第33卷 第2期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 33 No. 2
2020年6月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Jun. 2020

# 基于离散元法的隧道开挖过程动力学分析

严战友[1,2]， 盖惠恩[1]， 王 震[1]

(1.石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043;
2.石家庄铁道大学 交通安全与控制河北省重点实验室,河北 石家庄 050043)

**摘要**:基于离散元软件PFC3D建立了土壤盾构离散元三维模型,研究隧道埋深以及振动激励对推进力和扭矩的影响。对土壤模型施加初始应力以模拟隧道埋深,同时对刀盘的推进方向和旋转方向分别施加主动余弦激振,分析了掘进过程中刀盘在振动激励下的运动方程和受力机理,记录了掘进过程中刀盘推进力及扭矩。结果表明:随隧道埋深增加,刀盘所需推进力以及扭矩会相应增加,其中700 m埋深与300 m埋深相比,推进力相比增加了22.7%,扭矩增加了12.6%;隧道埋深一定的情况下,对刀盘的推进方向和旋转方向分别施加振动后,刀盘的推进力和扭矩与匀速掘削相比均有所减少,其中对旋转方向施加频率为15 Hz振幅为6.36e-3 rad的振动后,推进力减小了2.08%,扭矩减小了1.2%;对推进方向施加频率为15 Hz振幅为0.318 mm的振动后,推进力减小了1.67%,扭矩减小了3.28%;而且改变振幅后,刀盘受力呈现一定的变化规律,随着推进方向振幅的增加,扭矩呈明显的减小趋势;随着旋转方向的振幅增加,推进力呈减小趋势。隧道的埋深对开挖的推进力和扭矩影响比较大,而对刀盘施加振动可以在一定程度上减小推进力和扭矩。

**关键词**:离散元;隧道开挖;振动掘削;隧道埋深

**中图分类号**:U455.43 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-0373(2020)02-0102-08

随着经济的发展,许多大中型城市地上交通运输能力趋于饱和,交通拥堵情况日益严重,因此发展地下交通成为缓解这种情况的有效途径,地铁隧道工程建设步伐显著加快,而研究隧道开挖过程中盾构刀盘的受力,对隧道施工以及盾构机设计是有帮助的。

国内外一些学者专家对隧道开挖进行了许多研究包括力学分析、隧道变形分析以及开挖稳定性分析等。其中国内代表性的研究有:朱合华等[1]用模型试验方法,对不同的盾构机参数和土壤参数进行了组合试验,研究了土压平衡盾构推进过程中推进力变化的规律,土体与盾壳之间摩擦作用,并推导了推进力的计算公式。孙钧等[2]以在建的隧道盾构施工为研究对象 ,运用ANSYS软件模拟了交叠隧道土层位移以及地表沉降曲面在盾构推进中的变化,研究结果表明地面最大沉降量在上行隧道推进后将出现大幅度增长,且在推进前期沉降增幅最为显著。秦建设[3]采用Flac3D研究了盾构隧道施工中开挖面支护压力控制与掘进引起周围围岩的变形及破坏问题。徐前卫等[4]研究了刀盘扭矩的计算方法及其影响因素,并进行了土压平衡盾构的掘削模型试验,研究了在不同埋深、不同刀盘开口率、不同转速以及不同推进速度下刀盘扭矩的变化规律,并对理论研究成果进行了验证,取得了较为满意的结果。江英超[5]进行了室内掘进试验和颗粒离散元软件模拟,从宏观和细观层面上研究了盾构掘进对砂卵石地层的扰动特性。蒋建东等[6]利用LS-DYNA软件建立了刀盘掘削土壤有限元模型,并对刀盘在推进和圆周旋转方向分别施加主动激振进行了模拟,结果表明,在旋转方向施加主动振动,掘削阻力随振幅增加而减少,能耗随振幅增加而增加。童一珏[7]运用有限元动力学仿真软件LS-DYNA,通过改变刀盘

**收稿日期**:2019-05-27 **责任编辑**:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20190097
**基金项目**:国家自然科学基金(111172183);中央引导地方科技发展专项(18242219G)
**作者简介**:严战友(1972—),男,博士,副教授,研究方向为路面动力学。E-mail:yanzhanyou@163.com
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].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(2):102-109.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

圆周速度及掘进速度的方式实现刀盘振动切削，结果表明对盾构刀盘施加振动能有效提高切削性能。国外的专家学者也进行了许多研究，其中 Manuel J et al[8] 结合马德里的 2 个地铁项目，采用离散元软件 PFC3D 进行了开挖模拟，分析了刀盘的推进力和扭矩以及开挖断面的稳定性，将模型结果与实际数据进行了比较，显示了离散元方法运用于隧道和盾构机设计的可能性。Cho et al[9] 运用 AUTODYN-3D 对 TBM 刀盘铣刀对岩石的破碎进行了一系列数值模拟实验，模拟结果不仅对岩石破碎机理进行了较为真实的描述，而且得到了较为可靠的比能值，其研究结果表明，利用 AUTODYN-3D 进行的数值模拟可以代替 LCM 测试用于 TBM 的性能评估。Zhao et al[10] 针对正在建设的穿越阿尔卑斯山长距离高埋深的隧道面临的软弱岩层的挤压和脆性破坏问题，建立了包含岩体、掘进机及其系统部件与巷道支护的全三维模型，采用双护罩 TBM 来处理这 2 种地质情况，并对布伦纳隧道沿线的剥落问题和里昂-都灵基础隧道沿线的挤压问题，进行了设计分析。Sugimoto et al[11] 采用计算机辅助自动控制系统，开发了封闭式盾构掘进方法，分别对砂质土和黏土进行了直、曲 2 种情况下的盾构特性仿真，分析了模型参数对盾构特性的敏感性，对盾构行为的计算结果进行了检验，并与经验和理论计算结果进行了比较，验证了模型能较好地反映盾构行为。由以上可知，运用离散元研究隧道开挖过程较少，而离散元可以更为真实地反映盾构开挖过程中土壤的受力和破坏，因此选择离散元方法对开挖过程进行模拟。

运用离散元软件 PFC3D 建立了隧道土壤以及盾构刀盘模型，进行了开挖过程模拟，研究了在不同埋深条件，以及对刀盘施加主动激励的条件下，刀盘切削过程中受力的变化规律，以探讨不同埋深对刀盘受力的影响，以及振动减阻的效果。

## 1　盾构刀盘掘削过程力学行为

### 1.1　刀盘掘削的推进力和扭矩分析

盾构机在掘进过程中的刀盘所受载荷主要包括推进力和扭矩，刀盘掘进过程中所受的推进力 $F$ 为[12]

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \tag{1}$$

式中，$F_1$ 为盾构四周与土壤的粘结阻力及摩擦阻力；$F_2$ 为刀盘刀具插入土壤的贯入阻力；$F_3$ 为工作面前方的阻力，刀盘和其上的刀具在土中推进的阻力。

根据土壤切削力学分析，这 3 种力的计算公式为

$$F_1 = \begin{cases} f(\pi D L P_m + W) & \text{（砂性土）} \\ c\pi D L & \text{（黏性土）} \end{cases} \tag{2}$$

$$F_2 = l \cdot t \cdot K_p \cdot P_m \tag{3}$$

$$F_3 = P_t \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \tag{4}$$

式中，$f$ 为钢与土的摩擦因数；$D$ 为盾构刀盘直径；$L$ 为刀盘厚度；$P_m$ 为作用在盾构上的平均土压；$P_t$ 为工作面前方的压力；$c$ 为土壤内聚力；$K_p$ 为被动土压力系数；$l$ 为刀盘周长；$d$ 为刃角贯入深度；$W$ 为盾构重量；$t$ 为工作面周边长度。

刀盘掘进过程中所受的扭矩为[13]

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \tag{5}$$

式中，$T_1$ 为土壤切削阻力产生的扭矩；$T_2$ 为刀盘正面与土体的摩擦力产生的扭矩；$T_3$ 为刀盘外周与土体的摩擦力产生的扭矩。根据土壤切削力学分析，这 3 种力的计算公式为

$$T_1 = \sum_i^n F_i R_i \tag{6}$$

$$T_2 = \frac{\pi D^3}{12}(1 - \alpha_0) K f \left(H + \frac{D}{2}\right)\gamma \tag{7}$$

$$T_3 = \frac{\pi D^3}{12} L c + \frac{D^2}{4} L f \gamma \pi \left(H + \frac{D}{2}\right)(1 + K_a) \tag{8}$$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中,$n$ 为刀盘上的切刀数;$F_i$ 为第 $i$ 把切刀掘削土体产生的阻力;$R$ 为对应切刀的回转半径;$D$ 为盾构刀盘直径;$\alpha_0$ 为开口率;$K$ 为侧向土压力系数;$f$ 为刀盘表面与土的摩擦系数;$L$ 为刀盘厚度;$K_a$ 为主动土压力系数;$\gamma$ 为土体重力密度;$H$ 为盾构机工作深度。

其中

$$F = P\sin(\alpha_1 + \delta) + C_a dm\cot\alpha_1 + \mu[P\cos(\alpha_1 + \delta) - C_a dm + q_c l_2 m] \tag{9}$$

式中,$P$ 为切刀掘削过程中刀面法向所受的压力[14]

$$P = (\gamma g d^2 N_\gamma + CdN_c + C_a dN_{ca} + \gamma v^2 dN_a)m \tag{10}$$

式中,$d$ 为切深;$m$ 为刀具宽度;$C$ 为土体内聚力;$C_a$ 为土体与刀具的粘结力;$\alpha_1$ 为刀具切削角;$\delta$ 为土体与刀具的摩擦角;$q_c$ 为土层贯入强度;$l_2$ 为刀具底面与土层接触长度;$N_\gamma$ 为重力系数;$N_c$ 为内聚力系数;$N_{ca}$ 为粘结力系数;$N_a$ 为加速度系数;$v$ 为刀具切削速度。

### 1.2 刀盘运动学分析

刀盘的旋转推进是通过对刀盘施加速度实现的,其中刀盘沿 $y$ 方向推进,掘进过程分为3种工况,匀速掘进、推进方向施加振动掘进和旋转方向施加振动掘进。下面分别对这3种情况分别进行运动学分析,并给出了刀盘上某一点的运动方程。

(1)匀速掘进。这种情况下刀盘上一点沿推进方向作匀速直线运动,沿旋转方向作匀速运动,其运动方程为

$$y = vt \tag{11}$$

$$x = R\cos(\omega t) \tag{12}$$

$$z = R\cos(\omega t) \tag{13}$$

(2)推进方向施加振动掘进。推进方向为变速运动,旋转方向为匀速运动,运动方程为

$$y = vt - A\cos(2\pi ft) \tag{14}$$

$$x = R\cos(\omega t) \tag{15}$$

$$z = R\cos(\omega t) \tag{16}$$

(3)旋转方向施加振动推进。推进方向为匀速运动,旋转方向为变速运动,运动方程

$$y = vt \tag{17}$$

$$x = D\cos(\omega t - A\cos(2\pi ft)) \tag{18}$$

$$z = D\cos(\omega t - A\cos(2\pi ft)) \tag{19}$$

式中,$f$ 为振动频率;$v$ 为刀盘推进的速度;$R$ 为刀盘上某一点的旋转半径;$\omega$ 为刀盘旋转的角速度。

## 2 建立盾构刀盘及土体模型

离散元法(DEM)基本思想是把非连续体分离成大小、形状不同的刚性颗粒集合(异构多相系统)。颗粒间点接触,变形由颗粒间重叠构成,颗粒间可以设定粘结关系,满足一定的运动方程(牛顿第二定律),采用时步迭代法求解颗粒间运动方程,进而求解整体非连续运动方程。颗粒间是动态过程,每次施加外力都会引起一定范围颗粒平动与旋转,不一定满足位移连续和变形协调条件,特别适应求解大位移和非线性问题。本文采用离散元软件 PFC3D 模拟隧道开挖过程,而不是通常采用的连续方法。对于确定盾构机刀盘掘削土壤过程模拟,离散元软件是更为合适的分析工具,因为土壤是由土壤颗粒、空气和水等构成的离散体。关于隧道面稳定性分析,离散方法显示出优于连续方法的重要优势:可以允许模型发生非常大的变形,与连续模型模拟相比较土壤颗粒的剥离和材料的破坏可以以更加真实的方式进行。

### 2.1 细观参数的选定

离散元模型中细观参数是非常重要的,许多细观参数不能直接测量出来,但宏观力学与细观力学参数之间存在密切联系,一般应用材料的应力-应变趋势确定细观参数,通过单轴压缩或三轴压缩试验得到试件的应力-应变曲线,然后在软件中建立相同尺寸的试件,进行单轴或三轴压缩模拟试验,得到模拟曲

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

线。通过不断调整细观参数,使得模拟曲线和试验曲线趋势相一致,并且误差在 10%以内,由此得到的模型细观参数认为是可以反映材料属性的。需要确定的细观参数主要有 $k_n$ = 球-球接触处的法向刚度(力/位移);$k_S$ = 球-球接触处的剪切刚度(力/位移);Fraction = 球表面摩擦系数,用角度的正切值表示;n_bond = 粘结键法向强度(力);s_bond = 粘结键切向强度(力)。Manuel et al[8] 通过模拟三轴压缩试验对马德里的一处在建隧道土壤细观参数进行标定,首先用现场的土壤制成立方体试件进行三轴压缩试验,得到应力-应变曲线。然后通过 PFC 软件建立相同尺寸的试件进行仿真试验,试件由 6 面墙体围成,墙体与试件的摩擦系数设为零,通过伺服控制周围 4 面墙的速度以保持恒定的围压以模拟真实的试验条件,并赋予上下 2 面墙体一定的速度进行加载模拟得到模拟曲线。最后通过不断调整细观参数使得模拟曲线与试验曲线趋势一致且误差满足要求。参考 Manuel et al[8] 建立的隧道模型土壤的部分细观参数取值见表 1。

**表 1　细观参数**

| $k_n$/(N·m$^{-1}$) | $k_S$/(N·m$^{-1}$) | 摩擦系数 | 法向粘结强度/N | 切向粘结强度/N |
|---|---|---|---|---|
| 1.6e8 | 1.0e7 | 0.55 | 1.0e4 | 1.0e4 |

## 2.2　建立模型

本文主要研究刀盘与土体相互作用的力学行为,不考虑刀盘的磨损,因此采用墙体组成盾构系统。盾构刀盘通过三维软件建模并导入 PFC3D 中,刀盘直径为 0.1 m,开口率为 51%。土壤模型的建立,首先生成 8 个墙面组成 1 个封闭区域,并在这个区域中生成指定孔隙率的颗粒集合,土壤颗粒的半径设置为 8 mm,然后通过 PFC 中的 CYCLE 或 SOLVE 使重叠颗粒弹开并达到平衡,最后赋予颗粒接触参数并进一步使模型达到平衡状态。模型的尺寸为长 0.8 m,宽 0.4 m,高 0.4 m。土体周围除开挖面外都施加约束。盾构刀盘及土体模型见图 1。

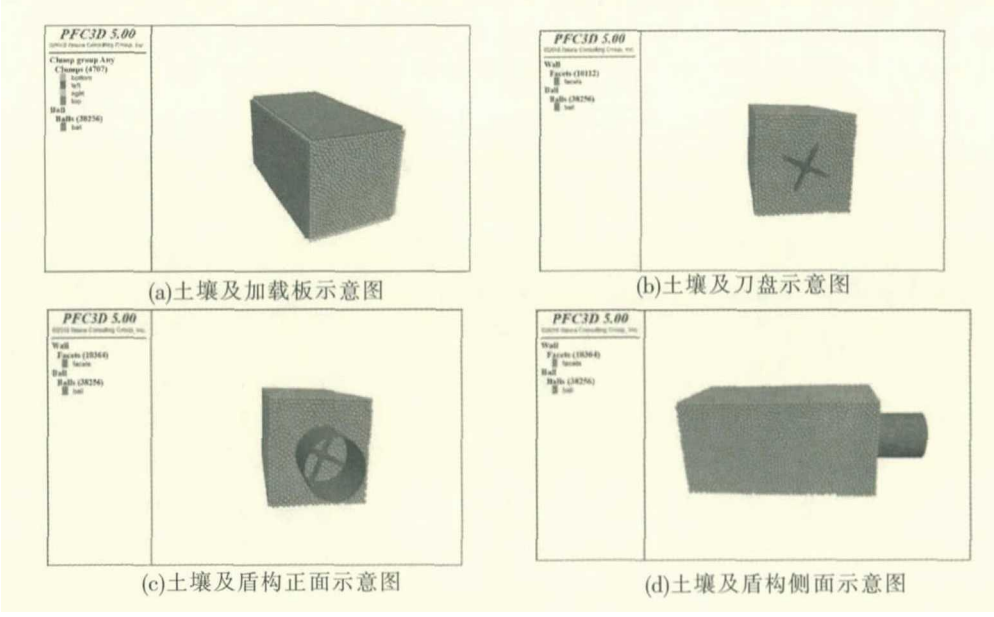


**图 1　盾构刀盘及土体建模示意图**

土壤的初始地应力是通过在土壤模型的四周生成 4 个 clump 加载板(如图 1(a)所示),并对加载板施加相应的荷载实现的,加载板由半径为 8 mm 的 pebble 组成,假定在埋深较大处隧道的竖向应力与横向应力相等。本文模拟了 300 m、500 m、700 m、1 000 m 和 2 000 m 5 种工况,与之对应的初始地应力分别为 6.75 MPa、11.25 MPa、15.75 MPa、22.5 MPa、和 45 MPa[15]。通过 wall attribute 命令赋予刀盘推进速度和旋转速度对土体进行掘削,将速度设置为正弦函数即实现振动掘削。最后设定历史变量监测墙体承受的推进力和扭矩,来提取隧道挖掘过程中的数据.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

## 3 计算结果及分析

对刀盘施加0.05 m/min的推进速度,6 r/min的转速进行匀速挖掘模拟,推进距离为10 cm,记录了刀盘的推进力和扭矩随时间变化的曲线图。图2为刀盘掘进过程中不同阶段土壤颗粒的位移云图。

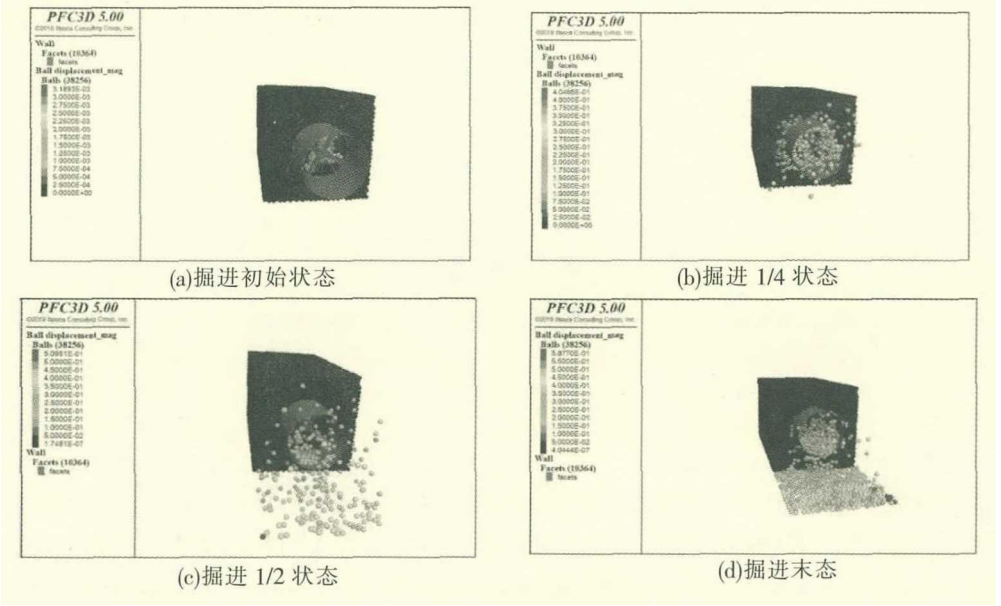


**图2 土壤颗粒的位移云图**

从图2土壤的位移云图可以看到土壤在刀盘掘削作用下的破坏过程。随着刀盘推进土壤受到掘削力的作用颗粒之间的力逐渐达到并超过接触粘结强度,从而颗粒间的粘结键破坏,颗粒之间的接触关系变为线性接触,因此在重力和掘削力的作用下,这些土壤颗粒从土壤模型上剥离脱落。

图3为匀速掘进下刀盘的推进力时程图。由图3可以看出:在推进过程中刀盘推进力先出现一个峰值为$7\times10^5$ N,随后推进力稳定在$2.5\times10^5$ N附近,波动范围为$3.5\times10^5\sim1.5\times10^5$ N。图4为匀速掘进下刀盘的扭矩时程图,可以看到扭矩是逐渐增加并趋于稳定,并没有产生明显的峰值,扭矩的稳定值为$2.2\times10^4$ N·m并在附近波动,波动范围为$1.1\times10^4\sim3.5\times10^4$ N·m。其中推进过程中推进力和扭矩都会在稳定值附近产生比较剧烈的波动,这是由于土壤在刀盘的切削作用下,土壤先出现裂纹并扩展至自由面,土壤破裂并剥落,之后会在刀盘前方产生临空面,并不断重复这一过程形成的。

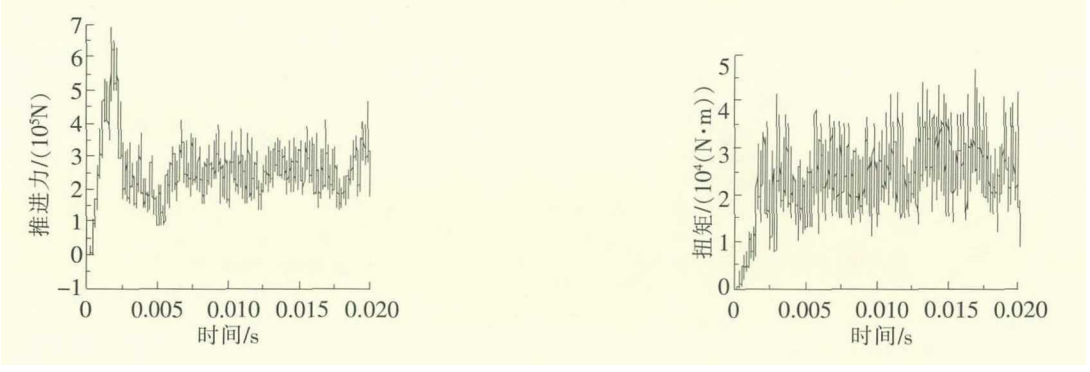


**图3 匀速掘进推进力** **图4 匀速掘进扭矩**

对刀盘的推进方向和旋转方向分别施加振动后,刀盘的推进力和扭矩与匀速状态的对比如图5与图6所示。图5为振动掘进与匀速掘进的推进力对比图,图6为振动掘进与匀速掘进的扭矩对比图,实线为匀速掘进的曲线,虚线为振动掘进的曲线。由图可知对刀盘施加振动之后的曲线波动位置稍有改变而且推进力和扭矩值有所减小。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

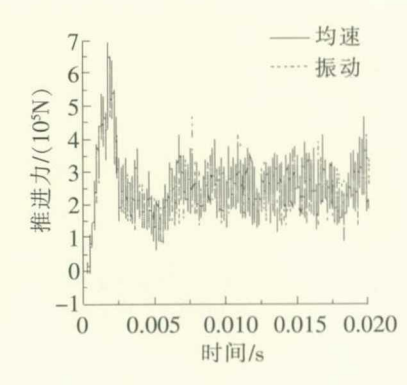


图 5　推进力对比图

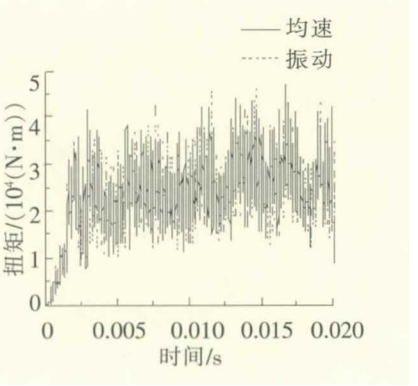


图 6　扭矩对比图

将推进方向振动频率固定为 15 Hz，同时改变推进方向的振幅，研究推进方向振幅变化对掘削阻力的影响。图 7 为在推进方向上施加不同振幅的振动之后推进力和扭矩的变化趋势图。从图 7 可以看出，随着振幅的增加扭矩会产生比较明显的下降趋势，而推进力没有出现上升或下降的趋势，而是在 $2.38\times10^5$ N 附近往复变化。由此可知，当推进方向振幅大于 0.2 mm 之后，才出现明显减阻效果。振幅最大为 0.318 mm 时，与匀速掘削相比，推进力减小了 1.67%，扭矩减小了 3.28%。

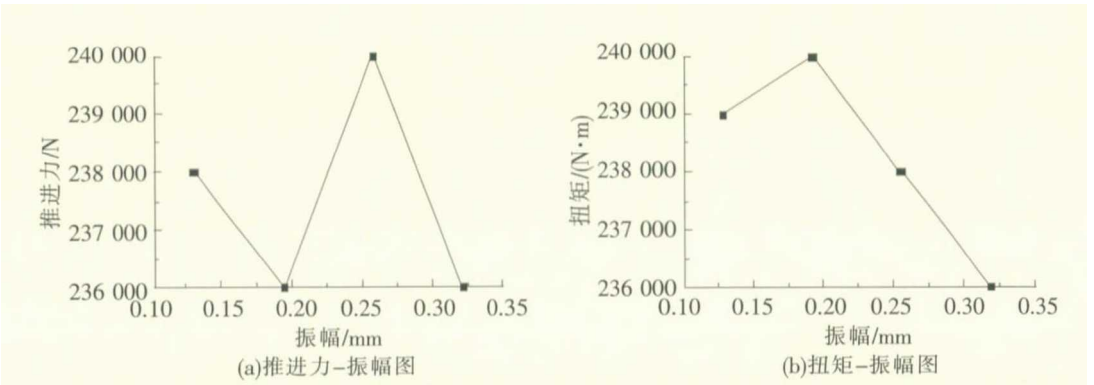


图 7　在推进方向施加振动

将旋转方向振动频率固定为 15 Hz，同时改变旋转方向的振幅，研究旋转方向振幅变化对掘削阻力的影响。图 8 为在刀盘旋转方向施加振幅不同的振动之后推进力和扭矩的变化趋势。从图 8 可以看出，随着振幅的增加，推进力曲线呈下降趋势；扭矩曲线在振幅小于 0.005 rad 时基本处于 2 400 N·m，未发生大的变化，当振幅大于 0.005 rad 后呈明显的上升趋势。当振幅最大为 6.36e-3 rad 时，与匀速掘削相比，推进力减小了 2.08%，扭矩减小了 1.2%。

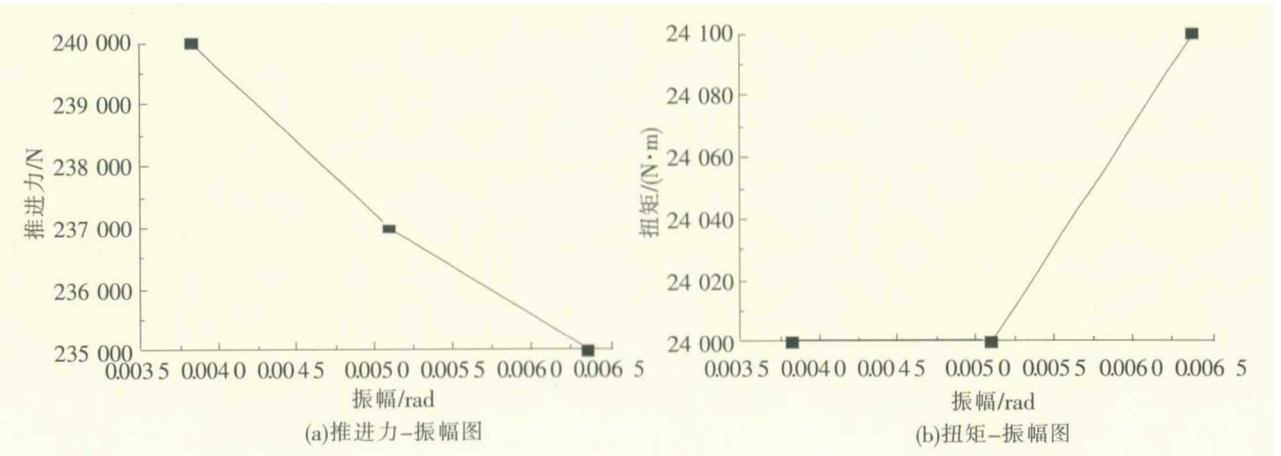


图 8　在旋转方向施加振动

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图9与图10分别为不同埋深处推进力和扭矩时程对比图。从图9与图10可以看出,2种情况下的推进力和扭矩基本在相同位置趋于稳定,可以明显看到700 m埋深处推进阻力大于300 m埋深处的推进阻力,推进力相比增加了22.7%。

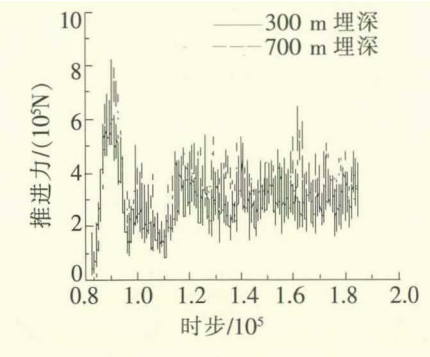


图9 不同埋深处的推进力对比图

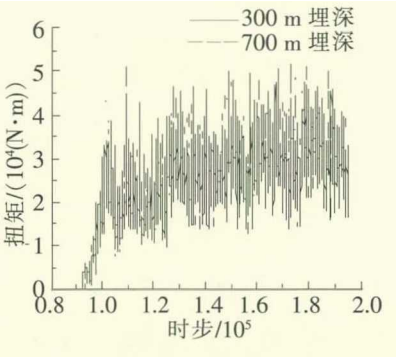


图10 不同埋深处的扭矩对比图

图11和图12分别为随埋深变化刀盘的推进力和扭矩变化趋势图。从图11与图12可以看出,随着埋深的增加推进力始终呈上升趋势,埋深从300 m增加到700 m的过程中推进力增加趋势比较明显,埋深超过700 m以后随着埋深的增加推进力的增加趋于缓和;扭矩随埋深的增加而增加,基本呈线性关系[16]。700 m与300 m处的扭矩相比增加了12.6%。

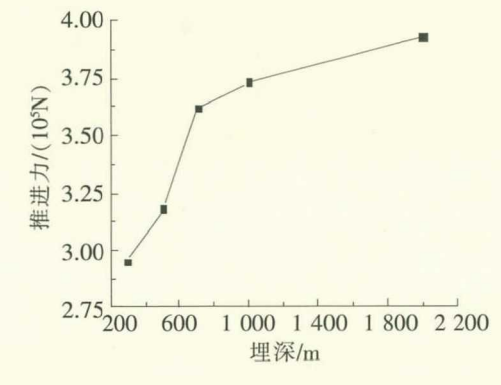


图11 不同埋深处的推进力图

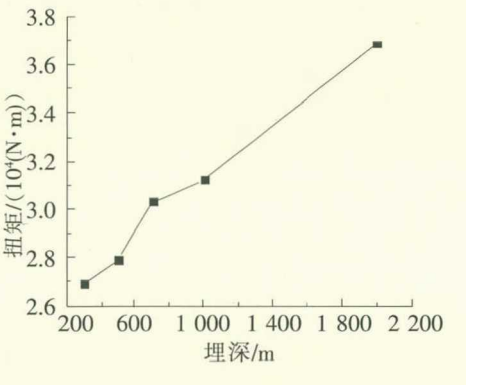


图12 不同埋深处的扭矩图

## 4 结论

本文通过建立离散元隧道开挖模型,模拟了不同埋深条件以及对刀盘施加振动激励的条件下的隧道开挖过程,研究了刀盘推进力和扭矩的变化规律,结果表明:

(1)随着埋深的增加推进力和扭矩呈增加趋势,700 m与300 m处的推进力相比增加了22.7%,扭矩增加了12.6%。

(2)对刀盘施加振动可以在一定程度上减小刀盘掘进的阻力。固定振动频率为15 Hz,分别改变推进方向和旋转方向振幅,当推进方向振幅大于0.2 mm之后,才出现减阻效果,而且振幅越大减阻效果越明显;当旋转方向振幅在0.003 5 rad到0.005 rad之间时,开挖阻力呈减小趋势,但是当振幅大于0.005 rad后,扭矩呈明显的增大趋势。

(3)运用离散元软件对隧道开挖进行受力分析,可用于指导隧道和盾构机的设计及施工。对开挖过程中的推进力和扭矩值进行预测,进而检验盾构机是否满足开挖要求;对振动挖掘的模拟,可为振动开挖施工提供参考提高开挖效率。

## 参 考 文 献

[1]朱合华,徐前卫,廖少明,等. 土压平衡盾构施工的顶进推力模型试验研究[J]. 岩土力学,2007(8):1587-1594.

[2]孙钧,刘洪洲. 交叠隧道盾构法施工土体变形的三维数值模拟[J]. 同济大学学报:自然科学版,2002,30(4):379-385.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[3]秦建设. 盾构施工开挖面变形与破坏机理研究[D]. 南京:河海大学,2005.
[4]徐前卫,朱合华,丁文其,等. 均质地层中土压平衡盾构施工刀盘切削扭矩分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(1):47-54.
[5]江英超. 盾构掘进对砂卵石地层的扰动机理研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
[6]蒋建东,章恩光,赵颖娣,等. 盾构刀盘振动掘削动力学建模与仿真研究[J]. 机械工程学报,2019,55(5):113-120.
[7]童一珏. 岩土振动掘削机理及盾构刀盘复合激振数值仿真研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2016.
[8]Manuel J M,Luis E R. Discrete numerical model for analysis of earth pressure balance tunnel excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2005,131(10):1234-1242.
[9]Cho J W, Jeon S, Yu S H, et al. Optimum spacing of TBM disc cutters: a numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2010, 25(3): 230-244.
[10]Zhao K, Janutolo M, Barla G. A completely 3D model for the simulation of mechanized tunnel excavation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2012,45(4):475-497.
[11]Sugimoto M, Sramoon A. Theoretical model of shield behavior during excavation. I: Theory[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2002,128(2):138-155.
[12]刘铁雄. 日本隧道标准规范(盾构篇)及解释[M]. 成都:西南交通大学出版社,1988.
[13]管会生. 土压平衡盾构机关键参数与力学行为的计算模型研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.
[14]Onwualu A,Watts K. Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tools[J]. Soil & Tillage Research,1998,48(4):239-253.
[15]蒋明镜,张鹏,陈添,等. 不同埋深条件下隧道开挖的离散元模拟初探[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(S2):794-802.
[16]吕强,傅德明. 土压平衡盾构掘进机刀盘扭矩模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006(S1):3137-3143.

# Discrete Element Numerical Simulation of Tunnel Excavation

**Yan Zhanyou[1,2], Ge Huien[1], Wang Zhen[1]**

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Key Laboratory of Traffic Safety and Control in Hebei, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract**: Based on the discrete element software PFC3D, a discrete element three-dimensional model including soil and shield was established to study the influence of tunnel depth and vibration excitation on thrust and torque. The initial stress was applied to the model to simulate the tunnel depth. At the same time, the cosine vibration was applied to the advancement and the rotation direction of the cutterhead respectively. The motion equation and force mechanism of the cutterhead under the action of vibration during excavation were analyzed, and the thrust and torque of the cutterhead were recorded. The results show that: with the increase of tunnel depth, the thrust and torque of the cutterhead increase correspondingly. For example, the buried depth of 700 m increases by 22.7% compared with 300 m, while the thrust force increases by 12.6%. When the depth of the tunnel is fixed, the thrust and torque of the cutterhead are reduced after the vibration is applied to the advancement and the rotation direction of the cutterhead compared with the constant speed excavation. For example, applying a vibration with a frequency of 15 Hz and an amplitude of 6.36e-3 rad to the direction of rotation, the thrust is reduced by 2.08%, and the torque is reduced by 1.2%. Besides the vibration with a frequency of 15 Hz and an amplitude of 0.318 mm is applied to the thrust direction, the thrust is reduced by 1.67%, and the torque is reduced by 3.28%. The depth of the tunnel has a great influence on the thrust and torque of the excavation, and the vibration applied to the cutterhead can reduce the thrust and torque to a certain extent.

**Key words**: discrete element; tunnel excavation; oscillatory excavation; tunnel depth

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net