

引文格式:蒋建华,卢宸宸,师效哲,等. 纳米  $\text{SiO}_2$  改性粉煤灰混凝土力学性能及吸水特性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(3): 10-17.

JIANG Jianhua, LU Chenchen, SHI Xiaozhe, et al. Study on mechanical properties and water absorption characteristics of fly ash concrete modified by nano- $\text{SiO}_2$  [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(3): 10-17.

DOI:10.19815/j.jace.2022.08071

# 纳米 $\text{SiO}_2$ 改性粉煤灰混凝土力学性能及吸水特性研究

蒋建华, 卢宸宸, 师效哲, 陈林林, 周家冰

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210024)

**摘要:**为了探索粉煤灰混凝土的高性能,开展了纳米  $\text{SiO}_2$  改性粉煤灰混凝土的力学和吸水试验,研究了粉煤灰取代率和纳米  $\text{SiO}_2$  掺量对混凝土力学性能(抗压强度、劈拉强度、动弹性模量)和吸水特性的影响。结果表明:粉煤灰混凝土的力学性能指标均随纳米  $\text{SiO}_2$  掺量的增加先增大后减小;当纳米  $\text{SiO}_2$  掺量从 0% 增加至 2% 时,粉煤灰混凝土 28 d 抗压强度、劈拉强度和动弹性模量分别提高了 12.90%、7.53% 和 5.85%,可见纳米  $\text{SiO}_2$  对抗压强度影响更显著;当粉煤灰取代率从 10% 增加至 30% 时,混凝土 28 d 抗压强度、劈拉强度和动弹性模量分别降低了 7.24%、2.61% 和 9.87%,可见粉煤灰对动弹性模量影响更显著;随纳米  $\text{SiO}_2$  掺量增加,粉煤灰混凝土的毛细吸水系数呈现出先下降后上升的趋势;随粉煤灰取代率增加,混凝土毛细吸水系数增大,且纳米  $\text{SiO}_2$  对混凝土毛细吸水系数影响也越显著;粉煤灰取代率和纳米  $\text{SiO}_2$  掺量对混凝土力学性能与毛细吸水系数之间的相关性无显著影响,混凝土抗压强度、劈拉强度以及动弹性模量与毛细吸水系数均呈现负相关性,其中抗压强度与毛细吸水系数相关性最好。

**关键词:**粉煤灰混凝土;纳米  $\text{SiO}_2$ ;力学性能;吸水特性;毛细吸水系数

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)03-0010-08

## Study on mechanical properties and water absorption characteristics of fly ash concrete modified by nano- $\text{SiO}_2$

JIANG Jianhua, LU Chenchen, SHI Xiaozhe, CHEN Linlin, ZHOU Jiabing

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to explore the high performance of fly ash concrete, the mechanical and water absorption tests of nano- $\text{SiO}_2$  modified fly ash concrete were carried out. The effects of replacement rate of fly ash and nano- $\text{SiO}_2$  content on the mechanical properties (compressive strength, splitting tensile strength and dynamic elastic modulus) and water absorption characteristics of concrete were studied. The results show that the mechanical properties of fly ash concrete increase first and then decrease with the increase of nano- $\text{SiO}_2$  content. When the nano- $\text{SiO}_2$  content increases from 0% to 2%, the 28 d compressive strength, splitting tensile

strength and dynamic elasticity modulus of fly ash concrete increase by 12.90%, 7.53% and 5.85%, respectively. Therefore, nano-SiO<sub>2</sub> has a more significant impact on the compressive strength. When the replacement rate of fly ash increases from 10% to 30%, the 28 d compressive strength, splitting tensile strength and dynamic elastic modulus of concrete decrease by 7.24%, 2.61% and 9.87%, respectively, so the influence of fly ash on the dynamic elastic modulus is more significant. With the increase of nano-SiO<sub>2</sub> content, the capillary water absorption coefficient of fly ash concrete shows a trend of first decreasing and then increasing. The capillary water absorption coefficient of concrete increases with the increase of replacement rate of fly ash. The higher the replacement rate of fly ash, the more significant the influence of nano-SiO<sub>2</sub> on the capillary water absorption coefficient of concrete. The replacement rate of fly ash and the content of nano-SiO<sub>2</sub> have no significant influence on the correlation between the mechanical properties of concrete and the capillary water absorption coefficient. The compressive strength, splitting tensile strength, and dynamic elastic modulus of concrete have negative correlation with the capillary water absorption coefficient, and the compressive strength has the best correlation with the capillary water absorption coefficient.

**Key words:** fly ash concrete; nano-SiO<sub>2</sub>; mechanical property; water absorption characteristic; capillary water absorption coefficient

**Author resume:** JIANG Jianhua(1982-), male, PhD, associate professor, E-mail:jjhzhx@hhu.edu.cn.

## 0 引言

随着中国基础设施建设的不断发展,建筑物中水泥用量日益增长,然而水泥混凝土的使用会带来大量的温室气体和粉尘污染。与此同时,中国用煤量巨大,煤在燃烧后产生大量粉煤灰,如不加控制和处理,将会污染环境,影响生态。因此,高效利用粉煤灰是实现混凝土材料绿色低碳的重要途径之一。

现有的工程实践与研究表明,在混凝土中掺入粉煤灰,会导致混凝土早期强度降低<sup>[1]</sup>,掺量过高时会降低水化产物的密实度,导致混凝土吸水性增大<sup>[2]</sup>。因此,为了提高粉煤灰混凝土的利用水平,对粉煤灰混凝土进行改性十分必要。纳米 SiO<sub>2</sub> 粉体因其特殊的表面与界面效应以及来源广泛、经济性好等特征,成为目前纳米混凝土研究中最常见的纳米改性剂<sup>[3]</sup>。纳米 SiO<sub>2</sub> 可以对混凝土微观结构改性,有效改善孔径分布,降低中小孔隙向大孔隙变化的概率<sup>[4-7]</sup>。Zhang 等<sup>[8]</sup>的研究表明,在高掺量粉煤灰或矿渣的水泥浆体中加入 SiO<sub>2</sub> 可以加快水泥和矿渣的水化速率。邓永刚等<sup>[9-10]</sup>研究发现,在混凝土中加入适量的纳米 SiO<sub>2</sub>,其抗拉、轴压强度及延性均提高。肖建庄等<sup>[11]</sup>发现复掺纳米 SiO<sub>2</sub> 和粉煤灰能够补偿再生混凝土由粉煤灰引起的早期强度降低。此外,纳米 SiO<sub>2</sub> 的掺入可以提高混凝土的抗碳化和抗氯离子渗透性能<sup>[12-13]</sup>、降低吸水率<sup>[14]</sup>。

从上述研究可以发现,基于纳米材料的混凝土改性已经成为当前混凝土材料领域的一大研究热点。目前关于纳米材料对不同混凝土改性效果的差异性分析研究还不足。本文针对纳米 SiO<sub>2</sub> 材料,通过开展混凝土力学和吸水试验,研究分析纳米 SiO<sub>2</sub> 对不同粉煤灰取代率混凝土的改性效果及其最佳掺量。研究成果期望为纳米 SiO<sub>2</sub> 改性粉煤灰混凝土的工程应用提供一定的技术支持和理论依据。

## 1 试验方案

### 1.1 原材料

水泥为 P.O42.5 普通硅酸盐水泥;粗骨料采用粒径 5~25 mm 的碎石;细骨料为河砂,细度模数为 2.7;水为实验室自来水;本试验中的减水剂为 Q8011HPWR 液体标准型高效能减水剂;粉煤灰属于 I 级 F 类,质量符合《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2017)中的规定;纳米 SiO<sub>2</sub> 粉末由贵皇金属材料有限公司提供,平均粒径为 20 nm,纯度为 99.99%。水泥和粉煤灰的主要化学成分如表 1 所示。

### 1.2 试件制备

力学试验和吸水试验均采用边长为 100 mm 的立方体试块,水胶比均为 0.40,试件配合比如表 2 所示。试验中考虑了 3 种粉煤灰取代率(10%、20%、30%)和 4 种纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量(0%、1%、2%、

表 1 胶凝材料成分

Table 1 Composition of cementitious materials

材料	各成分质量分数/%									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	烧失量
水泥	18.57	5.40	2.84	0.28	52.82	1.16	2.59	0.45	0.20	15.59
粉煤灰	45.70	24.60	6.55	1.86	4.87		2.10			

表 2 混凝土试件配合比

Table 2 Mixture ratio of concrete specimen

试件编号	各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )							数量/个
	水	水泥	细骨料	粗骨料	粉煤灰	纳米 SiO <sub>2</sub>	减水剂	
S0F10	180	405.0	655	1 165	45	0.0	1.8	9
S1F10	180	400.5	655	1 165	45	4.5	1.8	9
S2F10	180	396.0	655	1 165	45	9.0	1.8	9
S3F10	180	391.5	655	1 165	45	13.5	1.8	9
S0F20	180	360.0	655	1 165	90	0.0	1.8	21
S1F20	180	355.5	655	1 165	90	4.5	1.8	21
S2F20	180	351.0	655	1 165	90	9.0	1.8	21
S3F20	180	346.5	655	1 165	90	13.5	1.8	21
S0F30	180	315.0	655	1 165	135	0.0	1.8	9
S1F30	180	310.5	655	1 165	135	4.5	1.8	9
S2F30	180	306.0	655	1 165	135	9.0	1.8	9
S3F30	180	301.5	655	1 165	135	13.5	1.8	9

3%)。试件编号中 SF 代表既有纳米 SiO<sub>2</sub> 又有粉煤灰,数字表示材料掺量(质量分数)。纳米 SiO<sub>2</sub> 改性粉煤灰混凝土制作方法:先将纳米 SiO<sub>2</sub>、大部分水和减水剂(为确保混凝土坍落度满足试验要求,同时为避免减水剂含量不同的影响,统一取减水剂含量为 1.8 kg·m<sup>-3</sup>)人工高速搅拌 3 min 成混合溶液;再与水泥、粉煤灰、集料、剩余水一起倒入强制式搅拌机中,高速搅拌 10 min;然后将混凝土倒入模具中,振捣 1~2 min,抹平后放置于室内。混凝土试件浇筑 24 h 后脱模,在相对湿度不低于 95%、温度(20±2)℃的环境下养护。试验共设计了 12 种工况,其中粉煤灰取代率 10%和 30%的工况分别制备 6 个试件进行 28 d 养护龄期的力学试验;粉煤灰取代率 20%的工况制备 18 个试件分别进行 7、14、28 d 养护龄期的力学试验;同时,每种工况制备 3 个试件进行吸水试验。

1.3 试验方法

1.3.1 力学性能试验方法

(1)抗压强度及劈拉强度测试

抗压强度作为混凝土的基本指标,反映混凝土实际的受力性能。本文依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019),开展混凝土立方体抗压强度与劈拉强度测试;两者数据均为实

测值乘以尺寸换算系数 0.95 求得。

(2)动弹性模量测定

本试验采用超声法测量混凝土的动弹性模量。首先,利用超声测试仪通过对测法测量混凝土试件的超声声时  $t_u$ ;然后,结合混凝土立方体试块的边长  $l$  计算混凝土内超声波速  $v$ , $v=l/t_u$ ;最后,运用公式(1)计算得到混凝土的动弹性模量<sup>[15]</sup>。

$$E_d=v^2\rho\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu}$$

(1)

式中: $E_d$  为混凝土动弹性模量; $\rho$  为混凝土密度; $\mu$  为混凝土试件泊松比,本文统一取 0.2。

1.3.2 吸水试验方法

首先将待测混凝土试件放置在电热恒温干燥箱(105℃)内烘干至恒重,测试此时混凝土试件的质量并记为  $M_0$ ;混凝土烘干后,除测试面外的其余 5 个面用铝箔胶带密封;然后将混凝土试件固定在水槽底部的圆柱体支架上进行吸水,测试面向下,水面高于混凝土测试面 3 mm 左右,水温控制在(20±2)℃。为研究混凝土早期吸水特性,试件每隔 1 h 称重一次,称取 8 次,随后每隔 8 h 称取一次质量,连续测 2 次,最后每隔 24 h 称取一次质量,连续测 3 次。将吸水过程中每次测得的试件质量记作  $M_t$ ,则吸水时间  $t$  对应的混凝土累积吸水量  $\Delta M_t=M_t-M_0$ (1 h≤ $t$ ≤96 h)。同一工况吸水量的代表值由 2

个试件吸水量的平均值计算得到。

## 2 力学性能试验结果与分析

### 2.1 纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量对粉煤灰混凝土抗压强度的影响

粉煤灰混凝土抗压强度随纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量  $N_s$  的变化如图 1 所示。图 1(a)显示了粉煤灰取代率  $F$  为 20% 时不同养护龄期(7、14、28 d)的混凝土立方体抗压强度;图 1(b)显示了不同粉煤灰取代率混凝土的 28 d 立方体抗压强度。

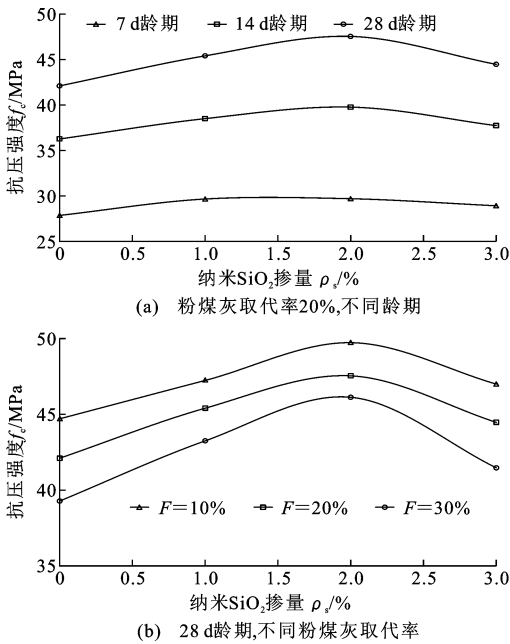


图 1 混凝土立方体抗压强度随纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量的变化

Fig. 1 Change of cube compressive strength of concrete with content of nano-SiO<sub>2</sub>

由图 1 可知,与普通粉煤灰混凝土相比,纳米 SiO<sub>2</sub> 的掺入提高了混凝土抗压强度,且粉煤灰混凝土的抗压强度随纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量的增加先增大后降低,在  $N_s$  为 2% 左右时达到最大。掺入纳米 SiO<sub>2</sub> 后,粉煤灰和纳米 SiO<sub>2</sub> 均与水泥水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生二次水化反应,生成更多 C—S—H 凝胶,使得混凝土微观结构更致密(图 2);如果纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量过大(本试验中大于 2%),由于纳米 SiO<sub>2</sub> 吸水性强,混凝土容易收缩产生微裂缝,同时纳米 SiO<sub>2</sub> 团聚影响水化反应的进行,从而降低了混凝土的密实性<sup>[16]</sup>。针对不同养护龄期的混凝土,当  $N_s$  从 0% 分别增加至 1%、2% 和 3% 时,粉煤灰混凝土 7 d 抗压强度分别提高了 6.46%、6.57% 和 3.80%;14 d 抗压强度分别提高了 6.15%、9.65% 和 4.03%;28 d 抗压强度分别提高了 7.84%、12.90%

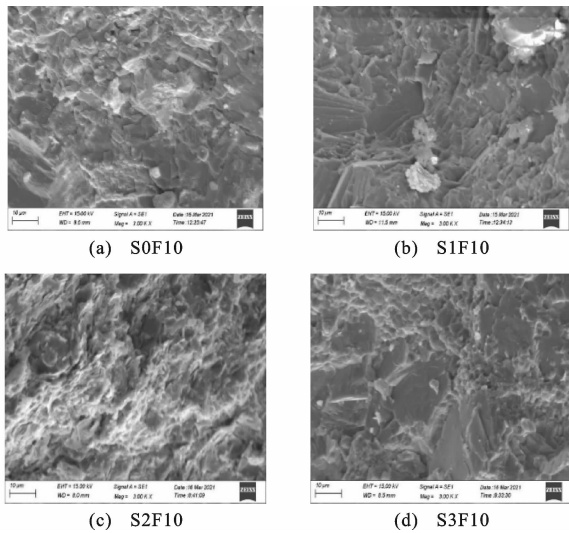


图 2 养护龄期 28 d 粉煤灰混凝土的扫描电镜图

Fig. 2 SEM of fly ash concrete with curing age of 28 d

和 5.63%。由此可见,纳米 SiO<sub>2</sub> 对粉煤灰混凝土 28 d 抗压强度增强效果最为显著。这主要是因为粉煤灰活性低、早期水化缓慢,随着养护龄期的增长,粉煤灰的活性效应才不断显现<sup>[17]</sup>。

针对不同粉煤灰取代率  $F$  的混凝土,当  $N_s$  从 0% 分别增加至 1%、2% 和 3% 时,  $F=10\%$  的混凝土 28 d 抗压强度分别提高了 5.66%、11.23% 和 5.12%;  $F=20\%$  的混凝土 28 d 抗压强度分别提高了 7.84%、12.90% 和 5.63%;  $F=30\%$  的混凝土 28 d 抗压强度分别提高了 10.11%、17.64% 和 5.58%。可见,在粉煤灰混凝土中添加纳米 SiO<sub>2</sub> 可以降低高掺粉煤灰对抗压强度的不利影响,且粉煤灰取代率越大,纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量对抗压强度的影响越显著。

### 2.2 纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量对粉煤灰混凝土劈拉强度的影响

粉煤灰混凝土劈拉强度随纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量的变化如图 3 所示。图 3(a)显示了粉煤灰取代率为 20% 时不同养护龄期(7、14、28 d)的混凝土劈拉强度;图 3(b)显示了不同粉煤灰取代率混凝土的 28 d 劈拉强度。

由图 3 可知,随纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量的增加,混凝土的劈拉强度与抗压强度呈现相似的变化趋势,即先上升后下降,在  $N_s$  为 2% 左右时达到最大。针对养护龄期的不同,当  $N_s$  从 0% 分别增加至 1%、2% 和 3% 时,粉煤灰混凝土 7 d 劈拉强度分别提高了 7.62%、15.24% 和 7.62%;14 d 劈拉强度分别提高了 10.86%、15.02% 和 9.90%;28 d 劈拉强度分别提高了 6.75%、7.53% 和 3.38%。说明纳米 SiO<sub>2</sub>

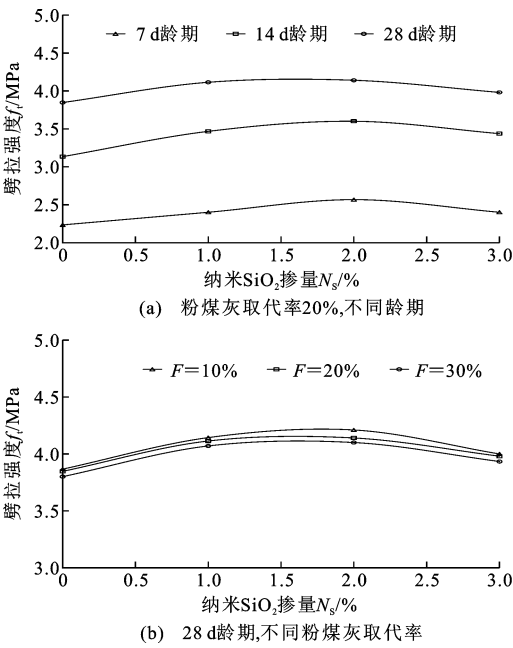


图3 混凝土劈拉强度随纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量的变化  
Fig. 3 Change of splitting tensile strength of concrete with content of nano-SiO<sub>2</sub>

的掺入对混凝土早期抗拉强度影响更显著。复掺纳米 SiO<sub>2</sub> 和粉煤灰混凝土的劈拉强度高于单掺粉煤灰混凝土。对于不同粉煤灰取代率  $F$  的混凝土,当  $N_s$  从 0% 分别增加至 1%、2% 和 3% 时,  $F=10\%$  的混凝土 28 d 劈拉强度分别提高了 6.98%、8.79% 和 3.36%;  $F=20\%$  的混凝土 28 d 劈拉强度分别提高了 6.75%、7.53% 和 2.60%;  $F=30\%$  的混凝土 28 d 劈拉强度分别提高了 7.11%、7.89% 和 3.42%。纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量对不同粉煤灰取代率混凝土劈拉强度的影响无显著差异。

### 2.3 纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量对粉煤灰混凝土动弹性模量的影响

粉煤灰混凝土动弹性模量随纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量的变化如图 4 所示。图 4(a) 显示了粉煤灰取代率为 20%, 不同养护龄期(7、14、28 d)的混凝土动弹性模量;图 4(b) 显示了不同粉煤灰取代率混凝土的 28 d 动弹性模量。

由图 4 可知,复掺纳米 SiO<sub>2</sub> 和粉煤灰混凝土的动弹性模量高于单掺粉煤灰混凝土,且随纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量的增加,混凝土动弹性模量先增大后降低,在  $N_s$  为 2% 左右达到最大。以养护龄期 28 d 为例,当  $N_s$  从 0% 分别增加至 1%、2% 和 3% 时,粉煤灰混凝土的动弹性模量分别提高了 4.58%、5.54% 和 1.93%。对于不同粉煤灰取代率的混凝土,当  $N_s$  从 0% 增加至 1%、2% 和 3%,  $F=10\%$  的混凝土动

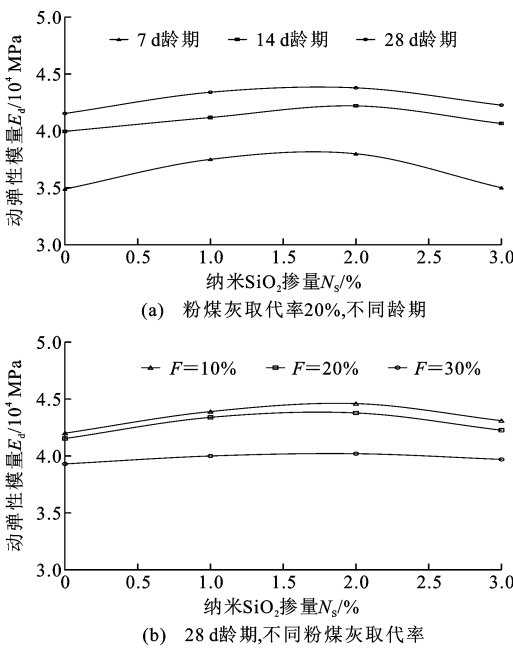


图4 混凝土动弹性模量随纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量的变化  
Fig. 4 Change of dynamic elastic modulus of concrete with content of nano-SiO<sub>2</sub>

弹性模量依次提高了 4.56%、6.19% 和 2.62%;  $F=20\%$  的混凝土动弹性模量分别提高了 4.55%、5.54% 和 1.93%;  $F=30\%$  的混凝土动弹性模量分别提高了 1.78%、2.29% 和 1.02%。纳米 SiO<sub>2</sub> 对粉煤灰取代率小的混凝土动弹性模量影响更显著。

当  $N_s$  从 0% 增加至 2% 时,混凝土 28 d 抗压强度、劈拉强度和动弹性模量分别提高了 12.90%、7.53% 和 5.54%。因此,纳米 SiO<sub>2</sub> 对粉煤灰混凝土抗压强度影响更显著。当  $F$  从 10% 增加至 30% 时,混凝土 28 d 抗压强度、劈拉强度和动弹性模量分别降低了 7.24%、2.61% 和 9.87%。因此,粉煤灰对动弹性模量影响更显著。

## 3 吸水试验结果与分析

### 3.1 纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量对混凝土吸水系数的影响

毛细吸水系数能够预测水工混凝土的使用寿命,通常作为混凝土吸水性的表征指标。通过分析混凝土单位面积吸水量  $k(k=\Delta M_t/A)$  与吸水时间平方根之间的关系(图 5),确定混凝土的毛细吸水系数,具体计算公式为<sup>[18]</sup>

$$\frac{\Delta M_t}{A} = S t^{1/2} \quad (2)$$

式中:  $A$  为混凝土吸水面的面积;  $S$  为混凝土的毛细吸水系数。

由图 5 可知,混凝土单位面积吸水量与吸水时间平方根之间基本符合两阶段线性关系,吸水时间

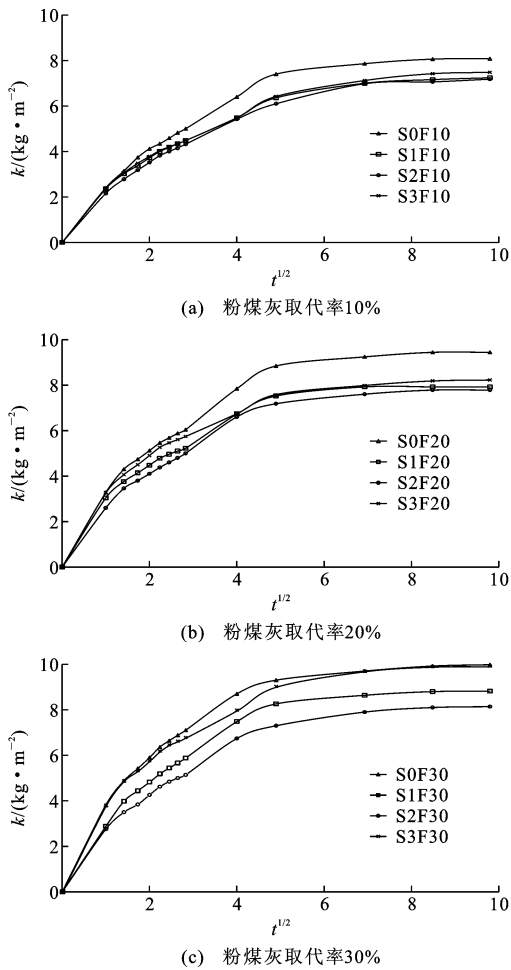


图 5 单位面积吸水量与时间平方根的关系  
Fig. 5 Relationship between  $k$  and  $t^{1/2}$

平方根在 0~5 内吸水量增长较快,在 5 以后吸水量增长缓慢。单位面积吸水量随纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量(0%~2%)的增加而降低,但纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量 3% 时反而增加。原因是掺入纳米 SiO<sub>2</sub> 后,能填充孔隙,特别是纳米级孔隙,使得混凝土孔隙率下降,从而增强密实度;高掺纳米 SiO<sub>2</sub> 后,纳米 SiO<sub>2</sub> 团聚使得填充混凝土孔隙的效果不佳,孔隙率反而增加<sup>[16,19]</sup>。因此纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量 3% 时混凝土单位面积吸水量大于掺量为 1% 和 2% 时。

为定量分析混凝土吸水特性,取曲线的早期线性段斜率作为混凝土的毛细吸水系数。毛细吸水系数与纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量关系如图 6 所示。由图 6 可知:随着纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量的增加,混凝土毛细吸水系数呈现出先下降后上升的趋势,在  $N_s$  为 2% 左右时毛细吸水系数最小;粉煤灰取代率越高,纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量变化对混凝土毛细吸水系数的影响越显著。当  $N_s$  从 0% 增加至 1%、2% 和 3% 时, $F=10\%$  的混凝土毛细吸水系数分别降低了 11.56%、15.03% 和

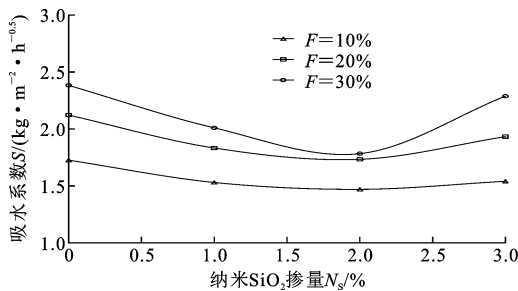


图 6 混凝土毛细吸水系数随纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量的变化  
Fig. 6 Variation of capillary water absorption coefficient of concrete with nano-SiO<sub>2</sub> content

10.98%; $F=20\%$  的混凝土毛细吸水系数分别降低了 13.68%、18.40% 和 8.96%; $F=30\%$  的混凝土毛细吸水系数分别降低了 15.55%、25.21% 和 3.78%。

### 3.2 粉煤灰取代率对混凝土吸水系数的影响

混凝土毛细吸水系数随粉煤灰取代率的变化如图 7 所示。由图 7 可知,随着粉煤灰取代率增加,混凝土毛细吸水系数呈现出上升的趋势。 $F$  从 10% 增加至 30%,当  $N_s$  为 0% 时,毛细吸水系数分别增大 22.54%、37.57%;当  $N_s$  为 1% 时,毛细吸水系数分别增大 25.32%、30.52%;当  $N_s$  为 2% 时,毛细吸水系数分别增大 17.69%、21.09%;当  $N_s$  为 3% 时,毛细吸水系数分别增大 18.83%、48.70%。由此可见,当纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量为 2% 时,粉煤灰对混凝土毛细吸水系数的影响最小。

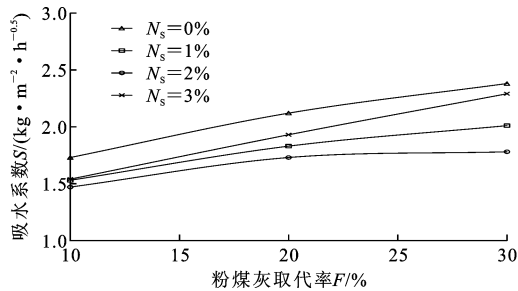


图 7 混凝土毛细吸水系数随粉煤灰取代率的变化  
Fig. 7 Variation of capillary water absorption coefficient of concrete with fly ash content

## 4 混凝土力学性能与毛细吸水系数的关系

对于混凝土类多孔材料,力学性能的主要影响因素是孔隙率等<sup>[20]</sup>,而毛细吸水系数与孔隙率呈正比关系。纳米 SiO<sub>2</sub> 改性粉煤灰混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度以及动弹性模量与毛细吸水系数的关系如图 8 所示。

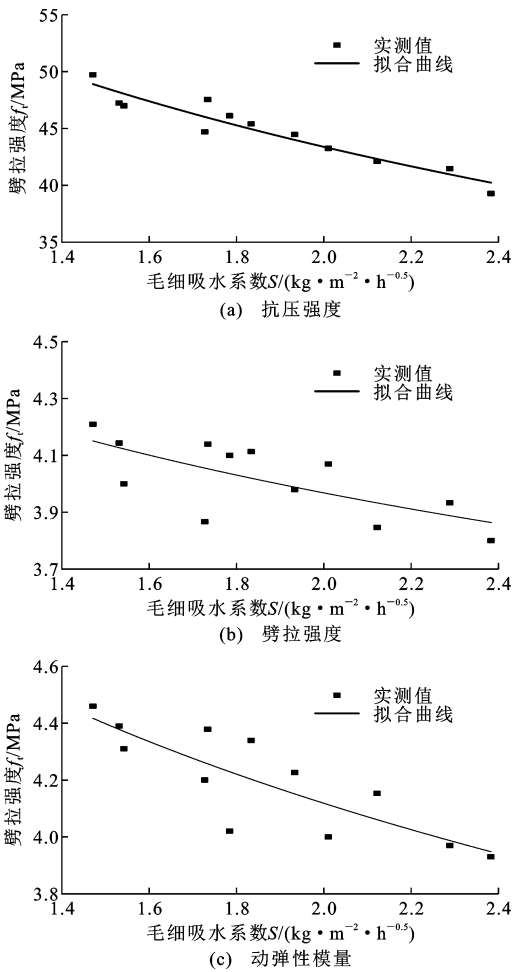


图 8 混凝土力学性能与毛细吸水系数的关系  
Fig. 8 Relationship between mechanical properties and capillary water absorption coefficient of concrete

图 8 中数据点均为不同粉煤灰取代率、不同纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量的工况所得,但从图中可以看出,不同工况的试验数据并没有呈现出明显的分布差异性,故可认为粉煤灰取代率、纳米二氧化硅掺量对毛细吸水系数与力学性能的相关性无显著影响。此外,抗压强度、劈拉强度及动弹性模量与毛细吸水系数均呈现负相关性,对数函数能够很好地描述毛细吸水系数和力学性能之间的关系,其中抗压强度与毛细吸水系数的相关系数最接近于 1,相关性最好。

5 结 语

(1)随着纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量的增加,粉煤灰混凝土的抗压强度、劈拉强度及动弹性模量均呈现出先增大后降低的趋势;当纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量为 2% 左右时,上述力学性能指标均达到最大值,且纳米 SiO<sub>2</sub> 对抗压强度影响更显著。

(2)随着纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量的增加,粉煤灰混凝土

的毛细吸水系数先减小后增大;粉煤灰取代率越大,混凝土毛细吸水系数越大,纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量对混凝土毛细吸水系数的影响越显著。

(3)混凝土抗压强度、劈拉强度以及动弹性模量与毛细吸水系数均为负相关,其中抗压强度与毛细吸水系数的相关性最好。

(4)开展了不同养护龄期、不同粉煤灰取代率工况下,纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量对粉煤灰混凝土力学性能和吸水性影响的显著性分析研究。由于纳米二氧化硅品质的差异以及试验数据的局限,关于粉煤灰混凝土中纳米 SiO<sub>2</sub> 的最佳掺量还有待进一步研究验证。

参考文献:

References:

[1] 胡晓鹏,牛荻涛,张永利. 粉煤灰混凝土早期强度的现场调查与试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012,40(6):676-680.  
HU Xiaopeng, NIU Ditao, ZHANG Yongli. Field investigation and experimental research on early-stage strength of fly ash concrete[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012,40(6):676-680.

[2] 郭秋生. 混凝土的毛细吸水特性及其与孔结构的关系[J]. 工业建筑,2020,50(3):119-123.  
GUO Qiusheng. Capillary water absorption characteristics of concrete and its relationship with pore structure [J] Industrial Architecture, 2020, 50 (3): 119-123.

[3] 侯学彪,黄 丹,王 委. 掺纳米 SiO<sub>2</sub> 高性能混凝土研究进展[J]. 混凝土,2013(3):5-9.  
HOU Xuebiao, HUANG Dan, WANG Wei. Recent progress on high performance concrete with nano-SiO<sub>2</sub> particles[J]. Concrete, 2013(3):5-9.

[4] 王宗熙,姚占全,何 梁,等. 溶蚀作用下纳米 SiO<sub>2</sub> 混凝土的孔隙演变[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(8):841-847.  
WANG Zongxi, YAO Zhanquan, HE Liang, et al. Pore evolution of nano-SiO<sub>2</sub> concrete under dissolution condition[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(8):841-847.

[5] SOBOLEV K, GUTIERREZ M. How nanotechnology can change the concrete world; part two of a two-part series[J]. American Ceramic Society Bulletin, 2005, 84:16-19.

[6] JI T. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub> [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35 (10): 1943-1947.

- [7] 高丹盈,李 晗.纤维纳米混凝土的微观增强机理与强度计算方法[J].建筑科学与工程学报,2015,32(5):47-55.  
GAO Danying, LI Han. Micro enhancement mechanism and strength calculation method of fiber and nanosized material reinforced concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(5): 47-55.
- [8] ZHANG M H, ISLAM J. Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag[J]. Construction and Building Materials, 2012, 29: 573-580.
- [9] 邓永刚,赵冰洁.纳米 SiO<sub>2</sub> 增强高掺量粉煤灰混凝土力学性能研究[J].沈阳理工大学学报,2020,39(6): 55-60.  
DENG Yonggang, ZHAO Bingjie. Study on the properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2020, 39(6): 55-60.
- [10] 鲍玖文,张洪锐,方晓龙,等.纳米二氧化硅改性再生粗骨料混凝土性能的研究进展[J].硅酸盐学报,2023,51(8):2045-2053.  
BAO Jiuwen, ZHANG Hongrui, FANG Xiaolong, et al. Properties of recycled coarse aggregate concrete modified by silica nanoparticles: a short review[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(8): 2045-2053.
- [11] 肖建庄,陈祥磊,李 标,等.纳米 SiO<sub>2</sub> 和粉煤灰复掺对再生混凝土性能的影响[J].建筑科学与工程学报,2020,37(1):26-32.  
XIAO Jianzhuang, CHEN Xianglei, LI Biao, et al. Effect of mixed nano-SiO<sub>2</sub> and fly ash on properties of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1): 26-32.
- [12] 黄 振.纳米混凝土力学性能及耐久性研究[D].沈阳:沈阳大学,2016.  
HUANG Zhen. Research on mechanical properties and durability of nano concrete [D]. Shenyang: Shenyang University, 2016.
- [13] GHAZY A, BASSUONI M T, SHALABY A. Nano-modified fly ash concrete: a repair option for concrete pavements[J]. ACI Materials Journal, 2016, 133(2): 231-242.
- [14] SHAIKH F U A, SUPIT S W M. Chloride induced corrosion durability of high volume fly ash concretes containing nano particles[J]. Construction and Building Materials, 2015, 99: 208-225.
- [15] 刘宏伟.混凝土早龄期弹性模量无损检测初探[D].南京:河海大学,2006.  
LIU Hongwei. Tentative research on non-destructive detection of concrete early-age elastic modulus[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [16] NAZARI A, RIAHI S. RETRACTED: splitting tensile strength of concrete using ground granulated blast furnace slag and SiO<sub>2</sub> nanoparticles as binder[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(4): 864-872.
- [17] 陈 潇,周明凯,刘 佳,等.水泥粉煤灰稳定碎石中粉煤灰效应的解耦分析[J].建筑材料学报,2010,13(6):764-768.  
CHEN Xiao, ZHOU Mingkai, LIU Jia, et al. Decoupling analysis of fly ash effects in cement-fly ash stabilized crushed stones[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(6): 764-768.
- [18] 鲍玖文,胡文文,张 鹏,等.有机硅憎水剂对混凝土强度与毛细吸水性能的影响[J].硅酸盐学报,2020,48(10):1644-1652.  
BAO Jiuwen, HU Wenwen, ZHANG Peng, et al. Effect of organic silicon hydrophobic agent on strength and capillary absorption of concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(10): 1644-1652.
- [19] 黄春龙,王栋民,田红伟.纳米二氧化硅影响水泥基材料流动性的研究综述[J].材料导报,2018,32(增1): 458-461,465.  
HUANG Chunlong, WANG Dongmin, TIAN Hongwei. Review on the influence of nano-silica on the fluidity of cement-based materials [J]. Materials Reports, 2018, 32(S1): 458-461, 465.
- [20] 金南国,金贤玉,田 野.基于人工神经网络研究混凝土孔结构与强度关系[J].稀有金属材料与工程,2008,37(增2):712-717.  
JIN Nanguo, JIN Xianyu, TIAN Ye. Study on the relationship between concrete pore structure and strength based on artificial neural network[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S2): 712-717.