

城市泥水盾构隧道泥膜稳定性模拟分析*

周宇¹ 张志民² 熊昊^{2,3,4} 陈凡² 韩凯航^{2,3,4} 黄明峰⁵

(1. 厦门地铁建设有限公司, 361010, 厦门; 2. 深圳大学土木与交通工程学院, 518060, 深圳;

3. 深圳市地铁地下车站绿色高效智能建造重点实验室, 518060, 深圳;

4. 滨海韧性城市基础设施教育部重点实验室, 518060, 深圳;

5. 中交一公局厦门工程有限公司, 361021, 厦门)

摘要 [目的] 由于厦门地铁3号线工程在隧道施工中, 泥水盾构始发端头隧道砂层与海水有贯通联系作用, 盾构始发时可能发生涌水、涌泥及地面塌陷事故。故有必要研究城市泥水盾构隧道泥膜的稳定性, 以确保施工安全。[方法] 采用DEM-CFD(离散元-计算流体力学)耦合方法, 构建了模拟不同渗透条件下泥膜成形和渗透过程的数值模型, 并通过分析泥浆颗粒的空间分布、泥膜液压变化及力链网络来评估泥膜的抗渗稳定性。[结果及结论] 砂粒尺寸和泥浆黏聚力的增加分别抑制和增强了泥膜的成形及其在动态水力载荷下的长期抗渗性和机械稳定性。黏聚力的增加对泥膜成形密度和抗渗稳定性都有提升作用, 然而对于粒径较小地层的泥膜抗渗稳定性的提升有限。在砂质地层中, 当孔隙较大且黏聚力低时, 泥膜易崩塌, 但增大黏聚力可有效增强稳定性。因此, 通过选配合适的粒径比和泥浆黏聚力, 可以提高泥膜的抗渗稳定性以满足工程需求。

关键词 地铁施工; 泥水盾构隧道; 泥膜稳定性; 数值模拟
中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.006

Simulation Analysis on the Mud Film Stability for Urban Slurry Shield Tunnel

ZHOU Yu¹, ZHANG Zhimin², XIONG Hao^{2,3,4}, CHEN Fan², HAN Kaihang^{2,3,4}, HUANG Mingfeng⁵

(1. Xiamen Metro Construction Co., Ltd., 361010, Xiamen, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, 518060, Shenzhen, China; 3. Shenzhen Key Laboratory of Green, Efficient and Intelligent Construction of Underground Metro Station, Shenzhen University, 518060, Shenzhen, China; 4. Key Laboratory of Coastal Urban Resilient Infrastructures, Shenzhen University, 518060, Shenzhen, China; 5. China First Highway Engineering Xiamen Engineering Co., Ltd., 361021, Xiamen, China)

Abstract [Objective] As the sand layer located at the launching end of the slurry shield section is connected with sea-

water during the tunnel construction of Xiamen Metro Line 3, accidents like water and mud gushing, ground collapse may occur when the shield starts. Therefore, it is necessary to study the mud film stability of urban slurry shield tunnel to ensure the construction safety. [Method] A numerical model is developed to simulate the mud film formation and infiltration process under different permeability conditions by using the DEM-CFD (Discrete Element Method-Computational Fluid Dynamics) coupling method. The impermeability stability of the mud film is evaluated by analyzing the spatial distribution of slurry particles, the mud film hydraulic pressure changes, and the force chain network. [Result & Conclusion] The increase in sand particle size and slurry cohesion inhibits and enhances mud film formation, its long-term impermeability and mechanical stability under dynamic hydraulic loads respectively. The increase in cohesion enhances both the mud film forming density and the impermeability stability. However, the enhancement of impermeability stability is limited for the mud film on smaller grain size stratum. In sandy stratum with large pores and low cohesion, the mud film is prone to collapse, but increasing the cohesive force can effectively enhance its stability. Therefore, by selecting the appropriate particle size ratio and slurry cohesion, mud film impermeability stability can be improved to meet the engineering requirements.

Key words subway construction; slurry shield tunnel; mud film stability; numerical simulation

随着现代城市建设的快速发展, 泥水平衡盾构作为盾构技术中的一种常用方法, 在世界范围内的管道、隧道等建设工程中被广泛使用^[1-2]。通过对泥浆管道系统持续输送的膨润土泥浆施加压力, 使泥浆颗粒在压力作用下向掘进方向的砂质地层渗透, 从而形成稳定的泥膜, 泥浆的渗透过程是影响

* 国家自然科学基金青年科学基金项目(52208354); 国家自然科学基金重大项目(52090084)

隧道面稳定性的重要因素^[3-4]。泥膜应具有稳定的抗渗性并将气仓压力传递给前方土壤,然而在隧道检测的过程中存在由泥浆的强渗透性产生的超孔隙水压力,导致传递到前方地层的压力减小,从而降低掘削面的稳定性。泥水平衡盾构机在富水的砂质地层掘进过程中,若出现掘削面失稳的现象,会产生超挖、泥水喷发现象甚至造成地面坍塌,造成人员伤亡与财产损失。因此,泥水平衡盾构过程中泥膜的渗透机理及抗渗稳定性评估具有重要研究意义。

国内外学者已对掘削面稳定性问题进行了研究,然而现场掌子面的失稳难以精确控制,试验的成本和风险很大且分析过程过于依赖经验,因此室内模型试验是常见的有效手段,通过对膨润土泥浆加压进行了多种模型试验来观察浆液的渗透过程。文献[5]研究了不同渣土量、膨水比及地层复合比对泥浆的渗透规律及动静态泥膜成膜规律的影响;其结果表明泥浆性质受外加剂的影响较大,适宜的渣土量能显著提高泥膜的抗渗性。文献[6]利用自制的渗透装置,对浆液分级加压,分析了泥膜成形过程以及泥浆渗流量、渗透系数、泥皮厚度之间的关系;其结果表明,泥浆颗粒粒径的增加能提高泥膜成形效率,泥浆渗透形成的泥皮稳定性差,不能判定有效泥膜的形成。文献[7]通过室内试验模拟掘进过程,研究水位对掘削面失稳破坏形式的影响;其结果表明,由泥浆颗粒渗透产生的超孔隙水压力会降低泥浆有效支护力。试验宏观现象被归纳总结成经验,然而地层和泥浆的细观特性在室内试验中难以被量化。

本文基于厦门地铁 3 号线五缘湾站至刘五店站区间(以下简称“五刘区间”)泥水盾构工程,地质断面图如图 1 所示。该段采用通用楔形管环,每环由 6 块管片组成。管环外径为 6.7 m,内径为 6.0 m,壁厚为 0.35 m,环宽为 1.5 m,混凝土强度等级为 C55,抗渗等级为 P12。五刘区间泥水盾构始发端头原为潮间带,后经人工填筑;其纵向主要地层为填砂、淤泥、黏土、粉质黏土、中粗砂、全风化花岗闪长岩、散体状强风化花岗岩及碎裂状强风化花岗闪长岩。始发端头隧道砂层与海水有贯通联系作用,盾构始发时可能发生涌水、涌泥及地面塌陷事故。因此,本文基于 DEM-CFD(离散元-计算流体动力学)耦合法,构建了考虑不同泥砂粒径比和泥浆黏聚力的泥浆颗粒渗透模型,量化了泥浆颗粒的空间分

布、泥膜成形后的液压变化及力链网络等宏细观力学响应;指出了砂粒尺寸和泥浆黏聚力对泥膜的影响趋势,为该地区后续工程提供理论依据。

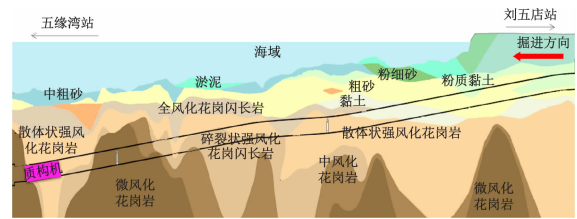


图 1 地质断面图

Fig. 1 Geological cross section

1 数值方法

离散颗粒的运动特征可用牛顿第二运动定律计算,平移和旋转运动的控制方程如下:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = m_p g + \sum F + F_{fp} \quad (1)$$

$$I_p \frac{d\omega_p}{dt} = \sum M \quad (2)$$

式中:

m_p ——粒子的质量;

I_p ——转动惯量;

F_{fp} ——流体产生的相互作用力;

$\sum F$ ——与其他颗粒以及边界产生的总接触力;

g ——重力加速度;

t ——时间;

$\sum M$ ——与其他颗粒以及边界产生的总扭矩;

ω_p ——粒子的角速度;

v_p ——粒子的平动速度。

DEM 能够准确模拟颗粒之间的碰撞、摩擦、黏附等复杂相互作用,因此对于颗粒系统的行为研究具有独特的优势。

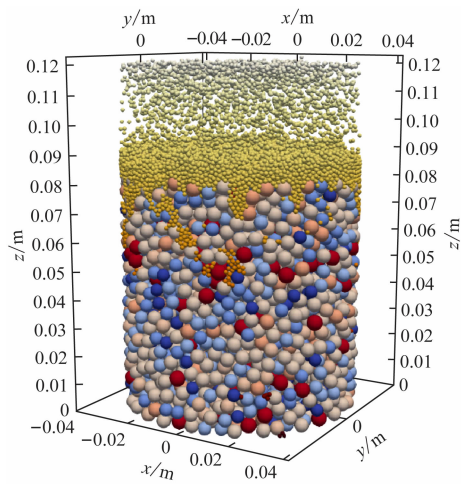
流体流动过程由连续性方程和局部平均的 Navier-Stokes(纳维-斯托克斯)方程控制。本文中所采用 DEM-CFD 耦合法首先需建立颗粒-流体系统的几何模型,并对系统中的几何形态和粒子特性进行确定;然后,定义颗粒与颗粒之间的接触,对颗粒相进行数值求解,计算离散颗粒的运动轨迹和运动状态。完成 DEM(离散元分析)循环后,CFD(计算流体动力学)求解器接收通过 DEM-CFD 耦

合过程的粒子信息(即每个粒子的速度和位置)。在传递信息的过程中计算孔隙度和相互作用项。随后求解流体流动的控制方程,更新流场分布和速度场分布。流体的运动学信息用于计算下一阶段施加在粒子上的液压力。重复以上步骤,直到颗粒-流体系统达到稳定状态或满足预定条件。

2 泥膜渗透模拟及验证

基于 DEM-CFD 耦合法建立了一系列模型,研究泥膜在不同条件下的形成过程及累增水压下的抗渗稳定性。基于 DEM-CFD 耦合法的泥膜渗透模型如图 2 所示。随机将 0.9 kg 的多分散粗颗粒插入直径为 84 mm 的 DEM 圆柱域并在重力作用下使其自由沉积,形成砂柱后模拟泥水盾构掘进的前方地层。当地层稳定后,从砂柱上方的细颗粒入口处释放 0.17 kg 的泥浆颗粒,这些颗粒随后在水力作用下在砂柱表面形成一层泥膜。考虑了 2 种不同级配的多分散粗颗粒砂,以及直径为 1.5 mm 的细颗粒,如图 3 所示。 D_{85} 为粒径小于该值的粗颗粒质量占总粗颗粒质量的 85%。 d_{15} 为粒径小于该值的细颗粒质量占细颗粒质量的 15%。在探究砂粒(即粗粒)级配对模拟过程的影响时,考虑了 2 种不同的情况,即 $D_{85}/d_{15}=3.3$ 和 $D_{85}/d_{15}=4.2$ 。此外,为研究不同渗透条件下泥膜的形成过程及其抗渗稳定性,黏聚力模型采用 Johnson-Kendall-Roberts (JKR) 颗粒接触模型:

$$F_{JKR} = \sqrt{8\pi\Gamma ER} \tag{3}$$



注: x、y、z 为模型水平轴方向。
图 2 基于 DEM-CFD 耦合法的泥膜渗透模型
Fig. 2 Mud film infiltration model based on DEM-CFD coupling method

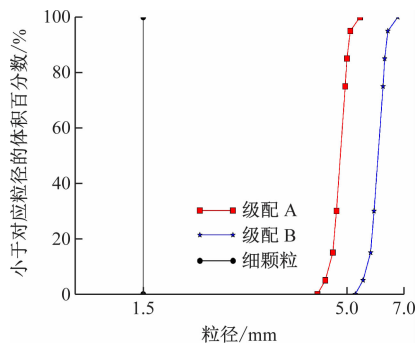


图 3 级配曲线示意图
Fig. 3 Schematic diagram of gradation curves

式中:
 F_{JKR} ——法向黏聚力;
 Γ ——表面能参数;
 E ——有效弹性模量;
 R ——接触半径。

本研究考虑了 4 个不同的砂浆黏聚力(泥浆表面能为 $1 \sim 4 \text{ J/m}^2$),模型参数设置如表 1 所示。流体域在圆柱域顶部设置入口边界为随时间累增的压力入口,前 1 s 维持 30 kPa 稳定的压力用于砂柱和泥膜的形成。在 $1 \sim 10 \text{ s}$ 的时间内,进行加压渗透过程以研究不同形成条件下泥膜的抗渗稳定性,其入口边界的压力设定范围如图 4 所示。圆柱域底部设置出口压力维持在 0。

表 1 模型参数设置	
Tab. 1 Model parameter settings	
参数	参数值
流体密度/(kg/m^3)	1×10^3
流体动态黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	1×10^{-3}
CFD 时间步大小/s	1×10^{-3}
砂粒密度/(kg/m^3)	2.3×10^3
泥浆颗粒密度/(kg/m^3)	1.7×10^3
DEM 时间步大小/s	3.0×10^{-7}

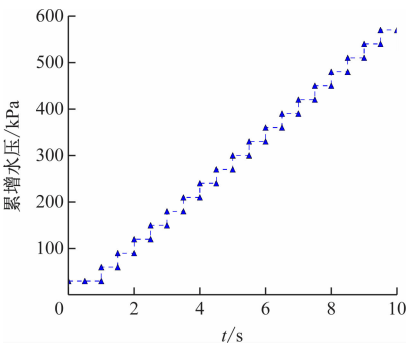


图 4 泥浆入口边界的压力设定范围
Fig. 4 Pressure setting range for slurry inlet boundary

本研究基于文献[8]的泥浆渗透试验,设置了 D_{85}/d_{15} 值等于3.33且泥浆表面能为 2.0 J/m^2 的渗透模型进行验证。试验结果和数值模拟的液压变化标定如图5所示,a点设置于泥砂分界面上方1 cm处,b点和c点分别设置于界面下方3 cm和5 cm处。由图5可知:a点和c点的压力变化趋势与试验结果十分吻合。c点的差异是由于局部平均的DEM-CFD算法对低渗透土壤的影响,但其能够有效地反映颗粒的运动规律以及细观特性。总体而言,基于DEM-CFD耦合的泥浆渗透模型结果与先前的试验研究相吻合并展现出良好的整体相关性。

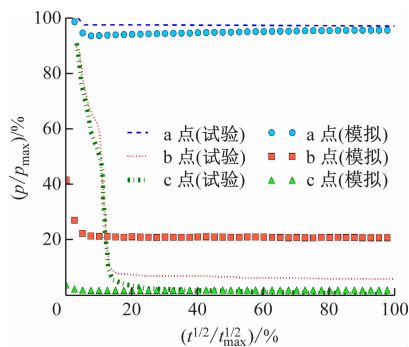


图5 试验结果和数值模拟的液压变化标定

Fig. 5 Hydraulic changes calibration of experimental results and numerical simulations

3 模拟计算结果分析

3.1 泥浆颗粒分布

图6绘制了位于0.08 m以上的泥浆颗粒在水平切割面上的分布,从俯视图的视角展示泥浆颗粒的累积数。从图6中可以看出:随着黏聚力的增加,泥膜的成形密度和抗渗稳定性均有所提升。然而,由于泥膜本身骨架的致密性较高,这种提升效果并不显著。此外,泥浆颗粒主要通过边缘的优先流道扩大其渗透范围。当砂质地层孔隙较大且黏聚力较低时,难以形成完整的泥膜;同时,边界上的优先流道会导致泥浆颗粒的持续渗透,随着液压的增大,泥膜形态可能发生崩坏。因此,提高黏聚力有助于形成分布均匀的泥膜,从而增强其对后续的液压渗透的抵抗能力。

泥浆颗粒的纵向分布反映其渗透程度。在泥膜成形稳定时($t = 1 \text{ s}$)的细颗粒纵向分布如图7所示。从图7中可以看出,当砂粒级配较小时,黏聚力对泥膜成形的影响较小,低渗透性的多孔介质能够

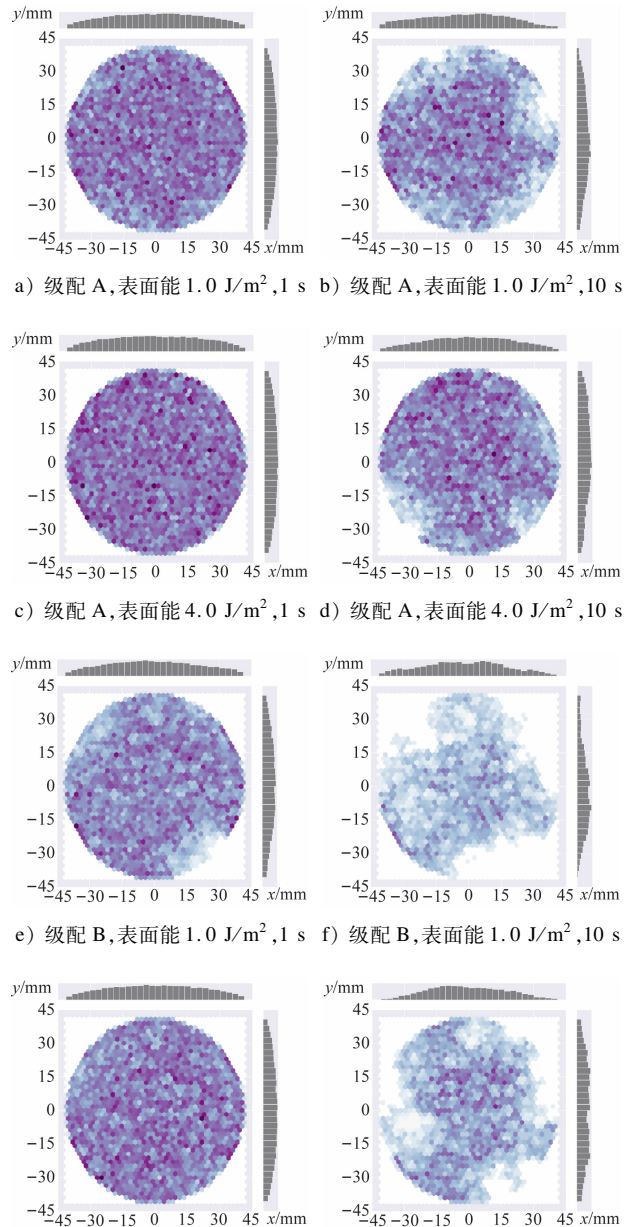
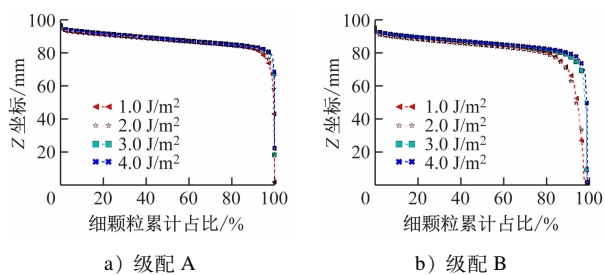


图6 泥浆颗粒在水平切割面上的分布(0.08 m以上的泥浆颗粒)

Fig. 6 Distribution of slurry particles on the horizontal cutting surface (slurry particles above 0.08 m)

有效地阻碍泥浆颗粒的运输。当砂粒级配增大,砂粒骨架的渗透性增强,泥浆颗粒在砂粒层顶部的累积显著变少,形成的泥膜更薄。随着泥浆颗粒之间的黏聚力增大,泥浆颗粒在多孔介质中的堵塞越明显。

图8为泥膜渗透过程结束时($t = 10 \text{ s}$)的细颗粒纵向分布图。从图8可以看出:在随时间增加的液压条件下,砂粒级配的影响十分明显,级配A条



注: Z 表示模型竖向轴方向。

图 7 泥膜成形时泥浆颗粒纵向分布

Fig. 7 Longitudinal distribution of slurry particles during mud film formation

件下的泥膜基本能够维持颗粒的分布曲线形态;泥浆表面能对泥膜稳定性的提升是有限的,表面能 3.0 J/m^2 时,泥膜抗渗性更强;当砂粒级配增大时,泥浆颗粒在给定的 4 种黏聚力情况下都显示出明显的颗粒渗透且随着黏聚力增大,泥膜抗渗性越强。

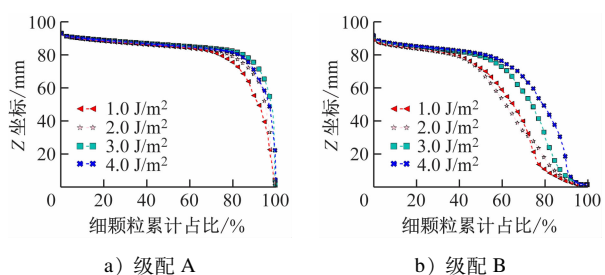


图 8 泥膜渗透结束时泥浆颗粒纵向分布

Fig. 8 Longitudinal distribution of slurry particles at the end of mud film infiltration

3.2 泥膜液压变化

沿模拟中心轴在 $0 \sim 0.12 \text{ m}$ 区间提取 60 个均匀分布点的液压变化,绘制出液压增加至 90 kPa 时中心轴上的液压演变(见图 9)。由图 9 可知:液压在泥浆与砂粒的混合物中持续下降,在底部约减少至 0。砂粒较小时,不同黏聚力模型的液压分布几乎没有差异,黏聚力的增加对抗渗性能提升很微弱。液压的纵向变化斜率先迅速减小后逐渐增大是由于纵向的堵塞的泥浆颗粒分布差异。提升黏聚力对砂粒较大的地层影响更明显,在低黏聚力作用下斜率增大更早,说明在地层前端就已经有高渗透率的区段。

图 10 绘制出渗透过程结束时($t = 10 \text{ s}$)中心轴上的液压梯度变化。砂粒较小时,整体的液压梯度沿纵向在泥膜域内逐渐增大,达峰值后迅速下降,随后缓慢下降至模型底部, 3.0 J/m^2 时峰值最高,泥膜抗渗性更强。砂粒增大后,泥膜形态的完整性

低,峰值随黏聚力的减小而降低。此外,在 $Z = 0.01 \text{ m}$ 的位置附近产生随黏聚力降低愈发明显的转折点,这反映了底部堆积的泥浆颗粒簇的数量变多,低抗渗性会造成泥浆颗粒的持续向前渗透,需要防止该现象在盾构应用中出现。

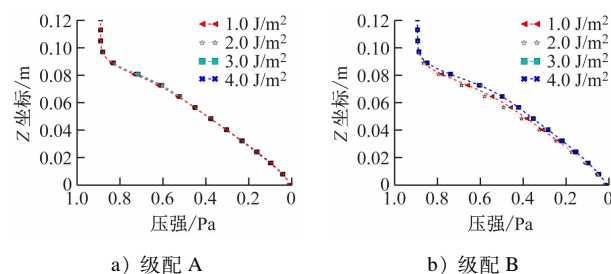


图 9 液压纵向变化

Fig. 9 Hydraulic longitudinal change

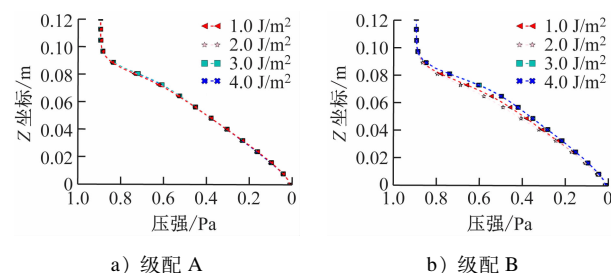


图 10 液压梯度纵向变化

Fig. 10 Hydraulic gradient longitudinal change

3.3 力链网络分析

图 11 显示了渗透结束时法向接触力网络。以粗细随接触力大小而定的管表征法向接触力,可以看出砂粒较小时,虽然在底部有部分强力链,但总体接触力的各向异性程度较低,这说明完整的泥膜能够有效传递较稳定应力至掘剖面和前端地层;砂粒级配增大时,泥浆砂粒混合土壤的非均质性强,砂粒之间存在相当大的力链,泥膜的不完整使泥浆压力直接传递到地层,这对掘剖面的稳定性极为不利。

4 结语

本文基于厦门地铁 3 号线地铁盾构隧道工程,通过多工况数值模拟研究不同渗透条件下泥膜的形成过程及其抗渗稳定性,得出如下结论:

1) 黏聚力增加对泥膜成形密度和抗渗稳定性均有所提升。黏聚力对粒径较小地层的泥膜抗渗稳定性的提升是有限的,低渗透性的多孔介质能够有效地阻碍泥浆颗粒的渗透。当砂质地层孔隙较

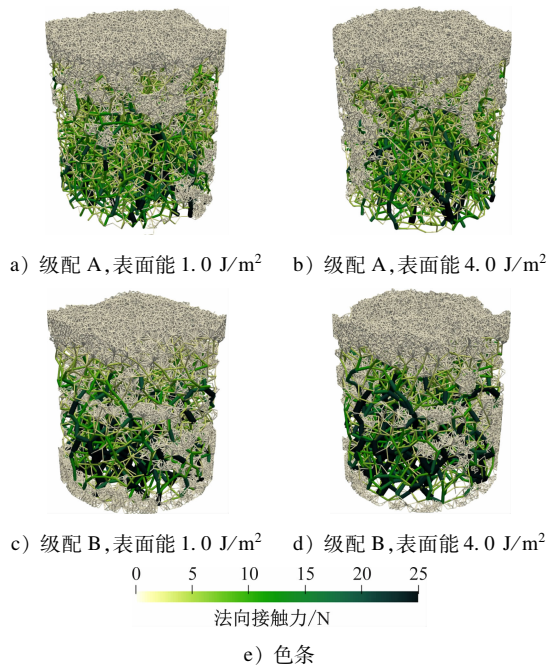


图 11 渗透结束时法向接触力网络

Fig. 11 Normal contact force network at the end of infiltration

大且黏聚力低时,无法形成完整的泥膜,泥膜形态易崩坏,增大黏聚力能够有效增强稳定性。

2) 砂粒级配对泥膜成形和渗透过程的影响显著,低抗渗性会使泥浆颗粒持续向前渗透,堆积的泥浆颗粒簇的数量变多,泥膜不完整使泥浆压力直接传递到地层,这对掘剖面的稳定性极为不利。

参考文献

- [1] 占传忠. 复合地层盾构的适应性及掘进参数的关联性分析[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(增刊1): 97.
ZHAN Chuanzhong. Adaptability of shield in composite strata and correlation analysis of driving parameters[J]. Coal Geology of China, 2018, 30(S1): 97.
- [2] 张刚. 粉质黏土地层中盾构土压平衡和泥水平衡掘进试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(5): 129.
ZHANG Gang. Experimental study on shield tunneling with earth pressure balance and mud water balance in silty clay layer[J]. Railway Construction Technology, 2022(5): 129.
- [3] 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.

LIU Haining, ZHANG Yafeng, LIU Handong, et al. Experimental study on active failure modes of slurry shield-driven tunnel faces in sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(3): 572.

- [4] 叶伟涛, 王靖禹, 付龙龙, 等. 福州中粗砂地层泥水盾构泥浆成膜特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1260.

YE Weitao, WANG Jingyu, FU Longlong, et al. Laboratory test and characteristic of filter film formation of slurry shield in medium-coarse sand stratum in Fuzhou[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1260.

- [5] 宋洋, 李昂, 王韦颐, 等. 泥岩圆砾复合地层泥水平衡盾构泥浆配比优化研究与应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 4054.
SONG Yang, LI Ang, WANG Weiye, et al. Research and application of mud proportioning optimization of slurry balance shield in mudstone and gravel composite stratum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 4054.

- [6] 林钰丰, 张尚达, 方勇, 等. 不同渗透系数地层中泥浆渗透成膜试验研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 190.

LIN Yufeng, ZHANG Shangda, FANG Yong, et al. Experimental study on filter cake for slurry infiltration in different permeability strata[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 190.

- [7] 周鹏, 张尚达, 董冰. 泥水平衡盾构开挖面失稳特征模拟试验研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(3): 114.

ZHOU Peng, ZHANG Shangda, DONG Bing. Simulation test study on instability characteristics of slurry balance shield excavation face[J]. Railway Engineering, 2022, 62(3): 114.

- [8] XU T, BEZUIJEN A. Experimental study on the mechanisms of bentonite slurry penetration in front of a slurry TBM[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019, 93(11): 103052.

· 收稿日期:2023-03-28 修回日期:2023-10-04 出版日期:2024-10-10

Received:2023-03-28 Revised:2023-10-04 Published:2024-10-10

· 第一作者:周宇,高级工程师,535375440@qq.com

通信作者:熊昊,助理教授,xionghao19529@szu.edu.cn

· ©《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

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821