

DOI: 10.11779/CJGE201906015

# 考虑渣土特征的盾构施工力学动态耦合仿真研究

肖超<sup>1, 2, 3</sup>, 谭立新<sup>2, 3</sup>, 陈仁朋<sup>1</sup>, 钟志全<sup>2, 3</sup>, 阳军生<sup>4</sup>

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中国建筑技术中心, 北京 101300; 3. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004;  
4. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 土压平衡盾构渣土作为开挖面支护力与土仓压力之间的传递介质, 其力学性能直接影响到土仓压力的控制、开挖面支护力大小和地层变形等。通过编制离散元和有限差分耦合程序, 模拟了土压平衡盾构机动态掘进过程, 分析了渣土改良对土仓压力传递性和开挖面地层响应的影响。研究结果表明: 盾构掘进过程中土仓压力会出现一定的波动幅度, 越靠近刀盘, 压力的波动幅度越大。刀盘转动角度对土仓压力有一定影响。刀盘面板转至监测点水平线上时土压力较大, 刀盘开口转至监测点水平线上时土压力较小。渣土改良能增大土仓压力传递系数, 降低土仓压力的离散性。压力传递系数不是一个稳定值, 而是一个受刀盘转动角度影响的变化值。

**关键词:** 土压平衡盾构; 渣土改良; 耦合分析; 土仓压力; 地层变形

中图分类号: TU445.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)06-1108-08

作者简介: 肖超(1986—), 男, 博士, 从事城市地铁方面的研究。E-mail: xiaochao317@qq.com。

## Dynamic coupling simulation of shield construction mechanics considering characteristics of soils

XIAO Chao<sup>1, 2, 3</sup>, TAN Li-xin<sup>2, 3</sup>, CHEN Ren-peng<sup>1</sup>, ZHONG Zhi-quan<sup>2, 3</sup>, YANG Jun-sheng<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410075, China; 2. China State Construction Technical Center, Beijing 101300, China; 3. China Construction Fifth Engineering Division Corp., Ltd., Changsha 410004, China; 4. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The soils are a transfer medium between supporting force of excavation face and earth pressure of soil chamber, and their performance directly affect the control of earth pressure of soil chamber, the supporting force of excavation faces, and the deformation of soil stratum, and subsequently the stability of surrounding buildings. Through the preparation of coupling procedures between discrete element and finite difference element, the dynamic excavation process of earth pressure balance shield is realized, and the effects of soil conditioning on transfer of earth pressure and response of excavation surface formation are analyzed. The results show that the earth pressure of soil chamber is not a stable value, which is a certain range of fluctuations, and the closer its distance to the cutterhead, the greater the pressure fluctuations in the process of shield tunneling. Under the excavation of shield machine, the rotation angle of cutterhead has certain influences on the internal and external earth pressures of soil chamber. The pressures are relatively large when the panel of cutterhead goes to the horizontal line of the monitoring point, whereas they are relatively small when the opening of cutterhead goes to the horizontal line of the monitoring point. The soil conditioning increases the transfer coefficient, which is not a constant, but a variable value affected by the rotation angle of cutterhead, and it reduces dispersion of earth pressures.

**Key words:** earth pressure balance shield; soil conditioning; coupling analysis; earth pressure of soil chamber; deformation of soil stratum

## 0 引言

土压平衡盾构掘进过程中刀盘切削下来的渣土流塑性和压力传递性较差, 容易出现结泥饼(黏性较大的地层)、喷涌(富水砂层)、刀盘刀具磨损和能耗高等不利情况, 严重影响到盾构掘进效率和开挖面的稳定性<sup>[1-2]</sup>。为了避免这些不利情况的发生, 可通过刀

盘面板和土仓隔板上的喷口注入改良剂, 实现土仓内和开挖面渣土的改良, 使其具备流塑性良好的特性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878669)

收稿日期: 2018-06-05

\*通讯作者(E-mail: xiaochao317@qq.com)

土仓内渣土作为开挖面支护力与土仓压力之间力的传递介质, 其力学性能的好坏直接影响到土仓压力的控制、开挖面支护力和地层变形等<sup>[3-5]</sup>。土仓压力监测元器件一般位于土仓隔板上, 其测得的压力为土仓压力, 而非开挖面支护力, 土仓压力只能间接的反映开挖面支护力(图1)。土仓压力传递性表示隔板上土仓压力与开挖面支护力之间的关系<sup>[6]</sup>, 目前国内外学者对土仓压力的传递性进行了一定的研究, 李向红等<sup>[7]</sup>利用直径1800 mm的土压力平衡盾构模拟试验平台在软土和砂土地层中掘进的模拟试验, 获得了土仓外土压力与土仓内土压力差值变化曲线。王新洪<sup>[8]</sup>利用流体力学理论推导出土仓内外压差的计算公式。武力等<sup>[9]</sup>依托某地铁盾构施工工程, 采用离散元PFC<sup>3D</sup>对土仓内外压力进行了分析。Bezuijen等<sup>[10]</sup>依托荷兰博特莱克铁路盾构隧道工程, 通过土仓隔板上和刀盘面板前后方土压力测试元器件, 总结了盾构施工过程中土仓压力和开挖面支护压力的关系。上述的研究认为土仓内外存在一定的压差, 其受到地层类型和刀盘开口率的影响。但上述研究并未考虑土仓压力传递介质渣土的力学性能, 未分析不同渣土力学性能情况下土仓内外压差之间的关系。

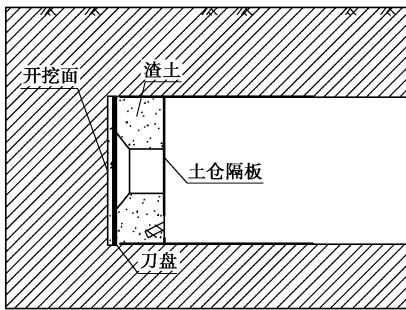


图1 盾构机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shield machine

## 1 耦合分析原理

离散元数值分析方法基于颗粒流理论, 其不像有限元分析方法那样假设地层为连续介质, 在模拟岩土大变形方面具有较大的优势<sup>[11-13]</sup>, 但受到计算机硬件限制, 离散元分析过程中颗粒数量不能过多。而相对于离散元, 有限元连续性假设大大提高了计算效率, 但其不能分析砾砂、渣土等散体材料的流动性。盾构机掘进过程中, 刀盘切削下来的渣土进入土仓, 再通过螺旋输送机排出, 有限差分软件无法模拟渣土颗粒大变形问题。因此基于离散元和有限差分的优缺点, 采用离散元和有限差分耦合方式模拟砂砾地层土压平衡盾构的掘进过程是合理的。

耦合分析过程中大变形区域采用离散元模拟, 其

他区域则采用有限差分模拟。有限差分与离散元的耦合是通过两者交界面相互交换数据而实现(图2, 3)。

$$U^n = R^B - d \quad , \quad (1)$$

$$K^n = \frac{k_n^{[W]} k_n^{[B]}}{k_n^{[W]} + k_n^{[B]}} \quad , \quad (2)$$

$$F_i^n = K^n U^n n_j \quad , \quad (3)$$

式中,  $U^n$ 为球与墙的重叠量,  $d$ 为沿着球中心点与墙的最短距离,  $R^B$ 为球体的半径,  $K^n$ 为法向刚度,  $k_n^{[W]}$ 为墙体的法向刚度,  $k_n^{[B]}$ 为球体的法向刚度。

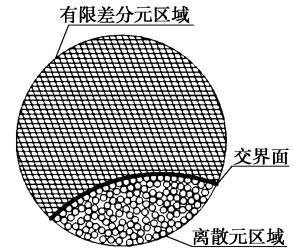


图2 离散元与有限差分交界面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of interface between discrete element and finite difference element

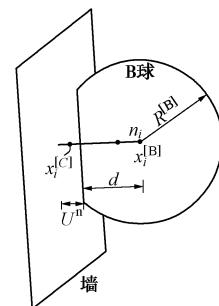


图3 墙与球接触示意图

Fig. 3 Schematic diagram of contact between ball and wall

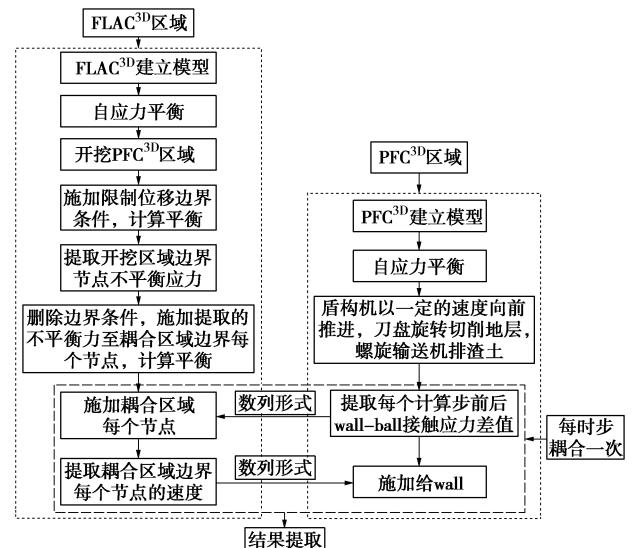


图4 耦合分析流程图

Fig. 4 Flow chart of coupling analysis

每个计算时步之前, 提取交界面处离散元区域墙与球的接触力(见式(1)~(3)), 通过数据传输通道将接触力以应力边界形式传递给有限差分域, 施加给交界面处有限差分的节点。每个计算时步之后, 提取交界面处有限差分区域节点的速度, 通过数据传输通道将速度以位移边界形式传递给离散元, 施加给交界面处离散元的墙。每个计算时步, 离散元区域与有限差分区域交换一次数据, 具体耦合分析过程见图4。

## 2 耦合力学参数的确定

耦合分析前, 需获得离散元和有限差分的力学参数。对于有限差分的参数, 采用室内试验的方式确定; 对于离散元的参数, 采用PFC<sup>3D</sup>反演的方式确定。

### 2.1 渣土的力学性能实验

盾构掘进过程中改良剂从刀盘面板喷口或土仓隔板上喷口不断喷出, 并与即将进入土仓或土仓内渣土混合, 形成改良渣土。改良后的渣土其透水性较差, 且渣土不断被螺旋输送机输出, 渣土来不及排水固结, 故选用三轴快剪试验。试验依托南昌地铁1号线区间盾构工程, 选用砾砂作为试验材料<sup>[14]</sup>, 共设置9组试验(表1)。

表1 砾砂渣土快剪试验统计

Table 1 Test program of gravel sand

改良前含水率/%	孔隙率/%	改良剂	添加比/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	围压/kPa
11.2	43.7	无	0	1.71	100
		无	0	1.71	140
		无	0	1.71	200
		膨润土泥浆	20	2.05	100
		膨润土泥浆	20	2.05	200
		膨润土泥浆	20	2.05	300
		聚合物	20	1.93	100
		聚合物	20	1.93	200
		聚合物	20	1.93	300

注: 改良前含水率为未考虑改良剂所增加的含水率, 密度为常压下试样的密度。

试验所用改良剂为膨润土泥浆和聚合物对渣土进行改良。其中膨润土采用钠基膨润土(粒度200 μm, 密度为2.5 g/cm<sup>3</sup>, 膨胀比大于30), 膨润土:水按质量比1:8进行膨化, 形成膨润土泥浆。聚合物采用康达特品牌。试验改良剂添加比为20%。根据规范要求, 轴向剪切应变速率为每分钟应变0.5%, 每0.2 mm记录一次测力计读数和轴向变形值<sup>[14]</sup>。

通过对试验数据进行整理分析, 获得了渣土的应力-应变关系(图5~7), 分析可知改良后和未改良

渣土的应力-应变曲线接近硬化型, 即随着应变增加应力逐渐增大, 直到进入临界破坏状态, 改良剂的添加不会影响渣土应力应变硬化型特征。基于渣土的应力-应变曲线, 分析其莫尔包络线, 获得了渣土的力学参数(表2)。分析可知采用膨润土改良时, 渣土的黏聚力出现小幅度增大; 而渣土的内摩擦角大幅度减小; 采用聚合物改良时, 渣土的黏聚力出现大幅度增大; 而渣土的内摩擦角大幅度减小。

表2 砂砾渣土的内摩擦角和黏聚力

Table 2 Internal friction angles and cohesions of gravel sand

改良方式	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0%	0.0	34
20%高分子聚合物	31.7	12
20%膨润土泥浆	5.0	19

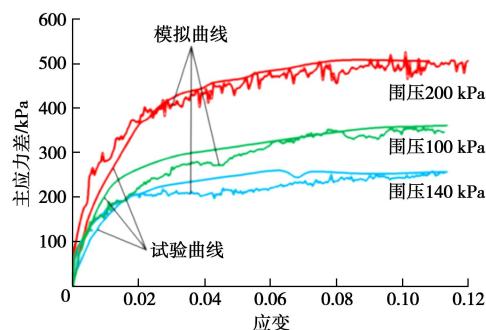


图5 工况1渣土应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of soils under working condition 1

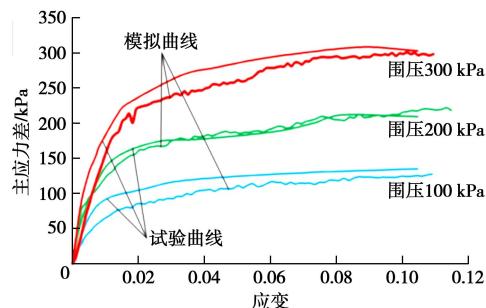


图6 工况2渣土应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of soils under working condition 2

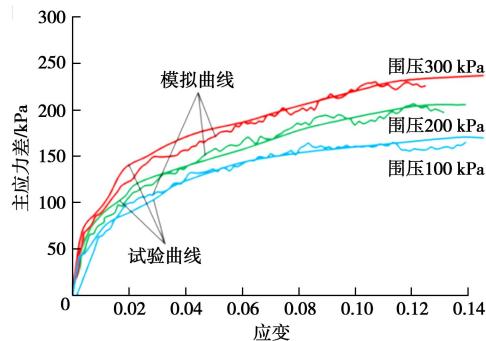


图7 工况3渣土应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of soils under working condition 3

## 2.2 离散元微观力学参数反演

相对于有限差分的宏观力学参数, 离散元参数的微观力学参数获得相对困难。为了获得离散元颗粒的微观参数, 基于室内渣土三轴试验数据, 采用PFC<sup>3D</sup>软件对室内三轴试验进行模拟, 以反演颗粒的微观参数。

本次离散元微观参数反演共设置3种工况, 分别对应渣土试验的3种渣土。工况1、工况2和工况3分别对应未改良渣土、20%膨润土泥浆改良渣土和20%聚合物改良渣土, 具体见表3。

PFC<sup>3D</sup>中颗粒本构模型由3部分组成, 分别为刚度模型、滑移模型和黏结模型。刚度模型表示接触力和相对位移之间呈现出弹性关系; 滑移模型表示剪切与法向接触力之间的关系, 使得两个接触球之间能产生滑移; 黏结模型表示颗粒之间存在一定的黏结力。考虑渣土的力学参数, 未改良渣土模型选用刚度模型和滑移模型的结合, 改良渣土选用刚度模型、滑移模型和黏结模型的结合(表3)。

表3 耦合参数反演工况表

Table 3 Inversion of coupling parameters under different working conditions

工况	改良剂	添加比/%	模型
1	无	0	刚度模型和滑移模型
2	膨润土泥浆	20	刚度模型、滑移模型和黏结模型
3	高分子聚合物	20	刚度模型、滑移模型和黏结模型

通过模拟获得了渣土的反演曲线(图5~7)。对比试验曲线和模拟曲线可知: 两者相似度比较高, 进而获得不同渣土的微观力学参数, 见表4。

表4 不同工况下渣土离散元力学参数表

Table 4 Discrete element mechanical parameters of soils under different working conditions

工况	法向刚度 (N·m <sup>-2</sup> )	切向刚度 (N·m <sup>-2</sup> )	法向黏结力/N	切向黏结力/N	摩擦系数
1	$0.87 \times 10^6$	$0.25 \times 10^6$	—	—	1.20
2	$0.87 \times 10^6$	$0.25 \times 10^6$	$0.45 \times 10^4$	$0.45 \times 10^4$	0.40
3	$0.87 \times 10^6$	$0.25 \times 10^6$	$0.60 \times 10^4$	$0.60 \times 10^4$	0.35
4	$0.87 \times 10^6$	$0.25 \times 10^6$	$0.45 \times 10^2$	$0.45 \times 10^2$	0.10

由于改良剂添加比超过20%时, 改良渣土的流塑性较好, 造成渣土制样困难, 不能获得其应力-应变曲线。国内学者研究表明离散元模型中颗粒间的摩擦系数、切向黏结力和法向黏结力的增大能提高渣土的峰值强度<sup>[16-17]</sup>。基于上述结论, 在膨润土泥浆添加比为20%改良渣土微观参数的基础上, 降低颗粒间的摩擦系数、切向黏结力和法向黏结力, 以达到模拟添加比大于20%的改良渣土, 见表4中工况4。

## 3 耦合分析模型及数据监测

### 3.1 耦合模型的建立

耦合分析模型主要包含FLAC<sup>3D</sup>和PFC<sup>3D</sup>两部分(见图8), 其中FLAC<sup>3D</sup>部分主要是地层; PFC<sup>3D</sup>区域包含部分地层和盾构机。

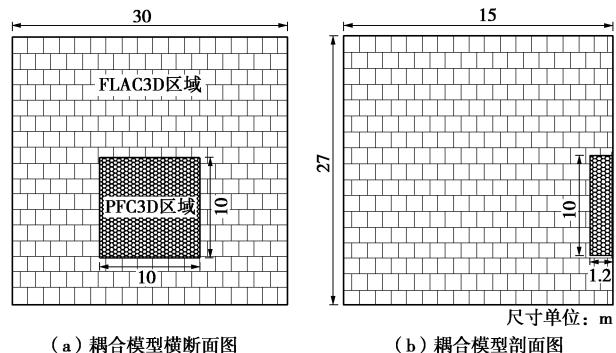


图8 耦合分析模型

Fig. 8 Model of coupling analysis

盾构机模型是参考南昌地铁1号线5标段盾构机建立, 其包含土仓、刀盘、刀具和螺旋输送机。相对于现场盾构机, PFC<sup>3D</sup>盾构机模型未考虑刀盘滚刀、搅动棒和牛腿。同时简化了螺旋输送机, 其长度为2.0 m, 倾斜角为0°。盾构机模型直径为6.28 m, 长度为4.0 m, 刀盘开口率为39%。螺旋输送机模型尺寸是参照现场螺旋输送机实际的尺寸, 直径为1.0 m, 其包含壳体、内轴和螺旋环(见图9, 10)。模拟过程中盾构机速度设定为30 mm/min, 刀盘转速设定为2.5 r/min, 螺机钻速3.86 r/min。

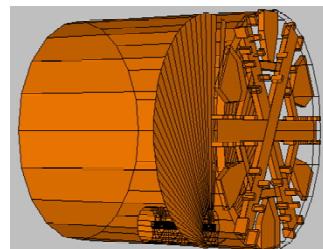


图9 PFC<sup>3D</sup>中盾构机模型

Fig. 9 Model of shield machine in PFC<sup>3D</sup>

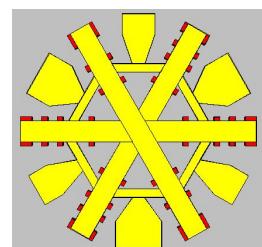


图10 PFC<sup>3D</sup>中刀盘模型

Fig. 10 Model of cutterhead in PFC<sup>3D</sup>

### 3.2 数据监测

为了分析盾构掘进时土仓压力和开挖面支护力的变化特征, 在离散元区域设置了8个监测点(见图11)。其中土仓隔板上设置了5个监测点, 其位置与盾构机

土仓隔板上压力监测元器件位置一致，分别为#1、#2、#3、#4和#5监测点；在#1测点位置的水平线设置了3个监测点，分别为#6、#7和#8监测点。监测频率为每秒提取一次数据。盾构掘进过程中，通常是通过控制上部土仓压力（也就是#1测点的压力）实现对盾构机的操作。因此，文章主要分析土仓上部压力传递性。

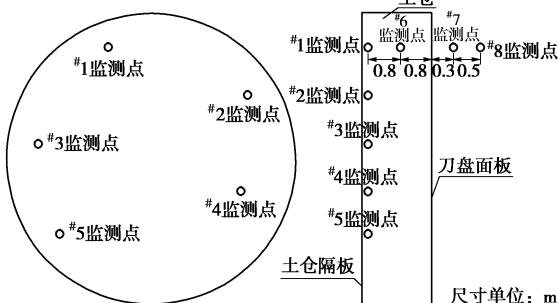


图 11 监测点布置图（左为土仓隔板，右图为土仓剖面图）

Fig. 11 Layout of measuring points

## 4 盾构施工动态耦合分析结果

### 4.1 土仓压力特征分析

通过对监测点的数据进行整理，获得了盾构掘进时土仓压力变化曲线（图 12）。分析可知，盾构掘进过程中土仓压力存在一定的波动幅度，但基本稳定。土仓顶部土仓压力（即#1监测点）最小，约 0.9 bar，土仓底部压力（即#5监测点）最大，这主要是受到监测点埋深的影响，#1监测点位于土仓隔板顶部，而#5监测点位于土仓隔板底部。这与现场土仓压力分布规律基本一致。

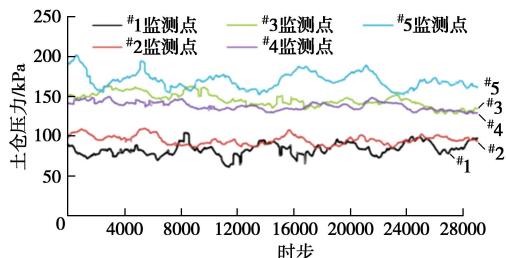


图 12 工况 2 土仓压力变化曲线

Fig. 12 Curves of earth pressures of soil chamber under working condition 2

通过对#1、#6、#7 和#8 监测点的监测数据进行整理，获得了盾构掘进过程中土仓压力和开挖面支护力变化曲线（见图 13）。分析可知：盾构机刀盘切削开挖面地层时土仓内外不同位置的土仓压力存在一定的差异。开挖面上部支护力（即#7 监测点）的波动幅度最大，其次分别为#6 监测（土仓内压力）和#8 监测点（开挖面前方土压力），最后是#1 监测点（土仓隔板上压力），这表明刀盘转动对不同位置压力波动幅度有

一定影响。

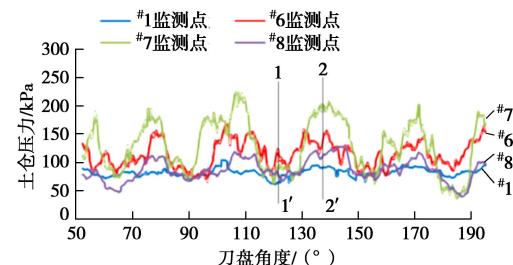


图 13 工况 2 土仓上部内外不同位置土压变化曲线

Fig. 13 Curves of earth pressures at different internal and external positions of soil chamber under working condition 2

受到刀盘转动角度的影响，压力曲线表现出有规律的波动。盾构机刀盘可以分为两部分，分别为面板和开口（图 14）。以#1 监测点为分析对象，刀盘顺时针转动时，#1 监测点前方可能为刀盘开口，也可能为刀盘面板，呈现出有规律的更替。当刀盘面板位于监测点水平线上，压力曲线凸起，压力值较大；刀盘开口位于监测点水平线上，压力曲线向下凹，压力值较小。

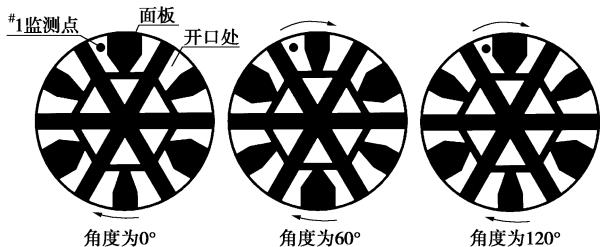


图 14 盾构机刀盘不同角度示意图（#1 监测点位置不变）

Fig. 14 Different angles of shield cutterhead

选取刀盘为 120° 和 135° 时两个角度（图 13 中 1—1' 和 2—2' 剖面）作为分析对象，通过对监测数据进行整理，获得了渣土改良后土仓压力传递变化曲线（图 15）。分析可知，土仓压力传递性受到刀盘角度的影响。刀盘开口处位置土仓压力的传递性较大，即土仓压力与开挖面支护力相差无几；刀盘面板位置土仓压力传递性较小，土仓压力和开挖面支护压力相差较大。

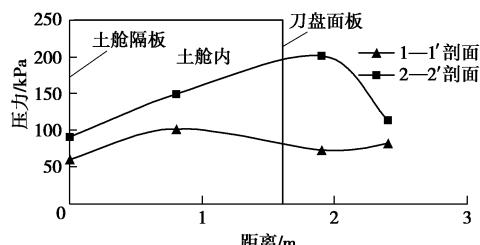


图 15 工况 2 后土仓压力传递变化曲线

Fig. 15 Transfer curves of earth pressures of soil chamber under working condition 2

#### 4.2 渣土改良对土仓压力传递性影响

通过对土仓内外监测压力进行整理, 获得不同渣土下土仓内外土压力变化曲线。图 16~18 分别表示在工况 1、工况 3 和工况 4 时土仓内外不同位置土压变化曲线。

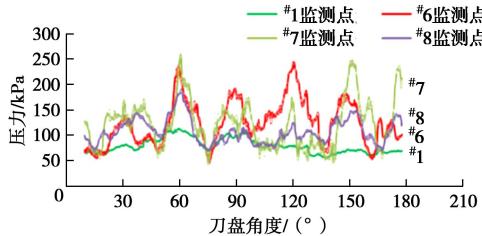


图 16 工况 1 情况下土仓内外不同位置侧向压力变化曲线

Fig. 16 Curves of earth pressures at different inner and outer positions of soil chamber under working condition 1

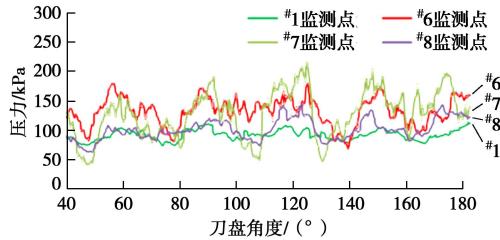


图 17 工况 3 情况下土仓内外不同位置土压变化曲线

Fig. 17 Curves of earth pressures at different inner and outer positions of soil chamber under working condition 3

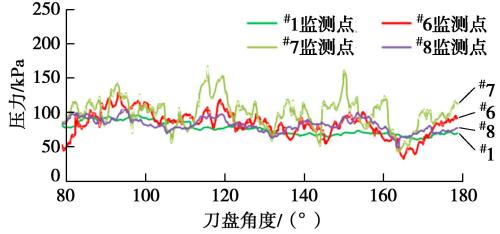


图 18 工况 4 情况下土仓内外不同位置土压变化曲线

Fig. 18 Curves of earth pressures at different inner and outer positions of soil chamber under working condition 4

分析可知, 工况 1 和工况 3 时监测点的土仓内外土压表现为有规律的上下波动变化。工况 4 时监测点压力的波动幅度明显减小。这说明渣土的状态对土仓压力和开挖支护力有一定的影响, 改良渣土状态越好(即渣土中改良添加比越高), 盾构掘进时土仓内外压力波动幅度越小。

为了分析渣土改良对土仓压力的影响, 对工况 1、工况 2 和工况 4 时土仓内#1 和#6 监测数据进行整理, 获得了渣土未改良和渣土改良后土仓压力变化曲线(图 19, 20)。分析可知, 相对于渣土未改良状态, 渣土改良后土仓压力变化幅度减小, 且渣土改良越充分, 压力波动幅度越小。这说明盾构掘进时渣土改良

对土仓内压力有一定的影响。

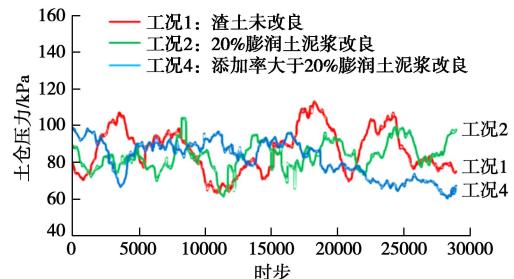


图 19 不同工况下#1 监测点土仓压力变化曲线

Fig. 19 Curves of earth pressures at monitoring point No. 1 under different working conditions

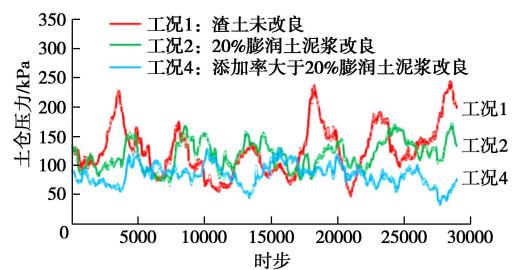


图 20 不同工况下#6 监测点土仓压力变化曲线

Fig. 20 Curves of earth pressures at monitoring point No. 6 under different working conditions

通过对工况 1、工况 2 和工况 4 土仓压力监测数据进行统计整理, 结果见表 5。分析可知, 工况 1 时#1 和#6 监测点的土仓压力均值分别为 86.8, 126.6 kPa, 两者压差为 39.8 kPa; 工况 2 时两个监测点压力均值分别为 83.7, 118.9 kPa, 两者压差为 35.2 kPa; 工况 4 时两个监测点压力均值分别为 81.9, 84.2 kPa, 两者压差为 2.3 kPa。这表明渣土改良能降低土仓内部压力差值, 渣土改良效果越好, 土仓内部压力差值越小。数理统计中标准差意味着数据的离散性, 标准差越大, 离散性越大。通过分析不同工况下土仓压力的标准差, 可以发现, 工况 1 时#1 和#6 监测点数据的标准差分别为 12.2 和 42.6; 工况 2 时两者的标准差分别为 7.8 和 24.0; 工况 4 时两者的标准差分别为 6.8 和 17.8。

表 5 土仓压力统计表

Table 5 Statistics of earth pressures of soil chamber

工况	统计参数	#1 监测点	#6 监测点	差值
工况 1	均值/kPa	86.8	126.6	39.8
	标准差	12.2	42.6	—
工况 2	均值/kPa	83.7	118.9	35.2
	标准差	7.8	24.0	—
工况 4	均值/kPa	81.9	84.2	2.3
	标准差	6.9	17.8	—

分析数据可知,1号监测点压力的波动幅度明显小于6号监测点压力波动幅度,这进一步说明了刀盘转动对土仓压力的影响;对于同一监测点,工况1的压力标准差最大,工况4的压力标准差最小,这说明渣土改良能减小盾构掘进过程中土仓压力值变化的离散性。

为了分析渣土改良对土仓压力传递性的影响,定义应力传递系数 $\lambda$ 为

$$\lambda = \frac{\sigma_0}{\sigma_1} , \quad (4)$$

式中,  $\lambda$ 为应力传递系数,  $\sigma_0$ 为开挖面支护力,  $\sigma_1$ 为土仓隔板上的应力。

分析图11可知,监测点#7采集的土压力数据可以看成开挖面支护压力,监测点#1压力数据可以看成土仓隔板上压力,两者的比值表示土仓上部土压力传递系数。考虑刀盘角度的影响,对盾构掘进时不同时刻的土仓压力传递系数进行了分析。

通过对数据的统计,获得了土仓压力传递系数统计参数(表6)。分析可知:盾构掘进时土仓压力传递系数不是一个固定值,而是一个变化值,其受到刀盘转动的影响。盾构机刀盘面板转至监测点水平线上时土仓压力传递系数相对较大;盾构机刀盘开口转至监测点水平线上时土仓压力传递系数相对较小。土仓压力传递系数受到渣土改良的影响。盾构机刀盘开口转至监测点水平线上时,工况1和工况2的土仓压力传递系数分别为0.48和0.47;工况4的土仓压力传递系数为0.65。盾构机刀盘面板转至监测点水平线上时,工况1和工况2的土仓压力传递系数分别为0.73和0.85;工况4的土仓压力传递系数为0.97。这说明渣土改良能增加盾构掘进过程中土仓压力传递系数。

表6 土仓压力传递系数统计表

Table 6 Statistics of transfer coefficient of earth pressure of soil chamber

位置	工况	均值
刀盘开口	工况1	0.48
	工况2	0.47
	工况4	0.65
刀盘面板	工况1	0.73
	工况2	0.85
	工况4	0.97

#### 4.3 盾构掘进状态下地层变形分析

通过对盾构掘进过程中地层的变形数据进行整理,获得了沿隧道中心线纵向地表沉降累计曲线(图21)。分析可知,盾构掘进过程中,上部土仓压力为0.9bar时,刀盘前方地层发生一定的隆起,约在1.5倍洞径地层隆起出现最大值。渣土改良对地表隆起的影响较小。工况1时地表最大隆起量为2.92mm;工况2时地表最大隆起量为2.67mm;工况4时地表最

大隆起量为2.66mm。相对于渣土改良情况下,渣土未改良时地表隆起略大点。

分析隧道走向水平位移变化云图(图22)可知,在掘进过程中,盾构机对开挖面前方地层产生较大挤压作用,造成地层向隧道走向产生位移。

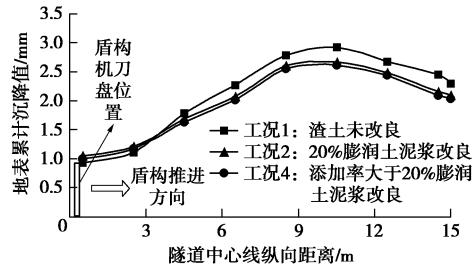


图21 隧道纵向地表沉降累计曲线

Fig. 21 Curves of surface settlement along longitudinal direction of tunnel

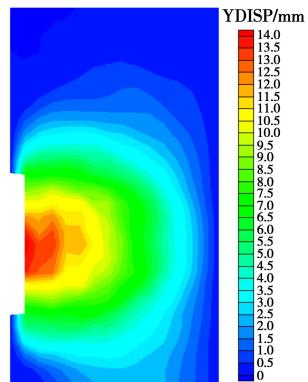


图22 隧道纵向地层水平位移云图

Fig. 22 Cloud chart of displacement of soil stratum along longitudinal direction of tunnel

综上所述可知盾构掘进过程中开挖面前方地层发生一定的隆起,地表隆起最大值位于1.5倍洞径的位置。渣土改良对盾构掘进过程中地层变形的影响较小。相对于渣土改良情况下,渣土未改良时地表隆起略大。

## 5 结 论

基于渣土改良的特征,采用FLAC<sup>3D</sup>和PFC<sup>3D</sup>耦合分析方法,对土压平衡盾构掘进状态下施工力学进行了研究,获得如下4点结论:

(1) 基于有限差分和离散元数值分析的优缺点,提出了采用有限差分和离散元耦合的方法对土压平衡盾构掘进状态下施工力学特征进行分析。通过编写FLAC<sup>3D</sup>和PFC<sup>3D</sup>耦合程序,采用耦合面交换数据的方式,实现盾构掘进的模拟分析。

(2) 刀盘切削地层造成的扰动对土仓压力和开挖面支护力有一定影响。越靠近刀盘,压力的波动幅度越大。刀盘转动的角度对土仓压力和开挖面支护力有

一定的影响。刀盘面板转至监测点水平线上时土压力较大, 刀盘开口转至监测点水平线上时土压力较小。渣土改良能降低土仓压力的离散性。相对于未改良渣土, 渣土改良后土仓压力的波动幅度较小。

(3) 盾构掘进过程中土仓压力传递系数不是一个稳定值, 而是一个受刀盘角度影响的变化值。渣土改良能增大土仓压力的传递系数, 即渣土改良后土仓压力更接近于开挖面支护力。

(4) 渣土改良对盾构掘进过程中地层变形有一定影响, 相对于渣土改良情况下, 渣土未改良时地表隆起略微大。

## 参考文献:

- [1] 肖超, 王树英, 叶新宇, 等. 泥质粉砂岩地层土压平衡盾构碴土改良技术研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(5): 165 - 170. (XIAO Chao, WANG Shu-ying, YE Xin-yu, et al. The study on soils conditioning technology of EPB shield for argillaceous siltstones[J]. Modern Tunneling Technology, 2015, 52(5): 165 - 170. (in Chinese))
- [2] RAFFAELE Vinai, CLAUDIO Oggeri, DANIELE Peila. Soil conditioning of sand for EPB applications: a laboratory research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23: 308 - 317.
- [3] PEILA D, OGGERI C, VINA R. Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soil for EPB tunneling operations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(12): 1622 - 1625.
- [4] MERRITT A S, MAIR R J. Mechanics of tunneling machine screw conveyors: a theoretical model[J]. Géotechnique, 2008, 58(2): 79 - 94.
- [5] RAFFAELE V, CLAUDIO O, DANIELE P. Soil conditioning of sand for EPB applications[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008(23): 308 - 317.
- [6] 肖超. 基于渣土特性的土压平衡盾构施工力学行为及其应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2016. (XIAO Chao. Research on construction mechanics behaviour of earth pressure balance shield and its application based on soil conditioning[D]. Changsha: Central South University, 2016. (in Chinese))
- [7] 李向红, 傅德明. 土压平衡模型盾构掘进试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1101 - 1105. (LI Xiang-hong, FU De-ming. Experimental study on excavation behaviour using model EPB shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1101 - 1105. (in Chinese))
- [8] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘开口率对土仓压力的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2012(1): 89 - 93, 104. (WANG Xin-hong. Influence of aperture ratio of cutterhead of EPB shield on earth pressure in the chamber[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012(1): 89 - 93, 104. (in Chinese))
- [9] 武力, 屈福政, 孙伟, 等. 基于离散元的土压平衡盾构密封舱压力分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 18 - 23. (WU Li, QU Fu-zheng, SUN Wei, et al. Discrete numerical model for analysis of chamber pressure of earth pressure balance shield machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 18 - 23. (in Chinese))
- [10] BEZUIJEN A, TALMON A M. Soil pressures on both sides of the cutter wheel of an EPB-shield[C]// Proceedings of the World Tunnel Congress 2014-Tunnels for a Better Life. Foz do Iguaçu, 2014.
- [11] CUNDALL P A, HART R D. Numerical modelling of discontinua[J]. Engineering Computations, 1992, 9(2): 101 - 113.
- [12] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Discrete element modelling of deep penetration in granular soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30(4): 335 - 361.
- [13] PAN X D, REED M B. A coupled distinct element-finite element method for large deformation analysis of rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1991, 28(1): 93 - 99.
- [14] 江西省勘察设计研究院. 南昌市轨道交通 1 号线一期工程 B 合同段滨江大道站—万寿宫站区间岩土工程勘察报告[R]. 南昌: 江西省勘察设计研究院, 2010. (Jiangxi Institute of Survey and Design. Geotechnical investigation report from Binjiang station to Wanshougong station of Nanchang metro line 1[R]. Nanchang: Jiangxi Institute of Survey and Design, 2010. (in Chinese))
- [15] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T 50123—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))
- [16] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Discrete element modelling of deep penetration in granular soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30(4): 335 - 361.
- [17] PAN X D, REED M B. A coupled distinct element-finite element method for large deformation analysis of rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1991, 28(1): 93 - 99.