

基于 SPH 的类矩形盾构同步注浆 扩散机制及参数获取

李培楠^{1,2}, 黄德中², 朱雁飞², 丁文其¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 200127)

摘要: 异型盾构由于自身断面几何形状的特殊性, 需要对其同步注浆的扩散效果及参数控制进行深入研究. 利用光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法对国内第 1 条类矩形盾构法隧道工程中同步注浆扩散机制和参数获取进行研究. 分析结果表明, 浆液扩散模式具有纵环向相互关联的挤压填充性流动特征, 其在盾构顶/底部填充效率较差; 高流动度和早强高抗剪性浆液的扩散面弧度与压力损失率效果以及整环流动封闭效率和填充均匀度都优于液态浆和抗剪浆; 注入率 150% 对周边环境的扰动程度最小, 上下孔位浆液注入比为 4:3:2:1 的注浆效果最好, 体现为浆液压力分布更均匀; 而考虑较快的闭合/充盈时间可以认为对称孔位布置更适合类矩形盾构同步注浆施工.

关键词: 类矩形盾构; 光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法; 数值模拟; 同步注浆; 扩散机制; 参数获取

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

Diffusion Mechanism and Parameters Acquisition of Quasi-rectangular Shield Synchronous Grouting using SPH Method

LI Peinan^{1,2}, HUANG Dezhong², ZHU Yanfei², DING Wenqi¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd, Shanghai 200127, China)

Abstract: Due to the particularity of heterotype shield, further research need to be executed on grouting diffusion effect and control parameters. This diffusion mechanism and parameter acquisition were studied using smoothed particle hydrodynamics (SPH) for the first quasi-rectangular shield tunneling project in China. The results show that the grout diffusion pattern has an related squeezing filling property in longitudinal and ring direction, and its filling efficiency is poor

at top/bottom of the shield; The grout diffusion surface curvature, grouting pressure loss rate, entire flow sealing efficiency and filling uniformity of rectangular grout are better than these situation of liquid grout and thick grout; The disturbance degree of 150% injection rate for the surrounding stratum environment is minimal, and the optimum effect with grout injection ratio is 4:3:2:1, which reflects in pressure distribution is more uniform; And considering the filling time, it is suggested that the symmetrical hole position is more suitable for synchronous grouting.

Key words: quasi-rectangular shield; smoothed particle hydrodynamics (SPH) method; numerical simulation; synchronous grouting; diffusion mechanism; parameters acquisition

同步注浆扩散和填充机理十分复杂, 特别是当遇到有别于传统结构断面形式的异型盾构隧道施工时, 由于其自身的几何形状特性, 常会导致浆液产生淤积, 不利于缝隙的填充, 容易使得已注浆液分布不均匀的现象产生. 因此, 浆液整体流淌特性与局部运动规律, 整体扩散模式以及其与周围土体和成型管片之间的交互影响就成为该类盾构隧道精细化施工函待解决的重要问题之一^[1]. 工程实践表明对这些难点的把控还需涉及注浆点位布置、浆液材料性能和注浆施工参数等技术细节的掌控.

同步注浆扩散和填充全过程数值仿真研究主要面临以下问题: ①浆液本身是一种类似液化土体的强非线性材料且具有流体特征; ②注浆工艺无法等效为准静态分析的动态过程; ③浆液自由面与周围土体及成型管片的相互作用决定了最终的注浆环形态和注浆质量^[2]. 基于传统理论方法建立的圆环形断面内的注浆扩散模型含有过多假设和简化, 其难

收稿日期: 2016-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(51378388); 上海市科学技术委员会重点科研项目(14DZ1207900)

第一作者: 李培楠(1983—), 男, 工学博士, 主要研究方向为地下空间建模、数值计算方法和盾构施工技术. E-mail: peinanli411@163.com

以精细化地描述注浆体在异型空隙中的运动特征和扩散模式。有限元及有限差分等数值技术也不能很好地模拟和分析注浆扩散规律,而利用其直接进行控制参数研究来指导注浆施工则是更加少见^[2-3]。

光滑粒子流体动力学(SPH)是一种集合了无网格技术、拉格朗日法以及颗粒流法等优势的先进数值方法,其既可诠释流态化大变形物质的流体动力学特征,又能涵盖液固交互过程中自由面分析功能^[4]。因此本文提出利用 SPH 数值方法进行同步注浆模拟仿真的技术路径,在结合方法适应性改进的基础上,分析不同控制参数下的浆液运动规律、充填特性及压力传播与分布情况,阐述扩散机制及参数获取和优化技术。

1 异形空隙注浆精细化模拟必要性

1.1 类矩形盾构工程概况

宁波市轨道交通 3 号线一期工程出入段线类矩形盾构隧道工程,因其特殊的结构断面形式,需要对注浆进行精细化研究。区间推进施工采用 1 台新制的 11.83 m×7.27 m 类矩形土压平衡盾构机,其隧道建筑限界尺寸为 10 300 mm×5 200 mm,隧道内径 10 600 mm×6 037 mm,考虑深埋隧道的结构受力合理性以及可扩展性,初步采用 4 段圆弧的类矩形截面,环宽为 1.2 m,衬砌环共分 11 块,见图 1 所示。长宽比为 1.66,一般段(中间设立柱)区间采用混凝土管片,外径 11 500 mm×6 940 mm,厚度 450 mm。

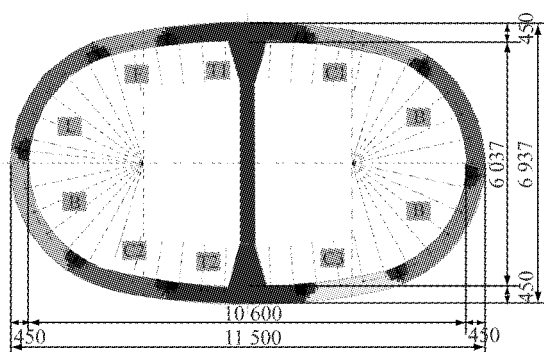


图 1 类矩形盾构标准断面形式及其衬砌分块(单位:mm)

Fig. 1 Standard section form and lining blocking of quasi-rectangular shield (unit: mm)

1.2 同步注浆扩散机制分析

浆液注入盾尾间隙是一个空间动态填充过程,由于注浆管路平行于隧道轴线方向,浆液最开始是沿隧道纵向注入,当遇到一定阻力后才转为环向流

动,新注入浆液通常会带动部分已注入浆液向两侧运动,在注浆孔附近这 2 种流动模式皆存在。基于既有大型注浆模拟试验^[5],在随盾构推进的当前环注浆中,离注浆孔一定距离外,新注入浆液尚未到达此处空间时,建筑空隙基本上依靠盾尾后方 0~2 环范围内尚未完全凝固的流塑状已注浆液进行挤压填充,其动力主要来自于隧道周围的水土压力、新注浆液逐渐传递而来的挤压力,甚至盾构推进后造成的部分真空吸力。已注浆液填充新空隙后所损失的这部分压力和量可由新注浆液通过逐层挤压来补充。总之,每个注浆孔注入的浆液都有各自相对独立的充填区域,即单位时间内新形成的盾尾空隙不是完全由新注入的浆液来充填,刚开始注入的浆液总是分布在注浆孔附近区域^[6]。因此,同步注浆浆液的扩散模式整体上可以看作是具有纵环向相互关联的挤压填充性流体运动,见图 2 所示。

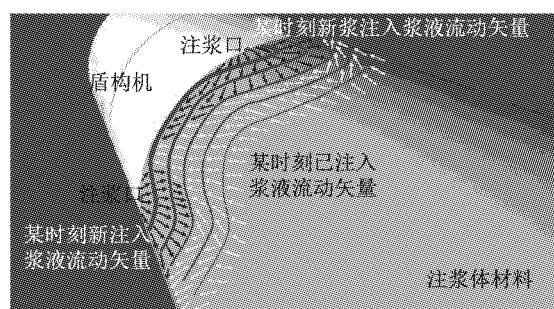


图 2 同步注浆 3D 扩散机制

Fig. 2 3D diffusion mechanism of synchronous grouting

由于矩形盾构断面含有近似水平的顶部构造,注浆体在该范围内的流向、流速及流形与在圆形断面内有很大差别,特别当浆液为非牛顿流体时。

1.3 同步注浆参数获取研究

为了更好地实现同步注浆的施工控制效果,所注浆液不管如何运动和扩散,最好能在较短时间内快速且均匀地填满盾构后方建筑空隙并及时补充部分因流动而损失的压力,对该时间的把控需借助能合理反映浆液流动性或填充性的材料参数来实现。此外,选择有效的注浆方式、注浆材料、注浆量/压力、上下孔位浆液注入比及注浆点位布置也是至关重要的。对于具有大尺寸和异型结构断面形式的盾构隧道来说,同步注浆的控制措施应从以下几个方面进行考虑:注浆口布置形式、浆液材料性能及注浆施工参数。其中注浆管路布置模式对于非常规断面类型的盾构隧道尤其重要;而浆液自身材料参数(浆液类型与浆液配比)及隧道掘进中的施工参数(注浆量、注浆压力、注浆时间和注浆速率)的合理确定则

关系能否有效地控制施工过程 and 环境保护的影响. 因此, 在充分理解浆液扩散机制和运动规律基础上, 基于 SPH 方法的进一步同步注浆参数获取研究能为异形盾构施工提供合理的建议.

2 SPH 基本理论与模拟方案

2.1 SPH 方法概述

SPH 方法最早由 Lucy^[7]在 1977 年提出并将其用于解决天体物理学中三维流体自引力问题. SPH 法的核心实为一种插值, 宏观物理变量(密度、压力、温度) $f(x)$ 能非常方便地借助于一组无序点上的值表示成积分插值计算得到, 其方程的构造涉及 2 个关键问题: 一是函数的光滑近似逼近, 即宏观变量的函数用积分形式表示; 二是质点的近似逼近, 即使用影响半径内临近质点粒子的运动特征求和平均近似代替参考质点运动信息.

用积分表示法来近似场函数为 SPH 方法在数学计算上提供了稳定性, 这是因为积分法具有光滑作用, 即相当于弱形式方程. 应用积分表示函数的核近似法对任意函数和光滑核函数进行逐步积分, 如下:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx' \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 是任意空间变量 x 的函数; Ω 是 x 的积分区间; 光滑函数 $W(x-x', h)$ 又被称作插值函数; h 是定义光滑函数 $W(\cdot)$ 的影响区域的光滑长度.

在 SPH 方法中, 整个系统是由具有独立的质量、占有独立空间的有限个粒子表示的. 应用粒子近似法可与核近似法相关的连续积分表示式转化为支持域内所有粒子叠加求和的离散化形式, 如式(2):

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\rho_i} f(x_i) W(x-x_i, h) \quad (2)$$

式中: m_i, ρ_i 分别为粒子的质量和密度, i 为计算质点记号; N 为质点总数.

SPH 方法通过使用光滑函数引进积分表示式. 光滑函数非常重要, 因为它不仅决定了函数近似式的形式、定义粒子支持区域的尺寸, 而且还决定核近似和粒子近似的一致性和精度. 通常光滑核函数 $W(\cdot)$ 需要满足: 归一性、紧支域、非负性、衰减性、 δ 函数性质以及对称性质与光滑性等条件. 任何具有以上性质的函数都可以作为 SPH 的光滑函数, Monaghan^[8]指出: 若要找到 SPH 方程的物理解释, 最好的办法就是假设光滑函数是高斯型的. 高斯型

核函数是充分光滑的, 即使对于高阶导数, 也被认为是一种极好的选择, 因为它很稳定且精度很高, 特别是对于不规则粒子分布的情况. 因此使用以下高斯型核函数作为光滑函数:

$$W(R, h) = \alpha_d e^{-R^2} \quad (3)$$

式中: α_d 的值在一维、二维和三维空间中分别为 $1/(\pi^{1/2}h)$ 、 $1/(\pi h^2)$ 和 $1/(\pi^{3/2}h^3)$, 这样就能在 3 个空间中满足归一性条件; R 是在点 x 和 x' 处两粒子之间的相对距离, $R=r/h=|x-x'|/h$, 其中 r 是两点之间的距离.

通过式(1)和式(2)便可对任意函数 $f(x)$ 在空间坐标内进行 SPH 方法的离散化处理. 转化后的不可压缩流体的 Navier-Stokes 公式的形式如下.

质量守恒方程为

$$\rho_i = \frac{\sum_{j=1}^N m_j W_{ij}}{\sum_{j=1}^N \left(\frac{m_j}{\rho_j}\right) W_{ij}} \quad (4)$$

动量守恒方程为

$$\frac{dv_i^\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \frac{\sigma_i^{\alpha\beta} + \sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (5)$$

能量守恒方程为

$$\frac{de_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \frac{P_i + P_j}{\rho_i \rho_j} v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{\mu_i}{2\rho_i} \epsilon_i^{\alpha\beta} \epsilon_j^{\alpha\beta} \quad (6)$$

式中: v 为速度; e 为热能; σ 为应力张量; P 为压力; μ 为动力黏滞系数; ϵ 为动剪应变率; α 和 β 代表不同坐标方向. i 和 j 代表不同质点, 其中 i 为计算质点记号, j 为邻近质点记号.

2.2 注浆体材料特性

通常情况下, 盾构隧道同步注浆由于其浆液的水灰比在 1.2~1.6 之间, 因此在理论分析中常基于 Bingham 流体模型对浆液扩散过程进行描述^[9]. 即当泥浆进入流动状态时, 其剪应变率与剪应力之间呈非线性关系. 由于 Bingham 模型具有剪切屈服强度的定义, 本文基于等效牛顿黏度系数的概念, 采用该模型描述注浆体的流动, 表达式如下:

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} + \tau_y \quad (7)$$

式中: τ 为剪应力; $\dot{\gamma}$ 为剪应变率; η_0 为黏度系数; τ_y 为抗剪强度.

采用等效黏度定义, 令 $\eta' = \tau/\dot{\gamma}$ 可得

$$\eta' = \eta_0 + (\tau_y/\dot{\gamma}) \quad (8)$$

式中: η' 为等效黏度系数, 引入经典的 M-C 破坏准则 $\tau_y = \sigma_n \tan \varphi + c$ (其中 σ_n 为正应力, φ 为内摩擦角, c 为黏聚力), 则式(8)可写作

$$\eta' = \eta_0 + (\sigma_n \tan \varphi + c)/\dot{\gamma} \quad (9)$$

结合 Mohr-Coulomb 破坏准则的 Bingham 流体模型便可以应用于同步注浆浆液流动分析。

2.3 SPH 工程仿真适应性改进

对异型盾构建筑空隙中的同步注浆工艺进行 SPH 动态模拟还需特别考虑固壁边界处理,这是由于在边界上或邻近边界处的粒子存在缺陷,即在积分的时候会被边界截断,故而 SPH 方法不能完全适用于整个区域。特别是针对计算区域呈相对较薄的条带状/环状空间内的 SPH 数值仿真工作来说,其在边界上或邻近边界处的粒子只受到边界内粒子的影响作用,而在边界外由于没有粒子,故而边界外不对粒子产生影响,由此会导致求解结果错误。当前已有一些处理边界条件和解决粒子缺陷问题的改进方案。借鉴 Liu 等^[10]的研究,本文使用 2 种类型的虚粒子来处理固定边界条件。

通过在固定边界上分布一组虚粒子用于对邻近边界的粒子作用强排斥力,从而阻止邻近边界的这些粒子非物理穿透边界。这里使用 2 种类型的虚粒子来处理固定边界条件:第 1 种类型粒子(型号 I)设置在固定边界上,第 2 种类型粒子(型号 II)分布在边界领域内。型号 II 的虚粒子按以下方式构造:即给定 1 个实粒子 i ,若它到边界的距离小于 κh_i ,其中 κh_i 为边界粒子 i 的影响领域半径, κ 是与点 x 处光滑函数相关的常数,并确定光滑函数的有效范围(支持域),则在边界外与实粒子对称处分布一个虚粒子。型号 II 的这些虚粒子具有与相对应实粒子相同的密度和压力,但速度方向相反。由于这些虚粒子不足以完全阻止实粒子穿透边界,因此必须再应用型号 I 的虚粒子,当实粒子到达边界时,型号 I 的虚粒子可产生足够大的排斥力,防止实粒子穿透边界。虚粒子的布置方式如图 3 所示。

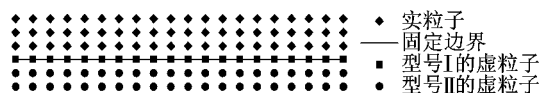


图 3 实粒子和模拟固定边界的 2 种类型的虚粒子

Fig. 3 Solid particles and two types of virtual particles

类型 I 的虚粒子被引入到实粒子的核函数核粒子近似法中。类型 II 的虚粒子可以应用来处理固定边界和自由表面。由此通过上述 2 种手段可对异型断面内的 SPH 边界缺陷问题进行合理的修正。本次 SPH 模拟计算过程通过 FORTRAN 语言对计算动力学软件 LS-DYNA 中的 SPH 引擎进行二次开发以满足异型空间中对固壁边界的要求,同时施加特定环境中的应力边界条件来影响模型中无网格粒子的

的运动状态及其扩散特征。仿真实现流程见图 4 所示。

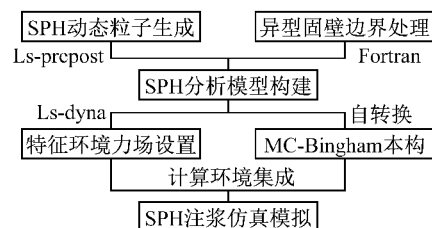


图 4 SPH 流体动力学适应性改进和分析模式

Fig. 4 Flow chart of SPH adaptive improvement and analysis

3 SPH 数值模型与注浆参数选优方法

3.1 SPH 模拟实施技术路线

基于 SPH 方法的注浆动态模拟分析及其参数获取技术流程见图 5 所示。其中包括 3 个步骤:即针对材料参数验算主要是对一种指标(浆液类型)不同配合比条件下进行注浆效果比较分析;针对施工参数验算分别从注浆率以及浆液上下注入比 2 个方面来进行考虑;而针对出浆口布置,则主要通过对比 2 种定位模式下的注浆效率来进行选优。

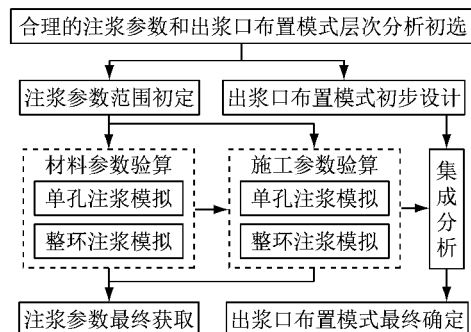


图 5 类矩形盾构同步注浆 SPH 模拟验算流程

Fig. 5 Flow chart of synchronous grouting for SPH simulation

3.1.1 材料参数选优分析方法

浆液材料参数的研究主要针对 3 种备选类型:可硬性单液浆(液态浆,为工况 1)、抗剪型单液浆(抗剪浆,为工况 2)、高流动度及早强高抗剪性浆液(矩形浆,为工况 3)进行验算比较。基于注浆材料参数已有研究成果^[9],借助同济大学岩土实验室旋转黏度计流变仪,得到各浆液类型的计算物理力学参数,见表 1 所示。

通过对比单孔和整环模拟中 3 种材料的浆液扩散效果、应力传播规律、闭合速率及成环质量等结果,选取适合类矩形盾构同步注浆的浆液类型。

表 1 不同浆液类型对应 SPH 计算物理参数设置

Tab. 1 Physical parameters of different grout types for SPH

浆液类型	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	塑性黏度系数/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	抗剪强度 (动切力)/Pa
1	1.8	1.903	18.1
2	2.0	5.194	71.1
3	2.1	3.828	56.6

3.1.2 施工参数选优分析方法

考虑到注浆率及上下注入比是注浆过程中主要控制因素,因此注浆施工参数的研究需针对这 2 种参数进行分析.首先利用 3 种不同注浆率进行注入率施工参数模拟验算,结合软土地区施工经验注浆率分别取 130%,150%,180%,其中注浆率采用 SPH 粒子集在空间中所占体积和相应建筑空隙计算而来,参数设置见表 2 所示.其中,利用耦合地层模型来分析地表影响和浆土交界面相互作用.

表 2 SPH 模拟中注浆施工参数的整环注入率设置

Tab. 2 Ring injection rate of grouting construction parameters

注浆工况	注入率/%	注浆速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	浆口压力/MPa
1	130.0	0.35	0~0.40
2	150.0	0.35	0~0.40
3	180.0	0.35	0~0.40

然后基于 4 种不同的上下孔位浆液注入比来执行进一步的施工参数模拟验算,其中注入比主要通过对应孔口的注浆速度分配(SPH 模拟中出浆口处粒子发射速度)来调节,参数设置见表 3 所示.

表 3 SPH 模拟中注浆施工参数的上下注入比设置

Tab. 3 Up and down injection ratio of grouting parameters

注浆工况	上下孔位注入比	注浆速度分配/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1:1:1:1	0.35,0.35,0.35,0.35
2	3:3:2:2	0.42,0.42,0.28,0.28
3	4:3:2:1	0.56,0.42,0.28,0.14
4	4:4:1:1	0.56,0.56,0.14,0.14

3.1.3 注浆孔位布置优化方法

注浆管路出口布置研究采用 2 种出浆口的空间定位模式来进行验算和分析,见图 6 所示.其一是出浆口沿盾尾环状断面呈等间距对称方式布置,见双层虚线标记处;而另一种则是出浆口相对往上移动的非对称布置方式,见图中点画虚线标记处.

本文主要采用单因素分析模式进行仿真实验,在选优验算某一个参数时,其他参数假定不变.如管路布置方案验算时固定一种材料参数(抗剪浆)、一种施工参数(150%注入率,4:3:2:1 上下注入比)以及符合实际的水土压力分布情况,并以此

类推.

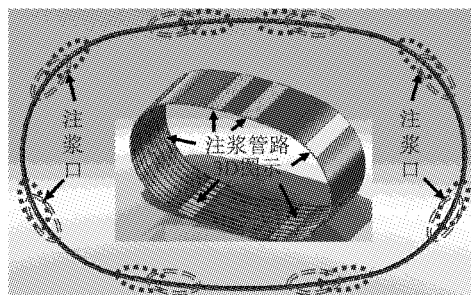


图 6 注浆管路布置验算工况示意

Fig. 6 Calculation working condition of grouting pipeline layout

3.2 数值模型及其边界条件

几何模型采用 1:1 全尺寸建模,同步注浆填充扩散环状腔体范围由盾尾边界、地层界面、管片外表面及尾部人工边界封闭构成,注浆影响层和管片为网格单元,数值模型见图 7 所示.盾尾边界移动速度为 $3 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$,粒子发射速度参考对应工况设置.

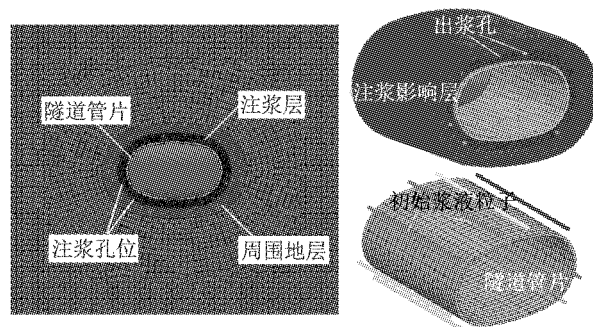


图 7 SPH 同步注浆数值计算模型

Fig. 7 Numerical model of synchronous grouting for SPH

盾构同步注浆空间外的应力边界条件为相应埋深环境下(8~15 m)的水土压力,压力分配见图 8 所示.其中水土压力从上到下取为 0.15~0.27 MPa.模拟过程中同步注浆工艺主要通过动态生成并发射粒子来模拟,水土压力施加到注浆影响层外边界,粒子数最多达到 100 000,粒子初始网格间距可用其精度来定义,一般在 10 mm 左右.

4 计算结果与分析

4.1 单孔注浆模拟的材料参数分析

4.1.1 平面注浆结果分析

借助单孔平面注浆模拟结果可以精细化地展示浆液从注浆孔射出后运动规律和扩散模式的细节,模拟过程的注浆速度按实际情况统一分配 0.35

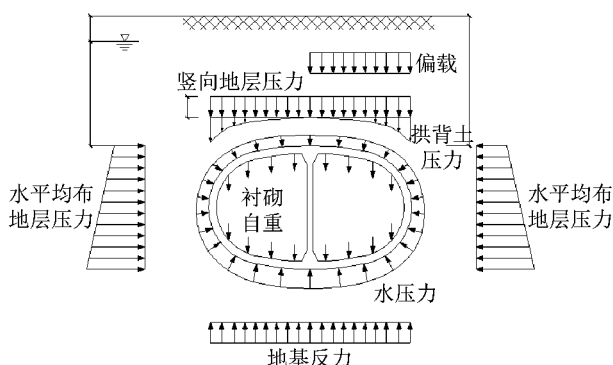
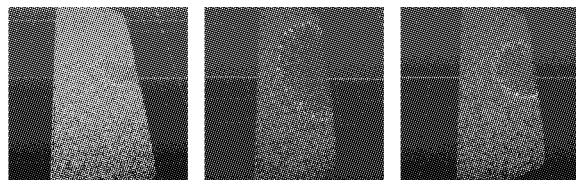


图 8 类矩形盾构隧道受力分析示意

Fig. 8 Stress analysis sketch of quasi-rectangular shield section

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 浆液扩散形态为具有纵环向相互关联的挤压填充性流动特征, 单位时间内新产生的空隙通过新注入浆液挤压既有浆液来充填, 见图 9 所示。液态浆进入建筑空隙的入射形状呈现较狭窄的箭头型, 其浆液颗粒扩散漫溢状态表现为滑动填充。抗剪浆和矩形浆入射形状则呈现较宽敞的圆弧型, 其中以矩形浆入射形状最为优美, 考虑到黏度较高的缘故, 后两者浆液颗粒扩散状态表现为挤压扩散/滚动填充。



a 液态浆 b 抗剪浆 c 矩形浆

图 9 不同浆液类型下的注浆扩散/填充模式

Fig. 9 Grouting diffusion/filling mode of different grout types

另一方面, 对于应力传递来说, 液态浆具有非常尖锐的等应力(合力能量)扩散泡, 基于该狭窄箭头形的应力传递边界波, 液态浆对注浆压力的保持能力较差, 注浆压力衰减程度较快; 而抗剪浆则具有一个较大且均匀的等应力扩散泡, 基于该类似圆形的应力传递边界波, 抗剪浆能更好地传递其注浆压力, 并能长时间地保持较大的能量向环向上的远方流动, 即注浆压力的衰减程度较慢; 而对于矩形浆来说, 其更多地保持了抗剪浆的特性, 其能够更好地保持注浆压力向远处传递, 见图 10 所示。

4.1.2 倾斜面注浆结果分析

针对倾斜面注浆效果, 见图 11 所示。从图中可以看出抗剪浆和矩形浆具有相同的流动形态, 其在盾构侧面管片环上的漫溢趋势一直保持较为均匀和

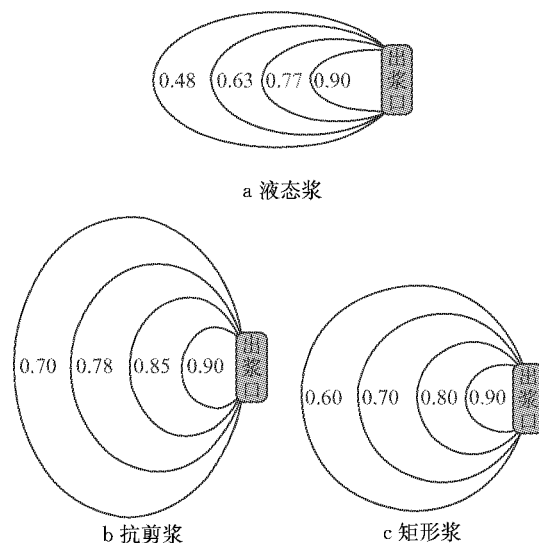
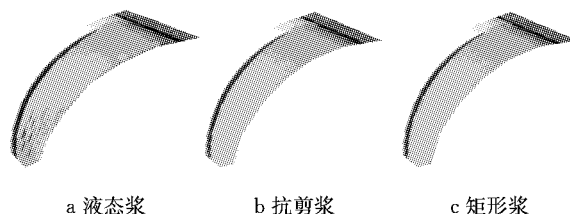


图 10 不同浆液类型下的注浆应力损失比率

Fig. 10 Grouting stress loss ratio of different grout types

厚实的状态, 该状态也有益于注浆压力和注浆环抗剪性能的保持。而液态浆在管片上运动时其对建筑空隙的充填度非常不均匀, 常出现坑坑洼洼的迹象, 见图 11a。虽然其扩散速度更高、单位时间内的填充面积更大, 但因其注浆环成环质量较差, 由此产生浆液环的密封阻水性能和抗剪性都会更低。



a 液态浆 b 抗剪浆 c 矩形浆

图 11 浆液 3D 倾斜面流淌形态和运动特征

Fig. 11 Grout 3D flow pattern in one inclined plane

4.2 整环注浆模拟的材料参数分析

在借助单孔注浆模拟进行材料参数选优分析的基础上, 进一步利用全尺寸整环模拟来验证在相应注浆孔位布置和推进速度情况下的材料物理参数的适用性是非常有必要的。考虑 3 种浆液材料在不同时间处的整环充填特征, 这里进行整环注浆扩散效果的比较主要依靠 2 个指标, 即盾尾整环注浆覆盖率(C)与顶部注浆前后缘厚度比(H)分别为

$$\begin{cases} C = A_t / A_0 \\ H = D_{f,t} / D_{b,t} \end{cases} \quad (10)$$

式中: A_t 为某时间点 t 处的浆液扩散面积 ($A_t = A_{t1} + A_{t2} + \dots + A_{t8}$); A_0 为盾尾整环全部面积; $D_{f,t}$ 为某时间点 t 处浆液前缘顶底面之间距离; $D_{b,t}$ 为相应时间点 t 处浆液后缘顶底面之间距离。上述计算

都在单位长度建筑空隙内. 不同浆液随时间变化的整环扩散效果评价指标示意图 12 所示.

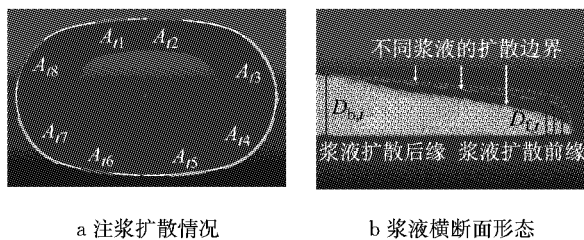


图 12 某时刻浆液横断面扩散情况示意

Fig. 12 Cross-section diffusion situation of grout at a moment

液态浆、抗剪浆以及矩形浆随时间变化的整环和顶部填充性扩散规律见图 13 所示. 针对液态浆, 以初始注浆为起点, 整环浆液闭合为终点, 从图中可以看出, 随浆液持续喷出, C 在不断增加, 增加趋势较为迅速, 模拟时间在 130 s 附近时, 浆液环几乎完全闭合; 而 H 则在不断减少, 减少幅度较大, 最终保持在 0.5 左右, 这与液态浆配合比对应材料性质偏稀有关. 当各注浆孔射入浆液完全聚合后, 即浆液封闭成环时, 随不同注浆孔喷入浆液在盾尾间隙环向不断叠加, 其 H 反而会增大.

针对抗剪浆, 从图 13 中可看出, 盾尾整环注浆覆盖率 C 随浆液喷出在不断增加, 增加趋势相对缓慢, 模拟时间在 230 s 附近时, 浆液环才能完全闭合; 其 H 随时间增长则在不断降低, 但降低幅度相对液态浆小很多, 最终保持在 0.7 附近, 这是因为抗剪浆含砂率及密度较大的缘故. 而针对矩形浆, 从图 13 中还可看出, 随着浆液持续喷出, C 在不断增加, 增

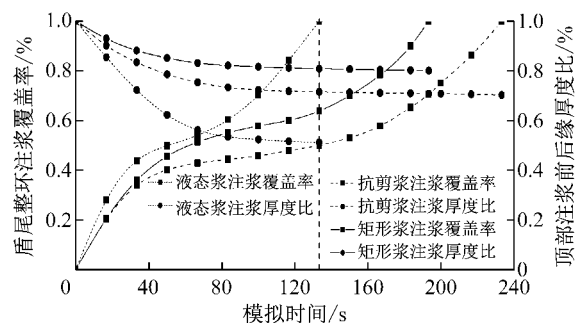


图 13 3 种浆液随时间变化的横竖向扩散规律

Fig. 13 Three types of grout horizontal/vertical diffusion law

加趋势相对液态浆较慢, 但快于抗剪浆, 浆液环在 190 s 附近时才完全闭合; 而其 H 则在不断减少, 减少幅度比前 2 种浆液都小, 最终保持在 0.8 左右. 上述此类现象与矩形浆(其中含适量的 HD 干粉)的坍落度、流动度和抗剪性等指标所对应配合比材料物理性质相关.

4.3 单孔注浆模拟的施工参数分析

基于 3 种备选注浆率, 采用矩形浆材料从细观上阐述注浆率大小对浆土相互挤压作用的影响, 其中注浆影响层网格被替换为 SPH 粒子, 不同注浆率下的浆液流动纵剖面展布特征及浆土交界面形态见图 14 所示. 计算结果表明, 130% 注入率对应的浆土交界面下沉明显, 拱顶处难以有效充填, 容易引起地表沉降; 150% 注入率表现为略微隆起的平缓交界面, 其随注浆压力消散后与地层适应性更好; 而 180% 注入率则使得交界面隆起较为显著, 地层受注浆扰动程度较大, 容易导致地层劈裂或浆液跑浆.

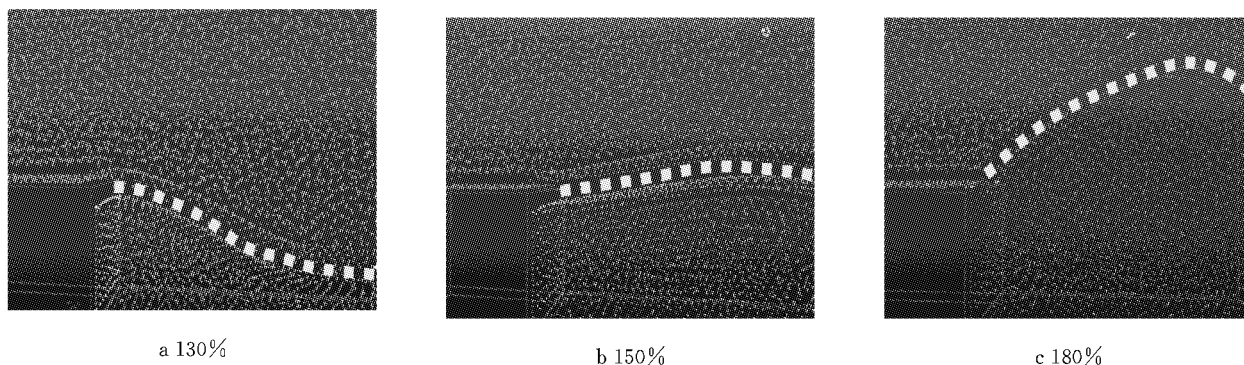


图 14 不同注入率下的浆液流动纵向展布特征

Fig. 14 Longitudinal distribution under different injection rates

4.4 整环注浆模拟的施工参数分析

相对于每环注入率, 整环浆液上下注入比的确定在异形盾构同步注浆施工中更为重要, 其中主要选取闭合/充盈时间及环向压力分布模式 2 个指标进行参数优化分析. 模拟过程中水土压力分布情况

见图 8 所示, 注浆扩散效率模拟结果见表 4 所示.

以整体充盈效率来看, 注入比为 4 : 3 : 2 : 1 时提供了最优化的注浆效果. 考虑到矩形盾构上表面较为平坦, 受自重影响流淌效果不明显, 因此上部分配更多的浆液不仅能通过量大来快速挤压填充扩

表 4 不同上下孔位注入比下的注浆扩散消耗时间

Tab. 4 Grouting diffusion time of different up/down injection ratios

上下孔位注入比	浆液扩散状态	消耗时间/s
1:1:1:1	浆液整体闭合/充盈	237:20
3:3:2:2	浆液整体闭合/充盈	220:20
4:3:2:1	浆液整体闭合/充盈	194:10
4:4:1:1	浆液整体闭合/充盈	206:00

散,还可为成型隧道的抗压抗剪提供必要的安全储备.而对于底部本就较大的围压,较少注入量也能快速封闭,故上大下小的分配策略是合适的.下面利用不同注入比各断面上浆液压力分布规律和变化趋势来进一步分析不同上下注入比取值优劣,结合浆液凝固时间,选取 3 个施工断面进行分析.

从注浆整体充盈后的各阶段环向压力分布情况来看,注入比为 1:1:1:1 工况的下部压力初值较大,上部压力初值较小,其下部注浆孔处浆液压力初

值超过 0.38 MPa,相当于软土地区 28 m 深度处静止土压力,如此大的浆液压力会对盾尾刷的密封性能造成不利影响,同时加剧对盾尾处地层的扰动,随着盾尾远离,同步注浆压力变化幅度较大,考虑自重效应和压力重分布作用,拱底处浆液压力还会逐步增大,竖向浆液压力梯度逐步接近浆液的自重应力梯度^[6],见图 15a 至 15c 所示.另一方面,后 3 个工况上下断面的浆压初值随注入比增加已逐渐平衡,其压力曲线较圆顺,上部孔位较下部多的注浆方式有利于减少浆液压力波动及对地层的扰动.与 3:3:2:2 工况相比,后 2 个工况盾尾上部浆液压力初值又有所增大,最终浆液内部压力和周围水土压力趋于平衡,其值保持在初压的 50% 左右^[11],见图 15d 至 15m 所示.说明上部较大的流量具有更好的地层适应能力,有利于拱顶充填和地层稳定.

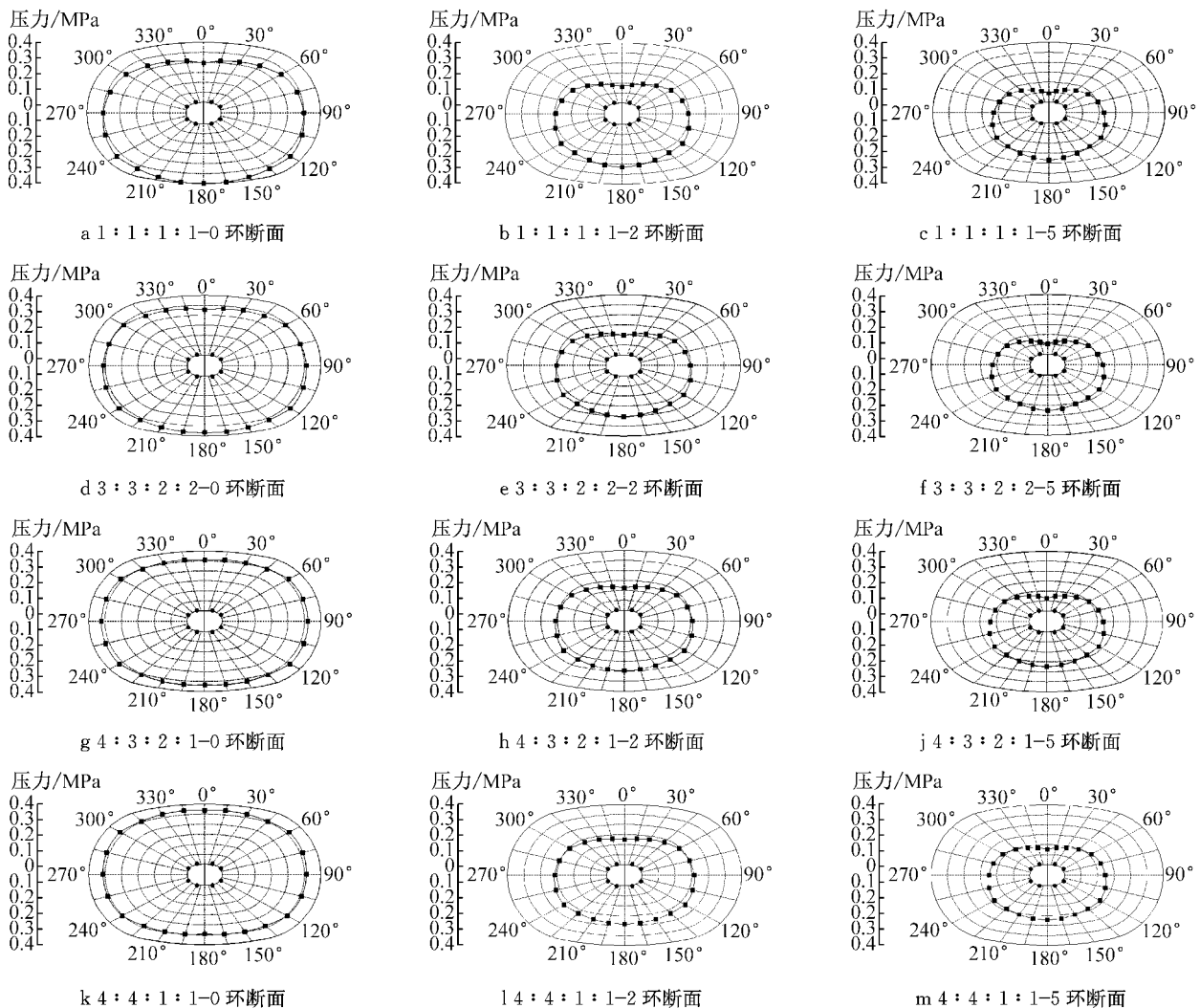


图 15 不同上下注入比各断面上的浆液压力分布情况

Fig. 15 Distribution situation of grout pressure for different up/down injection ratios in each section

综上考虑,当上部浆液流量占总流量的 60%~80%时,浆液压力初值的分布较为均匀,且盾尾通过后的注浆浆液压力变化幅度不会引起拱底最终压力过大,地层受同步注浆的扰动程度最小。

4.5 注浆孔位布置模拟优化分析

类似注浆材料选优分析,利用整环注浆扩散效果模拟结果的比较可以快捷地给出不同注浆孔布置情况的优选意见,同样依靠注浆覆盖率与注浆厚度比 2 个指标进行判断。模拟过程中水土压力分布情况见图 8 所示,对应的应力边界条件为 8~15 m 处埋深环境下的水土压力,其压力值从上到下取为 0.15~0.27 MPa。不同注浆孔位布置下随时间变化的整环和顶部填充扩散情况见图 16 所示。

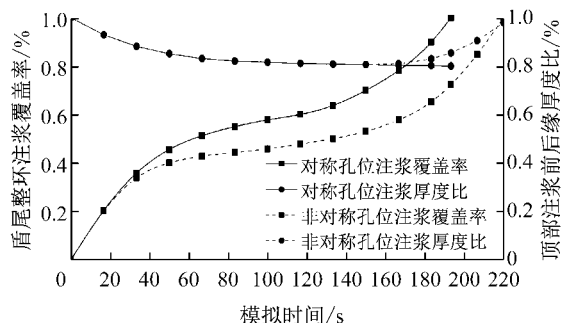


图 16 2 种注浆孔位下整环注浆横竖向扩散规律

Fig. 16 Horizontal/vertical diffusion law of two hole layouts

从图 16 中可看出,随着浆液的持续喷出,不同注浆孔位布置下的 C 在不断增加,非对称孔位布置下的增加趋势相对对称孔位来说较慢,这是由于盾尾下部注浆孔位间距过大,在高水土压力环境中浆液环很难快速闭合。在模拟时间为 220 s 左右的时候,浆液环才能完全闭合,与对称布置下的注浆效率相差近 30 s 左右的时间;针对不同注浆孔位下的 H 来说,其注浆模拟前期几乎保持一致的变化率(2 种工况采用相同的注浆材料参数和施工参数),而后期略有不同。在非对称孔位布置情况下,盾尾顶部 2 个出浆口距离更近,在盾尾下部和肩部的浆液尚未闭合之时盾尾上部的浆液早已相互交叠,因此非对称孔位布置情况下的注浆厚度比略有增大。考虑到盾构拱底部位的土压力相比上部大得多,过大的下部非对称布置孔距会使最终浆层分布较为稀薄,甚至部分地方出现浆液很难闭合的现象。

5 讨论与结论

利用 SPH 方法并结合 Bingham 流体模型和注

浆模拟适应性改进对浆液扩散过程进行描述,通过分析和总结不同控制参数下的浆液运动规律、充填特性及压力传播与分布情况,建立基于精细化数值模拟方法的同步注浆参数获取和优化技术。结论如下:

(1) 结合整环注浆模拟可看出,浆液扩散模式具有纵环向相互关联的挤压填充性流动特征,考虑到盾尾上下水平构造,其顶、底部填充效率较差。

(2) 与液态浆相比,矩形浆和抗剪浆在浆液扩散及其填充模式呈现较为宽敞的圆弧型,因此能较好地支持浆液向新的空隙环末端(两出浆口之间)运动。而矩形浆的浆液扩散面弧度与压力损失率及整环流动封闭效率与填充均匀度都优于液态浆和抗剪浆,其能在较长时间内保持纵横向压力平衡。

(3) 从整环注浆模拟的注浆覆盖率和注浆厚度比可以看出,矩形浆的流动封闭效率在液态浆和抗剪浆之间,而其填充均匀度和厚实度都优于液态浆和抗剪浆。由此表明矩形浆既有较高的流动度,又存在较好的稳定性,即其既能提供较好的施工流动状态,又能高效地输出早期抗压和抗剪性能。

(4) 针对施工参数中的注入率计算结果,无论是对地表的影响还是细观浆土交界面相互作用,都可看出注入率为 150% 较为适中,耦合地层模型的计算结果显示地表处仅有个别点位有轻微隆沉,且其浆液细观流动纵剖面展布特征更加平顺合理。

(5) 当上部浆液流量占总流量的 60%~80% 时,浆液压力初值分布较为均匀。结合流动速度比较认为,上下孔位浆液注入比为 4:3:2:1 的注浆效果最好,体现在浆压分布更均匀,充填速率更快。

(6) 对称注浆孔位布置在注浆效率上优于非对称注浆孔位布置,其 193 s 的闭合时间大大优于非对称注浆孔位布置情况。考虑到压力分布形式,对称孔位布置更适合类矩形盾构同步注浆施工。

基于 SPH 方法的盾构注浆过程动态模拟研究当前处于一个探索发展阶段,本文成果可为实现精细化管控和微扰动施工提供部分理论参考。

参考文献:

- [1] 张凤祥,朱合华,傅德明. 盾构隧道[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
ZHANG Fengxiang, ZHU Hehua, FU Deming. Shield tunneling method[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [2] 肖广良,李培楠,朱雁飞,等. 类矩形盾构施工中的 SPH 流体动力学应用探索[J]. 现代隧道技术,2016,53(增刊 1):181.
XIAO Guangliang, LI Peinan, ZHU Yanfei, et al. Explorative

- research on SPH fluid dynamics applied in quasi-rectangular shield construction[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2016, 53(S1): 181.
- [3] 叶飞,毛家骅,纪明,等.盾构隧道壁后注浆研究现状及发展趋势[J].*隧道建设*,2015,35(8):739.
YE Fei, MAO Jiahua, JI Ming, *et al.* Research status and development trend of back-filled grouting of shield tunnels[J]. *Tunnel Construction*, 2015, 35(8): 739.
- [4] 黄雨,郝亮,谢攀,等.土体流动大变形的 SPH 数值模拟[J].*岩土工程学报*,2009,31(10):1520.
HUANG Yu, HAO Liang, XIE Pan, *et al.* Numerical simulation of large deformation of soil flow based on SPH method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(10): 1520.
- [5] 黄俊.适用于类矩形盾构法隧道的同步注浆技术研究[J].*中国市政工程*,2016(A01):53.
HUANG Jun. Research on synchronous grouting technology for quasi-rectangular shield tunnel [J]. *China Municipal Engineering*, 2016(A01): 53.
- [6] 张莎莎,戴志仁,白云.盾构隧道同步注浆浆液压力分布规律模型试验研究[J].*中国铁道科学*,2015,36(5):43.
ZHANG Shasha, DAI Zhiren, BAI Yun. Model test research on distribution law of grout pressure for simultaneous backfill grouting during shield tunneling[J]. *China Railway Science*, 2015, 36(5): 43.
- [7] LUCY L B. Numerical approach to testing of fission hypothesis[J]. *Astronomical Journal*, 1977, 82(12):1013.
- [8] MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics[J]. *Annual Review of Astronomical and Astrophysics*, 1992, 30(9): 543.
- [9] 阮文军.注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J].*岩土工程学报*,2005,27(1):69.
RUAN Wenjun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(1): 69.
- [10] LIU G R, LIU M B. Smoothed particle hydrodynamics — A meshfree particle method[M]. New Jersey: World Scientific Publishing Company, 2003.
- [11] BEZUIJEN A, TALMON A M, BEZUIJEN A, *et al.* Grout pressures around a tunnel lining, influence of grout consolidation and loading on lining [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2004, 19(4/5): 443.

(上接第 1591 页)

- [13] BROCKEL U, WAHL M, KIRSCH R, *et al.* Formation and growth of crystal bridges in bulk solids [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2006, 29(6): 691.
- [14] KIRSCH R, BROCKEL U, BRENDL L, *et al.* Measuring tensile, shear and torsional strength of solid bridges between particles in the millimeter regime[J]. *Granular Matter*, 2011, 13(5): 517.
- [15] JIANG M J, SUN Y G, XIAO Y. An experimental investigation on the mechanical behavior between cemented granules[J]. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 2012, 35(5): 678.
- [16] JIANG M J, SUN Y G, LI L Q, *et al.* Contact behavior of idealized granules bonded in two different interparticle distances: An experimental investigation [J]. *Mechanics of Materials*, 2012, 55(14):1.
- [17] 蒋明镜,孙渝刚,李立青.胶结铝球接触力学特性测试装置研制[J].*岩土力学*,2011,32(1):309.
JIANG Mingjing, SUN Yugang, LI Liqing. Development of experimental apparatus for contact behaviour of bonded granules[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 309.
- [18] 蒋明镜,周雅萍,陈贺.不同胶结厚度下粒间胶结力学特性的试验研究[J].*岩土力学*,2013,34(5):1264.
JIANG Mingjing, ZHOU Yaping, CHEN He. Experimental study of mechanical behaviors of bonded granules under different bond thickness[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(5): 1264.
- [19] 蒋明镜,张宁,金树楼.不同胶结宽度粒间胶结特性试验研究[J].*岩土力学*,2015,36(5):928.
JIANG Mingjing, ZHANG Ning, JIN Shulou. Experimental study on the mechanical behaviors of bonded granules under different bond width[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(5): 928.
- [20] 蒋明镜,金树楼,张宁.不同胶结尺寸的粒间胶结强度统一表达式[J].*岩土力学*,2015,36(9):2451.
JIANG Mingjing, JIN Shulou, ZHANG Ning. Uniform formulation for bonding strength of cemented granules with different bond sizes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(9): 2451.
- [21] 蒋明镜,孙渝刚.结构性砂土粒间胶结效应的二维数值模拟[J].*岩土工程学报*,2011,33(8):1246.
JIANG Mingjing, SUN Yugang. Two dimensional numerical investigation on bonding effect between particles of structured sands[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(8): 1246.