

文章编号:1007-9629(2023)09-0980-08

正混凝土的 Mini-Mason 法制备及其性能研究

张文贵^{1,2}, 沈卫国^{1,2,3,4,*}, 刘 超^{1,2}, 王亚楠^{1,2}, 吴 鹏⁴

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 湖北 武汉 430070; 3. 武汉理工大学-加州大学伯克利混凝土科学与技术联合实验室, 湖北 武汉 430070; 4. 大宗固废综合利用与绿色建材襄阳市重点实验室, 湖北 襄阳 441100)

摘要:采用 Mini-Mason 法制备了一种高粗骨料体积分数的骨料嵌锁良好的正混凝土. 结果表明:通过提高填充砂浆的流动性, 能有效提升混凝土中粗骨料的体积分数至 52%, 并明显改善混凝土的力学性能、体积稳定性、传质性能和界面过渡区的结构, 优化浆体与粗骨料的黏结状态, 大幅度降低胶凝材料的用量. 试验证明了 Mini-Mason 工艺的可行性, 并为 3D 打印正混凝土提供了一种新的技术优势.

关键词:抛填骨料; 粗骨料体积分数; 骨料嵌锁; 正混凝土; 界面过渡区

中图分类号: TU528.56

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.09.005

Preparation and Properties of Orthoconcrete by Mini-Mason Method

ZHANG Wengui^{1,2}, SHEN Weiguo^{1,2,3,4,*}, LIU Chao^{1,2}, WANG Yanan^{1,2}, WU Peng⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. WUT-UC Berkeley Joint Laboratory on Concrete Science and Technology, Wuhan 430070, China; 4. Xiangyang Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Bulk Solid Waste and Green Building Materials, Xiangyang 441100, China)

Abstract: A orthoconcrete with high coarse aggregate volume fraction and good aggregate interlock was prepared by Mini-Mason method. The results show that by improving the fluidity of the filling mortar, the volume fraction of coarse aggregate in concrete can be effectively increased to 52%, and the mechanical properties, volume stability, mass transfer performance and interfacial transition zone structure of concrete can be significantly improved, and the bonding state between slurry and coarse aggregate can be optimized, and the use amount of cementing material can be greatly reduced. The experiment proves the feasibility of the Mini-Mason process and provides a new technical advantage for 3D printing orthoconcrete.

Key words: scattering-filling aggregate; volume fraction of coarse aggregate; aggregate interlock; orthoconcrete; interfacial transition zone

水泥作为混凝土制备的主要材料, 其工业生产过程中的碳排放占人类碳排放总量的 7%~9%^[1-2]. 特别是近年来, 随着混凝土施工的机械化程度与人

工成本的日益提高, 易施工的高流态混凝土成为了主流. 与此同时, 高流态往往伴随着高浆体体积分数, 而过多浆体会导致振捣和静置过程中骨料沉降

收稿日期: 2022-10-31; 修订日期: 2023-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51972247)

第一作者: 张文贵 (1996—), 男, 湖北黄冈人, 武汉理工大学硕士生. E-mail: 1425656430@qq.com

通讯作者: 沈卫国 (1971—), 男, 湖北北京山人, 武汉理工大学研究员, 博士生导师, 博士. E-mail: 2367@whut.edu.cn

严重^[3],使混凝土的匀质性变差,牺牲了混凝土服役性能.便易施工的3D打印混凝土粗骨料含量更低^[4],且过多的胶凝材料用量与双碳目标是相悖的^[5].

为解决上述问题,许鸽龙等^[6-9]在自然界正砾岩的启发下提出了正混凝土的概念,即骨料嵌锁型混凝土.与抛填骨料法制备正混凝土的工艺^[10-12]不同,Mini-Mason法需要预制高流态砂浆,以类似于浆砌石的方式成型骨料嵌锁程度良好的正混凝土.该工艺不仅提高了粗骨料体积分数,降低了胶凝材料用量,还可以契合混凝土3D打印技术,以实现混凝土的智能制造.本文提出了正混凝土的Mini-Mason法制备工艺,研究了粗骨料体积分数对混凝土抗压强度、干燥收缩以及电通量的影响,并

阐明了其影响机理.

1 试验

1.1 原材料

水泥(C)为华新P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其基本物理性能见表1;S95矿粉由大宗固废综合利用与绿色建材襄阳市重点实验室提供;粉煤灰为襄樊火力发电厂生产;细集料为花岗岩质机制砂(S),细度模数为3.1,表观密度为2 830 kg/m³;粗集料(CA)为5~15、10~20 mm连续级配的花岗岩质碎石,分别记作碎石A、B,其表观密度均为2 772 kg/m³,筛分结果见表2;减水剂(WR)为聚羧酸高性能减水剂;拌和用水为自来水(W).

表1 水泥的基本物理性能
Table1 Basic physical properties of cement

Apparent density / (kg·m ⁻³)	Normal consistency	Setting time/min		Soundness	Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
		Initial	Final		3 d	28 d	3 d	28 d
3 080	26.8	135	195	Eligible	7.1	9.8	28.3	52.7

表2 集料筛分结果
Table 2 Aggregate screening results

Aggregate type	Cumulative percentage retained(by mass)/%												
	31.5 mm	26.5 mm	19 mm	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
Stone A	0	19	88.4	93.9	97.6	98.3							
Stone B	0	0	0	0	6.7	70.7	99.4						
Manufactured sand								2.6	28.8	52.6	73.5	87.4	93.8

1.2 配合比

采用Mini-Mason工艺,设计 $m(\text{水泥}):m(\text{矿粉}):m(\text{粉煤灰})=50:35:15$,高流态砂浆具体配合比见表3.

调整碎石A与碎石B的质量比 m_A/m_B ,并对其空隙率(体积分数)进行分析.具体粗骨料级配见表4.

1.3 试件制备

砂浆试件制备:砂浆试件尺寸为40 mm×40 mm×160 mm,成型1 d后脱模并进行标准养护.

混凝土试件制备:先在试模中灌注一层高流态砂浆,再将粗骨料均匀抛填在砂浆上,振捣,再灌注一层砂浆,继续抛填粗骨料并振捣,如此重复3~5次,每次振捣30~60 s,直到混凝土表面平整且基本无气泡排出.采用此混凝土制备工艺制备尺寸分别为150 mm×150 mm×150 mm、100 mm×100 mm×515 mm和 $\phi 100\times 50$ mm的混凝土试件,成型24 h后脱模并进行标准养护.

1.4 性能测试

参照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检测方

法(ISO法)》、GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,分别对龄期为7、28 d的砂浆和混凝土试件进行强度测试.

参照GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,采用接触法,对尺寸为100 mm×100 mm×515 mm的混凝土试件进行干燥收缩性能测试,

参照GB/T 50082—2009标准,采用电通量法,对尺寸为 $\phi 100\times 50$ mm的混凝土试件进行抗氯离子渗透性能测试.

将龄期为28 d的混凝土试件破碎,选取尺寸约为10 mm×10 mm×5 mm的含粗骨料-砂浆结构的碎片,对其进行镀膜处理后,采用背散射扫描电镜(QUANTA FEG450)获取扫描电镜-背散射电子成像(SEM-BSE)照片.

从龄期28 d的混凝土试件中切出尺寸约为20 mm×20 mm×10 mm的含粗骨料-砂浆结构的薄片并打磨抛光,采用维氏显微硬度测试仪

表 3 高流态砂浆配合比
Table 3 Mix proportions of high fluidic mortars

Specimen	Cement-sand ratio	Material amount/(kg·m ⁻³)				Water-cement ratio
		Cement	Mineral powder	Fly ash	Sand	
A1	1.00∶1.00	528	369	158	1 055	0.25
A2		528	369	158	1 055	0.30
A3		528	369	158	1 055	0.35
B1	1.00∶1.25	469	328	141	1 172	0.25
B2		469	328	141	1 172	0.30
B3		469	328	141	1 172	0.35
C1	1.00∶1.50	461	323	138	1 333	0.25
C2		461	323	138	1 333	0.30
C3		461	323	138	1 333	0.35
D1	1.00∶1.75	409	286	123	1 432	0.25
D2		409	286	123	1 432	0.30
D3		409	286	123	1 432	0.35
E1	1.00∶2.00	375	263	113	1 500	0.25
E2		375	263	113	1 500	0.30
E3		375	263	113	1 500	0.35

表 4 粗骨料级配
Table 4 Gradation of coarse aggregates

$m(\text{stone A}):$ $m(\text{stone A})$	Loose bulk density/(kg·m ⁻³)	Stamped density/ (kg·m ⁻³)	Tap density/(kg· m ⁻³)	Loose bulk voidage/%	Stamped voidage/%	Vibrated voidage/%
10∶0	1 514	1 641	1 779	45.4	40.8	35.8
9∶1	1 627	1 752	1 841	41.3	36.8	33.6
8∶2	1 696	1 816	1 882	38.8	34.5	32.1
7∶3	1 785	1 891	1 924	35.6	31.8	30.6
6∶4	1 821	1 932	1 982	34.3	30.3	28.5
5∶5	1 868	1 954	2 029	32.6	29.5	26.8

(HVST-1000Z)对其进行显微硬度测定,保压时间为 10 s,压痕载荷为 0.098 N,在距离粗骨料表面约 100 μm 的距离内随机取点,距离相同的取平均值.

2 结果与分析

2.1 砂浆流动性

按照表 3 中 C3 的配合比,调节减水剂掺量¹⁾,得到砂浆的扩展度以及泌水率,如图 1 所示.由图 1 可见:聚羧酸高效减水剂的掺入对砂浆的流动性有明显的改善;当掺量较高时,砂浆离析泌水严重^[13];为保证砂浆的工作性,砂浆的泌水率应控制在 0.7% 以下^[14],在本研究中减水剂掺量应控制在 1.0% 以下.

在减水剂掺量为 1.0%,水灰比 $m_w/m_c=0.30$ 的条件下,调整灰砂比 m_c/m_s ,得到砂浆的扩展度以及

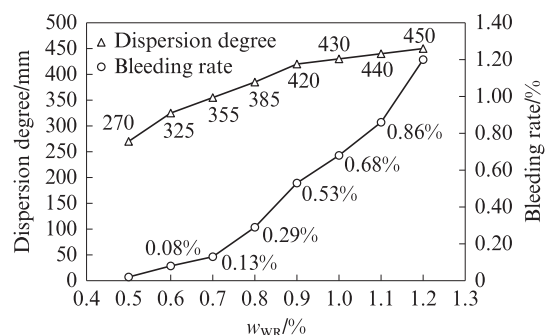


图 1 减水剂掺量对砂浆扩展度和泌水率的影响
Fig. 1 Effect of water reducer content on dispersion degree and bleeding rate of mortars

泌水率如图 2 所示.由图 2 可见,提高砂浆中砂的占比,能有效抑制砂浆的离析泌水,但随着砂体积分数的提升,砂浆中浆体不足,砂浆的流动性损失严重^[15].

1)文中涉及的掺量、灰砂比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

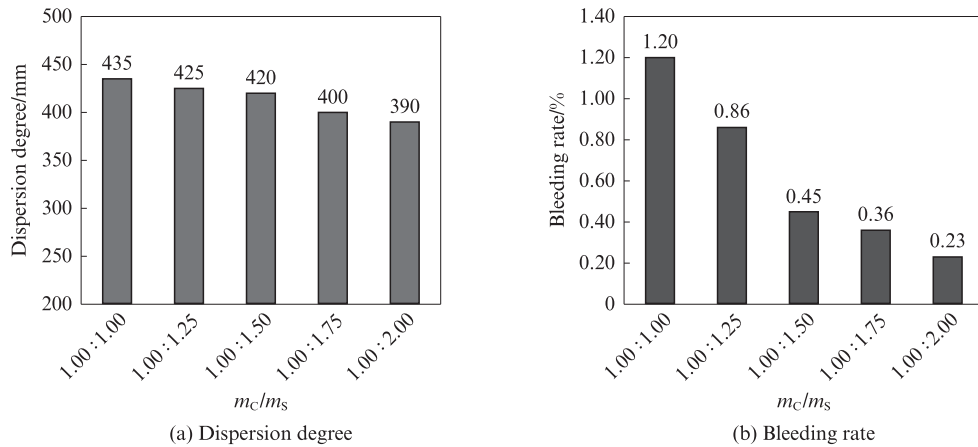


图2 灰砂比对砂浆扩展度和泌水率的影响
Fig. 2 Effect of cement-sand ratio on dispersion degree and bleeding rate of mortars

因此为了保证 Mini-Mason 工艺的可行性,所用填充砂浆灰砂比取 1.00:1.50.

2.2 混凝土粗骨料体积分数分析

取减水剂掺量为 0.9%,按照表 3 中 C3 的配合比制备填充砂浆,按表 4 中粗骨料级配进行试验,得到粗骨料级配对混凝土粗骨料体积分数 φ_{CA} 的影响,如图 3 所示.由图 3 可见,在保证混凝土完整成型的前提下,粗骨料的体积分数先上升后下降.成型过程中粒径较小的碎石 B 能填充大粒径碎石 A 的部分骨架间隙^[16],同时又会阻碍砂浆的填充,因此综合考虑粗骨料级配选用 $m_A/m_B=7:3$.

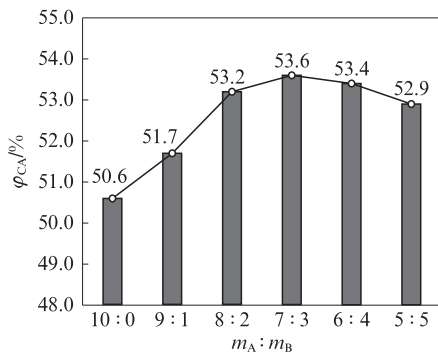


图3 粗骨料级配对混凝土粗骨料体积分数的影响
Fig. 3 Effect of coarse aggregate grade on volume fraction of concrete coarse aggregate

图 4 给出了砂浆扩展度对混凝土粗骨料体积分数的影响.由图 4 可看出,在一定的范围内,随着砂浆扩展度的增加,混凝土粗骨料体积分数明显提升.为保证成型骨料嵌锁程度较高的正混凝土,所用填充砂浆的扩展度应大于 350 mm.而综合图 1、2 可知,减水剂对砂浆流动性的改善有限,工作性良好的填充砂浆扩展度最高可达 420 mm.

按照表 3 中 C 组配合比,调整减水剂掺量,配置扩展度为 400 mm 的填充砂浆,此时砂浆离析泌水对

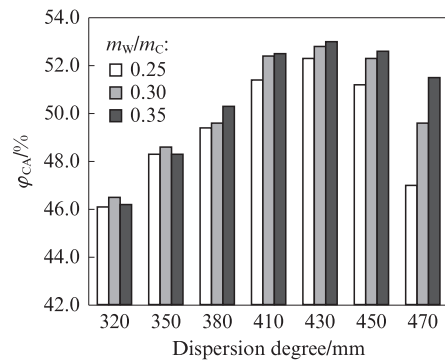


图4 砂浆扩展度对混凝土粗骨料体积分数的影响
Fig. 4 Effect of mortar dispersion degree on volume fraction of concrete coarse aggregate

混凝土成型影响较小,测量灰砂比对混凝土粗骨料体积分数的影响,结果如图 5 所示.由图 5 可见,在相同水灰比下,随着灰砂比的减小,粗骨料体积分数明显降低.这是因为砂浆中粒径较大的机制砂相较于浆体而言填充碎石缝隙的难度更大^[17],且增加了粗骨料间的位移阻力,粗骨料不能达到紧密堆积状态^[18],体积分数下降.

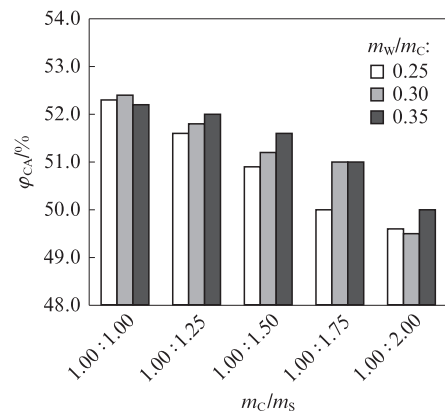


图5 灰砂比对混凝土粗骨料体积分数的影响
Fig. 5 Effect of cement-sand ratio on volume fraction of concrete coarse aggregate

2.3 抗压强度

2.3.1 砂浆抗压强度与混凝土抗压强度的关系

填充砂浆抗压强度与其制备的混凝土抗压强度的关系如图6所示.由图6可见,填充砂浆抗压强度对所成型混凝土抗压强度有决定作用,且当填充砂

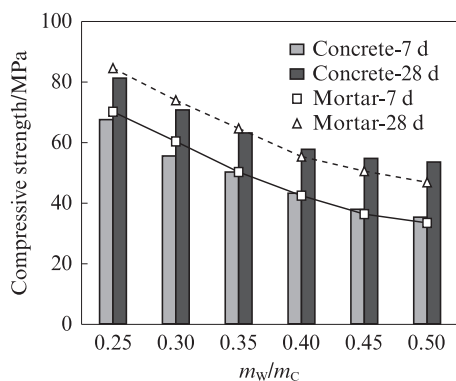
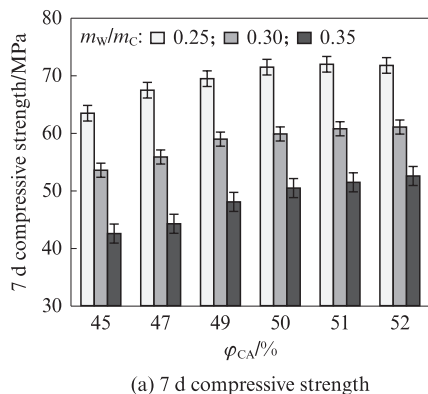
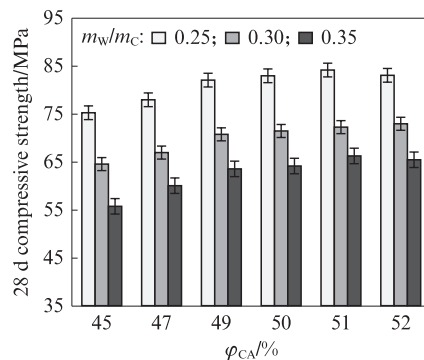


图6 填充砂浆抗压强度与其制备的混凝土抗压强度关系

Fig. 6 Relationship between compressive strength of filling mortar and compressive strength of prepared concrete



(a) 7 d compressive strength



(b) 28 d compressive strength

图7 粗骨料体积分数对混凝土强度的影响

Fig. 7 Effect of volume fraction of coarse aggregate on compressive strength of concrete

2.4 混凝土干缩性能

不同粗骨料体积分数下混凝土的干缩性能见图8.由图8可见,随着粗骨料体积分数的增加,混凝土

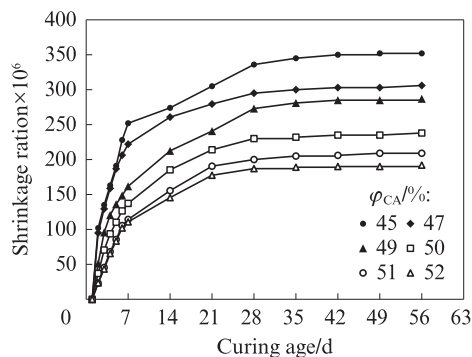


图8 不同粗骨料体积分数下混凝土的干缩性能

Fig. 8 Dry shrinkage of concretes with different volume fractions of coarse aggregates

浆水灰比较低时,砂浆抗压强度甚至高于同龄期混凝土抗压强度.这是因为当水灰比较低时,砂浆强度高于粗骨料强度^[19],粗骨料之间的嵌锁能力比砂浆的负载能力要弱,在施加载荷时,粗骨料接触部分容易发生位错,甚至会发生断裂^[20],因此粗骨料对混凝土强度的提升有限.

2.3.2 粗骨料体积分数与混凝土抗压强度的关系

粗骨料体积分数对混凝土抗压强度的影响如图7所示.由图7可见,混凝土7、28 d的抗压强度随着粗骨料体积分数的提高呈上升趋势,且在水灰比较高时,混凝土抗压强度提升幅度更大.这是因为随着粗骨料体积分数的提高,混凝土中粗骨料的相互嵌锁更为明显,且粗骨料为经过优化的连续级配,在施加载荷时,小粒径粗骨料可以分担填充砂浆的承载力,而大粒径粗骨料又可以阻止裂缝的扩展^[21],使混凝土整体强度得到提升.而在高水灰比时,填充砂浆强度低于粗骨料强度,粗骨料的骨架作用对混凝土强度的提升更为明显.

的干缩性能得到了较为明显的抑制,当粗骨料体积分数为52%时,混凝土收缩率较粗骨料体积分数为45%时降低了43.1%.大多数混凝土的粗骨料体积分数在40%左右.这是由于在混凝土中,随着龄期的变化,粗骨料的体积变化基本趋于稳定,决定混凝土整体收缩的是填充砂浆的体积变化^[22].而混凝土中粗骨料体积分数的上升,对应着填充砂浆体积分数的下降,即导致混凝土体积收缩的因素大幅减少.另外,粗骨料相互嵌锁限制了浆体的收缩,最终对混凝土体积稳定性有较大的提升.

2.5 抗氯离子渗透性能

混凝土的抗氯离子渗透性能是评价混凝土耐久性能的重要指标,可通过电通量法直观反映.粗骨料体积分数对混凝土电通量的影响如图9所示.由图9

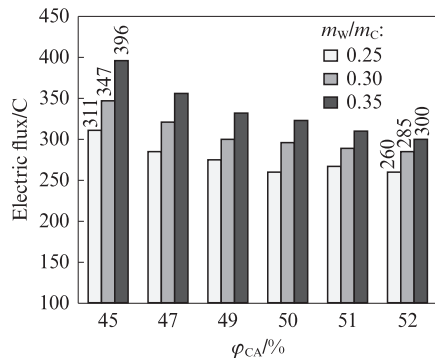


图9 粗骨料体积分数对混凝土电通量的影响

Fig. 9 Effect of volume fraction of coarse aggregates on concrete electric flux

可见:随着粗骨料体积分数的增加,不同水灰比下混凝土电通量均随之下降;当粗骨料体积分数较高时,混凝土电通量下降幅度减小。

粗骨料对混凝土抗氯离子渗透性能的影响形式包括稀释作用、绕行作用以及界面过渡区逾渗效应^[23]。随着粗骨料体积分数的提高,粗骨料的稀释作用和绕行作用增强,抑制了氯离子的渗透。与此同时,粗骨料与浆体构成的界面过渡区会随着粗骨料

的增多而增多,且随着粗骨料嵌锁程度的提高,浆体中气泡难以排出而富集于粗骨料表面,界面过渡区逾渗效应也会增强。因此当进一步提高粗骨料体积分数时,界面过渡区逾渗效应削弱了稀释作用和绕行作用对氯离子渗透的抑制效果,导致混凝土电通量下降幅度减小。

2.6 微观结构

界面过渡区(ITZ)较砂浆主体以及粗骨料而言,其结构相对疏松,且强度较低^[24],是混凝土结构当中最薄弱的部位,因此通过研究混凝土界面过渡区来改善其耐久性能和力学性能是非常有意义的。

采用SEM-BSE对龄期28 d的C60普通混凝土和Mini-Mason法制备的正混凝土(填充砂浆配比为表3中C2组, $m_A/m_B=7:3$)界面过渡区微观形貌进行对比观察,结果如图10。由图10可见:相同放大倍率下,普通混凝土中粗骨料与浆体之间有较为明显的裂纹,且浆体中的缺陷较多;而Mini-Mason法制备的正混凝土中粗骨料与浆体的分界线较为模糊,填充砂浆的分布较为均匀。

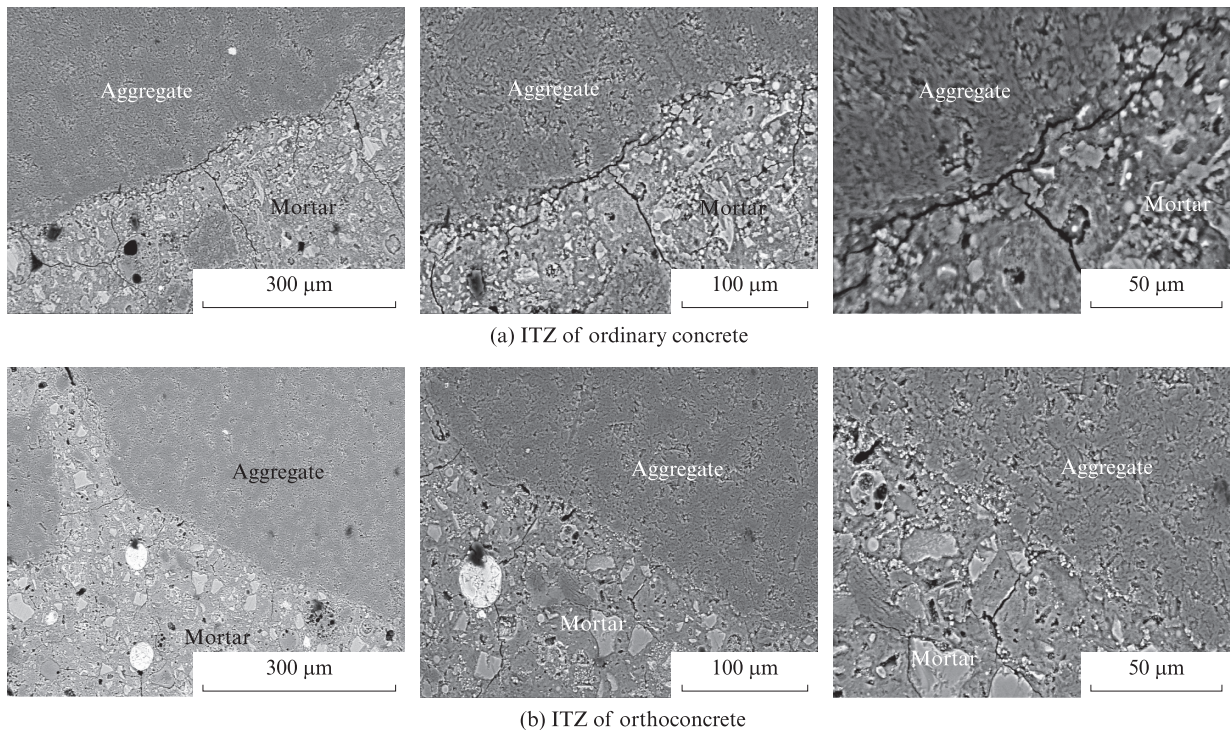


图10 两种工艺下混凝土界面过渡区的SEM-BSE微观形貌图

Fig. 10 SEM-BSE micromorphology in ITZ of concretes from two processes

图11为两种混凝土界面过渡区显微硬度 H_V 变化曲线。由图11可知,普通混凝土界面过渡区厚度大概为55 μm ,而正混凝土界面过渡区厚度大概为40 μm ,且正混凝土界面过渡区的显微硬度明显高于

普通混凝土,这与SEM-BSE的结果相吻合。正混凝土所用粗骨料为表面干燥的碎石,在砂浆填充过程中可吸附部分水分,改善粗骨料表面的微区泌水效应^[25],优化界面过渡区的微观结构,削弱界面过渡区

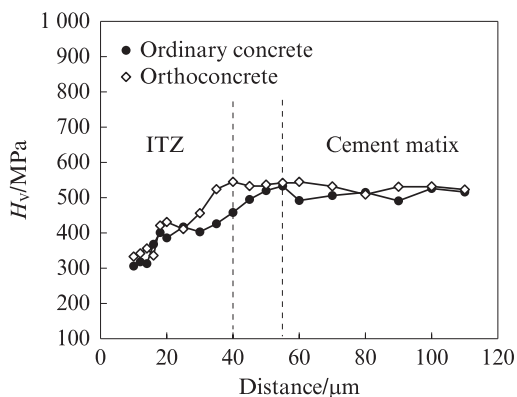


图11 两种混凝土中界面过渡区的显微硬度

Fig. 11 Microhardness of ITZ in two kinds of concretes

给混凝土力学性能和耐久性能带来的负面影响。

2.7 Mini-Mason 法制备正混凝土的材料组成

图12给出了相同强度等级下普通混凝土和Mini-Mason法制备的正混凝土中原材料的体积分数。由图12可以看出:与普通混凝土相比,在强度等级达到C50时,Mini-Mason法制备的正混凝土的胶凝材料用量可降低24.25%;在强度等级达到C60时,胶凝材料用量可降低29.21%;在强度等级达到C65时,胶凝材料用量可降低29.27%。这是因为,正混凝土的粗骨料体积分数可达52%,集料的总体积分数最高可达近75%,而普通混凝土粗骨料体积分数不足40%,集料总体积分数也在65%以下^[26],因此正混凝土中浆体含量明显低于普通混凝土。

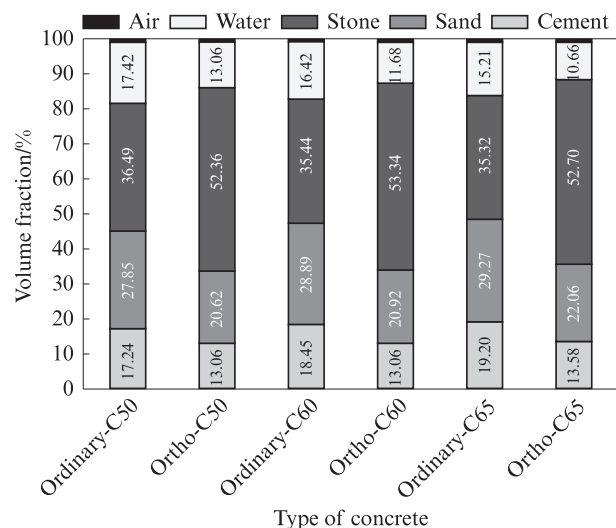


图12 不同混凝土中原材料的体积分数

Fig. 12 Volume fraction of raw materials in different concretes

3 结论

(1)适当降低灰砂比可改善砂浆的离析泌水,当

砂浆泌水率不大于0.7%时,砂浆仍保有较好的工作性,Mini-Mason法制备的正混凝土中粗骨料的体积分数随着砂浆扩展度的增大而提高。

(2)随着粗骨料体积分数的提高,Mini-Mason法制备的正混凝土抗压强度、干缩性能以及抗氯离子渗透性能都得到了提升,胶凝材料的用量显著降低。

(3)采用Mini-Mason法制备正混凝土,优化了填充砂浆的分布状态,改善了混凝土界面过渡区的微观结构,提高了界面过渡区的显微硬度,削弱了界面过渡区对混凝土力学性能和耐久性能带来的负面影响。

参考文献:

- [1] MONTEIRO P J M, MILLER S A, HORVATH A. Towards sustainable concrete[J]. Nature Materials, 2017, 6(7):698-699.
- [2] CHENG Y H, LIU S, ZHU B L, et al. Preparation of preplaced aggregate concrete and experimental study on its strength[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229:116847.
- [3] SHEN W G, CAO L, LI Q, et al. Quantifying CO₂ emissions from China's cement industry[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50:1004-1012.
- [4] MOHAN M K, RAHUL A V, DE SCHUTTER G, et al. Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective; A state-of-the-art review[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 115:103855.
- [5] XU G L, SHEN W G, FANG D, et al. Influence of size and surface condition of distributing-filling coarse aggregate on the properties of aggregate-interlocking concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261:577-585.
- [6] 许鹤龙. 骨料嵌锁型混凝土特性及其形成机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
XU Gelong. Properties of aggregate interlocking concrete and its formation mechanism [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [7] SHEN W G, ZHENG Z, LI J W, et al. Experimental investigation on the high-volume fly ash ecological self-compacting concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 60:105163.
- [8] SHEN W G, ZHANG T, ZHOU M K, et al. Investigation on the scattering-filling coarse aggregate self-consolidating concrete [J]. Materials and Structures, 2010, 43(10):1343-1350.
- [9] 沈卫国, 李家胜, 安涛, 等. 粗集料嵌锁型高性能混凝土的研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(12):18-21.
SHEN Weiguo, LI Jiasheng, AN Tao, et al. Research on the coarse aggregate interlocking high performance concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(12): 18-21.(in Chinese)
- [10] 沈卫国. 抛填集料工艺对混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(6):711-716.
SHEN Weiguo. Effect of scattering-filling aggregate technology

- on the mechanical properties of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(6):711-716. (in Chinese)
- [11] 沈卫国,李正昊,谭昱,等.粗集料堆叠率对自密实混凝土性能的影响[J].混凝土,2015(2):73-75.
SHEN Weiguo, LI Zhenghao, TAN Yi, et al. Stack coarse aggregate ratio on the properties of self-compacting concrete[J]. Concrete, 2015(2):73-75. (in Chinese)
- [12] 沈卫国,姜舰,潘洪祥,等.抛填骨料砼是实现水泥砼低碳排放的途径之一[J].新世纪水泥导报,2009,15(3):30-34.
SHEN Weiguo, JIANG Jian, PAN Hongxiang, et al. Filling aggregate concrete is one of the ways to realize low carbon emission of cement concrete[J]. Cement Guide for New Epoch, 2009, 15(3):30-34. (in Chinese)
- [13] LI P P, YU Q L, BROUWERS H J H, et al. Conceptual design and performance evaluation of two-stage ultra-low binder ultra-high performance concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 125:105858.
- [14] 汤明,杨松,郭加付,等.考虑石粉对流变性影响的自密实混凝土配合比设计[J].建筑材料学报,2022,25(2):191-198.
TANG Ming, YANG Song, GUO Jiafu, et al. Mix design of self-compacting concrete considering the effect of limestone powder on rheology[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2):191-198. (in Chinese)
- [15] SHEN W G, DONG R, LI J S, et al. Experimental investigation on aggregate interlocking concrete prepared with scattering-filling coarse aggregate process[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(11):2312-2316.
- [16] 李将伟.石质骨架生态混凝土的研究与制备[D].武汉:武汉理工大学,2019.
LI Jiangwei. Study and fabrication on stone-frame eco-concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] 崔激,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)
- [18] 李化建,黄法礼,程冠之,等.水粉比对自密实混凝土剪切变形行为的影响[J].建筑材料学报,2017,20(1):30-35.
LI Huajian, HUANG Fali, CHENG Guanzhi, et al. Effect of water-powder ratio on shear deformation behavior of self-compacting concrete(SCC)[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):30-35. (in Chinese)
- [19] 沈卫国,蔡智,张涛,等.抛填骨料对自密实混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2009,12(3):345-347.
SHEN Weiguo, CAI Zhi, ZHANG Tao, et al. Influence of scattering-filling coarse aggregate on properties of self-compacting concrete[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3):345-347. (in Chinese)
- [20] 吴鹏,沈卫国,催啸宇,等.抛填骨料工艺在水泥混凝土路面工程中的应用[J].混凝土,2011(8):147-149.
WU Peng, SHEN Weiguo, CUI Xiaoyu, et al. Engineering application of scattering-filling aggregate process in cement concrete pavement[J]. Concrete, 2011(8):147-149. (in Chinese)
- [21] YU S W, DU H J, JAY S J Y. Aggregate-bed 3D concrete printing with cement paste binder[J]. Cement and Concrete Research, 2020, 136:106169.
- [22] CAI J W, DU Y, XU G L, et al. The combined effect of distributing-filling aggregate process and air-entraining agent on the properties of aggregate-interlocking concrete[J]. Materials and Structures, 2022, 55(7):201.
- [23] SHEN W G, WU M M, ZHANG B L, et al. Coarse aggregate effectiveness in concrete: Quantitative models study on paste thickness, mortar thickness and compressive strength [J]. Construction and Building Materials, 2021, 289:123171.
- [24] 杨玉红,李悦,杜修力.自密实混凝土早期自收缩及微观孔结构研究[J].建筑材料学报,2010,13(5):601-606.
YANG Yuhong, LI Yue, DU Xiuli. Study on early autogenous shrinkage and microcosmic pore distribution of self-compacting concrete[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(5):601-606. (in Chinese)
- [25] 冷勇,余睿,范定强,等.碳化再生粗骨料环保型超高性能混凝土的制备[J].建筑材料学报,2022,25(11):1185-1189,1218.
LENG Yong, YU Rui, FAN Dingqiang, et al. Preparation of environmentally friendly UHPC containing carbonized recycled coarse aggregate[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11):1185-1189,1218. (in Chinese)
- [26] SHEN W G, ZHANG C, LI X L, et al. Low carbon concrete prepared with scattering-filling coarse aggregate process [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2014, 8(4):309-313.