

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.042



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



掺风积沙的 PVA-FRCC 早期自生收缩特性

王玉清^{1a}, 屈寻^{1a}, 云泽亚^{1a}, 桑达德², 刘曙光^{1b}

(1. 内蒙古工业大学 a. 土木工程学院; b. 资源与环境工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 中国建筑土木建设有限公司, 济南 250100)

摘要: 为研究掺风积沙的聚乙烯醇纤维水泥基复合材料 (polyvinyl alcohol fiber cement-based composites, 简称 PVA-FRCC) 的早期自生收缩特性, 并建立自生收缩预测模型, 以风积沙取代率、纤维体积率、水胶比及砂胶比为研究变量, 通过收缩试验测试材料 7 d 内的自生收缩, 总结各因素对自生收缩的影响规律, 并通过低场核磁试验测试试件内部孔隙流体饱和度、孔隙率与孔径, 揭示风积沙对自生收缩的影响机理。结果表明: 风积沙具有多孔吸水性, 且弹性模量较小, 水胶比较小时自生收缩随风积沙取代率提高而增大, 水胶比较大时自生收缩随风积沙取代率提高而减小; 聚丙烯 (PVA) 纤维的内养护作用降低了自生收缩; 水胶比较小时, 水化反应引起的化学收缩增大, 自生收缩增加; 砂胶比提高使风积沙绝对含量提高, 自生收缩增大; 掺风积沙的 PVA-FRCC 整体孔径较小, 最可几孔径在 10 nm 左右, 风积沙取代率提高后, 小孔孔隙率提高是自生收缩增大的主要原因。考虑各因素影响, 建立了掺风积沙的 PVA-FRCC 早期自生收缩预测模型, 模型计算值与实验值吻合良好。

关键词: 风积沙; 聚乙烯醇纤维水泥基复合材料; 自生收缩; 孔隙演化; 自生收缩模型

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Early autogenous shrinkage performance of PVA-FRCC mixed with aeolian sand

WANG Yuqing^{1a}, QU Xun^{1a}, YUN Zeya^{1a}, SANG Dade², LIU Shuguang^{1b}

(1a. School of Civil Engineering; 1b. School of Resources and Environmental Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, P. R. China; 2. China Construction Civil Engineering Construction Co. Ltd., Jinan 250100, P. R. China)

Abstract: In order to study the early autogenous shrinkage characteristics of polyvinyl alcohol fiber cement-based composites (PVA-FRCC) mixed with aeolian sand and establish an autogenous shrinkage prediction model, this paper takes aeolian sand replacement rate, fiber volume rate, water-binder ratio and sand-binder ratio as research variables. The autogenous shrinkage of the material within 7 days was tested by shrinkage test,

收稿日期: 2024-12-23

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2023LHMS05016); 国家自然科学基金(52468039、51968056); 内蒙古自治区科技计划(2022YFHH0153)

作者简介: 王玉清(1972-), 女, 教授, 主要从事复合材料的工程应用及工程防灾减灾研究, E-mail: imutwyq@126.com。

Received: 2024-12-23

Foundation items: Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region (No. 2023LHMS05016); National Natural Science Foundation of China (Nos. 52468039, 51968056); Inner Mongolia Autonomous Region Science and Technology Plan (No. 2022YFHH0153)

Author brief: WANG Yuqing (1972-), professor, main research interests: engineering application of composite materials and engineering disaster prevention and mitigation, E-mail: imutwyq@126.com.

and the influence of various factors on autogenous shrinkage was summarized. The pore fluid saturation, porosity and pore size of the specimen were tested by low-field nuclear magnetic resonance test. The influence mechanism of aeolian sand on autogenous shrinkage is revealed. The results show that aeolian sand has porous water absorption and small elastic modulus. When the water-binder ratio is small, the autogenous shrinkage increases with the increase of the replacement rate of aeolian sand. When the water-binder ratio is large, the autogenous shrinkage decreases with the increase of the replacement rate of aeolian sand. The internal curing effect of polypropylene (PVA) fiber reduces the autogenous shrinkage. When the water-binder ratio is small, the chemical shrinkage caused by the hydration reaction increases, resulting in an increase in autogenous shrinkage; the increase of sand-binder ratio increases the absolute content of aeolian sand, which leads to the increase of autogenous shrinkage. The overall pore size of PVA-FRCC mixed with aeolian sand is small, and the most probable pore size is about 10 nm. The increase of pore porosity after the increase of aeolian sand replacement rate is the main reason for the increase of autogenous shrinkage. Finally, considering the influence of various factors, the early autogenous shrinkage prediction model of PVA-FRCC mixed with aeolian sand was established. The calculated values of the model were in good agreement with the experimental values.

Keywords: aeolian sand; polyvinyl alcohol fiber cement-based composites (PVA-FRCC); autogenous shrinkage; pore evolution; model of autogenous shrinkage

中国西北地区分布有广阔的沙漠,具有丰富的风积沙资源^[1]。若能利用风积沙代替天然砂制备水泥基材料,不仅能减轻沙害、降低工程造价,还能减少砂石开采,有利于生态保护^[2]。然而风积沙属超细砂,比表面积大,用其制备水泥基材料时所需胶凝材料较多^[3],产生的自生收缩较大。加之中国西北地区大风干热气候显著,构件浇筑早期干燥收缩也较大,使构件早期易出现收缩裂缝。如果在其中加入聚乙烯醇(PVA)纤维,形成掺风积沙的聚乙烯醇纤维水泥基复合材料(Polyvinyl alcohol fiber reinforced cement-based composites,简称 PVA-FRCC),则其收缩开裂会得到有效缓解^[4-5]。因此,研究风积沙 PVA-FRCC 的自生收缩性能对于减小材料早期收缩、降低构件开裂风险具有重要意义。

水泥基材料的总收缩主要包括干燥收缩和自生收缩。当水胶比较小时,自生收缩在总收缩中占比较大^[6]。自生收缩包括水化反应引起的化学收缩和毛细管作用引起的自收缩。对于风积沙混凝土,提高风积沙掺量会使基体的自生收缩和总收缩均增加^[7-8],同时基体的干燥收缩和温度收缩也会增加^[9];提高砂率会使基体自生收缩和总收缩增加^[10];提高粉煤灰掺量或降低砂胶比可减小基体总收缩^[7,10]。与普通混凝土相比,沙漠砂混凝土在抵抗早期塑性收缩开裂方面的能力较弱^[11]。对于 PVA 纤维水泥基材料,有研究认为 PVA 纤维可有效提高材料抗裂性能,而对抑制收缩的效果不明显^[12];减小水胶比或增大砂胶比可使 PVA 纤维水泥基材料的收缩减小^[13]。另有研究表明^[14-17],在水泥基材中加入高吸水树脂(Super absorbent polymer,简称 SAP)或使

用饱水陶粒替代粗骨料可起到内养护作用,能减小包括风积沙混凝土在内的水泥基材料的自生收缩。在收缩预测模型方面,有学者根据 E. Tazawa 模型并结合实验数据建立了风积沙混凝土自生收缩预测模型^[10];也有学者依据纤维影响系数建立了 PVA 纤维增强水泥基复合材料的收缩模型^[18-19]。可见,目前关于风积沙混凝土及 PVA 纤维水泥基复合材料收缩性能的研究,对两种材料各自均有一些成果,但对于掺风积沙的 PVA-FRCC 自生收缩性能及预测模型的研究未见相关报道。

笔者研究掺风积沙的 PVA-FRCC 早期自生收缩性能,揭示其收缩机理,并建立早期自生收缩预测模型,以期为该材料的推广应用提供参考。

1 试验概况

1.1 原材料

试验选用呼和浩特市冀东水泥厂生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,华电集团新乡电厂生产的 I 级粉煤灰,包头明商环保科技有限公司生产的优质硅灰及日本 Kuraray 公司生产的 PVA 纤维;细骨料采用包头明商环保科技有限公司生产的石英砂和内蒙古库布齐沙漠风积沙。风积沙的粒径为 114 ~ 260 μm ,平均粒径为 172.4 μm ,堆积密度为 1 480 kg/m^3 ,表观密度为 2 460 kg/m^3 ,细度模数为 0.71,为特细砂;石英砂的粒径为 94 ~ 310 μm ,平均粒径为 183.3 μm ,堆积密度为 1 500 kg/m^3 ,表观密度为 2 580 kg/m^3 ,细度模数为 1.8。原材料化学成分见表 1,PVA 纤维参数见表 2。

表 1 原材料化学成分

Table 1 Chemical composition of raw materials

材料	化学成分											
	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	Cl	F
水泥	0.64	6.16	21.87	4.24	57.72	3.68	3.93	0.44	0.10	0.88	0.14	
粉煤灰	1.14	34.36	50.65	0.85	3.57	4.50	0.92	1.44	0.34	1.77	0.18	1.42
硅灰	0.27	1.84	40.76	0.12	22.14	0.49	32.52	0.07	0.03	0.22	0.03	1.42

表 2 PVA 纤维性能

Table 2 Properties of PVA fiber

长度/ mm	直径/ mm	抗拉强 度/MPa	拉伸模量/ GPa	伸长率/%	密度/ (g/cm ³)
12	0.04	1 600	40	6	1.3

1.2 试验工况

以风积沙取代率 A_r 、PVA 纤维体积率 V_f 、水胶比 W/C 和砂胶比 S/B 为变量,设计了 13 组试件,各组配合比见表 3。

1.3 收缩试验方法

收缩试验参照《建筑砂浆基本性能试验方法标

表 3 材料配合比

Table 3 Mix ratio of the material

配比	风积沙取代率/%	纤维体积率/%	水胶比	砂胶比
S1	0	1.0	0.25	0.35
S2	30	1.0	0.25	0.35
S3	60	1.0	0.25	0.35
S4	30	0	0.25	0.35
S5	30	0.5	0.25	0.35
S6	0	1.0	0.35	0.35
S7	30	1.0	0.35	0.35
S8	60	1.0	0.35	0.35
S9	0	1.0	0.45	0.35
S10	30	1.0	0.45	0.35
S11	60	1.0	0.45	0.35
S12	30	1.0	0.25	0.45
S13	30	1.0	0.25	0.55

注:风积沙取代率为石英砂的质量比;纤维体积率为水泥基体积占比;水胶比为水的用量与胶凝材料用量的质量比;砂胶比为砂的用量与胶凝材料用量的质量比。为方便叙述,下文中编号 S2-30-1-0.25-0.35 中各数字依次指风积沙取代率为 30%、纤维体积率为 1%、水胶比为 0.25 及砂胶比为 0.35,其余试件标注类推。

准》^[20](JGJ/T 70—2023)进行,试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm,试件两端预埋铜制收缩测头。每种配合比制作 8 组试件,一组试件不密封,在脱模后测量 1~7 d 总收缩;另外 7 组同时进行密封处理,同样在脱模后 1~7 d 每天拆封一组试件用于测量自生收缩。经过反复试验,按照材料凝结即测试收缩、脱模不致试件损坏和不致使铜制探头松动的原则,将脱模时间确定在砂浆终凝时间+20 h,最终各试件脱模时间基本在 24~29 h 之间。脱模后将试件表面擦拭干净,立即测量其初始长度,所用仪器为 BC156-300 型立式数显砂浆收缩仪,精度为 0.001 mm。对于自生收缩试件,采用真空封口机和 PET+铝箔+PE 复合密封袋进行真空密封处理,防止试件与外界进行物质交换。经试验前测定,密封试件 7 d 质量损失率为 0.000 417%,密封效果良好。收缩试件在干养室养护,温度为(20±2)℃,湿度为(60±5)%,在龄期 1~7 d 每天测试其长度,并采用式(1)计算收缩应变。

$$\epsilon_t = \frac{L_0 - L_t}{L - L_d} \tag{1}$$

式中: ϵ_t 为龄期 t 时试件的收缩率; L_0 为收缩测试开始时的长度,mm; L_t 为龄期 t 时试件的长度,mm; L 为试件的实际长度,160 mm; L_d 为两个测头埋入试件的长度之和,mm。

另外制作 13 组立方体、棱柱体和哑铃形试件,每组 3 个试件,测试其 7 d 立方体抗压强度 f_{cu} 、轴心抗压强度 f_c 、轴心抗拉强度 f_t 及极限拉应变 ϵ_{tu} ,试验参照《高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法》(JC/T 2461-2018)^[21]进行。所有试件、试验仪器及设备如图 1 所示,基本力学指标值见表 4。



图 1 试件、试验仪器及设备

Fig.1 Specimen, test instruments and equipment

表 4 基本力学性能试验结果

Table 4 The basic mechanical properties test results

配比	f_{cu}/MPa	f_c/MPa	f_t/MPa	$\epsilon_{iu}/\%$
S1	40.05	39.10	3.03	1.24
S2	41.80	41.67	3.10	1.26
S3	40.90	40.46	2.96	1.19
S4	32.40	32.45	2.00	0.32
S5	37.65	36.24	3.19	1.30
S6	31.80	27.36	2.32	0.79
S7	22.21	21.92	2.57	0.95
S8	23.21	22.90	2.50	0.92
S9	11.50	10.05	2.08	0.43
S10	10.07	9.80	2.27	0.62
S11	12.10	11.55	1.83	0.30
S12	42.70	41.80	2.78	1.06
S13	45.90	45.20	3.63	1.31

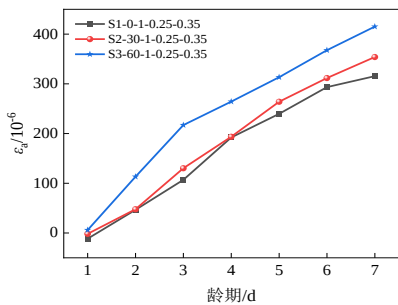
由表 4 可见,水胶比较小时材料抗压和抗拉强度均较高,水胶比较大时强度较低;水胶比越小,风

积沙取代率对强度的影响越小,水胶比为 0.25 时,风积沙取代率为 0%、30% 和 60% 的试件立方体抗压强度三者间最大相差 4.4%;而水胶比为 0.45 时,三者最大相差 20.2%。13 组试件中,力学性能最好的试件为 S13-30-1-0.25-0.55,其抗压和抗拉强度均最高。

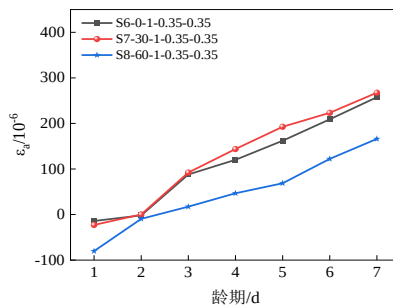
2 各因素对自生收缩性能的影响

2.1 风积沙取代率的影响

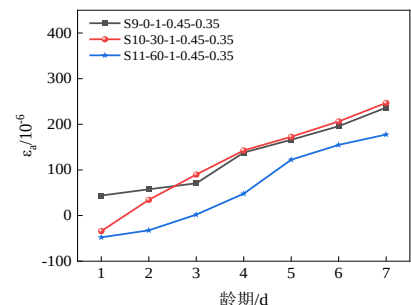
图 2 为风积沙取代率对自生收缩的影响。由图 2 可见,水胶比为 0.25 时,风积沙取代率 A_r 最高 (60%) 的试件 S3 自生收缩 ϵ_a 最大。水胶比为 0.35 或 0.45 时, A_r 为 60% 的试件其 ϵ_a 值却低于 A_r 为 0 和 30% 的试件;任一种水胶比下, A_r 为 0 和 30% 的试件 ϵ_a 均相差不多。7 d 时, S3 的 ϵ_a 值比 S1 高 31.63%, 而 S8 比 S6 低 35.5%, S11 比 S9 低 24.92%。



(a) 水胶比为 0.25



(b) 水胶比为 0.35



(c) 水胶比为 0.45

图 2 风积沙取代率对自生收缩的影响

Fig.2 The effect of aeolian sand replacement rate on autogenous shrinkage

风积沙取代率对材料收缩性能产生影响的原因有:1)风积沙细度模数小,单位体积沙粒多,粒间孔隙较多较细,使之具有多孔吸水性。水化早期会吸收水分储存于孔隙之间,随着水化反应的进行,试件内部相对湿度降低,风积沙释放水分供胶凝材料进行水化反应,起到内养护作用。当 A_r 较大且水胶比较小时,虽胶凝材料较多,但由于内部孔隙的吸水性较强、内养护作用较大,能够保证胶凝材料水化反应用水需求,水化反应较充分,引起的化学收缩较大;同时,毛细管中的水分参与水化反应而减少,毛细管张力增大,使自收缩增大。当 A_r 较大且水胶比也较大时,虽风积沙内部储存的水分较多,但由于胶凝材料较少,水化反应总量较少,化学收缩和自收缩均较小。2)风积沙的弹性模量小于石英砂,以其取代石英砂后对收缩的约束作用减小。 A_r 较大且水胶比较小时,一方面砂的约束作用较 A_r 较小的试件下降较多,另一方面水化产物较

多,风积沙不足以对较大的收缩产生有效约束,故 S3 自生收缩较大;而当 A_r 较大且水胶比也较大时,水化产物较少,风积沙对收缩有较好的约束作用,故 S3 自生收缩较小。

早期自生收缩出现负值是由于水化反应放热时试件膨胀量大于收缩量所致。

图 3、图 4 为风积沙取代率对总收缩、自生收缩占比的影响。由图 4 可见,总体来说,风积沙取代率 A_r 较高时自生收缩占比 α 值较小, A_r 较低时 α 值较高。7 d 时, S3 比 S1 的 α 高 6.84%, S8 比 S6 的 α 低 37.58%, S11 比 S9 的 α 值低 19.73%。水胶比为 0.25 时, S3 试件在前 3 d 的 α 值较高,原因是 S3 水胶比小,前 3 d 干燥收缩相对较小,充分的水化反应引起的化学收缩相对较大,故自生收缩占比较大。3 d 后水化反应大幅下降,引起的化学收缩大幅减小,虽然此时干燥收缩也减小,但减小幅度小于化学收缩,故自生收缩占比下降。

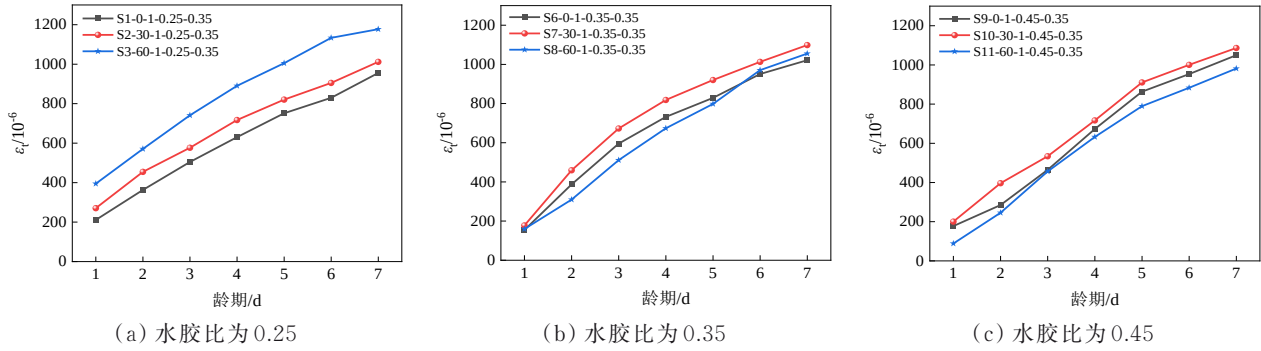


图 3 风积沙取代率对总收缩的影响

Fig.3 The effect of aeolian sand replacement rate on total shrinkage

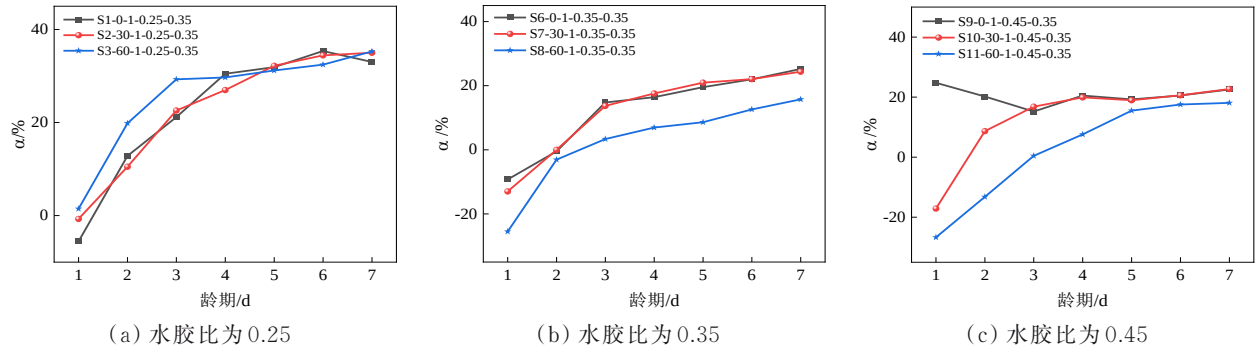


图 4 风积沙取代率对自生收缩占比的影响

Fig.4 The effect of aeolian sand replacement rate on proportion of autogenous shrinkage

2.2 PVA 纤维体积率的影响

图 5(a)为纤维体积率对自生收缩的影响。由图 5(a)可见,PVA 纤维能抑制风积沙水泥基材的自生收缩 ϵ_a ,使 ϵ_a 随纤维体积率升高而降低,试件 S2 和 S5 的 ϵ_a 值比 S4 分别降低了 28.9% 和 3.5%,S2 降幅更为显著。PVA 纤维对水泥基材自生收缩产生影响的原因有:1)纤维与基材间的胶着力和摩阻力对基材收缩有阻碍作用^[18];2)纤维中亲水基团的内养护作用促进胶凝材料水化,增大化学收缩^[13]的同时减缓毛细孔张力引起的自收缩。故 PVA 纤维对自生收缩具有正反两方面的影响,最终表现为对自

生收缩的抑制效应。

图 5(b)、(c)分别为纤维体积率对总收缩、自生收缩占比的影响。由图 5(c)可见,总收缩 ϵ_t 与自生收缩占比 α 随纤维体积率增大而降低,试件 S2 和 S5 的 ϵ_t 比 S4 分别降低 1.98% 和 9.36%, α 分别降低 1.54% 和 21.6%,原因是纤维越多,界面缝隙越多,水分蒸发散失越容易,干燥收缩占比提高,进而导致 α 降低。另外,试件 S2 和 S5 在 7 d 内 α 一直呈上升趋势,但试件 S4 后期呈下降趋势,这是因为不掺纤维的情况下不存在内养护作用,后期内部水分不足,水化反应减少,化学收缩下降,自生收缩减小。

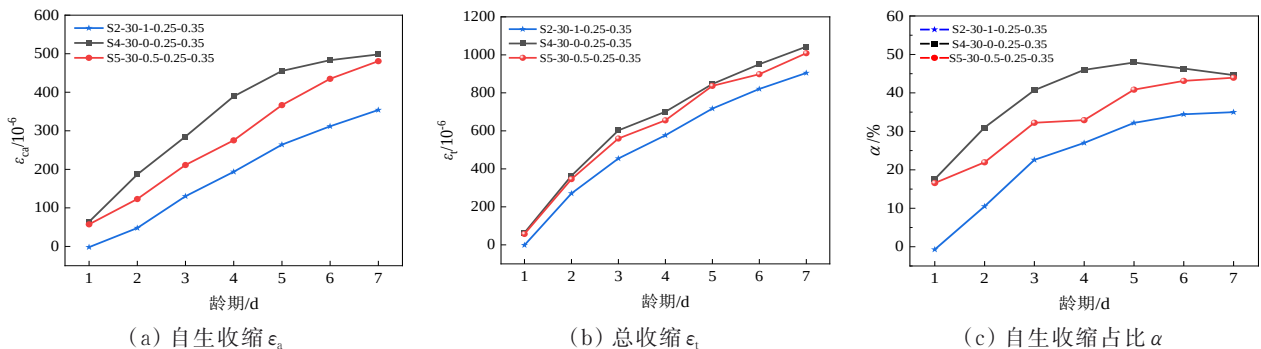


图 5 不同纤维体积率对自生收缩、总收缩的影响及自生收缩占比

Fig.5 The effect of different fiber volume ratios on autogenous shrinkage and total shrinkage, and the proportion of autogenous shrinkage

2.3 水胶比的影响

图6为水胶比对自生收缩的影响。由图6可见,水胶比为0.25时自生收缩 ϵ_a 较大,水胶比为0.35和0.45时 ϵ_a 较小,且二者相差不多。7d时,S1比S6和S9的 ϵ_a 值分别高18.37%和25.02%,S2比S7和S10的 ϵ_a 值分别高24.45%和30.31%,S3比S8和S11的 ϵ_a 值分别高60%和57.24%。这是因为水胶比为0.25时,水化反应剧烈,化学收缩较大;同时,水化反应用水使毛细管中水分减少,毛细管张

力提升,自收缩增大,当 A_r 较高时毛细管孔径减小,毛细管作用增强,自收缩增大,故自生收缩较大。对于水胶比为0.45的试件,内部水分充足,胶凝材料水化率高于水胶比为0.35的试件,使二者化学收缩相当;经过早期大量的水分蒸发散失和水化反应用水之后,后期毛细管内水分与水胶比为0.35的试件相当,由毛细管张力引起的自收缩也相当,最终二者的自生收缩相差不多。

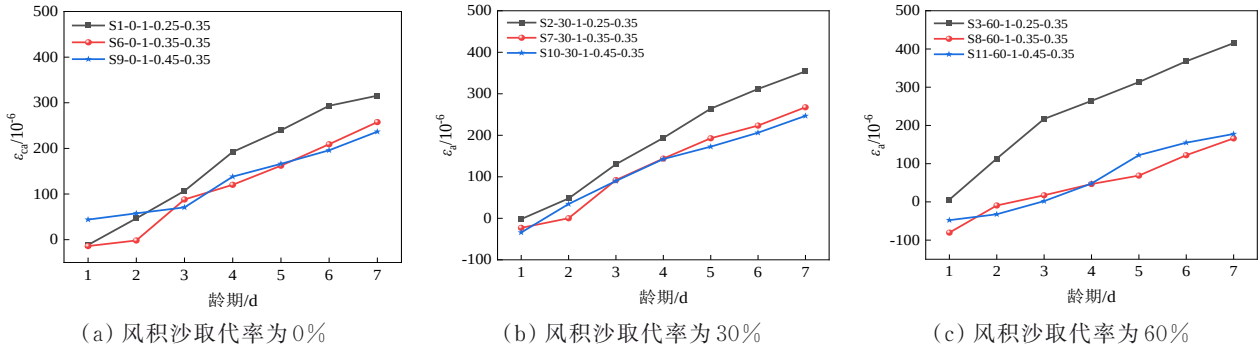


图6 水胶比对自生收缩的影响

Fig.6 The effect of water-binder ratio on autogenous shrinkage

图7和图8分别为水胶比对总收缩、自生收缩占比的影响。由图8可知,水胶比为0.25的试件自生收缩占比 α 大于其他两种配合比的试件,原因是此时自生收缩较大,但总收缩并未提高很多,故 α 较高。 A_r 为0%和30%、水胶比为0.45的试件前期 α

值大于0.35的试件,5~6d后相反;而 A_r 为60%时,内部孔隙较多,水胶比为0.45的试件前期联通孔较多,水分快速蒸发散失,干燥收缩较多, α 较小;后期水化产物增多,小孔增加,自干燥引起的自生收缩增加,使 α 增大。

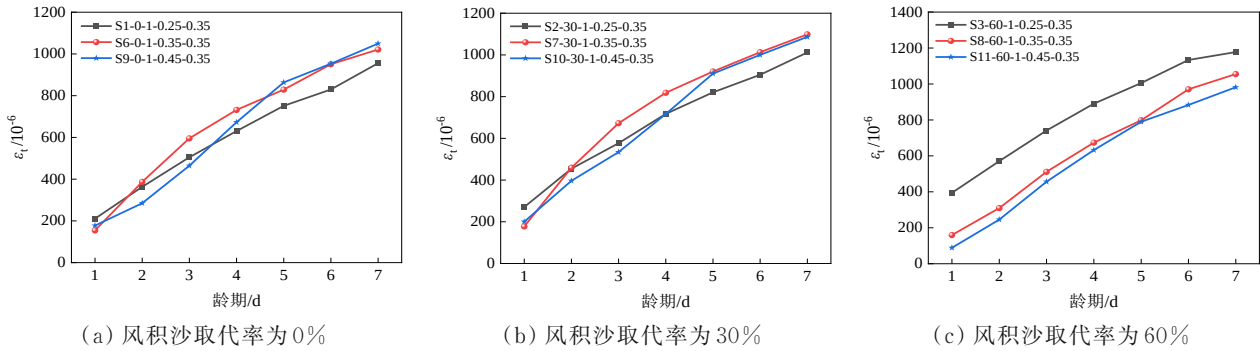


图7 水胶比对总收缩的影响

Fig.7 The effect of water-binder ratio on total shrinkage

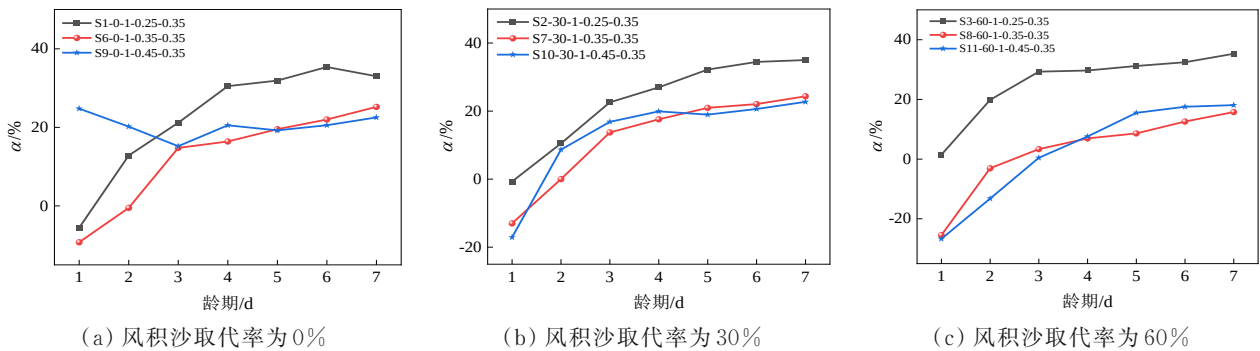


图8 水胶比对自生收缩占比的影响

Fig.8 The effect of water-binder ratio on the proportion of autogenous shrinkage

2.4 砂胶比的影响

图9(a)为砂胶比对自生收缩的影响。由图9(a)可见,自生收缩 ϵ_a 随砂胶比提高而增大,砂胶比从0.35提高到0.55,自生收缩增加31.87%。原因是砂胶比提高后,风积沙绝对含量增加,小孔增多,自收缩加大;同时,低水胶比下风积沙颗粒被胶凝

材料充分包裹,水化反应充分,化学收缩增大。图9(b)、(c)分别为砂胶比对总收缩、自生收缩占比的影响。由图9(c)可见,砂胶比越大, α 越大,除因为 ϵ_a 增大之外,砂对水泥浆体收缩的阻碍作用增强,使总收缩增幅减小,自生收缩占比增大。

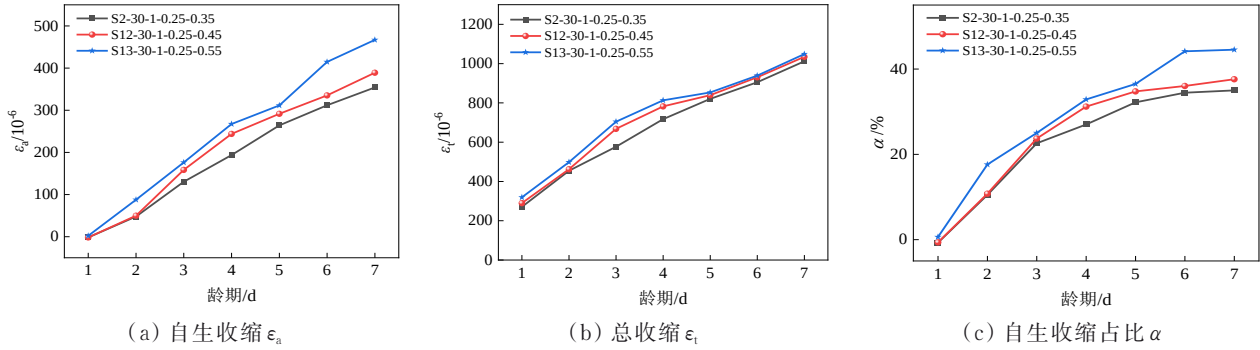


图9 不同砂胶比对自生收缩、总收缩的影响及自生收缩占比

Fig.9 The effect of different sand-binder ratios on autogenous shrinkage and total shrinkage, and the proportion of autogenous shrinkage

综上所述,若以减小收缩为目标,则S11-60-1-0.45-0.35组配合比较优,且其充分利用了风积沙,胶凝材料用量也较少,但其力学性能较差。若从力学性能、收缩性能及风积沙利用几方面综合评价,S12-30-1-0.25-0.45组的配合比较优。

3 风积沙PVA-FRCC孔隙演化特征

选取风积沙取代率 A_r 为0%、30%和60%的S1、S2、S3三组试件,分别在龄期1、2、3、7d进行低场核磁试验,以揭示 A_r 不同时孔隙特征演化对自生收缩的影响机制。将孔隙分为较小毛细孔(5~50 nm)、较大毛细孔(50~100 nm)及大孔(>100 nm)^[22],其中大孔和较大毛细孔失水不会产生张力,因此不会引起自收缩;而较小毛细孔中的水因水化反应形成弯月面,从而产生毛细孔张力,引起自收缩。

3.1 孔隙内流体饱和度

流体分为流动性较强的自由流体和流动性较弱的束缚流体,横向弛豫时间 $T_2 > 10$ ms的流体为自由流体, $T_2 \leq 10$ ms的流体为束缚流体。自由流体饱和度 S_{wf} 和束缚流体饱和度 S_{wi} 分别是自由流体和束缚流体所占孔隙体积比例,其值可间接反映水泥基材中孔隙大小, S_{wf} 高则说明大孔与较大孔多, S_{wi} 高则说明小孔多^[23]。流体饱和度的变化反映了孔隙的变化,孔隙的变化反映了水化反应进行程度,可间接反映收缩变化情况。本实验流体饱和度随龄期变化曲线如图10所示。

由图10可知,随龄期增长, S_{wf} 逐渐降低, S_{wi} 逐

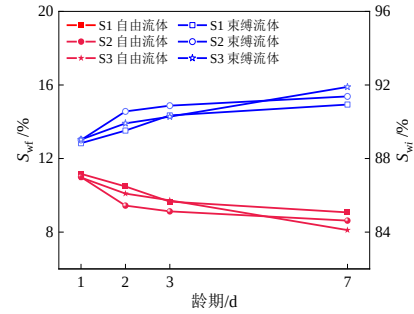


图10 流体饱和度随龄期变化曲线

Fig.10 The variation curves of fluid saturation with age

渐增大。这是因为随龄期增长,水化反应生成的固相产物填充在孔隙中,使大孔和较大孔转化为较小孔,产生较大的化学收缩;同时,孔内流体受到的毛细孔张力和层间吸附力增强,流动能力下降,部分自由水经过水化反应转化为结合水,自收缩增大。由图10还可见,流体饱和度在1~2d内变化最快,之后变化减缓,充分反映了水化反应在1~2d内最为剧烈,产生的水化产物较多,自由流体向束缚流体快速转化,之后水化反应减缓,流体饱和度的变化也减缓。与之对应,图2自生收缩在1~2d内增长迅速,之后增长速度减缓,收缩整体变化趋势与流体饱和度变化相吻合。

A_r 为60%的S3试件在7d内流体饱和度的变化较均匀,原因是S3试件风积沙取代率较大,其多孔吸水性的内养护作用较强,在7d内能不断释放毛细孔中的水分供水化反应进行,故水化产物不断产生,使得流体饱和度的变化较均匀。 A_r 为30%的S2试件在1~2d内流体饱和度变化最快,之后速度

减缓,原因是风积沙粒径小、颗粒均匀且表面光滑,在其取代率适中、水胶比较低的情况下,水泥浆能够充足、均匀地附着在风积沙颗粒表面,提高了水化反应效率,加快流体形态转变。但由于其风积沙取代率不大,内养护作用较弱,后期内部水分减少后不能持续为水化反应提供水分,水化产物减少,故流体饱和度后期变化较小。S3 试件 7 d 时 S_{wf} 最小、 S_{wi} 最大,说明其内部孔隙被大量水化产物填充,孔径很小,约束着内部水分使其不能自由流动,产

生的化学收缩与自收缩均较大,流体饱和度的变化较好地印证了图 2(a)中收缩发生发展的规律。

3.2 孔隙率与孔径分布

孔隙率与孔径分布能反映水泥基材水化反应程度,表明毛细孔张力大小,从而可间接反映自生收缩情况。图 11 为材料在不同龄期的孔径分布曲线,曲线与横坐标包围的面积反映了材料内部的孔隙率,孔径区间与曲线包围的面积越大,该孔径区间的孔隙越多。

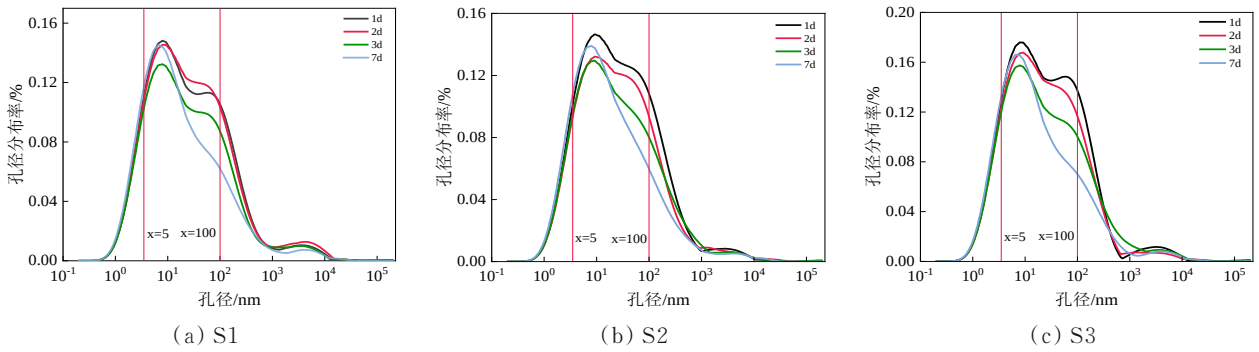


图 11 S1、S2、S3 孔径分布曲线

Fig.11 S1, S2, S3 pore size distribution curves

由图 11 可见:1)3 组试件最可几孔径基本均在 10 nm 左右,孔隙属于毛细孔。可见,由于风积沙颗粒粒径小,使得掺风积沙的 PVA-FRCC 孔径整体较小。2)1~7 d 的各曲线与横坐标包围面积依次减小,说明随龄期增长,材料内部孔隙率逐渐减小。1 d 时 S1、S2 和 S3 试件大于 100 nm 的孔隙率分别是 1.87%、2.13% 及 1.87%,7 d 时上述数值分别为 1.31%、1.36% 及 1.12%。原因是随水化反应进行,孔隙逐渐被水化产物填充,大孔向小孔转化,并有部分连通微孔完全被填充,使化学收缩增大,孔隙减小引起的毛细管作用增强,自收缩也增大。3)龄期 1~3 d 的各曲线达到峰点后,在 50~100 nm 区间出现平台,说明集中在此区间的较大孔孔隙率相差不多;但 7 d 时曲线在 50~150 nm 区间的平台不明显,原因是在 3~7 d 内水化反应生成物的填充效应使大孔和较大孔孔隙率下降较多。4)随风积沙取代率 A_f 提高,曲线峰值向左偏移,表明随 A_f 提高,单位体积内骨料颗粒增多,诱导材料产生更多小孔,小孔径孔隙率增大。此时由于小孔较多,毛细管张力增大,自生收缩增加,此性状很好地解释了图 2(a)中所示收缩试验结果。

4 早期自生收缩预测模型

早期自生收缩模型有 E. Tazawa 模型、Hashida-Yamazaki 模型及 Bentz 模型等^[24-28]。其中,Hashida-

Yamazaki^[25]模型只考虑了温度变化对收缩的影响;Bentz^[27]模型需计算浆体饱和程度等系数,实验较为复杂;E. Tazawa^[24]模型考虑了水胶比、水泥类型及温度变化等较多因素影响,对于混凝土材料自生收缩预测较精确。笔者采用 E. Tazawa 模型进行计算并与实验值进行对比,结果如图 12 所示。

在图 12 实验值与 E. Tazawa 模型曲线对比中,用 E. Tazawa 模型对实验数据进行拟合分析可得,3 种情况 R^2 分别为 0.958 45、0.909 85 和 0.157 59,可见第 3 种情况与拟合值相关性较差。原因在于 E. Tazawa 模型是关于混凝土自生收缩的预测模型,早期水化反应量较实验中掺风积沙的 PVA-FRCC 要小;另外,原模型未考虑风积沙取代率及纤维体积率等其他因素的影响,导致其用于掺风积沙的 PVA-FRCC 自生收缩计算时精度较差。故考虑风积沙取代率、纤维体积率、水胶比及砂胶比等多因素影响,在参考已有模型的基础上建立掺风积沙的 PVA-FRCC 早期自生收缩模型。模型建立的基本思路为:先只考虑水胶比的影响、不考虑时间影响,给出自生收缩基值 ϵ_{as0} ,再采用收缩发展系数 $\beta_a(t)$ 考虑时间和其他因素的影响,得出最终自生收缩值,模型计算式见式(2)~式(9)。

$$\epsilon_{as}(t) = \epsilon_{as0} \left(\frac{W}{C} \right) \beta_a(t) \quad (2)$$

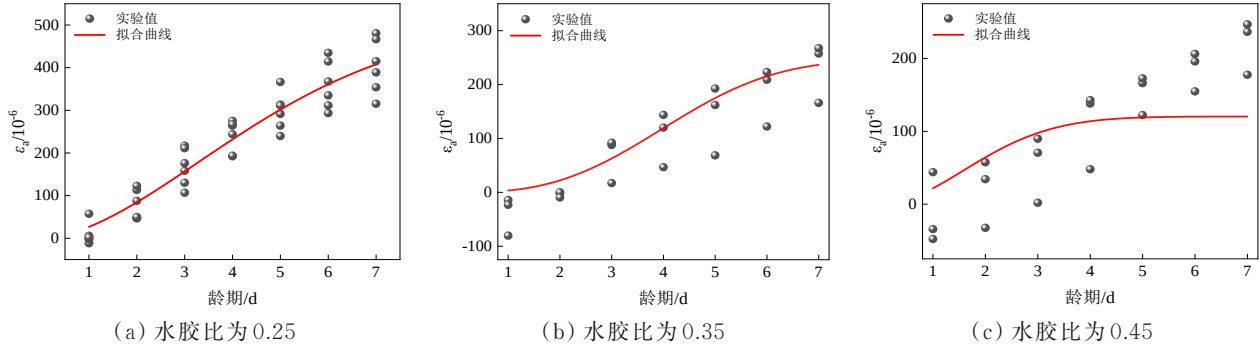


图 12 实验值与 E.Tazawa 模型曲线对比

Fig.12 Comparison of fitting curves with experimental values and E.Tazawa model

$$\epsilon_{as0}\left(\frac{W}{C}\right) = 3070e^{-7.2\left(\frac{W}{C}\right)} \times \frac{1}{10\left(\frac{W}{C}\right)} + 210.4 \quad (3)$$

$$\beta_a(t) = 1 - k_1 e^{k_2[-a(t-t_0)^5]} - k_3 \quad (4)$$

$$k_1 = 0.051V_f^4 - 0.89V_f^3 - 0.09V_f + 1.48 \quad (5)$$

$$k_2 = 0.02A_r^{2.2} - 0.21A_r^{1.2} - 0.02A_r + 0.3 \quad (6)$$

$$k_3 = 0.18\left(\frac{S}{B}\right)^2 - 0.16\left(\frac{S}{B}\right) - 0.26 \quad (7)$$

$$a = -0.77\left(\frac{W}{C}\right)^2 + 0.34 \quad (8)$$

$$b = \frac{3e^{140\left(\frac{W}{C}\right)^{0.2}}}{10\left(\frac{W}{C}\right)} \quad (9)$$

式中: $\epsilon_{as}(t)$ 为龄期为 t 时试件的自生收缩; $\epsilon_{as0}\left(\frac{W}{C}\right)$ 为自生收缩基值; $\frac{W}{C}$ 为水胶比; $\beta_a(t)$ 为自生收缩随龄期发展系数; t 为养护龄期, d; t_0 为初始测试龄期, d; $(t-t_0)$ 取 1~7 d; k_1 为纤维体积率影响系数; V_f 为纤维体积率; k_2 为风积沙取代率影响系数; A_r 为风积沙取代率; k_3 为砂胶比影响系数; $\frac{S}{B}$ 为砂胶比; a 、 b 为水胶比影响系数。

图 13 为实验值与模型拟合曲线对比, 由图 13 可得, 3 种情况的 R^2 分别为 0.91、0.98 和 0.99, 实验值与模型计算值相关性较好。总体来说, 模型预测值偏上限, 这是考虑到影响自生收缩的因素较多, 且各因素间相互关联、错综复杂, 故本文模型预测值取偏上限的值更为合理。

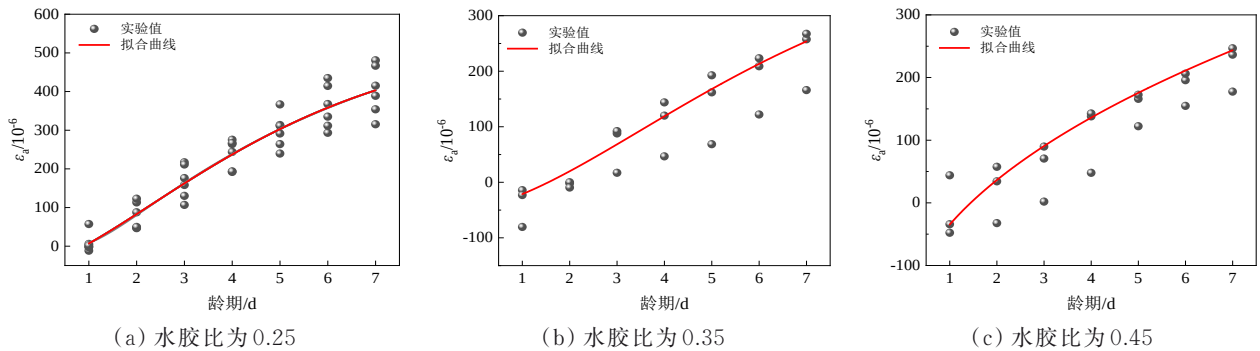


图 13 实验值与模型拟合曲线对比

Fig.13 Comparison of fitting curves between experimental values and the model

5 结论

1) 水胶比较小时, 风积沙取代率越高, 自生收缩越大; 水胶比较大时, 风积沙取代率的影响相反。水胶比为 0.25 时, A_r 为 60% 的试件比未掺风积沙的试件自生收缩提高 31.63%; PVA 纤维的内养护作用降低了自生收缩, 最大降幅为 28.9%; 水胶比为 0.35 和 0.45 的试件自生收缩相差不多, 但水胶

比降低到 0.25 时自生收缩明显增大, 最大增幅为 60%; 砂胶比提高使自生收缩增大, 但总收缩变化较小。

2) 从力学性能、收缩性能及风积沙利用率几方面综合评价, 当风积沙取代率和 PVA 纤维体积率适中、水胶比较小、砂胶比较大时, 材料配合比最优。

3) 流体饱和度在最初 1~2 d 内变化较快; 掺风

积沙的 PVA-FRCC 整体孔径较小,试件最可几孔径在 10 nm 左右;风积沙取代率提高后,小孔的孔隙率增大,使毛细管作用增强,自收缩增大。

4)建立的掺风积沙 PVA-FRCC 早期自生收缩预测模型计算值与实验值吻合良好,可为掺风积沙的 PVA-FRCC 早期自生收缩预测提供参考。

参考文献

- [1] 高玉生,程汝恩,李英海,等.中国沙漠风积沙工程性质研究及工程应用[M].北京:中国水利水电出版社,2013:244.
GAO Y S, CHENG R E, LI Y H, et al. Study on engineering properties of aeolian sand in China desert and its engineering application [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013: 244. (in Chinese)
- [2] 申向东,邹欲晓,薛慧君,等.风积沙掺量对冻融-碳化耦合作用下混凝土耐久性的影响[J].农业工程学报,2019,35(2):161-167.
SHEN X D, ZOU Y X, XUE H J, et al. Effect of aeolian sand content on durability of concrete under freezing-thawing-carbonization coupling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 161-167. (in Chinese)
- [3] 邓焙元,刘清,韩风霞,等.风积砂混凝土力学性能研究综述[J].混凝土,2021(6):47-52.
DENG B Y, LIU Q, HAN F X, et al. Review of research on mechanics and durability of aeolian sand concrete [J]. Concrete, 2021(6): 47-52. (in Chinese)
- [4] YANG Y Z, YANG E H, LI V C. Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(2): 176-183.
- [5] 徐世烺,李贺东.超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J].土木工程学报,2008,41(6):45-60.
XU S L, LI H D. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 45-60. (in Chinese)
- [6] 张君,韩宇栋,高原.混凝土自身与干燥收缩一体化模型及其在收缩应力计算中的应用[J].水利学报,2012,43(增刊1):13-24.
ZHANG J, HAN Y D, GAO Y. Integrative model of autogenous and drying shrinkages and its application in calculation of shrinkage-induced stresses in early-age concrete structures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(Sup 1): 13-24. (in Chinese)
- [7] 王丹,车佳玲,舒宏博,等.沙漠砂-水泥基材的收缩特性[J].材料科学与工程学报,2021,39(6):1021-1027.
WANG D, CHE J L, SHU H B, et al. Shrinkage properties of desert sand cementitious materials [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2021, 39(6): 1021-1027. (in Chinese)
- [8] 李根峰,申向东,吴俊臣,等.风积沙混凝土收缩变形的试验研究[J].硅酸盐通报,2016,35(4):1213-1218.
LI G F, SHEN X D, WU J C, et al. Experimental study on shrinkage deformation of aeolian sand concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(4): 1213-1218. (in Chinese)
- [9] 宋良瑞,李百毅.风积沙掺量对水泥稳定级配碎石力学性能与耐久性的影响[J].硅酸盐通报,2020,39(5):1421-1429.
SONG L R, LI B Y. Effect of aeolian sand content on mechanical properties and durability of cement stabilized graded macadam [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(5): 1421-1429. (in Chinese)
- [10] 李根峰,申向东,吴俊臣,等.风积沙混凝土早期自收缩变形的影响因素研究及数值模拟[J].硅酸盐通报,2018,37(3):996-1002.
LI G F, SHEN X D, WU J C, et al. Experimental study and numerical simulation on the influence factors of self-shrinkage deformation of aeolian sand concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(3): 996-1002. (in Chinese)
- [11] 叶建雄,廖佳庆,杨长辉.细集料对高性能混凝土早期塑性收缩开裂的影响[J].重庆大学学报,2009,32(2):168-172.
YE J X, LIAO J Q, YANG C H. Influence of fine aggregate on initial shrinkage of high performance concrete [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(2): 168-172. (in Chinese)
- [12] 王俊颜,庄云芳,刘非凡,等.减缩剂和PVA纤维对超轻水泥复合材料收缩开裂行为的影响[J].建筑材料学报,2022,25(7):744-750.
WANG J Y, ZHUANG Y F, LIU F F, et al. Effect of shrinkage reduce admixture and PVA fiber on shrinkage cracking behaviors of ultra lightweight cement composite [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7): 744-750. (in Chinese)
- [13] 王玉清,刘潇,刘曙光.PVA-FRCC收缩性能试验研究[J].建筑材料学报,2020,23(6):1289-1296.
WANG Y Q, LIU X, LIU S G. Experimental study on shrinkage behaviors of PVA-FRCC [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6): 1289-1296. (in Chinese)
- [14] 张媛媛,毛倩瑾,李松涛,等.高吸水树脂作为混凝土内养护材料的研究进展[J].硅酸盐学报,2022,50(11):3009-3020.
ZHANG Y Y, MAO Q J, LI S T, et al. Research progress on super absorbent polymer as internal curing materials of concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(11): 3009-3020. (in Chinese)
- [15] 张国防,陆小培,和瑞,等.高吸水性聚合物对水泥砂浆长期收缩性能的影响[J].建筑材料学报,2018,21

- (3): 472-477.
- ZHANG G F, LU X P, HE R, et al. Influence of super water-absorbing polymer on the long-term shrinkage of cement mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(3): 472-477. (in Chinese)
- [16] ZHU L L, ZHENG M L, ZHANG W, et al. Evolution and mechanism on shrinkage of high-performance concrete with full aeolian sand cured by superabsorbent polymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 400: 132846.
- [17] 韩松, 安明喆, 郭瑞, 等. 陶粒内养护高性能混凝土抗裂性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(5): 742-748.
- HAN S, AN M Z, GUO R, et al. Crack resistance of ceramsite self-curing high performance concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(5): 742-748. (in Chinese)
- [18] WANG Q, XIONG Z H, ZHANG J, et al. Impact of polyvinyl alcohol fiber on the full life-cycle shrinkage of cementitious composite [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 63: 105463.
- [19] MENG W N, KHAYAT K H. Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(4): 04018030.
- [20] 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2023 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.
- Standard for test method of basic properties of construction mortar: JGJ/T 70—2023 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023. (in Chinese)
- [21] 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法: JC/T 2461—2018 [S]. 北京: 建材工业出版社, 2018.
- Standard test method for the mechanical properties of ductile fiber reinforced cementitious composites: JC/T 2461—2018 [S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2018. (in Chinese)
- [22] 李贞. 再生细骨料对水泥砂浆收缩性能的影响及作用机制 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- LI Z. Influence of recycled fine aggregates on shrinkage of cement mortar and its mechanism [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [23] 薛慧君, 申向东, 邹春霞, 等. 基于NMR的风积沙混凝土冻融孔隙演变研究[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(2): 199-205.
- XUE H J, SHEN X D, ZOU C X, et al. Freeze-thaw pore evolution of aeolian sand concrete based on nuclear magnetic resonance [J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(2): 199-205. (in Chinese)
- [24] TAZAWA E I, MIYAZAWA S. Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(8): 1633-1638.
- [25] HASHIDA H, YAMAZAKI N. Deformation composed of autogenous shrinkage and thermal expansion due to hydration of high-strength concrete and stress in reinforced structures [C]//The Third International Research Seminar in Lund, 2002: 77-101.
- [26] CHAUBE R, KISHI T, MAEKAWA K. Modelling of concrete performance: Hydration, microstructure and mass transport [M]. London: CRC Press, 1999.
- [27] BENTZ D P, GARBOCZI E J, QUENARD D A. Modelling drying shrinkage in reconstructed porous materials: Application to porous Vycor glass [J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 1998, 6(3): 211.
- [28] VAN BREUGEL K. Numerical modelling of volume changes at early ages-Potential, pitfalls and challenges [J]. *Materials and Structures*, 2001, 34(5): 293-301.

(编辑 XXX)