

基于空间离散技术的盾构隧道近距离下穿既有隧道开挖面稳定性研究

黄阜, 张洪源, 张敏, 朱睿

(长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对目前盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中开挖面稳定性研究中存在的不足, 利用离散法“点到点”地生成该工况下开挖面前方土体的三维破坏机制, 利用该破坏机制和极限分析理论中的内外能耗关系推导盾构机土舱压力目标函数, 通过非线性优化方法计算了盾构机在近距离下穿既有隧道过程中维持开挖面稳定性所需的极限土舱压力并讨论相关参数对土舱压力及刀盘前方土体坍塌失稳特征的影响。参数分析表明: 盾构机近距离下穿既有隧道施工中维持开挖面稳定的极限土舱压力随着盾构机与既有隧道的接近而减小, 随着盾构机与既有隧道远离而增大。采用本文提出的方法计算广州地铁 12 号线某区间下穿既有隧道施工过程中盾构机土舱压力的理论解, 通过现场实测的土舱压力进行对比, 验证本文方法的有效性。

关键词: 近距离下穿施工; 极限分析; 空间离散技术; 开挖面; 土舱压力; 数值模拟

中图分类号: TU94+1

文献标志码: A

The face stability of shield tunnel drilling underneath an existing tunnel at close distance based on the spatial discretization technology

HUANG Fu, ZHANG Hongyuan, ZHANG Min, ZHU Rui

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: To study the face stability of a shield tunnel drilling underneath an existing tunnel at close distance, a three-dimensional failure mechanism of the soil in front of the excavation face was constructed by using spatial discretization technology. Utilizing this failure mechanism and virtual work principle, the objective function of the chamber pressure for the shield machine under limit states was derived. The upper bound solution of the required chamber pressure for maintaining the stability of soil in front of the tunnel face during was obtained based on optimization calculations. Moreover, the influences of various parameters on both the chamber pressure and the failure modes of the front soil mass were investigated. Parametric analysis demonstrates that the required chamber pressure decreases with the shield machine approaches the existing tunnel and increases with it moves away from the existing tunnel. Applying the proposed theoretical methodology to the Guangzhou Metro Line 12 shield tunneling project, the theoretical solution of the chamber pressure were calculated. By comparing with the field-measured data of the chamber pressure, the validation of the proposed approach was proved.

Key words: Underpass construction at close distance; limit analysis; spatial discretization technique; excavation face; chamber pressure; numerical simulation

随着“十四五”期间城市轨道交通建设目标的推进, 我国城市轨道交通运营里程增长显著。截至 2025 年 12 月, 全国已有 58 个城市开通城市轨道交通线路 382 条, 运营里程达 13071.58 公里, 其中地铁 10007.06 公里, 占比 76.56%。在各个大型城市的核心地带, 已经形成了便捷、通达的地铁网络。由于地铁隧道主要在浅层地层中施工, 当新建地铁穿越城市中心地带时, 近距离下穿既有隧道的情况十分常见。盾构机在近距离下穿既有隧道施工过程中, 刀盘前方的岩土体有可能发生坍塌失稳, 且该坍塌范围和模式受到既有隧

收稿日期: 2025-10-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52278395); 湖南省大学生创新创业训练项目 (s202310536092)

道结构的影响,与盾构机非下穿施工情况下的坍塌特征存在很大区别。因此,有必要对盾构机在既有隧道下方施工过程中刀盘前方岩土体的失稳破坏机理开展研究,为该工况下盾构隧道掘进参数设定提供理论依据。

目前已经有部分学者针对这一课题开展了一些卓有成效的研究工作。刘英男等^[1]针对新建盾构下穿既有隧道施工过程中开挖面前方土体的破坏特征,构建了隧道开挖面的三维刚性体破坏模型,利用极限平衡理论计算得到了盾构机的极限支护力并通过与已有结果进行对比验证了理论计算的有效性。李磊等^[2]基于上海地铁11号线与既有4号线叠交工程,采用现场监测与数值模拟结合的方法,分析了土仓压力、注浆压力等施工参数对既有隧道变形的作用机理。金大龙等^[3]以深圳地铁7号线、9号线四条小净距隧道近距离下穿既有地铁1号线为工程背景,利用离心模型试验揭示了盾构多次近距离穿越施工诱发既有线路的变形机理。阿卜杜拉等^[4]通过开展大尺寸盾构隧道模型试验,研究了盾构掘进施工对既有隧道内力的影响。杨荟斯等^[5]采用现场监测、数值模拟与理论分析相结合的方法,开展了盾构下穿施工对既有隧道结构变形与力学响应的研究,获得了盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中,既有隧道的位移及管片受力数据。姜腾等^[6]以广州地铁7号线西延顺德段盾构下穿既有地铁为工程背景,通过对施工过程中的风险进行全面评估,提出了相应的风险控制措施,为该工程的施工安全提供了可靠保障。戴正彬和卢云龙^[7]基于现场监测数据,利用数值模拟技术构建了南京某地铁盾构隧道超近距离下穿既有隧道施工的三维数值模型,分析了下穿施工对既有隧道结构的影响,研究结果可以为类似工程的施工提供指导。廖少明等^[8]基于上海地铁某区间隧道上下夹穿运营地铁的工程实例,采用数值模拟技术对先上后下和先下后上两种不同穿越次序引起的既有隧道变形及地层扰动影响进行了研究。Hu等^[9]采用数值模拟与现场监测相结合的方法,系统研究了双线重叠隧道施工过程中既有隧道的变形响应规律。代仲海等^[10]基于极限平衡法构建了盾构近距离穿越既有隧道的三维模型,分析了盾构机处于不同位置时开挖面的失稳特征以及隧道上方地表的沉降规律。针对盾构机近距离下穿既有隧道这一工程问题,目前国内外学者大多研究下穿施工对既有隧道结构的影响^[11-15],部分研究下穿施工过程中盾构机开挖面稳定性的成果又都是采用数值模拟或者模型试验开展的。基于理论方法的盾构机下穿既有隧道施工过程中开挖面的坍塌失稳模式研究少有报导,该工况下开挖面在极限状态下的坍塌失稳机理和发展演变模式研究不够透彻。因此,有必要采用理论方法对盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中盾构机开挖面的稳定性开展研究。

本文根据盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中刀盘前方土体在极限状态下的失稳特征,采用空间离散技术,建立盾构机近距离下穿既有隧道施工工况下刀盘前方土体的坍塌破坏模型。基于虚功原理,计算破坏模式中的能量耗散率与外部作用功率,推导得到土仓压力上限解析表达式。通过非线性优化算法对该函数进行极值求解,最终确定维持工作面稳定所需的最小土仓支护压力。研究成果可为盾构机下穿施工过程中土仓压力的设定提供理论依据,对降低施工风险、保障既有隧道运营安全具较高的科学意义与工程应用价值。

1 盾构隧道近距离下穿既有隧道开挖面三维离散型破坏机制

由于盾构在既有隧道下方施工过程中刀盘前方土体受到既有结构的影响,已有的盾构机刀盘前方土体破坏机制不能直接用于在既有隧道下方掘进的开挖面稳定性分析。本研究利用Mollon^[16-19]提出的空间离散技术,构建极限状态下盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中开挖面前方土体的整体坍塌破坏机制。该机制根据土体的正交法则,以“点到点”的方式逐一生成,与模型试验中观察到的开挖面前方土体坍塌模式

十分吻合，因此在盾构隧道稳定性分析中得到广泛应用。

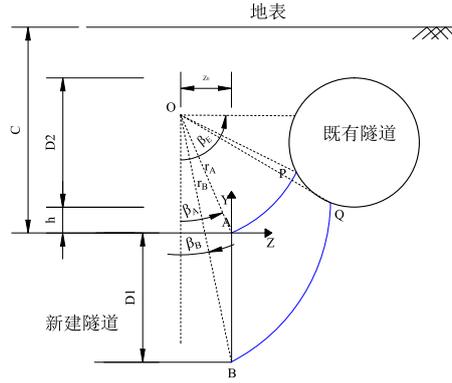


图 1 盾构隧道近距离下穿既有隧道施工开挖面土体塌落破坏机制剖面图

Fig1 Profile of soil collapse mechanism at the shield tunnel face when the shield tunnel passes underneath at a close distance

图 1 为极限状态下新建盾构近距离下穿既有隧道施工过程中刀盘前方土体塌落破坏体剖面图。AB 为新建盾构隧道刀盘掘进位置，刀盘前方的土体在极限状态下发生向刀盘方向的坍塌，形成“牛角型”塌落体。根据 Mollon^[19]构建的盾构隧道开挖面塌落破坏机制，在非下穿工况下该三维塌落体在顶部是一个尖角。但是盾构机在既有隧道下方掘进过程中，由于新建隧道离既有隧道比较近，原本生成的塌落体尖角会被既有隧道的衬砌结构“截断”。因此，本文通过设定新建隧道刀盘前方的三维破坏机制在与既有隧道衬砌外轮廓交汇处中止生成，得到用于描述极限状态下盾构机在既有隧道下方掘进开挖面的三维离散型塌落破坏机制，如图 2 所示。

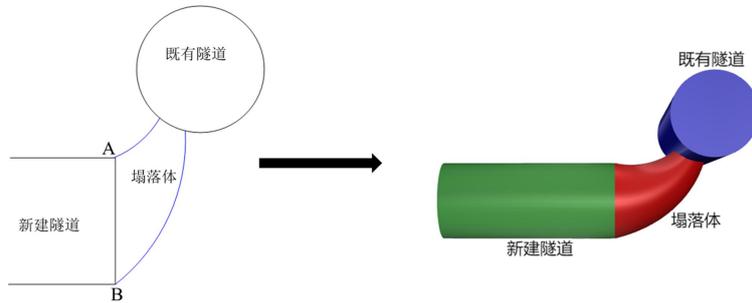


图 2 盾构机在既有隧道下方近距离掘进的开挖面三维离散型塌落破坏机制

Fig2 Three-dimensional discrete collapse failure mechanism of a newly constructed shield tunnel excavated beneath an existing tunnel closely

图 1 为新建盾构隧道刀盘前方塌落体在二维剖面上的投影。AP 和 BQ 这两条线，构成了开挖面塌落体的边界线。以 O 点为旋转中心，分别相交于既有隧道的 P, Q 点。图 1 所示的破坏机制中对数螺旋线 AP 和 BQ 的极坐标方程为：

$$\begin{aligned} r_1(\beta) &= r_A [\exp(\beta - \beta_A) \tan \varphi] \\ r_2(\beta) &= r_B [\exp(\beta_B - \beta) \tan \varphi] \end{aligned} \quad (1)$$

上式中，参数 r_A 表示 OA 的长度，几何参数 r_B 表示 OB 的长度；几何参数 β_A 表示 OA 与竖直向的夹角，几何参数 β_B 表示 OB 与竖直向的夹角， φ 为土体的摩擦角。

图 3 和图 4 为盾构机在既有隧道下方掘进过程中开挖面破坏机制的生成原理示意图。空间定位起始于平面 Π_1 上的 A_1 、 A'_1 基准点。将平面 Π_1 上的初始坐标点 A_1 和 A'_1 标记为 $P_{1,1}$ 和 $P_{2,1}$ ，其对应角度参数 $\theta_{1,1}$ 和 $\theta_{2,1}$ 可通过几何关系式解析确定。基于平面 Π_1 的基准点 $A_1(P_{1,1})$ 、 $A'_1(P_{2,1})$ 依据相关联流动法则生成平面 Π_2

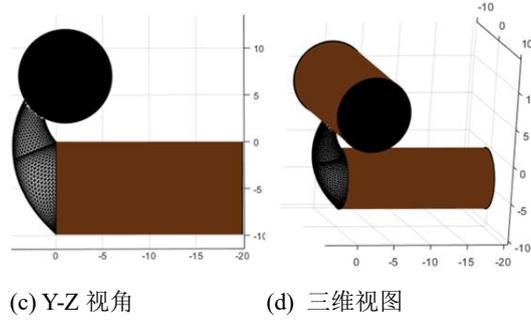


图 5 盾构机下穿既有隧道施工刀盘前方土体三维离散型破坏机制

Fig5 Three-dimensional discrete failure mechanism of soil ahead of the cutter head during the construction of shield machine passing through an existing tunnel

2 盾构隧道下穿既有隧道施工内外能耗功率计算

基于极限分析理论，在构建盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中盾构机开挖面前方土体的三维破坏机制后，根据 Mollon^[17]提出的方法，通过计算该破坏机制中的外力做功功率与内能耗散功率，构建由外力功率和耗散功率组成的虚功率平衡方程并由此推导维持开挖面稳定性所需要的极限土舱压力。由于 Mollon^[17]详细地给出了相关功率的计算公式和推导过程，受论文篇幅所限，本文不再赘述。

2.1 重力功率计算

本文构建的离散型破坏机制由大量离散单元构成。根据虚功率原理，计算塌落体重力做功功率时，首先计算单个离散单元的重力做功功率，然后通过叠加获得破坏机制中总的重力做功功率。破坏机制中土体重力做功功率的计算公式 W_γ 如下：

$$\begin{aligned}
 W_\gamma &= \iiint_V \vec{\gamma} \cdot \vec{v} dV \\
 &= \sum_{i,j} \left(\gamma \cdot \vec{v}_i \cdot V_{i,j} + \gamma \cdot \vec{v}'_{i,j} \cdot V'_{i,j} \right) \\
 &= \omega \cdot \gamma \cdot \sum_{i,j} \left(R_{i,j} \cdot V_{i,j} \cdot \sin \beta_{i,j} + R'_{i,j} \cdot V'_{i,j} \cdot \sin \beta'_{i,j} \right)
 \end{aligned} \quad (2)$$

上式中，参数组 $R_{i,j}$ 和 $\beta_{i,j}$ 及其对应参数 $R'_{i,j}$ 和 $\beta'_{i,j}$ 分别表示 $S_{i,j}$ 及其对应面 $S'_{i,j}$ 的重心极坐标参数，其中 γ 表示土体重度。 $V_{i,j}$ 和 $V'_{i,j}$ 是离散单元与其在 (Y, Z) 面上的投影所形成的单元体体积。

2.2 盾构机土舱压力功率的计算

盾构机土舱压力做功功率通过将开挖面外轮廓进行离散化处理，形成由相邻节点 A_j 、 A_{j+1} 及其对应映射点 A'_j 、 A'_{j+1} 围合而成的连续梯形网格单元。计算各离散单元上土舱压力的做功功率，通过采用累加算法计算得到破坏机制中总的土舱压力功率。其计算公式如下：

$$\begin{aligned}
 W_\sigma &= \iint_\Sigma \sigma \cdot \vec{v}_j d\Sigma \\
 &= -\omega \cdot \sigma \cdot \sum_j \left(\Sigma_j \cdot R_j \cdot \cos \beta_j \right)
 \end{aligned} \quad (3)$$

上式中，几何参数 Σ_j 为表示梯形结构单元 $A_j A'_j A_{j+1} A'_{j+1}$ 的截面面积，几何参数 R_j 定义为该梯形中心至旋转中心 O 点的径向距离，参数 σ 为土舱压力。

2.3 内能耗散功率的计算

当土体在自重作用下向隧道内发生坍塌失稳时，由于土体黏聚力的存在，破坏面附近的土体颗粒在剪切滑移过程中会与周围介质产生摩擦耗能。本文所构建的离散型塌落体由大量三角形单元构成，沿速度不连续面产生的总能量耗散率可通过对各离散单元的耗散功率积分获得。根据极限分析理论，破坏机制的表面发生速度间断，产生的耗散功率等于土体黏聚力、速度不连续面面积及速度矢量切向分量的乘积。本文

构建的破坏机制中总内能耗散功率为：

$$\begin{aligned}
 W_D &= \iint_S c \cdot v \cdot \cos \varphi \cdot dS \\
 &= \sum_{i,j} (c \cdot v_{i,j} \cdot S_{i,j} \cdot \cos \varphi + c \cdot v'_{i,j} \cdot S'_{i,j} \cdot \cos \varphi) \\
 &= \omega \cdot c \cdot \cos \varphi \sum_{i,j} (R_{i,j} \cdot S_{i,j} + R'_{i,j} \cdot S'_{i,j})
 \end{aligned} \tag{4}$$

上式中， $S_{i,j}$ 和 $S'_{i,j}$ 分别为离散单元的面积， c 为土体黏聚力。

2.4 盾构机下穿既有隧道施工维持开挖面稳定的极限土舱压力

基于虚功原理的能量守恒定律，本文构建中的盾构隧道开挖面破坏机制中外力做功功率与内能耗散功率相等。因此，可建立包含土体自重做功功率、土舱支护压力做功功率及内能耗散功率的虚功率平衡方程：

$$W_\gamma + W_\sigma = W_D \tag{5}$$

利用式(5)可以获得维持开挖面前方土体稳定的土舱压力上限目标函数：

$$\sigma = \gamma \cdot D \cdot N_\gamma - c \cdot N_c \tag{6}$$

上式中， N_γ 为土体重力影响系数， N_c 为粘聚力影响系数，计算公式如下：

$$N_\gamma = \frac{\sum_{i,j} (R_{i,j} \cdot V_{i,j} \cdot \sin \beta_{i,j} + R'_{i,j} \cdot V'_{i,j} \cdot \sin \beta'_{i,j})}{D \cdot \sum_j (\Sigma_j \cdot R_j \cdot \cos \beta_j)} \tag{7}$$

$$N_c = \frac{\cos \varphi \cdot \sum_{i,j} (R_{i,j} \cdot S_{i,j} + R'_{i,j} \cdot S'_{i,j})}{\sum_j (\Sigma_j \cdot R_j \cdot \cos \beta_j)} \tag{8}$$

基于极限分析理论，为求解极限状态下土舱压力的极限值，需确定式(6)所示目标函数的全局极大值。由于该目标函数是一个非线性方程，用解析法无法求解极值。因此，本文采用非线性规划方法编制程序，对该目标函数进行全局优化搜索，从而得到盾构隧道下穿既有结构时确保开挖面不失稳的极限土舱压力。

3 影响参数分析

3.1 盾构机下穿施工过程中各参数对土舱压力影响分析

为了分析盾构机在下穿施工过程中，刀盘从既有隧道正下方穿越这一过程中土舱压力的变化规律，本文绘制了盾构机在下穿隧道施工过程中土舱压力随刀盘-既有隧道中心距离 t 变化的曲线图，如图 6 所示。该图中，纵轴为基于极限分析理论计算的盾构机土舱压力，横轴为盾构机与既有隧道的相对位置。设定初始工况为盾构机距离既有隧道较远处开始掘进， $t = 0 \text{ m}$ 表示盾构机刀盘恰好通过既有隧道的中心处， $t < 0 \text{ m}$ 表示刀盘未抵达中心位置， $t > 0 \text{ m}$ 则表明刀盘已穿越中心位置，横轴的绝对值表示盾构机刀盘与既有隧道中心的距离。

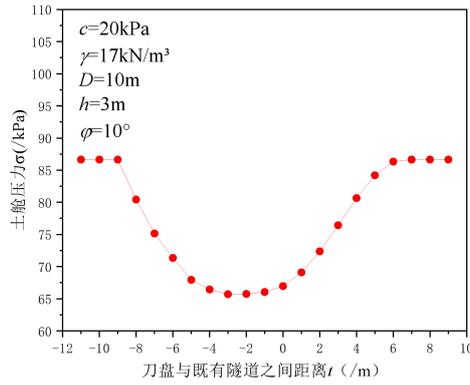


图 6 盾构机下穿既有隧道施工土舱压力随刀盘与既有隧道之间距离 t 变化规律

Fig6 Curve of soil chamber pressure variation with the change in distance between the cutter head and the existing tunnel during the shield machine passing beneath the existing tunnel

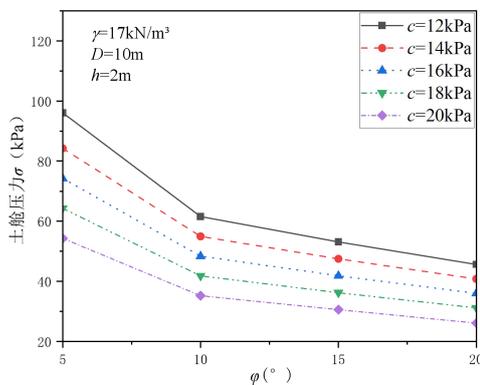
如图 6 所示，盾构机在既有隧道下方施工过程中，维持刀盘前方土体稳定的极限土舱压力随刀盘与既有隧道中心之间距离变化规律如下：

1) 当 $t < -9$ m 时，盾构机开挖面距既有隧道较远，刀盘前方土体的坍塌破坏机制还未接触到既有隧道的衬砌结构。此时，盾构机与在地层中正常掘进的状态一致，土舱压力维持 86.64 kPa 不变。

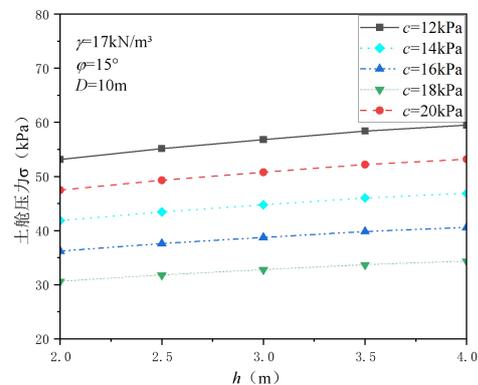
2) 当 -9 m $< t < -3$ m 时，盾构机刀盘与既有隧道中心的距离大于 5 m，此时塌落体已经侵入到了既有隧道衬砌范围内。但是由于隧道衬砌是钢筋混凝土结构，其刚度远大于塌落体的刚度，导致塌落体的顶端被衬砌截断，造成盾构机土舱压力急剧下降。随着刀盘继续向前推进，塌落体被既有隧道衬砌截断的体积越大，土舱压力从正常掘进阶段的 86.64 kPa 减小为盾构机刀盘距既有隧道中心 3m 处的 65.71 kPa。

3) 当 -3 m $< t < 7$ m 时，盾构机刀盘已经越过了既有隧道中心线，塌落体被既有隧道衬砌截断的体积逐渐减小，土舱压力逐渐从最小值 65.71 kPa 恢复为正常掘进阶段的 86.64 kPa。

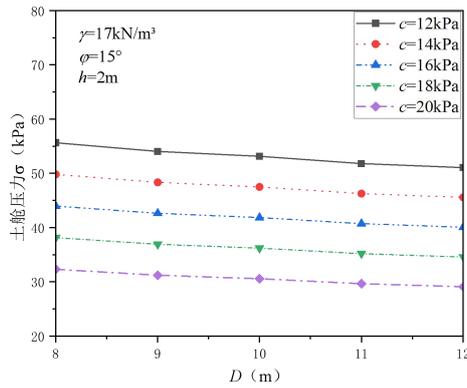
为了进一步研究不同参数对极限土舱压力的影响，绘制了当盾构机掘进到开挖面在既有隧道中心正下方，新建隧道直径 $D=8\sim 12$ m、黏聚力 $c=12\sim 20$ kPa、摩擦角 $\varphi=5\sim 20^\circ$ 、两隧道垂直净距 $h=2\sim 4$ m、土体重度 $\gamma=17$ kN/m³ 时，土舱压力 σ 随各个参数的变化规律，如图 7 所示。从图 7 中可以看出，盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中，极限土舱压力随黏聚力 c 、摩擦角 φ 和新建隧道直径 D 的增大而减小，随隧道之间垂直净距 h 的增大而增大。



(a) 不同的土体内摩擦角 φ 和黏聚力 c



(b) 不同的垂直净距 h



(c)不同的隧道直径 D

图 7 盾构机在既有隧道下方施工过程中极限土舱压力随相关参数变化规律

Fig7 Changing law of extreme soil chamber pressure variation with relevant parameters during the shield machine passing beneath an existing tunnel closely

3.2 土体参数对盾构机刀盘前方土体坍塌破坏范围的影响

根据计算得到盾构隧道近距离下穿既有隧道开挖面破坏机制中各个几何参数值，利用 MATLAB 绘图工具可以绘制出盾构机近距离下穿既有隧道工作面前方土体在极限状态下的三维破坏形状。本文绘制了 4 组不同参数下盾构机近距离下穿既有隧道前方土体的三维坍塌体图形，如图 8 所示。其中，土体重度为 $\gamma=17 \text{ kN/m}^3$ 。

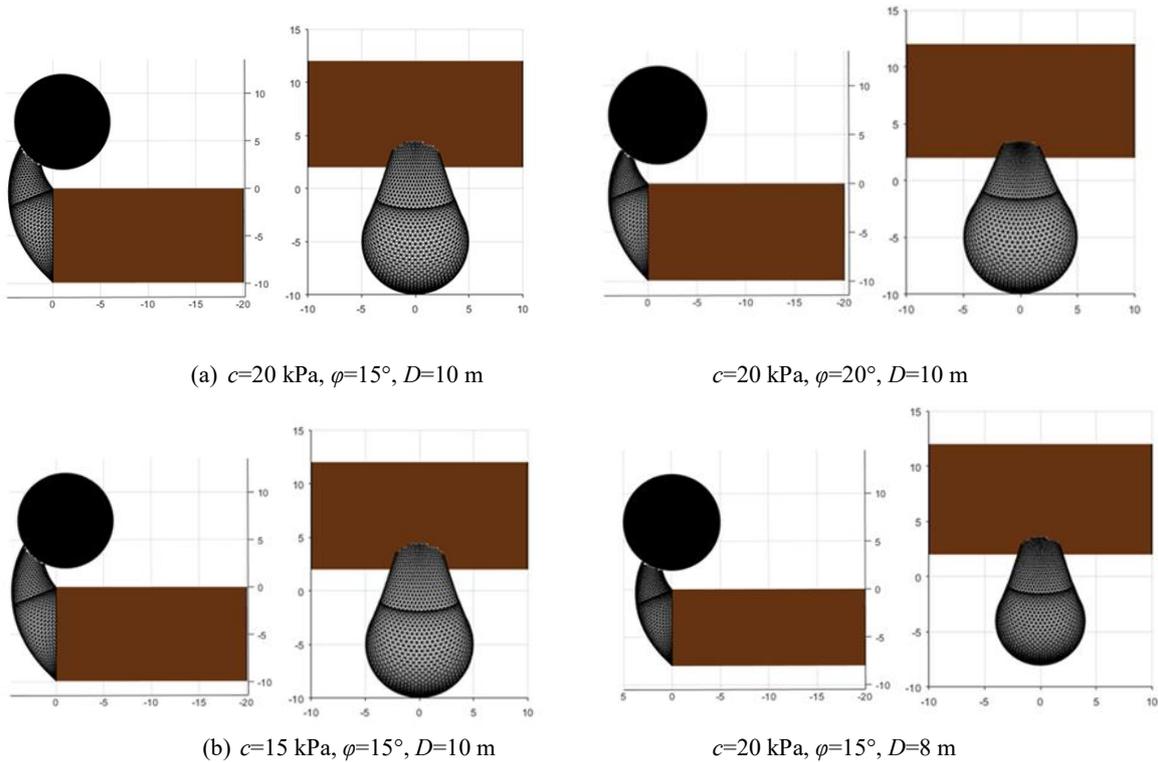


图 8 不同参数下盾构机近距离下穿既有隧道施工刀盘前方土体在极限状态下的坍塌形状

Fig8 Collapse shape of soil in front of the cutter head during the construction of shield tunneling machine passing through an existing tunnel at a close distance under different parameters in the limit state

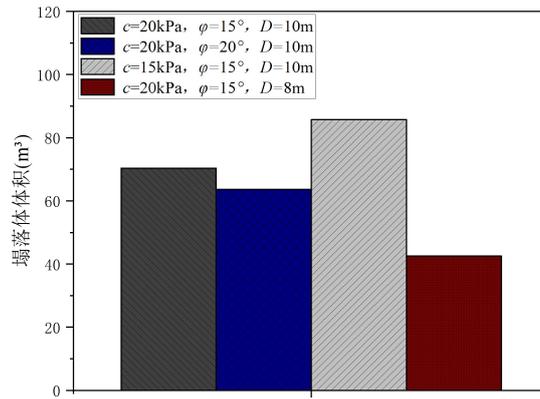


图9 不同参数下盾构隧道施工刀盘前方塌落体的体积

Fig9 Volume of collapsed material in front of the cutter head during shield tunnel construction under different parameters

从图8和图9中可以看出，内摩擦角 ϕ 与隧道直径 D ，对盾构工作面前方土体的破坏范围影响较为显著，而粘聚力 c 对其影响相对较小。随着内摩擦角 ϕ 变小和新建隧道直径 D 增大，开挖面前方土体的塌落范围增大。

4 工程实例分析

4.1 工程概况

广州市轨道交通十二号线工程串联棠溪交通枢纽，是广州市区一条重要的轨道交通干线。云溪公园站-小金钟站区间隧道下穿金园路隧道，区间左线长457.164 m，右线长454.65 m。本区间采用盾构法施工，区间左线盾构内设一道存车线和行车线，左线隧道外径为11.7 m；右线隧道只有行车线，外径6.4 m，埋深11.9 m，不设联络通道。上覆金园路市政隧道为13.7 m×6.6 m的矩形隧道，隧道埋深为2.7 m，盾构机从云溪公园站始发，至小金钟站吊出。本文主要针对该区间右线盾构机下穿既有隧道施工过程中开挖面稳定性进行研究。

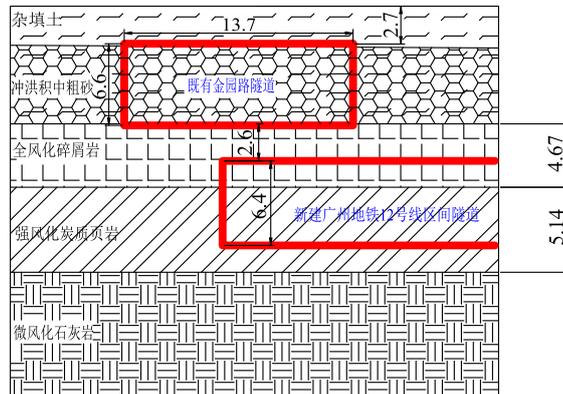


图10 广州市轨道交通十二号线云溪公园站-小金钟站区间隧道下穿金园路隧道地质纵断面图

Fig10 The geological profile of the tunnel between Yunxi Park Station and Xiaojinzhong Station of Guangzhou Rail Transit

Line 12 underpassing Jinyuan Road Tunnel

表1 广州市轨道交通十二号线工程地质参数

Table1 Engineering geological parameters of Guangzhou rail transit line 12

土层名称	厚度 /m	天然重度 $\gamma/\text{kN/m}^3$	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\phi/^\circ$
全风化碎屑岩	4.67	19.6	28.3	17.2
强风化炭质页岩	5.14	20.09	21.8	24.3

根据地质勘察报告，盾构机穿越的地层和地质参数如图 10 和表 1 所示。

4.2 盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中确保开挖面不失稳的极限土舱压力上限解

由于本文的理论计算模型根据均质地层中盾构机近距离下穿既有隧道构建的，因此需要将表 1 中实际地层的参数进行加权平均以构建理论计算模型。简化后的土体参数为： $\gamma=19.85 \text{ kN/m}^3$ ， $c=25.05 \text{ kPa}$ ， $\varphi=20.75^\circ$ 。将盾构隧道的几何参数和简化后的土体参数代入本文构建的理论模型中进行计算得到极限状态下刀盘前方土体的坍塌区域，如图 11 所示。

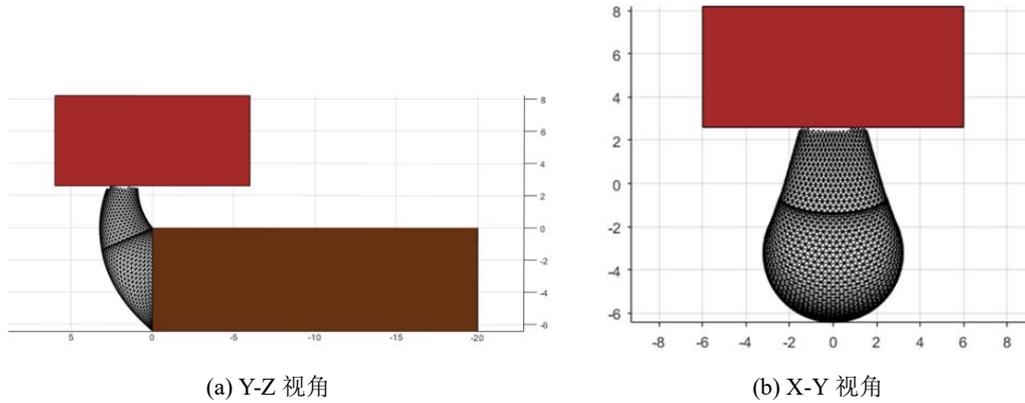


图 11 广州市轨道交通十二号线工程盾构机下穿既有隧道施工开挖面塌落体

Fig11 Collapse block of the tunnel face for shield tunnel crossing under existing tunnel in Guangzhou Metro Line 12 project

4.3 盾构机近距离下穿既有隧道施工土舱压力理论解与实测数据对比

为了验证本文理论计算的盾构机近距离下穿既有隧道施工土舱压力理论解的有效性，本节将 4.2 节中计算盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中维持隧道开挖面稳定所需的极限土舱压力理论解与现场实测土舱压力进行对比，如表 2 和图 12 所示。

表 2 盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中土舱压力理论解与实测数据

Table2 Comparison of theoretical solutions and measured data of soil chamber pressure during the construction process of shield machine passing through an existing tunnel at a close distance

开挖面距既有隧道 中心距离 t/m	σ/kPa (理论解)	σ/kPa (实测数据)
6	103.2	150
4.5	99.3	140
3	95.3	135
1.5	88.9	130
0	83.3	120
-1.5	87.7	130
-3	91.6	139
-4.5	97.3	145

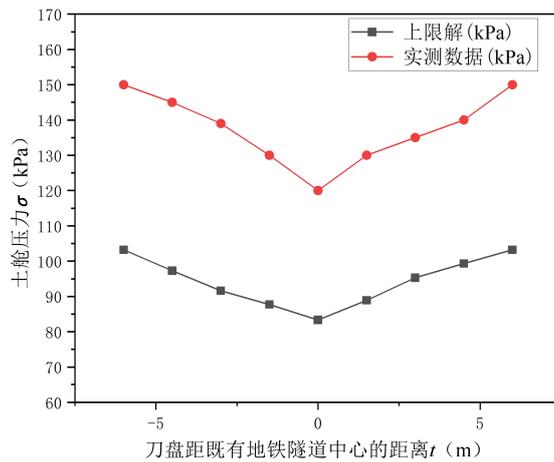


图 12 盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中土舱压力理论与实测数据对比

Fig12 Comparison of theoretical solution and measured data of soil chamber pressure during the construction process of shield machine passing through an existing tunnel at a close distance

根据盾构掘进诱发刀盘前方土体坍塌的发生机理，当实际工程中的土舱压力值小于基于坍塌破坏机制计算的土舱压力上限解时，开挖面前方土体有可能发生坍塌。而本依托工程中，盾构机在既有隧道下方施工过程中实测的土舱压力均大于上限解。因此，该实际工程中盾构机在既有隧道下方施工过程中土舱压力是安全有效的，且实际工程顺利竣工也说明了这一事实。此外，本文理论计算得到的土舱压力理论解和实测值对比可以看出，盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中计算得到的土舱压力的上限解与实测值随刀盘距上覆隧道距离变化而变化的规律一致。本文将新建隧道与既有隧道之间的地层简化为均质地层开展理论计算，而实际工程中新建隧道和既有隧道之间的地层是非均质的，因此计算得到的土舱压力上限解与实测值之间的差值可以接受。本文提出的盾构机在既有隧道下方施工过程中确保开挖面不失稳所需的极限土舱压力计算方法可以为实际工程中盾构机土舱压力设定提供指导。

4.4 盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中维持开挖面稳定的极限土舱压力数值解

基于 4.2 节中该工程的勘察数据与隧道结构几何参数，建立了盾构机近距离下穿既有隧道施工的三维数值模型，如图 13 所示。数值模型中岩土介质本构参数设置为：黏聚力 25.05 kPa，摩擦角 20.75°，土体重度为 19.85 kN/m³，弹性模量 12 GPa，泊松系数 0.3。本文采用 RHINO 软件构建盾构机下穿既有隧道三维数值模型中不规则结构。由于构建的模型关于中轴线对称，选取整体模型的一半进行建模以提升计算效率。三维数值模型的边界条件设定如下：模型左右两端固定 X 方向的位移；模型前后两端固定 Z 方向的位移；模型下底面固定 Y 方向的位移；模型上表面则设为自由边界。本研究基于连续介质力学基本假设，将地层介质简化为均质各向同性弹塑性材料，采用 Mohr-Coulomb 本构模型。模型在 X、Y、Z 方向的尺寸分别为：48 m、50 m 和 50 m，盾构隧道直径为 6.4 m，埋深为 11.9m，既有隧道埋深为 2.7m。



图 13 新建盾构隧道下穿既有隧道三维数值模型
Fig13 Three-dimensional numerical model of shield tunnel passing beneath an existing tunnel

FLAC3D 5.00

©2012 Itasca Consulting Group, Inc.

Contour Of Displacement

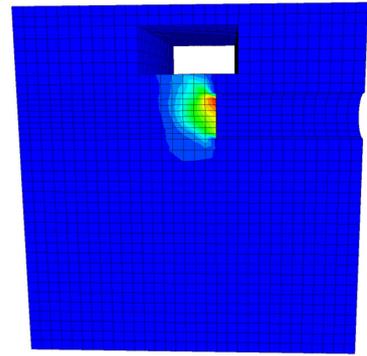
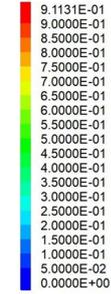


图 14 盾构机下穿既有隧道施工过程中开挖面前方土体位移云图
Fig14 Cloud chart of soil displacement for the tunnel face during the shield machine passing beneath an existing tunnel closely

利用构建的数值模型模型盾构机下穿施工，得到了盾构机刀盘前方土体坍塌破坏的位移云图，如图 14 所示。

4.5 盾构机近距离下穿既有隧道施工土舱压力理论解与数值解对比

根据广州地铁 12 号线云溪公园-小金钟区间的地质参数构建了三维数值模型，通过模拟盾构机下穿既有隧道施工，获得了该施工过程中土舱压力的数值解。选取盾构机掘进至既有隧道中心 3.8 m 处的典型工况进行对比研究，数值模拟计算得到的极限土舱压力为 93.5 kPa，理论方法计算的土舱压力值为 96.8 kPa，两者相差 3.4%。结果表明，本文提出的理论计算方法能够有效计算施工过程中土舱压力的临界值。

此外，通过将理论计算得到的三维塌落面投影到基于数值模拟计算的开挖面土体位移云图上，可以对比两种方法计算的盾构机刀盘前方土体坍塌范围和形状，如图 15 所示。从图中可以看出，基于理论计算得到的盾构隧道下穿既有隧道施工的开挖面前方土体坍塌范围和形状与数值模拟技术计算得到的结果基本一致。

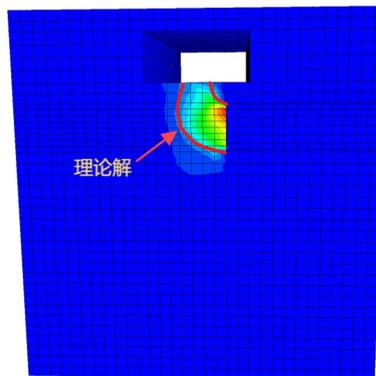


图 15 盾构机下穿既有隧道施工过程中开挖面前方土体破坏面数值解与上限解对比

Fig15 Comparison of numerical solution and upper bound solution of soil failure surface of the tunnel face during the shield tunnel passing beneath an existing tunnel closely

5 结论

基于极限分析上限定理，构建了盾构机在既有隧道下方掘进过程中开挖面的三维破坏机制，通过理论计算获得了盾构机在在既有隧道下方施工时保持开挖面稳定性需要的土舱压力上限解。在此基础上，分析了不同参数对盾构机土舱压力的影响。研究结果表明：

- 1) 盾构机在既有隧道下方掘进过程中，维持刀盘前方土体稳定的极限土舱压力随着盾构机与既有隧

道的之间的距离减小而减小,随着盾构机与既有隧道之间距离的增大而增大。

2) 盾构机在既有隧道下方施工过程中的极限土舱压力随粘聚力 c 、内摩擦角 ϕ 和盾构机直径 D 的增大而减小,随盾构隧道与既有隧道施工之间垂直净距 h 的增大而增大。

3) 盾构机近距离下穿既有隧道施工过程中,刀盘前方土体的失稳区域随摩擦角 ϕ 的减小而增大,随盾构机直径 D 的增大而增大。

4) 采用本文提出的理论方法计算了广州地铁 12 号线某区间盾构机下穿既有隧道施工过程中确保开挖面不失稳的极限土舱压力,通过与现场实测的土舱压力进行对比,证明本文提出的理论方法可以为盾构机下穿施工的土舱压力设定提供参考。

参考文献:

- [1] 刘英男,雷华阳,马长远,等. 近接既有隧道盾构开挖面三维稳定性分析 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (07): 1374-1383.
LIU Y N, LEI H Y, MA C Y, et al. Three-dimensional stability analysis of shield tunnel face adjacent to existing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(7): 1374-1383.
- [2] 李磊,张孟喜,吴惠明,等. 近距离多线叠交盾构施工对既有隧道变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1036-1043.
LI L, ZHANG M X, WU H M et al. Influence of Short-distance Multi-line Overlapped Shield Tunneling on Deformation of Existing Tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2014, 36 (6): 1036-1043.
- [3] 金大龙,袁大军,韦家昕,等. 小净距隧道群下穿既有运营隧道离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1507-1514.
JIN D L, YUAN D J, WEI J X, et al. Centrifugal model test of group tunneling with small spacing beneath existing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1507-1514.
- [4] 阿卜杜拉,雷春明,田雨,等. 盾构下穿对既有隧道影响的模型试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16 (S2): 540-545.
ABDULLAH, LEI C M, TIAN Y, et al. Model test study on the influence of shield tunneling undercrossing on existing tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020 16(S2): 540-545.
- [5] 杨荟斯,刘涛,缪红彬,等. 盾构隧道近距离下穿对既有运营隧道影响 [J]. 大连理工大学学报, 2022, 62 (03): 263-271.
YANG H S, LIU T, MIAO H B, et al. Influence of close-distance undercrossing of shield tunnel on existing operational tunnel[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2022 62(03): 263-271.
- [6] 姜腾,丁建军,麦海颖. 盾构近距离下穿运营地铁风险控制技术研究-以广州轨道交通 7 号线西延顺德段工程为例[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(增 1): 941-950.
JIANG T, DING J J, MAI H Y. Research on the risk control technology of shield tunnelling passing under the operational metro line with short distance: a case study of the west extension Shunde section of Guangzhou metro line 7[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(S1): 941-950.
- [7] 戴正彬,卢云龙. 盾构超近距离下穿对既有隧道变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2025, 47 (10): 2154-2162.
DAI Z B, LU Y L. Influence of ultra-close undercrossing shield on deformation of existing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47 (10): 2154-2162.
- [8] 廖少明,杨宇恒. 盾构上下夹穿运营地铁的变形控制与实测分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (5): 936-942.
LIAO S M, YANG Y H. Deformation Analysis and Control of a Running Subway Crossed by Upper-and Lower-shield in Succession [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2012, 34 (5): 936-942.
- [9] HU Y, LEI H Y, ZHENG G, et al. Assessing the deformation response of double-track overlapped tunnels using numerical simulation and field monitoring[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(2): 436-447.
- [10] 代仲海,胡再强. 穿越紧邻隧道时盾构开挖面稳定性分析 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (01): 145-152.
DAI Z H, HU Z Q. Stability analysis of excavation face during shield passing through adjacent tunnels[J]. China Journal of

Highway and Transport, 2020, 33(1): 145-152.

- [11] 肖鹏飞, 冯光福, 贾少东, 等. 近距离下穿车站富水圆砾地层盾构隧道开挖面稳定性研究 [J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3 (01): 75-81+91.
XIAO P F, FENG G F, JIA S D, et al. Study on face stability of shield tunnel in water-rich round gravel stratum undercrossing adjacent station [J]. Tunnel and Underground Engineering Disaster Prevention and Control, 2021, 3(1): 75-81+91.
- [12] LIU B, YU Z, ZHANG R, et al. Effects of undercrossing tunneling on existing shield tunnels[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(8): 04021131.
- [13] 周舟, 钟长平, 谢文达. 泥岩地层盾构常压开舱对既有隧道结构变形的影响研究[J].现代隧道技术,2023, 60 (05): 205-212.
ZHOU Z, ZHONG C P, XIE, W D. Study on the Influence of Constant Pressure Shield Tunneling in Mudstone Strata on the Deformation of Existing Tunnels. Modern Tunnelling Technology,2023 60(05): 205-212.
- [14] 周文杰, 黄安, 王铭芮等. 新建双线盾构隧道下穿既有隧道变形规律及控制技术研究 [J]. 国防交通工程与技术, 2023, 21 (05): 51-55.
ZHOU W J, HUANG A, WANG M R, et al. Research on Deformation Characteristics and Control Techniques of Existing Tunnels Underneath the New Double-Line Shield Tunnels. National Defense Transportation Engineering and Technology,2023 21(05): 51-55.
- [15] JIN D, YUAN D, Li X, et al. Analysis of the settlement of an existing tunnel induced by shield tunneling underneath[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 209-220.
- [16] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Face stability analysis of circular tunnels driven by a pressurized shield [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136: 215-229.
- [17] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Rotational failure mechanisms for the face stability analysis of tunnels driven by a pressurized shield [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(12): 1363-1388.
- [18] MOLLON G, PHOON K K, DIAS D, et al. Validation of a new 2D failure mechanism for the stability analysis of a pressurized tunnel face in a spatially varying sand[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, 137(1): 8–21.
- [19] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Continuous velocity fields for collapse and blowout of a pressurized tunnel face in purely cohesive soil[J].International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(13):2061-2083.



通信作者: 黄阜(1983—), 男, 长沙理工大学土木与环境工程学院教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为隧道与地下工程, Email: hfcsu0001@163.com。