

文章编号:1007-9629(2021)03-0538-07

自密实混凝土 J 型环试验的数值模拟及敏感性分析

李敬军, 田 雷, 邱流潮

(中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于移动粒子半隐式法-离散元法(MPS-DEM)耦合模型对自密实混凝土(SCC)的 J 型环试验进行了数值模拟, 研究了砂浆塑性黏度、屈服强度及密度对 SCC 的 J 型环试验模拟结果的影响。结果表明: 砂浆密度不会对 J 型环试验结果产生较大影响; 砂浆的塑性黏度和屈服强度均会对 SCC 流动时间和流停状态产生影响, 且砂浆屈服强度敏感性大于塑性黏度; 相同砂浆屈服强度下, 随着砂浆塑性黏度的增大, SCC 流动时间变长, 填充距离减小; 相同砂浆塑性黏度下, 随着砂浆屈服强度的增大, SCC 流动时间变短, 填充距离减小; 砂浆塑性黏度对于 J 型环内、外骨料分配的均匀性影响较大, 且砂浆塑性黏度越大, 骨料分布越均匀。

关键词: 自密实混凝土; 移动粒子半隐式法; 离散元法; 数值模拟; 敏感性分析

中图分类号: TV43

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.013

Sensitivity Analysis and Numerical Simulation of J-Ring Test of Self-compacting Concrete

LI Jingjun, TIAN Lei, QIU Liuchao

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the moving particle semi-implicit method-discrete element method(MPS-DEM) coupling model, the J-ring test of self-compacting concrete(SCC) was numerically simulated, the effects of the plastic viscosity, yield strength and density of mortar on the simulation results of SCC J-ring test were studied. The results show that the mortar's density will not significantly influence the results of the J-ring test. The plastic viscosity and yield strength of mortar can affect the expansion flow time and the expansion form. And the sensitivity of mortar yield strength is greater than that of mortar plastic viscosity. With the increase of the mortar's plastic viscosity, the flow time of SCC increases, and the filling distance decreases. With the increase of yield strength, the flow time of SCC becomes shorter, and the filling distance decreases with the same viscosity of mortar. The mortar plastic viscosity has a greater impact on the uniformity for the aggregate distribution inside and outside the J-ring, and the higher the mortar plastic viscosity, the more uniform the aggregate distribution.

Key words: self-compacting concrete(SCC); moving particle semi-implicit method(MPS); discrete element method(DEM); numerical simulation; sensitivity analysis

自密实混凝土(SCC)是一种具有高流动性能的混凝土,在浇筑过程中不需要任何的振捣,被认为是近几十年来混凝土材料最具有革命性的发展^[1]。尽

管 SCC 在许多领域取得了成功的应用,但由于其自身流动性不足,骨料离析,空隙填充不密实等原因,在施工过程中也出现了一系列的问题,这些问题大

收稿日期:2020-01-10; 修订日期:2020-02-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11772351)

第一作者:李敬军(1992—),男,山东聊城人,中国农业大学博士生. E-mail:lijingjunedu@163.com

通讯作者:邱流潮(1971—),男,云南彝良人,中国农业大学副教授,博士生导师,博士. E-mail:qiuliuchao@cau.edu.cn

多与 SCC 本身的材料特性有着密切的关系。

在现有的试验规范中,主要通过一系列试验(坍落度试验、L 型箱试验、V 型漏斗试验、U 型箱试验、J 型环试验等)对新拌 SCC 的流动特性进行检测并作综合评定^[2],其中 J 型环试验是用于检测 SCC 流动性能和骨料通过能力的常用方法。随着计算方法和计算机技术的不断发展,数值模拟被越来越多地用作研究 SCC 工作性能和材料特性的方法^[3-4]。目前,模拟 SCC 流动的数值模型主要包括单相流模型、颗粒流模型和颗粒悬浮流模型^[3]。单相流模型基于宏观的连续性假设^[5],把 SCC 看成一种均匀单相的非牛顿流体^[6]。颗粒流模型从细观角度将 SCC 视为固体颗粒流,通过在单元之间考虑具有 Bingham 塑性流体特性的接触作用,对其进行数值描述^[7-8]。颗粒悬浮流模型将 SCC 视为自密实砂浆和粗骨料颗粒组成的颗粒两相流^[9]。陈松贵^[10]、张传虎等^[11]基于 Bingham 流体的格子玻尔兹曼方法-离散元法(LBM-DEM)模拟了 SCC 在堆石孔隙中的流动,为 SCC 的数值模拟研究提供了新的思路。

考虑到 SCC 流动的大变形特征和填充行为的复杂性,近年来发展起来的移动粒子半隐式法(MPS)为混凝土流动模拟提供了一个新的计算方法。MPS 最早是由日本东京大学 Koshizuka 等^[12]提出的一种用于计算不可压缩流体的粒子方法,目前该方法已被广泛用于描述波-结构的相互作用^[13]、溃坝问题^[12]、液仓晃动^[14-15]、入水砰击^[16]等牛顿流体问题,同时也被应用于非牛顿流体的研究当中^[17-20]。Sakai 等^[21-23]给出了 MPS 和 DEM 耦合的具体方法,并且将其应用于圆柱形储罐内固液混合物和泥沙运移的研究中。对于非牛顿流体的固液两相流问题,Li 等^[24]提供了基于非牛顿流体模型的 MPS-DEM 耦合方法,并将其运用到新拌混凝土的

模拟当中,但并未应用该方法对 SCC 的流动特性进行深入的研究。

本文通过引入 MPS-DEM 耦合模型对 SCC 的 J 型环试验进行了数值模拟研究。从模拟尺度来看,研究中将 SCC 分成自密实砂浆和粗骨料,从而使用 MPS-DEM 耦合模型准确模拟 SCC 的复杂流动过程。分析了 SCC 砂浆塑性黏度、屈服强度和密度对 J 型环试验模拟结果中 SCC 的流动时间、最终流停状态和流停后粗骨料分布均匀性的影响,并进行了敏感性分析。

1 基本理论

本文主要使用文献[24]中所使用的方法将 MPS 与 DEM 方法进行耦合,其中 DEM 方法用于计算粗骨料的运动和碰撞^[25],MPS 方法用于计算自密实砂浆的大变形运动^[26]。

自密实砂浆的流变特性主要用 Bingham 流变模型进行描述^[27]。为防止计算的不稳定性,本文采用双黏度模型来对流体的运动进行求解,模型将非牛顿流体视为处于流体状态的黏塑性流体,以及处于刚性状态的高黏性流体。本研究考虑了拖曳力和压力梯度力来建立固液相互作用的模型^[27]。

2 J 型环试验模拟

本文的目的是为了将 MPS-DEM 方法运用到 J 型环试验的数值模拟当中,并探究砂浆材料参数对于 J 型环试验模拟结果影响的敏感性。在试验过程中将坍落度筒置于 J 型环中心,然后向坍落度筒内充填满 SCC,随即垂直平稳地提起坍落度筒,观测 SCC 的流动过程和最终的流停状态。试验装置及 MPS-DEM 模型如图 1 所示,模型中的黑色小球部分为粗骨料。

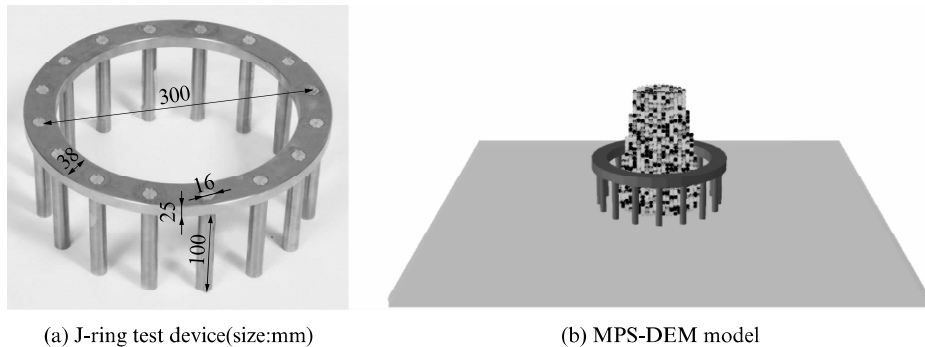


图1 J 型环试验装置及 MPS-DEM 模型
Fig. 1 J-ring test device and MPS-DEM model

在本文模拟工况下,砂浆的密度 ρ 为 $1\,800\text{ kg/m}^3$, 屈服强度 τ 为 25 Pa , 塑性黏度 η 为 $15\text{ Pa}\cdot\text{s}$; 粗骨料含量(质量分数)为 30% , 密度为 $2\,680\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 $1\times 10^4\text{ MPa}$, 恢复系数为 0.8 , 摩擦系数为 0.3 . 图2给出了不同时刻下J型环试验模拟流

态图. 图3给出了 SCC 的最终流停状态. 由图2、3可以发现, 通过J型环后的 SCC 粗骨料分布较为均匀, 最终扩展度为 535 mm , 中心高度为 60 mm , 流动时间为 3.69 s . 从流动过程及结果可知, 本文所引进的方法可以较好地模拟 SCC 的J型环试验.

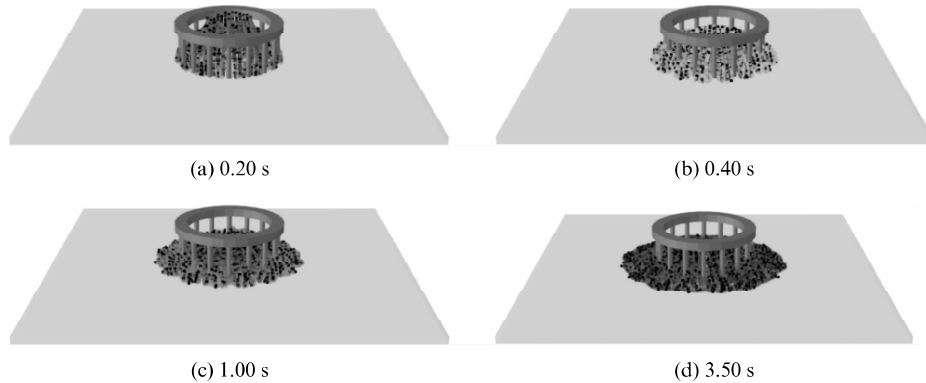


图2 不同时刻下J型环试验模拟流态图

Fig. 2 Snapshot of J-ring test at different moments

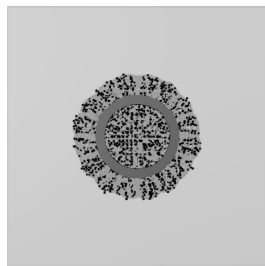


图3 SCC 最终流停状态

Fig. 3 Final shape of SCC

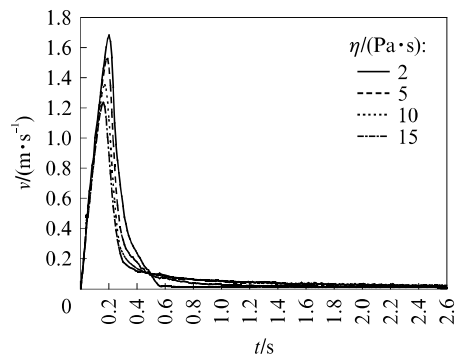


图4 不同砂浆塑性黏度下扩展速度与流动时间的关系

Fig. 4 Relationship between expansion speed and flow time with different mortar plastic viscosity

3 影响因素分析

3.1 塑性黏度

通过调整水胶比或者减水剂用量来改变砂浆的塑性黏度. 模拟工况选取4种砂浆塑性黏度 η (2 、 5 、 10 、 $15\text{ Pa}\cdot\text{s}$), 固定砂浆屈服强度 τ 为 25 Pa , 密度 ρ 为 $1\,800\text{ kg/m}^3$.

图4给出了不同砂浆塑性黏度下,J型环试验中 SCC 向外扩展速度 v 与流动时间 t 的关系. 由图4可见, 在不改变其他影响因素的情况下, 随着砂浆塑性黏度的增大, 扩展速度的极值逐渐减小. 这是因为砂浆塑性黏度的增大使得流体内部的摩擦力增大, 从而降低了其流动速度.

表1给出了不同砂浆塑性黏度下J型环试验模拟结果. 由表1可见, 随着砂浆塑性黏度的增大, SCC 的流动时间 t (从开始流动到最终流停的时间) 逐渐增长. 这是因为随着砂浆塑性黏度的增大, 砂浆

内部的摩擦力随之增大, 与粗骨料之间的相互摩擦作用增强, 造成 SCC 的塑性黏度增大, 从而使得 SCC 内部摩擦力整体增大, 运动速度减小, 因此 SCC 的流动时间增长.

表1 不同砂浆塑性黏度下J型环试验模拟结果
Table 1 Experimental simulation results of J-ring test with different mortar plastic viscosity

$\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	t/s	$\frac{L}{H}$	$a_{e,A}/\%$	$a_{e,B}/\%$	$E/\%$
2	1.01	15.72	32.09	28.16	3.93
5	2.07	10.96	31.63	28.89	2.74
10	2.74	8.97	31.00	29.18	1.83
15	3.69	8.87	30.94	29.22	1.72

为了评价 SCC 在J型环试验模拟中的流停状态, 在保持 SCC 体积量不变的前提下, 选取 L/H 作

为流停状态的评价标准,其中 L 为流停状态下 SCC 的扩展直径, H 为流停状态下 SCC 在中心位置的高程, L/H 值列于表 1. 从表 1 中可以发现随着砂浆塑性黏度的增大, L/H 值逐渐减小, 且当砂浆塑性黏度大于 $10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时, L/H 不再有较大变化. 这是因为砂浆塑性黏度的增大会增大砂浆对于粗骨料的拖曳力, 从而提高 SCC 整体的屈服强度, 减小其最终的流动距离; 当砂浆的塑性黏度大于 $10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时, 足够大的拖曳力使得砂浆与粗骨料之间不再产生较大

的相对运动, 因此对于整体 SCC 屈服强度也不再有较大的影响, 最终的流停状态也不再有较大的改变.

图 5 给出了不同砂浆塑性黏度下 SCC 的流停状态. 从图 5 可知: 随着砂浆塑性黏度的增大, SCC 最终的扩展距离逐渐减小; 且在砂浆塑性黏度为 $2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时, 其外部边缘轮廓能明显看到由于 J 型环钢筋圆柱的阻挡作用而产生的波浪曲线.

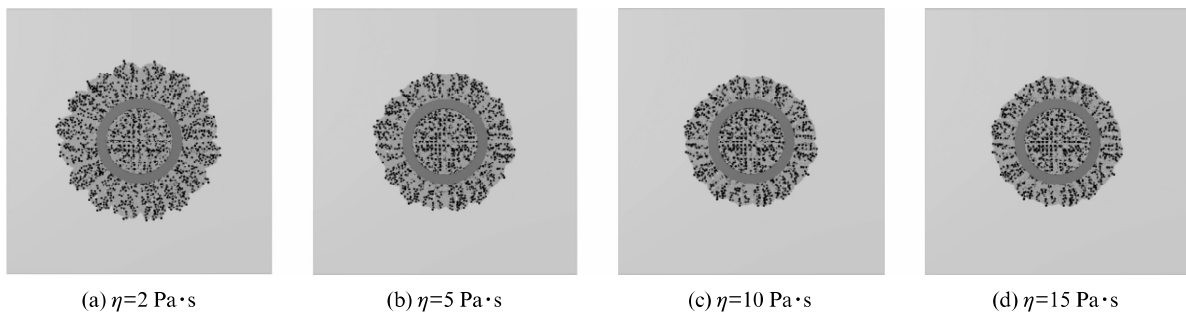


图 5 不同砂浆塑性黏度下 SCC 的流停状态

Fig. 5 Final shape of SCC with different mortar plastic viscosity

为了更好地评价 SCC 在 J 型环试验模拟结果中粗骨料的分布状态, 这里以 J 型环钢筋圆柱所在位置作为分割线, 将扩展部分分为内、外 2 个区域 (如图 6 中 A、B 所示), 并对内、外 2 个区域分别进行粗骨料含量的统计与监测. 砂浆塑性黏度与 J 型环内、外区域粗骨料含量 $a_{e,A}$ 、 $a_{e,B}$ 及其差值 E 之间的关系见表 1. 随着砂浆塑性黏度的增大, 内、外区域内的粗骨料含量都向初始粗骨料含量 (30%) 趋近, 并在 $\eta > 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 后趋于稳定. 由于 J 型环钢筋圆柱的存在, 内区粗骨料含量大于外区. 这是因为当砂浆塑性黏度较小时, 砂浆对于粗骨料的拖曳力较小, 相较于砂浆而言, 密度较大的粗骨料会产生较大的惯性力, 使得粗骨料更容易与砂浆产生相对运动致使 SCC 产生离析现象, 因而 J 型环内外粗骨料含量差值较

大. 随着砂浆塑性黏度的增大, 砂浆对于粗骨料较大的拖曳力使得粗骨料与砂浆趋于同步运动, 粗骨料在砂浆内部的分布趋于保持原有均匀度, 因此内、外区域粗骨料含量差值越来越小并趋于稳定.

3.2 屈服强度

通过调整配合比来改变砂浆屈服强度, 本节选取 4 种砂浆屈服强度 (10、15、20、25 Pa) 作为模拟工况, 固定砂浆塑性黏度为 $10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 密度为 1800 kg/m^3 .

表 2 给出了不同砂浆屈服强度下 SCC 的 J 型环试验模拟结果. 由表 2 可见, 随着砂浆屈服强度的提高, t 降低, L/H 值减小. 本文认为砂浆屈服强度的提高增大了砂浆内部摩擦力, 从而增大了其抵抗剪切应力的能力. 同时砂浆屈服强度的增大也会协同粗骨料一起提高 SCC 的屈服强度, 从而使其在较短的时间和流动距离下达到受力平衡.

表 2 不同砂浆屈服强度下 SCC 的 J 型环试验模拟结果

Table 2 Experimental simulation results of J-ring with different mortar yield strength

τ/Pa	t/s	$\frac{L}{H}$	$a_{e,A}/\%$	$a_{e,B}/\%$	$E/\%$
10	5.48	17.30	31.30	29.42	1.87
15	4.42	14.02	31.39	29.25	2.14
20	3.12	10.92	31.26	29.15	2.11
25	2.74	8.97	31.00	29.18	1.82

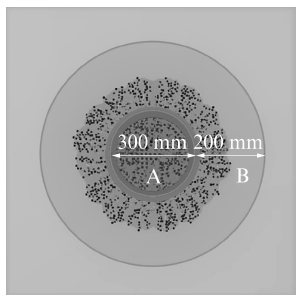


图 6 分区示意图

Fig. 6 Partition diagram

图7给出了不同砂浆屈服强度下 SCC 的流停状态. 由图7可见: 随着砂浆屈服强度的不断增大, SCC 在 J 型环试验模拟中的扩展距离逐渐减小; 在相同的屈服强度下, 其外部边缘轮廓线基本处于相同的圆滑状态; 且各工况下粗骨料分布都较为均匀, 并没有随着砂浆屈服强度的变化而产生较大改变. 砂浆屈服强度与 J 型环内、外区域粗骨料含量及其差值之间的关

系见表2. 由表2可见, 随着砂浆屈服强度的增大, 内、外区域之间的粗骨料含量差值并没有较大的变化. 相同的砂浆塑性黏度下, 砂浆对于粗骨料的携裹作用不会改变, 由于本文选取的砂浆塑性黏度 $10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 使得粗骨料与砂浆之间不会产生较大的相对位移, 因此不会产生粗骨料离析的现象, 从而使得 J 型环内、外区域中粗骨料的分布较为一致.

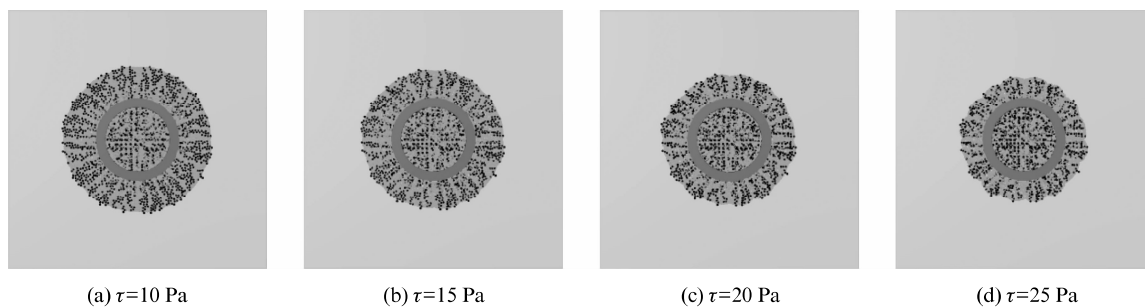


图7 不同砂浆屈服强度下 SCC 的流停状态

Fig. 7 Final shape of SCC with different mortar yield strength

3.3 砂浆密度

调整砂浆的配合比以改变砂浆的密度. 本节选取4种砂浆密度 ($1\,500$ 、 $2\,000$ 、 $2\,500$ 、 $3\,000 \text{ kg/m}^3$) 作为模拟工况, 固定砂浆屈服强度为 25 Pa , 塑性黏度为 $5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

图8和表3分别给出了不同砂浆密度下 SCC 的流停状态以及模拟结果. 由图8和表3可知, 砂浆

密度的改变并没有对整体 SCC 的 J 型环试验模拟结果产生较大的影响, 仅流停状态下的 L/H 值有较小幅度的增长. 这是因为随着砂浆密度的增大, SCC 的密度也在增大, 因此增加了 SCC 自身的重力, 在相同的砂浆屈服强度和塑性黏度下, SCC 自身的屈服强度只能平衡更薄的流动形态下由重力所产生的剪切应力.

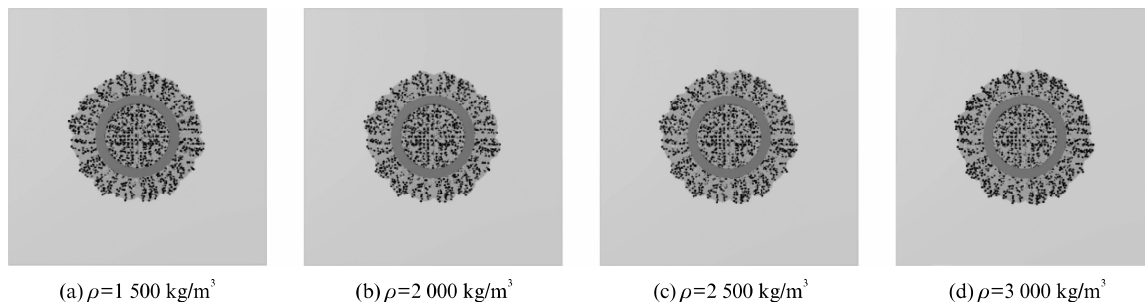


图8 不同砂浆密度下 SCC 的流停状态

Fig. 8 Final shape of SCC with different mortar density

表3 不同砂浆密度下 J 型环试验模拟结果
Table 3 Experimental simulation results of J-ring with different mortar density

$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	t_i / s	$\frac{L}{H}$	$a_{c,A} / \%$	$a_{c,B} / \%$	$E / \%$
1 500	2.57	9.61	31.36	28.97	2.39
2 000	2.20	9.92	31.65	28.78	2.87
2 500	2.72	10.82	31.78	28.78	2.99
3 000	2.61	11.44	31.49	29.01	2.48

3.4 各因素敏感性分析

对砂浆的3个材料特性(塑性黏度 η , 屈服强度 τ 和密度 ρ) 与 J 型环试验的流动时间(t)、流停状态(以 L/H 表征)和骨料分布均匀性(以 E 表征)的关系进行多元回归分析, 结果如表4所示. 表4中: P 值为回归分析中理论值超越样本值的概率. 一般认为当 $P < 0.05$ 时, 模型显著水平 $\alpha = 0.05$, 置信度达到 95%; $|b|$ 为回归系数绝对值, 即多元回归方程的斜率绝对值, 可以用其作为敏感性的度量指标.

表4 多元回归分析结果
Table 4 Results of multiple regression analysis

Factor	Sensitivity	$\eta/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	τ/Pa	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
t/s	P	0.001 3	8.00×10^{-5}	0.071 95
	$ b $	0.153 6	0.163 3	0.000 4
$\frac{L}{H}$	P	0.014 8	0.000 5	0.771 9
	$ b $	0.396 5	0.505 0	0.000 2
$E/\%$	P	0.000 5	0.690 0	0.796 8
	$ b $	0.001 1	6.14×10^{-5}	3.28×10^{-7}

从表4可知,J型环试验模拟中SCC的流动时间 t 与砂浆密度的 P 值大于0.05,与砂浆塑性黏度的 P 值为0.001 3,与砂浆屈服强度的 P 值为 8×10^{-5} ,后两者均小于0.05,置信度达到95%。本文认为除砂浆密度外,砂浆屈服强度和塑性黏度都与其在J型环中的流动时间都有一定的关系。通过比较回归系数绝对值 $|b|$ 的大小,发现砂浆屈服强度的敏感性略大于砂浆塑性黏度,且两者差值不大。这是因为砂浆塑性黏度通过影响SCC流动速度来影响其流动时间,砂浆屈服强度通过影响其流动距离来影响流动时间。因此在实际工程中,可以选择砂浆塑性黏度和屈服强度来对SCC在J型环试验中的流动时间进行调整。

J型环中SCC最终的流停状态以 L/H 作为评定标准。从表4可知, L/H 与砂浆密度的 P 值大于0.05,与砂浆塑性黏度的 P 值为0.014 8,与砂浆屈服强度的 P 值为0.000 5,后两者均小于0.05,置信度达到95%。本文认为除砂浆密度外,砂浆屈服强度、塑性黏度都与其在J型环中的流停形态有一定的联系。通过比较 $|b|$,发现砂浆屈服强度的敏感性大于砂浆塑性黏度。因此在实际工程中,可以首先选择砂浆屈服强度,其次选择砂浆塑性黏度来对J型环试验中SCC的流停形态进行调整。

J型环中的粗骨料分布以内外粗骨料含量差值 E 作为评定标准。从表4可知: E 与砂浆屈服强度和密度的 P 值均大于0.05,可认为砂浆屈服强度及密度与J型环中SCC流动后粗骨料的分布均匀性没有较强的联系; E 与砂浆塑性黏度的 P 值为0.000 5,小于0.05,置信度达到95%。因此在实际工程中,为提高SCC在J型环内外的粗骨料分布均匀程度,可以调整砂浆塑性黏度。

4 结论

(1)由于粗骨料的存在,砂浆塑性黏度和屈服强度的改变都会对SCC在J型环试验中的流动时间

和流停状态产生影响。相同砂浆屈服强度下,随着砂浆塑性黏度的增大,SCC流动时间变长,填充距离减小。在相同砂浆塑性黏度下,随着砂浆屈服强度的增大,SCC流动时间变短,填充距离减小。

(2)针对J型环试验中SCC的流动时间,砂浆塑性黏度和屈服强度的敏感性相似,可以选择改变砂浆塑性黏度和屈服强度来对SCC的流动时间进行调整;针对J型环试验中SCC的流停状态,砂浆屈服强度的敏感性大于塑性黏度,可以首先选择砂浆屈服强度,其次选择砂浆塑性黏度来对SCC的流停状态进行调整。

(3)针对J型环试验中粗骨料在环内外的分布均匀性,仅砂浆塑性黏度对其有较显著的影响,可通过提高砂浆塑性黏度,增大砂浆与粗骨料之间的拖曳力来增加SCC流动后粗骨料的分布均匀性。

参考文献:

- [1] 刘运华,谢友均,龙广成.自密实混凝土研究进展[J].硅酸盐学报,2007,35(5):671-678.
LIU Yunhua, XIE Youjun, LONG Guangcheng. Progress of research on self-compacting concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(5): 671-678. (in Chinese)
- [2] 安雪晖,金峰,石建军.自密实混凝土充填堆石体试验研究[J].混凝土,2005(1):3-6,42.
AN Xuehui, JIN Feng, SHI Jianjun. Experimental study of self-compacting concrete filled prepacked rock[J]. Concrete, 2005(1): 3-6, 42. (in Chinese)
- [3] ROUSSEL N, GEIKER M R, DUFOUR F, et al. Computational modeling of concrete flow: General overview[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(9): 1298-1307.
- [4] ROUSSEL N, GRAM A. Simulation of fresh concrete flow[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2014: 65-124.
- [5] ROUSSEL N. Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(9): 1656-1664.
- [6] VASILIC K, SCHMIDT W, KÜHNE H C, et al. Flow of fresh concrete through reinforced elements: Experimental validation of the porous analogy numerical method[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 88: 1-6.
- [7] SHYSHKO S, MECHTCHERINE V. Developing a discrete element model for simulating fresh concrete: Experimental investigation and modelling of interactions between discrete aggregate particles with fine mortar between them[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 601-615.
- [8] TAN Y, CAO G, ZHANG H, et al. Study on the thixotropy of the fresh concrete using DEM[J]. Procedia Engineering, 2015, 102: 1944-1950.
- [9] MORESI L, DUFOUR F, MUHLHAUS H B. A Lagrangian integration point finite element method for large deformation modeling of viscoelastic geomaterials[J]. Journal of Computa-

- tional Physics, 2003, 184(2): 476-497.
- [10] 陈松贵. 宾汉姆流体的 LBM-DEM 方法及自密实混凝土复杂流动研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
CHEN Songgui. Development of LBM-DEM for Bingham suspensions with application to self-compacting concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
- [11] 张传虎, 金峰, 陈松贵, 等. 自密实混凝土在堆石孔隙中的流动规律研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(10): 112-120.
ZHANG Chuanhu, JIN Feng, CHEN Songgui, et al. Flow behaviors of self-compacting concrete in rockfill gaps[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(10): 112-120. (in Chinese)
- [12] KOSHIZUKA S, OKA Y, TAMAKO H. A particle method for calculating splashing of incompressible viscous fluid[C]// Proceedings of the International Conference, Mathematics and Computations, Reactor Physics, and Environmental Analyses. Portland: ANS, 1995, 2: 1514-1521.
- [13] 饶成平, 万德成. Numerical study of the wave-induced slamming force on the elastic plate based on MPS-FEM coupled method[J]. 水动力学研究与进展: B 辑, 2018, 30(1): 70-78.
RAO Chengping, WAN Decheng. Numerical study of the wave-induced slamming force on the elastic plate based on MPS-FEM coupled method[J]. Journal of Hydrodynamics: B, 2018, 30(1): 70-78. (in English)
- [14] 潘徐杰, 张怀新. 移动粒子半隐式法晃荡模拟中的压力震荡现象研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(4): 453-463.
PAN Xujie, ZHANG Huaixin. A study on the oscillations appearing in pressure calculation for sloshing simulation by using moving-particle semi-implicit method[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23(4): 453-463. (in Chinese)
- [15] 潘徐杰, 张怀新. 用移动粒子半隐式法模拟液舱横摇晃荡现象[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(11): 1904-1907.
PAN Xujie, ZHANG Huaixin. Moving-particle semi-implicit method for simulation of liquid sloshing on roll motion[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2008, 42(11): 1904-1907. (in Chinese)
- [16] ZHANG Y L, TANG Z Y, WAN D C. Simulation of water entry of a free-falling wedge by improved MPS method[C]// Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2016: 220-227.
- [17] XIANG H, CHEN B. Simulating non-Newtonian flows with the moving particle semi-implicit method with an SPH kernel[J]. Fluid Dynamics Research, 2015, 47(1): 1-27.
- [18] XIE J, JIN Y C. Parameter determination for the Cross rheology equation and its application to modeling non-Newtonian flows using the WC-MPS method[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2015, 10(1): 111-129.
- [19] 李敬军, 田雷, 邱流潮. 基于 MPS 方法的堆石混凝土填充流动数值模拟[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6): 1357-1365.
LI Jingjun, TIAN Lei, QIU Liuchao. Numerical simulation for the filling of RFC based on MPS method[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6): 1357-1365. (in Chinese)
- [20] 李敬军, 田雷, 邱流潮, 等. 基于 MPS 方法的自密实混凝土流动数值模拟[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 309-316.
LI Jingjun, TIAN Lei, QIU Liuchao, et al. Numerical simulation of self-compacting concrete flow based on MPS method[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 309-316. (in Chinese)
- [21] SAKAI M, SHIGETO Y, SUN X S, et al. Lagrangian-Lagrangian modeling for a solid-liquid flow in a cylindrical tank[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 200-202: 663-672.
- [22] HARADA E, GOTOH H, IKARI H, et al. Numerical simulation for sediment transport using MPS-DEM coupling model[J]. Advances in Water Resources, 2019, 129: 354-364.
- [23] SUN X S, SAKAI M, SAKAI M T, et al. A Lagrangian-Lagrangian coupled method for three-dimensional solid-liquid flows involving free surfaces in a rotating cylindrical tank[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 246: 122-141.
- [24] LI J J, QIU L C, TIAN L, et al. Modeling 3D non-newtonian solid-liquid flows with a free-surface using DEM-MPS[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2019, 105: 70-77.
- [25] CUNDALL P A, STRACK O D L. Discrete numerical-model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [26] ANDERSON T, JACKSON R. A fluid mechanical description of fluidized beds[J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1967, 6(4): 527.
- [27] FEYS D. Steady-state rheological properties of fresh self-compacting concrete and their evolution in time [C]// Annual Transactions the Nordic Rheology Society-Nordic Rheology Conference. [S.l.: s.n.], 2007: 35-41.