**文章编号:**1007-9629(2024)06-0551-08

# 基于数值模拟的新拌混凝土竖直泵送流动行为

徐支松1, 袁世军2, 刘加平1,\*

(1.东南大学 材料科学与工程学院,江苏 南京 211189;2.重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400044)

摘要:借助数值模拟研究了3种流动性的混凝土在竖直向上泵送时的管内流动行为,分析了混凝土 内部压力和流速的分布规律.结果表明:泵送压力主要受润滑层性质的影响,其纵向分布与管壁阻力 沿程变化规律有关,截面中心的泵送压力略高于管壁处;混凝土在管内的流动存在"前进—扩散—滞 留堆积—汇聚"的行为特征,并据此分析了润滑层的形成和粗骨料的迁移,解释了泵送离析和堵管的 原因.

**关键词:**系送混凝土;流动行为;压力分布;速度分布;数值模拟;润滑层;骨料迁移 **中图分类号:**TU528.53 **文献标志码:**A **doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.06.010

### Numerical Simulation on Vertical Pumping Flow Behavior of Fresh Concrete

 $XU Zhisong^1$ ,  $YUAN Shijun^2$ ,  $LIU Jiaping^{1,*}$ 

School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;
 College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** To examine the pumping flow behavior of fresh concrete in vertical upward pumping, the flow of three concretes with different fluidities in a vertical pipeline was investigated by numerical simulation. The distribution of pressure and velocity field in concrete during pumping were analyzed in detail. The results show that the magnitude of pumping pressure is mainly affected by the properties of the lubrication layer. The longitudinal pressure distribution is related to the pattern of boundary resistance variations along the pipe wall, while the pressure at cross-section center is marginally higher than that at the pipe wall. Moreover, the research identified the flow behavior of concrete in the pipe, involving progression, diffusion, retention, accumulation, and convergence. Based on this, an analysis was conducted to understand the formation of the lubrication layer and the migration of coarse aggregates. These findings explained the reasons for concrete pumping segregation and plugging.

**Key words :** pumping concrete; flow behavior; pressure profile; velocity profile; numerical simulation; lubrication layer; particle migration

混凝土泵送技术在现代建造中发挥着关键作用,高层建筑和大跨度结构对混凝土泵送提出了更高的要求<sup>[1]</sup>.尽管一些评价混凝土流动性的指标被用于混凝土可泵性的预测,但尚无法用于混凝土泵送流动行为的精确建模和预测<sup>[2]</sup>.现代混凝土的泵送流

动行为更为复杂<sup>[34]</sup>,包括泵送压力、流速、润滑层形成和粗骨料迁移等,受到了学者们的关注<sup>[5-6]</sup>.

合理的泵送压力对泵送施工至关重要<sup>[2,7]</sup>,现有 研究主要关注泵送入口的压力<sup>[8]</sup>,对混凝土内部的压 力分布鲜有报道<sup>[9]</sup>.泵管内混凝土从内到外分为栓流

收稿日期:2023-12-26;修订日期:2024-01-14

基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2021YFF0500800);国家自然科学基金资助项目(52208231);江苏省卓越博士后计划(2022ZB76)

第一作者:徐支松(1991一),男,安徽马鞍山人,东南大学助理研究员,博士.E-mail: xuzs@seu.edu.cn

通讯作者:刘加平(1967一),男,江苏南通人,东南大学教授,博士生导师,博士.E-mail: liujiaping@cnjsjk.cn

层、剪切层和润滑层<sup>[10]</sup>.然而,混凝土在管内的流动较 复杂,润滑层在管壁的形成和耗散过程尚不明确<sup>[11-12]</sup>. 因此,亟需开展泵送混凝土压力分布和流速分布的 研究,对进一步掌握和调控混凝土的泵送流动行为 具有重要意义.竖直泵送作为高程泵送的主要形式, 更能反应混凝土的管内流动行为特征.

受限于现有的测量手段,混凝土泵送试验无法获得 全面的内部流动信息.而数值模拟可以实时获取混凝土 内部的各项参数并实现可视化分析,因此选用合适的模 型和方法可以研究混凝土的流动和骨料的迁移<sup>[13-14]</sup>.

本文通过数值模拟方法研究了混凝土竖直向上 泵送时的管内流动行为,预测了混凝土的泵送压力, 分析了混凝土内的压力分布和流速分布,并进一步 分析了粗骨料的迁移运动,揭示了润滑层的动态形成机理.本研究对混凝土泵送性能的预测和提升具有重要的理论意义.

# 1 混凝土简易泵送

## 1.1 原材料与配合比

本文采用数值模拟的方法对泵送混凝土内部的 压力分布和速度分布进行分析研究,泵送试验数据 均引用自文献[15].为了研究具有不同流动性的混凝 土在泵送过程中的流动行为,本文从文献[15]中选 用了低、中、高流动性的3组混凝土,流动度分别为 13、18、22 cm,编号分别为 No.1、No.2和 No.3,配合 比经整理后如表1所示.

表1 混凝土配合比 Table 1 Mix proportions of concretes<sup>[15]</sup>

<b>T</b> 2			1	/
- U	nit	٠	ko.	/ m`
	THE	٠	115/	111

						· 0,
Group	Water	Cement	Sand	Gravel	Additive 1	Additive 2
No. 1	171	323	912	946	0.808	0.646
No. 2	179	338	890	936	0.845	0.676
No. 3	191	360	872	913	0.900	0.720

#### 1.2 流变性能测试

采用宾汉模型作为混凝土的流变模型,文献 [15]使用同轴旋转流变仪测量了3种混凝土的流变 参数.将混凝土视为砂浆和粗骨料的混合物,应用文 献[13]中提出的含粗骨料流变系统流变参数的计算 方法,基于混凝土的流变参数<sup>[15]</sup>反推基质砂浆的流 变参数,借助流变模型计算骨料颗粒之间的相互作 用.计算得到的流变参数汇总如表2所示.

表 2 试验材料的流变参数 Table 2 Rheological parameters of fresh materials

Group	Material	Density/ (kg•m <sup>-3</sup> )	Viscosity/ (Pa•s)	Yield stress/Pa
No. 1	Mortar	2 010.6	139.3	134.5
	Concrete	2 353.5	397.0	190.0
	Gravel	2 630.0	872.8	256.4
No. 2	Mortar	2 186.8	78.0	114.0
	Concrete	2 344.5	305.0	181.0
	Gravel	2 630.0	488.6	217.4
No. 3	Mortar	2 182.1	80.3	95.9
	Concrete	2 337.6	297.0	149.0
	Gravel	2 630.0	503.1	182.8

#### 1.3 泵送试验

使用混凝土水平泵送简易装置进行混凝土的水 平泵送试验<sup>[15-16]</sup>. 在罐中装入新拌混凝土后密封,使 用空气压缩机向罐内施加压力将混凝土经水平泵管 挤出,泵管内径100 mm.通过调整罐内气压来实现对 泵送速度的调整,根据混凝土的流出量计算泵送速 度(m/s).分别在入泵和出泵位置设置压力传感器, 计算单位长度的压力损失.试验测得的泵送流量 (m<sup>3</sup>/h)和泵送压力损失(kPa/m)如图1所示.泵送速 度与泵管横截面积的乘积即为泵送流量.尽管3组混 凝土的流动性有很大的差异,但是在相同流量时测 得的泵送压力损失比较接近.



图 1 混凝土泵送流量与泵送压力损失的关系 Fig. 1 Relationship between concrete pumping flow rate and pressure loss

# 2 数值模拟方法与模型

### 2.1 数值方法的基本原理

考虑到在混凝土泵送过程中粗骨料的迁移,本 文使用一种无网格粒子法(I-MPS, implicit moving particle simulation)来计算颗粒之间的相互作用.该 方法将不可压缩的黏性流体离散为有限多个粒子并 赋予物理属性.通过纳维-斯托克斯方程(式(1))计 算每个粒子的运动,从而实现对流体流动的模拟.具体的算法流程和原理详见文献[13,17].

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + v\nabla^2 u + g \tag{1}$$

式中:t为时间;u为速度; $\rho$ 为流体的密度;P为压力;v为流体的运动黏度,即表观动力黏度 $\mu$ 与密度 $\rho$ 的比 值;g为重力加速度.

#### 2.2 流变模型

本文使用宾汉模型作为混凝土的流变模型<sup>[13]</sup>, 如式(2)所示.模拟过程中使用的表观动力黏度通过 式(3)计算后再代入式(1)中计算流体的运动.当剪 切速率趋于0时将会导致表观动力黏度趋于无穷大, 计算结果不收敛.因此,本文使用正则化的宾汉模 型<sup>[13]</sup>,如式(4)所示.

$$\tau = \tau_0 + \mu_0 \dot{\gamma}, \ \tau > \tau_0 \tag{2}$$

$$\mu = \mu_0 + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \tag{3}$$

$$\mu = \mu_0 + \tau_0 \frac{1 - \mathrm{e}^{\beta \dot{\gamma}}}{\dot{\gamma}} \tag{4}$$

式中: $\tau$ 为剪切应力; $\tau_0$ 为屈服应力; $\mu_0$ 为塑性黏度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; $\beta$ 为固液转化系数. $\beta$ 值越大,正则化的 宾汉模型与未正则化的宾汉模型越接近.当 $\beta$ 值大于 10时,上述2个流变模型的计算差别可忽略不计<sup>[18]</sup>. 本文取 $\beta$ =100.

#### 2.3 边界条件

润滑层与管壁之间的剪切作用即为管壁对泵送 混凝土的阻力.尽管学者们对润滑层的组成和厚度 尚未达成共识<sup>[19-20]</sup>,但是Murata等<sup>[21]</sup>发现管壁阻力与 混凝土流速之间呈线性关系,如式(5)所示.因此,可 以通过润滑层的宏观润滑效果来计算管壁的阻力作 用并评估混凝土的可泵性<sup>[22-23]</sup>.

$$\tau_s = \alpha V_R + A \tag{5}$$

式中:τ<sub>s</sub>为管壁阻力;α为滑移黏度系数;V<sub>R</sub>为混凝土 在管壁的流速;A为滑移屈服应力.

文献[15]中使用水平泵送试验测量了混凝土的 管壁摩擦参数(α和A),混凝土No.1~No.3的α值分 别为893、844、922 Pa·s/m,A值分别为251、239、 204 Pa.在满管稳定流动时水平泵送和竖直向上泵送 的差异主要为混凝土自重压力.由式(5)可知自重压 力并不影响参数α和A的计算.因此,上述由水平泵 送测得的参数可以用于本文中竖直向上泵送的模拟.

#### 2.4 泵送模型与参数的确定

本研究采用二维数值模型,模拟300 mm混凝土 柱在内径为100 mm管内的泵送流动.通常模型的解 析度越高,离散流体粒子越小,计算精度越高,但计 算效率会大幅降低.为了确定合适的粒子大小(粒径),本节以混凝土No.1为例,控制泵送活塞的推送 速度为0.15 m/s,粒子粒径分别设置为1、2、4 mm,计 算得到活塞上平均泵送压力分别为9.25、9.29、 9.93 kPa.结果表明:当粒径小于等于2 mm时,计算 结果达到稳定,即计算结果与粒径无关.因此,本文 的数值模型设置离散粒子粒径为2 mm.

本研究根据对混凝土的处理方式建立2种泵送 模型:单相均质(SPMP)模型和双相多颗粒(DPMP) 模型,如图2所示.在SPMP模型中混凝土被看作均 质宾汉流体;在DPMP模型中混凝土被看作均质砂 浆和粗骨料的混合物,砂浆粒子粒径为2mm,粗骨 料由5~20mm随机大小和形状的颗粒来表示.具体 建模方法参照文献[24].模型中的各相参数按照表 2 设置.



# 3 结果与讨论

### 3.1 泵送压力的理论结果和模拟结果

根据混凝土在泵管内稳定流动时的受力平衡原 理<sup>[25]</sup>,在三维模型中由管壁阻力引起的泵送压力*P*<sub>3D</sub> 如式(6)所示,而在二维模型中由管壁阻力引起的泵 送压力*P*<sub>2D</sub>如式(7)所示.结合式(6)~(7)可见,相同 的管壁阻力在二维模型中引起的压力为三维模型中 压力的一半.

$$P_{\rm 3D} = \frac{\tau 2\pi RL}{\pi R^2} = \frac{2\tau L}{R} \tag{6}$$

$$P_{2D} = \frac{\tau 2L}{2R} = \frac{\tau L}{R} \tag{7}$$

式中:R为泵管半径;L为泵送混凝土的长度.

在竖直泵送时的泵送压力由混凝土自重和管壁 阻力共同产生.由混凝土各自的密度计算其自重压 力,使用插值法从图1中得出泵送压力损失,再乘以混 凝土长度即为由管壁阻力引起的泵送压力.本文选取 活塞移动速度0.15 m/s,泵管内径100 mm,对应泵送 流量为4.25 m<sup>3</sup>/h,计算得到在二维模型中3种混凝土 所需泵送压力的理论结果分别为9.15、9.01、8.83 kPa.

本文分别使用 SPMP 模型和 DPMP 模型模拟了 3 种混凝土的泵送流动行为,其中泵送压力的模拟结果如 图 3 所示.由图 3 可见,使用 SPMP 模型模拟混凝土 No.1~No.3泵送压力得到的结果与理论结果的误差分 别为 2%、2% 和 3%,使用 DPMP 模型的误差分别为 5%、1% 和 1%.模拟结果与理论结果的误差均小于





5%,验证了本文数值模型和模拟方法的准确性.

#### 3.2 混凝土在泵管内的压力分布

由于DPMP模型中粗骨料会引起局部压力波 动,SPMP模型的均质流体计算结果更稳定,故本节 基于 SPMP 模型的计算结果进行讨论.视自由表面 压力为零,沿泵送方向输出混凝土中轴线上压力P的 垂直分布,并根据混凝土密度计算自重压力P<sub>w</sub>,结果 如图4所示.由图4可见,泵送压力P和自重压力P. 均与竖直高度呈线性关系.两者的差值即为由管壁 阻力引起的泵送阻力P。,故泵送阻力P。也与竖直高 度呈线性关系.这是因为边界条件假定管壁阻力仅 与滑移速度有关,管壁处滑移速度几乎与活塞速度 相同,即各位置阻力近似相等.泵送阻力P。是管壁阻 力的沿程累积,因此其与竖直高度呈线性关系.这意 味着混凝土内部垂直压力的分布规律主要受管壁阻 力沿程变化的影响.由图4还可见,尽管3种混凝土 的流动性不同,但是其泵送压力几乎相同.这是因为 3种混凝土所形成润滑层的摩擦参数接近.因此,混 凝土的泵送压力主要受润滑层性质的影响.



Fig. 4 Pressure profile along central axis in pumped concrete

测量距离活塞不同垂直距离(h)处泵送混凝土内 水平截面上的压力分布曲线,如图5所示.图5中横轴 表示半径,负值表示在中轴线左侧,正值表示在中轴线 右侧;纵轴表示压力.由图5可见,在横截面边缘压力有 小幅降低,在横截面中心部分的压力几乎相等.Kaplan 等<sup>[10]</sup>指出在低速时泵管内混凝土只有栓流层和润滑层. 针对本研究中的低速状态(15 cm/s),横截面中心部分 为混凝土的栓流层,流动性差,剪切阻力大;边缘部分 为润滑层,由于其高流动性的特点,内部剪切屈服阻力 较小,因此润滑层内压力相对栓流层有所降低.

#### 3.3 混凝土在泵管内的速度分布

3种混凝土在纵向(泵送方向)和径向(垂直于泵 送方向)上的速度云图如图6所示.

测量距活塞顶面不同高度横截面上的混凝土纵

向速度分布,如图7所示.结合图6、7可见,3种混 凝土在管壁处的速度均小于活塞的移动速度 (15 cm/s),在中心部分的速度均大于活塞的移动速 度.这是因为在管壁处由边界阻力引起的剪切应力 最大,阻碍了混凝土向前流动.底部活塞的挤压可以 使混凝土克服管壁阻碍,但是距离活塞越远,混凝土 受到活塞挤压的作用越小,因此管壁处混凝土的速 度沿其流动方向逐渐减小.从图7中可以进一步发 现:中心部分半径3 cm以内的混凝土存在无剪切流 动的栓流区,纵向速度几乎相等;混凝土No.3的剪切 区域最大,No.1的剪切区域最小.这是因为混凝土 No.3的屈服应力最小,在相同的泵送速度下其中心 部分最容易发生剪切变形,所以混凝土No.3的剪切 范围较广、栓流半径较小、流动前端的速度相对较快.

555



Fig. 7 Velocity profile along flow direction in vertical pumped concrete

由图6还可见,混凝土在管内除了纵向流动外, 还有轻微的径向流动,且该径向流动在混凝土自由 顶面和活塞顶面较为明显.分别选取不同高度的横 截面,绘制竖直泵送混凝土径向速度分布,如图8所 示.图8中纵轴表示径向速度,负值表示沿径向向内 流动,正值表示向外流动.由图8可见,顶部混凝土从 中心向管壁扩散,底部活塞附近的混凝土从管壁向

中心汇聚,径向速度均小于0.15 cm/s;轴向混凝土柱 中间部分(9~18 cm)的径向流动杂乱,但是速度很小 (小于0.02 cm/s).

#### 3.4 混凝土在泵管内的相对流动行为

以混凝土No.1为例,以活塞为参考系,绘制泵送 混凝土在管内的相对流动行为,如图9所示.图中箭 头方向表示流速方向,流速大小由箭头大小和灰度



Fig. 8 Velocity profile along radius direction in vertical pumped concrete



来表示.图9直观地展示了泵送混凝土在管内的流动 行为规律:①混凝土在活塞的推送下向前流动,靠近 中轴线区域流速更快;②混凝土向前流动至接近自 由顶面后开始向管壁扩散;③由于管壁阻力,混凝土 在管壁处滞留并向流动后方堆积;④管壁滞留的混 凝土逐渐在活塞顶面堆积,并向中心汇聚.文献[26] 通过泵送试验验证了上述②和③的流动行为.本研 究通过对混凝土整体纵向和径向流速的全面观测, 获得了混凝土在管内完整的相对流动行为特征,即 "前进一扩散一滞留堆积一汇聚".

基于混凝土的管内循环流动行为,中心部分混 凝土裹挟粗骨料向前移动,当到达混凝土前端后向 管壁扩散.混凝土中的浆体在管壁形成润滑层并被 滞留.润滑层在流动方向的前端不断形成,并沿着管 壁逐渐后移、被消耗.润滑层通过自身剪切耗散的方 式降低泵送沿程阻力.后部混凝土继续向前移动,形 成粗骨料的向前迁移运动,从而导致粗骨料在流动 前端堆积.根据DPMP模型的计算结果,统计泵送前 端(距活塞25~30 cm 区间段)混凝土内粗骨料体积 分数的变化,如图10所示.由图10可见,5 s内,混凝 土 No.1在泵送前端的粗骨料体积分数由 29.6% 增加 至 30.3%,混凝土 No.2和 No.3中粗骨料体积分数均 由 28.2% 增加至 33.3%.粗骨料体积分数的统计结 果与前文粗骨料迁移运动的分析一致,也与文献 [27]中的骨料聚集现象相同.由此得出:低流动性混 凝土中粗骨料体积分数的变化较小,中、高流动性混 凝土中粗骨料在前端聚集的程度较高,引起泵送离 析和堵管的风险较大.



Fig. 10 Volume fraction variation of coarse aggregate in front of pumped concrete

# 4 结论

(1)混凝土的泵送压力主要受润滑层性质的影响,而混凝土的流动性主要对管内混凝土的流速分布有影响.降低泵送压力的有效途径是促进润滑层的形成来提高润滑效果.

(2)泵送混凝土内部压力沿流动纵向的分布规 律主要受管壁阻力沿泵送方向变化规律的影响.在 径向横截面上,中心部分泵送压力分布均匀,管壁处 的泵送压力较中心部分有所降低.

(3)泵送混凝土在管内的流动同时包含了纵向

557

流动和径向流动.泵管中轴线周围栓流区混凝土的 纵向流速高于管壁处的纵向流速.管内的径向流动 在混凝土自由顶面和活塞顶面较为明显.径向流速 相较纵向流速很小,一般小于0.15 cm/s.

(4)混凝土在泵管内存在"前进一扩散一滞留堆 积一汇聚"的相对流动行为.该流动行为解释了泵送 时润滑层在管壁处的动态形成过程.

(5)混凝土的管内相对流动行为会导致粗骨料 向流动前端汇聚,容易造成中、高流动性混凝土在流 动前端的泵送离析和泵送堵管.

#### 参考文献:

- [1] 马建峰,涂玉林,谢昱昊,等.800m超长盘管泵送前后混凝土 性能变化及其机理[J].建筑材料学报,2022,25(12):1293-1299. MA Jianfeng, TU Yulin, XIE Yuhao, et al. Change of concrete performance and its mechanism before and after 800 m super-long coil pumping[J]. Journa of Building Materials, 2022,25(12): 1293-1299.(in Chinese)
- [2] 元强,李白云,史才军,等. 混凝土泵送性能的流变学表征及 预测综述[J]. 材料导报, 2018, 32 (17):2976-2985.
  YUAN Qiang, LI Baiyun, SHI Caijun, et al. An overview on the prediction and rheological characterization of pumping concrete
  [J]. Materials Review, 2018, 32 (17):2976-2985. (in Chinese)
- [3] 孙振平,李祖悦, 庞敏,等. 聚羧酸系减水剂的缓释效应及机 理[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(3):263-269.
  SUN Zhenping, LI Zuyue, PANG Min, et al. Slow-release effect of polycarboxylate superplasticizers with various functional groups
  [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3):263-269. (in Chinese)
- [4] 李北星, 吕敦详, 乔敏. 花岗岩机制砂细粉对聚羧酸减水剂吸 附性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25 (12):1284-1292.
   LI Beixing, LÜ Dunxiang, QIAO Min. Effect of microfines in granite manufactured sand on adsorption characteristics of polycarboxylate superplasticizer[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25 (12):1284-1292. (in Chinese)
- [5] 蒋正武,陶志龙,任强.机制砂自密实混凝土泵送压力规律研究[J].建筑材料学报,2017,20(1)18-23.
   JIANG Zhengwu, TAO Zhilong, REN Qiang. Pumping pressure of manufactured sand self-compacting concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):18-23. (in Chinese)
- [6] 韩建国,阎培渝,陈喜旺,等.混凝土沿程泵送压力损失测定 与影响因素分析[J].施工技术,2021,50(9):12-16,19.
  HAN Jianguo, YAN Peiyu, CHEN Xiwang, et al. Measurement of concrete pumping pressure loss and analysis of influencing factors[J]. Construction Technology, 2021, 50(9):12-16,19. (in Chinese)
- [7] 李悦,宋春英,梅期威,等.高强混凝土泵送压力损失计算方 法的比较研究[J].混凝土,2020(7):88-91.
   LI Yue, SONG Chunying, MEI Qiwei, et al. Comparative study on calculation methods of pumping pressure loss of high strength

concrete[J]. Concrete, 2020(7):88-91. (in Chinese)

- [8] SECRIERU E, MOHAMED W, FATAEI S, et al. Assessment and prediction of concrete flow and pumping pressure in pipeline [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 107:103495.
- [9] LI F M, SHEN W K, JI Y H, et al. Prediction of nonlinear pumping pressure loss of concrete induced by rheological property changes[J]. Cement and Concrete Research, 2023, 169:107182.
- [10] KAPLAN D, DE LARARD F, SEDRAN T. Design of concrete pumping circuit[J]. ACI Matererials Journal, 2005, 102(2): 110-117.
- [11] FEYS D, DE SCHUTTER G, FATAEI S, et al. Pumping of concrete: Understanding a common placement method with lots of challenges[J]. Cement and Concrete Research, 2022, 154: 106720.
- [12] FATAEI S, SECRIERU E, MECHTCHERINE V. Experimental insights into concrete flow-regimes subject to shear-induced particle migration (SIPM) during pumping [J]. Materials, 2020, 13(5):1233.
- [13] XU Z S, LI Z G. Numerical method for predicting flow and segregation behaviors of fresh concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 123:104150.
- [14] 崔溦,孟苗苗,宋慧芳.自密实混凝土粗骨料运动及静态离析的CFD数值模拟[J].建筑材料学报,2021,24(1):39-44.
  CUI Wei, MENG Miaomiao, SONG Huifang. CFD numerical simulation of movement and static segregation of self-compacting concrete aggregate[J]. Journal of Building Materials, 2021,24 (1):39-44. (in Chinese)
- [15] SUZUKI K, KOSHIKAWA S, ITOH Y. Studies on pipe flow of concrete[J]. Concrete Research and Technology, 2004, 15(2): 47-57.
- [16] YAMANOUCHI K, YAGUCHI S, ITO Y, et al. A study of a method for estimating rheological constants using O type funnel test equipment[J]. Cement Science and Concrete Technology, 2019, 72(1):136-143.
- [17] XU Z S, LI Z G, JIANG F. The applicability of SPH and MPS methods to numerical flow simulation of fresh cementitious materials[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274: 121736.
- [18] PAPANASTASIOU T C. Flows of materials with yield [J]. Journal of Rheology, 1987, 31(5):385-404.
- [19] CHOI M, ROUSSEL N, KIM Y, et al. Lubrication layer properties during concrete pumping [J]. Cement and Concrete Research, 2013, 45:69-78.
- [20] NGO T T, KADRI E H, CUSSIGH F, et al. Relationships between concrete composition and boundary layer composition to optimise concrete pumpability [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2012, 16(2):157-177.
- [21] MURATA J, SUZUKI K. Study on grout flow in pipe with sliding at wall[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1987(384): 129-136.
- [22] NERELLA V N, MECHTCHERINE V. Virtual sliding pipe rheometer for estimating pumpability of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170:366-377.

- [23] 尹健昊,孔祥明,张莉莉,等.基于滑管仪的泵送混凝土压损 流量关系研究[J].混凝土,2021(7):103-106,113.
  YIN Jianhao, KONG Xiangming, ZHANG Lili, et al. Research on pressure loss-flow relationship in concrete pumping by slide pipe rheometer [J]. Concrete, 2021(7):103-106,113. (in Chinese)
- [24] XU Z S, LI Z G, JIANG F. Numerical approach to pipe flow of fresh concrete based on MPS method[J]. Cement and Concrete Research, 2022, 152:106679.
- [25] 阎培渝,黎梦圆,韩建国,等.新拌混凝土可泵性的研究进展

[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(2):239-246.

YAN Peiyu, LI Mengyuan, HAN Jianguo, et al. Recent development on pumpability of fresh concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(2):239-246. (in Chinese)

- [26] JACOBSEN S, HAUGAN L, HAMMER T A, et al. Flow conditions of fresh mortar and concrete in different pipes [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(11):997-1006.
- [27] FERRARIS C F, MARTYS N S, CHOI M, et al. Research needs to advance concrete pumping technology[R]. Gaithersburg, MD:National Institute of Standards and Technology, 2015.