

超高性能混凝土早期收缩性能的研究

Study on Early Shrinkage of Ultra-high Performance Concrete

顾炳伟^{1,3}, 王景正¹, 龚致远¹, 韩沛沛², 邹金丽¹

(1. 江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 连云港 222005; 2. 江苏瀚能电气有限公司, 连云港 222300;
3. 江苏省海洋工程基础设施智能建造工程研究中心, 连云港 222005)

摘要: 为解决超高性能混凝土 (UHPC) 早期开裂的问题, 研究了不同组成、不同养护方式下 UHPC 的早期收缩情况。结果表明: UHPC 早期收缩存在一个临界水胶比, 水胶比小于临界水胶比时, UHPC 早期收缩随水胶比增大而增大, 水胶比大于临界水胶比时, 其收缩随水胶比的增大而减小; 粉煤灰与矿渣粉对 UHPC 早期收缩影响表现相似, 随掺量的增加收缩减小, 且粉煤灰抑制收缩的效果优于矿渣粉; 硅灰掺量增加, UHPC 早期收缩增大; 钢纤维对抑制 UHPC 早期收缩有明显效果; 不同养护方式下 UHPC 的 7 d 总收缩, 以热水养护最大, 标准养护次之, 自然养护最小; 4 种养护制度在前 3 d 产生的收缩均十分明显, 在 3~7 d 期间, 热水养护产生的收缩较小, 因此, 实际工程中前期适当进行热水养护, 对后期抑制收缩发展有利。

关键词: 超高性能混凝土; 组成; 养护方式; 早期收缩

中图分类号: TU528.31 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0011-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.003

GU Bingwei^{1,3}, WANG Jingzheng¹, GONG Zhiyuan¹, HAN Peipei², ZOU Jinli¹

(1. College of Civil and Harbor Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;
2. Jiangsu Hanneng Electric Corporation Limited, Lianyungang 222300, China; 3. Jiangsu Ocean Engineering Research Center for Intelligent Infrastructure Construction, Lianyungang 222005, China)

Abstract: The shrinkages of UHPC specimens with different constituent in different curing methods were measured by contact method in order to solve the crack problem of UHPC at early stage. The results show that there is a critical water-binder ratio for the early shrinkage of UHPC, when the water-binder ratio is less than the critical water-binder ratio, the shrinkage of UHPC increases with the increase of water-binder ratio, and decreases with the increase of water-binder ratio when the water-binder ratio is larger than the critical water-binder ratio. The effect of fly ash and slag powder on early shrinkage of UHPC is similar. The shrinkage decreases with the increase of the dosage of fly ash and slag powder, the effect of fly ash on early shrinkage control is better than that of slag powder. The early shrinkage of UHPC increases with the addition of silica fume. There is the obvious effect of steel fiber on early shrinkage control of UHPC. The total shrinkage of UHPC in 7 d is the highest in hot water curing, the second in standard curing, and the lowest in natural curing. The shrinkage of the four curing methods is very obvious in the first 3 d, and the shrinkage from 3 d to 7 d in hot water curing is the smallest in four curing methods. Therefore, the proper hot water maintenance in the early stage of the actual project is beneficial to the late development of shrinkage inhibition.

Key words: ultra-high performance concrete; constituent; curing method; early shrinkage

0 引言

自 Larrard 等^[1]提出超高性能混凝土 (UHPC) 以来,其研究与应用已成为土木工程领域关注的热点。作为一种新型水泥基复合材料,其以极低的水胶比,高胶凝材料用量,从而具备高强度、高韧性和耐久性好的特点^[2-3]。但由于其胶凝材料早期水化程度剧烈,水化进程发展迅速,导致其早期体积变化大,开裂敏感性高^[4]。由于早期收缩导致 UHPC 开裂,影响 UHPC 的耐久性及其在工程中的应用^[5-6]。因此,对其开展早期收缩研究具有极其重要的意义。

UHPC 的极低水胶比、极高的胶凝材料用量以及早期养护的温湿度变化等,对 UHPC 早期收缩均有显著影响。Liu 等^[7]研究了低水胶比 (0.2 以下) 的 UHPC 早期水化特征及其力学性能,结果显示早龄期 (1 d) UHPC 中的胶凝材料水化速度较快,UHPC 的强度发展迅速,同时早龄期 UHPC 的体积变化发展亦非常显著。曹世勇^[8]研究不同水胶比下超高性能水泥基材料自收缩性能,发现随着水胶比的降低,混凝土内部毛细孔张力增大,导致内部自由水减少,材料内部自干燥现象提前,收缩增大。韩松等^[9]研究了不同粉煤灰、矿渣粉和硅灰的组合情况下 UHPC 收缩情况,结果表明高粉煤灰掺量下的 UHPC 早期收缩得到抑制,而矿渣粉在低掺量下的作用效果更优;矿渣粉和硅灰共同使用可有效降低收缩。钢纤维在 UHPC 中可起到骨料作用,增大与其他材料间的摩擦力,从而延缓早期裂缝的发展和扩大,对 UHPC 的收缩起抑制作用,减少早期裂缝的产生^[10]。Scheydt 等^[11]研究发现,UHPC 早期收缩与内部温度有紧密的关系,温度的升高加速了水化反应,低温则产生相反的效果。杭美艳等^[12]研究了不同钢纤维掺量的 UHPC 在自然养护、标准养护、热水养护 3 种养护条件下的收缩性能变化,结果表明标准养护和热水养护条件对 UHPC 的收缩有比较显著抑制作用,因此养护过程对温度的控制极为重要。对实际工程的调查研究发现,大多数的超高性能混凝土构件的开裂,极少数是因疲劳或过载引起的^[13-14],绝大部分是由于 UHPC 自身收缩变形造成。因此,对 UHPC 的收缩性能研究有利于探寻超高性能混凝土的开裂原因,制定其开裂抑制措施。

基于此,在基准配合比的基础上通过改变 UHPC 的组成及养护方式,研究 UHPC 的早期总体收缩的特性,以期解决实际工程应用中存在的早期开裂问题,为实际工程应用提供指导。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

水泥选用 P·O 52.5 水泥,主要性能指标见表 1;细集料采用连云港当地河砂,细度模数为 2.87,级配满足混凝土用砂 II 区砂的级配要求;硅灰品质符合 GB/T 27690—2011《砂浆和混凝土用硅灰》要求,活性指数 119%;矿渣粉品质符合 GB/T 18046—2017《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》要求,比表面积为 420 m²/kg;活性指数 102%;粉煤灰采用 I 级粉煤灰,品质符合 GB/T 1596—2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》要求,游离 CaO 为 0.19%,需水量比 92%;钢纤维采用镀铜微丝钢纤维,其主要性能指标见表 2。品质符合 JG/T 3064—1999《钢纤维混凝土》要求;减水剂采用市售的聚羧酸高效减水剂,白色固态粉末,减水率为 30%;水为自来水。

表 1 水泥主要性能指标
Table 1 Main properties of cement

比表面积 / (m ² /kg)	凝结时间/min		3 d 强度/MPa		烧失量/%
	初凝	终凝	抗折	抗压	
385	151	196	5.9	31.7	2.06

表 2 钢纤维主要性能指标
Table 2 Main properties of steel fiber

长度/mm	等效直径/mm	长径比	抗拉强度/MPa
12.26	0.22	61	2 886

1.2 配合比

试验的基础配合比见表 3。为了分析 UHPC 的材料组成对其早期收缩性能的影响,将水胶比、粉煤灰、矿渣粉、硅灰和钢纤维掺量作为试验变量,其中粉煤灰、矿渣粉和硅灰掺量以质量百分数计量,钢纤维以体积百分数计量,减水剂以胶凝材料的百分比计量,根据试验变量的变化确定试验配合比,见表 4。

表 3 UHPC 基础配合比
Table 3 Benchmark mix proportion of UHPC

水泥 /kg	砂/kg	粉煤 灰/kg	矿渣 /kg	硅灰 /kg	水/kg	硅灰掺 量/%	减水剂 掺量/%
980	980	98	196	294	266	30	1.25

表 4 UHPC 试验配合比
Table 4 Test mix proportion of UHPC

编号	水胶比	粉煤灰/kg	矿渣粉/kg	硅灰/kg	钢纤维/%
W/B-0.16	0.16	98	196	294	2
W/B-0.17	0.17	98	196	294	2
W/B-0.18	0.18	98	196	294	2
W/B-0.19	0.19	98	196	294	2
W/B-0.20	0.20	98	196	294	2
FA-0	0.17		196	294	2
FA-10	0.17	98 (10%)	196	294	2
FA-20	0.17	180 (20%)	196	294	2
FA-30	0.17	248 (30%)	196	294	2
Cr-0	0.17	98		294	2
Cr-10	0.17	98	107 (10%)	294	2
Cr-20	0.17	98	196 (20%)	294	2
Cr-30	0.17	98	272 (30%)	294	2
Si-0	0.17	98	196		2
Si-10	0.17	98	196	132 (10%)	2
Si-20	0.17	98	196	212 (20%)	2
Si-30	0.17	98	196	294 (30%)	2
SF-0	0.17	98	196	294	
SF-1	0.17	98	196	294	1
SF-2	0.17	98	196	294	2
SF-3	0.17	98	196	294	3

1.3 试件制备

首先将水泥、砂、粉煤灰、矿渣粉、硅灰等干料按 UHPC 配合比称量投入强制式卧轴混凝土搅拌机（主轴转速为 40 r/min）进行干拌预混 2min；然后加入已经溶解的减水剂和剩余的水，搅拌 6 ~ 10 min，搅拌过程中根据 UHPC 拌合料的搅拌情况适当调整搅拌时间，直至拌合料完全流化；将钢纤维分撒均匀加入搅拌机，搅拌 2 ~ 3 min 使钢纤维完全与混凝土混合；最后将搅拌好的 UHPC 拌合物立即分 3 次均匀装入 PVC 管中，每次装料后在 ZHDG-80 型振动台（振动频率为 50 Hz，振幅为 0.5 mm）上振动 10 s 左右，装填完毕后用保鲜膜密封顶面，试件分别采用 90℃ 热水养护、标准养护、自然水养护和自然养护到规定龄期。

1.4 收缩性能检测

为使试验更贴近实际工程情况，试验的“测量零点”均选择在 UHPC 拌合料装模完成后 6 h，带模测试直至 7 d 结束试验。在研究材料组分对于 UHPC 早期收缩的影响时，均采用自然养护；研究养护制度对 UHPC 早期收缩的影响时，试件先带模测试 1 d，然后脱模放入对应的养护制度下继续，直至试验结束。6 h 后开始测试，每 1 h 记录一次数据，直至 7 d 结束。

2 试验结果与分析

2.1 材料组成

2.1.1 水胶比

水胶比影响着 UHPC 制备时的用水量，对 UHPC 中胶凝材料的水化反应速率和进程有着直接的影响。试验采用的水胶比分别为 0.16、0.17、0.18、0.19、0.20，不同水胶比、不同龄期的 UHPC 早期收缩变化如图 1 所示。

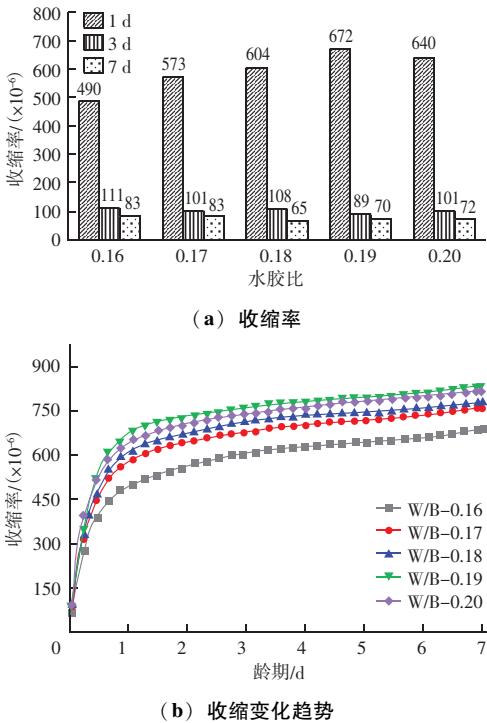


图 1 不同水胶比的 UHPC 早期收缩变化
Fig. 1 Varieties of early shrinkage of UHPC with different W/B

随着水胶比的增大，UHPC 早期收缩不再呈现单调函数的变化规律，而是随着水胶比的提高，UHPC 早期收缩先增大后减小。各水胶比的 UHPC 试件在 1 d 内的收缩极为明显。在水胶比为 0.16 时，试件的 1 d 收缩值最小，为 490×10^{-6} ，在 7 d 总收缩中占比高达 71.6%；水胶比为 0.19 时，在 7 d 内的总收缩达到最大值，为 831×10^{-6} 。通过对比发现，水胶比 0.16 的试件 7 d 内的收缩率与其他组差距较大，仅为 684×10^{-6} 。

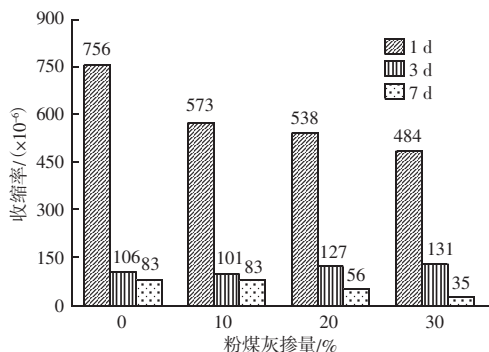
对于 0.16 水胶比的 UHPC 试件，由于水胶比太低，混凝土内部缺少自由水，水化反应缓慢，因此造成了早期收缩的减小，其总收缩最低。但随着水

材料科学

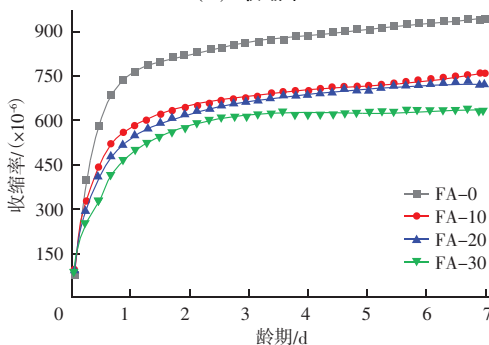
胶比的增大, 相对较多的水促进胶凝材料的水化。随着水化反应的进行, 混凝土内部水分不断减少, 自干燥效应提前出现, 导致自收缩增大, 因此水胶比在低于临界水胶比时, 随着水胶比增大, UHPC 的总收缩增加。

2.1.2 粉煤灰

不同粉煤灰掺量对 UHPC 早期收缩有着不同程度的影响。试验采用粉煤灰掺量分别为 10%、20%、30% 时, UHPC 在不同龄期的收缩变化如图 2 所示。



(a) 收缩率



(b) 收缩变化趋势

图 2 不同粉煤灰掺量的 UHPC 早期收缩变化

Fig. 2 Varieties of early shrinkage of UHPC with different fly ash dosages

在外部条件相同的情况下, 不同粉煤灰掺量的试件收缩发展趋势与未掺试件基本类似, 且随着粉煤灰掺量的增加, UHPC 早期收缩呈现明显减小的趋势。与未掺粉煤灰试件相比, 10%、20%、30% 粉煤灰掺量的试件在 7 d 内的收缩分别减小了 19.9%、23.7%、31.2%。这说明粉煤灰代替部分水泥能有效抑制 UHPC 收缩, 且粉煤灰掺量越高, 抑制效果越好。

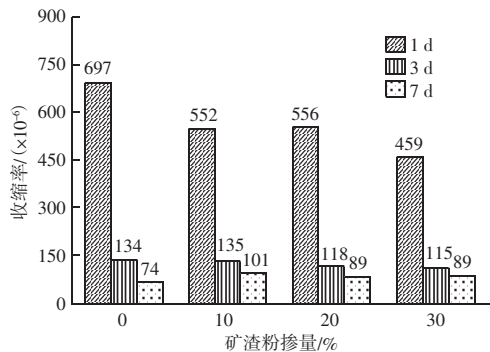
在试件浇筑成型后的 1 d 内, UHPC 收缩十分明显。随着粉煤灰掺量的增加, UHPC 收缩呈下降趋

势。与未掺粉煤灰试件相比, 粉煤灰掺量在 10%、20% 和 30% 的 UHPC 试件收缩分别减小了 24.2%、28.8%、35.9%。这说明粉煤灰的掺入可有效抑制 UHPC 早期收缩, 且对收缩的抑制效果随着粉煤灰掺量的增大而增强。这主要由于粉煤灰的活性较低, 对早期的水化反应起到了抑制作用。

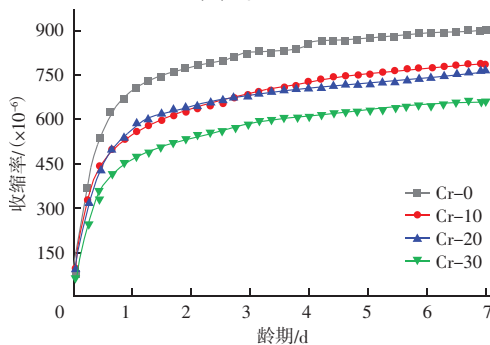
掺入粉煤灰后的 UHPC 早期收缩呈下降趋势, 且在 10%~30% 范围内, 随着粉煤灰掺量的增加, 其早期收缩减小。分析其机理主要为: 粉煤灰的形态效应可改善拌合物的流动性及内部结构, 产生的塑性变形可抵消部分早期收缩; 粉煤灰的掺入使体系早期水化反应得到抑制, 参与反应的胶凝材料减少, 从而减小了早期收缩; 粉煤灰充分发挥其微集料填充效应, 填充于各大孔隙之间, 导致水分蒸发受阻, 因此降低了 UHPC 收缩。

2.1.3 矿渣粉

矿渣粉是 UHPC 的重要掺合料, 其对 UHPC 的早期性能也有着积极的贡献。试验采用矿渣粉掺量分别为 10%、20%、30% 时, UHPC 在不同龄期的收缩变化如图 3 所示。



(a) 收缩率



(b) 收缩变化趋势

图 3 不同矿渣粉掺量的 UHPC 早期收缩变化

Fig. 3 Varieties of early shrinkage of UHPC with different Slag powder dosage

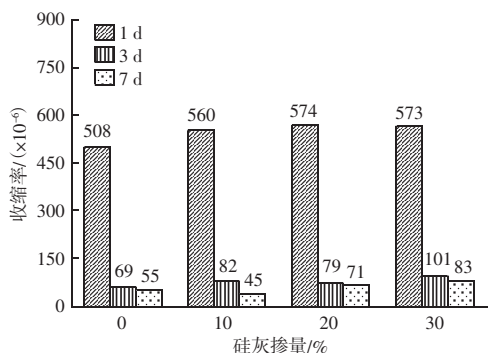
UHPC 早期收缩随着矿渣粉掺量的增加而减小, 与粉煤灰类似。从 7 d 内的总收缩来看, 未掺矿渣粉的试件收缩最大, 达到了 904×10^{-6} ; 与之相比, 10%、20%、30% 矿渣粉掺量的 UHPC 7 d 收缩分别减小了 12.8%、15.6%、26.7%。

在试件浇筑完成 1 d 内, UHPC 收缩量急剧上升, 30% 矿渣粉掺量的试件产生的收缩应变最小, 为 459×10^{-6} 。与未掺矿渣粉试件相比, 10%、20%、30% 矿渣粉掺量的试件在 1 d 内的收缩分别降低了 20.8%、20.2%、34.1%。说明矿渣粉的掺入对 UHPC 前 1 d 内的收缩有抑制作用。主要原因是矿渣粉代替水泥掺入原材料中, 胶凝材料活性降低, 水化反应受限, 水化进程减缓, 浆体凝结时间增长, 导致混凝土早期收缩减小。另外, 随着矿渣粉掺量增加, 降低了水泥的用量, 因此造成混凝土内部 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量较少, 在硅灰掺量相同的情况下, 二次火山灰反应进展缓慢, 同时混凝土内部水分的消耗速率减慢。这对由水化反应引起的化学收缩及自收缩有抑制作用, 从而在整体上表现为收缩减小。

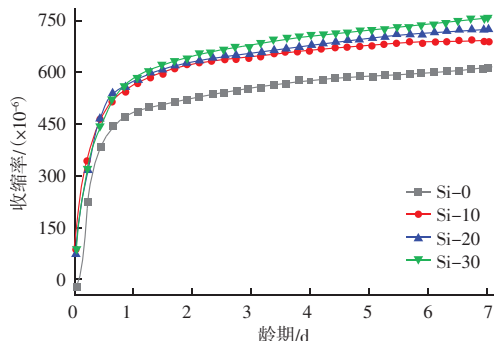
未掺矿渣粉试件在 3~7d 龄期产生的收缩最小, 与之相比, 10%、20%、30% 矿渣粉掺量的试件收缩分别增大了 27.8%、20.3%、20.3%。这主要因为矿渣粉的形态效应较差, 不能很好地填充混凝土内部孔隙, 对密实度增强效果不明显, 残存于孔隙中的水分被蒸发, 因此造成混凝土的干燥效应增强, 导致干燥收缩和自收缩增大。

2.1.4 硅灰

试验采用硅灰掺量分别为 10%、20%、30% 时, UHPC 在不同龄期的收缩变化如图 4 所示。



(a) 收缩率



(b) 收缩变化趋势

图 4 不同硅灰掺量的 UHPC 早期收缩变化

Fig. 4 Varieties of early shrinkage of UHPC with different silica fume dosage

在其他组分不变的情况下, 随着硅灰掺量的增加, UHPC 早期收缩率呈增大趋势。就 7 d 的总收缩而言, 未掺硅灰的 UHPC 早期收缩最小, 为 632×10^{-6} ; 与之相比, 10%、20%、30% 硅灰掺量的 UHPC 收缩率分别增大了 8.7%、14.5%、19.8%。

在收缩试验开始阶段, 未掺硅灰试件的收缩小于 0, 为 -27×10^{-6} , 说明此时的 UHPC 处于膨胀状态, 主要是因为混凝土内部水化反应的不断进行, 导致大量的水化热释放, 产生了膨胀。同时由于该配比的 UHPC 搅拌时间过长, 大量空气滞留浆体内部, 在气泡不断排出的过程中也会产生膨胀。而 10%、20%、30% 硅灰掺量的试件在试验开始阶段均未出现膨胀现象, 是因为随着硅灰掺量的增加, 稀释了水泥量, 导致 UHPC 内部水化反应剧烈程度下降, 水化热减小; 之后由于水化反应的持续进行, UHPC 收缩迅速增大, 在试验进行到 1 d 时, 10%、20%、30% 硅灰掺量试件的收缩率为分别为 560×10^{-6} 、 574×10^{-6} 、 573×10^{-6} , 较未掺试件分别增大了 10.2%、12.9%、13.0%。与粉煤灰、矿渣粉相比, 硅灰的掺入引起的早期收缩远低于前者, 且掺量超过一定量, UHPC 的收缩趋于稳定。

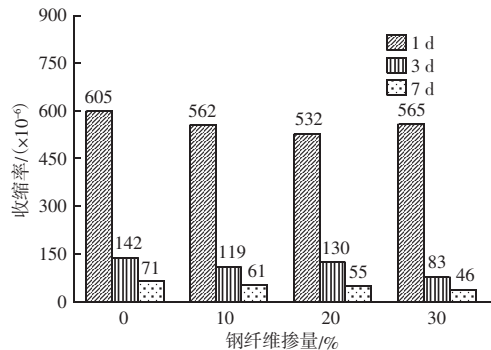
2.1.5 钢纤维

UHPC 中钢纤维的掺入不仅可以有效地提高 UHPC 的强度, 更有助于提升其韧性。试验采用钢纤维体积掺量分别为 1%、2%、3% 时, UHPC 在不同龄期的收缩变化如图 5 所示。

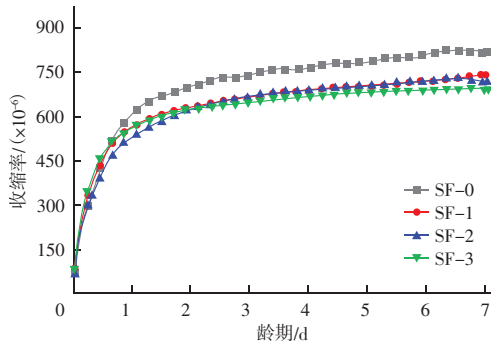
在其他条件相同的情况下, 掺入钢纤维对抑制 UHPC 早期收缩有明显效果。随着钢纤维体积掺量的增加, UHPC 的早期收缩率呈降低趋势。1%、2%、

材料科学

3% 钢纤维体积掺量的 UHPC 的 7 d 总收缩较未掺试件分别减小了 9.3%、12.3%、15.2%。



(a) 收缩率



(b) 收缩变化趋势

图 5 不同钢纤维掺量的 UHPC 早期收缩变化

Fig. 5 Varieties of early shrinkage of UHPC with different steel fiber dosage

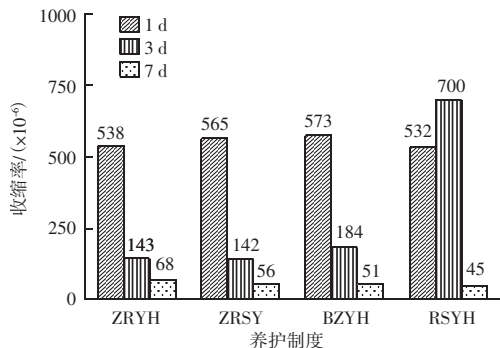
在浇筑成型的 1 d 内试件收缩率均很大, 对照组各掺量下试件收缩率分别为 605×10^{-6} 、 562×10^{-6} 、 535×10^{-6} 、 565×10^{-6} 。此时的 7 d 总收缩率占比分别高达 74.9%、75.7%、74.6%、81.4%。在此阶段, UHPC 仍处于塑性阶段, 胶凝材料的不断水化反应产生的化学减缩和部分自干燥收缩是变形产生的主要原因, 因此表现出 1 d 收缩速度较快, 收缩率较高。

在 3~7 d 龄期, 各组试件的收缩率均大幅下降。此时混凝土的初始结构已经形成, 钢纤维的分布错综复杂, 形成三维乱向体系, 延缓和抑制混凝土收缩, 从而阻止 UHPC 内部早期裂缝的产生与扩展。

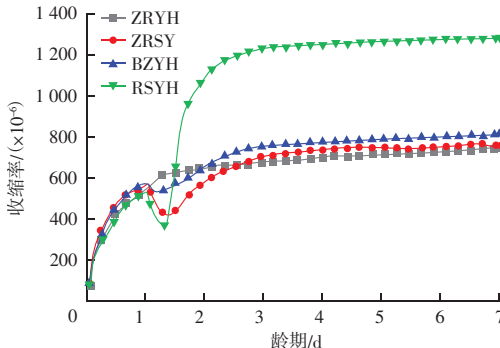
2.2 养护制度对 UHPC 早期收缩性能的影响

不同养护制度对 UHPC 早期收缩影响存在显著差异, 采用自然养护 (ZRYH)、自然水养 (ZRSY)、标准养护 (BZYH)、90 °C 热水养护 (RSYH) 4 种养护方式, 探究不同养护制度对 UHPC 早期收缩的影

响规律。为使试验与实际工程更加吻合, 试验 1 d 内进行带模测量, 拆模后分别放入 4 种养护环境下进行收缩测量。测得不同养护制度下 UHPC 在 7 d 内的收缩变化, 如图 6 所示。



(a) 收缩率



(b) 收缩变化趋势

图 6 养护方式对 UHPC 早期收缩的影响

Fig. 6 Effect of curing method on early shrinkage of UHPC

90 °C 热水养护、自然水养、标准养护下 UHPC 早期收缩情况基本相同, 前 1 d 内处于快速收缩阶段, 脱模养护开始后 12 h 左右进入吸湿膨胀阶段; 而自然养护却无膨胀阶段。这主要是由于自然养护条件下混凝土的内外湿度差较小, 收缩发展的速率大于膨胀速率。就 UHPC 的 7 d 总收缩而言, 热水养护的试件产生的收缩率最大, 为 1280×10^{-6} ; 标准养护次之, 为 808×10^{-6} ; 自然水养和自然养护相差不大, 分别为 763×10^{-6} 和 749×10^{-6} 。

相较其他三种养护方式, 热水养护的试件在 3 d 内的收缩发展十分迅速, 分别比标准养护、自然水养和自然养护高 62.7%、74.5%、80.9%。由此可见, 养护温度的提高对超高性能混凝土早期收缩影响较大。究其原因主要是由于 UHPC 在热水养护下加速了早期水化反应的进程, 促进了矿物掺合料的火山灰反应, 使 UHPC 在 3 d 产生很大的化学收缩和

自收缩。

由图 6 (a) 可以看出, 在 3、7 d 龄期, 自然养护下的试件收缩率最大。与自然养护相比, 热水养护、标准养护和自然水养的收缩率分别降低了 33.8%、25%、17.6%。主要因为自然养护水化反应速率较慢, 混凝土内部密实性不足, 在自然环境下, 混凝土内部持续蒸发, 加速了干燥收缩的发生。反观其他养护的 UHPC, 由于水分相对较充足, 水化反应不断进行, 水化产物填充混凝土的内部孔隙, 降低混凝土孔隙率, 提升密实度, 进而阻止混凝土内部的水分向外部迁移, 抑制了收缩的发生。

在不同养护制度下, UHPC 的前 3 d 收缩均非常大, 以热水养护最为突出, 而热水养护试件在后续的收缩却很小。因此在工程中, 可以将构件在前期进行适当的热水养护, 能够减小后期的收缩和构件开裂的风险, 对工程的安全性有利。

3 结论

为了探究 UHPC 早期收缩对其早期开裂的影响, 研究了不同组成、不同养护方式下 UHPC 试件的早期收缩情况, 得到以下主要结论:

(1) 水胶比对 UHPC 的早期收缩影响存在一个临界值, 此次试验的水胶比临界值为 0.19。当水胶比小于临界值时, 早期收缩随着水胶比的增大而增大; 当水胶比大于临界值时, 早期收缩随着水胶比的增大而减小。

(2) 粉煤灰与矿渣粉对 UHPC 早期收缩影响表现类似, 均为随掺量的增加收缩减小, 且粉煤灰抑制收缩的效果优于矿渣粉。矿渣粉的掺入会导致 3~7 d 内 UHPC 早期收缩加剧。掺入硅灰, 增大了 UHPC 早期收缩, 且随着硅灰掺量的增加, UHPC 早期收缩呈增大趋势。钢纤维在 UHPC 体系中具有骨料的作用, 可抑制收缩裂缝的产生和扩展, 有助于收缩的减小。

(3) 不同养护方式下 UHPC 的 7 d 总收缩, 以热水养护最大, 标准养护次之, 自然养护最小。4 种养护制度在前 3 d 产生的收缩均十分明显, 在 3~7 d 期间, 热水养护产生的收缩较小。因此, 在实际工程

中, 前期可适当进行热水养护, 对后期抑制收缩发展有利。

参 考 文 献

- [1] LARRARD F D, SEDRAN T. Optimization of Ultra-high-performance concrete by the use of a packing model [J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24 (6): 997-1009.
- [2] 缪昌文, 穆松. 混凝土技术的发展与展望 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (1): 1-11.
- [3] DAMME H V. Concrete material science: past, present and future innovations [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 10 (112): 5-24.
- [4] 刘金涛, 郑柏加, 张龙, 等. 超早龄期 UHPC 力学性能和水化进程研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2025, 53 (1): 22-30.
- [5] 刘晓波, 马耀辉, 张恒. 养护制度对活性粉末混凝土收缩性能的影响 [J]. 水利科学与寒区工程 2019, 2 (1): 48-51.
- [6] 陈宝春, 李聪, 黄伟, 等. 超高性能混凝土收缩综述 [J]. 交通运输工程学报, 2018, 18 (1): 13-28.
- [7] LIU Y Z, AN M Z, WANG Y, et al. Rehydration model for ultrahigh-performance concrete matrix [J]. Journal of materials in civil engineering, 2021, 33 (1): 402-415.
- [8] 曹世勇. 超高性能水泥基复合材料自收缩特性及其机理研究 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34 (3): 813-818.
- [9] 韩松, 涂亚秋, 安明喆, 等. 活性粉末混凝土早期收缩规律及其控制方法 [J]. 中国铁道科学, 2015, 36 (1): 40-47.
- [10] 王稷良, 马淑梅, 沈永飞, 等. 钢纤维形状及掺量对超高性能混凝土力学性能的影响 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (5): 58-62, 109.
- [11] SCHEYDT J C, MÜLLER H. Microstructure of ultra high performance concrete (UHPC) and its impact on durability; proceedings of the proceedings of the 3rd international symposium on UHPC and nanotechnology for high performance construction materials [C], Kassel, Germany, 2012: 349-356.
- [12] 杭美艳, 宋洪彬, 刘佳棋, 等. 不同养护条件和钢纤维掺量对超高性能混凝土收缩性能的改善 [J]. 四川建筑科学研究, 2024, 50 (2): 85-91, 100.
- [13] 朱三凡, 胡超, 夏樟华, 等. 预应力连接 UHPC 预制拼装管廊受力性能试验研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 33 (1): 289-299.
- [14] 郭婕. 超高性能混凝土在梯形轨枕水沟盖板的应用研究 [J]. 铁道建筑技术, 2024 (11): 218-221.