

特细砂混凝土干燥收缩性能分析

付玉娇¹, 冯 伟¹, 车佳玲²

¹宁夏农垦建设有限公司, 宁夏 银川

²宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川

收稿日期: 2025年5月10日; 录用日期: 2025年6月3日; 发布日期: 2025年6月11日

摘 要

以不同掺量的特细砂取代机制砂制备特细砂混凝土试件, 分析不同水胶比下特细砂掺量与粉煤灰掺量对试件干燥收缩性能的影响。结果表明, 特细砂混凝土干燥收缩率随着养护龄期的增加呈现先增加后趋于平稳的变化趋势, 在45 d龄期时达到最大干缩率。特细砂混凝土干燥收缩率随特细砂替代率增加而增加, 特细砂替代率为20%时, 特细砂混凝土干燥收缩性能最好。掺量28%粉煤灰抑制混凝土干燥收缩效果优于掺量18%粉煤灰。水胶比0.34、粉煤灰替代率28%及特细砂替代率20%时, 特细砂混凝土干燥收缩性能最好。

关键词

特细砂混凝土, 干燥收缩, 特细砂替代率, 粉煤灰替代率

Analysis of Drying Shrinkage Performance of Ultra-Fine Sand Concrete

Yujiao Fu¹, Wei Feng¹, Jialing Che²

¹Ningxia Agricultural Reclamation Construction Co., Ltd., Yinchuan Ningxia

²School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

Received: May 10th, 2025; accepted: Jun. 3rd, 2025; published: Jun. 11th, 2025

Abstract

Ultra-fine sand concrete specimens were prepared by replacing machine-made sand with different dosages of ultra-fine sand. The effects of the dosages of ultra-fine sand and fly ash on the drying shrinkage performance of the specimens were analyzed under different water cement ratios. The results showed that the drying shrinkage rate of ultra-fine sand concrete showed a trend of first increasing and then stabilizing with the increase of curing age, reaching the maximum drying

shrinkage rate at 45 days of age. The drying shrinkage rate of ultra-fine sand concrete increases with the increase of ultra-fine sand replacement rate. When the ultra-fine sand replacement rate is 20%, the drying shrinkage performance of ultra-fine sand concrete is the best. The inhibitory effect of 28% fly ash on concrete drying shrinkage is better than that of 18% fly ash. When the water cement ratio is 0.34, the substitution rate of fly ash is 28%, and the substitution rate of ultra-fine sand is 20%, the drying shrinkage performance of ultra-fine sand concrete is the best.

Keywords

Ultra-Fine Sand Concrete, Drying Shrinkage, Replacement Rate of Ultra-Fine Sand, Substitution Rate of Fly Ash

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混凝土收缩是指混凝土在凝结硬化过程中因物理化学作用产生的体积缩减现象, 主要包含塑性收缩、化学收缩、干燥收缩和碳化收缩。研究表明, 约 80% 的非荷载裂缝源于收缩变形[1], 其关键控制因素涉及骨料特性[2]、水胶比[3]及矿物掺合料等。

在骨料影响机制方面, 李家正等[4]证实不同岩性骨料对干燥收缩具有显著差异性。刘海卿等[5]发现 C30 混凝土中粗骨料用量与收缩率呈负相关, 而 Yu 等[6]指出再生粗骨料质量提升与替代率降低可有效抑制收缩。特别值得注意的是, 孙道胜等[7]揭示了再生骨料表面高吸水砂浆的双重效应, 即早期内养护作用降低收缩, 但后期加剧干燥收缩变形。水胶比对收缩行为的影响较为复杂, 当水胶比处于 0.30~0.37 区间时, 自密实混凝土收缩变化趋于稳定[8], 但廖巍崑[9]与刘积丁[10]的研究显示, 水胶比对干燥收缩和自生收缩具有显著差异化影响。宫泽伸君[11]进一步量化了水胶比与自生收缩占比的非线性关系, 当水胶比从 0.4 降至 0.17 时, 自生收缩贡献率由 40% 增至近 100%。在矿物掺合料方面, 粉煤灰通过火山灰效应显著降低干燥收缩[12], Guneyisi 等[13]证实该结论并发现硅粉的收缩促进作用。张恒春[14]与段承刚[15]的研究显示, 微珠与超细矿粉掺量增加可有效抑制收缩, 而硅灰则呈现反向作用。

综上所述, 现有研究已建立多因素作用的理论框架, 但特细砂混凝土的收缩演变规律及其与矿物掺合料的协同效应仍缺乏系统认知, 制约了特细砂资源的高效利用。因此本文探究了水胶比、特细砂掺量和粉煤灰掺量对特细砂混凝土干燥收缩性能的影响, 不仅有助于提高建筑材料的性能和使用寿命, 还能环境保护和资源利用提供科学依据。

2. 试验概况

2.1. 试验原材料

特细砂混凝土由水泥、粉煤灰、细骨料、粗骨料与外加剂组成。水泥采用宁夏赛马水泥厂生产 P·O 42.5 R 普通硅酸盐水泥; 粉煤灰采用宁夏大坝电厂生产的 I 级粉煤灰, 比表面积为 $1110 \text{ m}^2/\text{kg}$, 含水率为 0.2%, 烧失量为 2.8%, 中位径为 $7.79 \mu\text{m}$, 粉煤灰化学组分见表 1; 机制砂取自幸德源砷业有限公司, 细度模数 3.4; 特细砂选用宁夏金樾府基坑开挖的细骨料, 比表面积为 $150 \text{ m}^2/\text{kg}$, 表观密度为 2439 kg/m^3 , 堆积密度为 1425 kg/m^3 , 含水率为 0.4%, 特细砂粒径分布见图 1; 粗骨料采用宁夏镇北堡生产的人工碎

石，属于 II 级级配，粒径 5~25 mm；外加剂选用萘系液体减水剂，减水率 15%~25%；制备用水均采用自来水。

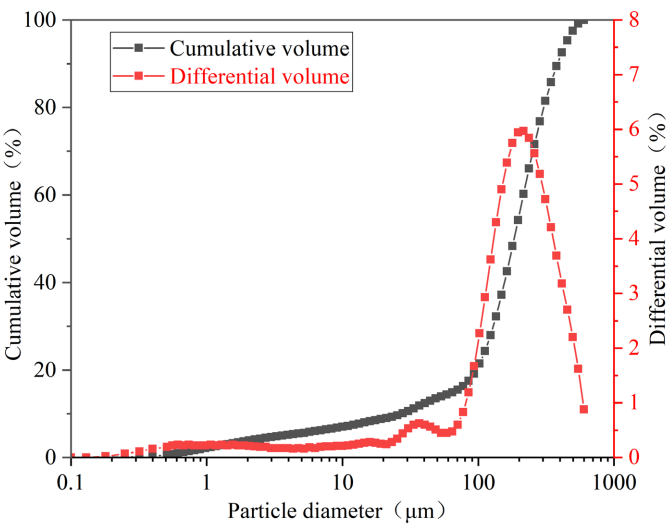


Figure 1. Distribution of ultra-fine sand particle size
图 1. 特细砂粒径分布图

Table 1. Chemical components of fly ash
表 1. 粉煤灰化学组分

Chemical components	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	TiO ₂
Mass ratio (%)	6.12	38.5	23.6	7.49	2.13	3.66	2.14

2.2. 试验配合比

试验以水胶比 0.34 和 0.38，特细砂替代率 0%、20%、30%、40%、60%，粉煤灰替代率 18%和 28% 为变量，以砂率 0.44、砂胶比 1.92、粗骨料 1053 kg/m³ 为定量。试验配合比主要变化参数见表 2。

Table 2. Main variation parameters of experimental mix proportion
表 2. 试验配合比主要变化参数

编号	水胶比	粉煤灰替代率(%)	特细砂替代率(%)	砂率	减水剂用量(%)
AF18S0	0.34	18	0	0.44	1.8
AF18S2		18	20		2.3
AF18S3		18	30		2.7
AF18S4		18	40		3.2
AF18S6		18	60		4.0
AF28S0		28	0		1.8
AF28S2		28	20		2.3
AF28S3		28	30		2.7
AF28S4		28	40		3.2
AF28S6		28	60		4.0

续表

BF18S0		18	0	1.8
BF18S2		18	20	2.3
BF18S3		18	30	2.7
BF18S4		18	40	3.2
BF18S6		18	60	4.0
BF28S0	0.38	28	0	0.44
BF28S2		28	20	2.3
BF28S3		28	30	2.7
BF28S4		28	40	3.2
BF28S6		28	60	4.0

注：编号 A、B 分别表示水胶比 0.34 与 0.38；S0、S2、S3、S4 和 S6 分别表示特细砂替代率为 0%、20%、30%、40% 和 60%；F18 与 F28 分别表示粉煤灰替代率为 18%与 28%。

2.3. 干燥收缩性能试验方法

特细砂混凝土干燥收缩性能试验根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/T 50082-2009) 规范进行。根据试验配合比制作尺寸 100 mm × 100 mm × 515 mm 的棱柱体试件，共 16 组，每组 3 个，共计 48 个。制作试件时应将试件置于空气中带模养护 24 h，试件成型脱模后放置于标准养护室中(温度 20℃ ± 2℃，相对湿度 ≥ 95%)。当试件养护龄期达到 3 d 后取出，采用卧式收缩仪测定其初始长度，测量完成后将试件移入恒温恒湿室(温度 20℃ ± 2℃，相对湿度 60% ± 5%)，试件与试件之间距离间隔 ≥ 30 mm，在特细砂混凝土试件移入恒温恒湿室后的不同龄期(包括 1 d、3 d、5 d、7 d、10 d、14 d、28 d、45 d、90 d 和 120 d)，按照规定的时间间隔对特细砂混凝土干燥收缩值进行测量。测量完成后通过公式(1)计算特细砂混凝土干燥收缩率。

$$\varepsilon_{st} = \frac{L_0 - L_t}{L_b} \quad (1)$$

式中： ε_{st} ——龄期为 t (d) 时的特细砂混凝土收缩率， t 从测量初始长度算起；

L_0 ——试件长度初始读数(mm)；

L_t ——试件在测试龄期 t (d) 时测得的长度读数(mm)；

L_b ——试件测量标距(mm)。

3. 试验结果分析

3.1. 水胶比对特细砂混凝土干燥收缩性能的影响

水胶比对特细砂混凝土干燥收缩性能的影响情况见图 2。相同特细砂替代率和粉煤灰替代率下，不同水胶比的特细砂混凝土干燥收缩率均在 1 d~14 d 增长速度最快，在 14 d~45 d 内增长速度减缓，在 45 d 后干燥收缩率趋于平缓。养护 45 d 时，BF18S0、BF28S0、BF18S2、BF28S2、BF18S3、BF28S3、BF18S4 和 BF28S4 的干燥收缩率相较于 AF18S0、AF28S0、AF18S2、AF28S2、AF18S3、AF28S3、AF18S4 和 AF28S4 分别提高了 4.4%、14.3%、2.8%、29.2%、6.8%、16.2%、12.4%和 13.4%。这是因为水胶比增加时，混凝土中的自由水含量相应增加，在混凝土硬化过程中失去的自由水量也会相应增多，水分的损失

会导致混凝土收缩。其次水胶比较大的混凝土在硬化后往往具有更高的孔隙率, 这些孔隙在干燥过程中会因水分的散失而产生较大的收缩应力, 进而导致更大的干燥收缩。

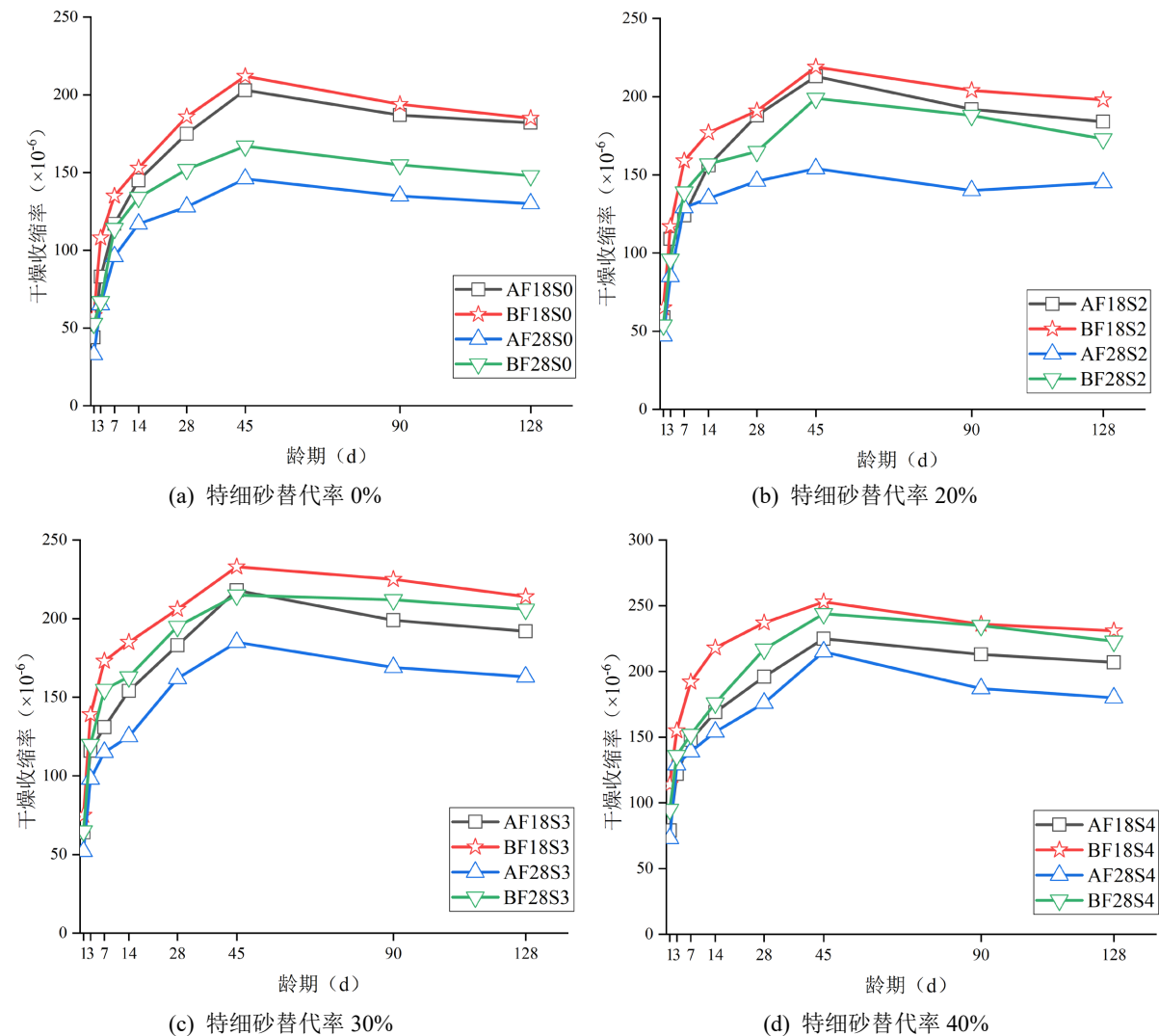


Figure 2. Influence of water cement ratio on shrinkage performance of ultra-fine sand concrete
图 2. 水胶比对特细砂混凝土收缩性能的影响

3.2. 特细砂替代率对特细砂混凝土干燥收缩性能的影响

特细砂替代率对特细砂混凝土干燥收缩性能的影响情况见图 3。由图可知, 随着特细砂掺量的增加, 特细砂混凝土的干燥收缩率逐渐增加, 特细砂替代率 20% 时, 特细砂混凝土干燥收缩性能最好。养护 45 d 时, 相较于 AF18S0 的干燥收缩率, AF18S2、AF18S3 和 AF18S4 分别增加了 4.9%、7.4%、10.8%。相较于 BF18S0 的干燥收缩率, BF18S2、BF18S3 和 BF18S4 分别增加了 3.3%、9.9%、19.3%。这是因为沙子越细, 其比表面积越大, 特细砂替代率的增加间接增加了细骨料总比表面积, 更多的水分将被吸附在沙子表面, 不是被混凝土中的水泥颗粒吸收, 这种增加的接触面积会导致更多的水分被吸附和散失, 导致混凝土中有效水泥含量降低, 增加了混凝土干燥收缩。其次由于特细砂粒径小, 容易形成更多的毛细孔隙。这些孔隙在混凝土干燥过程中会成为水分蒸发的通道, 导致更大的干燥收缩。

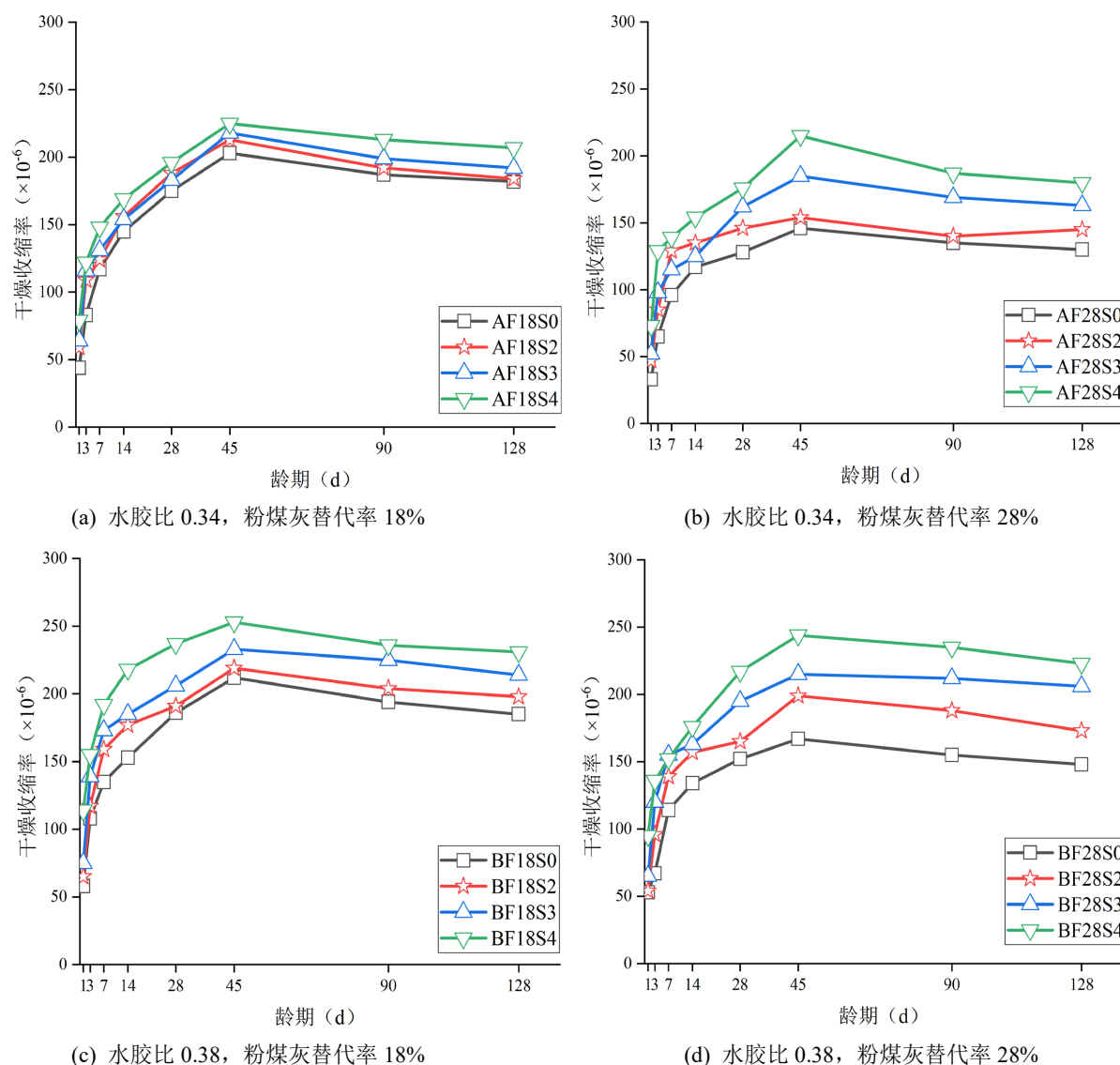


Figure 3. Effect of replacement rate of ultra-fine sand on the shrinkage performance of ultra-fine sand concrete
图 3. 特细砂替代率对特细砂混凝土收缩性能的影响

3.3. 粉煤灰替代率对特细砂混凝土干燥收缩性能的影响

粉煤灰替代率对特细砂混凝土干燥收缩性能的影响情况见图 4。由图可知, 相同特细砂替代率下, 掺入 28% 粉煤灰的特细砂混凝土的干燥收缩率均低于掺入 18% 粉煤灰的特细砂混凝土。养护 45 d 时, AF28S0、AF28S2、AF28S3 和 AF28S4 的干燥收缩率相较于 AF18S0、AF18S2、AF18S3 和 AF18S4 分别降低了 28.1%、27.7%、15.1% 和 4.4%; BF28S0、BF28S2、BF28S3 与 BF28S4 的干燥收缩率相较于 BF18S0、BF18S2、BF18S3 与 BF18S4 分别降低了 21.2%、9.1%、7.7% 与 3.6%。一方面是因为粉煤灰的稀释效应, 即粉煤灰的掺入有效降低了水泥用量, 减少了因混凝土内部胶凝材料水化反应所消耗的水, 进而降低了混凝土的干燥收缩率; 另一方面是因为粉煤灰的火山灰效应和填充效应, 产生的 C-S-H 凝胶可以阻塞水泥石结构内部孔隙, 减少硬化基体结构中毛细孔数量和毛细孔收缩应力, 使得混凝土内部水分迁移阻碍增大, 减小了混凝土干燥收缩率。

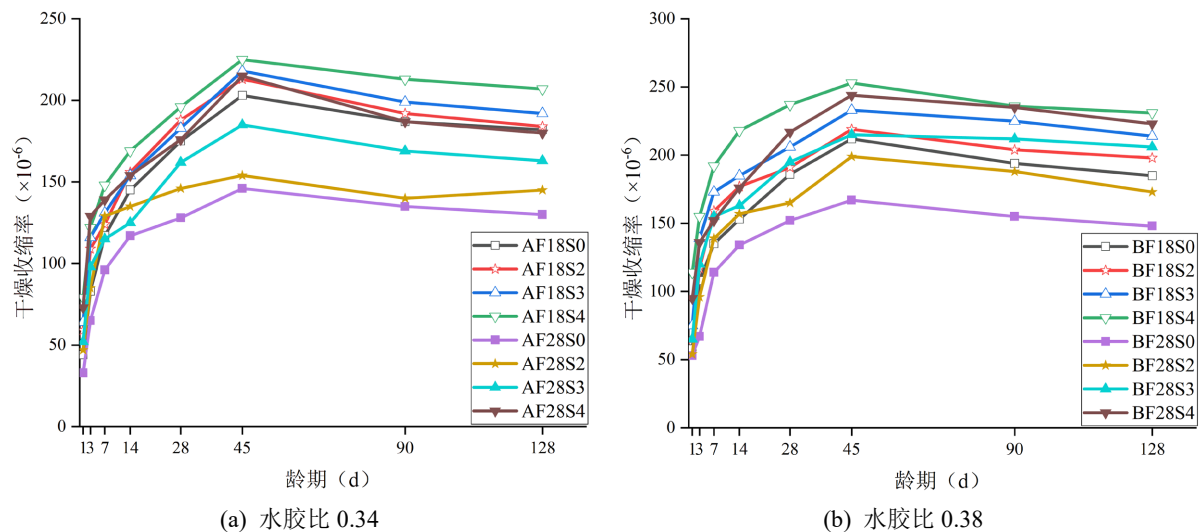


Figure 4. The effect of fly ash substitution rate on the shrinkage performance of ultra-fine sand concrete
图 4. 粉煤灰替代率对特细砂混凝土收缩性能的影响

4. 结论

本章主要研究了水胶比、粉煤灰替代率及特细砂替代率对特细砂混凝土干燥收缩性能的影响，主要分析结论如下：

- 1) 特细砂混凝土干燥收缩率随干燥龄期呈现典型三段式演变规律，初始阶段(1 d ~14 d)增速最快，中期(14 d ~45 d)增速趋缓，后期(45 d 后)趋于稳定甚至略有回缩，收缩峰值均出现在 45 d 龄期。
- 2) 特细砂替代率与干燥收缩率呈正相关，但存在临界优化值。当替代率为 20%时，特细砂混凝土表现出最佳收缩抑制效果，超过该阈值后细骨料比表面积增大导致的孔隙效应加剧收缩变形。
- 3) 粉煤灰掺量提升至 28%时，通过火山灰效应优化胶凝体系、降低有效水胶比及细化孔隙结构，显著抑制干燥收缩，其抑制效果随水胶比和特细砂替代率的增加呈现差异化响应规律。

基金项目

宁夏农垦建设有限公司技术开发合同“低碳、环保型砵系列建筑材料的研究与开发”(技术合同登记号：2022640101000054)。

参考文献

- [1] 瞿尔仁, 杨木旺, 叶桂花, 等. 再生混凝土技术及其应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2003(6): 1183-1187.
- [2] Maghfouri, M., Shafigh, P., Alimohammadi, V., Doroudi, Y. and Aslam, M. (2020) Appropriate Drying Shrinkage Prediction Models for Lightweight Concrete Containing Coarse Agro-Waste Aggregate. *Journal of Building Engineering*, 29, Article ID: 101148. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101148>
- [3] 喻泽鑫, 李秋义, 苏敦磊. 再生混凝土自生收缩和干燥收缩性能研究进展[J]. 混凝土, 2022, 388(2): 6-9.
- [4] 李家正, 石妍, 杨华全. 骨料品种对混凝土体积变形特性的影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(6): 16-19.
- [5] 刘海卿, 颜丙男. 不同骨料用量与尺寸对混凝土干缩性能影响[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(1): 204-207.
- [6] Yu, Y., Wang, P., Yu, Z., Yue, G., Wang, L., Guo, Y., et al. (2021) Study on the Effect of Recycled Coarse Aggregate on the Shrinkage Performance of Green Recycled Concrete. *Sustainability*, 13, Article 13200. <https://doi.org/10.3390/su132313200>
- [7] 孙道胜, 李泽英, 刘开伟, 等. 再生粗骨料的形态及缺陷对再生混凝土干燥收缩和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(11): 11027-11033, 11056.

-
- [8] 何世钦, 高鹏飞, 白紫云, 等. 石粉对自密实混凝土收缩性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(10): 3428-3435.
 - [9] 廖巍巍, 汤胜, 窦加进, 等. 自密实混凝土室内干燥收缩性能预估[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 521-524.
 - [10] 刘积丁. 自密实混凝土自生约束收缩下应力松弛性能研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2017.
 - [11] Tam, C.M., Tam, V.W.Y. and Ng, K.M. (2012) Assessing Drying Shrinkage and Water Permeability of Reactive Powder Concrete Produced in Hong Kong. *Construction and Building Materials*, **26**, 79-89.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.006>
 - [12] Mermerdaş, K. and Arbili, M.M. (2015) Explicit Formulation of Drying and Autogenous Shrinkage of Concretes with Binary and Ternary Blends of Silica Fume and Fly Ash. *Construction and Building Materials*, **94**, 371-379.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.074>
 - [13] Güneyisi, E., Gesoğlu, M. and Özbay, E. (2010) Strength and Drying Shrinkage Properties of Self-Compacting Concretes Incorporating Multi-System Blended Mineral Admixtures. *Construction and Building Materials*, **24**, 1878-1887.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.015>
 - [14] 张恒春, 唐方宇, 季锡贤, 等. 超细矿物掺合料对高强混凝土干燥收缩影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(7): 2514-2518.
 - [15] 段承刚, 孙永涛. 复掺高性能矿物掺合料对高强机制砂混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2296-2305.