

## 收缩徐变反向设计提升混凝土早龄期抗裂性能

孙艺嘉<sup>1,2</sup>, 贾雅丽<sup>1,2</sup>, 何征峰<sup>3</sup>, 单心宇<sup>1,2</sup>, 苏帅磊<sup>1,2</sup>, 赵庆新<sup>1,2</sup>

(1. 燕山大学城市固废无害化协同处置及利用河北省工程研究中心, 河北 秦皇岛, 066004;

2. 燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

3. 沧州曲港高速公路建设有限责任公司, 河北 沧州 062450)

**摘 要:** 收缩是混凝土早期开裂的重要诱因, 而拉伸徐变则有利于降低开裂风险。为研究矿物掺合料掺量、细度与水胶比对水泥基材料早龄期收缩、拉伸徐变与开裂性能的影响, 研制了水泥基材料全龄期收缩测试仪器和超早期拉伸徐变测试装置, 修正得到梯度递增加载制度下的拉伸徐变度逐步计算法; 研发了水泥石试件开裂试验装置, 可监测水泥石由拆模前自收缩、拆模后干燥收缩引起的约束应力; 采用不同细度的粉煤灰、磨细矿渣替代水泥设计了 20 组水泥石配合比, 并利用以上试验装置进行测试。结果表明: 将细度较小的 S95 级磨细矿渣和细度较大的超细粉煤灰协同配置, 制备的水泥石表现为低收缩高徐变特征; 矿物掺合料的总替代率处于 60%~80% 时, 增加超细粉煤灰掺量同时降低 S95 级磨细矿渣掺量, 水泥石收缩表现为先降低后增大, 超早期徐变度呈现相反规律; 采用低收缩高徐变的水泥石可以起到松弛收缩应力、延后开裂时间的作用。

**关键词:** 水泥基材料; 抗裂; 早龄期; 收缩; 徐变

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)11-3408-10

网络出版时间: 2024-08-06



钢筋混凝土结构是目前使用最为广泛的结构形式, 在氯离子渗透、冻融循环、硫酸盐腐蚀、碳化等环境因素作用下, 大量混凝土结构耐久性劣化导致提前失效, 其维护修复耗资巨大, 且存在严重安全隐患<sup>[1-3]</sup>。大量研究与工程调查报告表明<sup>[4-5]</sup>, 混凝土结构物在各种条件下的开裂及微裂缝的扩展为侵蚀介质的扩散提供了通道, 这是导致混凝土劣化从而降低结构耐久性的最主要因素。

混凝土收缩是造成其开裂的重要诱因, 合理使用掺合料能够有效减小收缩, 是提高混凝土抗裂性能的重要途径。刘建忠等<sup>[6]</sup>研究了不同掺量的粉煤灰、矿粉对低水胶比混凝土干缩和自收缩性能的影响规律, 结果表明粉煤灰能够减少低水胶比混凝土的干缩和自收缩值, 矿粉虽能减少干缩, 但增大了自收缩。管宗甫等<sup>[7]</sup>的研究表明, 通过调控矿物掺合料的细度和掺量使之与水泥颗粒实现合理的胶凝材料级配, 在水胶比合理、大幅度降低水泥用量的前提下, 可使混凝土收缩显著降低, 提高其抗裂性能。Pormmoon 等<sup>[8]</sup>

制备了以硅酸盐水泥、磨细底灰和粉煤灰为胶凝材料的高性能混凝土, 发现合理调控矿物掺合料的掺量可使混凝土自收缩大幅度降低, 提高其抗裂性能。郑杰等<sup>[9]</sup>利用单掺和复掺粉煤灰和矿粉抑制 3D 打印水泥基材料的干燥收缩, 发现矿物掺合料的骨架填充效应与火山灰效应可改善材料的孔隙结构, 降低孔隙间的连通, 减少水分消耗, 复掺粉煤灰和矿粉使 28 d 干燥收缩降低了 23%~25%。

混凝土在其凝结过程中承受收缩与温度差引起的持续拉应力, 李司晨等<sup>[10]</sup>、马新伟等<sup>[11]</sup>均指出, 提高混凝土早期拉伸徐变能够使拉应力得以松弛, 从而有效抑制混凝土开裂。杨杨等<sup>[12]</sup>发现掺加 40% 粉煤灰可使大体积混凝土在降温阶段发生较大拉伸徐变, 从而提高其早期抗裂性能。作者在前期研究中发现, 通过改变矿物掺合料的品种和掺量能够调控硬化净浆的微观结构, 矿物掺合料与基体界面的微观缺陷可使混凝土徐变显著增加, 这为通过掺入矿物掺合料设计制备高徐变混凝土提供了可能<sup>[13-14]</sup>。

收稿日期: 2024-04-06。 修订日期: 2024-04-24。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52308289, 51578477)。

第一作者: 孙艺嘉(1992), 女, 博士, 讲师。

通信作者: 赵庆新(1973), 男, 博士, 教授。

Received date: 2024-04-06. Revised date: 2024-04-24.

First author: SUN Yijia (1992-), female, Ph.D., Lecturer.

E-mail: sunyijiaysu@163.com

Corresponding author: ZHAO Qingxin (1973-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zhaoqingxin@ysu.edu.cn

传统观点认为, 混凝土材料的收缩与徐变可以看成同一种现象来考虑, 只是徐变受到外载荷作用而收缩不受, 二者规律往往表现出一致性<sup>[15-17]</sup>。收缩是混凝土早期开裂的重要诱因, 而超早期(初凝至终凝)拉伸徐变则有利于降低开裂风险。如果能够设计出一种具备全程低收缩超早期高徐变特性的混凝土, 其抗裂性必大幅度提升, 对于保障混凝土结构耐久性非常有利。本工作通过调整水泥石的矿物掺合料掺量、细度与水胶比, 实现了水泥基材料的低收缩高徐变设计, 通过试验对抗裂性能的提升进行了验证。

## 1 收缩徐变反向设计理论基础

### 1.1 低收缩水泥基材料设计

微观结构决定宏观性能, 水泥石孔隙中的毛细水、凝胶水散失是混凝土收缩的主要来源<sup>[18]</sup>。因此, 减少水泥石中的凝胶数量与孔隙含量, 能够实现从源头降低收缩。采用矿物掺合料替代水泥可减低凝胶数量, 由于硬化浆体性能与胶凝材料加水拌和前的堆积状态有着密切的关系<sup>[19-20]</sup>, 可进一步通过合理匹配矿物掺合料粒径, 使胶凝体系整体的颗粒级配尽量接近最紧密, 显著减少材料内部的孔隙和缺陷, 从而达到抑制收缩的目的(见图 1)<sup>[21]</sup>。

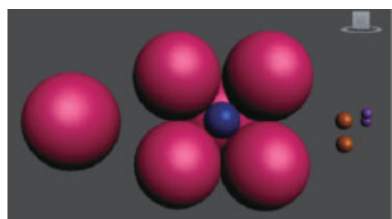


图 1 最紧密堆积原理示意图<sup>[21]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of the closest packing principle<sup>[21]</sup>

水泥水化的生成物体积小于反应物体积。水化过程中逐渐形成的凝胶结构具备抵抗收缩的能力, 致使结构内部形成孔隙<sup>[22-23]</sup>。通过调控水化过程减少孔隙结构是降低收缩的另一有效途径。反应物中的各类胶凝材料水化速度相近也有利于提高凝胶结构致密程度, 故活性较大的胶凝材料可选取较低细度以延缓其反应, 反之亦然。即可通过对各胶凝材料的细度与活性进行反向配置的方法, 使其水化反应速率相近, 进而达到减少水泥石孔隙、抑制收缩的目的。

### 1.2 高徐变水泥基材料设计

作者前期通过试验分析了矿物掺合料对高性能混凝土压缩徐变的影响机理, 发现混凝土抵抗徐变的能力不仅与矿物掺合料本身的弹性模量有关, 还

受矿物掺合料颗粒和基体结合情况以及水胶比的影响<sup>[14]</sup>。具体而言, 磨细矿渣颗粒的弹性模量略低于水泥颗粒, 故不能通过“微集料效应”抑制混凝土的徐变, 当界面结合不良时, 混凝土徐变显著增大。采用较高水胶比(0.4), 高粉煤灰掺量下的界面结合明显变弱, “微集料效应”不能正常发挥<sup>[13]</sup>, 且骨料-水泥石界面过渡区显著弱化, 导致混凝土徐变增大<sup>[24]</sup>。可以推断, 通过调控矿物掺合料种类(弹性模量)、掺量与水胶比能够创建胶材颗粒与基体之间的弱界面, 达到增大混凝土超早期拉伸徐变的效果。水泥石中的胶材颗粒-基体界面过渡区如图 2 所示。

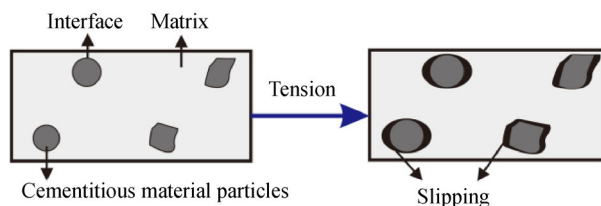


图 2 增大水泥石超早期拉伸徐变原理

Fig. 2 Principle of increasing the early tensile creep of hardening paste

## 2 实验

### 2.1 原材料

水泥石变形是混凝土收缩、徐变的主要来源, 通过水泥石变形研究混凝土变形, 能够避免粗细骨料的干扰, 使研究结果更加明确直观。为避免水泥组分中矿物掺合料的影响, 选取秦皇岛浅野 P·II 42.5 硅酸盐水泥。矿物掺合料包括绥中热电厂生产的 II 级粉煤灰和 S95 级磨细矿渣, 以及河南小海豹公司生产的超细粉煤灰和 S115 级磨细矿渣。各胶凝材料主要化学组成、比表面积、中位径、烧失量见表 1。采用 BT-9300H 型激光粒度分布仪分别测试以上胶凝材料的粒径, 得到的颗粒累计分布曲线检测结果见图 3。

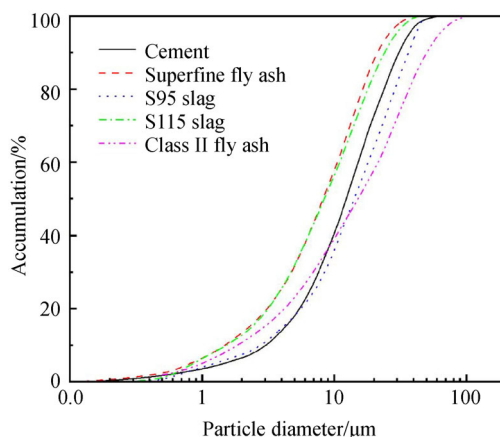


图 3 胶凝材料颗粒累计分布曲线

Fig. 3 Cumulative distribution curves of cementitious material particles

表 1 水泥、粉煤灰与磨细矿渣的化学组成与物理性能  
Table 1 Chemical composition and physical properties of cement, fly ash, and slag

| Raw material      | Mass fraction/% |                  |                                |                 |                                |      |                  |                  | Median diameter<br>( $D_{50}$ )/ $\mu\text{m}$ | Specific surface<br>area/( $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | Loss on<br>ignition/% |
|-------------------|-----------------|------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|------|------------------|------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------|
|                   | CaO             | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | TiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O |                                                |                                                              |                       |
| Cement            | 64.3            | 19.8             | 4.89                           | 3.68            | 3.01                           | 2.57 | 0.00             | 1.15             | 14.85                                          | 462.9                                                        | 1.00                  |
| Class II fly ash  | 4.48            | 42.7             | 44.8                           | 0.00            | 3.24                           | 0.00 | 1.69             | 1.14             | 14.88                                          | 503.6                                                        | 5.88                  |
| Superfine fly ash | 5.77            | 39.8             | 43.9                           | 0.00            | 4.66                           | 0.00 | 1.64             | 1.12             | 6.09                                           | 840.2                                                        | 5.94                  |
| S95 slag          | 32.3            | 32.9             | 17.4                           | 2.81            | 0.00                           | 8.39 | 3.00             | 0.00             | 14.60                                          | 476.6                                                        | 5.76                  |
| S115 slag         | 43.6            | 39.7             | 5.75                           | 1.67            | 0.00                           | 4.63 | 1.07             | 0.00             | 8.54                                           | 839.7                                                        | 5.91                  |

2.2 配合比设计

为了获取较好的颗粒级配，矿物掺合料采用粗细结合的双掺模式，即 S95 级磨细矿渣与超细粉煤灰双掺、S115 级磨细矿渣与Ⅱ级粉煤灰双掺，矿物掺合料占胶凝材料总量的范围为 50%~80%，双掺组分替代率分别以 10%为梯度改变。通过净浆流动度试验调整减水剂掺量，筛选得到具有良好流动性的水泥石配合比<sup>[25]</sup>，见表 2。试件编号分为 3 部分，分别表示矿物掺合料总替代率、矿物掺合料混掺方式与水胶比。

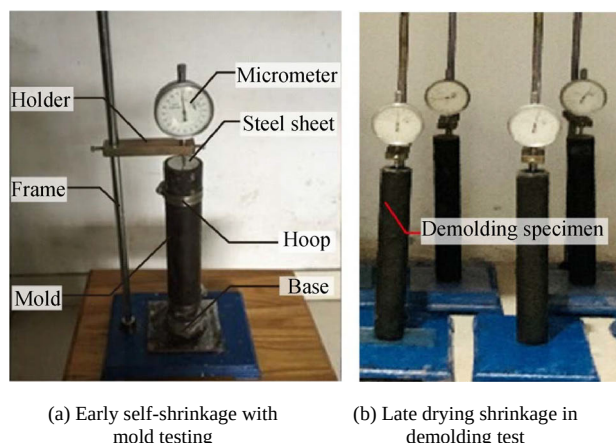
2.3 收缩试验方法

为监测符合工程实际条件的水泥石收缩过程，研

制了水泥基材料全龄期收缩测试仪器，见图 4。收缩试件模具为沿纵向切割为对称 2 部分的钢管，其内径为 36 mm，外径为 46 mm，采用套箍进行固定。模具底部插入安装在铁架台上的钢制底座，浇筑水泥浆体后，在其顶部浇筑石蜡进行液封并覆盖钢片。每个配比浇筑 3 个试件进行收缩测试，浇筑后迅速移入温度为(20±2) °C、相对湿度为(60%±5%)<sup>[26]</sup>的徐变室内。在钢片顶部安装千分表以监测试件的收缩变形(见图 4a)，最初 12 h 内读数间隔为 1 h，而后延长至 3 h。龄期 3 d 时拆除模具继续测量试件的干燥收缩(见图 4b)，龄期 10 d 前读数间隔为 1 d，而后读数间隔为 3 d，直至 28 d 龄期终止读数。

表 2 水泥石配合比  
Table 2 Mix proportions of the cement paste

| Specimen<br>No. | m/g    |                  |           |                   |          |       |                  | Water-cement ratio |
|-----------------|--------|------------------|-----------|-------------------|----------|-------|------------------|--------------------|
|                 | Cement | Class II fly ash | S115 slag | Superfine fly ash | S95 slag | Water | Superplasticizer |                    |
| 50-I-0.3        | 750    | 300              | 450       | 0                 | 0        | 450   | 10.5             | 0.30               |
| 50-II-0.3       | 750    | 0                | 0         | 150               | 600      | 450   | 7.5              | 0.30               |
| 50-III-0.3      | 750    | 0                | 0         | 300               | 450      | 450   | 4.5              | 0.30               |
| 50-IV-0.3       | 750    | 0                | 0         | 450               | 300      | 450   | 4.5              | 0.30               |
| 60-I-0.3        | 600    | 450              | 450       | 0                 | 0        | 450   | 10.5             | 0.30               |
| 60-II-0.3       | 600    | 0                | 0         | 150               | 750      | 450   | 7.5              | 0.30               |
| 60-III-0.3      | 600    | 0                | 0         | 300               | 600      | 450   | 4.5              | 0.30               |
| 60-IV-0.3       | 600    | 0                | 0         | 450               | 450      | 450   | 4.5              | 0.30               |
| 70-I-0.3        | 450    | 450              | 600       | 0                 | 0        | 450   | 10.5             | 0.30               |
| 70-II-0.3       | 450    | 0                | 0         | 150               | 900      | 450   | 7.5              | 0.30               |
| 70-III-0.3      | 450    | 0                | 0         | 375               | 675      | 450   | 4.5              | 0.30               |
| 70-IV-0.3       | 450    | 0                | 0         | 600               | 450      | 450   | 4.5              | 0.30               |
| 80-I-0.3        | 300    | 300              | 900       | 0                 | 0        | 450   | 10.5             | 0.30               |
| 80-II-0.3       | 300    | 0                | 0         | 300               | 900      | 450   | 7.5              | 0.30               |
| 80-III-0.3      | 300    | 0                | 0         | 600               | 600      | 450   | 4.5              | 0.30               |
| 80-IV-0.3       | 300    | 0                | 0         | 900               | 300      | 450   | 4.5              | 0.30               |
| 60-III-0.25     | 600    | 0                | 0         | 300               | 600      | 375   | 9.0              | 0.25               |
| 60-III-0.35     | 600    | 0                | 0         | 300               | 600      | 525   | 4.5              | 0.35               |
| 70-II-0.25      | 450    | 0                | 0         | 150               | 900      | 375   | 7.5              | 0.25               |
| 70-II-0.35      | 450    | 0                | 0         | 150               | 900      | 525   | 2.25             | 0.35               |



(a) Early self-shrinkage with mold testing

(b) Late drying shrinkage in demolding test

图 4 水泥基材料全龄期收缩测试仪器

Fig. 4 Full-age shrinkage testing instrument for cementitious materials

## 2.4 徐变试验方法

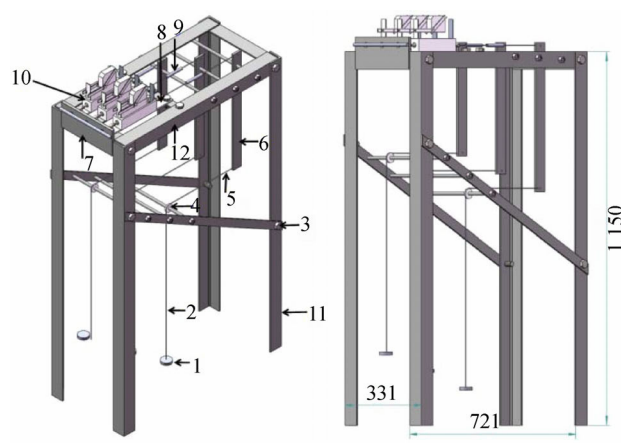
**2.4.1 试验装置** 水泥基材料超早期是指初凝至终凝的阶段, 因胶凝材料尚未硬化完全, 该阶段拉伸徐变需带模测试。采用自主研发的水泥基材料超早期拉伸徐变测试装置, 包括模具、框架、加载系统、信息采集处理系统 4 部分, 装置尺寸如图 5 所示。选取伸长率大、回弹性优的聚氨酯材料制作模具, 其物理力学性能见表 3。模具外部尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm, 内部尺寸为 35 mm×30 mm×140 mm, 内侧面布置间距为 40 mm、深度为 1 mm 的竖向通缝, 以保障模具与水泥基材料之间的良好粘结, 模具两端各通过挡板连接一根 30 mm 钢制带环螺杆, 分别作为固定端和加载端。

表 3 聚氨酯材料力学性能指标

Table 3 Mechanical performance indicators of polyurethane materials

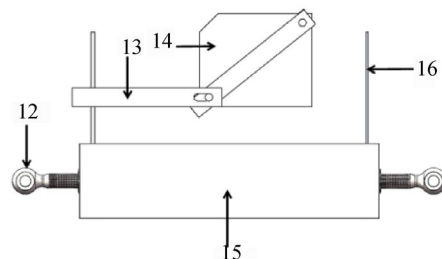
| Tensile strength/MPa | Tearing elongation/% | Elastic modulus/MPa | Poisson's ratio |
|----------------------|----------------------|---------------------|-----------------|
| 45                   | 500                  | 60                  | 0.42            |

装置框架为采用螺栓连接的 50 mm×50 mm×4 mm 角钢, 端部焊接受拉挡板, 顶部设置涂抹凡士林的轨道垫板。模具放置在轨道垫板上, 固定端螺杆与受拉挡板连接, 加载端螺杆通过钢绞线依次与拉线螺栓、杠杆、特制轴承与载荷挂板连接, 加载时在挂板上放置沙袋, 将杠杆放大后的荷载传递至模具加载端。采用固定装置将 OD2-P30W04U2 位移测量传感器安装在模具上, 通过激光测距测量模具长度变化, 采用 uT7800 系列动静态应变采集分析系统进行数据采集。



(a) Design diagram of loading frame

(b) Dimensional diagram of loading frame



(c) Diagram of cement stone stretching mold

1: Load plate; 2: Steel strand; 3: Bolt and nut; 4: Special bearing; 5: Steel strand; 6: Lever; 7: Tension baffle; 8: Track plate; 9: Stay bolt; 10: Mold with device; 11: Steel angles; 12: Bolt rod; 13: Fixed installation; 14: Laser measuring device; 15: Polyurethane mold; 16: Mold inner baffle.

图 5 水泥基材料超早期拉伸徐变测试装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the ultra early tensile creep testing device for cementitious materials

**2.4.2 加载方法** 依据《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)<sup>[27]</sup>测定水泥基材料初凝、终凝时间, 采用研发的超早期徐变加载装置测定初凝后 20 min 水泥石的抗拉强度  $f_t$ , 具体方法为通过嵌入的螺栓杆迅速向试件施加拉伸荷载, 出现裂缝时停止加载并读取此刻施加荷载值  $F$ 。利用模具与内部水泥石应变协调, 水泥石  $t$  时刻抗拉强度  $f_t(t)$ 可按式(1)进行计算。初凝后 20 min 每组配合比测试 5 个抗拉强度数据, 其均值即为  $f_t$ 。

$$f_t(t) = \frac{F(t)E(t)}{E_M A_M + E(t)A} \quad (1)$$

式中:  $E(t)$ 为  $t$  时刻水泥石的弹性模量, 由 Wang 等<sup>[28]</sup>提出的方法测试得到;  $E_M$  为模具的弹性模量;  $A_M$  为模具的 U 型槽截面面积;  $A$  为水泥石的截面面积。

为研究水泥基材料超早期徐变对其抗裂性能的影响, 采用阶梯式增量进行徐变试验加载, 初凝后

20 min 施加初始荷载, 为避免水泥石试件直接开裂, 初始荷载水平选取 0.2, 之后每分钟增加  $0.02f_t$ 。利用模具与内部水泥石应变协调, 加载过程中任一时间点施加外力可采用式(2)表示。每组配合比制备 3 个徐变试件和 3 个不施加荷载的收缩试件, 测试环境的温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为  $(60\% \pm 5\%)$ 。

$$F(t) = \frac{(0.2 + 0.02t)f_t [E_M A_M + E(t)A]}{E(t)} \quad (2)$$

基于毕波等<sup>[29]</sup>提出的徐变应变增量分析模型, 修正得到梯度递增加载制度下的水泥基材料超早期徐变度逐步计算法, 开裂时的徐变度  $C(\tau_0, \tau_i)$  按式(3)计算, 具体推导过程参照文献[30]。

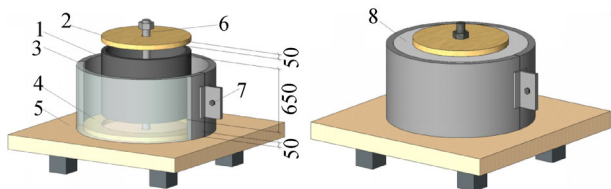
$$C(\tau_0, \tau_i) = \frac{\varepsilon_c(\tau_i)}{\sigma_c(\tau_i)} = \frac{\varepsilon(\tau_i)}{\sigma_c(\tau_i)} - \frac{m_c \varepsilon_c(\tau_0)}{m_1 \sigma_c(\tau_i)} \quad (3)$$

式中:  $\tau_0$  为加载时刻;  $\tau_i$  为开裂时刻;  $\varepsilon_c(\tau_i)$  为开裂时刻的徐变应变;  $\sigma_c(\tau_i)$  为水泥基材料在开裂时刻所受应力;  $\varepsilon(\tau_i)$  为开裂时的除去收缩的总拉伸应变;  $m_c$  为开裂时试件所受荷载;  $m_1$  为试件所受初荷载;  $\varepsilon_c(\tau_0)$  为初始弹性应变。

## 2.5 开裂试验方法

**2.5.1 试验装置** 约束作用下, 水泥基材料凝结硬化过程中的收缩会引起约束应力, 而徐变可使该部分约束应力得以松弛。为综合反映水泥基材料收缩、徐变对开裂性能的影响, 基于圆环约束开裂法研发了水泥石试件开裂试验装置, 能够稳定监测自浇筑到拆模期间自收缩引起的约束应力, 以及拆模后干燥收缩引起的约束应力。

传统混凝土圆环约束开裂测试装置尺寸大、弹性模量高, 用于测试水泥石试件开裂不仅浪费试验材料, 而且敏感性不足。考虑此, 选取聚氯乙烯树脂塑料材质制作内圆环, 其弹性模量  $E_p$  为 4.38 GPa, 泊松比  $\nu$  为 0.393。设计的圆环装置示意图见图 6<sup>[31]</sup>, 低弹模内圆环外部设置可拆卸开口外圆环, 内、外圆环之间安装限位环形板, 内圆环顶部安装限位圆形板, 采用固定螺栓将限位圆形板、低弹模内圆环、



1: Low elastic mode inner ring; 2: Limit circular plate; 3: Open outer ring; 4: Limit ring plate; 5: Pedestal; 6: Fixing bolt; 7: Connecting bolt; 8: Cement specimen

图 6 低弹模圆环约束开裂模具

Fig. 6 Low modulus circular ring constraint cracking mold

基座紧密固定。其中, 内圆环内径为 81.4 mm、外径为 90.0 mm, 外圆环内径为 126.6 mm, 二者高度均为 65.0 mm。

**2.5.2 加载与量测方案** 在内圆环内表面中间高度每间隔  $90^\circ$  粘贴一对垂直布设的应变片, 见图 7a。将处于对侧的两对应应变片采用全桥连接进行测量, 见图 7b。2 组全桥桥路测量读数  $\varepsilon_{r1}$ 、 $\varepsilon_{r2}$  与内圆环内表面环向拉应变  $\varepsilon_{\theta1, \max}(t)$  的关系见式(4)。

$$\varepsilon_{\theta1, \max}(t) = \frac{1}{2(1+\nu)} \cdot \frac{\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2}}{2} \quad (4)$$

通过预拧紧固定螺栓连接基座、内圆环以及限位圆形板, 在基座上安装限位环形板和开口外圆环后, 在由内圆环、限位环形板与开口外圆环组成的试模内部涂抹润滑剂。将制备的水泥浆体分 3 次等量倒入试模中, 每次浇筑后充分振捣, 最后将试件表面刮平并覆盖塑料薄膜, 试件高度为 60.0 mm。浇筑完毕后, 将试件连同装置移至温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为  $(60\% \pm 5\%)$  的徐变室内。连接应变采集系统, 拆卸固定螺栓和限位圆形木板, 而后开启应变采集系统, 达到养护龄期后, 揭除塑料薄膜并拆除开口外圆环, 直至试件开裂, 每组配合比测试 3 次, 实测过程见图 8。

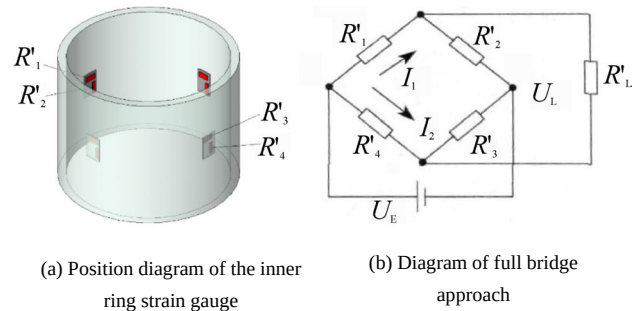


图 7 水泥基材料约束应力量测方案

Fig. 7 Measurement scheme for constraint stress of cementitious materials

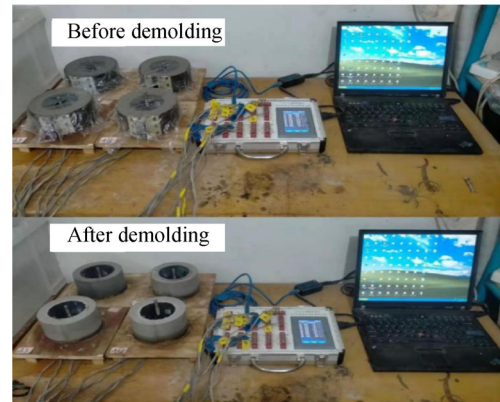
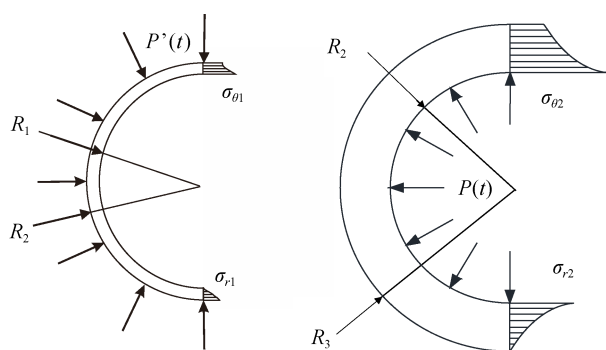


图 8 水泥基材料开裂试验实测过程

Fig. 8 Actual measurement process of cracking test of cementitious materials

**2.5.3 约束应力分析** 水泥石环形试件收缩受内圆环的约束, 内圆环与环形试件极坐标下受力分别如图 9a、图 9b 所示。由图 9 可见,  $R_1$  表示内圆环内径,  $R_2$  表示内圆环外径(即环形试件内径),  $R_3$  表示环形试件外径,  $P(t)$  表示  $t$  时刻水泥石环形试件受到来自于内圆环的径向约束应力,  $P(t)$  表示水泥石环形试件收缩对内圆环产生的径向作用应力, 与  $P(t)$  互为反作用力。



(a) Force diagram of inner ring

(b) Force diagram of ring specimen

图 9 内圆环与水泥石环形试件受力示意图

Fig. 9 Schematic diagram of stress on inner ring and cement stone ring specimens

根据弹性力学分析, 不考虑内圆环承受的径向应力, 假定环向应力沿径向均匀分布, 则内圆环径向各位置的环向应力均按最大值  $\sigma_{\theta 1, \max}(t)$  取值, 基于径向约束应力  $P(t)$  求解得到的  $\sigma_{\theta 1, \max}(t)$  可表示为

$$\sigma_{\theta 1, \max}(t) = \frac{2R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} P(t) \quad (5)$$

环形试件最大环向拉应力  $\sigma_{\theta 2, \max}(t)$  按式(6)计算。

$$\sigma_{\theta 2, \max}(t) = \frac{R_3^2 + R_2^2}{R_3^2 - R_2^2} P(t) \quad (6)$$

基于聚氨酯弹性本构关系, 内圆环内表面拉伸应变  $\varepsilon_{\theta 1, \max}(t)$  与所受应力  $\sigma_{\theta 1, \max}(t)$  的关系为

$$\sigma_{\theta 1, \max}(t) = E_p \varepsilon_{\theta 1, \max}(t) \quad (7)$$

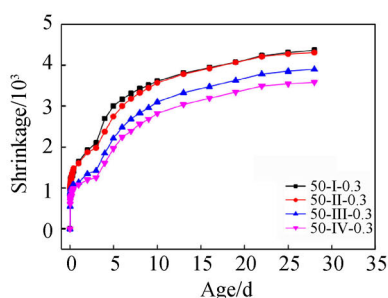
联立式(4)~式(7), 可利用应变测量结果求解环形试件  $\sigma_{\theta 2, \max}(t)$ , 见式(8)。

$$\sigma_{\theta 2, \max}(t) = \frac{E_p (\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2})}{8(1+\nu)} \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_2^2} \cdot \frac{R_3^2 + R_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \quad (8)$$

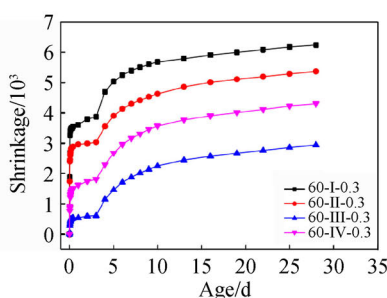
### 3 结果与讨论

#### 3.1 收缩试验

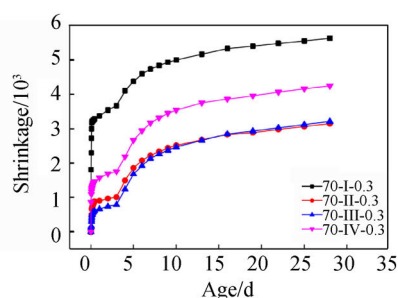
对表 2 中各组水泥石开展早龄期收缩试验, 得到收缩应变随时间变化曲线见图 10。由图 10 可见:



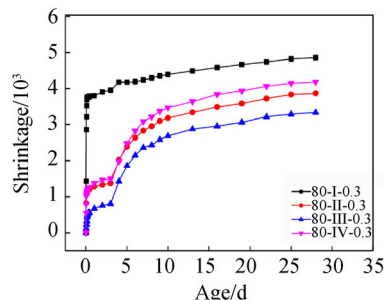
(a) 50% total replacement at 0.3 water-cement ratio



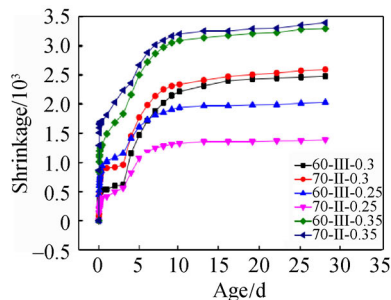
(b) 60% total replacement at 0.3 water-cement ratio



(c) 70% total replacement at 0.3 water-cement ratio



(d) 80% total replacement at 0.3 water-cement ratio



(e) Effect of water-cement ratio on shrinkage

图 10 水泥石收缩应变-龄期曲线

Fig. 10 Shrinkage strain-age curves of hardening paste

1) 矿物掺合料总替代率相同时, 颗粒级配不同导致水泥石收缩存在差异, 超细粉煤灰和 S95 级磨细矿渣混掺组均比 II 级粉煤灰与 S115 级磨细

矿渣混掺组收缩小, 究其原因, 磨细矿渣活性高于粉煤灰, 配置细度较小的磨细矿渣和细度较大的粉煤灰有利于减小二者反应速率差异, 减少孔

隙结构;

2) 矿物掺合料的总替代率为 50% 时, 增大超细粉煤灰掺量同时降低 S95 级磨细矿渣掺量, 引起水泥石收缩值减小, 较高总替代率下(60%~80%), 随超细粉煤灰掺量增大、S95 级磨细矿渣掺量降低, 收缩呈先降低后增大的趋势;

3) 矿物掺合料的总替代率为 50%、60%、70%、80% 时, 超细粉煤灰掺量的最佳值分别为 30%、20%、25%、40%。

4) 不同矿物掺合料替代率下, 水泥石收缩均随水胶比的提高而增大。

为表征矿物掺合料颗粒级配对水泥石收缩的影响程度, 定义影响系数  $N$ :

$$N = \frac{M_1}{M_2} \quad (9)$$

式中:  $M_1$ 、 $M_2$  分别为矿物掺合料总替代率相同时, 不同组分水泥石 30 d 收缩的最大值和最小值。

基于收缩试验数据进行计算, 矿物掺合料的总替代率为 50%、60%、70%、80% 时,  $N$  值分别为 1.22、2.12、1.79、1.46。由此可知, 矿物掺合料总替代率不同, 胶凝材料的颗粒级配对水泥石收缩的影响程度也不同。矿物掺合料总替代率为 60% 时, 改善颗粒级配对降低水泥石收缩的效果

最为明显。

### 3.2 徐变试验

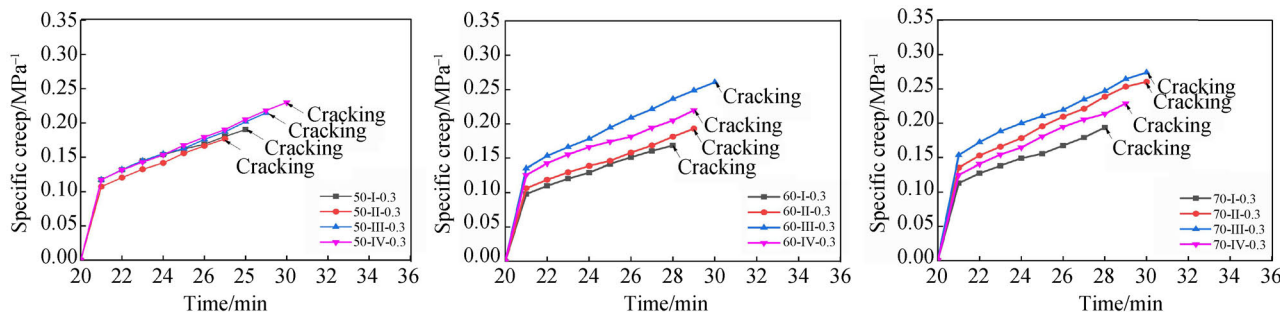
对表 2 中各组水泥石配合比开展超早期拉伸徐变试验, 得到的徐变度随时间变化曲线如图 11 所示, 各试件开裂时刻均标注于图中。由图 11 可见:

1) 矿物掺合料的总替代率为 50% 时, 粉煤灰与磨细矿渣颗粒匹配方式对水泥石超早期拉伸徐变趋势影响不显著, 但造成开裂时刻对应的徐变度存在差别, 其中试件 50-IV-0.3(30% 超细粉煤灰和 20% S95 级磨细矿渣混掺组) 开裂时刻最晚;

2) 较高总替代率(60%~80%) 下, 不同颗粒级配的水泥石超早期徐变表现出明显差异, 相较于 II 级粉煤灰与 S115 级磨细矿渣混掺组, 超细粉煤灰和 S95 级磨细矿渣混掺组超早期徐变度较大、开裂较晚;

3) 与收缩规律相反, 较高总替代率(60%~80%) 下, 增大超细粉煤灰掺量同时降低 S95 级磨细矿渣掺量, 超早期徐变度表现为先增大后减小。

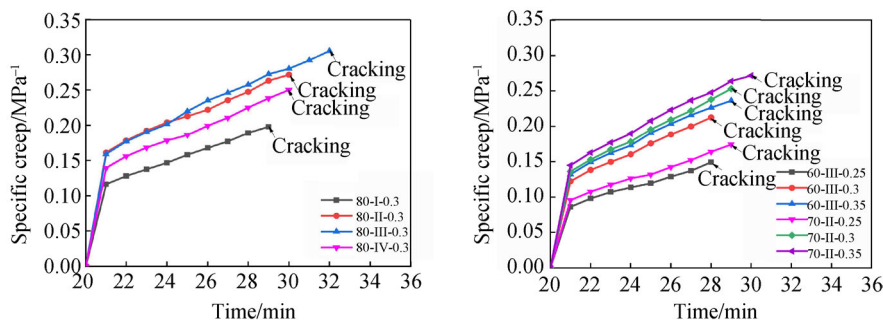
4) 水灰比由 0.25 提高至 0.30 时, 水泥石超早期徐变度显著增大, 但对开裂时间影响不显著; 水灰比由 0.30 提高至 0.35 使得超早期徐变度略有提高、开裂时间稍有延后。



(a) 50% total replacement at 0.3 water-cement ratio

(b) 60% total replacement at 0.3 water-cement ratio

(c) 70% total replacement at 0.3 water-cement ratio



(d) 80% total replacement at 0.3 water-cement ratio

(e) Effect of water-cement ratio on ultra-early creep

图 11 水泥石超早期徐变度时随变化曲线

Fig. 11 Time varying curves of the ultra-early specific creep of hardening paste

### 3.3 开裂试验

为分析矿物掺合料颗粒级配对水泥石抗开裂能力的影响,采用研发的圆环约束开裂装置对表 2 中矿物掺合料总替代率为 60%、水灰比为 0.3 的水泥石开展约束开裂试验,试件带模测试时长为 24 h。采用 2.5 节测试分析方法得到试件最大环向拉应力  $\sigma_{\theta 2, \max}$ ,  $\sigma_{\theta 2, \max}$  时随变化曲线见图 12。对  $\sigma_{\theta 2, \max}-t$  曲线进行求导,得到环向应力增长速率  $K$ ,  $K-t$  曲线见图 13。

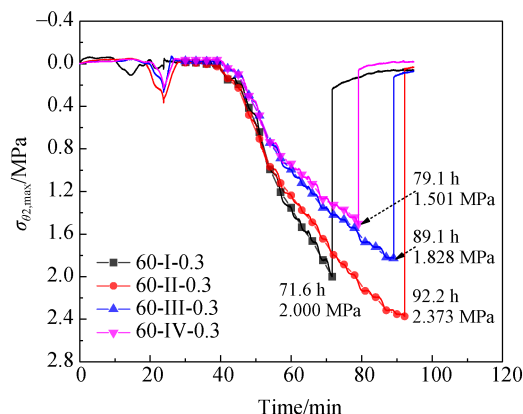


图 12 环向约束水泥石试件  $\sigma_{\theta 2, \max}-t$  曲线

Fig. 12  $\sigma_{\theta 2, \max}-t$  curves of circumferentially constrained hardening paste

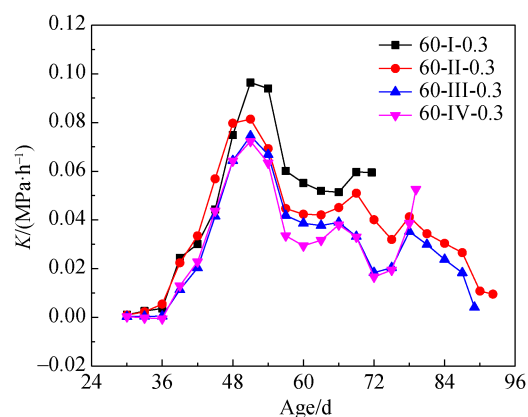


图 13 环向约束水泥石试件  $K-t$  曲线

Fig. 13  $K-t$  curves of circumferentially constrained hardening paste

综合 3.1、3.2 节结果可知,矿物掺合料的总替代率为 60%时,水泥石的早龄期收缩从小到大依次为 60-III-0.3、60-IV-0.3、60-II-0.3、60-I-0.3,超早期徐变从高到低依次为 60-III-0.3、60-IV-0.3、60-II-0.3、60-I-0.3,即 60-I-0.3 表现为高收缩低徐变特征,而 60-III-0.3 表现为低收缩高徐变特征、60-II-0.3 与 60-IV-0.3 居中。结合图 12、图 13 可见,60-I-0.3 与 60-III-0.3 开裂时刻对应的最大环向拉应力  $\sigma_{cr}$  接近,但 60-III-0.3 开裂时间显著延后,应力

增长速率  $K$  较低,表明采用低收缩高徐变的水泥石能够达到松弛收缩应力的效果,有利于延缓水泥石开裂。

## 4 结论

针对水泥基材料早龄期收缩、超早期徐变与早龄期开裂性能开展试验研究,得出以下结论:

1) 采用相同种类的矿物掺合料,颗粒级配不同会引起水泥石收缩存在差异。将细度较小的 S95 级磨细矿渣和细度较大的超细粉煤灰协同配置,二者反应速率差异较小,制备的水泥石表现为低收缩特征。

2) 矿物掺合料总替代率处于 60%~80% 区间时,增加超细粉煤灰掺量同时降低 S95 级磨细矿渣掺量,水泥石收缩呈先降低后增大的特征,超早期徐变度表现为先增大后减小。

3) 矿物掺合料总替代率较高(60%~80%)时,相较于 II 级粉煤灰与 S115 级磨细矿渣混掺组,超细粉煤灰和 S95 级磨细矿渣混掺组超早期徐变度较大、开裂较晚。

4) 采用低收缩高徐变水泥石能够有效降低其内部应力增长速率,起到松弛收缩应力、延后开裂时间的效果。

### 参考文献:

- [1] 覃源, 吕昊, 关科, 等. 基于熵权法的混凝土耐久性评价及寿命预测[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(5): 1344-1354.  
QIN Yuan, LV Gao, GUAN Ke, et al. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(5): 1344-1354.
- [2] 鲍玖文, 魏佳楠, 张鹏, 等. 海洋环境下混凝土抗氯离子侵蚀的相似性研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(5): 689-704.  
BAO Jiwen, WEI Jianan, ZHANG Peng, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(5): 689-704.
- [3] 刘镇. 海洋环境下混凝土氯离子渗透性评价[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(11): 2846-2856.  
LIU Zhen. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(11): 2846-2856.
- [4] 杨华全, 周世华, 董维佳. 混凝土抗裂性的分析、评价与研究展望[J]. 混凝土, 2007(10): 46-48.  
YANG Huaquan, ZHOU Shihua, DONG Weijia. Concrete, 2007(10): 46-48.
- [5] 刘四进, 何川, 封坤, 等. 受荷状态下盾构隧道管片锈蚀劣化破坏过程研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(6): 120-128.  
LIU Sijin, HE Chuan, FENG Kun, et al. China Civ Eng J, 2018, 51(6): 120-128.
- [6] 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 Jianzhong, SUN Wei, MIAO Changwen, et al. J Southeast Univ Nat Sci Ed, 2009, 39(3): 580–585.
- [7] 管宗甫, 李小红, 李世华, 等. 矿物掺合料和聚丙烯纤维对混凝土性收缩开裂的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(5): 794–798.
- GUAN Zongfu, LI Xiaoying, LI Shihua, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2013, 32(5): 794–798.
- [8] PORMMOON P, CHAROENAMNUAYSUK P, JATURAPITAKKUL C, et al. Strength, shrinkage, heat evolution, and microstructure of high performance concrete containing high proportions of ground bottom ash blended with fly ash[J]. J Sustain Cem Based Mater, 2023, 12(10): 1270–1285.
- [9] 郑杰, 罗素蓉, 欧翔, 等. 不同胶凝组成对 3D 打印水泥基材料干燥收缩性能的影响[J]. 工业建筑, 2023, 53(10): 151–156.
- ZHENG Jie, LUO Surong, OU Xiang, et al. Ind Constr, 2023, 53(10): 151–156.
- [10] 李司晨, 张云升, 张国荣. 高性能混凝土的拉伸徐变特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(增刊 2): 40–44.
- LI Sichen, ZHANG Yunsheng, ZHANG Guorong. J Civ Environ Eng, 2013, 35(S2): 40–44.
- [11] 马新伟, 钮长仁, HOOTON R D. 高性能混凝土在约束条件下的受拉徐变特征[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(2): 26–29.
- MA Xinwei, NIU Changren, HOOTON R D. J Wuhan Univ Technol, 2006, 28(2): 26–29.
- [12] 杨杨, 王亦聪, 高凡, 等. 基于温度-应力试验的粉煤灰混凝土抗裂性能[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(8): 1101–1108.
- YANG Yang, WANG Yicong, GAO Fan, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(8): 1101–1108.
- [13] 赵庆新, 孙伟, 缪昌文. 粉煤灰掺量和水胶比对高性能混凝土徐变性能的影响及其机理[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 76–82.
- ZHAO Qingxin, SUN Wei, MIAO Changwen. China Civ Eng J, 2009, 42(12): 76–82.
- [14] 赵庆新, 孙伟, 缪昌文, 等. 磨细矿渣掺量对混凝土徐变性能的影响及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(10): 1760–1766.
- ZHAO Qingxin, SUN Wei, MIAO Changwen, et al. J Chin Ceram Soc, 2009, 37(10): 1760–1766.
- [15] Young J F. Assessment of the influence of microstructure on time dependent deformations of hardened cement paste [C]//Proceedings of First Australian Conference on Engineering Materials, Sidney, 1974: 3–28.
- [16] Powers T C. Mechanisms of shrinkage and reversible creep of hardened Portland cement paste [C]//Proceedings of International Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association, London, England, 1968: 319–344.
- [17] Xi Y, Jennings H M. Relationships between microstructure and creep and shrinkage of cement paste [C]// Materials Science of Concrete, Vol. III, The American Ceramic Society, Westerville, OH, 1992: 37–63.
- [18] 沈翀. 混凝土和水泥净浆早期收缩研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 30.
- SHEN Chong. A study on early-age shrinkage of concrete and cement paste [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 30.
- [19] 冯奇, 刘光明, 巴恒静. 颗粒级配水泥基材料有害孔隙率的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(9): 1168–1172.
- FENG Qi, LIU Guangming, BA Hengjing. J Tongji Univ, 2004, 32(9): 1168–1172.
- [20] 高嵩, 李秋义, 李楠, 等. 基于最紧密堆积理论超密实再生砂浆制备研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S1): 466–472.
- GAO Song, LI Qiuyi, LI Nan, et al. J Build Struct, 2021, 42(S1): 466–472.
- [21] 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 Cong, CHEN Baochun, WEI Jiangang. J Traffic Transp Eng, 2019, 19(5): 11–20.
- [22] 廖宜顺, 叶建, 汤盛文. 海水拌和与偏高岭土对铁铝酸盐水泥水化的影响[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(11): 2834–2845.
- LIAO Yishun, YE Jian, TANG Shengwen. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(11): 2834–2845.
- [23] 吴福飞, 董双快, 赵振华, 等. 矿物掺合料对水泥基材料化学收缩与光谱性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 177–184.
- WU Fufei, DONG Shuangkuai, ZHAO Zhenhua, et al. Trans Chin Soc Agric Eng, 2018, 34(4): 177–184.
- [24] 徐泽华, 赵庆新, 张津瑞, 等. 界面过渡区对混凝土徐变性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 347–356.
- XU Zehua, ZHAO Qingxin, ZHANG Jinrui, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(2): 347–356.
- [25] 单心宇. 矿物掺合料的颗粒级配水泥石收缩的影响[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- SHAN Xinyu. Influence of particle size distribution of mineral admixture on shrinkage of cement stone[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [26] GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [27] 中国建筑材料科学研究总院、厦门艾思欧标准砂有限公司、浙江中富建筑集团股份有限公司等. GB/T 1346—2011 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [28] WANG D L, ZHAO Q X, ZHANG J R, et al. Experimental research for elastic modulus of cement paste at ultra-early age based on indentation technique[J]. Constr Build Mater, 2019, 226: 51–60.
- [29] 毕波, 邹小江, 寿楠椿. 关于混凝土徐变计算的一些讨论[J]. 郑州工业大学学报, 1998, 19(4): 18–21.
- BI Bo, ZOU Xiaojang, SHOU Nanchun. J Zhengzhou Univ Eng Sci, 1998, 19(4): 18–21.
- [30] 马千里. 水泥基材料超早期拉伸徐变试验方法[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
- MA Qianli. Test method on tensile creep of cement-based materials at ultra-early age [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.
- [31] 苏沛磊. 低收缩高徐变水泥基材料的抗裂性能[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- SU Shuailei. Crack resistance of cement-based materials with low shrinkage and high creep [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.

## Improvement of Early-Age Crack Resistance of Concrete Based on Reverse Design of Shrinkage and Creep

SUN Yijia<sup>1,2</sup>, JIA Yali<sup>1,2</sup>, HE Zhengfeng<sup>3</sup>, SHAN Xinyu<sup>1,2</sup>, SU Shuailei<sup>1,2</sup>, ZHAO Qingxin<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Province Engineering Research Center for Harmless Synergistic Treatment and Recycling of Municipal Solid Waste, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China;

2. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China;

3. Cangzhou Qugang Expressway Construction Co.Ltd, Cangzhou 062450, Hebei, China)

### Extended Abstract

**Introduction** Reinforced concrete structures are currently the most widely used structural form. However, a large number of concrete structures deteriorate with premature failure under the action of environmental factors. Numerous studies and engineering investigations have reported that cracking and expansion of microcracks in concrete structures under various conditions provide a channel for the diffusion of erosive media, which is the most important factor leading to the deterioration of concrete and thus reducing the durability of the structure. Shrinkage of concrete is an important causative factor for its cracking, and the rational use of mineral admixtures can effectively reduce the shrinkage, which is an important way to improve the crack resistance of concrete. Moreover, concrete is subjected to continuous tensile stress caused by contraction and temperature difference during the setting process. It has been proved that improving the early tensile creep of concrete can relax the tensile stress, and thus effectively inhibit the cracking of concrete. In this study, a design method of low shrinkage high creep cementitious materials was realized by adjusting the mineral admixture amount, mineral admixture fineness and water-cement ratio. The enhancement of cracking resistance was finally obtained as expected.

**Methods** P·II 42.5 cement, Class II fly ash, S95 slag, ultrafine fly ash and S115 slag were selected for this test. The mineral admixtures were used in a double mixing mode combining coarse and fine particles, i.e., double mixing of S95 slag with ultrafine fly ash, and double mixing of S115 slag with Class II fly ash, with the range of mineral admixtures to the total cementitious materials from 50% to 80%. The substitution rate of each component changed with an increment of 10%.

Three series of tests were included in this work: a full-age shrinkage test, an ultra-early tensile creep test, and a cracking test. The full-age shrinkage test apparatus was used to test the autogenous shrinkage from casting to 3 d and the drying shrinkage from 3 d to 28 d of cementitious materials. The ultra-early tensile device was used to test the tensile strain of cementitious materials from initial to final setting. This device used a polyurethane mold to hold the specimen and transfer the tensile load. The creep displacement was monitored by a laser displacement sensor. A low-elasticity circular restrained cracking mold was used to monitor the restraining stresses due to autogenous shrinkage from casting to demolding, as well as the restraining stresses caused by drying shrinkage after demolding. The mold was made of polyvinyl chloride resin plastic material. A pair of vertically placed strain gauges were pasted on the inner surface of the inner ring to detect the stresses.

**Results and discussion** Shrinkage test results show that at constant total replacement rate of mineral admixtures, the mixing group of ultrafine fly ash and S95 slag is smaller than the mixing group of Class II fly ash and S115 slag. The reason is that the activity of the slag is higher than that of the fly ash. Using of smaller fineness slag and larger fineness fly ash in combination is beneficial to decrease the difference in the reaction rate of these two materials, leading to a reduction in the porosity. When the total replacement rate of mineral admixture is 60%, the effect of improving the particle grade matching to reduce the shrinkage of the cement stone reaches maximum. In addition, the shrinkage of the cement stone increased with increasing water-cement ratio for all different mineral admixture substitution rates. Ultra-early tensile creep test results show that under relatively high total substitution rate (60%–80%), the ultra-early creep of cementite with different particle gradation shows obvious differences. Compared with the mixing group of Class II fly ash and S115 slag, the mixing group of ultra-fine fly ash and S95 slag exhibits larger ultra-early creep and later cracking. Contrary to the shrinkage law, under relatively high total substitution rate (60%–80%), increasing the substitution rate of ultrafine fly ash while simultaneously decreasing the substitution rate of S95 slag, the ultra-early creep is shown to increase first and then decrease. Increasing the water-cement ratio slightly increases the ultra-early specific creep and delays the cracking time. The use of low shrinkage high creep cement stone can effectively reduce the internal stress growth rate, resulting in shrinkage stress relax and cracking time delay.

**Conclusions** Experimental studies are carried out on the early age shrinkage, creep and cracking properties of cementitious materials. The following conclusions are drawn. The cement stone using S95 slag with coarse particles and ultrafine fly ash with fine particles in combination exhibits characteristics of low shrinkage and high creep. When the total replacement rate of mineral admixture is in the range of 60%–80%, increasing the admixture of ultrafine fly ash while simultaneously decreasing the admixture of S95 slag, the shrinkage of specimens is observed to decrease first and then increase. While the ultra-early creep is characterized by increasing first and then decreasing. The use of low shrinkage high creep cement stone can effectively reduce the growth rate of the internal stress and delay the cracking time.

**Keywords** cementitious material; crack resistance; early-age; shrinkage; creep