DOI: 10.3901/JME.2019.05.113

盾构刀盘振动掘削动力学建模与仿真研究*

蒋建东 章恩光 赵颖娣 李聪聪 乔 欣

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室 杭州 310032)

摘要: 研究主动振动激励对盾构刀盘掘削的推进力及扭矩的影响。在加振动激励影响下, 刀具与土体接触状态变化和土体结构参数不稳定, 实现了盾构刀盘振动掘削减阻的效果。在数值模型中, 土壤失效采用 Drucker-Prager 破坏准则, 利用 LS-DYNA 软件建立了刀盘掘削土壤有限元动力学模型。刀盘在推进和圆周旋转方向分别施加主动余弦激振, 对掘削过程中的刀盘推进力及扭矩曲线做了数据分析。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。在 16 组正交试验中推进力、扭矩、能耗均减少。单独在旋转方向施加 21.2×10^{-3} rad 振幅, 15 Hz 的余弦激励可以实现推进阻力减少 24.4%, 扭矩减少 22.3%, 能耗增加 4.3%。同时在推进方向施加 0.254 mm 振幅, 10 Hz 振动频率和旋转方向 6.36×10^{-3} rad 以及 20 Hz 振动频率下, 推进力减少 1.3%, 扭矩减少 6.5%, 能耗减少 1.5%。

关键字: 刀盘; 振动掘削; 数值仿真; 动力学建模; LS-DYNA

中图分类号: U455

Dynamic Modeling and Simulation of Shield Tunneling Cutter-head in Oscillatory Excavation

JIANG Jiandong ZHANG Enguang ZHAO Yingdi LI Congcong QIAO Xin

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032)

Abstract: Study the influence of thrust and torque in shield tunneling cutter head with oscillatory excavation. Because of the change of contact state between cutting tools with the soil body and of the instability of soil structure under the active vibration, the resistance has been reduced during shield tunneling excavation. In the numerical model, the Drucker-Prager failure criterion is adopted. The finite element dynamic model of cutter-head digging is established by LS-DYNA software. Analyzed the curve of thrust and torque during the cutter-head excavated simulation under vibration acted respectively on the forward and rotation direction. The results show that when the active vibration is applied in the direction of rotation, the cutting resistance decreases with the increase of amplitude, and the energy consumption increases with the increase of amplitude. In the 16 sets of orthogonal tests, thrust, torque and energy consumption are all reduced. One cosine vibration in 21.2×10^{-3} rad amplitude and 15 Hz frequency applied to the rotation direction can reduce the propulsion resistance by 24.4% and torque by 22.3%. But energy consumption increase by 4.3%. When 0.254 mm amplitude 10 Hz frequency applied in advanced direction and 6.36×10^{-3} rad amplitude 20 Hz frequency applied in rotation direction, the propulsion resistance reduced by 1.3%. And the torque reduced by 6.5%. Energy consumption reduced by 1.5%.

Key words: cutter head; oscillatory excavation; numerical simulation; dynamic modeling; LS-DYNA

0 前言

刀盘作为隧道挖掘盾构机的关键掘削工作部件, 国内外有许多针对刀盘进行了刀具与土壤切削相关的理论和实验研究^[1-4]。

研究反映盾构刀盘载荷的数值建模方法, 在国

内外也已经有了许多基础研究。沈建奇等^[2]2009 年利用 LS-DYNA 软件建立盾构刀盘掘削土体的 ALE 模型, 研究盾构设备的动态掘削特性。通过与实验结果对比, 证明 ALE 模型可以反映实际的土壤切削变形。苏翠侠^[3]2011 年在 Abaqus 软件中建立盾构刀盘掘削的 FEM 仿真模型, 对刀盘掘削过程中的载荷变化进行了分析, 土体采用 Drucker-Prager 模型。刘春花^[4]2014 年在 ANSYS/LS-DYNA 软件中建立了盾构切刀掘削砂卵石地层的有限元模型, 研究了

* 国家自然科学基金资助项目(51375456)。20180209 收到初稿, 20180728 收到修改稿

刀具布置方式以及切削参数对切削效果的影响。韩美东等^[5]2015年利用 ABAQUS 软件仿真了全断面隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)的刀盘整体掘进过程,从仿真中得到刀盘的动态载荷变化以及掌子面岩体的损伤失效状态。

在其他岩土作业领域,对掘削工具施加振动以改善扭矩,减少切削阻力的工作已有一定的基础。SPEKTOR^[6]1981年以实验和土动力学为基础研究了土壤作业中施加振动的减阻机理。SHANGOLI等^[7]2010年为研究振动参数对深耕的作用,设计制作了一种振动深耕铲。振幅 69 mm,振动角 27°,前进速度最大 3 km/h,振动频率可以在 1.9 到 8.8 Hz 间变化。实验结果表明在速比小于 1 时对深耕铲施加振动,会使牵引拉力减小,扭矩减少。并针对功率最小,在速比 1.5 时得到最优化振动频率 3.3 Hz。振动参数的合理选择的确可以起到减少切削阻力的效果。朱建新^[8]2008年尝试在液压挖掘机作业中施加振动掘削,通过实验和理论分析,可以有效降低掘削阻力和功耗。蒋建东等^[9]2012年利用 ALE 模型对深耕铲在振动作用下的阻力特性与静态切削特性做了比较。童一珏等^[10]2016年使用 Plastic Kinematic 塑性模型研究了盾构刀盘切削土体在振动作用下的载荷变化。KIM 等^[11]2016年通过 LS-DYNA 软件,对压路机振动作业的效果进行了分析。

本文引入土壤振动切削机理,研究在主动振动激励下盾构掘进过程中刀盘的受力与能耗变化,利用 LS-DYNA 和 Drucker-Prager 土壤模型进行盾构刀盘振动掘削动力学建模与数值仿真。

1 盾构刀盘振动掘削减阻机理

1.1 掘削过程中刀盘受力及阻力矩分析

盾构机在掘进过程中的刀盘所受载荷包括推进阻力和切削阻力矩,盾构刀盘与土体之间的受力如图 1 所示。

图1 盾构掘进过程中刀盘受力分析

忽略盾构掘进施工过程中变向阻力、盾尾与衬砌之间的摩擦力及台车牵引阻力等因素的影响,刀

盘掘进过程中所受的载荷 F 为^[12]

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

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,三种阻力理论计算为

$$F_1 = \begin{cases} f \times (\pi D \cdot L \cdot P_m + W) & (\text{砂性土}) \\ c \cdot \pi D \cdot L & (\text{粘性土}) \end{cases}$$

$$F_2 = l \cdot t \cdot K_p \cdot P_m$$

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

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。

单个刀盘掘进过程中所受扭矩载荷可以估计为^[13]

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (2)$$

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。

下面列出这三种扭矩的估算公式

$$T_1 = \sum_i^n F_i R_i \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{\pi D^3}{12} (1 - \alpha_0) K f \left(H + \frac{D}{2} \right) \gamma \quad (4)$$

$$T_3 = \frac{\pi D^2}{2} L c + \frac{D^2}{4} L f \gamma \pi \left(H + \frac{D}{2} \right) (1 + K_a) \quad (5)$$

式中, D 为盾构刀盘直径; α_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因数; L 为刀盘厚度; K_a 为主动土压力系数; γ 为土体重力密度; H 为盾构机工作深度。

T_1 中 n 为刀盘上的切刀数; F 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。

$$F = P \sin(\alpha_1 + \delta) + C_a d m \cot \alpha_1 + \mu (P \cos(\alpha_1 + \delta) - C_a d m + q_c l_2 m) \quad (6)$$

式中, P 为切刀掘削过程中刀面法向所受的力^[15]

$$P = (\gamma g d^2 N_\gamma + C d N_c + C_a d N_{ca} + \gamma v^2 d N_a) m \quad (7)$$

式中, w 为被切土块受的重力; 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; α_1 为刀具切削角; δ 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_r 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。这里式 (3) T_1 中只考虑了切削软土的刀盘, 没有考虑滚刀破岩的作用力。

由上面刀盘载荷公式可以看出, 盾构施工过程中, 在刀盘结构及动力参数一定的情况下, 若可以减少 c , f , γ , K , N 等岩土参数, 则可以减少刀盘推进阻力及掘削阻力转矩。在盾构掘削过程中过程中施加振动激励, 可以改变刀具与土体的接触状态。从而可以使盾构前方的土体情况发生改变, 实现减阻的目的。有利于降低土体动态下的内聚力、摩擦角、土压系数等参数, 而且带有振动的刀具在掘削过程会伴有冲击载荷, 这种冲击载荷可以以更小的能耗代价使被切削岩土断裂失效。

1.2 刀盘运动学分析

下面给出对刀盘匀速掘削时刀盘上一点的轨迹方程以及在两个方向上施加余弦激励后的运动方程。

刀盘匀速旋转直线推进时, 其刀盘某点的运动轨迹为等距螺旋线, 其运动方程为

$$\begin{cases} x = vt \\ y = R \cos(\omega t) \\ z = R \sin(\omega t) \end{cases} \quad (8)$$

式中, t 为时间, v 为刀盘推进速度, R 为刀盘上一点的回转半径, ω 为刀盘旋转角速度。

在刀盘推进 x 方向增加的振幅为 A_x 频率为 f_x 的主动激振时, 刀盘某点的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = vt - A_x \cos(2\pi f_x t) \\ y = R \cos(\omega t) \\ z = R \sin(\omega t) \end{cases} \quad (9)$$

式中, A_x 为振幅, f_x 为振动频率。

在刀盘旋转方向 T 上施加振幅为 A_T 频率为 f_T 的主动激振时, 刀盘某点的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = vt \\ y = D \cos(\omega t - A_T \cos(2\pi f_T t)) \\ z = D \sin(\omega t - A_T \cos(2\pi f_T t)) \end{cases} \quad (10)$$

由上述分析可知, 当在刀盘上施加前进和旋转方向的主动激振后, 刀盘上刀具与岩土接触状态及切削路径发生了改变, 因此切削刀具和岩土切削过程的效果也受外加主动激振的影响。

2 盾构刀盘掘削过程的数值分析

2.1 切削过程数值仿真的土壤模型

本文使用 LS-DYNA 中的 Mat147(FHWA_soil)

模型进行土体掘削破坏的仿真。该模型是修正的 Mohr-Coulomb 模型, 即 Drucker-Prager 模型, 该模型能较好反映土壤掘削过程中的土壤变形及破坏失效。本研究参考土壤样本为长江中下游地质土壤样本, 考虑盾构挖掘深度, 故选择土层 (3)^[17]。下表土体密度, 含水量、摩擦角、内聚力来自杭州地铁一号线地质勘探, 表中切变模量、体积模量由静力触探结果估计^[17]。其余表中参数需要在数值模拟时测试, 比较依赖经验, 表中参考文献设定^[16, 18-19]。

表 1 土壤参数

参数	数值	参数	数值
密度/(kg/m ³)	1 900	体积模量/Pa	3.3×10^5
土壤相对容重	2.78	切变模量/Pa	2.1×10^5
水密度/(kg/m ³)	1 000	最大摩擦角/rad	0.6
粘塑性参数	1.1	屈服面修正系数	3 000
含水率(%)	0.3	土壤内聚力/Pa	1.1×10^4
最大塑性迭代次数	10	第三不变效应偏心率参数	0.7
残余切应力强度/rad	0.32	初始损伤阈值体积应变	0.003 6
材料损伤水平	0.25	极大值原则屈服应变	0.8
失效生成能/J	7.2		

2.2 盾构刀盘及土体有限元模型

有限元建模中采用 0.8 m 直径的盾构刀盘。刀盘安装有 24 把切刀, 4 把边刮刀以及一把中心刀。刀盘采用辐条式, 开口率 55%。有限元刀盘模型有 16 204 个节点, 9 687 个单元。土体有限元模型采用 1.2 m × 1.2 m × 0.2 m 的立方体。每个有限元单元为 10 mm。总共有 312 564 个节点, 288 000 个单元。如图 2 所示。

图 2 盾构刀盘及土体的有限元建模示意图

边界条件为土体外围施加固定约束, 开挖面为自由边界。刀盘施加旋转方向和推进方向上的速度约束, 刀盘与土体间采用面面侵蚀接触。刀盘振动效果是利用不同幅值、频率的余弦函数通过速度边界条件施加于刀盘。

2.3 刀盘掘进土壤过程分析

仿真时间 3 s, 刀盘推进速度 0.05 m/s, 转速 1 rad/s。图 3 展示了刀盘匀速切削下土体的破坏过程。

图3 动态切削过程 0.5 s、1.0 s、2.0 s 时刻数值仿真结果

由图3可以看出,随着刀盘的掘进,掌子面的土体,逐渐破裂。与刀盘接触的土体随着应变的增加,判断为失效,然后删除。

(a) 匀速掘削中推进力时程图

(b) 匀速掘削中扭矩时程图

图4 刀盘推进力及扭矩时程图

匀速推进下,盾构刀盘的推力时程曲线和扭矩时程曲线中可以看出,刀盘进入土体切削过程中,推进力一开始有一个峰值,进入土体之后会有稳定的推进力,范围在 2 500~3 500 N。平均值 3 025 N。而刀盘的转矩则没有这样一个进入峰值,在进入土体后,主要转矩值的范围在 2 000~2 500 N·m。平均值 2 023 N·m。由推进力对推进距离积分得到推进力做的功为 453 J。由扭矩对旋转角度积分得到扭矩做的功为 6 080 J。

在图5中比较了盾构刀盘匀速掘削和振动掘削时刀盘推进力与扭矩。图5中实线为匀速掘削时刀盘所受推进力和扭矩;虚线为刀盘在施加振动后的受力曲线。刀盘所受振动为余弦波,推进方向振幅 0.19 mm 振动频率 5 Hz,旋转方向振幅 3.8×10^{-2} rad 振动频率 20 Hz。受振动激励后,基本在无振动曲

线的附近。在平稳推进过程中,有几组小的波动,这些峰值的大小,发生的位置,在振动作用下产生了变化。

(a) 刀盘推进力对比

(b) 刀盘扭矩对比

图5 匀速掘削与振动掘削推进力与扭矩对比图

3 盾构刀盘振动掘削减阻规律分析

3.1 单方向刀盘振动减阻规律分析

盾构刀盘掘削过程中有个两方向运动,推进方向以及旋转方向。现分别对两个方向施加4组不同振幅,频率 15 Hz 的余弦振动激励。盾构刀盘的推进阻力及扭矩如图6所示。

通过图6与第2.2节中平均阻力和扭矩的对比,可以看出,不管在推进方向还是旋转方向施加振动,刀盘的推进力及扭矩均有减少。在图6a中旋转方向施加振动,依振幅的增大而减阻效果明显增大。且在推进力与扭矩中皆减阻效果明显。在推进方向施加振动则相反,推进力及扭矩并不随振幅单调变化。且减阻效果不明显。

在旋转方向施加 21.2×10^{-3} rad 振幅,15 Hz 的余弦激励可以实现推进阻力减少 24.4%,扭矩减少 22.3%。在推进方向施加 0.8 mm 振幅,15 Hz 余弦激励可以实现阻力减少 1.9%,扭矩减少 2.4%。说明在旋转方向施加振动减阻效果优于推进方向。

(a) 在旋转方向施加振动

(b) 在推进方向施加振动

图 6 单方向施加振动后推进力和扭矩关系

3.2 单方向刀盘振动能耗影响分析

由上一节 8 组固定频率变振幅的振动仿真结果，可以得到各自的能耗变化，如图 7 所示。

图 7a 中，随旋转方向振动振幅的增加，能耗增加明显。图 7b 中，能耗不随推进方向振幅增加单调变化。能耗变化规律与掘削阻力变化趋势一致。与 2.2 节中，匀速掘削下，盾构刀盘能耗对比，在推进方向施加振动能起到减少能耗的作用。

在旋转方向施加 21.2×10^{-3} rad 振幅，15 Hz 的余弦激励能耗会增加 4.3%。在推进方向施加 0.8 mm 振幅，15 Hz 余弦激励可以实现能耗减少 2.5%。说明在推进方向施加振动会产生减少能耗的作用。

3.3 双方向复合振动减阻规律分析

进一步，从推进力方向和旋转方向两个方向，以振幅和频率为变量，建立四因素四水平的正交试验，进行盾构刀盘双方向复合振动规律数值分析。

数值仿真分析中外加激励以余弦波的形式施加在盾构掘进运动的圆周运动方向和前进推进方向，由于盾构掘进有两个方向的运动可以施加振动，所以以推进方向振动频率和振幅，旋转方向振动频率与振幅为实验因素，以刀盘推进力平均值与扭矩

(a) 在旋转方向施加振动

(b) 在推进方向施加振动

图 7 单方向施加振动后能耗关系

平均值为实验指标。旋转方向振幅以角弧度(rad)的形式给出。其中频率在 0~25 Hz，取 5，10，20，25 四个值。推进方向振幅和旋转方向振幅具体见表 2。

表 2 盾构振动掘削仿真分析正交因素水平表

水 平	因素			
	A	B	C	D
	推进方向振幅 /mm	推进方向振动 频率/Hz	旋转方向 振幅/rad	旋转方向 振动频率/Hz
1	0.127	5	2.54×10^{-3}	5
2	0.191	10	3.82×10^{-3}	10
3	0.254	20	5.09×10^{-3}	20
4	0.318	25	6.36×10^{-3}	25

图 8 为对 16 组正交试验的结果按 A 推进方向振幅，B 推进方向振动频率，C 旋转方向振幅，D 旋转方向振动频率四个因素分别对各自四组结果的推进力和扭矩求和平均得到。图 8 正交试验分析可以看出，盾构刀盘的振幅与振动频率对推进力和扭矩的影响均不是单调的。双向复合振动改变了原有的单方向振动的规律。说明两种振动影响是相关的。由极差可知，对推进力影响的主因素为推进方向的振动幅度。对扭矩影响的主因素为旋转方向的振动频率。

图8 双方向复合振动与推进力扭矩关系

从图8与图6的对比中可以看出,双方向振动削弱了原有单方向振动造成的减阻效果。

3.4 双方向复合振动能耗影响分析

从图9中16组正交试验设计中的数值分析解脱可以看出,每一组的能耗相比第2.2节匀速掘削都有所减少,说明复合振动可以消除刀盘单方向旋转主动激振带来的能耗增加,但也因此导致减阻效果有所下降。由实验数据极差分析可知,在推进方向施加 0.254 mm 振幅, 10 Hz 振动频率和旋转方向 $6.36 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 以及 20 Hz 振动频率下,推进力减少 1.3% ,扭矩减少 6.5% ,能耗减少 1.5% ,对能耗影响的主要因素是推进方向振动频率和旋转方向振动频率。

图9 双方向复合振动与能耗关系

4 结论

论文通过盾构刀盘推进的土体受力理论建模与分析,表明在受外加振动激励影响下,土体动态物理参数会变化以及和刀具接触状态变化,从而使得盾构掘进过程中在刀盘上施加一定频率和振幅的激振具有掘削减阻、降低能耗的效果。

土体有限元建模参数参照杭州地铁一号线沿线地质勘测数据,结合盾构作业施工深度,选用了层

淤泥质粘土。采用 Drucker-Prager 本构模型及失效准则,用 LS-DYNA 软件对盾构刀盘在主动振动激励下,推进力及转矩的减阻效果数值仿真研究。

(1) 单方向主动振动激励下,旋转方向振动,掘削阻力随振幅增加而减少,能耗随振幅增加而增加,规律明确,减阻效果明显。推进力方向振动,但减阻效果不明显,能耗与掘削阻力变化趋势一致。

(2) 双方向施加复合振动激励下,推进力、扭矩、能耗均减少,对推进力影响的主因素为推进方向的振动幅度。对扭矩影响的主因素为旋转方向的振动频率。对能耗影响的主因素是推进方向振动频率和旋转方向振动频率。

(3) 在旋转方向施加 21.2×10^{-3} rad 振幅, 15 Hz 的余弦激励可以实现推进阻力减少 24.4%, 扭矩减少 22.3%, 能耗增加 4.3%。在推进方向施加 0.254 mm 振幅, 10 Hz 振动频率和旋转方向 6.36×10^{-3} rad 以及 20 Hz 振动频率下,推进力减少 1.3%, 扭矩减少 6.5%, 能耗减少 1.5%。

参 考 文 献

- [1] 邢彤, 龚国芳, 杨华勇. 盾构刀盘驱动扭矩计算模型及实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(10): 1794-1800.
XIN Tong, GONG Guofang, YANG Huayong. Torque calculation model of cutting head in shield machine and experimental study[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(10): 1794-1800.
- [2] 沈建奇, 金先龙, 杨建刚, 等. 盾构机刀盘掘削动态数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2009(6): 1017-1020.
SHEN Jiangi, JIN Xiaolong, YANG Jiangang, et al. Dynamic numerical simulation of excavation in shield Tunnelling[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009(6): 1017-1020.
- [3] 苏翠侠. 基于数值仿真技术的盾构刀盘系统载荷与结构特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
SU Cuixia. Study on loads and structural properties of shield cutter-head based on numerical simulation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [4] 刘春花. 砂卵石地层盾构刀盘刀具切削仿真分析[D]. 大连: 大连交通大学, 2014.
LIU Chunhua. Simulation analysis on cutter-head and cutter cutting of shield machine in sandy cobble stratum[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2014.
- [5] 韩美东, 曲传咏, 蔡宗熙, 等. 刀盘掘进过程动态仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015(8): 1098-1102.
HAN Meidong, QU Chuanyong, CAI Zongxi, et al. Dynamic numerical simulation of tunneling by TBM cutter-head[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015(8): 1098-1102.
- [6] SPEKTOR M. Principles of soil-tool interaction[J]. Journal of Terramechanics, 1981, 18(1): 51-65.
- [7] SHAHGOLI G, FIELKE J, DESBIOLLES J, et al. Optimising oscillation frequency in oscillatory tillage [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 106(2): 202-210.
- [8] 朱建新. 液压挖掘机振动掘削机理及其过程优化建模与智能控制策略研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
ZHU Jianxin. Study on vibratory excavation mechanism process optimization modeling and intelligent control strategy of hydraulic excavator[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [9] 蒋建东, 高洁, 赵颖娣, 等. 基于 ALE 有限元仿真的土壤切削振动减阻[J]. 农业工程学报, 2012, 28(s1): 33-38.
JIANG Jiandong, GAO Jie, ZHAO Yingdi, et al. Numerical simulation on resistance reduction of soil vibratory tillage using ALE equation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(s1): 33-38.
- [10] 童一珏, 蒋建东, 张钧, 等. 盾构刀盘振动切削性能有限元仿真研究[J]. 机电工程, 2016, 33(6): 668-673.
TONG Yijue, JIANG Jiandong, ZHANG Jun, et al. Finite element simulation of shield cutter head vibration cutting performance[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(6): 668-673.
- [11] KIM K, CHUN S. Finite element analysis to simulate the effect of impact rollers for estimating the influence depth of soil compaction[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2016, 20(7): 1-10.
- [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.
LIU Tiexiong. Japan tunnel standard specification (shield) and explanation [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 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.
GUAN Huisheng. Research on calculation model of key parameters and mechanical behavior of EPB shield machine[D]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University, 2008.
- [14] 暨智勇. 盾构掘进机切刀切削软岩和土壤受力模型研究及实验验证[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
JI Zhiyong. Model study and experimental verification of cutting soft rock and soil force of shield tunneling machine[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [15] 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.
- [16] TAGAR A, JI C, ADAMOWSKI J, et al. Finite element simulation of soil failure patterns under soil bin and field testing conditions[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 145: 157-170.
- [17] 金兴平, 杨迎晓, 李辉煌. 杭州地铁 1#线岩土工程问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(s2): 5680-5685.
- JIN Xingping, YANG Yinxiao, LI Huihuang. Discussion on geotechnical problems of Hangzhou metro line no.1[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(s2): 5680-5685.
- [18] LEWIS B. Manual for LS-DYNA soil material model 147[M]. San Francisco: Federal Highway Administration Research and Development Turner-Fairbank Highway Research Center, 2004.
- [19] REID J, COON B A, LEWIS B, et al. Evaluation of LS-DYNA soil material model 147[R]. San Francisco: Federal Highway Administration, 2004, Report No. FHWA-HRT-04-094.
-
- 作者简介: 蒋建东(通信作者), 男, 1974 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为机械动力学, 机电系统设计与控制。
E-mail: jiangjd@zjut.edu.cn