

文章编号:1007-9629(2021)01-0039-06

自密实混凝土粗骨料运动及静态离析的 CFD 数值模拟

崔 激^{1,2,3}, 孟苗苗³, 宋慧芳³

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350;

2. 天津大学 中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室, 天津 300350;

3. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350)

摘要: 采用移动刚体(GMO)方法,将新拌自密实混凝土(SCC)视为粗骨料与砂浆相混合的两相固液介质,对粗骨料运动及静态离析现象进行计算流体力学(CFD)数值模拟. 分析了砂浆的屈服应力和塑性黏度对粗骨料运动过程的影响,研究了 3 种级配的 SCC 中粗骨料在砂浆中的运动行为. 结果表明:砂浆的屈服应力对 SCC 静态离析具有显著影响,而砂浆的塑性黏度对其影响不大;虽然不同的骨料级配在相同条件下的离析行为不尽相同,但仍体现出一定的规律性,其中大粒径骨料含量较少、小粒径骨料含量较多的级配相对稳定.

关键词: 自密实混凝土; 离析; 骨料随机建模; 砂浆流变性; 级配

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.006

CFD Numerical Simulation of Movement and Static Segregation of Self-compacting Concrete Aggregate

CUI Wei^{1,2,3}, MENG Miaomiao³, SONG Hui Fang³

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience of China Earthquake Administration, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The general moving object(GMO) method was used to simulate the motion and static segregation of fresh self-compacting concrete(SCC) considering the fresh self-compacting concrete as a two-phase solid-liquid medium. The effect of yield stress and viscosity of mortar on aggregate movement process was studied. Based on this, the movement behavior of three groups of self-compacting concrete coarse aggregates with different gradation in mortar was studied. The results show that the yield stress of mortar has an obvious effect on the static segregation of concrete, while the viscosity has little effect. The segregation behavior of different aggregate gradations under the same conditions is different, but it still shows certain regularity. Under the same conditions, gradation with less content of large particle size aggregate and more content of small particle size aggregate is relatively stable.

Key words: self-compacting concrete(SCC); segregation; aggregate random modeling; rheological property of mortar; gradation

收稿日期:2019-08-12; 修订日期:2019-09-22

基金项目:国家自然科学基金雅江联合基金资助项目(U1765106);国家自然科学基金资助项目(52079092)

第一作者:崔 激(1977—),男,山东诸城人,天津大学副教授,博士生导师,博士. E-mail: cuiwei@tju.edu.cn

离析指的是混凝土中的砂浆与粗骨料相互分离的现象.其不但会影响混凝土的泵送施工性能,造成黏罐、堵管等,还会降低混凝土的强度及均一性,影响混凝土结构的承载力及耐久性.自密实混凝土(SCC)由于自身的高流动性,一般具有较低的屈服应力和黏度,更容易产生离析现象^[1].

为研究混凝土离析的影响因素及分析方法,不少学者作了大量工作.如 Han 等^[1]对混凝土试块断面进行二维图像分析,研究了混凝土中粗骨料的特性及分布;Zeng 等^[2]采用落球测量浆体黏性系数的方法,研究了不同骨料颗粒粒径在同稠度浆体下的离析程度;Petrou 等^[3]利用核医学技术获得新拌混凝土中粗骨料在砂浆的实时分布情况,以此研究混凝土的流动特性及离析状况;Panesar 等^[4]采用 V 型漏斗试验及视觉稳定指数方法对混凝土的离析性能进行了研究,并对混凝土其与砂浆带厚度、抗拉强度及氯离子的渗透性进行了相关性分析;Masoud 等^[5]将新拌自密实混凝土视为球型骨料和砂浆的混合流体,分析了钢筋布置和粗骨料含量对 L 型箱抗剪离析的耦合效应;Cenk 等^[6]采用 Fluent 的离散相模型,对混凝土进行了 V 型漏斗和 L 型箱试验离析数值模拟并进行了验证,模拟了典型柱-梁-钢筋混凝土模板泵送 SCC 过程中粗骨料的堵管及离析行为.

由于浆体的不可视化,研究混凝土的骨料分布时,一般采用剖切试块来获取二维图像.该方法不仅费时费力,而且获取的二维数据并不能完全代表整体分布,具有一定的局限性^[3].随着计算机科学的发展,数值模拟越来越受到众多学者的青睐,且可以很好地从三维空间观察混凝土的骨料分布规律^[7-9].在以往的数值模拟研究中,习惯于将复杂问题简单化,用球型骨料代替真实骨料,忽略了骨料的真实不规则形态.事实上,不规则骨料的受力和运动与球型骨料明显不同.

鉴于此,本研究基于移动刚体(GMO)原理,将混凝土拌和物看作是粗骨料和砂浆混合的两相介质,在一定程度上还原了真实粗骨料的随机形态,并将流体近似为宾汉姆流体,借助计算流体力学(CFD)软件 Flow-3D 来模拟混凝土的静态离析状况,量化分析不同流体性质及级配情况下粗骨料的运动及离析过程.

1 研究方法验证

1.1 验证方案

在 Flow-3D 中,采用宾汉姆流体模拟砂浆的流变行为,采用 GMO 模型模拟骨料在流体中的运动

和骨料之间的摩擦、碰撞作用;选择单个骨料验证 Flow-3D 精确模拟不规则骨料在砂浆中运动的可行性.已有研究表明,添加玻璃微珠后的卡波姆凝胶可以等效模拟水泥砂浆^[10-11],因此本文采用该可视化流体来代替砂浆,并基于 GMO 方法进行对比验证.

配制 1 L 质量分数为 0.30%、玻璃微珠(粒径 0.3~0.6 mm)质量分数为 5% 的卡波姆凝胶,此时该透明胶砂拌和物的流体性质近似为宾汉姆流体.经计算和测定,该流体的密度为 $1\,050\text{ kg/m}^3$,屈服应力为 36 Pa,塑性黏度为 $1.15\text{ Pa}\cdot\text{s}$.选取 1 颗粒径为 25 mm,密度为 $2\,600\text{ kg/m}^3$ 的骨料,采用高速摄像机摄录该骨料在透明胶砂拌和物中的运动行为,同时对骨料的真实形状进行三维扫描建模,真实骨料与模拟骨料对比图如图 1 所示.

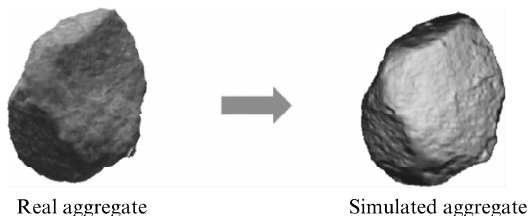


图 1 真实骨料与模拟骨料对比图

Fig. 1 Comparison between real aggregate and simulated aggregate

1.2 验证结果分析

试验与数值模拟得到的骨料运动过程对比见图 2. 可以看到,由两者得到的骨料运动轨迹基本一致.两者竖向位移对比如图 3 所示.由图 3 可以看出:(1)2 条时间-位移拟合曲线较吻合.(2)粗骨料在 0~4 s 时位移急剧减小,降幅较大;粗骨料在 4~17 s 时位移降幅速率变缓;17 s 后粗骨料沉入烧杯底部.(3)试验值和模拟值在同一时刻的位移误差最大不超过 5 mm.由此可见,采用 Flow-3D 来模拟不规则骨料在宾汉姆流体中的运动是精确可行的.

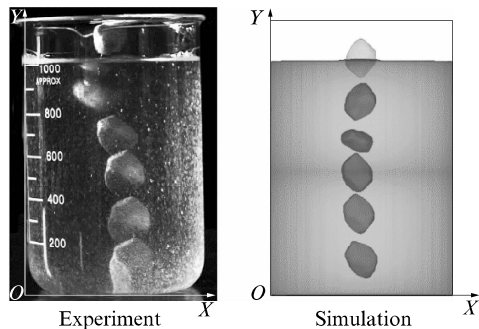


图 2 骨料运动过程对比

Fig. 2 Comparison of moving process of aggregate

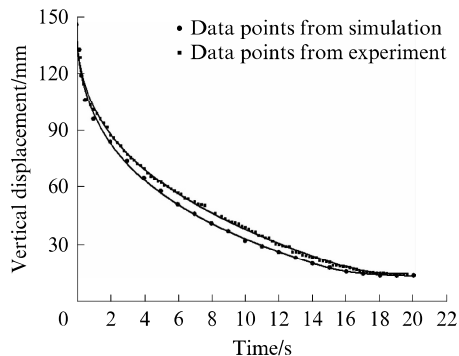


图 3 骨料竖向位移对比

Fig. 3 Comparison of vertical displacement of aggregate

2 研究方案及模型设置

2.1 研究方案

砂浆的流变参数和骨料级配对自密实混凝土拌和物的性能起到至关重要的作用. Zerbino 等^[12]分析了工程试验结果与砂浆流变参数之间的关系; Zhao 等^[13]研究了粗骨料级配对自密实混凝土性能的影响. 为研究砂浆流变参数及骨料级配对混凝土静态离析的影响, 从以下两方面入手: (1) 流变参数主要包括屈服应力和塑性黏度, 模拟屈服应力 15~30 Pa 和塑性黏度 15~30 Pa·s 的离析状况; (2) 根据 ACI 237R-07《Self-consolidating concrete》, 选取 3 种骨料级配进行模拟试验, 3 种骨料级配的粗骨料含量(体积分数, 下同)见表 1. 需要说明的是, 根据 GB/T 14685—2011《建筑用卵石、碎石》规定, 粒径小于 4.75 mm 的骨料视为细骨料, 不在本次模拟范围之内.

表 1 3 种骨料级配的粗骨料含量

Table 1 Coarse aggregate content at three aggregate gradations

Aggregate size/mm	$\varphi(\text{coarse aggregate})/\%$		
	Gradation I	Gradation II	Gradation III
19-25	9.0	3.0	2.3
12.5-19	19.0	15.0	9.2
9.5-12.5	8.0	14.0	5.1
4.75-9.5	14.0	15.0	25.4
Total	50.0	47.0	42.0

Note: The aggregate content refers to proportion of aggregate of each particle size to total aggregate (including fine aggregate) in specimen.

2.2 模型参数设置

2.2.1 粗骨料随机形态模型的建立

为还原骨料的真实状态, 采用宋来忠等^[14]的研究方法, 实现混凝土三维随机参数化骨料建模. 运用参数曲面自由变形技术, 通过基本伸缩因子函数的伸缩系数和丰满指数控制伸缩方向、伸缩幅度和丰满度, 再利用复合、叠加等手段将球状变形为粗骨料的形状. 具体建模流程如下: (1) 从模拟效果和计算效率综合考虑, 先设定模拟空间区域为 $[0, 5] \times [0, 5] \times [0, 15]$, 然后按照级配要求随机生成覆盖球面; (2) 通过随机控制变形参数进行骨料形状生成; (3) 记录生成骨料的体积累加数据, 判定是否达到要求, 若不能满足要求, 则返回第(1)步; (4) 当生成的骨料满足要求后, 输出模型. 在 Matlab 中通过编程计算实现上述建模方法, 最终生成 3 种级配骨料. 模拟试块及骨料级配 I、II、III 示意图如图 4 所示.

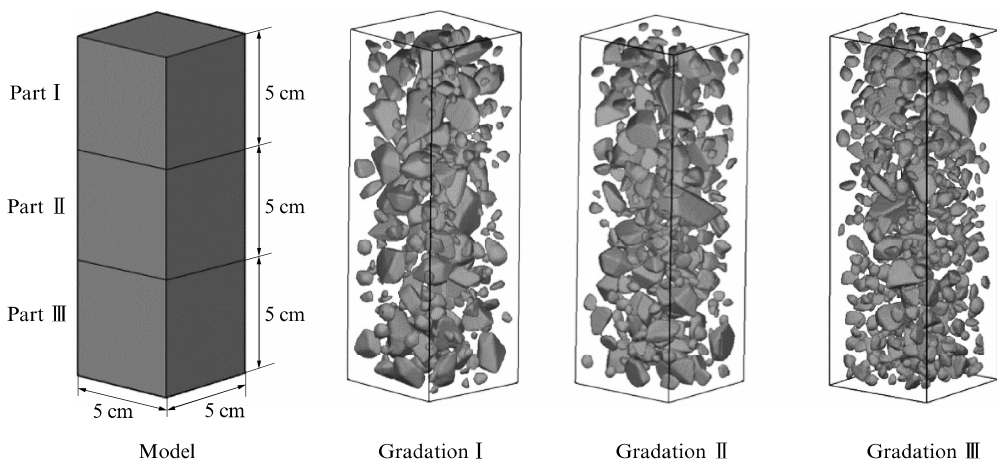


图 4 模拟试块及骨料级配 I、II、III 示意图

Fig. 4 Sketch map of simulated specimen and three aggregate gradations

2.2.2 边界条件及参数设置

将生成的随机骨料导入 Flow-3D 中, 设置流体

区域为模拟试块尺寸, 屈服应力为 15~30 Pa, 塑性黏度为 15~30 Pa·s, 密度为 2 200 kg/m³, 骨料密

度为 2 600 kg/m³. 为较精确地识别出骨料的形状,划分网格时采用结构化网格,网格数量为 465 388. 开启重力模型、弹黏塑性模型和 GMO 模型等. 其中,重力模型设置 Z 方向上的重力加速度为-9.81 m/s²; GMO 模型设置恢复系数为 0.8,摩擦系数为 0.4^[5]. 顶部预留 10 mm 高度空气介质,以防止砂浆液面波动,其边界条件设置为 Symmetry,其他面边界条件为 Wall. 采用隐式求解器,利用动量方程中的压力

和连续性方程中的速度进行耦合,用迭代方法和松弛因子求解方程,以达到精确模拟的效果.

3 模拟结果及分析

为量化分析混凝土的静态离析状况,将模型由上至下平均分为 3 个部分 Part I、Part II 和 Part III (见图 4). 计算不同工况下每个部分的粗骨料含量(初始值均为 33.3%),结果如表 2、3 所示.

表 2 各级配在塑性黏度为 25 Pa·s、不同屈服应力条件下的粗骨料含量
Table 2 Coarse aggregate content under different yield stresses with plastic viscosity of 25 Pa·s

Yield stress/Pa	$\varphi(\text{coarse aggregate})/\%$								
	Gradation I			Gradation II			Gradation III		
	Part I	Part II	Part III	Part I	Part II	Part III	Part I	Part II	Part III
15	15.8	38.8	45.4	18.2	36.1	45.7	20.1	35.1	44.8
20	20.5	37.2	42.3	22.5	35.4	42.1	23.4	34.5	42.1
25	28.6	34.0	37.4	29.4	33.8	36.8	30.7	33.5	35.8
30	33.1	32.9	34.0	32.9	33.5	33.6	33.1	33.3	33.6

Note: The aggregate content refers to proportion of aggregate of each part to total aggregate.

表 3 级配 I 在屈服应力为 15、30 Pa、不同塑性黏度条件下的粗骨料含量
Table 3 Coarse aggregate content of gradation I under different plastic viscosities of yield stress at 15, 30 Pa

Plastic viscosity/(Pa·s)	$\varphi(\text{Coarse aggregate})/\%$					
	Yield stress at 15 Pa			Yield stress at 30 Pa		
	Part I	Part II	Part III	Part I	Part II	Part III
15	15.8	38.8	45.4	33.1	32.9	34.0
20	15.7	38.7	45.6	33.4	32.7	33.9
25	16.0	38.9	45.1	33.2	32.9	33.9
30	15.8	38.7	45.5	33.1	32.8	34.1

Note: The aggregate content refers to proportion of aggregate of each part to total aggregate.

3.1 流变参数对混凝土静态离析的影响

3.1.1 屈服应力对混凝土静态离析的影响

以级配 I 为例,分析砂浆屈服应力对混凝土静态离析的影响. 由表 2 可知:(1)当屈服应力为 15 Pa 时,Part II 和 Part III 的粗骨料含量明显高于 Part I,此时发生了较严重的离析现象;大部分粗骨料发生了沉降,由于其不规则的形状,在下降过程中粗骨料产生翻转偏移行为,最终堆积在中下部;一些处于大骨料下方的小骨料由于受到大骨料垂直方向上的挤压,也发生了空间上的翻转和下沉.(2)随着屈服应力的增大,Part I 中的粗骨料含量不断增加,Part II 中的粗骨料含量不断减小,说明在较低屈服应力下,粗骨料沉降和离析现象较为明显.(3)随着屈服应力的增加,粗骨料沉降速率逐渐减小,当屈服应力达到 30 Pa 时,各部分的粗骨料含量基本呈现为平均分布,与初始值接近.

总体来看,屈服应力是影响混凝土静态离析的重要因素,随着砂浆屈服应力的增加,粗骨料沉降速率减小,混凝土离析性可能降低.

3.1.2 塑性黏度对混凝土静态离析的影响

由表 3 可知,当屈服应力为 15、30 Pa 时,改变塑性黏度值后各部分的粗骨料含量均无太大变化. 由此可见,塑性黏度对混凝土的静态离析并无显著影响.

综上所述,自密实混凝土拌和物的离析行为主要取决于宾汉姆流体的屈服应力,而非其塑性黏度,这一结果在 Roussel^[15] 和 Bilgil 等^[16] 的研究中也得到了肯定. Ramge 等^[17] 在其研究中提到,塑性黏度不能阻止骨料的分离,只能控制骨料运动的速度.

3.2 不同级配下混凝土静态离析状况

为衡量 3 种级配在不同屈服应力下的离析程

度,在各屈服应力下,以每个部分中的粗骨料含量为样本,分析样本集的极差和标准差,以此为指标,选出最优级配。本研究中,粗骨料含量的平均数即为每

部分的初始粗骨料含量值 33.3%。图 5 给出了不同屈服应力下 3 种级配各部分粗骨料含量的极差和标准差。

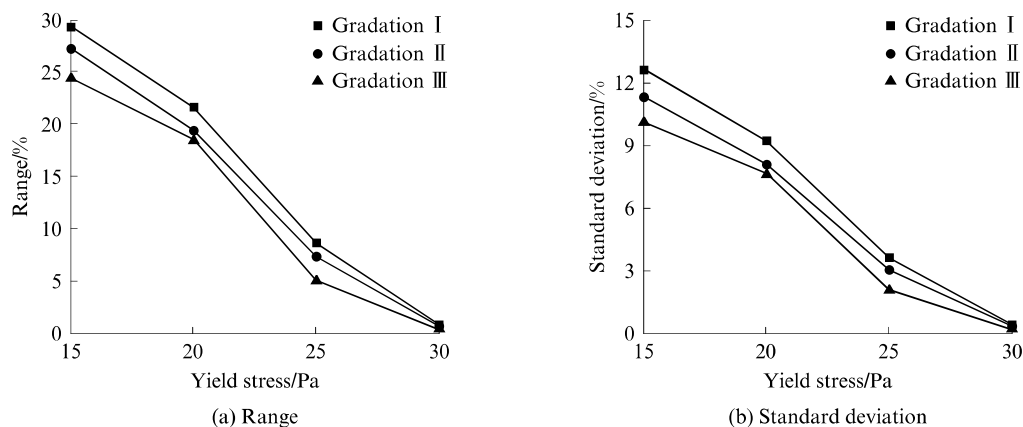


图 5 不同屈服应力下 3 种级配的极差和标准差

Fig. 5 Range and standard deviation of three gradations under different yield stresses

由图 5 可以看出:(1)当屈服应力为 15 Pa 时,级配 I 各部分粗骨料含量的极差与标准差分别为 29.6%、12.7%,稍高于级配 II 的 27.5%、11.4%和级配 III 的 24.7%、10.2%。(2)随着屈服应力的增加,每种级配的极差与标准差均呈现下降趋势;当屈服应力达到 30 Pa 时,3 种级配的极差和标准差降至 1.0%和 0.5%左右,说明此时样本集的数据差异较小,且稳定在平均值附近。

极差和标准差进一步反映了混凝土中各级配的离析程度。上述结果表明,级配对混凝土的静态离析有显著影响,级配 I 在屈服应力较小条件下更容易产生离析现象,级配 III 相对来说最稳定。这是由于级配 I 中大骨料含量最多,屈服应力较小时,大骨料更容易克服屈服应力而产生沉降,因而发生了较严重的离析现象。级配 III 中大骨料含量最少,小粒径的骨料无法克服屈服应力,因此在相同条件下相对比较稳定。

4 结论

(1)考虑真实骨料随机形态的特点,实现了骨料的三维随机建模。基于 GMO 方法,将新拌混凝土视为粗骨料和砂浆的两相固液介质,实现了自密实混凝土的静态离析数值模拟。

(2)分析了流体中屈服应力和塑性黏度对于混凝土静态离析的影响。屈服应力是影响混凝土静态离析的敏感因素,随着屈服应力的增大,混凝土中的骨料逐渐稳定,离析现象得到改善。当屈服应力为 30 Pa 时,混凝土不会再发生静态离析行为。塑性黏

度对于混凝土的静态离析并无显著影响。

(3)大粒径骨料含量较少、小粒径骨料含量较多的级配(级配 III),在屈服应力较小的情况下,相对于其他 2 种级配更加稳定,且砂浆屈服应力变化对其影响较小,因此在 3 种级配中为最佳选择。

参考文献:

- [1] HAN J G, WANG K J, WANG X H, et al. 2D image analysis method for evaluating coarse aggregate characteristic and distribution in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 127:30-42.
- [2] ZENG L, ZHANG Y H, GAO Z, et al. Study on the impact of aggregate size to SCC segregation[J]. Advanced Materials Research, 2011, 243-249:6984-6989.
- [3] PETROU M F, HARRIES K A, GADALA M F, et al. A unique experimental method for monitoring aggregate settlement in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30 (5):809-816.
- [4] PANESAR D K, SHINDMAN B. The effect of segregation on transport and durability properties of self consolidating concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42 (2): 252-264.
- [5] MASOUD H, KAMAL H, KHAYAT Y. Numerical simulation of self-consolidating concrete flow as a hetero-geneous material in L-Box set-up: Coupled effect of reinforcing bars and aggregate content on flow characteristics [J]. Materials and Structures, 2017, 50:163-177.
- [6] CENK K, AHMET O C, CEM Y, et al. CFD simulation of self-compacting concrete with discrete phase modeling [J]. Construction and Building Materials, 2018, 186:20-30.
- [7] 崔激,宋慧芳. 自密实混凝土及浇筑过程的 CFD 数值模拟 [J]. 混凝土, 2017(8):111-115.

- CUI Wei, SONG Huifang. CFD simulation of fresh self compacting concrete flow and casting process[J]. Concrete, 2017(8):111-115. (in Chinese)
- [8] 周扬. 基于宾汉姆模型用 L-箱测试与反演自密实混凝土流变参数[D]. 衡阳: 南华大学, 2014.
- ZHOU Yang. Test method and inversion technique of self-compacting concrete's rheological parameters with L-box based on Bingham model[D]. Hengyang: Nanhua University, 2014. (in Chinese)
- [9] 周扬, 石建军, 吴现磊, 等. 基于 Bingham 模型的新拌自密实混凝土流变参数反演研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(9): 135-139.
- ZHOU Yang, SHI Jianjun, WU Xianlei, et al. Back analysis of self-compacting concrete rheological parameters Bingham model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(9): 135-139. (in Chinese)
- [10] 田正宏, 李旭航, 彭志海. 卡波姆凝胶模拟水泥浆体流变性能试验[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(2): 243-248.
- TIAN Zhenghong, LI Xuhang, PENG Zhihai. Test of Carbomer gel to simulate the rheological performance of cement paste[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(2): 243-248. (in Chinese)
- [11] 田正宏, 李旭航, 朱飞鹏, 等. 流变混凝土骨料运动模拟试验研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 22-28.
- TIAN Zhenghong, LI Xuhang, ZHU Feipeng, et al. Experimental simulation study on aggregate motion of rheological concrete[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 22-28. (in Chinese)
- [12] ZERBINO R, BARRAGAN M, GARCIA T, et al. Workability tests and rheological parameters in self-compacting concrete[J]. Materials & Structures, 2009, 42(7): 947-960.
- [13] ZHAO H, SUN W, WU X M, et al. The effect of coarse aggregate gradation on the properties of self-compacting concrete[J]. Materials & Design, 2012, 40: 109-116.
- [14] 宋来忠, 彭刚, 姜袁. 混凝土三维随机参数化骨料模型[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 91-98.
- SONG Laizhong, PENG Gang, JIANG Yuan. A three-dimensional model for concrete with random parameterized irregular aggregate[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 91-98. (in Chinese)
- [15] ROUSSEL N. A theoretical frame to study stability of fresh concrete[J]. Materials and Structures, 2006, 39(1): 81-91.
- [16] BILGIL A, OZTURK B, BILGIL H. A numerical approach to determine viscosity-dependent segregation in fresh concrete[J]. Applied Mathematics & Computation, 2005, 162(1): 225-241.
- [17] RAMGE P, PROSKE T. Segregation of coarse aggregates in self-compacting concrete[C]//Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete. Berlin: Springer, 2010: 113-125.

~~~~~

(上接第 38 页)

- PENG Jiahui, LOU Zonghan. Study on the mechanism of ettringite formation[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2000, 28(6): 511-515. (in Chinese)
- [24] 陈霞, 杨华全, 张建峰. 磷酸盐和氟盐对水泥凝结特性的影响及作用机理[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(12): 511-515.
- CHEN Xia, YANG Huaquan, ZHANG Jianfeng. Influence of phosphate and fluoride on cement setting and its working mechanism[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(12): 511-515. (in Chinese)
- [25] 杨利刚. 氟掺杂水化硅酸钙的制备与性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- YANG Ligang. The preparation and properties of fluorine-doped calcium silicate hydrate [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [26] PAGLIA C. The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems: I. Characterization of the setting behavior[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(6): 913-918.
- [27] SALVADOR R P, CAVALARO S H P, SEGURA I, et al. Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 389-398.
- [28] LUKAS W. Substitution of Si in the lattice of ettringite[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(1): 225-234.
- [29] ILJINA I A, BALTAKYSL K, BANKAUSKAITE A, et al. The stability of formed  $\text{CaF}_2$  and its influence on the thermal behavior of C-S-H in  $\text{CaO}$ -silica gel waste- $\text{H}_2\text{O}$  system[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 127: 221-228.