

特细砂替代率对自密实砂浆流变性的影响

林忠财[†], 许潇, Hamideh Mehdizadeh, 王敏
(湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要:为解决在中砂资源匮乏地区配制自密实砂浆时原材料短缺的问题,同时提高特细砂的资源利用率,使用特细砂替代中砂配制自密实砂浆,并研究了不同替代率(0~50%)对自密实砂浆流变性能的影响.结果表明:特细砂替代率对自密实砂浆流变性能的影响存在临界点,这是由于特细砂高的吸水率会使砂浆基体中自由水的含量降低,进而导致自密实砂浆的流变性能变差.然而,特细砂的颗粒效应会改善自密实砂浆的级配,使更多的自由水在拌和时被释放,改善砂浆的流变性能.随着特细砂替代率增大,砂浆的黏度和屈服应力也随之增大;当特细砂替代率大于30%后,替代率增加会使浆体稠度急剧增加,因此从自密实砂浆流变学性能稳定性考虑,特细砂替代率应在30%内.

关键词:特细砂;替代率;自密实砂浆;流动性;经时黏度

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A

Influence of Ultra Fine Sand Replacement Ratio on Rheology of Self-consolidating Mortar

LING Tungchai[†], XU Xiao, Hamideh Mehdizadeh, WANG Min
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To compensate for the deficiency of natural sand (NS) resources during the production of self-consolidating mortar (SCM) in the area with limited medium sand resources and promote the utilization of ultra-fine sand (UFS), this study aimed to use UFS as a substitution of medium-size sand in the production of self-consolidating mortar (SCM) and examine the effect of different replacement ratio on the rheology of self-consolidating mortar (SCM). The results showed that there existed an critical UFS replacement ratio with regard to its influence on the rheology properties of the SCM. This is because the high water absorption capability of UFS can decrease the free water content in the SCM matrix, resulting in the deterioration of its rheological properties. However, the particle effect of the UFS could improve the gradation of self-compacting mortar, allowing more free water to be released during mixing and improving the rheological properties. The viscosity and the yield stress of the SCM mixture increased as the UFS ratio increased. Also, the influence of the high water absorption of UFS on consistency was more obvious at UFS replacement ratio over 30%. Taken together, the UFS ratio should be fixed within 30% for the production of SCM with a good rheological performance.

Key words: ultra fine sand (UFS); replacement ratio; self-consolidating mortar (SCM); flowability; time-dependent viscosity

* 收稿日期:2021-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(5181101350, 5191101169, U1605242), National Natural Science Foundation of China (5181101350, 5191101169, U1605242)

作者简介:林忠财(1980—),男,马来西亚华裔,湖南大学教授,博士

[†] 通信联系人, E-mail: tcling611@yahoo.com

从颗粒大小来看,细度模数处于0.7~1.5或平均粒径在0.25 mm以下的砂可称为特细砂(Ultra Fine Sand, UFS),其粒径多集中在0.1~0.6 mm,多来自于河床冲刷淤积底砂或沙漠风化磨蚀细砂^[1]。早前研究中特细砂被定义为低级的、不可利用的原材料,因此工程中浇筑混凝土所使用的细骨料大部分都是中、粗砂。然而,部分地区中砂资源极度匮乏,特细砂资源相对丰富,在此类地区工程建设所需中砂运输费用增加,特细砂资源浪费^[2]。长江和黄河江岸则就地取材,使用细度模数为0.5~1.5的特细砂作细骨料制备高性能混凝土^[3-4]。国内还曾在安居、渭滩等水电站大体积混凝土中使用特细砂,但由于其依照常规混凝土设计方法,导致了一定程度的收缩开裂问题。在前人的研究中,马红娜等^[5]认为使用特细砂拌制C20以上泵送混凝土的水胶比不能低于0.5;谢祥明和黄绪通^[6]提出了“低砂率、低坍落度、低水泥用量”的配制方法来优化特细砂混凝土的流动性;刘登贤等^[7]以30%特细砂替代机制砂设计的超高层泵送混凝土可满足良好的流动性和粘聚性;蒋聚桂等^[8]发现特细砂所能配制的混凝土的最大流动度随含砂量增大而降低。

特细砂也被研究应用于制备抗裂砂浆、粘结砂浆、自密实砂浆和自流平水泥基材料^[9-11],其中自密实砂浆(Self-consolidating Mortar, SCM)可为不平基材提供光滑的基底,同时还能提高大面积施工效率^[12],它需要良好的流动性和一定的保水性,确保在其后续混凝土配合比设计时不会发生离析、泌水现象。自密实砂浆的性能评价是自密实混凝土设计中必不可少的一部分^[13],当骨料确定后,可通过调节自密实砂浆的流变系数来得到满足自密实性能的混凝土^[14]。根据欧洲自密实混凝土指南,自密实砂浆的扩展度在240~260 mm,微坍落扩展度(胶砂流动度)需要达到180 mm,V漏斗流动时间在7~11 s内^[15]。学者们还通过研究黏度、屈服应力等流变参数定量表征自密实砂浆工作性能变化的背后机理,其中黏度反映了浆体流动速度的快慢,可看作浆体各平流层流动方向相反的阻止其流动的粘滞力,主要由颗粒表面水膜厚度决定^[16]。在流变实验中,絮凝的水泥基材料受剪切应力影响而分散,其黏度随着转子转速及剪切速率的变化而改变^[17],实验通常选择用流动梯度实验来测其黏度;而屈服应力是浆体受剪切作用开始流动时的剪切应力临界值,主要是浆体胶凝材料颗粒间或网状结构间的摩擦及相互吸附产生的阻力^[18]。在复合水泥基材料体系中,原材料的细度与掺

量相互平衡制约,从而改变浆体流变性能的主导地位,并使得浆体的屈服应力和塑性黏度随之变化^[19]。在前人的研究中,Tang等^[20]认为高流动态混凝土遵循宾汉模型,且适宜选用黏度为3 500~5 500 Pa·s的砂浆;Chidiac等^[21]和Tregger等^[22]发现自密实混凝土的黏度与其达到一定坍落扩展度所需时间相关;吴琼^[23]以扩展度和V漏斗测试研究了自密实净浆对自密实混凝土流动性的影响,并以理论计算公式给出了SCM屈服应力上限和黏度下限;王裕宜等^[24]以不同河沙代替碎石,研究其对自密实砂浆流动性的影响;宓永宁等^[25]发现在相同配合比下,特细砂混凝土的坍落度要比中砂混凝土的坍落度低9~11 mm,且均具有良好的保水性和粘聚性,坍落度要求在40~60 mm时,特细砂配制的混凝土拌合物坍落度要比中砂混凝土拌合物坍落度小,且抗压强度均不同程度地高于中砂混凝土的强度。同时学者们也强调了外加剂对自密实浆体的流动性影响显著:在特细砂浆中掺入纤维素可减少泌水和离析^[26],聚羧酸系减水剂配合威兰胶型纤维素共同使用可更好地满足砂浆保水性^[27]。

自密实混凝土体系浆体的流动性和强度都随着其堆积密度增大而增大^[28-29],因此可利用二级骨料、废细骨料等非通常材料来替代中砂用量,增加堆积密度,填充混凝土骨架,同时可保证自密实混凝土体系流动性和稠度。本文以特细河砂为例,主要研究了特细砂替代中砂(即ISO标准砂,Normal Sand, NS)时不同替代率对砂浆流变性的影响,其中包括胶砂流动度、经时流动性损失、经时黏度、静态屈服应力、变速下黏度和剪切变稀指数等因素的影响,可为在高性能水泥基复合砂浆的混凝土构件粘结修补^[30]等实际工程中使用特细砂的自密实水泥砂浆提供相关流变性能理论与参考。

1 实验

1.1 试剂与材料

水泥为P·I 42.5普通硅酸盐水泥,比表面积为340 m²/kg,平均粒径为16.49 μm,密度为3 150 kg/m³。

特细砂为长江下游河道内特细砂,其中值粒径约0.30 mm,粒径主要集中在0.20~0.60 mm之间,各粒级从重量占比来看,0.24 mm以下约占28%,0.24~0.40 mm约占29%,0.40~0.60 mm约占33%。特细砂和水泥的化学组成如表1所示。中砂使用厦门艾思欧标准砂(ISO GSB08-1337),级配位于Ⅲ区,其重量

占比 0.25 mm 以下约 6%, 0.25~0.40 mm 约(54±5)%, 0.40~0.60 mm 约(40±5)%, 特细砂和标准砂的物理性能如表 2 所示.

表 1 特细砂和水泥的化学组成(质量分数)

Tab. 1 Composition of cement and UFS

材料	w/%							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	IOI
水泥	22.01	4.47	3.45	64.31	2.45	—	2.450	1.27
特细砂	69.71	11.37	4.45	6.19	2.33	2.43	0.035	—

表 2 特细砂和标准砂的物理性能

Tab.2 Physical properties of UFS and NS

材料	细度模数	中值粒径/mm	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	吸水率/%
特细砂	1.00	0.35	8.85	1 580	7.83
标准砂	2.50	—	—	1 830	2.98

减水剂为上海臣启聚羧酸系 CQJ-JSS 减水剂(Superplasticizer, SP), 掺量为水泥质量的 5%, 减水剂粉体溶于实验用水中; 纤维素为上海臣启 S-130(1)型威兰胶(Welan Gum, WG), 掺量为水泥质量的 0.5%, 纤维素粉体搅拌在已溶解了减水剂的实验用水中; 水灰比为 0.35, 灰/(特细砂+中砂)(质量比)为 0.5, 各组特细砂替代率依次为 0%、10%、20%、30%、40% 和 50%, 不同替代率下的砂浆配合比如表 3 所示.

表 3 不同替代率下的砂浆配合比

Tab. 3 Mix design at each UFS replacement ratio

替代率/%	配合比					
	水泥	特细砂	标准砂	水	减水剂	威兰胶
0	1	0	2	0.35	0.05	0.005
10	1	0.2	1.8	0.35	0.05	0.005
20	1	0.4	1.6	0.35	0.05	0.005
30	1	0.6	1.4	0.35	0.05	0.005
40	1	0.8	1.2	0.35	0.05	0.005
50	1	1.0	1.0	0.35	0.05	0.005

1.2 流动性能测试

1) 砂浆的自密实性能由 V 漏斗实验表征^[15]. V 漏斗经清水冲洗干净后置于台架上使其顶面呈水平状态, 体侧为垂直状态. 用湿布湿润 V 漏斗的内表面后关上底盖, 由漏斗的上端平稳地填入砂浆, 用刮刀

沿将漏斗上端砂浆顶面刮平, 静置 10 s 后, 打开底盖, 用秒表测量自开盖至漏斗内浆体全部流出的时间, 精确至 0.1 s.

2) 砂浆的经时流动性损失按照测试方法^[15,31-32], 把砂浆在搅拌仪 Ibertest Autotest 200/10 中, 先以 140 r/min 转速搅拌 2 min, 暂停 30 s 后以 285 r/min 转速继续搅拌 2 min, 随后把砂浆填充在 70 mm × 100 mm × 60 mm 的截锥型模具中备平, 完成后垂直提起, 在跳桌上振动 10 次后释放使其流动, 取三个方向上直径的均值为微坍落度.

1.3 流变性能测试

所用流变仪为 Brookfield-DV3T-HB, 配有扇形转子 EZ-lock-v73(扇直径=12.67 mm, 扇长=25.35 mm), 流变测试均使用高 70 mm、直径 55 mm 的容器盛放样品, 样品顶部预留约 25 mm 的空间, 容器放置在 25±0.5 °C 的恒温水浴中进行实验.

经时黏度的测试, 首先将试样混合后使用小型搅拌器以约 150 r/min 的转速搅拌均匀, 迅速移入流变仪进行 1 h 的表观黏度测试, 转子旋转速度保持在 100 r/min, 黏度取每次转动上行和下行的平均值.

在 30 s 的采样时间段内, 以 0.1 r/min 的转速计算出浆体的最大转矩, 再对结果乘以手册中提供的对应转子因数 428 000 得到最后静态屈服应力(结果由流变仪自动转换).

为确定浆液样品改变转速下的黏度和剪切变稀指数(Thinning Index, TI), 根据 ASTM-D-2196-05^[33] 采用如图 1 中的如下步骤: 1) 转子的转动速度分步从 0 上升到 100 r/min, 每转速下在其开始后的第 10 转记录其表观黏度; 2) 下坡道与上坡道采用相同操作, 分步降低转子转速直至停止转动, 每转速下的黏度取上下坡均值; 3) 完成一周周期后, TI 取值为低转速与高 10 倍转速下表观黏度的比值, 如公式(1), 其中 η 为测出的表观黏度, 数字下标为此刻转动速度. 本实验中取转速 10 r/min 和 100 r/min 下二者的黏度比值,

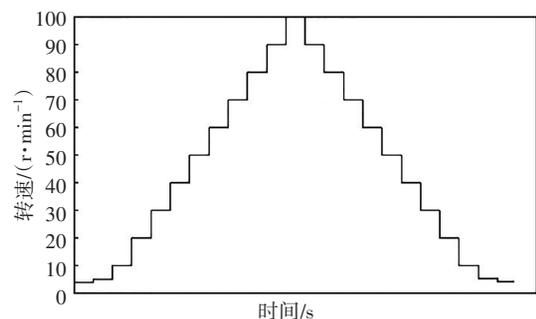


图 1 黏度的取值方法

Fig.1 Determination of viscosity R/MIN-dependent

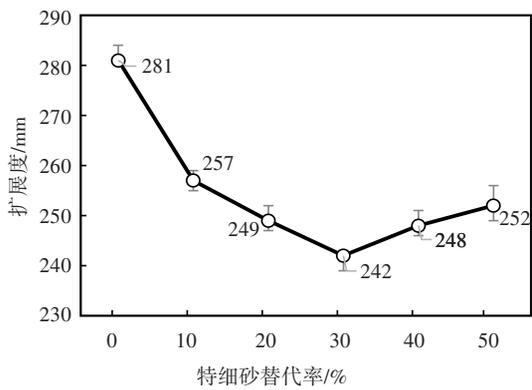
根据预实验, 10 r/min 前的黏度梯度变化大, 不宜选取.

$$\text{剪切变稀指数 (TI)} = \frac{\eta_2}{\eta_{20}} \text{ or } \frac{\eta_5}{\eta_{50}} \text{ or } \frac{\eta_{10}}{\eta_{100}} \quad (1)$$

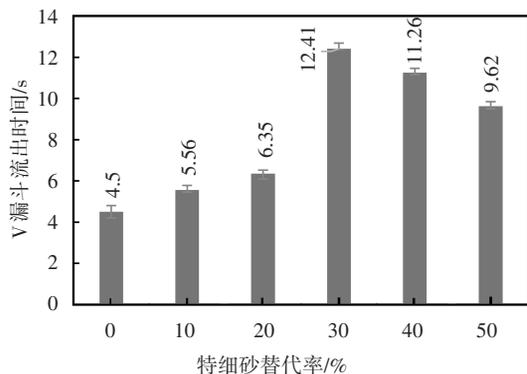
2 结果与讨论

2.1 流动性能

特细砂替代率对自密实砂浆流动性能的影响如图 2 所示, 特细砂掺量为 10%~50% 的砂浆流动性均低于特细砂掺量为 0% 时, 这是由于特细砂的吸水率大于标准砂, 特细砂的掺入导致砂浆体系中自由水含量减小, 进而使其流动性能变差. 特细砂替代率在 0%~30% 范围内, 砂浆的扩展度降低, V 漏斗流动时间增加, 即砂浆的流动性随着特细砂替代率的增加而降低, 这是由于随着特细砂替代率增加, 细骨料细度模数降低、比表面积增加, 从而湿润细骨料表面所需用水量也增加, 砂浆基质中实际拌合水量降低所导致; 然而, 特细砂替代率在 30%~50% 范围内时情况则相反, 即砂浆的流动性随着特细砂替代率的增加而增加, 表现为砂浆的扩展度增加, V 漏斗流出时间降低, 这归因于特细砂间增高的内聚力和更优的细



(a) 扩展度



(b) 漏斗流出时间

图 2 特细砂对自密实砂浆流动性能的影响

Fig.2 Influence of UFS ratio on SCM fluidity

骨料级配^[34], 特细砂原材中 0.25 mm 以下的粒级占比约达 28%, 可细骨料中占比极少(6%)的连续 0.25 mm 以下粒级. 当特细砂替代率大于 30% 时, 两种砂成分中 0.25 mm 以下的超细颗粒含量总共约有 14.4%, 能足够明显地弥补细骨料超细颗粒所缺的粒级, 使自密实砂浆中细骨料的间断级配得到优化. 特细砂粒径对级配的积极影响要大于其更高吸水率带来的负面影响.

综上所述, 在使用特细砂替代中砂制备自密实砂浆时, 替代率需平衡细骨料级配效应和特细砂吸水率间的关系, 这两方面因素相互制约, 使得自密实砂浆流动性能出现明显的临界点. 替代率 30%~40% 的实验组砂浆流动性最低, 此时特细砂吸水率使砂浆流动性的降低大于特细砂补充间断级配后带来的砂浆流动性的增大, 即特细砂吸水率对流动性的降低作用占主导地位, 故特细砂替代中砂制备自密实砂浆的替代率可在 20% 以内.

2.2 特细砂替代率对砂浆经时黏度的影响

特细砂不同替代率下自密实砂浆黏度随时间的变化如图 3 所示. 特细砂的加入提高了自密实浆体的黏度, 并且随着特细砂替代率变大, 自密实砂浆黏度依次增大, 在 60 min 时, 不同替代率下特细砂自密实砂浆的黏度依次为 4 790 Pa·s、5 480 Pa·s、8 731 Pa·s、9 850 Pa·s 和 10 440 Pa·s, 由于特细砂替代率的增加, 自密实砂浆基质的含水量的降低, 故黏度增大. 此外, 各替代率下浆体的经时黏度呈缓慢增长的趋势, 并且随着时间推移达到动态平衡, 这是由于水化反应的持续发生产生了絮状结构及网状结构, 随着时间的增长, 絮状结构及网状结构的生成量增加, 因此自密实砂浆的黏度随时间增加.

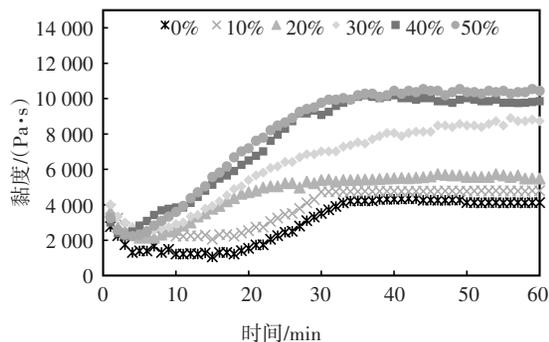


图 3 特细砂对自密实砂浆经时黏度的影响

Fig.3 Influence of UFS ratio on SCM time-dependent viscosity

2.3 特细砂替代率对静态屈服应力的影响

特细砂不同替代率下自密实砂浆屈服应力随着时间的变化如图4所示,可知自密实砂浆屈服应力随着时间的增大逐渐增长,这是由水化反应中初始凝胶的形成和砂浆基质含水量的降低所导致的。

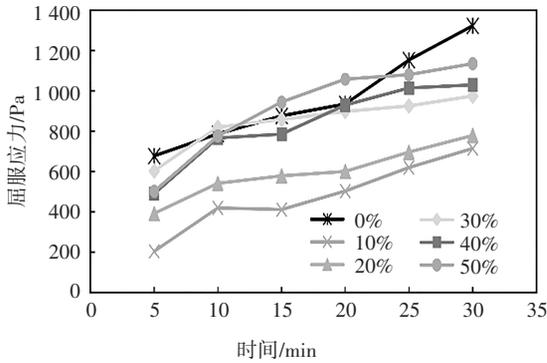


图4 特细砂对自密实砂浆屈服应力的影响
Fig.4 Influence of UFS ratio on SCM yield stress

随着特细砂替代率的增加,砂浆的屈服应力也逐渐增大.当替代率为30%~50%时,砂浆屈服应力接近于对照组.根据王裕宜等^[24]的观点,浆体的屈服应力受砂颗粒的粒径和浓度影响,其屈服应力随砂颗粒浓度的增大而增大,随砂颗粒粒径的增大而减小,反之亦然,浆体的屈服应力受制于此两种因素,互相影响.因此在实验中,随着特细砂替代率逐渐提高,相当于更细粒径的颗粒越来越多,浆体屈服应力也就随颗粒粒径的减小而增大.此外,在实验保证砂总重量不变的同时,由于特细砂密度大于标准砂,实验组砂的体积分数也就小于对照组,因此实验组屈服应力基本上也均小于对照组.

2.4 特细砂替代率对变转速下黏度的影响

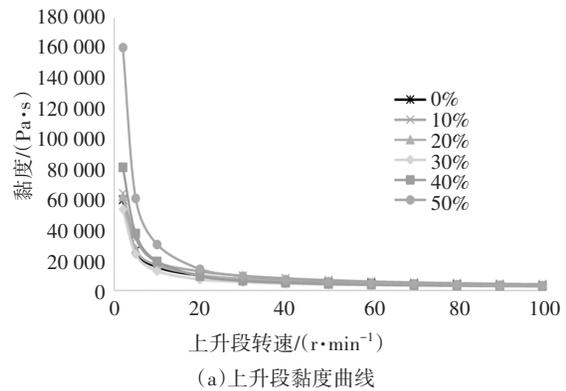
图5为变转速下特细砂替代率对自密实砂浆黏度的影响.各替代率下的特细砂砂浆,在低转速下表现为明显的粘滞特性,高转速下表现为明显的流动特性.根据Brookfield流变仪指导手册“IPA·S paste法”,对各替代率下表观黏度 η /(Pa·s)和转动速度 \bar{Y} /(r·min⁻¹)用式(2)进行拟合,得到此转速范围内的触变方程:

$$\eta = K \times \bar{Y}^n \tag{2}$$

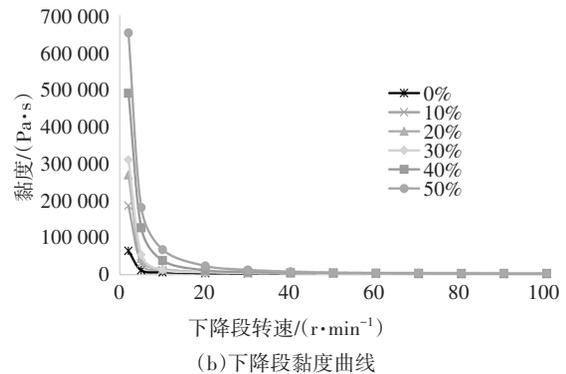
式中: n 代表剪切敏感度(无量纲); K 代表稠度指数(单位为Pa·s).

将图5中各替代率的表观塑性黏度和转速按公式(2)拟合后得到各替代率下的 n 和 K , n 和 K 与特细

砂替代率的关系如图6所示.由图6可知,随着特细砂替代率的增加, n 呈线性增长,由0.66(0%)增长至1.18(50%),表明随着特细砂含量的增加,特细砂替代率的增长对 n 的变化速度无显著影响.此外,特细砂替代率由0%增长至20%时, K 值逐渐增大,自密实砂浆稠度增大;在10%~30%替代率内, K 值增长缓慢,砂浆稠度几乎不变;而替代率由30%增长至50%时, K 值由17 980 Pa·s迅速增大至43 770 Pa·s,说明大于30%的特细砂替代率对浆体稠度指数 K 有着显著影响,砂浆相对变稠.



(a)上升段黏度曲线



(b)下降段黏度曲线

图5 变转速下特细砂替代率对自密实砂浆黏度的影响

Fig.5 Influence of UFS ratio on SCM R/MIN-dependent viscosity

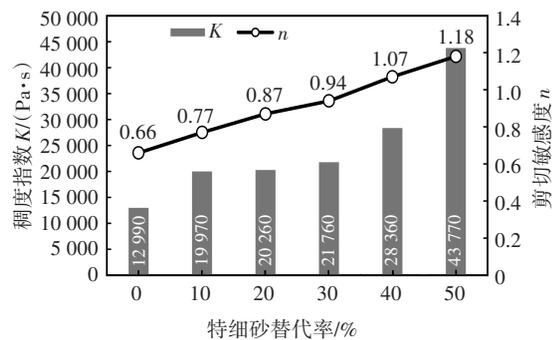


图6 各替代率下触变方程的系数

Fig.6 Coefficients of thixotropy equation at each UFS replacement ratio

2.5 特细砂替代率对剪切变稀指数的影响

将经时黏度代入公式(1)可得剪切变稀指数TI,即为低转速下与高转速下两个表观黏度的比值,并以其表征浆体触变性的大小,结果见图7.浆体在转动速度增高时,絮凝颗粒间的弱作用力被打破;在转动速度降低时,絮凝颗粒间的弱作用力再次形成^[29],表现为浆体受剪时黏度变小,停止剪切时黏度又恢复,该可逆现象为触变性,反映了浆体在剪切作用下结构破坏后恢复原有结构的能力大小.实验中随着转速增大, TI 越大,即触变性增大,浆体黏度减小得越快,反之亦然.

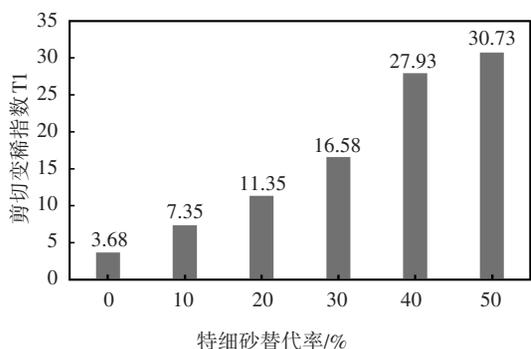


图7 特细砂对自密实砂浆剪切变稀指数的影响

Fig.7 Influence of UFS ratio on SCM shear thinning index

当特细砂替代率在0~30%时, TI 平缓增长,尽管浆体触变性逐渐增大,但砂浆仍然保持良好的工作性能;当特细砂替代率超过30%后, TI 突然大幅增长,40%替代率下砂浆触变性突增,表观黏度减小更快;当特细砂替代率达到50%时, TI 增长趋缓,砂浆触变性变化再次趋缓,表观黏度减小速度变慢,但此时特细砂的较高替代率使得砂浆失去最佳工作稠度.在剪切实验后期(1 h后)发生一定程度的泌水,预实验中各组泌水约为2%.为保证自密实砂浆流变学性能稳定,特细砂替代率不宜超过30%.在超过40%的替代率下,如有1 h以上流动性需求,可再次提高威兰胶等纤维素用量来减少泌水.

3 结论

1)使用特细砂替代中砂制备自密实砂浆时,一方面,特细砂的高吸水率使砂浆基体中自由水的含

量降低,进而对流变性能产生消极影响;另一方面,特细砂的掺入改善了颗粒粒径分布,填充了颗粒间的空隙,使得拌和时更多的自由水被释放,会改善砂浆的流变性能.因此,替代率需平衡细骨料级配效应和特细砂吸水率间的关系.

2)替代率在30%~40%范围内时,特细砂吸水率使砂浆流动性的降低大于特细砂补充间断级配后带来的砂浆流动性的增大,即特细砂吸水率对流动性能的降低作用占主导地位.从流动性能考虑,特细砂替代中砂制备自密实砂浆的替代率宜在20%以内.

3)特细砂的加入提高了自密实浆体的黏度,并且随着特细砂替代率变大,自密实砂浆黏度依次增大.浆体的经时黏度随替代率增加呈缓慢增长的趋势,并且随着时间推移达到动态平衡,砂浆的屈服应力也逐渐增大.当替代率为30%~50%时,随着替代率增高砂浆屈服应力接近于对照组,但对剪切敏感度 n 的变化速度无显著影响.大于30%的特细砂替代率对浆体稠度指数 K 有着显著影响,此时 K 增长迅速,砂浆变稠.当特细砂替代率由0%增大至50%,浆体触变性也随之逐渐增大.

4)通过1 h的经时剪切实验可知,为保证自密实砂浆流变学性能稳定,特细砂替代率不宜超过30%.

参考文献

- [1] 赵书锋. 开封特细砂混凝土力学性能和收缩性能研究[J]. 四川水泥, 2019(6): 10-11.
ZHAO S F. Research on the mechanical and shrinkage properties of ultra fine sand in Kaifeng [J]. Sichuan Cement, 2019 (6) : 10-11. (In Chinese)
- [2] ZHAO Y Q. Experimental study on superfine sand concrete mixed by double mixing technology [J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013, 6(9) : 1649-1652.
- [3] 李光瑞. 特细砂混凝土的力学性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007: 29-30.
LI G R. Study on the mechanics of ultra fine sand concrete [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2007: 29-30. (In Chinese)
- [4] 李光伟. 水工特细砂混凝土性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(4): 18-20.
LI G W. Experimental study on characteristics of hydraulic super-

- fine sand concrete [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2006, 26(4):18-20. (In Chinese)
- [5] 马红娜, 娄宗科, 王海娟. 水工特细砂泵送混凝土力学特性试验研究[J]. *混凝土*, 2009(7):85-86.
MA H N, LOU Z K, WANG H J. Test research and project application of hydraulic superfine sand pump concrete [J]. *Concrete*, 2009(7):85-86. (In Chinese)
- [6] 谢祥明, 黄绪通. 特细砂水工混凝土配合比设计的“三低一超”法[J]. *混凝土*, 2003(8):55-56.
XIE X M, HUANG X T. The method of “three-low and one excess” of design of mixproportion of super-fine sand hydraulic concrete [J]. *Concrete*, 2003(8):55-56. (In Chinese)
- [7] 刘登贤, 桂根生, 吴鑫, 等. 掺特细砂C30超高层泵送混凝土的制备及工程应用[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(11):35-39.
LIU D X, GUI G S, WU X, *et al.* Preparation and its application of C30 superfine sand concrete pumped for super-high building [J]. *New Building Materials*, 2017, 44(11):35-39. (In Chinese)
- [8] 蒋聚桂, 张长清. 特细砂流态混凝土[J]. *混凝土及加筋混凝土*, 1989(1):10-17.
JIANG J G, ZHANG C Q. Ultra fine sand flow concrete [J]. *Concrete and Reinforced Concrete*, 1989(1):10-17. (In Chinese)
- [9] 董素芬. 水泥基自流平砂浆的配制与性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009:24-41.
DONG S F. Study on the compounding and performance of cementitious self-leveling mortar [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009:24-41. (In Chinese)
- [10] 彭家惠, 董军, 张建新, 等. 干混特细砂陶瓷墙地砖粘结砂浆研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2008, 30(6):146-150.
PENG J H, DONG J, ZHANG J X, *et al.* Dry-mixed superfine sand mortar for bonding ceramic tile [J]. *Journal of Chongqing Jiaozhu University*, 2008, 30(6):146-150. (In Chinese)
- [11] 毛靖波, 彭家惠, 江飞飞, 等. 特细砂抗裂砂浆的性能研究[J]. *墙材革新与建筑节能*, 2011(2):61-63.
MAO J B, PENG J H, JIANG F F, *et al.* Study of the performance of ultra-fine sand cracking mortar [J]. *Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings*, 2011(2):61-63. (In Chinese)
- [12] 傅得海, 赵四渝, 徐洛屹. 干粉砂浆应用指南[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2006:40-218.
FU D H, ZHAO S Y, XU L Y. The guideline of dry-mixed mortar application [M]. Beijing: Chinese Building Materials Industry Press, 2006:40-218. (In Chinese)
- [13] DOMONE P L, JIN J. Properties of mortar for self-compacting concrete [C]//First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, Sweden: RILEM Publications SARL, 1999: 109-120.
- [14] FIGUEIRAS H, NUNES S, COUTINHO J S, *et al.* Linking fresh and durability properties of paste to SCC mortar [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 45:209-226.
- [15] The European guidelines for self-compacting concrete, specification, production and use [R]. Farnham, UK: The Self-Compacting European Project Group EFNARC, 2002: 15-16, 25-26.
- [16] 刘延年. 建筑结构胶粘剂粘度及触变性试验分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2008, 34(6):77-81.
LIU Y N. Construction structure adhesive viscosity and thixotropic experiment analysis [J]. *Sichuan Building Science*, 2008, 34(6):77-81. (In Chinese)
- [17] BOURAS R, KACI A, CHAOUCHÉ M. Influence of viscosity modifying admixtures on the rheological behavior of cement and mortar pastes [J]. *Korea-Australia Rheology Journal*, 2012, 24(1):35-44.
- [18] 冯金, 马昆林, 龙广成. 基于不同流变模型下粉煤灰对水泥净浆流变性能的影响[J]. *铁道科学与工程学报*, 2015, 12(3):534-539.
FENG J, MA K L, LONG G C. Influence of fly ash on rheological properties of cement paste under different rheological models [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2015, 12(3):534-539. (In Chinese)
- [19] 苗苗, 雪凯旺, 苗芳, 等. 石灰石粉对水泥浆体水化特性及流变性能的影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(12):90-96.
MIAO M, XUE K W, MIAO F, *et al.* Influence of limestone powder on hydration characteristics and rheological properties of cement paste [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(12):90-96. (In Chinese)
- [20] TANG C W, YEN T, CHANG C S, *et al.* Optimizing mixture proportions for flowable high-performance concrete via rheology tests [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(6):493-502.
- [21] CHIDIAC S E, MAADANI O, RAZAQPUR A G, *et al.* Controlling the quality of fresh concrete—a new approach [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2000, 52(5):353-363.
- [22] TREGGER N, GREGORI A, FERRARA L, *et al.* Correlating dynamic segregation of self-consolidating concrete to the slump-flow test [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28(1):499-505.
- [23] 吴琼. 基于净浆流变性的自密实混凝土配合比设计方法研究[D]. 北京:清华大学, 2013:23-33.
WU Q. The development of mix design method for self-compacting concrete based on the rheological characteristics of paste [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013:23-33. (In Chi-

- nese)
- [24] 王裕宜,詹钱登,严璧玉,等. 泥石流体的流变特性与运移特征[M].长沙:湖南科学技术出版社,2014:233-278.
WANG Y Y, ZHAN Q D, YAN B Y, *et al.* Debris-flow Rheology and Movement [M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 2014:233-278. (In Chinese)
- [25] 宓永宁,孙荣华,张玉清,等. 特细砂配制混凝土的试验研究[J]. 混凝土,2011(12):56-58.
MI Y N, SUN R H, ZHANG Y Q, *et al.* Concrete test of the super-fine sand preparation[J]. Concrete, 2011(12): 56-58. (In Chinese)
- [26] SCHMITZ L, HACKER C J, 张量. 纤维素醚在水泥基干拌砂浆产品中的应用[J]. 新型建筑材料, 2006, 33(7):45-48.
SCHMITZ L, HACKER C J, ZHANG L. The application of cellulose ether in cementitious dry-mixed mortar[J]. New Building Materials, 2006, 33(7):45-48. (In Chinese)
- [27] PRAKASH N, SANTHANAM M. A study of the interaction between viscosity modifying agent and high range water reducer in self compacting concrete[M]// Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2006: 449-454.
- [28] LIBRE N A, POURZARABI A, ETEMADREZAEI A M, *et al.* An investigation on effect of aggregate grading on fresh properties of self-consolidating mortar [J]. Materials & Structures, 2012(2012): 1336-1339.
- [29] RIZWAN S A, AHMAD S, BIER T A. Application of packing concepts to high performance self-consolidating mortar (SCM) systems [C]// Twelfth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology & Sustainability Issues. Farmington Hills: ACI Special Publication, 2012:299-315.
- [30] 卜良桃,高伟,罗兴华. 高性能水泥复合砂浆与混凝土粘结性能钻芯拉拔试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2009, 36(1):19-23.
BU L T, GAO W, LUO X H. Experimental research on the tensile behavior of high performance cement-mortar to concrete with core-drilling and pull-stripping test [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(1): 19-23. (In Chinese)
- [31] SANTAMARÍA A, GONZÁLEZ J J, LOSÁÑEZ M M, *et al.* The design of self-compacting structural mortar containing steelmaking slags as aggregate [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 111:103627.
- [32] WEDDING P A, KANTRO D L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste—A miniature slump test [J]. Cement, Concrete and Aggregates, 1980, 2(2):95.
- [33] Standard test methods for rheological properties of non-newtonian materials by rotational (brookfield type) viscometer: ASTM-D-2196-05[S]. Washington D C: ASTM, 2018: 2-4.
- [34] 张倩倩,刘建忠,周华新,等. 超高性能混凝土流变特性及其对纤维分散性的影响[J]. 材料导报,2017,31(23):73-77.
ZHANG Q Q, LIU J Z, ZHOU H X, *et al.* Rheological properties of ultra-high performance concrete and its effect on the fiber dispersion within the material[J]. Materials Review, 2017, 31(23): 73-77. (In Chinese)