

DOI: 10.11779/CJGE201403005

泥膜形成与状态划分细观分析及模型试验研究

刘 成¹, 孙 钧^{2, 3}, 杨 平¹, 王海波¹

(1. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 泥水盾构施工中泥浆在高压作用下侵入土层形成不同状态的泥膜, 泥膜的形成机理复杂, 但其状态划分依据相对简单。基于离散元程序 YADE 编制了流体与颗粒相互作用及粒间长程引力作用模型, 从粒径比、粒间范德华力、流体初始流速以及泥浆颗粒密度几个方面分析了泥浆侵入土层初始恒速阶段的堆积状态, 确定土层最紧密堆积对应的泥膜状态理论下限值。采用静置后的泥浆侵入土层模型试验分析了两组土层粒径的泥膜状态, 表明粒径比对泥膜状态的影响与离散元分析结果、泥膜状态划分理论相吻合。初步建立了泥膜形成过程的宏细观联系, 弥补了传统过滤理论和离散元法未考虑颗粒侵入土层动态形成泥膜的不足。

关键词: 泥膜状态; YADE; 细观分析; 范德华力; 模型试验

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)03-0435-08

作者简介: 刘 成(1982-), 男, 江苏宿迁人, 博士, 讲师, 主要从事地下渗流、动力分析及离散元等方面的研究与教学工作。E-mail: lcheng83@163.com。

Mesoscopic analysis and model test on formation process and state division of slurry membrane

LIU Cheng¹, SUN Jun^{2, 3}, YANG Ping¹, WANG Hai-bo¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Geotechnical

Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the slurry shield construction, slurry membrane forms when slurry invades stratum under high pressure. The mechanism of slurry membrane formation is complicated, but the criteria for the state division are relatively easy. A model of fluid-particle interaction and intergranular long-range attractive force is developed based on the discrete element program YADE to analyze the packing state of slurry particles during the initial constant rate period from the viewpoint of partial diameter ratio, Van der Waals force, initial fluid velocity and slurry particle density, to determine the lower limit value of slurry membrane state corresponding to the closest packing of soil particles. The slurry membrane state with two diameters of soil particles is also analyzed by conducting the model test using the slurry after standing. The result of model test shows that the influence of partial diameter ratio on slurry membrane state is consistent with the DEM simulation and the theory of state division of slurry membrane. The macro-meso relation is established for slurry membrane formation process. This study remedies the defects of the conventional filtration theory and DEM simulation which do not consider slurry invading stratum and slurry membrane forming dynamically.

Key words: slurry membrane state; YADE; mesoscopic analysis; Van der Waals force; model test

0 引 言

在各种复杂环境下采用泥水盾构法修建隧道工程, 如何及时形成安全有效的泥膜是维持开挖面稳定需要解决的首要问题。泥膜形成和状态演变的机制复杂, 目前相关理论和试验研究仍滞后于工程实践。泥膜(泥饼)的研究起源于化学工业和矿产工业中过滤处理、废物处理等方面的研究。基本原理是使用过滤

介质实现固-液分离的过程, 随着过滤介质的堵塞, 过滤处理能力下降, 最终形成致密微透水的泥膜, 逐渐增长的泥膜表现出一定程度的压缩性。泥膜与过滤

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308302); 教育部博士点基金资助项目(20133204120014); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(2013); 住建部基金项目(2013-K3-16)

收稿日期: 2013-07-24

介质中的压力分布不均匀,影响了泥膜结构(固化率 ε 和渗透率 k 等),并影响了过滤过程。后人的研究基本上都是基于 Ruth 等首先提出的过滤方程经典公式,但是该公式引入了较多的假设。Tien 等^[1]根据多相流理论求解分析,给出了考虑泥膜内部颗粒运动的解析解,后被白云等^[2]引入到泥水盾构泥膜形成模型的研究,取得了较好的分析效果。刘成等^[3]假设泥膜的形成过程中,其应力状态与土的体积状态的关系与饱和重塑正常固结黏土类似,满足唯一性关系,在泥膜形成过程中同时考虑了固结变形。目前在过滤介质表面形成泥膜的研究比较成熟,但多局限于泥皮型泥膜(薄膜模型),未考虑细颗粒进入粗颗粒土间隙形成其它状态的泥膜,因此不适用于透水性较大的地层。Broere 等^[4]给出与时间 t 相关的侵入距离 e_i 的表达式,将地层假设为成层地层,采用积分的方式求解地层中孔隙压力增长,这与复杂的地层条件仍有较大的区别。Anagnostou 等^[5]提出了泥浆侵入的停滞梯度 f_{so} 的概念,指出完全的颗粒尺寸分布对泥浆侵入地层能力影响不大,主要取决于细粒土含量;除了泥浆剪切强度外,泥浆中膨润土浓度对泥浆侵入地层能力有较大的影响。李昀等^[6]考虑泥水的渗透区域与滑动面之间的几何关系对有效泥水压力进行折减,采用泥浆渗透(侵入)模型探讨了泥浆渗透对开挖面稳定性的影响。

泥膜形成与增长常用动态方法进行分析,早期研究多采用半动态分析方法。Lu 等^[7]提出了可描述泥膜形成整个过程的运动学模型,模型中考虑到单个颗粒的受力平衡,包括重力作用和颗粒-流体间相互作用。Dong 等^[8]采用离散元分析流速恒定和压力恒定下沉降和滤失过程中泥膜的形成与增长规律,假设液体为一维流动,固体颗粒为二维流动。这些分析方法在分析泥浆侵入地层形成地层堆积填充时存在几点困难:①二维模型模拟泥膜在介质表面动态形成过程中无法直接模拟颗粒间隙空间分布状态,不能正确分析泥浆颗粒在地层中的迁移和堆积。②半动态方法揭露了泥膜形成的微观机理,但因其对颗粒运动和平衡进行一定的假设,不是完全动力模型,因此,一些重要特性无法分析,如泥膜的压缩变形特性。③目前泥膜形成离散元分析多局限于泥皮型泥膜(薄膜模型),考虑细颗粒进入粗颗粒土间隙形成其它状态泥膜的细观研究仍显不足。④粒径介于 $10\sim 100\mu\text{m}$ 之间的颗粒,其范德华力的量级与重力接近或者大数个量级,其作用不可忽略,但泥膜结构的分析中往往忽略了这种影响。本文在三维离散元开源程序 YADE 基础上编制流体与颗粒相互作用以及粒间长程引力作用模型,进行了泥浆侵入土层的离散元分析,重点分析影响泥膜状态的影响因素,与泥浆侵入土层模型试验结果及泥膜

状态相关理论进行比较分析。

1 泥膜状态的划分标准

泥水在掘削面上的渗透形态也叫泥膜状态。泥膜状态可分为 3 种类型^[9-11]:①泥皮型,即“表面泥膜”,泥膜仅在开挖面表面形成,对应“薄膜模型”。认为泥浆压力作为外力完全有效地作用于不透水的薄膜上,这种情况多发生在黏粒土、粉粒土及细砂土等土层,对应地层的有效间隙 $L < d_{\min}$ (泥水最小粒径)的情形。②渗透带型,即“流变堵塞”,泥水侵入地层,地层表面完全没有泥膜存在。这种情形多发生于粗砂、砾石等地层,对应地层的有效间隙 $L > 3d_{\max}$ (泥水最大粒径),其解决措施是增大泥水的粒径,即在泥水中添加砂粒。③泥皮+渗透带型,相当于“中间状态”,这种情形多发生于砂性地层(中、细),对应地层的有效间隙 L 满足条件 $3d_{\max} > L > d_{\min}$ 。后两种泥膜状态对应“渗透模型”,更具有代表性。对于软黏土层,当泥水压力与维持切削面稳定所需的泥水压力接近时,有可能发生泥水喷发,此时,在地层中的泥浆是处在劈裂裂隙中,不属于“渗透模型”^[12]。

2 泥浆侵入地层细观分析

2.1 颗粒受力分析

泥浆悬浮液中泥浆颗粒在流体拖曳力作用下在土层间隙中迁移,受到流体和周围颗粒的各种力的作用。但各力的贡献比例不同^[13],起主要作用的主要有流体对颗粒的浮力和拖曳力作用、粒间接触力作用以及颗粒间长程引力,如范德华力、静电力和毛细吸力等。泥浆近似处在饱和状态,毛细吸力可以忽略;但非饱和和地层中毛细吸力对渗流作用影响较大,不能忽略。这里以含水率较高的地层为研究对象,不考虑地层中的毛细吸力作用。各作用力的贡献大小影响因素有颗粒的矿物成分、平均粒径和级配,流体的稠度、流速、浓度、添加剂类型和含量等。为了简化分析泥浆颗粒在土层中的堆积状态和泥膜形成规律,除了粒间切向接触力 F_{ij}^s 和法向接触力 F_{ij}^n ,这里主要考虑 4 种力的作用,即

$$G = mg \quad , \quad (1)$$

$$F_{\text{buoy}} = mg \rho_f / \rho_p \quad , \quad (2)$$

$$F_{\text{drag},i} = f_{m,i} \varepsilon_i^{-(x+1)} \quad , \quad (3)$$

$$F_j^v = -\frac{H_a}{6} \cdot \frac{64r_i^3 r_j^3 (h + r_i + r_j)}{(h^2 + 2r_i h + 2r_j h)^2 (h^2 + 2r_i h + 2r_j h + 4r_i r_j)} \hat{n}_j \quad (4)$$

颗粒 i 上的作用力如图 1 所示,其中颗粒 j 对 i 产生接触力 F_{ij}^s , F_{ij}^n 和非接触力 F_{ij}^v ,颗粒 k 对 i 产生

非接触力 F_{ik}^v , 颗粒 i 上的合力 F_i 为

$$F_i = \sum (F_{ij}^n + F_{ij}^s + F_{ij}^v) + F_{\text{buoy}} + F_{\text{drag}} + m_i g \quad (5)$$

式中 $f_{i0,i} = 0.5C_{d0,i}\rho_f\pi r_i^2\varepsilon_i^2|u_f - u_i|(u_f - u_i)$; $\chi = 3.7 - 0.65\exp\left[-\frac{(1.5 - \lg_{10}\text{Re}_{p,i})^2}{2}\right]$; 拖曳力系数 $C_{d0,i} = (0.63 + \frac{4.8}{\text{Re}_{p,i}^{0.5}})^2$; 雷诺数 $\text{Re}_{p,i} = \frac{2\rho_f r_i \varepsilon_i |u_f - u_i|}{\mu_f}$; $u_f - u_i$

为流体与颗粒相对速度; ε_i 为局部孔隙率; 下标 i 表示颗粒 i 上的相关值; ρ_f 为流体密度; ρ_p 为颗粒密度; m 为颗粒质量; h 为粒间间隔; H_a 为 Hamaker 常数, Hamaker 理论假设分子间范德华力具有叠加性, 并只计入范德华力的引力部分。

上述各力的贡献比例与粒径相关, 当 $H_a = 6.5 \times 10^{-20} \text{ J}$, $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_p = 2700 \text{ kg/m}^3$, $h = 1 \text{ nm}$ 或 10 nm , $u_f - u_i = 0.001 \text{ m/s}$, $\mu_f = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\varepsilon_i = 0.999$ 时, 粒径对颗粒上作用力影响规律如图 2 所示。

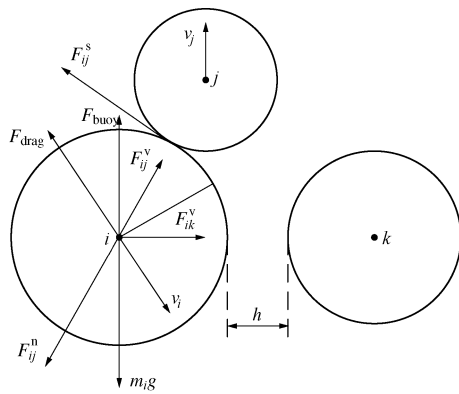


图 1 颗粒 i 上的作用力示意图

Fig. 1 Schematic illustration of forces exerting on particle i

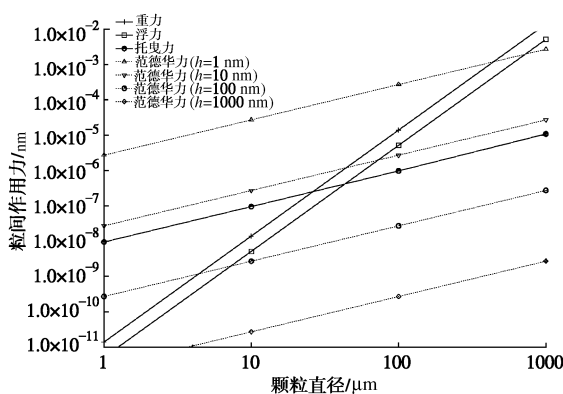


图 2 粒径对颗粒上作用力影响规律

Fig. 2 Influence of particle diameter on forces exerting on particle

图 2 表明流体与颗粒相对速度不变情况下, 粒径越小, 拖曳力与重力的比值越大, 泥浆颗粒因重力下沉造成泥浆不均匀性的影响降低。因此, 粒径小于一定值时, 如 $10 \mu\text{m}$, 在无其它外力作用下颗粒与流体

运动速度几乎相同, 即颗粒运动由流体运动控制。

范德华力与 Hamaker 常数 H_a 成正比, 与粒间间隔 h^2 成反比。 H 远低于 1 nm 或者颗粒已产生接触, 按式 (4) 确定的范德华力将接近于无穷大, 而离散元分析中允许颗粒接触, 这将导致数值奇异。为得到合理的结果, 式 (4) 中取 h_{\min} 等于 1 nm 作为截断距离, 低于 1 nm 按 1 nm 计算。 h 从 1 nm 增大至数纳米, 范德华力的影响将迅速降低。图 2 表明, 对于粒径介于 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间的颗粒, $h = 1 \sim 100 \text{ nm}$ 时, 范德华力与重力量级接近, $h = 1000 \text{ nm} = 1 \mu\text{m}$ 时, 范德华力相对重力较小, 可以忽略。在离散元模拟中, 选取的粒径最小值为 $10 \mu\text{m}$, 根据对称性, 仅需判断颗粒周围粒径 $0.05 (=1 \mu\text{m} / (2 \times 10 \mu\text{m}))$ 倍范围内是否存在其它颗粒的范德华力作用即可。

2.2 土层颗粒堆积与泥膜状态分析

土层中土体颗粒处于随机堆积状态, 具有各向异性和不均匀性, 土层有效间隙和流路路径变化较大, 给分析泥浆侵入地层的填充规律和泥膜状态带来了困难。编制程序可以得到等粒径颗粒的最密实堆积, 由此可以确定泥浆侵入土层的泥膜状态的理论下限值 (实际土层无法达到此密实状态)。等粒径颗粒的最紧密堆积状态孔隙率约为 0.26 , 六方密堆积是其中一种堆积形式, 如图 3 所示。六方密堆积的颗粒排布规则, 有效间隙和流路路径相同, 易于分析。这里以允许通过光滑球体的最大粒径作为有效间隙, 根据几何关系知, 六方密堆积的有效间隙对应圆的直径 d' 等于 $(2\sqrt{3}-1)d_{\text{soil}}$ (d_{soil} 为土层颗粒的直径)。根据张凤祥等^[9]对泥膜状态的划分可知, 当泥水最小粒径 d_{pmin} 大于 $0.1547d$, 泥膜处于泥皮状态; 当泥水最大粒径 d_{pmax} 小于 $0.0515d$ 时, 泥膜处于逸泥状态; 当泥水粒径满足 $3d_{\text{pmax}} > 0.1547d > d_{\text{pmin}}$ 时, 泥浆渗入土层一定深度。泥膜状态受到多种因素的影响, 因此实际情况更为复杂。

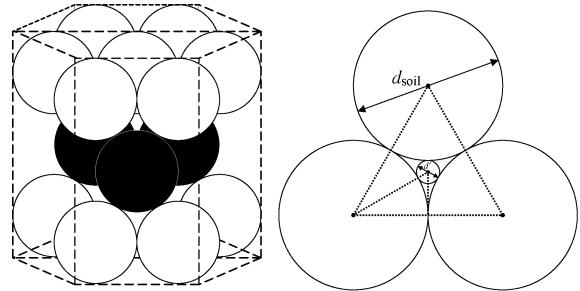


图 3 最密堆积 (六方密堆积)

Fig. 3 Closest packing (hexagonal close packing)

2.3 模拟方法

(1) 在一长方体箱体中下部放置土体颗粒, 上部

放置泥浆，箱体长宽高按土层颗粒尺寸和泥浆初始流速确定。长宽相等，为土层粒径的 4 倍；高为土层粒径的 $(1+8\sqrt{6}/3)$ 倍与流体 1 s 流过的距离之和。底端封闭，不允许土层颗粒通过，当泥浆颗粒接近底板将被删除。分析模型及颗粒堆积状态见后文分析中图 9。

(2) 泥浆初始浓度为 $1-\varepsilon_0$ ，孔隙率为 ε_0 ，对应空间的泥浆颗粒数量为 N_0 。计算中每隔 0.1s 在顶部 $0.1s \times v_{f0}$ 高度空间内加入 $N_0/10$ 个颗粒，如此循环计算至预定时间，分析各阶段泥浆颗粒的堆填状态。

(3) 泥膜形成分析一般分为两个阶段，即初始恒定流速阶段和后期的恒压过滤阶段，这里仅研究第一阶段即初始恒定流速阶段。

(4) 泥浆侵入土层程序流程图如图 4 所示，在 YADE 基础上主要编制了颗粒间非接触判断计算范德华力、流体对颗粒的拖曳力和浮力作用模型，以及间隔性增加新泥浆、删除底部附近泥浆颗粒并计算各层颗粒填充数量等相关子程序，并最终确定泥膜的填充状态。

2.4 参数设置

长方体箱体侧壁和底板相对土体刚度较大，摩擦系数为 0，模拟光滑刚性墙；土层实际长宽值比箱体略大，以满足六方密堆积孔隙率设置需求。与箱体交叉或在箱体外侧土层颗粒平动位移受到约束。影响泥浆侵入土层和泥膜状态结果的主要因素有土层级配、孔隙率等，泥浆的配比、浓度、黏度、添加剂类型和含量，Hamaker 常数等。这里主要分析土层粒径和孔隙率，泥浆浓度、黏度、流速和 Hamaker 常数，表 1 给出了数值试验主要微观参数分析值。

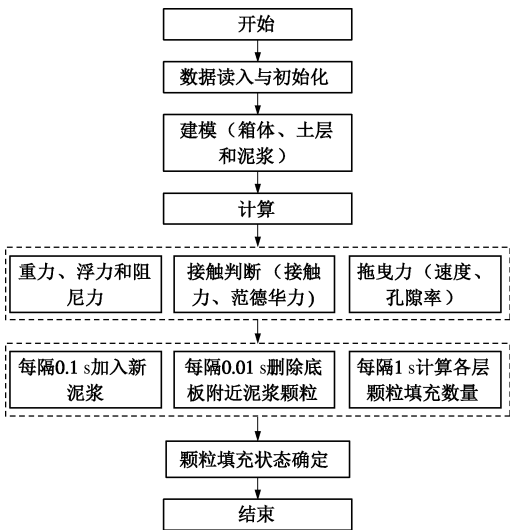


图 4 泥浆侵入土层程序流程图

Fig. 4 Flow chart for slurry invading stratum program

表 1 泥浆侵入土层微观参数

| Table 1 Microscopic parameters for slurry invading stratum | | |
|--|--|---------------------|
| 参数 | 分析值 | 基准值 |
| 土层颗粒粒径 $d_{\text{soil}}/\text{mm}$ | 1,0.5 | 1 |
| 泥浆颗粒粒径 d_p/mm | 0.01~0.1 | 0.1 |
| 颗粒弹模 E_b/kPa | 5000 | 5000 |
| 刚度比 k_s/k_n | 0.05 | 0.05 |
| 粒间摩擦角 $\varphi_c/(\text{^\circ})$ | 25 | 25 |
| 流体密度 $\rho_f/(\text{kg/mm}^3)$ | $1 \times 10^{-6} \sim 2.7 \times 10^{-6}$ | 1×10^{-6} |
| 泥浆动力黏度 $\eta/(\text{kPa} \cdot \text{s})$ | $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ | 1×10^{-6} |
| 泥浆体积浓度 c | 0.001, 0.0015 | 0.0015 |
| 泥浆初始流速 $v_{f0}/(\text{mm/s})$ | 0~50 | 10 |
| 泥浆颗粒密度 $\rho_s/(\text{kg/mm}^3)$ | $1 \times 10^{-6} \sim 2.7 \times 10^{-6}$ | 1×10^{-6} |
| Hamaker 常数 H_a/J | $1 \times 10^{-21} \sim 6.5 \times 10^{-20}$ | 1×10^{-20} |
| 最小计算间隔 h_{min}/mm | 1×10^{-6} | 1×10^{-6} |

3 泥膜状态模拟结果分析

3.1 范德华力对泥膜状态影响分析

范德华力是长程引力，使得土层填充结构和泥膜结构更为紧密，被填充土层和泥膜内部压降增加。不同介质中，Hamaker 常数 H_a 不同，通过分析 Hamaker 常数对区域孔隙率的影响可以反映范德华力对泥膜结构的影响规律。

范德华力对泥浆颗粒填充和泥膜形成速度影响规律如图 5 所示，图中实线为整个计算区域的泥浆颗粒堆积数量，虚线为土层表面泥皮的颗粒数量。图 5 表明，范德华力对颗粒在土层中填充和土层表面堆积状态的影响较大，随着范德华力的增大，土层颗粒与泥浆颗粒间的引力增加，颗粒填充和泥膜形成速度增加，而土层表面也更容易形成堆积，导致土层表面堆积颗粒数 (top) 占分析土层区域填充颗粒总数 (all) 的比例相应增大。泥浆颗粒经过土层颗粒附近，较大的范德华力降低了颗粒移动速度，局部区域泥浆颗粒聚集，容易形成堆积；同时，颗粒在较大范德华力作用下形成更为致密的结构，透水性降低，流体对泥浆颗粒的拖曳力降低，这也是造成堆积速度增加的原因。范德华力对堆积速度增加的影响呈非线性，范德华力增加至一定值时，虽对土层表面泥膜 (top) 的增长幅度影响较大，但对颗粒堆积总数 (all) 的增长幅度影响却在降低，如 $H_a=2 \times 10^{-20} \text{ J}$ ，泥浆颗粒在土层间隙迁移过程中速度不断降低，经过几层土层颗粒后即可形成孔隙堵塞。

3.2 泥浆初始流速对泥膜状态影响分析

初始流速对颗粒堆填规律的影响需要同时考虑其它影响因素，如泥浆粒径、泥浆流体与泥浆颗粒密度之比等。泥浆颗粒与土层有效间隔比例不同其泥膜状

态不同。若为泥皮状态,初始流速增大泥膜形成速度增加;若为渗透带型,初始流速增大,较大的拖曳力将部分与土层颗粒产生接触连接的泥浆颗粒带走,初始流速增大泥浆堆积速度降低。若为中间过渡型,一般初始流速增加,堆积速度呈非线性增加。这是因为单位时间通过相同截面的泥浆浓度增加,容易形成堆积,如图6所示。

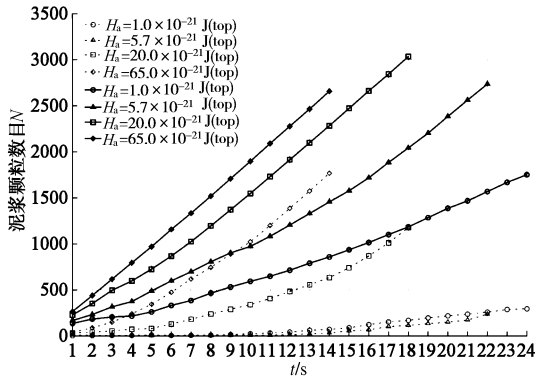


图5 范德华力与泥浆颗粒在土层中分布规律的关系

Fig. 5 Relationship between Van der Waals force and distribution regularities of slurry particles in soils

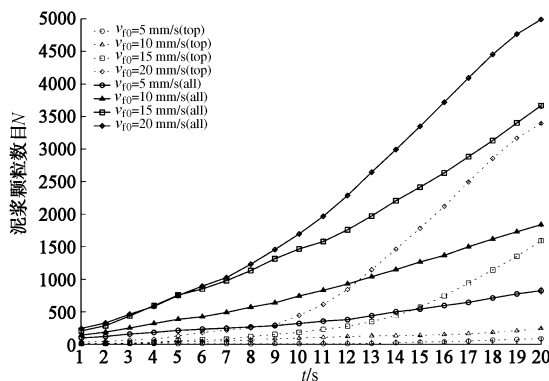


图6 初始流速与泥浆颗粒在土层中分布规律的关系

Fig. 6 Relationship between initial velocity and distribution regularities of slurry particles in soils

3.3 泥浆颗粒密度对泥膜状态影响分析

泥浆颗粒密度对颗粒堆填规律的影响如图7所示。由图7可知,泥浆颗粒密度对颗粒堆积状态影响较小,密度从 1000 kg/m^3 增加至 2700 kg/m^3 ,颗粒堆填速度略有降低,可以归结为两个方面原因。一方面颗粒密度增大,颗粒下沉速度增大,易于进入土层,降低了周围颗粒范德华引力对其的影响;另一方面,颗粒下沉速度增大,因颗粒下沉将引起下方悬液浓度增大,但分析中浆液按 0.1 s 时间间隔进入分析区域,因此下方悬液浓度变化不大。实际工程或试验中浆液自均匀搅拌到压入土层过程中产生的水土分离也可以看成是分阶段的,因此浆液按 0.1 s 时间间隔进入分析区域的处理是合理的,且大大减少了机时。

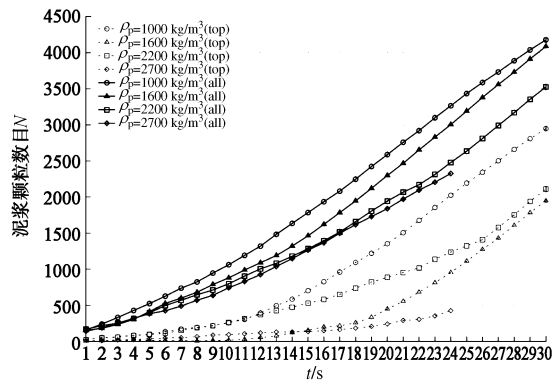


图7 泥浆颗粒密度与泥浆颗粒在土层中分布规律的关系

Fig. 7 Relationship between slurry particle density and distribution regularities of slurry particles in soils

3.4 粒径比对泥膜状态影响分析

张凤祥等^[9]对泥膜状态的划分标准表明土层有效间隙和泥浆颗粒最大最小粒径的关系决定了泥膜的状态,而六方密堆积的土层有效间隙与土层粒径有明确的换算关系,因此,这里选择泥浆颗粒与土体颗粒粒径的粒径比来进行分析。图8共给出了5种情形(工况1~工况5)进行比较分析,工况1~工况4土层粒径为 1 mm ,粒径比分别为 0.0515 , 0.075 , 0.1 , 0.1547 ,工况5土层粒径为 0.5 mm ,粒径比为 0.1547 。

工况1粒径比为 0.0515 ,泥浆颗粒相对较小,经过一段时间,在下部土层分析区域内分布的泥浆颗粒数量较多,但大多数属于可穿过型颗粒,最终将离开土层区域。土中各层堆积量很小,无法在土层间隙形成有效的堵塞,仅在两个土颗粒接触的位置可能产生堆积,主要通过摩擦力与范德华力在颗粒间形成连接作用。这种连接从土层表面到后面各层依次逐渐形成,有一定的先后顺序,但堆积形成的稳定结构并非一直增大,达到一定体积后基本保持不变,因此表面堆积比率(top/all)呈先增加后减少变化规律, $t=6 \text{ s}$ 时泥浆颗粒分布和堆积状态如图9(a)所示。其中 6 s 时表面堆积比率为 0.184 ,大于平均值 $1/9$ (9为分析层数)。 5 s 时 50% 以上泥浆颗粒通过土层分析区域,并被删除;随着时间增长,暂时存在分析区域的绝大部分颗粒也将被流体带出分析区域。上述分析表明工况1对应泥膜的逸泥状态,泥水最大粒径 $d_{\text{pmax}}=0.0515 \text{ mm} < 0.0515 d_{\text{soil}}$,这与张凤祥等^[9]对泥膜状态中逸泥状态的划分标准是一致的。

工况2和工况3粒径比为 0.075 和 0.1 ,位于(0.0516 , 0.1547)范围内,泥浆颗粒渗入土层一定深度,因为颗粒部分通过土层,泥膜表层形成颗粒堆积,最终完全堵塞表层孔隙,泥浆颗粒无法继续侵入土层间隙,其中工况2在 $t=6 \text{ s}$ 时泥浆颗粒分布和堆积

状态如图 9 (b) 所示。随着泥浆颗粒粒径增大, 表面堆积比率随之增大, 如 11 s 时工况 2 和工况 3 表面堆积比率分别为 0.226 和 0.359。工况 2 和工况 3 的泥水粒径满足条件 $3d_{pmax} > 0.1547d_{soil} > d_{pmin}$, 与张凤祥等对泥膜状态中泥浆渗入土层一定深度的状态的划分标准是一致的。

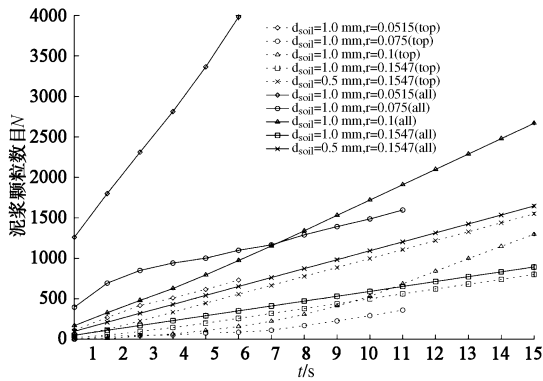


图 8 粒径比与泥浆颗粒在土层中分布规律的关系

Fig. 8 Relationship between partial diameter ratio and distribution regularities of slurry particles in soils

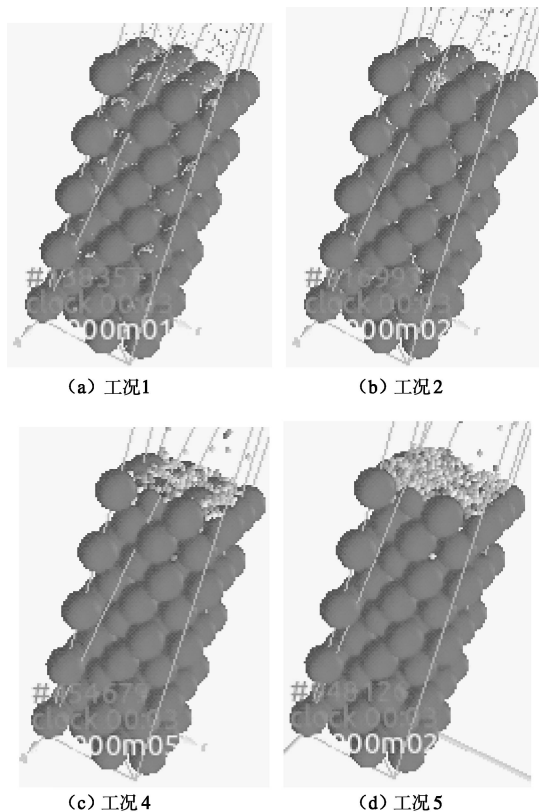


图 9 泥浆颗粒分布和堆积状态 ($t=6$ s)

Fig. 9 Distribution and packing state of slurry particles ($t=6$ s)

工况 4 和工况 5 粒径比均为 0.1547, 泥浆颗粒相对较大容易形成堵塞。工况 4 情形 1 s 时进入各层颗粒数为 [0, 0, 0, 0, 0, 1, 5, 24, 20] (从底层到土

层表面), 5 s 时为 [0, 1, 2, 5, 3, 11, 14, 56, 198], 以后下面各层数量保持不变, 土层表面堆积不断增加, 17 s 时为 [0, 1, 2, 5, 3, 11, 14, 56, 921], 没有颗粒通过分析区域。工况 5 情形 3 s 时为 [0, 0, 2, 3, 8, 7, 14, 62, 225], 以后下面各层数量保持不变, 17 s 时为 [0, 0, 2, 3, 8, 7, 14, 62, 1771], 没有颗粒通过分析区域。由于进入土层的颗粒数量较少, 无法形成堵塞, 仅在土层表面形成泥皮, 因此工况 4 和工况 5 均属于泥皮状态, 如图 9 (c) 和 (d) 所示。工况 4 和工况 5 情形的泥水最小粒径 $d_{pmin} \geq 0.1547d_{soil}$, 与张凤祥等对泥膜状态中泥皮状态的划分标准是一致的。

综上所述, 不同粒径颗粒侵入土层的分析表明, 离散元分析的结果与张凤祥等对泥膜状态的划分标准基本一致, 不过这里为了控制土层有效间隙均匀性, 土层颗粒采用了六方密堆积, 孔隙率较低。泥浆浓度为 0.0015, 较实际工程采用的泥浆配比浓度低, 而土层颗粒和泥浆颗粒采用等值粒径, 对分析结果产生的影响将在后续分析中作进一步研究。

4 泥浆侵入土层模型试验

4.1 试验概况

为了验证泥浆侵入土层初始阶段即恒速阶段泥膜形成情形与粒径比的关系, 自行研制了泥浆侵入土层模型仪进行了一组模型试验。模型主要由两个端板、两个隔板和一个有机玻璃筒组成, 见图 10, 玻璃筒长 930 mm, 外径 250 mm, 内径 230 mm, 右侧依次填入相对分析粒径的粗粒径砂土缓冲层 (厚度 50 mm) 和分析粒径压实砂土 (厚度 400 mm), 左侧充满静置 48 h 后的泥浆, 通过后期加减水调整泥浆体积浓度至 0.001 和 0.0015。在形成致密微透水泥膜之前, 泥浆初始速度近似认为保持不变, 泥浆初始速度由空气压力调节。这里控制初始流速为 2 mm/s, 土层分析粒径为 0.1~0.25 mm 时空气加压约为 0.16 MPa, 土层分析粒径为 0.25~0.5 mm 空气压力约为 0.11 MPa。

4.2 试验结果分析

静置 48 h 后泥浆的粒径主要范围约为 0.01~0.05 mm, 且小于 0.02 mm 的颗粒占更大的比重, 因此分析土层粒径为 0.1~0.25 mm 时粒径比介于 0.04~0.5 之间; 分析土层粒径为 0.25~0.5 mm 时粒径比介于 0.02~0.2 之间。两者部分粒径比均大于 0.1547, 泥膜状态均属于部分渗透性型。由于有相对较大颗粒存在, 虽然比例较小, 但土层间隙容易形成堵塞, 更接近于泥皮型, 部分泥浆颗粒被水流带走, 两种粒径的泥膜状态相近。在分析土层粒径为 0.25~0.5 mm 土层中用

环刀切取土样如图 11 所示。虽然模型试验条件与离散元分析条件存在一定的差异, 但试验结果与离散元分析结果及泥膜状态划分理论基本吻合。

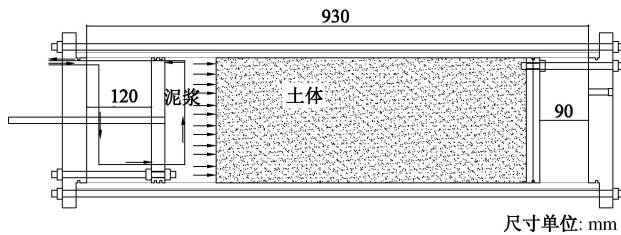


图 10 泥浆侵入土层试验示意图

Fig. 10 Schematic illustration of slurry invading stratum



图 11 土样中泥膜状态

Fig. 11 State of slurry membrane in a soil sample

5 结 论

在三维颗粒流离散元程序 YADE 基础上编制了流体与颗粒相互作用以及粒间长程引力作用模型, 通过离散元模拟和模型试验, 分析了泥浆侵入土层初始恒速阶段泥膜的动态形成机理和各因素的影响规律, 得到如下结论:

(1) 粒径比是泥膜状态的决定因素, 粒径比分析验证了泥膜状态划分标准相关理论。而其它因素对泥浆侵入土层深度、泥皮增长速度和在土层中堆积状态有着量变的影响。

(2) 粒径介于 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间的颗粒, 其范德华力的影响不可忽略, 且粒径越小, 范德华力影响越大。范德华力降低了泥浆颗粒移动速度, 容易形成颗粒堆积, 较大的范德华力能够形成更为致密的泥膜结构。

(3) 泥浆初始速度的影响需考虑粒径比控制下的泥膜状态如何, 分析作用在颗粒上的拖曳力与其它各力的贡献比例。

(4) 泥浆颗粒密度增大其沉降速度增加, 进入土层表面时泥膜浓度增大, 容易造成土层间隙堵塞。但泥浆按一定流速进入分析区域, 导致这种影响减少, 因此泥浆颗粒密度对泥膜状态的影响相对较小, 这种分析方法与工程实际泥浆定流量进入泥水舱是一致

的。

(5) 离散元模拟中土层采用了等粒径颗粒的最密实堆积, 确定的泥浆侵入土层的泥膜状态的理论下限值与泥膜状态划分标准的相关理论是一致的。

模型试验中泥膜状态类型与离散元分析及相关理论基本吻合。但由于模型试验中分析土层粒径范围较大, 粒径比对结果的影响分析尚显不足, 后续工作将选择定制的玻璃球替代砂土或其他筛分方法获取粒径范围较小的砂土进行分析。

参考文献:

- [1] TIEN C, BAI R. An assessment of the conventional cake filtration theory[J]. Chemical Engineering Science, 2003, **58**(7): 1323 - 1336.
- [2] 白云, 孔祥鹏, 廖少明. 泥水盾构泥膜动态形成机制研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 2): 19 - 24. (BAI Yun, KONG Xiang-peng, LIAO Shao-ming. Research on dynamic formation mechanism of slurry membrane for slurry shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S2): 19 - 24. (in Chinese))
- [3] 刘 成, 孙 钧, 赵志峰, 等. 泥水盾构泥膜形成二维理论分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(6): 1593 - 1597. (LIU Cheng, SUN Jun, ZHAO Zhi-feng, et al. Two-dimensional theoretical analysis of slurry membrane formation process in slurry shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(6): 1593 - 1597. (in Chinese))
- [4] BROERE W, VAN Tol A F. Influence of infiltration and groundwater flow on tunnel face stability[J]. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, 2000: 339 - 344.
- [5] ANAGNOSTOU G, KOVÁRI K. Stability analysis for tunnelling with slurry and EPB shields[C]// Proc Gallerie in Condizioni Difficili. Torino, 1994.
- [6] 李 昀, 张子新. 泥浆渗透对盾构开挖面稳定性的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, **3**(4): 720 - 725. (LI Yun, ZHANG Zi-xin. Influence of slurry infiltration on excavation face stability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, **3**(4): 724 - 725. (in Chinese))
- [7] LU W M, HWANG K J. Mechanism of cake formation in constant pressure filtrations[J]. Separations Technology, 1993, **3**(3): 122 - 132.
- [8] DONG K J, ZOU R P, YANG R Y, et al. DEM simulation of cake formation in sedimentation and filtration[J]. Minerals Engineering, 2009, **22**(11): 921 - 930.
- [9] 张凤祥, 傅德明, 杨国祥, 等. 盾构隧道施工手册[M]. 北

- 京: 人民交通出版社, 2005. (ZHANG Feng-xiang, FU De-ming, YANG Guo-xiang, et al. Construction manual of shield tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese))
- [10] 韩晓瑞, 朱伟, 刘泉维, 等. 泥浆性质对泥水盾构开挖面泥膜形成质量影响[J]. 岩土力学, 2008, **29**(增刊): 288 - 292. (HAN Xiao-rui, ZHU Wei, LIU Quan-wei, et al. Influence of slurry property on filter-cake quality on working face of slurry shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(S0): 288 - 292. (in Chinese))
- [11] 邓宗伟, 伍振志, 曹浩, 等. 基于流固耦合的泥水盾构隧道施工引发地表变形[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013(2): 785 - 791. (DENG Zong-wei, WU Zhen-zhi, CAO Hao, et al. Surface deformation of slurry shield tunneling using fluid-solid coupling theory[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013(2): 785 - 791. (in Chinese))
- [12] 袁大军, 尹凡, 王华伟, 等. 超大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(10): 2074 - 2080. (YUAN Da-jun, YIN Fan, WANG Hua-wei, et al. Study of soil disturbance caused by super-large diameter slurry shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(10): 2074 - 2080. (in Chinese))
- [13] DONG K J, YANG R Y, ZOU R P, et al. Simulation of the cake formation and growth in sedimentation and filtration[C]// 3rd International Conference on CFD in Minerals and Process Industries. Melbourne, Australia. 2003.

第九届全国土动力学学术会议（一号通知）

第九届全国土动力学学术会议将于 2014 年 11 月 14 日~16 日在天津召开。会议立足于交流近年来中国土动力学、岩土工程抗震领域最新研究成果, 共同促进土动力学理论创新与工程实践, 为中国工程建设防灾减灾事业的发展提供坚实的技术支持。

主办单位: 中国振动工程学会土动力学专业委员会主办; 并得到中国土木工程学会土力学及岩土工程分会, 中国水利学会岩土力学专业委员会, 中国力学学会岩土力学专业委员会, 中国地震学会地震工程专业委员会, 中国建筑学会工程勘察分会与中国建筑学会地基基础分会的支持。

承办单位: 天津大学, 中交天津港湾工程研究院有限公司, 交通运输部天津水运工程科学研究院。

协办单位: (排名不分先后) 中国民航大学, 中海油田服务股份有限公司, 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津城建大学, 河北工业大学。

会议主题: 土的动力特性与本构关系; 土工动力测试技术及其应用; 岩土动力解析与数值方法; 地面运动与场地效应; 土体 - 结构动力相互作用分析; 地震液化判别和危害性评价;

土工结构与边坡工程抗震; 减振隔振技术与环境岩土工程; 基础和地下工程抗震; 生命线工程抗震; 海洋土动力特性与海洋岩土工程; 爆炸及其它高速人工荷载下土体响应; 土工震(振)灾监测技术; 土工抗震加固技术; 计算机技术应用; 规范、政策议题及行业标准; 工程实录。

论文格式要求: 论文篇幅应控制在 6 页以内。本次会议录用的论文将在《岩土工程学报》专刊上发表, 来稿请严格按照《岩土工程学报》论文模板进行排版。论文中务必注明详细通讯地址、邮编、联系电话及 E-mail 地址。请按时通过电子邮件发至大会秘书处邮箱: tdlxhy@tju.edu.cn。

重要日期: 2014 年 6 月 30 日前提交论文全文, 2014 年 7 月 31 日前通知是否录用, 2014 年 9 月 30 日前提交论文修改稿。

联系人: 天津大学建筑工程学院岩土工程研究所 刘润, 孙立强 (请注明“第九届全国土动力学学术会议”字样); 地址: 天津市南开区卫津路 92 号 (300072), 电话: 13820185360 (刘润), 13752697072 (孙立强)。

(大会组委会 供稿)