

# 土体旋转流变仪开发与土压平衡盾构改性土体塑性流动特性实验

孟庆琳<sup>1</sup>, 屈福政<sup>1</sup>, 李守巨<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为了研究土压平衡式盾构机(EPBS)密封仓及螺旋输送机内改性土体塑性流动特性, 开发了一种土体旋转流变仪。该装置属于可变围压式控制应变型旋转流变仪, 通过测量标准十字叶片在给定围压及转速条件下的旋转扭矩, 获得被测介质的表观动力黏度。对某地铁施工标段的砂土进行实验测量, 实验砂土均采用泡沫改性且改性配比相同, 而初始含水率不同(5%, 10%和15%)。测量条件包含4个不同围压等级(100, 200, 300和400 kPa)和7个不同的叶片转速(1/3.4, 1/4.1, 1/5, 1/6.4, 1/9, 1/15和1/30 RPM)。实验结果表明, 泡沫改性砂土的剪切应力与剪切速率之间满足Bingham流体模型, 属于一种黏塑性非牛顿流体。其黏度系数和屈服应力均随围压的增大而增大。该装置不但可作为一种比较改性土体塑性流动特性优劣的工具, 而且可以为仿真获取密封仓及螺旋输送机内压力场分布和研究密封仓压力平衡控制提供实验支撑。

**关键词:** 土压平衡式盾构; 改性土体; 塑性流动特性; 非牛顿流体

中图分类号: U455 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)10-1642-07

作者简介: 孟庆琳(1981-), 男, 天津市人, 博士研究生, 主要从事盾构密封仓压力平衡问题的数值仿真研究。E-mail: mengqinglin@mail.dlut.edu.cn。

## Development of soil rotational rheometer and experiment on plastic flow characteristics of conditioned soil in earth pressure balance shield

MENG Qing-lin<sup>1</sup>, QU Fu-zheng<sup>1</sup>, LI Shou-ju<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** A soil rotational rheometer is developed for investigating plastic flow characteristics of conditioned soil in the bulk chamber and the screw conveyor of earth pressure balance shield (EPBS). The device belongs to variable pressure and controlled strain rate rotational rheometer. It is capable of obtaining apparent viscosity by measuring the torsional shear applied to a standard vane with controlled pressure and strain rate. The test sands come from a section of a metro and are prepared by the same conditioning treatments under different initial moisture contents (5%, 10% and 15%). The test conditions contain four confining pressure levels (100, 200, 300 and 400 kPa) and seven vane speeds (1/3.4, 1/4.1, 1/5, 1/6.4, 1/9, 1/15 and 1/30 RPM). The results show that the relationship between shear stress and stain rate of foam conditioned sand fits the Bingham fluid model. It belongs to the visco-plastic non-Newtonian fluid. The viscosity coefficient and the yield stress increase with the increase of the confining pressure. The device is a valuable tool for comparing plastic flow characteristics of conditioned soil in EPBS and the test support for investigating distribution of pressure for simulation of soil flow in the working chamber and along the screw conveyor and developing pressure balance control in EPBS.

**Key words:** earth pressure balance shield; conditioned soil; plastic flow characteristic; non-Newtonian fluid

## 0 引言

土压平衡式盾构机(EPBS)是一种被广泛应用于软土施工中的隧道掘进装备。为了增强EPBS的地质

适应性, 挖掘时通常在刀盘前、密封仓内和螺旋输送

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB714006)

收稿日期: 2010-07-27

机沿程注入改性剂(泡沫和聚合物)并与开挖土体充分混合, 成为一种较为均匀的糊状介质<sup>[1]</sup>。采用合适的改性方案, 可使开挖介质呈现良好的塑性流动特性, 对开挖界面的稳定控制以及提高掘进效率至关重要。为此有必要研究改性土体塑性流动特性的评测方法。

目前, 国内外对土压平衡式盾构密封仓及螺旋输送机内改性土体的塑性流动特性研究尚属起步阶段, 现有研究工作根据采用方法的不同可分为两类: ①标准坍落度实验; ②实验室挖掘系统模型。

标准坍落度实验是一种标准混凝土流变特性测试方法, 通过坍落度这个综合指标反映改性土体的流变特性, 因其经济便捷得到广泛应用。在坍落度与改性土体流变特性的映射关系方面已有大量研究成果。Quebaud 等<sup>[2]</sup>提出适合 EPBS 施工的坍落度值应为 120 mm, 此时土体混合物具有较好的塑性流动特性; Williamson 等<sup>[3]</sup>建议的坍落度值为 210 mm; Jancsecz 等<sup>[4]</sup>建议坍落度值为 200~250 mm; Boone 等<sup>[5]</sup>建议坍落度值为 80~100 mm; Vinai 等<sup>[6]</sup>建议坍落度值为 120~225 mm; 魏康林<sup>[7]</sup>认为坍落度应在 100~150 mm 之间。目前, 普遍认为标准坍落度实验所给出的坍落度值与介质的剪切屈服应力有很好的相关性, 一定程度上能够反映被测介质的流变特性, 但在反映坍落过程方面存在一定的局限性, 因此仅凭坍落度值还不能全面地评价改性土体塑性流动特性。

另外一些研究者通过建立 EPBS 开挖系统实验室模型, 仿真模拟掘进过程, 研究改性土体的塑性流动特性。Yoshikawa<sup>[8]</sup>应用全尺寸螺旋输送机研究不同转速条件下塑性土体的输送机理, 提出螺旋输送机沿程压力梯度为线性分布。Bezuijen 和 Schaminee<sup>[9-10]</sup>通过螺旋输送机实验室模型和全尺寸螺旋输送机研究改性砂土的输送特性, 提出螺旋输送机沿程压力梯度为线性分布, 螺杆扭矩近似恒定, 螺旋输送机出口压力受到排土闸门开度的影响。Merritt 和 Mair<sup>[11]</sup>通过实验室螺旋输送机装置针对黏性土体, 研究不同转速条件和螺旋输送机出口条件下的沿程压力梯度和扭矩。上述方法能够通过螺旋输送机的扭矩和沿程压力梯度综合反映介质的塑性流动特性, 为改性土体的塑性流动特性评价提供途径, 但实验系统较为复杂, 且评价指标过于综合, 还不能从流动机理方面解释改性土体的塑性流动特性。

以上关于土压平衡式盾构密封仓及螺旋输送机内改性土体塑性流动性的研究, 主要通过流动产生的综合结果反映其流动特性, 还没有从流动机理上对流动过程进行研究。而在泥石流<sup>[11]</sup>、水煤浆<sup>[12]</sup>、砂土液化<sup>[13]</sup>和耕作<sup>[14]</sup>等领域, 基于流变学理论将土体视为非牛顿流体研究土体的塑性流动特性, 已取得大量的成果。

非牛顿流体是剪切应力和剪切速率之间不满足正比例关系的流体<sup>[15]</sup>。由坍落度实验可知最终改性土体能够达到稳定的坍落高度, 说明其存在屈服应力, 具有黏塑性流体的特征。黏塑性流体属于一种非牛顿流体, 其特性表现为存在屈服应力, 当剪切应力小于屈服应力时, 介质像固体一样不流动, 剪切应力一旦超过屈服值时, 介质才像流体一样流动<sup>[16]</sup>。目前, 黏塑性流体包括 3 种模型: Bingham 模型、Herschel-Bulkley 模型和 Casson 模型。Bingham 模型结合了固体和非牛顿黏性流体的特性, 通过 von-Mises 屈服准则区分固体和塑性流体区域<sup>[17]</sup>。

为了研究 EPBS 改性土体的塑性流动特性, 基于流变学理论开发一种土体流变仪。该装置及方法可作为盾构施工前, 在实验室评价改性方案优劣的工具, 对施工参数的确定也有一定的借鉴意义。另外该装置还可为仿真获取密封仓及螺旋输送机内压力分布, 进而研究 EPBS 压力平衡控制, 提供确定材料黏度模型及参数的实验支撑。

## 1 土体旋转流变仪的开发

旋转流变仪是研究非牛顿流体流动特性的重要工具, 可以通过测量被测介质的剪切应力与剪切速率, 确定其表观动力黏度。现有的产品根据测量原理的不同可分为两类: 控制应力型和控制应变型。控制应变型旋转流变仪的原理是测量整个剪切缝隙在给定剪切速率时的剪切应力, 相对更容易实现。根据旋转部件的不同可分为 4 类: 同心圆筒型、锥板型、平行平板型和叶片型<sup>[18]</sup>。旋转部件的选取主要考虑剪切缝隙的限制, 因此叶片型更适合 EPBS 改性土体的特点。本研究中土体流变仪的开发, 重点考虑了壁面效益的影响及剪切缝隙限制, 最终选用十字叶片及控制应变型。

### 1.1 设计原理

通常十字板剪切实验假设最终失效面是叶片直径和长度确定的圆柱表面。叶片旋转驱动扭矩等于剪切失效面上的阻力扭矩。如果假定失效圆柱的上下表面及侧面受到的剪切应力相等, 并采用标准尺寸的叶片( $L=2d$ ), 则剪切应力:

$$\tau = \frac{0.86M}{\pi d^3}, \quad (1)$$

式中,  $M$  为最大扭矩,  $d$  为叶片直径,  $\tau$  为剪切应力。

由于本实验装置采用底部气囊加压的方式, 且土体是各向异性介质。因此在竖直方向上失效圆柱上下表面受到的土体正压力与水平方向上失效圆柱侧面受到的土体正压力是不相等的。存在以下关系:

$$\sigma_{\text{top}} = \sigma_{\text{bottom}} = \frac{\sigma_{\text{lateral}}}{k} \quad , \quad (2)$$

式中,  $\sigma_{\text{top}}$  为失效圆柱顶面受到的土体正压力,  $\sigma_{\text{bottom}}$  失效圆柱底面受到的土体正压力,  $\sigma_{\text{lateral}}$  失效圆柱侧面受到的土体正压力,  $k$  为侧压系数。

由库仑定律可知, 正压力与剪切应力的关系:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad , \quad (3)$$

式中,  $\varphi$  为土体内摩擦角,  $c$  黏聚力。

对于砂质土体, 可忽略黏聚力  $c$ , 则

$$\tau_{\text{top}} = \tau_{\text{bottom}} = \frac{\tau_{\text{lateral}}}{k} \quad . \quad (4)$$

修正公式 (1), 得侧面受到的剪切应力:

$$\tau = \frac{M}{\left( \frac{1}{6k} + 1 \right) \pi d^3} \quad . \quad (5)$$

剪切速率计算公式:

$$\dot{\gamma} = 2 \times \frac{2\pi n_{\text{vane}}}{60} \times \frac{D^2}{D^2 - d^2} \quad , \quad (6)$$

式中,  $\dot{\gamma}$  剪切速率,  $n_{\text{vane}}$  叶片转速,  $D$  为容器内径。

## 1.2 装置介绍

本实验装置由实验容器、驱动系统、加载系统和数据采集系统 4 部分组成。图 1 为本实验装置的示意图, 图 2 为本实验装置的实物照片。

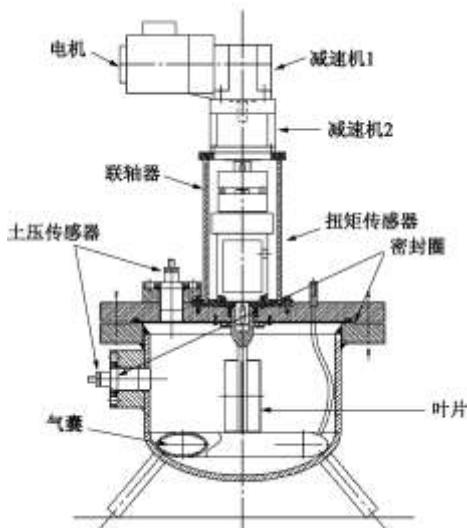


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Structure of test device



图 2 实验装置实物照片

Fig. 2 Photograph of test device

### (1) 实验容器

实验容器由上盖和底部容器组成。上盖直径为 395 mm, 厚度为 26 mm。上盖设有驱动系统的安装座和一个土压传感器的安装孔。底部容器内径为 273 mm, 壁厚为 8 mm, 容积为 10 L。侧壁设有一个土压传感器的安装孔。通过 12 个螺栓连接上盖和底部容器, 并采用 O 型密封圈密封。

### (2) 驱动系统

驱动系统包括一个调速电机、两级减速机、一个联轴器、一个扭矩传感器和一个标准尺寸的十字叶片组成。调速电机的转速范围 (100~1400 RPM)。调速电机与两个速比分别为 1:180 和 1:25 的减速机顺序直联, 再通过联轴器与扭矩传感器 (0~100 Nm) 及一个标准尺寸的十字叶片连接, 最终减速比为 1:4500。因此, 叶片转速与电机转速的关系为

$$n_{\text{vane}} = \frac{1}{180} \times \frac{1}{25} \times n_{\text{motor}} = \frac{n_{\text{motor}}}{4500} \quad . \quad (7)$$

规范推荐的叶片转速 1/50~1/33 RPM。十字叶片采用 ASTM(D2573—72)<sup>[19]</sup> 推荐的标准尺寸。叶片宽度为 50 mm, 长度为 100 mm。十字叶片轴与上盖之间布置了唇形密封圈。

### (3) 加载系统

加载系统包括一个空压机、一个内部气囊和两个土压传感器组成。空压机所能提供的最大空气压力为 800 kPa, 内部气囊最大充气体积为 1 L, 两个分别布置于上盖和侧壁的土压传感器量程为 (0~500 kPa)。

### (4) 数据采集系统

本实验装置采用工业示波器采集扭矩传感器和两个土压传感器的测量信号, 并通过计算机实时监测和记录测量结果。

## 1.3 性能及特点

该套实验系统的设计结合 EPBS 密封仓及螺旋输送机内改性土体的工作环境特点, 其性能指标见表 1。

表 1 仪器性能指标

Table 1 Performance indices of apparatus

项 目	数 值
叶片转速/RPM	1/45~1/3.2
剪切速率/ $s^{-1}$	0.005~0.067
叶片扭矩/(N·m)	0~100
剪切应力/kPa	0~200
围压/kPa	0~500

设计中借鉴了其它领域已有的实验手段, 具有以下功能及特点:

(1) 由于该装置采用密封处理, 可实现被测介质在不排水条件下的流变参数的测量。

(2) 通过布置于容器内部的气囊对实验土体施加不同等级的围压, 可研究围压对改性土体塑性流动特性的影响。

(3) 通过布置于上盖及侧壁上的土压传感器测得的压力值及气囊充气压力, 可修正由于叶片受到的围压及剪切应力。

## 2 实验砂土制备及实验过程

### 2.1 实验砂土制备

对泡沫改性的砂, 考查不同初始含水率, 应用相同改性方案, 说明该实验装置及方法的有效性。实验用砂取自某地铁施工标段, 其天然密度  $1.79 \text{ g/cm}^3$ , 含水率介于  $4.6\% \sim 20.4\%$ 。对砂样进行筛分处理, 筛分后实验用砂的颗粒级配曲线如图 3 所示。

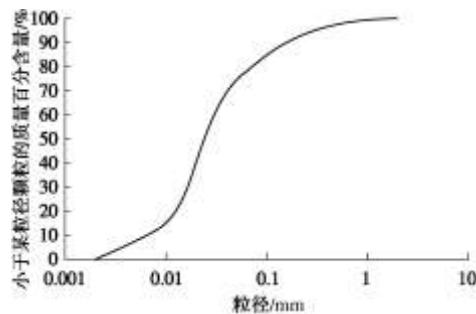


图 3 实验砂土的颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain size distribution for test sand

制备 3 种不同初始含水率的实验砂土进行实验测量, 相关改性参数见表 2。

表 2 改性参数

Table 2 Parameters of conditioning

编 号	含 水 率 /%	泡 沫 注 入 率 /%	发 泡 率	泡 沫 剂 浓 度 /%
F1	5	40	13	5
F2	10	40	13	5
F3	15	40	13	5

### 2.2 实验过程

对于每种实验砂土, 分别采用 4 种不同的围压等

级进行测试 (100, 200, 300 和 400 kPa), 在每个围压等级下, 包含 7 种不同的叶片转速 (1/3.4, 1/4.1, 1/5, 1/6.4, 1/9, 1/15 和 1/30 RPM), 共包括 28 种不同的实验条件。每种实验条件下, 数据采集系统同时记录叶片扭矩随时间的变化及土压传感器随时间的变化。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 改性土体的黏塑性参数

本土体流变仪可以记录不同实验条件时的叶片旋转扭矩时程曲线, 应用公式 (5) 将其转化为剪切应力时程曲线, 图 4 为实验砂土 F3, 围压 200 kPa, 叶片转速为 1/30 RPM 时的剪切应力时程曲线。其它实验条件下也可以得到类似的时程曲线。

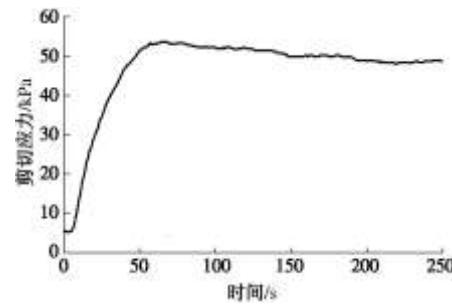
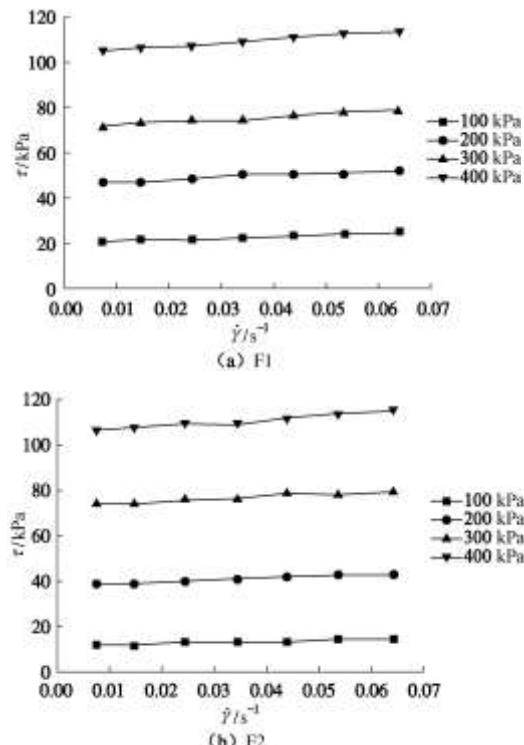


图 4 剪切应力时程曲线

Fig. 4 Time history curve of shear stress

记录剪切应力时程曲线的峰值, 绘制 3 种实验砂土, 在不同围压等级下, 剪切应力  $\tau$  与剪切速率  $\dot{\gamma}$  的关系曲线 (见图 5)。



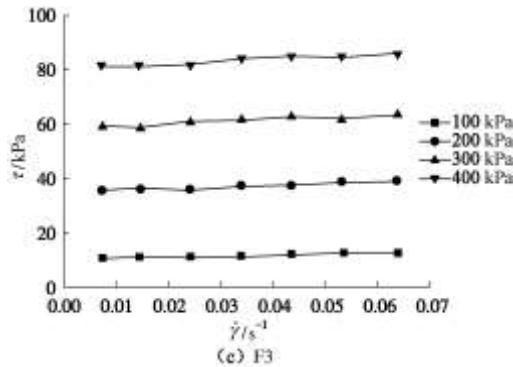


图 5 不同围压下剪切应力与剪切速率的关系

Fig. 5 Relationship between shear stress and shear rate under different confining pressures

由图 5 可知在被测剪切速率范围内泡沫改性砂土的剪切应力与剪切速率间存在较好的线性关系, 同时两者之间的关系受到围压的影响, 剪切应力随剪切速率的增大而增大。相同剪切速率时, 剪切应力随着围压的增大而增大。对比 3 种不同初始含水率的实验砂土, 其结果略有不同, 但存在相同变化趋势。

由图 6 可知表观动力黏度  $\eta$  与剪切速率  $\dot{\gamma}$  有关。3 种实验砂土的表观动力黏度  $\eta$  与剪切速率  $\dot{\gamma}$  之间存在相同的变化趋势, 即不同围压等级下改性土体的表观动力黏度  $\eta$  均随剪切速率  $\dot{\gamma}$  的增大而减小, 呈现剪切稀化的非牛顿流体特性; 围压对表观动力黏度随剪切速率间的变化趋势存在明显的影响, 相同剪切速率时, 表观动力黏度  $\eta$  随围压的增大而增大。对比 3 种不同初始含水率的实验砂土, 其结果略有不同, 但存在相同变化趋势。

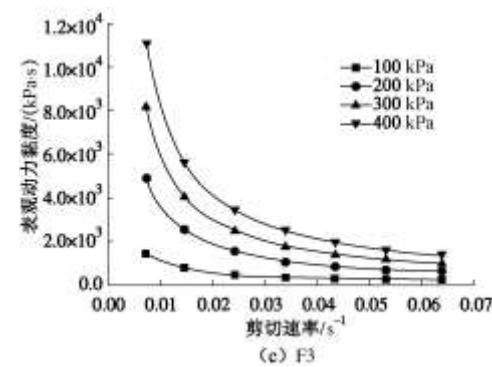
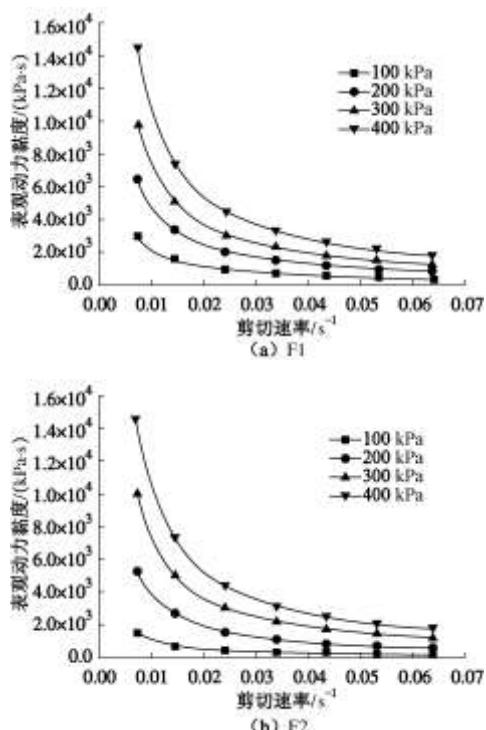


图 6 不同围压下表观动力黏度与剪切速率间的关系

Fig. 6 Relationship between apparent viscosity and shear rate under different confining pressures

采用专业的数据分析软件, 用 Bingham 模型拟合 3 种实验砂土不同围压时的剪切应力  $\tau$  与剪切速率  $\dot{\gamma}$ , 分别得到的黏度系数  $\mu$  和屈服应力  $\tau_0$  (结果见表 3)。其中黏度系数  $\mu$  的范围为 32.8~156.3 kPa s, 屈服应力  $\tau_0$  的范围为 10.3~105.1 kPa。其中屈服应力略低于直剪实验结果 50.8~145.6 kPa。

Bingham 流体模型如下:

$$\text{当 } |\tau| > \tau_0 \text{ 时, } \tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (8)$$

$$\text{当 } |\tau| \leq \tau_0 \text{ 时, } \dot{\gamma} = 0 \quad (9)$$

式中,  $\tau$  为剪切应力,  $\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $\tau_0$  为屈服应力,  $\mu$  为黏度系数。

表 3 实验砂土的黏塑性参数

Table 3 Visco-plastic parameters of test sand

围压 /kPa	F1		F2		F3	
	黏度 系数 /(kPa s)	屈服 应力 /kPa	黏度 系数 /(kPa s)	屈服 应力 /kPa	黏度 系数 /(kPa s)	屈服 应力 /kPa
100	67.8	20.2	45.9	11.2	32.8	10.3
200	93.2	46.5	71.9	38.4	58.8	35.2
300	124.3	71.2	108.0	72.7	73.4	58.7
400	156.3	104.0	151.5	105.1	95.2	80.2

### 3.2 围压对改性土体黏塑性参数的影响

由于 3 种实验砂土的含水率均未达到饱和状态, 围压对泡沫改性砂土的黏塑性参数均有影响。随着围压的增大, 会使实验砂土孔隙率减少, 相对密度增大, 直到砂土达到饱和状态。随着孔隙率的减少, 相对密度增大, 颗粒间的相对距离变短, 相对运动时黏性阻力增大, 因此黏度系数均随围压的增大而增大 (见图 7)。同时颗粒间产生相对运动需要克服更大的初始内摩擦力, 因此屈服应力均随围压的增大而增大 (见图 8)。

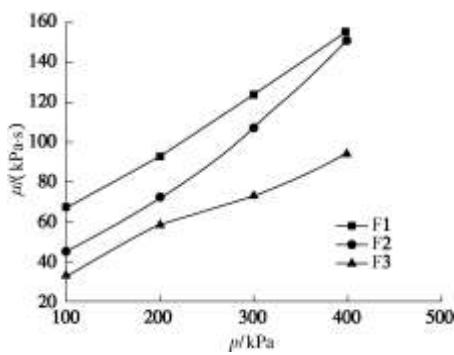


图7 围压对黏度系数的影响

Fig. 7 Effect of confining pressure on viscosity coefficient

### 3.3 初始含水率对改性土体黏塑性参数的影响

图9是不同围压下, 黏度系数随初始含水率的变化曲线。由图可知, 对于不同的围压条件, 黏度系数均随初始含水率的增加而减少。这是由于孔隙水对颗粒间相对运动起到润滑作用。随着孔隙水的增加使得润滑作用更加明显。图10是不同围压下, 屈服应力随初始含水率的变化曲线。由图可知, 不同围压下, 屈服应力均随初始含水率的增大而减小。

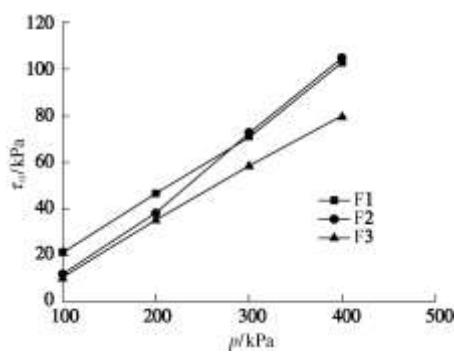


图8 围压对屈服应力的影响

Fig. 8 Effect of confining pressure on yield stress

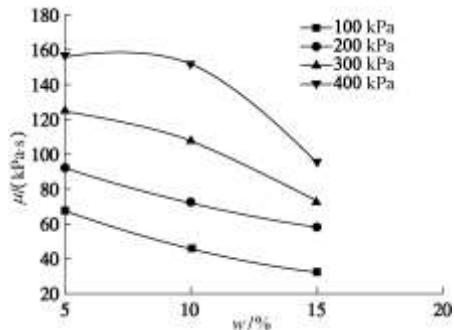


图9 初始含水率对黏度的影响

Fig. 9 Effect of initial moisture content on viscosity

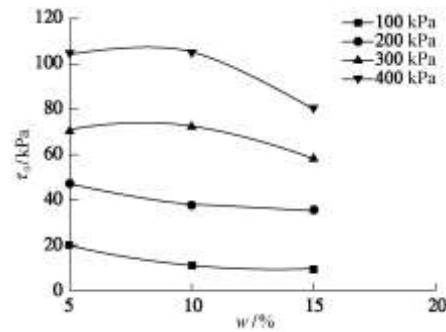


图10 初始含水率对屈服应力的影响

Fig. 10 Effect of initial moisture content on yield stress

## 4 结 论

开发了一种基于流体力学理论, 研究土压平衡式盾构密封仓及螺旋输送机内改性土体塑性流动特性的土体流变仪。该装置可以通过测量改性土体的黏塑性参数从而量化其塑性流动特性。随后应用该装置对不同初始含水率, 相同改性方案改性的砂土进行实验测量, 获取了泡沫改性砂土的黏塑性参数。通过实验不但证明该装置能够达到预期的实验目标, 可以为后续研究土压平衡式盾构螺旋输送机压力输送机理提供依据, 同时可得出如下结论:

(1) 土压平衡式盾构密封仓及螺旋输送机内泡沫改性砂土的剪切应力与剪切速率之间较好地符合Bingham流体模型, 呈现黏塑性流体的特性, 属于一种存在屈服应力的非牛顿流体。实验所获得的黏度系数 $\mu$ 的范围为32.8~156.3 kPa s, 屈服应力 $\tau_0$ 的范围为10.3~105.1 kPa。

(2) 不同初始含水率的泡沫改性砂土样本, 在不同围压条件时, 表观动力黏度均随剪切速率的增大而减小, 呈现剪切稀化的非牛顿流体特性。

(3) 围压和初始含水率对泡沫改性砂土的黏塑性参数具有影响。黏度系数和屈服应力均随围压的增大而增大; 黏度系数和屈服应力均随初始含水率的增大而减小。

## 参考文献:

- [1] MERRITT A, MAIR R J. Mechanics of tunnelling machine screw conveyor: model tests[J]. Géotechnique, 2006, **56**(9): 605~615.
- [2] QUEBAUD S, SIBAI M, HENRY J P. Use of chemical foam for improvements in drilling by earth pressure balanced shields in granular soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, **13**(2): 173~180.
- [3] WILLIAMSON G E, TRAYLOR M T, HIGUCHI M. Soil conditioning for EPB shield tunneling on the South Bay

- Ocean Outfall[C]// Proceedings of RETC, 1999: 897 – 925.
- [4] JANCSEZ S, KRAUSE R, LANGMAACK L. Advantages of soil conditioning in shield tunnelling: experiences of LRTS Izmir[C]// ALTEN T, et al, eds. Proceedings of International Congress on Challenges for the 21st Century, Balkema, Rotterdam: 865 – 875.
- [5] BOONE S J, ARTIGIANI E, SHIRLAW J N, et al. Use of ground conditioning agents for Earth Pressure Balance machine tunnelling[C]// AFTES, ed. Proceedings of Congress International de Chambery: 313 – 319.
- [6] VINAI R, OGGERI C, PEILA D. Soil conditioning of sand for EPB applications: a laboratory research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, **23**(3): 308 – 317.
- [7] 魏康林. 土压平衡式盾构施工中“理想状态土体”的探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2007(1): 67 – 70. (WEI Kang-lin. On the ideal soil in the earth pressure balanced shield tunnelling[J]. Urban Mass Transit, 2007(1): 67 – 70. (in Chinese))
- [8] YOSHIKAWA T. Soil pressure drop of the screw conveyor for shielded machines[C]// Transactions of the Japan Society for Mechanical Engineers, 1996, Part C 62(595): 1197 – 1203.
- [9] BEZUIJEN A, SCHAMINEE P E L. Model experiments using foam simulation the drilling with an EPB shield[R]. GeoDelft Report No. BF 51010. Delft, GeoDelft, 2000.
- [10] BEZUIJEN A, SCHAMINEE P E L. Simulation of the EPB-shield TBM in model tests with foam as additive[C]// Proceedings of Congress on Modern Tunnelling Science and Technology. Balkema, Kyoto, Rotterdam, 2001: 935 – 940.
- [11] 沈寿长. 泥石流流变特性的试验研究[J]. 水利学报, 1998, 9(9): 7 – 13. (SHEN Shou-chang. Experiment of rheology of debris flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, **9**(9): 7 – 13. (in Chinese))
- [12] 刘宝林, 孔 琳. 水煤浆流动特性及其流变模型确定方法综述[J]. 煤化工, 1995(4): 49 – 53. (LIU Bao-lin, KONG Long. A summary of flowing properties of coal-water slurry and determination of rheologic model thereof[J]. Coal Chemical Industry, 1995(4): 49 – 53. (in Chinese))
- [13] 陈育民, 刘汉龙, 邵国建, 等. 砂土液化及液化后流动特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(9): 1408 – 1413. (CHEN Yu-min, LIU Han-long, SHAO Jian-guo, et al. Laboratory tests on flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(9): 1408 – 1413. (in Chinese))
- [14] KARMAKAR S, KUSHWAHA R L. Development and laboratory evaluation of a rheometer for soil visco-plastic parameters[J]. Journal of Terramechanics, 2007, **44**(2): 197 – 204.
- [15] SKELLAND A H P. Non-Newtonian flow and heat transfer [D]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1967.
- [16] ZISIS T, MITSOULIS E. Visco-plastic flow around a cylinder kept between parallel plates[J]. J Non-Newtonian Fluid Mech, 2002, **105**: 1 – 20.
- [17] BERIS A N, TSAMOPOULOS J A, Armstrong R C, et al. Creeping motion of a sphere through a Bingham plastic[J]. J Fluid Mech, 1985, **158**: 219 – 244.
- [18] CHHABRA R P, RICHARDSON J F. Non-Newtonian flow in the process industries, fundamentals and engineering applications[D]. Oxford: Butterworth Heinemann Publishing Ltd., 1999.
- [19] ASTM D2573—72. Standard test method for field vane shear test in cohesive soil[S]. 1972.