

矿物掺合料复掺对超高性能湿接缝 混凝土性能的影响

盖珂瑜^{1,2}, 龙 勇^{1,2}, 陈露一^{1,3}, 李 信^{1,3}, 刘开志^{1,2}, 王 宇^{1,2}, 孙 涛⁴

(1. 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 武汉 430034; 2. 中铁大桥科学研究院有限公司, 武汉 430034;
3. 中铁桥研科技有限公司, 武汉 430034; 4. 武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 武汉 430070)

摘要:采用石灰石粉和粉煤灰微珠作为调节超高性能湿接缝混凝土性能的矿物掺合料,通过设置石灰石粉和粉煤灰微珠的不同复掺比例,研究了两种矿物掺合料对超高性能湿接缝混凝土流变性能、力学性能、收缩性能和抗渗性能的影响,并采用水化热分析了超高性能湿接缝混凝土的水化特性。结果表明:当石灰石粉掺量高于30% (质量分数)时,随着石灰石粉掺量的增加,超高性能湿接缝混凝土的塑性黏度先增大后减小,复掺50%石灰石粉和50% (质量分数)粉煤灰微珠时,混凝土塑性黏度可降低38.0%;掺入石灰石粉可以促进水泥的早期水化,提高超高性能湿接缝混凝土的早期抗压强度,3 d抗压强度最大涨幅为11.6%;复掺石灰石粉和粉煤灰微珠可以降低超高性能湿接缝混凝土的自收缩;当复掺30%石灰石粉时,超高性能湿接缝混凝土的抗渗性能最优,28 d氯离子扩散系数为 $0.15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

关键词:超高性能湿接缝混凝土; 石灰石粉; 粉煤灰微珠; 塑性黏度; 水化热; 抗压强度; 收缩性能; 抗渗性能
中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1625 (2024)03-0948-08

Effects of Mixing Mineral Admixtures on Properties of Ultra High Performance Wet-Joint Concrete

GE Keyu^{1,2}, LONG Yong^{1,2}, CHEN Luyi^{1,3}, LI Xin^{1,3}, LIU Kaizhi^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, SUN Tao⁴

(1. National Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Wuhan 430034, China;
2. China Railway Bridge Science Research Institute, Ltd., Wuhan 430034, China;
3. China Railway Bitech Co. Ltd., Wuhan 430034, China; 4. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Limestone powder and fly ash microbeads were used as mineral admixtures to adjust the properties of ultra high performance wet-joint concrete. The effects of limestone powder and fly ash microbeads on rheological properties, mechanical properties, shrinkage properties and impermeability of ultra high performance wet-joint concrete were studied by setting different mixing ratios. In addition, the hydration performance of ultra high performance wet-joint concrete was analyzed by hydration heat. The results show that when limestone powder is higher than 30% (mass fraction), with the increase content of limestone powder, the plastic viscosity of ultra high performance wet-joint concrete increases first and then decreases. The plastic viscosity of concrete is reduced by 38.0% when added with 50% limestone powder and 50% (mass fraction) fly ash microbeads. The addition of limestone powder promotes the early hydration of cement and improves the early compressive strength of ultra high performance wet-joint concrete, and the maximum growth rate of 3 d compressive strength is 11.6%. The autogenous shrinkage of ultra high performance wet-joint concrete is reduced by adding limestone powder and fly ash microbeads. The impermeability of ultra high performance wet-joint concrete is the best when the content of limestone powder is 30%, and the 28 d chloride ion diffusion coefficient is $0.15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Key words: ultra high performance wet-joint concrete; limestone powder; fly ash microbead; plastic viscosity; hydration heat; compressive strength; shrinkage property; impermeability property

收稿日期:2023-10-02; 修订日期:2023-11-24

基金项目:湖北省科技厅创新发展项目(2021BLB155); 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划(2020-25-重点)

作者简介:盖珂瑜(1993—),男,工程师。主要从事生态建筑材料方面的研究。E-mail:1327530794@qq.com

0 引言

传统湿接缝混凝土与预制混凝土的黏结强度不高,且与桥面板间存在龄期差,导致湿接缝混凝土容易产生裂缝、渗水等病害,即混凝土的抗渗性能降低,这会加速腐蚀介质的渗透,进而降低结构体系的承载能力和变形能力。此外,随着交通量日益增长,湿接缝混凝土还要承受交变荷载的作用,这进一步加剧湿接缝的破坏,严重影响桥梁结构的安全性能和服役性能^[1-3]。因此,研究新型高性能湿接缝混凝土具有十分重要的意义。

粗骨料超高性能混凝土(ultra high performance concrete with coarse aggregate, CA-UHPC)是以超高性能混凝土(ultra high performance concrete, UHPC)为基础,并掺入粗骨料制备的一种新型水泥基材料,既具有UHPC的超高强度和超高耐久性,又具有低收缩、高弹模、低成本等特点。史占崇等^[4]、伍贤智等^[5]对比研究了CA-UHPC和UHPC的力学性能和自收缩性能,结果表明,与UHPC相比,CA-UHPC的抗压强度、抗弯拉强度和自收缩量降低,弹性模量提高。高立强等^[6]研究了普通混凝土拼装梁CA-UHPC湿接缝的抗弯性能,结果表明,采用CA-UHPC的湿接缝抗裂性能明显优于普通混凝土湿接缝。Yu等^[7]、Liu等^[8]、李聪等^[9]分析了粗骨料掺量和级配对UHPC自收缩和力学性能的影响,结果表明:粗骨料可减小UHPC的自收缩,且减缩量随粗骨料掺量的增加而增大;适宜掺量的粗骨料可提高混凝土的弹性模量和抗压强度,但会降低混凝土的抗拉强度。黄维蓉等^[10]采用不同掺量和粒径的辉绿岩制备了CA-UHPC,结果表明,粗骨料掺量越大,CA-UHPC的收缩越小,且骨料粒径为8~10 mm时,收缩最小。以上研究表明,CA-UHPC具有良好的体积稳定性和力学性能,而且采用CA-UHPC制备的湿接缝构件也具备优异的抗裂性能。

然而,目前关于CA-UHPC的研究主要集中在力学性能和收缩性能方面,关于CA-UHPC流变性能和耐久性能的研究相对较少,也鲜见矿物掺合料对CA-UHPC性能影响的系统研究。为此,本文以石灰石粉和粉煤灰微珠为主要参数,系统测试了CA-UHPC作为湿接缝混凝土的流变性能、力学性能、抗渗性能及水化热,以为CA-UHPC在湿接缝结构中的推广应用提供参考。

1 实验

1.1 原材料

水泥:P·O 52.5级水泥,水泥的化学组成如表1所示。硅灰:埃肯硅灰,比表面积为23 000 m²/kg。微珠:粉煤灰微珠,比表面积为2 432 m²/kg,性能指标如表2所示,微观形貌如图1所示。石灰石粉:400目(38 μm)石灰石粉,CaCO₃含量为99%(质量分数),比表面积为756 m²/kg,性能指标如表3所示。膨胀剂:武汉某公司生产的I型氧化钙膨胀剂。细骨料:石英砂,粒径为0.30~1.18 mm。粗骨料:玄武岩碎石,粒径为5~10 mm。钢纤维:直径为0.2 mm,长度为13 mm。减水剂:粉状聚羧酸高性能减水剂。消泡剂:上海某公司生产的粉状消泡剂。水:自来水。

表1 胶凝材料的主要化学组成

Table 1 Main chemical composition of cementitious materials

Material	Mass fraction/%								
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Cement	60.46	22.14	5.45	3.04	2.33	2.56	0.68	0.13	3.18
Silica fume	0.35	93.86	0.28	0.16	0.45	0.72	0.85	0.36	2.31
Fly ash microbead	6.38	45.04	37.31	3.52	0.63	0.71	0.81	0.18	5.42

表2 粉煤灰微珠的物理力学性能

Table 2 Physical and mechanical properties of fly ash microbead

Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	Water demand ratio/%	Compressive strength ratio/%	
		7 d	28 d
2 432	87	84.3	102.6

表3 石灰石粉的物理力学性能

Table 3 Physical and mechanical properties of limestone powder

Methylene blue value/($g \cdot kg^{-1}$)	Residue on 45 μm sieve/%	Fluidity ratio/%	Strength activity index/%	
			7 d	28 d
0.73	5.76	101	74	92

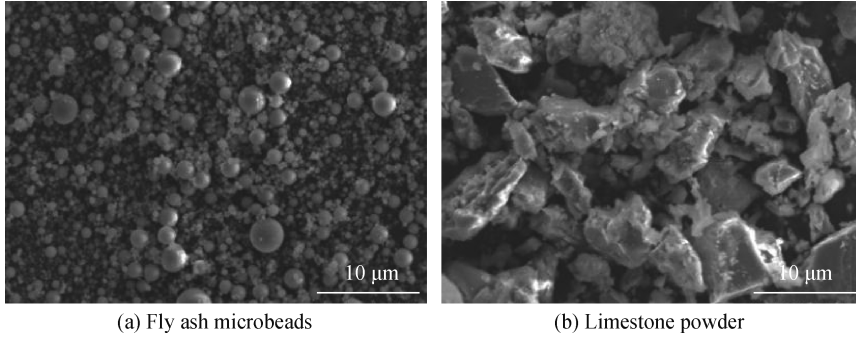


图1 粉煤灰微珠和石灰石粉的SEM照片

Fig. 1 SEM images of fly ash microbeads and limestone powder

1.2 配合比方案设计

本试验研究了不同掺量粉煤灰微珠和石灰石粉对超高性能湿接缝混凝土扩展度、流变性能、抗压强度、自收缩、干燥收缩、抗渗性能的影响,基于前期试验^[5]进行了配合比设计,具体配合比如表4所示,F代表粉煤灰微珠,LS代表石灰石粉,粉煤灰微珠和石灰石粉总量固定为 150 kg/m^3 ,石灰石粉掺量分别为0%、30%、50%、70%和100%(质量分数)。

表4 超高性能湿接缝混凝土配合比

Table 4 Mix proportion of ultra high performance wet-joint concrete

Sample No.	Mix proportion/($kg \cdot m^{-3}$)										
	Cement	Silica fume	Fly ash microbead	Limestone powder	Expanding agent	Quartz sand	Basalt stone	Steel fiber	Water reducer	Defoamer	Water
F100	450	75	150	0	50	750	750	40	9	1	145
F70LS30	450	75	105	45	50	750	750	40	9	1	145
F50LS50	450	75	75	75	50	750	750	40	9	1	145
F30LS70	450	75	45	105	50	750	750	40	9	1	145
LS100	450	75	0	150	50	750	750	40	9	1	145

1.3 试验过程与测试方法

1.3.1 试件制备与养护

按设计配合比称量好各原材料的质量,先将水泥、硅灰、石灰石粉、膨胀剂、石英砂、玄武岩碎石、减水剂、消泡剂、钢纤维倒入搅拌机内,干拌6 min,再将水全部加入,继续搅拌6 min至混凝土完全流化,装入模具,在试块表面及时覆盖塑料薄膜,在温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的室内养护24 h后拆模,拆模后放入标准养护室中养护至测试龄期。

1.3.2 测试方法

1) 流变性能

采用美国博勒飞公司生产的R/S SST2000型黏滞系数测试仪测试浆体的流变性能,测试程序如图2所

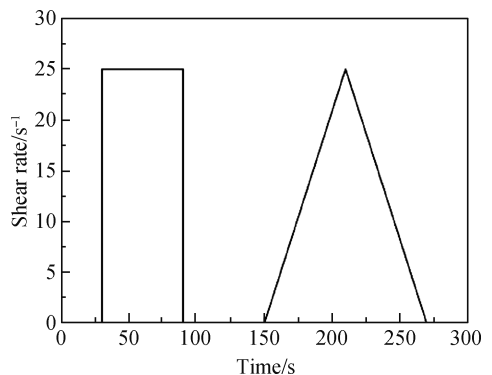


图2 流变性能的测试程序

Fig. 2 Test program for rheological properties

示,试验温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,剪切速率范围为 $1 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。

2) 水化热分析

采用 TAM AIR 等温量热仪测试混凝土胶凝体系的水化热,升温速率为 $0.1 \sim 2.0^\circ\text{C}/\text{min}$,测量精度为 0.1°C 。

3) 抗压强度

混凝土抗压强度试验参照《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)^[11]进行,试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,养护龄期为3、7和28 d。

4) 收缩性能

混凝土自收缩和干燥收缩试验参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[12]进行,自收缩的试验龄期为7 d,干缩试验的试验龄期为1、3、7、14、28、45、60和90 d。

5) 抗渗性能

混凝土抗氯离子渗透和电通量试验参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[12]进行,养护龄期为28 d。

2 结果与讨论

2.1 流变性能

超高性能湿接缝混凝土的流变曲线如图3所示。由图3可知,随着剪切速率的增大,屈服应力也逐渐增大。Herschel-Bulkley(H-B)模型可有效评价低水胶比浆体的流变性能,方程式如式(1)和式(2)所示^[13-14]。

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad (1)$$

$$\mu = \frac{3k}{n+2} (\gamma_{\max})^{n-1} \quad (2)$$

式中: τ 为剪切应力,Pa; τ_0 为屈服应力,Pa; μ 为塑性黏度; k 为稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; γ 为剪切速率, s^{-1} ; γ_{\max} 为最大剪切速率, s^{-1} ; n 为流变行为参数, $n > 1$ 时,浆体发生剪切增稠, $n < 1$ 时,浆体发生剪切变稀。

基于 H-B 模型得到湿接缝混凝土流变参数,如表5所示。由表5可知,当石灰石粉掺量低于30%时,随着石灰石粉掺量的增加,混凝土的屈服应力和塑性黏度增大,当石灰石粉掺量高于30%时,随着石灰石粉掺量的增加,混凝土的屈服应力和塑性黏度先减小后增大。单掺石灰石粉的混凝土屈服应力和塑性黏度最大,分别为 42.16 Pa 和 $64.98 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,复掺50%石灰石粉的混凝土屈服应力和塑性黏度最小,为 16.22 Pa 和 $40.31 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,与单掺石灰石粉的混凝土相比,屈服应力和塑性黏度分别降低了61.5%和38.0%。

表5 超高性能湿接缝混凝土的流变参数

Table 5 Rheological parameters of ultra high performance wet-joint concrete

Sample No.	Yield stress τ_0/Pa	Plastic viscosity $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	Rheological index n	R^2
F100	23.96	41.54	0.967 3	0.998 7
F70LS30	44.16	48.40	0.977 9	0.997 9
F50LS50	16.22	40.31	1.034 0	0.998 4
F30LS70	22.48	45.03	1.048 0	0.996 1
LS100	42.16	64.98	1.188 0	0.987 8

注: R^2 为拟合程度相关系数。

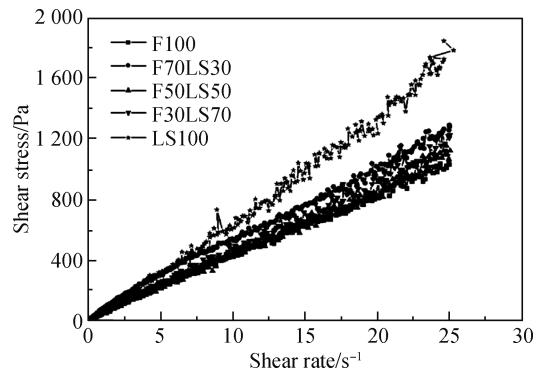


图3 超高性能湿接缝混凝土的流变曲线

Fig. 3 Rheological curves of ultra high performance wet-joint concrete

出现上述现象的原因可能是:1)石灰石粉中的细小颗粒虽然可以填充孔隙,释放出一定的自由水,但石灰石粉表面不规则,颗粒之间不易发生滑动,尤其颗粒间距离较近时,受颗粒间附着力和摩擦力的影响,滑动阻力进一步增大,这种阻力随着石灰石粉掺量的增加而增大^[15-16]。2)复掺粉煤灰微珠和石灰石粉时,粉煤

灰微珠呈球形,可有效降低石灰石粉颗粒间的滑动阻力,两者相互协同,有效降低了体系的屈服应力和塑性黏度。3)石灰石粉的密度大于粉煤灰微珠,等质量取代粉煤灰微珠时,体系中的浆体体积随之减少,覆盖骨料的浆体层变薄,增大了骨料间的摩擦阻力。

由表5流变行为参数 n 可知,当石灰石粉掺量低于30%时,浆体表现出剪切变稀,而当石灰石粉掺量较高时,浆体则表现为剪切增稠,且随着石灰石粉掺量的增加, n 值随之增大,这表明石灰石粉的掺入加剧了剪切增稠现象。

2.2 水化热

超高性能湿接缝混凝土的水化热如图4所示。由图4(a)可知,石灰石粉的掺入均不同程度地促进了水泥的水化,复掺30%石灰石粉和掺100%石灰石粉的水化速率均较大,这表明当石灰石粉掺量为30%时,石灰石粉和粉煤灰微珠之间具有良好的协同效应,加速了水泥水化。其次,石灰石粉全部取代粉煤灰微珠时,体系内自由水分增多,促进了水泥水化^[17]。由图4(b)可知,随着石灰石粉掺量的增加,累计放热量先减小后增大,其中复掺30%石灰石粉和掺100%石灰石粉的72 h累计放热量分别为140.5和142.2 J/g,较未掺石灰石粉时分别增长了9.7%和11.0%。

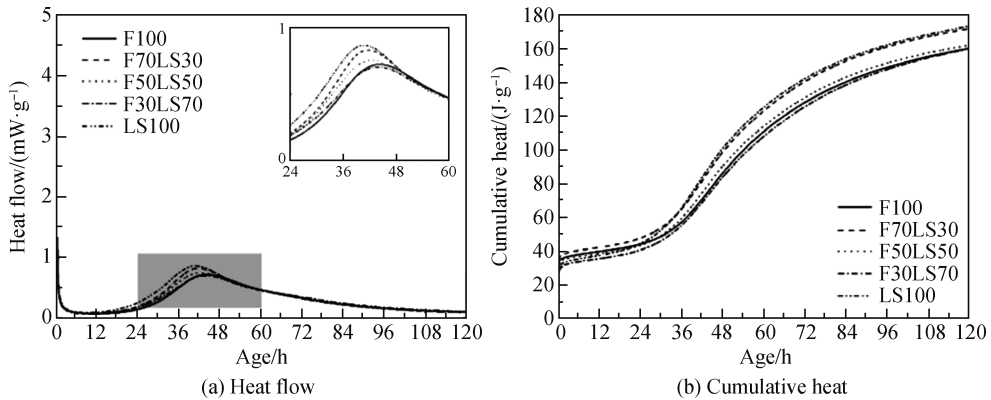


图4 超高性能湿接缝混凝土的水化热

Fig. 4 Hydration heat of ultra high performance wet-joint concrete

2.3 抗压强度

超高性能湿接缝混凝土的抗压强度如图5所示。图5可知,当石灰石粉掺量高于30%时,随着石灰石粉掺量的增加,混凝土的3 d抗压强度整体上逐渐增大,而混凝土的28 d抗压强度逐渐减小,当复掺30%石灰石粉时,混凝土的28 d抗压强度最大,为118.4 MPa,相比未掺石灰石粉的混凝土增长5.7%,相比仅掺石灰石粉的混凝土增长了6.2%。其次,单掺石灰石粉的混凝土3 d抗压强度最大,相比未掺石灰石粉的混凝土增长了11.6%,这表明石灰石粉可以促进混凝土早期强度的发展,但对后期强度的发展不利。这是由于:1)石灰石粉具有特殊的表面结构,可以促进水化硅酸钙(C-S-H)凝胶的生长;2)石灰石粉和粉煤灰微珠具有协同效应,石灰石粉具有成核效应,可以为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的结晶提供晶核,粉煤灰微珠可以与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成更多水化产物;3)石灰石粉掺量增加时,有效水灰比增大,促进了水泥早期的持续水化;4)石灰石粉中的细微颗粒可以填充内部孔隙,改善混凝土的级配^[17-19]。

2.4 收缩性能

超高性能湿接缝混凝土的自收缩如图6所示。由图6可知,湿接缝混凝土的自收缩可分为三个阶段:第

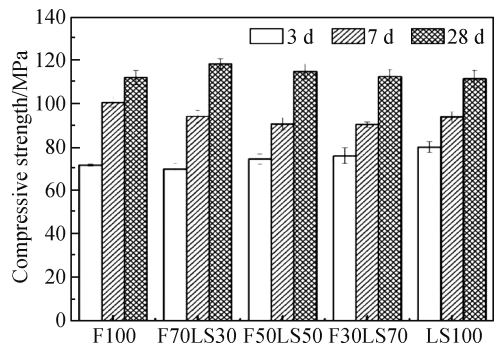


图5 超高性能湿接缝混凝土的抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of ultra high performance wet-joint concrete

一阶段为从初凝到初凝后 10 h,该阶段混凝土自收缩迅速发展;第二阶段为初凝后 10~24 h,该阶段混凝土发生微膨胀,混凝土自收缩有所降低;第三阶段为初凝 24 h 以后,该阶段自收缩发展较为平稳。对比不同掺量的混凝土可知,随着石灰石粉掺量的增加,混凝土的自收缩先减小后增大,未掺石灰石粉的混凝土 7 d 自收缩值分别为 291 $\mu\text{m}/\text{m}$,复掺 30%、50% 和 70% 石灰石粉的混凝土 7 d 自收缩值分别为 278、258 和 254 $\mu\text{m}/\text{m}$,与未掺石灰石粉的混凝土相比,分别降低了 4.5%、11.3% 和 12.7%,而掺 100% 石灰石粉的混凝土 7 d 自收缩值则为 373 $\mu\text{m}/\text{m}$,与未掺石灰石粉的混凝土相比,增大了 28.2%。这是因为:1) 石灰石粉可以为水化产物的形核生长提供形核点,促进水泥的水化,提高体系的放热速率和放热量^[20-21];2) 水胶比相同的条件下,石灰石粉活性低于粉煤灰微珠,由于稀释效应,更多的水参与了水化,促进了水泥水化的持续进行^[19];3) 单掺石灰石粉时,石灰石粉约占胶凝材料总量的 21%,较大地促进了水泥的持续水化,胶凝材料迅速水化消耗了更多的水分,毛细孔中的相对湿度下降,导致毛细张力产生,混凝土产生更大的收缩应力。

超高性能湿接缝混凝土的干燥收缩如图 7 所示。由图 7 可知,不同配合比的超高性能湿接缝混凝土干燥收缩发展趋势基本一致,在 14 d 之前,干燥收缩发展迅速,14 d 干燥收缩量占 90 d 干燥收缩总量的 75%~85%,14 d 之后,干燥收缩逐渐趋于稳定,这是由于超高性能湿接缝混凝土的强度发展较为迅速,内部结构密实,孔隙的连通性降低,增加了水分迁移的难度^[22],因此不同配比的干燥收缩相差较小。随着石灰石粉掺量的增加,混凝土的干燥收缩先增大后减小,未掺石灰石粉的混凝土 90 d 干燥收缩值为 282 $\mu\text{m}/\text{m}$,对比未掺石灰石粉的混凝土,复掺 30% 和 50% 石灰石粉的混凝土 90 d 干燥收缩分别增加了 7.4% 和 9.6%,而复掺 70% 和 100% 石灰石粉的混凝土 90 d 干燥收缩分别降低了 4.6% 和 3.9%,这是由于石灰石粉促进了水泥水化,提高了混凝土的早期强度,混凝土内部结构更为密实,水分更难迁移,因此当石灰石粉掺量较高时,混凝土的干燥收缩减小。

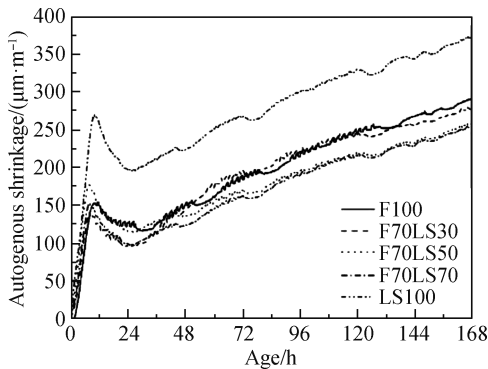


图 6 超高性能湿接缝混凝土的自收缩

Fig. 6 Autogenous shrinkage of ultra high performance wet-joint concrete

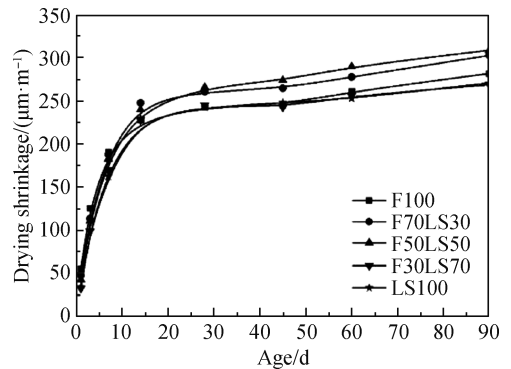


图 7 超高性能湿接缝混凝土的干燥收缩

Fig. 7 Drying shrinkage of ultra high performance wet-joint concrete

2.5 抗渗性能

超高性能湿接缝混凝土的电通量和氯离子扩散系数如图 8 所示。由图 8 可知,未掺石灰石粉的混凝土 28 d 电通量值和氯离子扩散系数分别为 152 C 和 $0.26 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,而未掺粉煤灰微珠、复掺石灰石粉和粉煤灰微珠的混凝土电通量值和氯离子渗透系数均低于未掺石灰石粉的混凝土,其中复掺 30% 石灰石粉的混凝土电通量值和氯离子渗透系数最小,分别为 126 C 和 $0.15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,这表明石灰石粉可在一定程度上改善混凝土的孔隙分布,提高混凝土的抗渗性能。

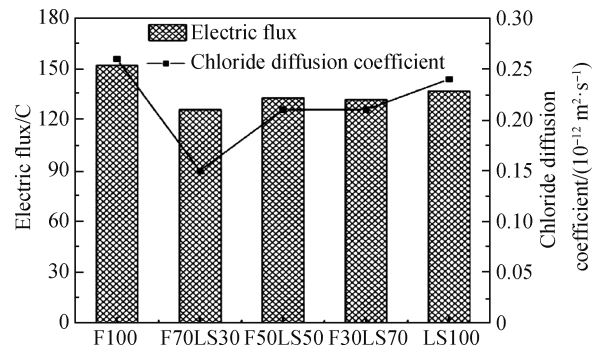


图 8 超高性能湿接缝混凝土的电通量和氯离子扩散系数

Fig. 8 Electric flux and chloride diffusion coefficient of ultra high performance wet-joint concrete

3 结 论

1)单掺粉煤灰微珠的浆体屈服应力和塑性黏度显著小于单掺石灰石粉,复掺50%(质量分数)石灰石粉和粉煤灰微珠可有效降低浆体的屈服应力和塑性黏度;当石灰石粉掺量高于30%(质量分数)时,浆体表现为剪切增稠。

2)石灰石粉可以促进水泥的早期水化,提高湿接缝混凝土的早期强度;复掺30%石灰石粉可与粉煤灰微珠发挥协同效应,提高湿接缝混凝土的后期抗压强度和抗渗性能。

3)单掺石灰石粉可显著增大湿接缝混凝土的自收缩,复掺石灰石粉和粉煤灰微珠可降低湿接缝混凝土的自收缩。

参 考 文 献

- [1] 尹炳森. 预制桥面板 UHPC 湿接缝力学性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
YIN B S. Study on mechanical properties of UHPC wet joint of precast bridge deck[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [2] 杨晓明, 王爱国, 刘开伟, 等. 纤维增强微膨胀湿接缝混凝土的性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6): 1974-1978.
YANG X M, WANG A G, LIU K W, et al. Study on the properties of fiber reinforced micro-expansion wet joint concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(6): 1974-1978 (in Chinese).
- [3] 徐 晨, 卢 毅, 马 焜, 等. 含湿接缝的钢-UHPC 组合桥面板收缩效应[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(9): 17-26.
XU C, LU Y, MA B, et al. Shrinkage effect of steel-UHPC composite bridge deck with wet joint[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(9): 17-26 (in Chinese).
- [4] 史占崇, 苏庆田, 邵长宇, 等. 粗骨料 UHPC 的基本力学性能及弯曲韧性评价方法[J]. 土木工程学报, 2020, 53(12): 86-97.
SHI Z C, SU Q T, SHAO C Y, et al. Basic mechanical behavior and flexural toughness evaluation method of coarse aggregate UHPC[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(12): 86-97 (in Chinese).
- [5] 伍贤智, 李 信, 陈露一, 等. 桥梁湿接缝用含粗骨料超高性能混凝土的性能研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(12): 89-92 + 122.
WU X Z, LI X, CHEN L Y, et al. Study on performance of ultra-high performance concrete with coarse aggregate for wet joint of bridge[J]. New Building Materials, 2021, 48(12): 89-92 + 122 (in Chinese).
- [6] 高立强, 王 敏, 王康宁. 预制 NC 拼装梁粗骨料 UHPC 湿接缝抗弯性能研究[J]. 桥梁建设, 2022, 52(2): 82-88.
GAO L Q, WANG M, WANG K N. Research on flexural performance of precast NC beam with in-situ coarse aggregate UHPC stitches[J]. Bridge Construction, 2022, 52(2): 82-88 (in Chinese).
- [7] YU Z H, WU L S, YUAN Z, et al. Mechanical properties, durability and application of ultra-high-performance concrete containing coarse aggregate (UHPC-CA): a review[J]. Construction and Building Materials, 2022, 334: 127360.
- [8] LIU J Z, HAN F Y, CUI G, et al. Combined effect of coarse aggregate and fiber on tensile behavior of ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 310-318.
- [9] 李 聪, 陈宝春, 韦建刚. 粗集料 UHPC 收缩与力学性能[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(5): 11-20.
LI C, CHEN B C, WEI J G. Shrinkage and mechanical properties of UHPC with coarse aggregate[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(5): 11-20 (in Chinese).
- [10] 黄维蓉, 杨玉柱, 崔 通, 等. 含粗骨料超高性能混凝土收缩变形性能的研究[J]. 混凝土, 2021(8): 99-103.
HUANG W R, YANG Y Z, CUI T, et al. Study on the workability and mechanical properties of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate[J]. Concrete, 2021(8): 99-103 (in Chinese).
- [11] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, China National Standardization Administration Committee. Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015[S]. Beijing: China Standards Press, 2015 (in Chinese).
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009 (in Chinese).
- [13] 李珂珂, 李 龙, 何友林, 等. 超高性能混凝土流变特性及其调控研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1570-1577.
LI K K, LI L, HE Y L, et al. Rheological characteristics of ultra-high performance concrete and its regulation[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(5): 1570-1577 (in Chinese).
- [14] 郑晓博, 韩方玉, 刘建忠, 等. 粗骨料超高性能混凝土流变与稳定性[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(11): 2844-2854.

- ZHENG X B, HAN F Y, LIU J Z, et al. Rheological properties and stability of ultra high performance concrete containing coarse aggregate[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(11): 2844-2854 (in Chinese).
- [15] 谢友均, 陈小波, 马昆林, 等. 石灰石粉对水泥-粉煤灰浆体剪切变稀和剪切增稠的影响[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(5): 824-829.
XIE Y J, CHEN X B, MA K L, et al. Effects of limestone powder on shear thinning and shear thickening of cement-fly ash paste[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(5): 824-829 (in Chinese).
- [16] 谢友均, 陈小波, 马昆林, 等. 石灰石粉对水泥-粉煤灰砂浆流变行为影响的研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2015, 12(1): 59-65.
XIE Y J, CHEN X B, MA K L, et al. Effects of limestone powder on rheological properties of cement-fly ash mortar[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2015, 12(1): 59-65 (in Chinese).
- [17] 黄 伟, 孙 伟. 石灰石粉掺量对超高性能混凝土水化演变的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(4): 751-759.
HUANG W, SUN W. Effects of limestone addition on hydration development of ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2017, 47(4): 751-759 (in Chinese).
- [18] 姜天华, 管建成, 张秀成. 超高性能混凝土掺合料应用综述[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(14): 5528-5538.
JIANG T H, GUAN J C, ZHANG X C. Summary of application of admixtures in ultra-high performance concrete[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(14): 5528-5538 (in Chinese).
- [19] 陈炜一, 周予启, 阎培渝. 石灰石粉对胶凝材料水化及混凝土性能的影响研究[J]. *施工技术*, 2022(20): 52-56.
CHEN W Y, ZHOU Y Q, YAN P Y. Influence of limestone powder on the hydration of binder and concrete performance [J]. *Construction Technology*, 2022(20): 52-56 (in Chinese).
- [20] LOTHENBACH B, LE SAOUT G, GALLUCCI E, et al. Influence of limestone on the hydration of Portland cements[J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(6): 848-860.
- [21] ZAJAC M, ROSSBERG A, LE SAOUT G, et al. Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 46: 99-108.
- [22] 刘建忠, 孙 伟, 缪昌文, 等. 矿物掺合料对低水胶比混凝土干缩和自收缩的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(3): 580-585.
LIU J Z, SUN W, MIAO C W, et al. Effect of mineral admixtures on drying and autogenous shrinkage of concrete with low water-to-binder ratio[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2009, 39(3): 580-585 (in Chinese).