_{\text{外},C} = W_{p_0,C} + W_{G,C} - W_{q_0,C} \quad (15)$$

$$W_{p_0,C} = v p_0 b \sin \alpha \quad (16)$$

$$W_{G,C} = \gamma V_{\text{侧}} v \sin \alpha \quad (17)$$

$$V_{\text{侧}} = \frac{1}{2} b (H + R - h_0) + \frac{1}{2} R L_1 \sin(\alpha + \varphi - \theta_1) + \frac{1}{2} R L_2 \sin(\alpha - \varphi + \theta_2) - \frac{1}{2} (\pi - \theta_1 - \theta_2) R^2 \quad (18)$$

$$W_{q_0,C} = \int_{\theta_1}^{\alpha} q_0 d s \cos(\alpha - \theta) v + \int_{\alpha}^{\pi - \theta_2} q_0 d s \cos(\theta - \alpha) v = q_0 R [\sin(\alpha - \theta_1) + \sin(\alpha + \theta_2)] v \quad (19)$$

根据虚功率原理, 令图 1 破坏模型对应的内部能量耗散率与总的外力功率相等, 即  $W_{\text{外},C} = W_{D,C}$ , 代入式(14)和式(15), 当既有结构基础传来的基底附加压力一定时, 为保证新建隧道穿越施工安全, 隧道内部所需提供的临界支护力  $q_{0,L,C}$  为:

$$q_{0,L,C} = \frac{p_0 b \sin \alpha + \gamma V_{\text{侧}} \sin \alpha - c(L_1 + L_2) \cos \varphi}{R [\sin(\alpha - \theta_1) + \sin(\alpha + \theta_2)]} \quad (20)$$

当新建隧道内部所需提供的支护力一定时, 为防止既有结构基础土体的破坏, 既有结构基础对应的临界基底附加压力的大小  $p_{0,L,C}$  为:

$$p_{0,L,C} = \{ c(L_1 + L_2) \cos \varphi - \gamma V_{\text{侧}} \sin \alpha + q_0 R \cdot [\sin(\alpha - \theta_1) + \sin(\alpha + \theta_2)] \} / (b \sin \alpha) \quad (21)$$

## 3 算例分析

为进一步研究不同隧道穿越位置、土体力学参数及基底压力等因素对隧道所需支护力的影响规



律,基于上述计算式,采用控制变量法计算不同工况下隧道所需支护力。本文算例中,标准组取值: $b$  取为 1.2 m; $R$  取为 5 m; $c$  取为 20 kPa, $\varphi$  取为  $24^{\circ}$ , $\gamma$  取为  $20\text{ kN/m}^3$ , $p_0$  取为 200 kPa,隧道与基础结构埋深差  $\Delta H$  取为 3 m。

不同水平距离下,隧道与基础埋深差同隧道所需支护力之间的关系如图 2 所示。当  $D=0$  时,即当上部基础与隧道处于正穿情况时,对既有结构的破坏情形最为危险,所对应的隧道所需支护力最大。随着隧道与基础埋深差的增加,隧道所需支护力不断减小。当隧道与基础埋深差一定时,随着水平距离的增加,隧道所需支护力不断减小。

不同水平距离下,土体力学参数与隧道所需支护力之间的关系如图 3 所示。当  $D=0$  时,即当上部基础与隧道处于正穿情况时,对既有结构的破坏情形最为危险,所对应的隧道所需支护力最大。隧道所需支护力与土体黏聚力、土体内摩擦角成负相关;隧道所需支护力与土体重度成正相关。随着土体黏聚力的增加,隧道所需支护力不断减小。当土体黏聚力一定时,随着水平距离的增加,隧道所需支护力不断减小。随着土体内摩擦角的增加,隧道

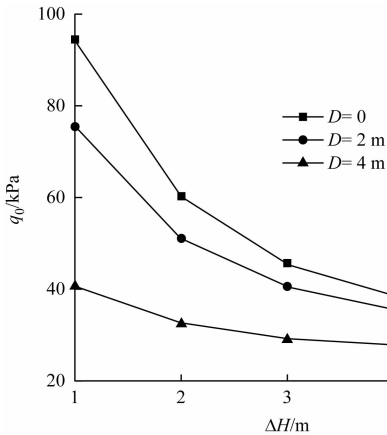
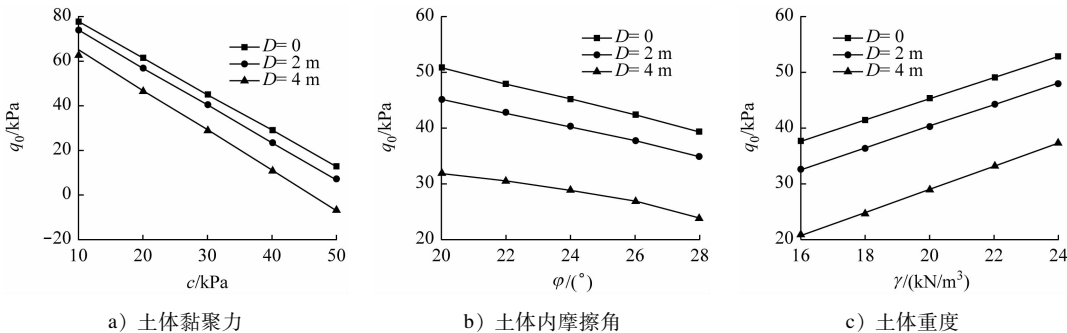


图 2 不同水平距离下隧道与基础埋深差同隧道所需支护力之间的关系

Fig. 2 Relationship between the required supporting force and the tunnel-foundation buried depth difference at different horizontal distances

所需支护力不断减小。当隧道土体内摩擦角一定时,随着水平距离的增加,隧道所需支护力不断减小。随着土体重度的增加,隧道所需支护力不断增加。当土体重度一定时,随着水平距离的增加,隧道所需支护力不断减小。



注:隧道支护力以指向隧道外为正,以指向隧道内为负。

图 3 不同水平距离下土体力学参数与隧道所需支护力之间的关系

Fig. 3 Relationship between the required supporting force and soil mechanics parameters at different horizontal differences

不同水平距离下,基础临界基底压力与隧道所需支护力之间的关系如图 4 所示。当  $D=0$  时,即当上部基础与隧道处于正穿情况时,对既有结构的破坏情形最为危险,所对应的隧道所需支护力最大。隧道所需支护力与基础临界基底压力成正相关,随着基础临界基底压力的增加,隧道所需支护力不断增大。

4 工程建议措施

为有效保证既有结构基础下方隧道开挖的安

全性,在实际工程中应遵循以下工程建议措施:

1) 在进行既有结构基础周边隧道开挖时,应尽可能加大隧道与既有结构基础之间的距离。其中,隧道与基础埋深差越小,对新建隧道和既有基础结构的变形及应力控制越困难,导致二者的状态越危险,在实际工程中应尽可能避免。

2) 当隧道在既有结构基础开挖的位置一定时,随着土体强度参数的增加,相应的隧道所需支护力越来越小。因此在实际工程中,当既有结构基础下方近距离穿越时,可通过注浆加固的方式对地层提

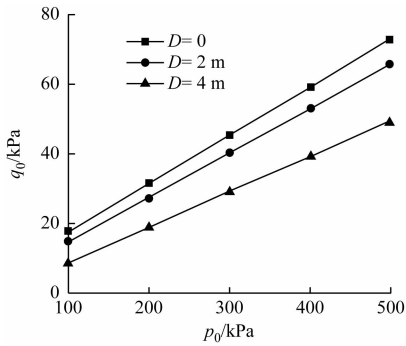


图4 不同水平距离下基础临界基底压力与隧道所需支护力之间的关系

Fig. 4 Relationship between the required supporting force and critical foundation base pressure at different horizontal distances

前进行注浆,以提高土体的强度参数,从而保证新建隧道开挖的安全性。

## 5 结语

1) 本文考虑既有结构基础下方隧道正穿与侧穿两种情形,提出了隧道周边两种扰动破坏模式的力学分析模型,利用上限法推导得到新建开挖隧道所需支护力与既有结构基础临界基底压力计算公式,分析得到了不同穿越位置、土体力学参数及基底压力等因素对新建隧道所需支护力的影响规律。

2) 新建隧道与既有结构基础的相对位置会对隧道的安全性及隧道所需支护力产生较为显著的影响。相比于侧穿情况,新建隧道正穿既有结构基础时最为危险。隧道所需支护力同隧道与基础埋深差、土体黏聚力、土体内摩擦角呈负相关;隧道所需支护力与土体重度、基础临界基底压力呈正相关。

## 参考文献

- [1] 翁效林, 孙腾, 冯莹. 桩基础承载过程对近距离地铁隧道影响机制分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 138.  
WENG Xiaolin, SUN Teng, FENG Ying. Influence of loading pile foundation on existing neighboring subway tunnel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 138.
- [2] 张玉伟, 翁木生. 大厚度湿陷性黄土层浸水条件下承载桩基对近距隧道的的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 2040.  
ZHANG Yuwei, WENG Musheng. Influence of pile foundation to adjacent tunnel with water immersion in collapsible loess layer of

great thickness[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 2040.

- [3] 丁智, 张霄. 桩基施工对邻近既有地铁隧道影响的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 390.  
DING Zhi, ZHANG Xiao. Numerical analysis of influence of pile foundation construction on adjacent metro tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(2): 390.
- [4] 张旭, 张成平, 韩凯航, 等. 隧道下穿既有地铁车站施工结构沉降控制案例研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 759.  
ZHANG Xu, ZHANG Chengping, HAN Kaihang, et al. Case study of control technology of structural settlements due to tunneling beneath a subway station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 759.
- [5] 张治国, 姜蕴娟, 徐晨, 等. 对“考虑桩侧土体三维效应和地基剪切变形的隧道开挖对邻近桩基影响分析”讨论的答复[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1360.  
ZHANG Zhiguo, JIANG Yunjuan, XU Chen, et al. Reply to discussion on 'Influence of tunneling on deflection of adjacent piles considering shearing deformation of foundation and 3D effects of lateral soils beside piles'[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1360.
- [6] 白海卫, 王剑晨, 刘运亮, 等. 既有地下结构受下穿施工影响的力学响应与安全控制研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 874.  
BAI Haiwei, WANG Jianchen, LIU Yunliang, et al. Safety control and mechanical response of existing underground structures induced by excavation of new tunnels under construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 874.
- [7] 李雪, 周顺华, 王培鑫, 等. 隔离桩及盾构近接施工对高铁桩基的影响分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 235.  
LI Xue, ZHOU Shunhua, WANG Peixin, et al. Analysis of impact of isolation piles and shield tunnelling on adjacent high-speed railway pile foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 235.
- [8] 沈建文, 刘力. 盾构隧道施工对临近桥桩影响数值及现场监测研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊2): 709.  
SHEN Jianwen, LIU Li. Numerical analysis and field monitoring for studying effects of shield tunnelling on nearby piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 709.

· 收稿日期:2023-03-25 修回日期:2023-06-14 出版日期:2024-02-10  
Received:2023-03-25 Revised:2023-06-14 Published:2024-02-10  
· 通信作者:王策,高级工程师,sdjzdxwc98@163.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license