

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.1215

基于物质点法的隧道开挖面失稳破坏数值分析

甄亮¹, 王剑锋¹, 柳楚楠¹, 孔雷¹, 桑琴扬², 许达³, 朱文轩^{4*}

(1.上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海 200433; 2.宁波职业技术大学, 浙江 宁波 315800; 3.浙江恒辉勘测设计有限公司, 浙江 杭州 310015; 4.上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 开挖面失稳坍塌是隧道施工安全的重大威胁之一, 合理设计隧道开挖面极限支护压力和预测开挖面失稳破坏影响范围是隧道施工安全的保障。采用自编隐式物质点法(Material Point Method, MPM)程序对隧道开挖面失稳机制进行研究。首先通过理论和试验对比, 验证了隐式MPM模拟开挖面稳定性的可行性。随后建立工程尺度的隧道模型, 分析土体摩擦角对隧道开挖面坍塌和地层变形响应的影响。结果表明: (1) 隐式MPM可有效捕捉掌子面失稳-破坏全过程特征; (2) 在临界状态下, 隧道掌子面的极限支护力、失稳区域和地表沉降均随土体摩擦角的增加呈负相关关系; (3) 当隧道掌子面发生倒塌破坏时, 涌入隧道的土体质量与土体摩擦角呈负相关关系。

关键词: 物质点法; 开挖面稳定性; 破坏形态; 大变形计算

中图分类号: TU451; TU94

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132(2026)01-0036-08

Numerical analysis of instability failure of tunnel excavation face based on material point method

ZHEN Liang¹, WANG Jianfeng¹, LIU Chunan¹, KONG Lei¹, SANG Qinyang², XU Da³, ZHU Wenxuan^{4*}

(1. Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China; 2. Ningbo Polytechnic University, Ningbo 315800, China; 3. Zhejiang Henghui Survey and Design Co., Ltd., Hangzhou 310015, China; 4. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The instability of excavation face is one of the major threats to the safety of tunnel construction. A reasonable design of support pressure limit for the excavation face and the prediction of the influence range of excavation face instability are the guarantee to tunnel construction safety. In this paper, the mechanism of excavation face failure is studied by using the self-programmed implicit material point method (MPM) computer program. Firstly, the implicit MPM is validated by comparing with the results obtained from the existing theoretical and experimental results. Subsequently, a series of field-scale numerical simulations are conducted to explore the influence of soil friction angle on tunnel face collapse and formation deformation response. The results show that: (1) Implicit MPM can capture the whole process of instability and failure of the palm surface effectively; (2) Under critical state, the ultimate support force, instability area and surface settlement of the tunnel face all show a negative correlation with the increase of soil friction angle; (3) There is a negative correlation between the mass of soil pouring into the tunnel and the friction angle of soil when the tunnel face collapses.

Keywords: material point method; stability of excavation face; failure shape; large deformation calculation

收稿日期: 2024-12-26

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.nbu.edu.cn/>

基金项目: 上海市交通委员会科研项目(JT2022-KY-021)

第一作者: 甄亮, 博士/高级工程师, 主要研究方向为地下工程理论与施工技术。E-mail: 348130339@qq.com

*通信作者: 朱文轩, 博士/助理研究员, 主要研究方向为岩土数值分析。E-mail: zhuwx1992@sjtu.edu.cn

随着城市化进程加速推进, 地下空间开发利用需求与日俱增, 促使隧道工程建设规模呈现指数级增长态势。在众多隧道施工技术中, 盾构法因其具备适应性强、环境影响小等优势^[1], 已成为城市地下隧道建设的首选工法。然而工程实践表明, 支护压力控制失当(欠压或超压)将导致掌子面稳定性劣化^[2-3], 进而可能引发开挖面塌陷、地表沉降等连锁工程灾害。因此, 深入研究地层条件对隧道开挖面破坏机制的影响规律具有重要工程意义。

当前, 隧道开挖面稳定性研究主要依托三大技术路径: 理论解析法^[4-5]、物理模型试验^[6-7]及数值模拟技术^[8-9]。随着计算硬件性能的突破性发展, 数值方法在岩土工程领域已占据主导地位。主流数值手段如有限元法(Finite Element Method, FEM)与有限差分法(Finite Difference Method, FDM)虽在常规变形分析中表现良好, 但在处理开挖面大变形破坏及失稳后行为时, 受限于网格畸变问题, 其计算精度与可靠性显著降低。

物质点法(Material Point Method, MPM)作为新一代无网格数值方法, 创新性地融合了拉格朗日粒子法与欧拉网格法的双重优势^[10], 算法继承并发展了单元粒子法(Particle in Cell)核心思想^[11], 其技术特征体现在粒子系统承载质量、应力、速度等关键的物理量及本构历史变量, 而背景网格则用于平衡方程求解。这种解耦机制使 MPM 在边坡失稳^[12-13]、地基破坏^[14]等大变形岩土工程问题中展现出独特优势。同时, 传统显式 MPM 受 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)条件的限制^[15], 时间步长受限问题导致计算效率瓶颈突出。

本文基于隐式物质点法对隧道开挖面从小尺度到大尺度变形问题进行研究。首先, 利用应力控制方法对开挖面稳定性问题进行计算分析, 并通过理论计算和试验结果的对比, 验证新方法在计算小尺度变形问题上的可靠性。其次, 利用 MPM 模拟分析开挖面倒塌现象的行为, 并将计算结果与试验结果进行比较。最后, 采用工程尺度模型对影响开挖面的稳定因素进行参数分析。

1 物质点法理论

物质点法是一种耦合欧拉-拉格朗日算法, 通过拉格朗日粒子对问题域进行离散化, 并利用欧拉

背景网格技术来求解系统的控制方程, 能有效克服传统网格方法和纯粒子方法的局限性。在隐式物质点法中, 每个增量步的计算可以分为 4 个阶段, 相关流程如图 1 所示。

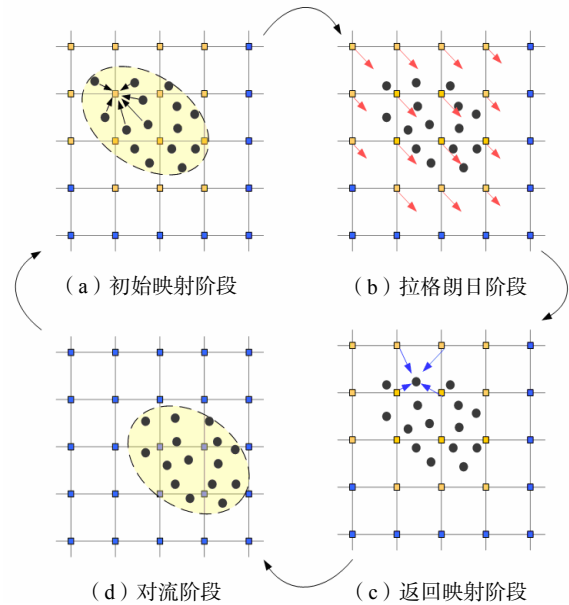


图 1 MPM 计算流程

阶段 1 称为初始映射阶段, 如图 1(a) 所示。此阶段中确认每个粒子所影响的网格节点, 并利用形函数将每个物质点的状态变量映射到相应的背景网格节点上。

阶段 2 称为拉格朗日阶段, 如图 1(b) 所示。该阶段采用更新拉格朗日描述建立控制方程, 包括质量守恒方程和动量守恒方程, 相关方程如下:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

式中: ρ 为连续体密度; t 为时间; $\dot{\mathbf{u}}$ 为连续体的速度矢量; $\ddot{\mathbf{u}}$ 为连续体加速度矢量; $\boldsymbol{\sigma}$ 为柯西应力张量; $\mathbf{g}$ 为重力加速度矢量。为求解偏微分方程(2), 可将试函数 $\delta \mathbf{u}$ 引入等式中, 使用 Galerkin 方法对等式进行弱化处理, 动量守恒方程弱化形式为

$$\int_V \delta \mathbf{u} \rho \ddot{\mathbf{u}} dV + \int_V \delta \mathbf{u} : \boldsymbol{\sigma} dV = \int_V \delta \mathbf{u} \cdot \mathbf{b} dV + \int_S \delta \mathbf{u} \cdot \mathbf{f} dS \quad (3)$$

式中: $\mathbf{b}$ 为体积力矢量; $\mathbf{f}$ 为表面荷载矢量; V 为体积; S 为连续体上荷载作用面积。遵循与标准 FEM 相似的过程, 通过假设物质点变量与使用形状函数背景网格节点上的变量构建映射关系, 得出

离散全局平衡方程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_i + \mathbf{K}\Delta\mathbf{u}_i = \mathbf{F}_{\text{ext}} - \mathbf{F}_{\text{int}} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为质量刚度矩阵, 此处采用集中质量刚度矩阵进行计算; $\ddot{\mathbf{u}}_i$ 为节点加速度矢量; $\mathbf{K}$ 为材料刚度矩阵; $\Delta\mathbf{u}_i$ 为节点位移矢量; $\mathbf{F}_{\text{ext}}$ 为外荷载矢量, 其中包含体力载荷矢量和表面荷载矢量; $\mathbf{F}_{\text{int}}$ 为内力矢量, 其表达式如下:

$$\mathbf{F}_{\text{int}} = \sum_{p=1}^n \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} V_p \quad (5)$$

式中: $\mathbf{B}$ 为位移-应变矩阵; V_p 为粒子体积。最后为保证平衡方程计算结果准确性, 采用 Newton 迭代法对式 (4) 进行计算。

阶段 3 称为返回映射阶段, 如图 1 (c) 所示。该阶段通过形函数将每个节点计算得出的变量映射到相应物质点上, 并更新物质点的状态变量, 例如应变、应力和变形梯度。

阶段 4 称为对流阶段, 如图 1 (d) 所示。该阶段中每个粒子根据计算所得的位移量在背景网格内进行移动。

数值计算采用隐式时间积分方法, 以提高计算精度, 同时为避免能量的耗散, 动态计算时未设置阻尼。此外, 为降低物质点穿越单元时对内力计算导致的明显振荡问题, 采用广义插值形函数; 同时为缓解粒子堆积导致的体积自锁问题, 采用 B-bar 法^[16-17]对粒子应变计算结果进行平滑处理。

2 隧道掌子面数值模型建立与验证

2.1 数值模型建立

为便于实际工程的应用和经典力学理论分析 (如极限平衡理论^[18]), 基于二维平面应变条件下的隧道掌子面模型常被用于研究掌子面的失稳模式和破坏机制^[19]。本文基于二维 MPM 对隧道掌子面模型的稳定性和失稳破坏过程进行研究, 其中, 模型一对隧道掌子面临界状态支护压力进行方法验证和参数分析, 模型二用于掌子面失稳倒塌大变形问题的方法验证。模型一中, 为避免边界效应对计算结果产生影响, 水平和竖直方向上的隧道几何模型尺寸为 $(C+2D) \times 8D$ (C 为隧道深度, D 为隧道直径), 模型边界左右两侧水平固定, 底边界水平和竖直均受到约束, 由于文中研究重点为掌子面的变形破坏, 因此将隧道开挖过程简化为一步开

挖。开挖完成后, 在隧道边界面上施加内支撑边界, 作用是固定模型水平和竖向位移, 如图 2 (a) 所示。模型二中隧道未开挖长度 $L_1 = 0.30$ m, 开挖段长度 $L_2 = 0.12$ m, C 为隧道深度, D 为隧道直径。模型左右两侧边界施加水平约束, 底边界自由度被完全约束, 同时在隧道表面施加完全约束, 模拟隧道边界面上的内支撑结构, 如图 2 (b) 所示。2 个模型均采用正方形单元作为背景网格单元, 开挖面划分为 16 个单元, 每个单元内分配 4 个粒子。采用莫尔库伦本构关系描述土体的应力与应变关系, 模型具体参数见表 1。时间步长按 $\Delta t = 2.5 \times 10^{-3}$ s 进行计算, 每个工况计算总时长为 5.0 s。

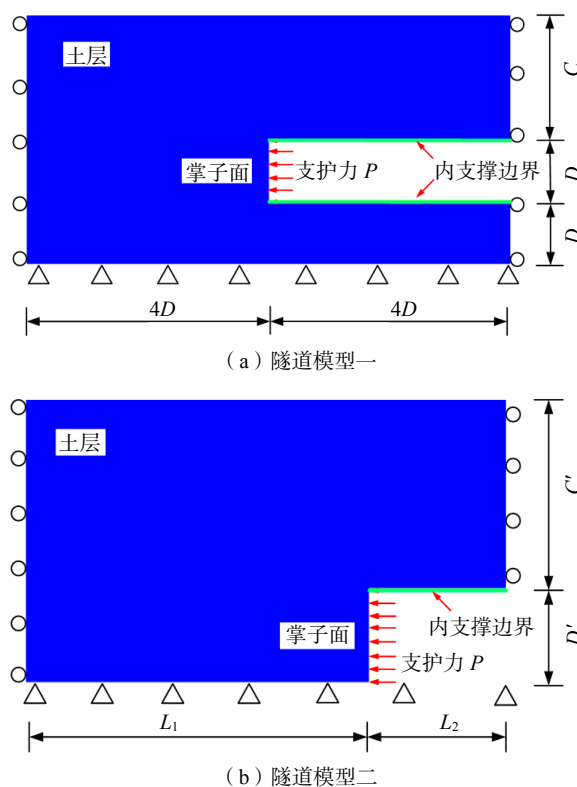


图 2 隧道模型图

表 1 验证模型参数

参数	模型一	模型二
弹性模量/kPa	20.0×10^3	5.84×10^3
泊松比	0.3	0.3
密度/(t·m ⁻³)	2.50	2.17
黏聚力/kPa	0	0
摩擦角/(°)	35.0	21.9
隧道直径/m	4.60	0.08
隧道埋深比	1, 2, 3	1, 2

2.2 模型验证

为验证隐式 MPM 在计算开挖面稳定性和灾后失稳破坏形态的可行性,采用 K_0 法($K_0 = 1 - \sin \varphi$, K_0 为土体侧向压力系数, φ 为土体内摩擦角)生成模型的初始应力场,同时采用应力控制方法^[20]施加支护力 P 在开挖面表层的物质点上,开启开挖面失稳破坏模拟计算。对于每个工况,支护力始终保持不变。为获得开挖面的极限支撑力,可通过降低支护力大小并监测隧道中心点水平位移变化来判断开挖面是否发生失稳破坏。

2.2.1 开挖面稳定性

图 3 展示了不同隧道埋深下开挖面支护力比($\lambda = P/P_0$)与隧道中心点水平位移之间的关系,其中, P_0 为开挖面初始支护压力。由图可见,随着隧道埋深的增加,隧道开挖面极限支护压力比值呈逐渐降低趋势,直接原因是随着埋深的增加,地层应力也相应提升,最终造成支护力比值下降。

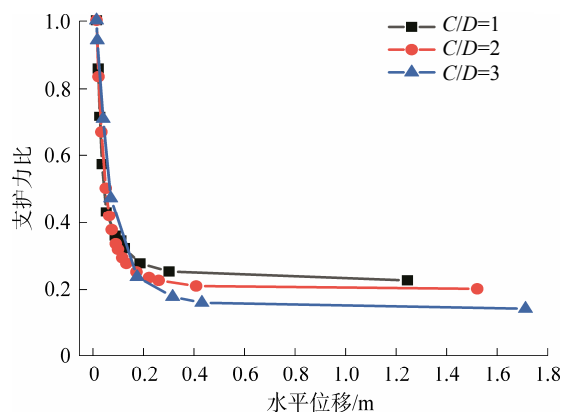


图3 不同隧道埋深比下支护力比—水平位移曲线

如图 4 所示,当埋深比 $C/D \geq 1$ 时,开挖面极限支护力的提升并不明显。模型计算结果与极限平

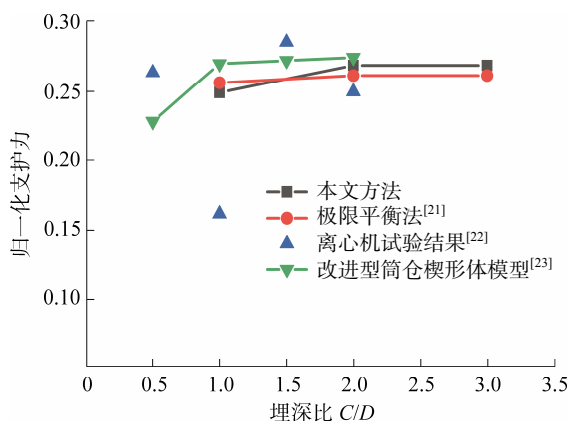


图4 归一化支护力与隧道埋深比的关系

衡法^[21]、离心机试验结果^[22]以及改进型筒仓楔形体模型^[23]的结果吻合较为良好,说明本方法能有效地模拟出不同埋深条件下隧道开挖面临界状态的极限支护力。

图 5 为不同埋深条件下,隧道模型一的位移和等效塑性应变云图。由图可见,当埋深比 $C/D=1$ 和 $C/D=2$ 时,模型地表发生下沉变形,且隧道失稳区域呈现“锥形-棱柱”组合形式,同时位移失效区域延伸至地表,这与已有研究^[24-26]结果相一致。当 $C/D=3$ 时,开挖面附近的位移值较大,且失稳区域未延伸至地表,同时等效塑性应变轮廓在隧道开挖面附近聚集,其破坏模式类似于锥体,说明失稳破坏发生在掌子面附近,如图 5(c) 所示,且与 Leca 等^[27]提出的失稳机制非常吻合。由此可以看出,隧道失稳区域会随隧道埋深的增大而减小,同时该结果也证明采用隐式 MPM 方法能有效模拟隧道开挖面的失稳模式。

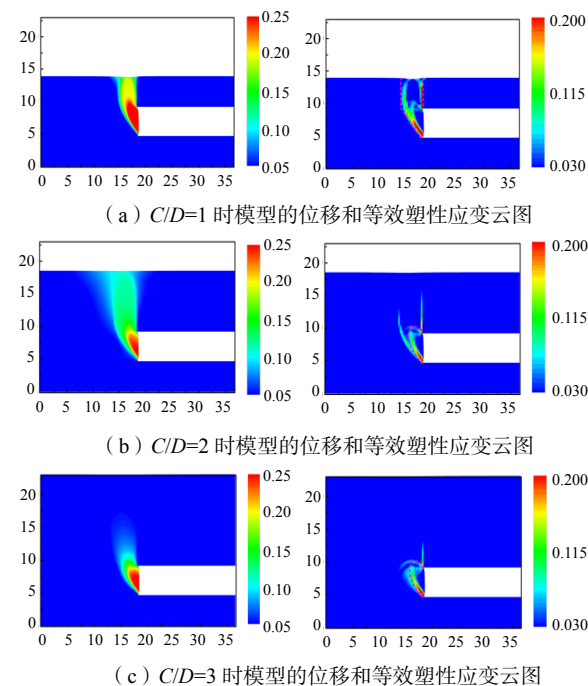


图5 不同埋深比下开挖面的破坏模式
(模型长高单位: m)

2.2.2 开挖面失稳破坏

在计算掌子面失稳破坏问题时,采用试验对比法对计算结果进行验证。应注意的是为消除颗粒不均匀性和表面粗糙度对结果的影响,缩尺试验^[28]采用铝棒代替沙土进行研究,同时也不考虑颗粒体内部的黏聚力作用。为贴合试验模型,采用隧道模

型二及其材料参数进行计算。图 6 分别为隧道埋深 $C'/D'=1$ 和 $C'/D'=2$ 时, 模型试验和 MPM 的模拟结果对比图。其中包括试验模型倒塌最终态(图 6(a)和(b))、总位移(图 6(c)和(d))和累积等效塑性应变(图 6(e)和(f))。图 6(c)和(d)中红线为试验测得表面线, 白线为试验测得失效线, 这些破坏线将移动区域与静态未受干扰区域分开。从图中可以明显看出, 当开挖面发生坍塌破坏后, 模型试验和 MPM 模型的土体变形趋势基本一致。

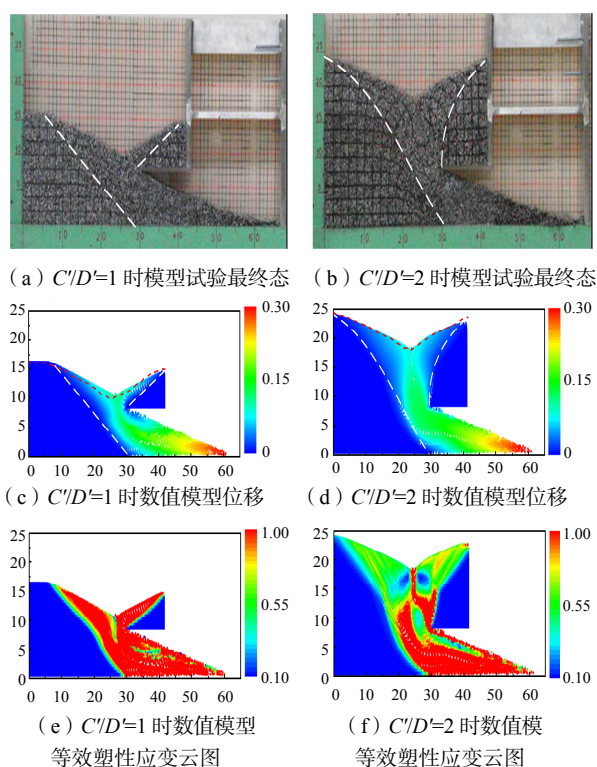


图 6 隐式 MPM 模拟结果与试验结果对比
(模型长高单位: cm)

对于不同隧道埋深的模型, 其位移的模拟结果均与试验结果吻合度较高, 此现象再次验证了本文提出的 MPM 隧道开挖面模型具有模拟土体大变形问题的能力, 并且对于模拟开挖面坍塌这一复杂工况具有良好的适用性。

3 模型参数分析

为展示隐式 MPM 算法的鲁棒性和通用性, 并探究内摩擦角对隧道掌子面临界状态以及失效破坏形态的影响, 采用隧道模型一(埋深比 $C/D=2$)对掌子面稳定性问题(小变形问题)和失稳倒

塌问题(大变形问题)进行统一计算, 相关模型参数见表 1。

3.1 开挖面临界状态参数化分析

图 7 为不同内摩擦角条件下模型的位移云图。由图中可看出土层发生位移的区域均贯穿土层表面, 并且模型中最大位移区域均分布在隧道开挖面附近, 此现象与极限平衡法^[21]所假设的失稳破坏轮廓相一致。通过对比图 7, 还可看出随着内摩擦角的增大, 土层所发生的失稳位移在逐渐减小, 同时, 失稳范围也在逐步缩小。

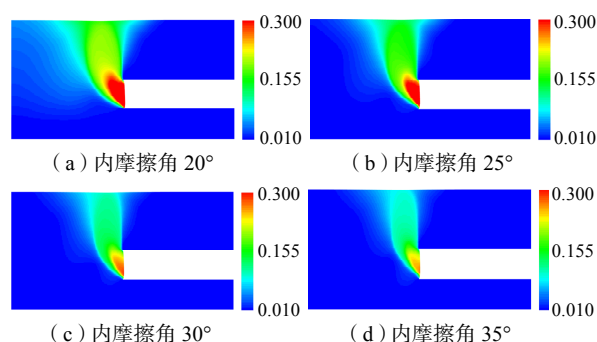


图 7 不同内摩擦角的隧道开挖面位移云图(单位: m)

图 8 为不同内摩擦角条件下模型的等效塑性应变云图。由图可见, 在不同内摩擦角下计算得出的失稳破坏区域底部的夹角满足 Rankine 土压力理论中的相关假定条件 $\pi/4 + \varphi/2$ (φ 为摩擦角), 由此也证明了本文采用隐式 MPM 算法的可靠性。

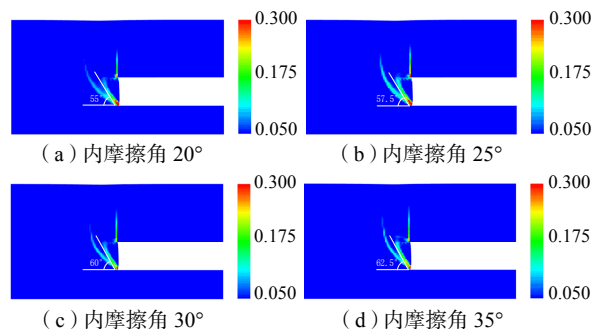


图 8 不同内摩擦角的隧道开挖面等效塑性应变云图

如图 9 所示, 随着支护力的降低, 开挖面中心处的水平位移逐步增大。同时, 随着土层内摩擦角的减小, 开挖面极限支护力以及极限状态下的水平位移均相应增大, 其中, 当内摩擦角从 35° 下降到 20° 时, 极限支护力和水平位移分别增加 56.8% 和 5.2%。图 10 给出了临界状态下不同内摩擦角模型的表面土层竖向位移曲线, 从中可以看出随着内摩擦角的减小, 临界状态下地表沉降更为剧烈, 同时

地表沉降位移并不对称,其峰值位于邻近开挖面前方的土体表面现象与文献[22]研究结果相一致。

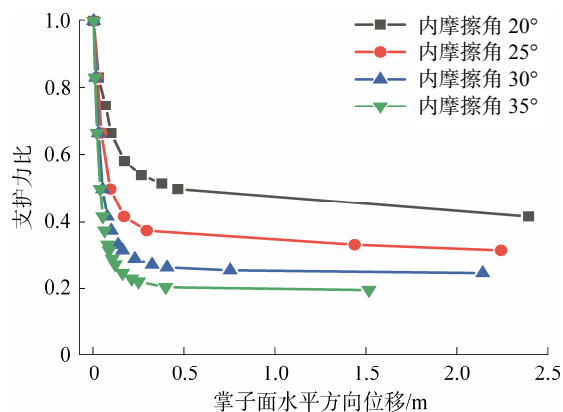


图9 不同摩擦角的隧道开挖面支护比—位移曲线

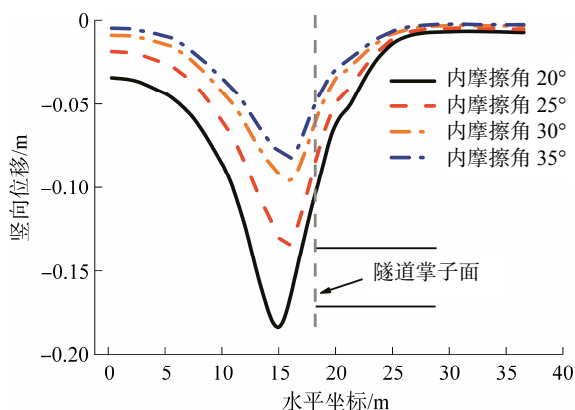


图10 临界状态下土层表面竖向位移曲线

3.2 开挖面失稳破坏后参数化分析

图11展示了不同内摩擦角条件下,支护失效后开挖面的破坏形态。由图可见,随着土体内摩擦角的减小,涌入隧道内部土体的滑移距离逐步增大,同时模型中土体发生松动位移的区域也在增大。主要原因是当土体发生扰动时,内摩擦角较小土体抵抗扰动的能力相对较弱,造成发生大变形的区域就相对较大。

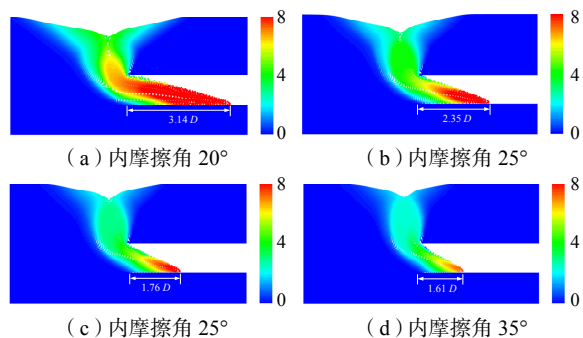


图11 不同内摩擦角的隧道开挖面位移云图（单位：m）

图12为不同内摩擦角（20°、25°、30°、35°）时,隧道掌子面最终时刻下的速度云图。从图中可以看出,当土层速度数值趋于0时,土层位移不再发生任何变化,已达到稳定状态。进一步说明本文模型中的塌方规模与内摩擦角有关,但与计算时间的长短无关。

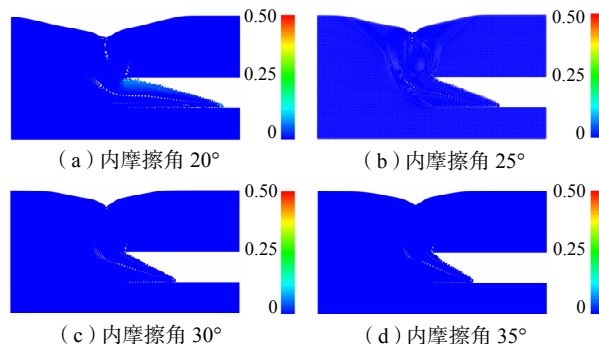


图12 隧道模型最终时刻下的速度云图（单位：m/s）

图13为不同内摩擦角（20°、25°、30°、35°）时,隧道掌子面模型系统总动能变化曲线。由图可见,在掌子面破坏初期（即计算时间小于1s）,土体动能迅速上升,同时土体内摩擦角越小的模型,其动能上升速率越快,且峰值越高。随着掌子面破坏程度的加剧,模型动能开始逐步降低,且下降速率与内摩擦角的大小呈反比例关系。说明模型动能下降一方面与摩擦角有关,另一方面与土体在隧道内部滑动距离有关。随着土体滑动距离的增加,模型需要克服的摩擦力也随之增大,模型动能下降趋势开始加剧。当计算时间为5s时,模型动能趋于零,模型位移也趋于稳定。

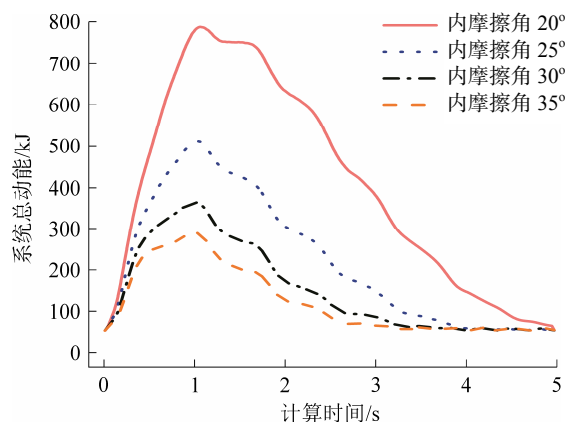


图13 隧道模型总动能变化曲线

图14为模型达到稳定状态时,涌入隧道内部的土体质量变化曲线,其中土体质量可以通过计算

隧道内的颗粒数来近似获得^[29]。从图中可见,随着土体内摩擦角的减小,涌入隧道内的土体质量逐步增大。图 15 展示了不同内摩擦角条件下,模型达到稳定状态时,顶部地表土层表面的竖向位移曲线。同样从中可以看出,当隧道掌子面发生倒塌时,临界隧道的表层土体竖向位移较大;同时随着内摩擦角的减小,表层土体发生塌陷的范围和竖向位移都在逐步增大。由此说明土体内摩擦角变化对地表沉降值、沉降范围和涌入隧道内部的土体质量均有明显影响,且内摩擦角与它们均呈现负相关性。

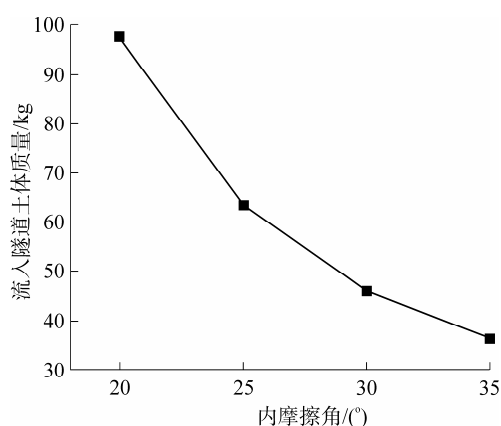


图 14 不同摩擦角时涌入隧道土体质量曲线

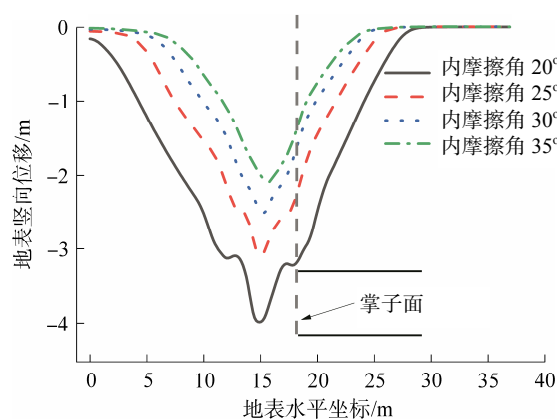


图 15 不同内摩擦角时土层地表竖向位移曲线

4 结论

提出利用隐式物质点法对隧道掌子面从小尺度到大尺度变形问题进行研究。通过与已有理论计算和试验结果的比较,证明了本方法在模拟隧道掌子面变形问题的可行性。进一步在工程尺度模型基础上,通过调整土体内摩擦角对掌子面多尺度变形行为进行研究,得出以下结论:

(1) 隐式 MPM 建立的计算模型与传统有限

元法相比,对于网格的依赖性相对较小。该方法不仅能准确计算小变形条件下隧道掌子面稳定所需的极限支护力和土体失稳区域,还可以有效模拟大变形条件下表层土体的破坏形态和影响范围。

(2) 在掌子面临界状态下,上覆土层厚度与隧道直径比值为 $C/D=1$ 时,土体失稳区会延伸至土层表面,当 $C/D=3$ 时,土体失稳区主要集中于掌子面附近。

(3) 在掌子面临界状态下,隧道掌子面的极限支护力、掌子面失稳位移和地表沉降均与土体摩擦角呈现负相关性,其中当内摩擦角从 35° 下降到 20° 时,极限支护力和掌子面失稳位移分别增加了 56.8% 和 5.2%。

(4) 当隧道掌子面发生倒塌破坏时,涌入隧道的土体质量以及地表沉降量均与土体内摩擦角呈现负相关性。

参考文献:

- [1] HE C, WANG B. Research progress and development trends of highway tunnels in China[J]. Journal of modern transportation, 2013, 21(4):209-223.
- [2] ANAGNOSTOU G, KOVÁRI K. Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields[J]. Tunnelling and underground space technology, 1996, 11(2):165-173.
- [3] LIU W, ZHAO Y, SHI P X, et al. Face stability analysis of shield-driven tunnels shallowly buried in dry sand using 1-g large-scale model tests[J]. Acta geotechnica, 2018, 13(3):693-705.
- [4] 陈海军, 张聚文, 孙志彬, 等. 基于上限分析与随机响应面法的盾构隧道掌子面可靠度研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(7):1177-1186.
- [5] 蒋武军, 李得建, 瞿拓宇. 基于强度折减法的浅埋隧道掌子面三维主动稳定性上限解析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(6):55-62, 69.
- [6] CHEN R P, YIN X S, TANG L J, et al. Centrifugal model tests on face failure of earth pressure balance shield induced by steady state seepage in saturated sandy silt ground[J]. Tunnelling and underground space technology, 2018, 81:315-325.
- [7] 刘海宁, 张亚峰, 刘汉东, 等. 砂土地层中泥水盾构掌子面主动破坏模式试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3):572-581.
- [8] 李少庭. 考虑纵坡的隧道掌子面稳定性上限有限元分析[J]. 中外公路, 2019, 39(5):188-193.

- [9] 秦建设, 尤爱菊. 盾构隧道开挖面稳定数值模拟研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005(1):27-30, 118.
- [10] ZHANG H W, WANG K P, CHEN Z. Material point method for dynamic analysis of saturated porous media under external contact/impact of solid bodies[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2009, 198(17/18/19/20):1456-1472.
- [11] SULSKY D, CHEN Z, SCHREYER H L. A particle method for history-dependent materials[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1994, 118(1/2):179-196.
- [12] GUO Z H, FEI J B, JIE Y X. An equivalent additional stress based material point method for the deformation of reinforced soil slopes under supergravity[J]. Computers and geotechnics, 2022, 142:104536.
- [13] SOGA K, ALONSO E, YERRO A, et al. Trends in large-deformation analysis of landslide mass movements with particular emphasis on the material point method[J]. Géotechnique, 2016, 66(3):248-273.
- [14] WOO S I, SALGADO R. Simulation of penetration of a foundation element in Tresca soil using the generalized interpolation material point method (GIMP)[J]. Computers and geotechnics, 2018, 94:106-117.
- [15] COURANT R, FRIEDRICH K, LEWY H. On the partial difference equations of mathematical physics[J]. IBM journal of research and development, 1967, 11(2): 215-234.
- [16] WANG B, VARDON P J, HICKS M A, et al. Development of an implicit material point method for geotechnical applications[J]. Computers and geotechnics, 2016, 71:159-167.
- [17] SANG Q Y, XIONG Y L, ZHENG R Y, et al. An implicit stabilized material point method for modelling coupled hydromechanical problems in two-phase geomaterials[J]. Computers and geotechnics, 2024, 166:106049.
- [18] GUTIÉRREZ-CH J G, SENENT S, ZENG P, et al. DEM simulation of rock creep in tunnels using rate process theory[J]. Computers and geotechnics, 2022, 142:104559.
- [19] 张宇, 陶连金, 刘军, 等. 考虑主应力偏转和土拱效应的干砂盾构隧道掌子面极限支护力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3):530-540.
- [20] LÜ X L, ZHAO Y C, XUE D W, et al. Numerical modelling of shield tunnel face failure through a critical state sand plasticity model with nonlocal regularization[J]. Computers and geotechnics, 2023, 164:105847.
- [21] LI P F, ZOU H H, WANG F, et al. An analytical mechanism of limit support pressure on cutting face for deep tunnels in the sand[J]. Computers and geotechnics, 2020, 119:103372.
- [22] ANAGNOSTOU G. The contribution of horizontal arching to tunnel face stability[J]. Geotechnik, 2012, 35(1):34-44.
- [23] 武军, 廖少明, 时振昊. 考虑土拱效应的盾构隧道开挖面稳定性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(2): 213-220.
- [24] THORPE J P. Ground movements during tunneling in sand[D]. Kingston, Canada: Queen's University, 2007.
- [25] CHAMBON P, CORTÉJ F. Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel face[J]. Journal of geotechnical engineering, 1994, 120(7):1148-1165.
- [26] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Probabilistic analysis and design of circular tunnels against face stability[J]. International journal of geomechanics, 2009, 9(6):237-249.
- [27] LECA E, DORMIEUX L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material[J]. Géotechnique, 1990, 40(4):581-606.
- [28] MATSUO T, MORI K, HIRAOKA N, et al. Study of SPH simulation on tunnel face collapse[J]. International journal of geomate, 2016, 10(22):2077-2082.
- [29] CHENG X S, ZHENG G, SOGA K, et al. Post-failure behavior of tunnel heading collapse by MPM simulation[J]. Science China technological sciences, 2015, 58(12): 2139-2152.

(责任编辑 章践立)