

基于盾构机挖掘效率提升的盾构机关键施工参数优化设计

王晓旭

中铁十九局集团轨道交通工程有限公司，北京
Email: 717056647@qq.com

收稿日期：2020年12月20日；录用日期：2021年1月12日；发布日期：2021年1月21日

摘要

刀盘开口率是刀盘设计的关键参数，是决定盾构机是否稳定高效掘进的关键参数之一。在充分理解刀盘与开挖面相互作用的基础上，针对某地铁的粉砂层土体进行三轴试验应力-应变数值模拟仿真，采用 EDEM (Engineering + Discrete Element Method) 通用 CAE 软件进行离散元三轴试验和盾构刀盘不同开口率下的挖掘数值模拟研究，分析了不同开口率对进入土仓土体质量的影响，运用回归分析得出了刀盘开口率、刀盘转速和挖掘面土体进入土仓的效率的函数关系式，最后得出盾构机刀盘设计参数如下：刀盘转速的选择范围为 6~8 r/min，刀盘开口率为 30% 时，刀盘开口率的排土量介于 100%~108% 之间。

关键词

土压平衡盾构，刀盘开口率，离散元

Optimization Design of Key Construction Parameters of Shield Tunneling Machine Based on Improvement of Mining Efficiency

Xiaoxu Wang

China Railway 19th Bureau Group Rail Transit Engineering Co., LTD, Beijing
Email: 717056647@qq.com

Received: Dec. 20th, 2020; accepted: Jan. 12th, 2021; published: Jan. 21st, 2021

Abstract

The opening ratio of cutter head is a key parameter of cutter head design and is one of the key parameters to determine whether the shield machine is stable and efficient. On the basis of fully un-

derstanding the interaction between the cutter head and the excavation surface, the stress-strain numerical simulation of the triaxial test on the silt soil of a subway is carried out, using the general CAE software EDEM (Engineering + Discrete Element Method), the discrete element triaxial test and the numerical simulation of excavation under different opening rate of shield cutter head are carried out, and the influence of different opening rate on the mass of soil entering the silo is analyzed, based on the regression analysis, the functional relations of the cutter head opening rate, the cutter head rotating speed and the efficiency of the soil mass entering the soil chamber on the excavation face are obtained, when the open ratio of the cutter head is 30%, the discharge of the open ratio of the cutter head is between 100% and 108%.

Keywords

Earth Pressure Balance Shield, Opening Ratio of Cutter Head, Discrete Element

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国民经济的快速发展, 隧道工程建设成为提高交通运输效率的有效途径, 而盾构法因其安全、快速等优势成为隧道施工的主要方法, 盾构隧道工程遍布全国各个地区, 被广泛应用于公路、铁路和城市地铁隧道工程建设[1] [2]。其中, 土压平衡盾构具有成本相对较低、出土效率高、适用地层范围广等优点, 在我国各类隧道施工中得到了广泛的应用, 占 60% 以上[3]。开口面积与刀盘总面积之比, 即开口率是决定刀盘拓扑结构的关键参数, 在不同的地质条件和施工要求下有不同的要求。刀盘开口率是刀盘设计时需要确定的重要参数[4]。如果刀盘开口率选择不恰当(过大或过小), 就会影响盾构的掘进, 造成地表塌陷或者隆起, 危及盾构施工工地附近的建筑物安全。不同的地质条件下, 刀盘开口率的大小选择是不同的, 比如在黏土地层中, 选择较小的开口率有利于开挖面的稳定; 但在砂砾石地层中, 较小的开口率就会造成排土困难, 引起地表隆起[4] [5]。

盾构机挖掘施工事故主要是由于掘进面压力与盾构密封舱压力不平衡所导致的土体坍塌事故, 而与其密切相关有刀盘开口率, 土仓以及通过排土量调节密封舱内部压力的螺旋输送机。本文选择了一种离散方法研究刀盘开口率, 而不是常用的有限元或有限元差分方法。离散元法最开始应用到岩土工程中, 研究非连续性刚体的力学行为, 广泛应用在模拟岩体挖掘问题中, 随着离散元在我国的快速发展, 已经广泛运用到复杂环境作用下的颗粒行为研究[6]。

目前少有对粉砂地层盾构施工的研究, 本文依托离散元法对盾构挖掘中的开口率进行模拟研究, 通过分析结果对盾构机刀盘开口率、转速和土体颗粒进入土舱的效率之间的关系进行研究。

2. EDEM 三轴试验

本文针对某地铁的粉砂层土体进行三轴试验应力 - 应变数值模拟仿真, 采用 EDEM (Engineering + Discrete Element Method)通用 CAE 软件进行离散元三轴试验和盾构刀盘不同开口率下的挖掘数值模拟研究[7] [8]。

2.1. 三轴试验参数设置

三轴试验的模拟方法是將这种颗粒试样限制在圆柱体内如图 1(a)所示, 圆柱筒是用于生成粉砂颗粒

的空间模型。模拟试验步骤和室内三轴试验应保持相同，其顶面和底部设置模拟加力板，周边模拟土体围压，由样品的两顶面板实现加载，通过在圆柱筒顶部和底部墙面指定一定的速度，以一种受应变的方式控制加载。颗粒试样与墙体之间的系数为零，从而避免了颗粒试样与加载板之间的摩擦。在试验模拟的所有阶段，侧面的速度由一个数值伺服机构自动控制，该伺服机构在试样内保持恒定的围压应力，其中试验过程中的围压通过编写颗粒的 API 体积力插件来实现，三轴试验试样破坏示意图如图 1(b)所示。在参数标定过程中，通过将已有的实验数据与数值结果进行比较，确定了模型参数，找到数值模拟合适的参数，然后对盾构挖掘的离散元模型进行参数标定。

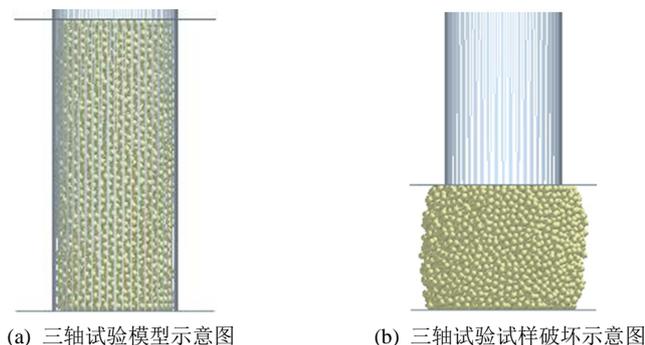


Figure 1. Numerical simulation of triaxial test
图 1. 三轴试验数值模拟

三轴试验模型的参数设置如表 1 所示，三轴试验参数初值设定如表 2 所示。

Table 1. Material parameters of triaxial test model

表 1. 三轴试验模型材料参数

模型	密度(kg/m ³)	泊松比	加载速度(mm/min)	剪切模量(Pa)
加载盘	7800	0.3	0.01	7e+10
柔性墙体	2630	0.35	/	1e+06
粉砂颗粒	1890	0.27	/	4.807e+06

Table 2. Initial setting of triaxial test parameters

表 2. 三轴试验参数初值设定

接触部位	静摩擦系数	滚动摩擦系数	恢复系数
颗粒 - 加载	5.03	0.02	0.31
颗粒 - 边界	5.03	0.02	0.31
颗粒 - 颗粒	5.03	0.02	0.31

2.2. 三轴模拟试验加载机理

加载盘的加载机理其实是通过调节速度，使三轴试验模型达到需要的应力值。其中轴向应变公式为：

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{\frac{1}{2}(L + L_0)} \quad (1)$$

式中， L 为圆筒变形后的长度， L_0 为圆筒初始长度。

2.3. 三轴试验结果分析

通过不断调整粉砂土层颗粒的参数进行模拟, 得到围压为 200 kPa 条件下土体颗粒的应力 - 应变曲线。查找文献关于粉砂室内三轴试验结果, 并将它们和模拟三轴试验应力 - 应变结果之间的关系进行对比, 其结果如图 2 所示[9] [10]。

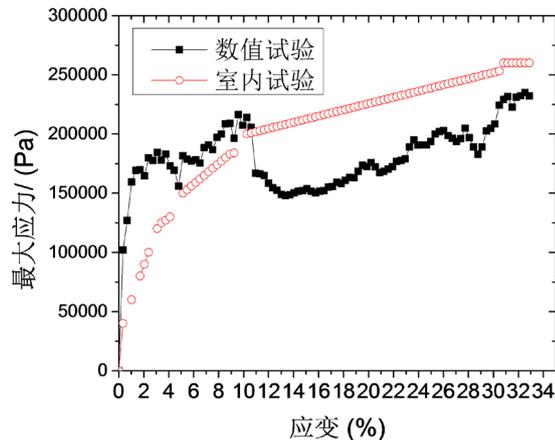


Figure 2. Stress-strain relationship curve at confining pressure of 200 kPa
图 2. 围压 200 kPa 时的应力 - 应变关系曲线

由图 2 可知, 在围压为 200 kPa 条件下模拟结果和实际结果曲线基本保持一致, 所以可以得出模拟结果基本能够准确反映粉砂土层的宏观参数, 说明这种方法进行模拟是可行的。

3. 盾构挖掘离散元仿真模型的建立

3.1. 几何模型的建立

通过 SolidWorks 三维软件建立仿真的三维几何模型。模型主要包括刀盘、土舱和螺旋输送机三个部分。盾构刀盘采用辐板式设计, 刀盘直径为 6.4 m, 土舱的长度为 1 m, 螺杆长度为 10 m, 直径为 1 m, 节距为 0.68 m, 为螺旋输送机倾角为 25°, 盾构刀盘开口率初始设计分别为 30%、和 60%, 如图 3 所示。

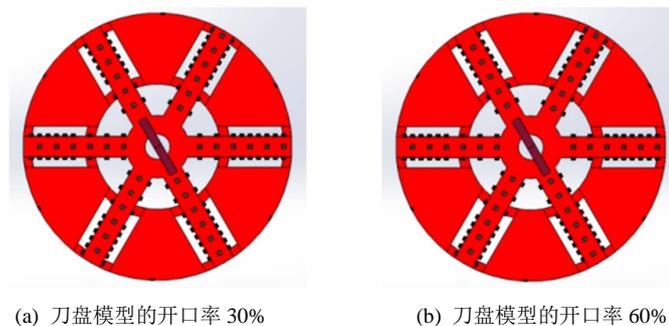


Figure 3. Four cut-rate cutter head models of cutter head (Established in SolidWorks)
图 3. 刀盘的两两种开口率刀盘模型(SolidWorks 中建立)

3.2. 盾构机挖掘离散元模型的建立

在软件前处理功能模块中设置土壤模型和盾构材料参数。土体和盾构机物理力学参数、刀盘和土体颗粒的接触参数, 离散元的仿真参数和本文刀盘仿真的技术参数方案设置分别如表 3~6 所示。

Table 3. Soil and shield material parameters

表 3. 土体和盾构材料参数

名称	材料	密度(kg/m ³)	泊松比	弹性模量(MPa)	颗粒半径(mm)
土层	粉砂	1890	0.27	12.21	30
盾构	Q345	7850	0.3	2.1 × 10 ⁵	-

Table 4. Contact parameters of cutter head and soil mass

表 4. 刀盘和土体的接触参数

接触部位	静摩擦系数	滚动摩擦系数	恢复系数
颗粒 - 边界	5.03	0.02	0.31
颗粒 - 颗粒	5.03	0.02	0.31
颗粒 - 盾构	0.7	0.001	0.25

Table 5. Simulation parameters

表 5. 仿真参数

名称	单位	数值	名称	单位	数值
CPU 核数	个	4	网格	mm	3 R
瑞丽时间步	s	6.6E-4	仿真时间	h	5.5

Table 6. Scheme of cutting head technical parameter (The cutting head tunneling speed was 60 mm/min)

表 6. 刀盘技术参数方案(刀盘掘进速度为 60 mm/min)

实验组	刀盘开口率(ξ%)	刀盘转速(r/min)	实验组	刀盘开口率(ξ%)	刀盘转速(r/min)
1	30%	1	6	60%	1
2	30%	2	7	60%	2
3	30%	4	8	60%	4
4	30%	6	9	60%	6
5	30%	8	10	60%	8

边界条件的设置: 将盾构机三维几何模型导入到 EDEM 2018 中, 离散元模型边界条件主要包括掘进界面水土压力(土体颗粒厚度为 0.8 m)、系统重力(通过施加-Y 方向的重力加速度来实现)、掘进速度和刀盘旋转速度。在盾构掘进模拟前, 在掘进面和土仓中设置颗粒工厂生成一定数量的土体颗粒, 使掘进界面和螺旋输送机之间充满土体颗粒, 以此来模拟盾构挖掘时的土层条件[11]。然后设置盾构掘进速度为 60 mm/min, 刀盘转速为 1 r/min, 螺旋转速为 10 r/min。当土体颗粒被螺旋输送机带出土仓, 达到螺旋输送机出口处, 在重力作用下降落, 然后被系统删除计算。制造盾构埋深为 17 m 时的水土压力条件, 开启掘进界面的压力伺服控制系统, 当压力达到主土压力和被动土压力之间和整个系统达到动态平衡时停止压力伺服控制系统[12]。

4. 离散元数值仿真模拟结果及分析

4.1. 土仓内颗粒速度分析

以盾构刀盘开口率为 30%和旋转速度为 1 r/min 时的刀盘磨损的分布情况为例, 当模拟时间为 60 s

时，盾构机土舱速度分布情况如图 4 所示。在 EDEM 后处理中对土体颗粒设置速度颜色梯度，速度小的土体颗粒显示为蓝色，速度中间的土体颗粒显示为绿色，速度大的土体颗粒显示为红色[13]。

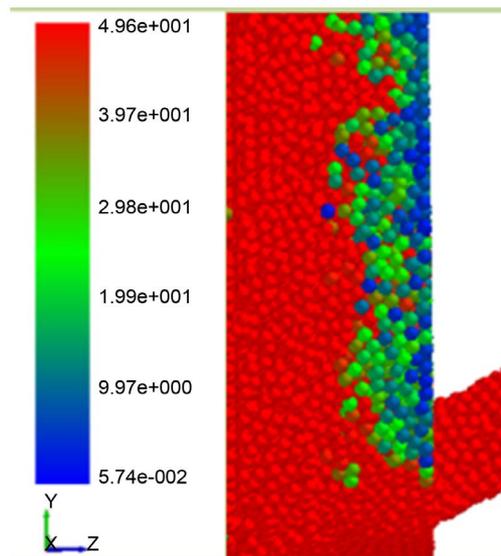


Figure 4. Velocity distribution of soil tank
图 4. 土舱速度分布情况

由图 4 可知，在螺旋输送机入口处土体颗粒的速度比较大，说明螺旋输送机排土量对土舱土体的流动性起到主导影响，土体颗粒流动比较理想，此处不会因为土体颗粒而产生堆积现象，也就不会产生应力集中现象，提供螺旋轴良好的工作环境。靠近刀盘处的左侧土体颗粒速度比较大，往右依次降低，说明刀盘挖掘面土体颗粒为平衡土舱缺失的土体颗粒，通过刀盘开口部分进入土舱以稳定整个挖掘过程。

4.2. 不同刀盘开口率下挖掘效率分析

刀盘开口率分别为 30% 和 60% 及刀盘转速分别为 1 r/min、2 r/min、4 r/min、6 r/min 和 8 r/min 时，刀盘挖掘面土体进入土舱的土体质量随时间的变化如图 5 所示。通过软件后处理功能每 10 秒记录一次进入土舱的颗粒质量，其横坐标代表时间(单位 s)，纵坐标代表挖掘面土体进入土舱随时间的变化趋势。

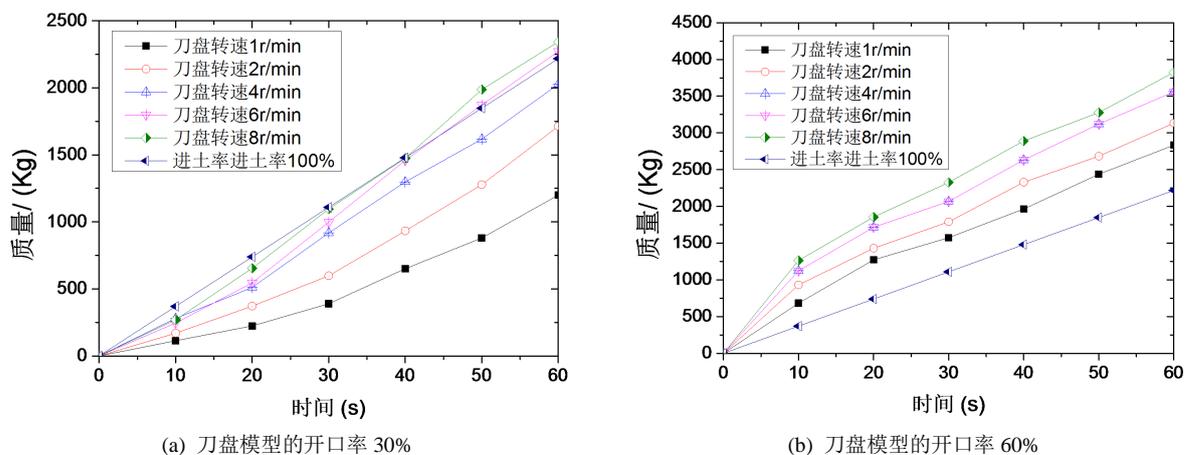


Figure 5. Mass changes at different cutting head opening rate and rotating speed
图 5. 不同刀盘开口率及转速下质量变化

由图 5 可知，每一种刀盘开口率和刀盘转速对应的土体质量变化曲线基本趋势比较平稳，说明刀盘在前进过程中挖掘面土体进入土舱的质量波动比较小，挖掘的离散元仿真过程可以说是基本稳定。不同刀盘开口率和转速下刀盘挖掘面土体进入土舱的土体质量和效率如表 7 所示。

Table 7. Soil mass and efficiency of excavation surface soil entering the soil chamber under different cutter head opening rate and rotation speed

表 7. 不同刀盘开口率和转速下挖掘面土体进入土舱的土体质量和效率

刀盘开口率(%)	刀盘转速(r/min)	土体进入土舱的质量(kg)	土体进入土舱效率(p%)	刀盘开口率(%)	刀盘转速(r/min)	土体进入土舱的质量(kg)	土体进入土舱效率(p%)
30	1	1200.1	54.116	60	1	2832.9	127.743
30	2	1713.2	77.253	60	2	3133	141.276
30	4	2026.3	91.371	60	4	3376.5	152.256
30	6	2272	102.451	60	6	3559.1	160.490
30	8	2343.7	105.684	60	8	3824.3	172.449

运用回归分析对刀盘挖掘面土体进入土舱的质量料率进行拟合，得到不同刀盘开口率及转速下的函数数学模型。不同刀盘开口率下刀盘转速与挖掘面土体进入土舱的效率的关系曲线如图 6 所示。

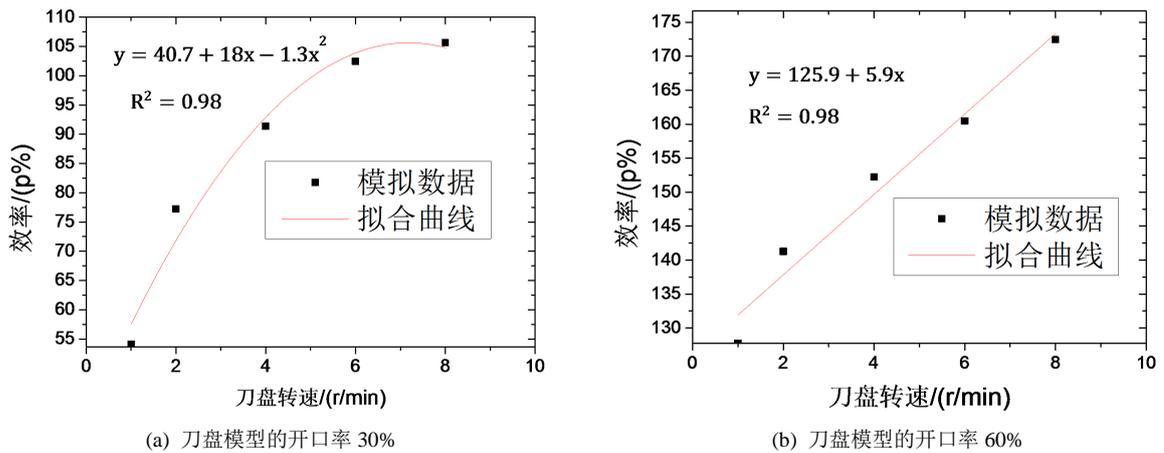


Figure 6. Curve of the relationship between the rotary speed of cutter head and the efficiency of soil entering the soil chamber on the excavation surface under different cutter head opening rates

图 6. 不同刀盘开口率下刀盘转速与挖掘面土体进入土舱的效率的关系曲线

采用非线性曲面模型，数学回归模型公式为 $z = z_0 + ax + by + cx^2 + dy^2 + fxy$ 进行回归分析， x 代表旋转速度、 y 代表挖掘速度和 z 代表挖掘面土体颗粒进入土舱的效率，分析得出数学模型公式中的系数如表 8 所示。

Table 8. Formula coefficients of mathematical model

表 8. 数学模型公式系数

名称	z_0	a	b	c	d	f
数值	-74	4.9	14.3	-0.03	-0.87	0.02
T 绝对值	3.7	6.6	4.1	4.6	2.8	0.6
显著性	高度显著	高度显著	高度显著	高度显著	高度显著	不显著

通过 T 统计量对自变量和因变量之间的显著性进行检验，数学回归方程相关系数 R 为 0.97，取显著性 $\alpha = 0.05$ ，查表得 $t_{0.025(18)} = 2.1$ ，只有 t 值大于 2.1 回归系数显著性成立，反之不成立。由表 5~8 中的 t 值可知，回归方程中的系数 $abcd$ 具有极高的显著性， f 系数没有显著性，所以刀盘开口率、刀盘转速和挖掘面土体进入土舱的效率的函数关系式为：

$$z = -74 + 4.9x + 14.3y - 0.03x^2 - 0.87y^2 \quad (2)$$

式中， x 代表刀盘开口率(x 的取值范围为 30~75)， y 代表刀盘转速(y 的取值范围为 1~8 r/min)， z 代表挖掘面土体颗粒进入土舱的效率(取 p 值)。

刀盘开口率、刀盘转速和挖掘面土体进入土舱的效率的关系曲线如图 7 所示。

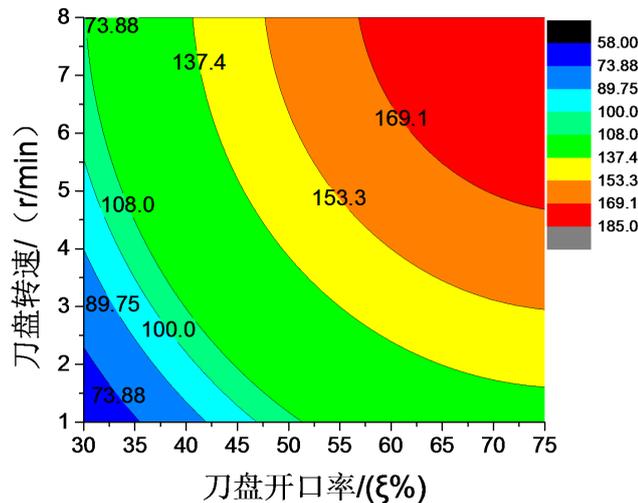


Figure 7. Curve of the relationship between the opening rate of cutter head, the rotary speed of cutter head and the efficiency of soil entering the soil chamber on the excavation surface

图 7. 刀盘开口率，刀盘转速和挖掘面土体进入土舱的效率的关系曲线

由以上仿真结果的数据分析可知，在同一刀盘开口率下，随着刀盘转速的增加，刀盘挖掘面土体进入土舱的土体质量越大；在同一刀盘转速下，随着刀盘开口率的增加，刀盘挖掘面土体进入土舱的土体质量越大。在选择刀盘开口率时，考虑到施工中不能产生地面隆起和沉降现象，以及被动土压力对刀盘的压力损伤较大，应选择刀盘挖掘面颗粒进入土舱的效率为 100%~108%之间的值[14]。因为刀盘转速在 6~8 r/min 之间切削效率最高，通过式 2 计算得刀盘转速分别为 6 r/min、7 r/min、8 r/min， z 取值分别为 100 和 108 时，对应的刀盘开口率如表 9 所示。

Table 9. The corresponding relationship among the rotary speed, the rate of soil discharge and the rate of opening

表 9. 刀盘转速、排土率和开口率的对应关系

转速(r/min)	z 数值	开口率(ζ)	转速(r/min)	z 数值	开口率(ζ)
6	100	29.7	6	108	31.8
7	100	28.9	7	108	30.9
8	100	28.5	8	108	30.6

通过表 9 可知：刀盘转速为 6 r/min 时，刀盘开口率处于 29.7%~31.8%之间；刀盘转速为 7 r/min 时，刀盘开口率处于 28.9%~30.9%；刀盘转速为 8 r/min 时，刀盘开口率处于 28.5%~30.6%之间。因为考虑到

刀盘开口率为整数，所以选择刀盘开口率为 30%。这样既能保证盾构机挖掘过程中不发生地面隆起和沉降现象，又能快速的对土体进行挖掘。

5. 结论

本文通过 EDEM 离散元软件对刀盘开口率进行数值仿真模拟研究，并得出以下结论：

1) 介绍 EDEM 离散元软件的基本原理，并对离散元软件进行介绍。在盾构施工时，掘进面压力和土舱压力应保持平衡状态，掘进面土压力应介于主动土压力和被动土压力之间[15]。

2) 针对粉砂层土体进行三轴试验应力 - 应变数值模拟的对比试验，在围压为 200 kPa 条件下模拟结果和通过查找文献的实际结果曲线基本保持一致，说明这种方法进行盾构挖掘模拟是可行的。

3) 运用回归分析对挖掘面土体进入土舱的质量料率进行拟合，得到不同刀盘开口率及转速下的数学模型。最后得出刀盘开口率、刀盘转速和挖掘面土体进入土舱的效率的函数关系式为

$z = -74 + 4.9x + 14.3y - 0.03x^2 - 0.87y^2$ 。结果表明：在同一刀盘开口率下，随着刀盘转速的增加，刀盘挖掘面土体进入土舱的土体质量越大；在同一刀盘转速下，随着刀盘开口率的增加，挖掘面土体进入土舱的土体质量越大。考虑到刀盘转速的选择范围为 6~8 r/min 和螺旋输送机入口处的压力，以及刀盘开口率的排土量应介于 100%~108%之间，最后选择刀盘开口率为 30%。

参考文献

- [1] 金大龙, 袁大军, 李兴高. 盾构刀盘开口率对掘进参数影响的模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2): 156-162.
- [2] 欧阳凯, 叶蕾, 姜礼杰, 王轩. 泥水盾构刀盘开口率设计影响分析与研究[J]. 建筑机械化, 2019, 40(8): 47-49.
- [3] 杨志勇, 江玉生, 张晋勋. 土压平衡盾构刀盘环向开口率研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2312-2317.
- [4] 王世杰, 王学科, 王吉业, 刘春光, 关振华. 微型土压平衡盾构机刀盘开口率对排土率的影响[J]. 中国工程机械学报, 2014, 12(3): 204-207.
- [5] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘开口率对土舱压力的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 89-93+104.
- [6] 刘凯欣, 刘凯欣, 高凌天, 等. 离散元法研究的评述[J]. 力学进展, 1900, 33(4): 200-210.
- [7] Fargnoli, V., Boldini, D. and Amorosi, A. (2013) TBM Tunnelling-Induced Settlements in Coarse-Grained Soils: The Case of the New Milan Underground Line 5. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **38**, 336-347. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.07.015>
- [8] Fang, Y., Wang, J., Jiang, Y., et al. (2012) Study on Ground Settlement Induced by Shield Tunnel Construction in Sandy Gravel Stratum. *International Conference on Pipelines and Trenchless Technology*, Wuhan, 19-22 October 2012, 1567-1573. <https://doi.org/10.1061/9780784412619.159>
- [9] 张文峰. 成样方法对南通饱和粉砂变形及强度特性影响的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [10] 王海礁. 成样方法对多种土体三轴试验结果的影响对比[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [11] 严战友, 盖惠恩, 王震. 基于离散元法的隧道开挖过程动力学分析[J/OL]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020(2): 102.
- [12] 周杰. 基于离散元法的等效地层沉降及开挖面稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2019.
- [13] 高见. 盾构机刀盘开口率与盘体结构优化设计[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [14] 于颖, 徐宝富, 奚鹰, 等. 软土地基土压平衡盾构切削刀盘扭矩的计算[J]. 中国工程机械学报, 2004, 2(3): 314-318.
- [15] 刘建琴, 郭伟, 黄丙庆, 杨亚楠, 王志勇. 土压平衡盾构刀盘开口率与刀盘前后压差的关系[J]. 天津大学学报, 2011, 44(8): 659-664.