

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20211231001

文章编号: 1672-9331(2023)05-0136-10

引用格式: 张登祥, 吴斐, 许荣荣, 等. 大流动性高强轻集料混凝土早期收缩特性研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(5): 136-145.

Citation: ZHANG Dengxiang, WU Fei, XU Rongrong, et al. Study on early-age shrinkage characteristics of high workability and high strength lightweight aggregate concrete[J]. J. Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(5): 136-145.

大流动性高强轻集料混凝土早期收缩特性研究

张登祥^{1,2}, 吴斐^{1,2}, 许荣荣³, 肖妞³

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南长沙南南方新材料科技有限公司, 湖南 长沙 410115)

摘要:【目的】探索大流动性高强轻集料混凝土(high workability and high strength lightweight aggregate concrete, HHLC)的收缩特性, 以为 HHLC 推广应用提供参考依据。【方法】采用高强页岩陶粒制备 HHLC, 通过室内试验测量其自生收缩应变及总收缩应变。【结果】HHLC 的 28 d 自生收缩应变仅为 57×10^{-6} , 总收缩应变为 203×10^{-6} , 与相同强度等级的自密实混凝土(self-compacting concrete, SCC)及普通混凝土(normal concrete, NC)相比, HHLC 的早期自生收缩应变及总收缩应变最小; HHLC 收缩变形的发展规律与 SCC、NC 收缩变形的基本一致, 但 HHLC 在前 3 d 出现微膨胀现象, 膨胀值约为 10×10^{-6} ; 在 HHLC 的总收缩应变中, 自生收缩应变占比较小, 收缩应变主要表现为外干燥引起的干燥收缩应变, 且水胶比越小, 干燥收缩应变越大; 粉煤灰对降低 HHLC 的早期收缩效果明显, 但粉煤灰的掺量不宜超过 25%; 用混凝土收缩计算模型 MC90 计算 NC 的变形, 适用性较好, 但用来计算 SCC、HHLC 的变形, 误差较大。考虑掺合料及骨料对 HHLC 收缩特性的影响, 对现行规范中的 MC90 模型进行修正。【结论】采用低吸水性的高强页岩陶粒制备的 HHLC 具有良好的工作性能及体积稳定性, 在结构工程中应用前景广阔; 修正后的 MC90 模型对 HHLC 具有较好的适用性。

关键词: 大流动性高强轻集料混凝土; 收缩变形; 水胶比; 粉煤灰; 计算模型

中图分类号: TU528.2、TV431

文献标志码: A

0 引言

大流动性高强轻集料混凝土(high workability and high strength lightweight aggregate concrete, HHLC)是在自密实混凝土(self-compacting concrete, SCC)的基础上, 用高强轻集料代替普通骨料配制而成的表观密度小于 1950 kg/m^3 的高性能混凝土^[1-2]。HHLC 既具有轻集料混凝土所具有的自重轻的优点, 也具有 SCC 所具有的大流动性、不用振捣、施工快的优点, 在工程应用上具有广阔的前景^[3]。

由于轻骨料多孔且吸水率大, 有研究认为轻骨料混凝土的体积稳定性较差, 其耐久性没有普通混凝土(normal concrete, NC)的好^[4-8]。但

RADLIŃSKA 等^[9]认为用轻骨料及普通骨料混合制备而成的混凝土的收缩抗裂性比 NC 的好。也有研究表明, 在轻骨料混凝土中掺加矿物掺合料也能有效减小轻骨料混凝土的收缩变形, 如外掺偏高岭土、粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料能减小轻骨料混凝土的干燥收缩变形, 提高混凝土的早期抗裂性^[10-12], 在将粉煤灰、矿渣粉按 2:3 的质量比复掺后, 混凝土抗自由收缩变形的性能最佳^[13]。普通轻骨料强度低、高强轻集料价格高限制了轻骨料混凝土在工程上的应用, 且学术界对高强轻集料混凝土的性能研究还很少。近年来, 为推动高强轻集料混凝土在结构工程中的应用, 部分学者开展了高强轻集料混凝土力学性能及体积稳定性的研究, 如张登祥等^[14]、周佳^[15]指出 HHLC 的约束收缩应变明显比 NC 的小, 与相同强度等级的

收稿日期: 2021-12-31; 修回日期: 2022-05-18; 接受日期: 2022-05-26

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ2273); 湖南省水利科技项目(XSKJ2018179-26)

通信作者: 张登祥(1971—)(ORCID: 0000-0002-9707-1678), 男, 副教授, 主要从事混凝土结构设计理论方面的研究。

E-mail: zhangdx098@163.com

NC相比,HHLC的早期开裂风险系数较小;张云国等^[16]指出自密实轻骨料混凝土在前10 d龄期有轻微膨胀现象,但收缩变形始终比SCC和NC的小,至6个月龄期时,三者的收缩变形逐渐接近;张虎^[17]指出掺入钢纤维后自密实轻骨料混凝土的收缩变形明显减小,与普通骨料混凝土相比,自密实钢纤维轻骨料混凝土初始裂缝的产生与发展得到了有效控制。综上所述,学者们对HHLC体积稳定性的研究虽然取得了一定的进展,但研究成果还不够系统。

混凝土收缩计算模型是混凝土体积稳定性研究的热点。国内外常用的混凝土收缩计算模型有ACI209、MC90、MC2010等^[18-19]。这些模型均考虑了结构尺寸、环境湿度、养护时间等外部因素对混凝土收缩变形的影响,但对于内部影响因素的考虑则各有差异。我国规范采用的是MC90模型,但

MC90模型是否适用于HHLC,尚未见报道。本研究采用高强页岩陶粒及粉煤灰制备HHLC,通过早期自由收缩试验研究HHLC的早期收缩应变随龄期的发展规律,为HHLC的推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 原材料

1) 水泥:采用普通硅酸盐水泥P·O 42.5,其基本物理力学性能、化学成分见表1~2。

表1 水泥的基本物理力学性能

Table 1 Basic physical and mechanical properties of cement

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	安定时 间/min		抗折强 度/MPa		抗压强 度/MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
3 100	3.0	4.5	4.5	7.7	24.5	46.8

表2 水泥的化学成分及其质量分数

Table 2 Chemical composition and its mass fraction of cement %

$w(\text{CaO})$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{SO}_3)$
65.6	22.5	4.4	3.3	2.3	1.2	0.7

2) 粉煤灰:采用I级粉煤灰,其中, $w(\text{SiO}_2)=56.7\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=21.4\%$,烧失量为2.5%,需水量为95.0%。

3) 粗骨料:轻集料采用高强碎石型页岩陶粒,NC及SCC采用5~10 mm碎石。页岩陶粒的基本性能指标见表3。

4) 细集料:湘江河沙,其细度模数为3.0,表观

表3 页岩陶粒的基本性能指标

Table 3 Basic performance index of shale ceramsite

筒压强 度/MPa	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	吸水率/%		孔隙 率/%	最大粒 径/mm
			1 h	24 h		
6.5	860	1 800	3.2	6.1	45.5	20

密度为2 600 kg/m^3 。

5) 外加剂:聚羧酸高效减水剂,减水率>25%。

1.2 试验配合比设计

本研究设计了编号为HHLC50、SCC50、NC50的3组试件,研究相同强度等级的HHLC、SCC及NC收缩性能的差异;设计了编号为HHLC50、HHLC40、HHLC30的3组试件,其水胶比分别为0.28、0.33、0.43,研究水胶比对混凝土早期收缩性能的影响;设计了编号为HHLC50-1、HHLC50、HHLC50-2、HHLC50-3的4组试件,其粉煤灰掺量分别为20%、25%、30%、35%,研究粉煤灰掺量对混凝土早期收缩性能的影响。试验配合比见表4。

表4 试验配合比

Table 4 Test mix proportion

试件编号	每 m^3 试件中各材料的质量/kg						水胶比	粉煤灰掺量/%
	水泥	粉煤灰	水	页岩陶粒	碎石	细集料		
HHLC30	374	125	215	540		798	0.43	25
HHLC40	426	142	190	540		798	0.33	25
HHLC50	462	154	173	540		798	0.28	25
HHLC50-1	494	122	178	540		798	0.28	20
HHLC50-2	430	186	168	540		798	0.28	30
HHLC50-3	399	217	173	540		798	0.28	35
SCC50	462	154	173		804	798	0.28	25
NC50	483	0	153		1 133	694	0.32	0

1.3 试验方法

对于混凝土的工作性能试验及基本力学试验,分别按照《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283—2012)和《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行试件的制备、养护及测试。收缩试验采用100 mm×100 mm×515 mm的棱柱体试件,共8组,每组6个(总收缩试件和自生收缩试件各3个)。将试件标准养护1 d后,拆模并置于测试仪上。测试仪由试件架与外挂式千分表组成。将自生收缩试件拆模后,立即用塑料膜密封,总收缩试件不用密封处理。实验室室温为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $(60\pm 5)\%$,并保持两者恒定。分别测量龄期为2、3、5、7、14、21、28 d混凝土试件的收缩变形值。

2 试验结果与分析

2.1 HHLC的工作性能及力学性能

HHLC的工作性能及抗压强度试验结果见表5。

表5 混凝土工作性能及抗压强度试验结果

Table 5 Workability and mechanical performance of concrete

试件编号	水胶比	工作性能			28 d抗压强度/MPa
		扩展时间 T_{50}/s	坍落扩展度/mm	坍落度/mm	
HHLC30	0.43	2.92	760	285	30.5
HHLC40	0.33	4.88	685	275	41.8
HHLC50	0.28	5.78	695	270	51.2
HHLC50-1	0.28	5.96	660	260	50.3
HHLC50-2	0.28	2.32	765	275	44.7
HHLC50-3	0.28	4.21	680	265	43.2
SCC50	0.28	4.32	690	268	51.5
NC50	0.32		270	75	49.0

注: T_{50} 指用坍落度筒测量混凝土坍落扩展度时,自坍落度筒提起开始计时至混凝土坍落扩展度达到500 mm的时间。

从表5可以看出,采用高强页岩陶粒制备的混凝土的强度等级可以达到C30以上,水胶比为0.28的混凝土试件,其强度等级甚至可以达到C50,表中混凝土试件的强度均可满足结构混凝土强度等级的要求;水胶比相同的HHLC50与SCC50两组混凝土试件的坍落度、坍落扩展度及扩展时间比较接近。

2.2 HHLC的早期收缩变形规律

通过试验得到相同强度等级的HHLC50、SCC50和NC50的自生收缩应变、总收缩应变的变

化规律曲线,如图1所示(文中应变为负表示收缩,为正表示膨胀)。

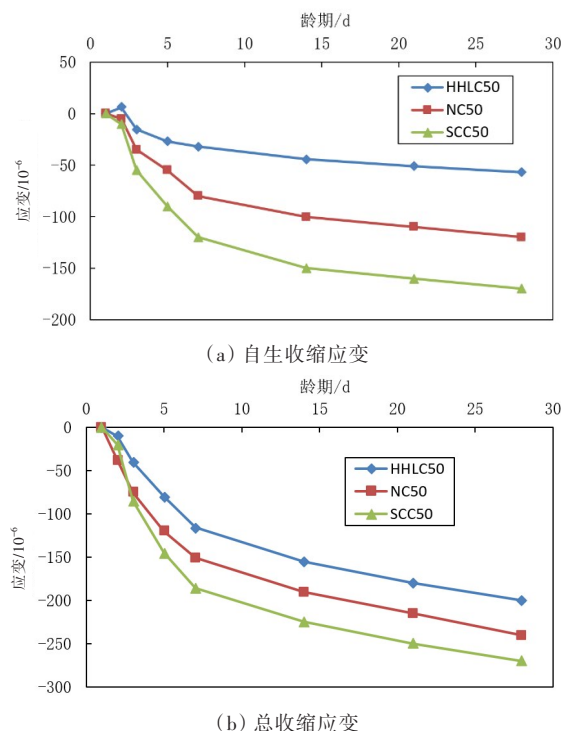


图1 混凝土试件的收缩应变

Fig. 1 Shrinkage strain of concrete specimen

从图1(a)可以看出,HHLC50的自生收缩应变较小,在前3 d龄期,HHLC50还出现了微膨胀现象,但到28 d龄期时,其自生收缩应变仅为 57×10^{-6} ;而NC50及SCC50试件在28 d龄期时,自生收缩应变分别为 121×10^{-6} 和 173×10^{-6} ,说明在相同龄期情况下,HHLC50的自生收缩应变比SCC50的小得多,也比NC50的小。从图1(b)可以看出,随着龄期的增长,3个配合比混凝土试件总收缩应变曲线的变化趋势基本一致,以龄期7 d为界,前7 d总收缩应变增长很快,7 d后总收缩应变增长明显变缓。到龄期为28 d时,HHLC50、NC50及SCC50的总收缩应变分别为 203×10^{-6} 、 241×10^{-6} 和 275×10^{-6} ,说明在相同龄期情况下,HHLC50的总收缩应变也明显比SCC50和NC50的小。

2.3 配合比参数对HHLC早期收缩变形的影响

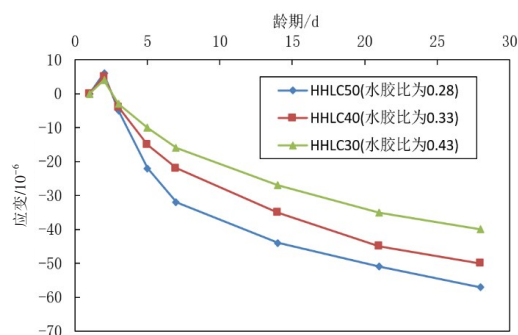
对于水胶比分别为0.43、0.33和0.28的3组试件,其28 d自生收缩应变及总收缩应变随龄期的变化规律如图2所示。

从图2可以看出,各配合比HHLC的自生收缩应变在前3 d龄期均出现微膨胀现象,但膨胀值不超过 10×10^{-6} ,3 d后开始收缩,在28 d龄期时自生收缩应变为 $40\times 10^{-6}\sim 57\times 10^{-6}$,且水胶比越小自生

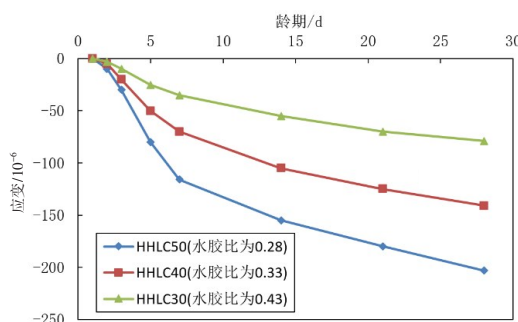
收缩应变越大。随着龄期的发展,HHLC总收缩应变的变化规律与自生收缩应变的变化规律基本相似,28 d龄期的总收缩应变为 $79 \times 10^{-6} \sim 203 \times 10^{-6}$,且水胶比越小总收缩应变越大,所以水胶比对总收缩应变的影响非常明显。

对于 HHLC50-1、HHLC50、HHLC50-2 及 HHLC50-3 这4个配合比不同的混凝土,其粉煤灰掺量分别为20%、25%、30%和35%时的自生收缩应变和总收缩应变如图3所示。

从图3可以看出,随着粉煤灰掺量的增加,HHLC的自生收缩应变及总收缩应变的降低趋势比较明显。在粉煤灰掺量从20%增大到35%时,HHLC 28 d龄期的自生收缩应变及总收缩应变分别降低了42.6%及29.5%。



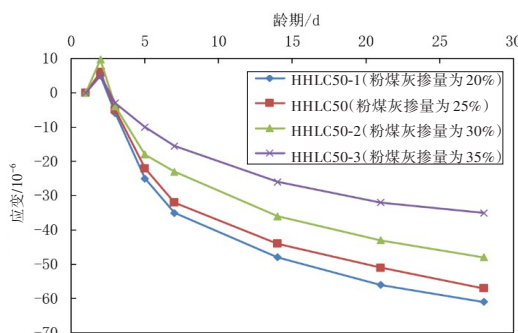
(a) 自生收缩应变



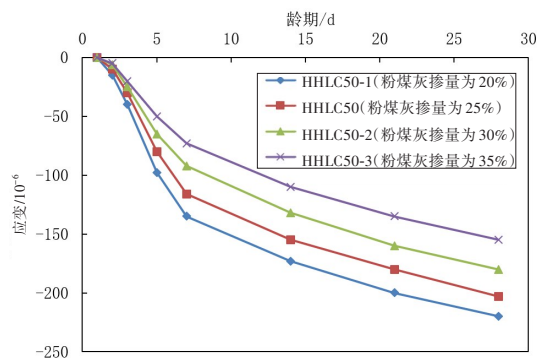
(b) 总收缩应变

图2 水胶比对HHLC收缩应变的影响

Fig. 2 Effect of water-binder ratio on shrinkage strain of HHLC



(a) 自生收缩应变



(b) 总收缩应变

图3 粉煤灰掺量对HHLC收缩应变的影响

Fig. 3 Effect of fly ash on shrinkage strain of HHLC

3 HHLC收缩计算模型

混凝土收缩计算模型的建立方式主要有两种^[18]:一种是通过混凝土的材料特征进行量化分析,建立分析模型;另一种是通过大量试验,对试验结果进行回归分析,建立试验模型。目前,第二类模型最多,且以欧洲混凝土委员会和国际预应力混凝土协会(CEB-FIP)提出的MC90模型应用最广。在我国现行的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)中,混凝土收缩计算采用的就是MC90模型,其表达式为:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cso} \beta_s(t - t_s) \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ 为混凝土收缩应变; ε_{cso} 为名义收缩系数; $\beta_s(t - t_s)$ 为收缩随时间发展的函数; t 为混凝土龄期; t_s 为混凝土开始收缩时的龄期。

近年来,高强高性能混凝土在工程上得到了广泛应用。高强高性能混凝土的水灰比小,活性掺合料与外加剂等的掺量大,导致该类混凝土的自生收缩应变显著增大。为此,CEB-FIP又在MC90模型的基础上提出了MC2010模型。MC2010收缩模型将混凝土的总收缩应变表示为自生收缩应变和干燥收缩应变之和,其表达式为:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cso}(f_{cm}) \beta_{as}(t) + \varepsilon_{cdso}(f_{cm}) \beta_{ds}(t - t_s) \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_{cso}(f_{cm})$ 为自生收缩系数,与混凝土28 d抗压强度及水泥种类相关; $\beta_{as}(t)$ 为自生收缩随时间发展的函数; $\varepsilon_{cdso}(f_{cm})$ 为干燥收缩系数,与混凝土28 d抗压强度及水泥种类相关; $\beta_{ds}(t - t_s)$ 为干燥收缩随时间发展的函数; f_{cm} 为强度等级为C20~C50的

混凝土在龄期 28 d 时的抗压强度平均值。

将 HHLC50、SCC50、NC50 这 3 个强度等级相同的混凝土试件的收缩应变试验结果与 MC90、MC2010 模型的计算结果进行比较,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,对于 NC50,MC90 模型的计算值与试验值吻合较好;对于 HHLC50,MC90 模型的计算值大于试验值,且在早期(7 d 以内)误差较大,在后期误差变小,误差为 11.4%~25.4%;对于 SCC50,MC90 模型的计算值与试验值之间的差距较明显,试验值明显大于 MC90 模型计算值。NC50 和 HHLC50 试验值与 MC2010 模型计算值之

间的差距都较大,但 SCC50 试验值与 MC2010 模型计算值较为吻合。因此,本研究认为 MC2010 模型考虑了自生收缩应变对总收缩应变的影响,理论上更加合理。但 HHLC 自生收缩应变小,且收缩试验值与 MC90 模型计算值误差较小,因此 MC90 模型更适合 HHLC 收缩应变的计算。

导致 HHLC50 收缩应变试验值与 MC90 模型计算值之间差距的主要因素是材料配比。HHLC50 中的 I 级粉煤灰掺量为 25%,而粉煤灰的水化活性不如水泥,因此,HHLC50 的早期水化反应速度相对较慢。轻骨料在水化反应过程中的吸水膨胀及内养护效应也会影响混凝土的早期收缩。因此,HHLC50 收缩计算模型应该考虑掺合料及骨料特性的影响。在 MC90 模型中,混凝土收缩是由名义收缩系数 ε_{cs0} 及收缩随时间发展的函数 $\beta_s(t-t_s)$ 决定的,其表达式如下:

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s(f_{cm})\beta_{R_H} \quad (3)$$

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = [160 + 10\beta_{sc}(9-f_{cm}/f_{cm0})] \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$\beta_{R_H} = 1.55[1 - (R_H/R_{H0})^3] \quad (5)$$

$$\beta_s(t-t_s) = \left[\frac{(t-t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t-t_s)/t_1} \right]^{0.5} \quad (6)$$

式中: β_{sc} 为与水泥类型相关的系数,对于慢硬、普通、快硬水泥, β_{sc} 分别取 4、5、8; β_{R_H} 为相对湿度系数,适用于 $40\% \leq R_H < 90\%$ 的情况; R_H 为相对湿度,其初始值 $R_{H0}=100\%$; f_{cm0} 为 f_{cm} 的初始值,取值为 10 MPa; t_1 为 t 的初始值,取值为 1 d; h 为截面有效厚度,其初始值 $h_0=100$ mm。

LABBÉ 等^[20]对膨胀土陶粒和膨胀玻璃两种轻集料混凝土的收缩进行了试验和理论研究,认为轻集料对混凝土干燥收缩的影响主要表现在两个方面:一是对混凝土名义收缩系数 ε_{cs0} 的影响,用修正系数 k_g 表示;二是对收缩时间发展函数 $\beta_s(t-t_s)$ 的影响,用修正系数 k_c 表示。修正系数 k_c 和 k_g 与试件尺寸相关,均为常数。在本文的试验中,骨料采用吸水率较低的高强页岩陶粒,且在试件制作时没有经过预湿处理。试验结果表明,轻骨料对混凝土收缩的影响主要发生在早期(前 7 d),如图 1 所示。因此,有必要对早期(前 7 d)的收缩时间发展函数 $\beta_s(t-t_s)$ 进行修正,修正函数用 $k_c(t)$ 表示,修正后的 $\beta_s(t-t_s)$ 的表达式为:

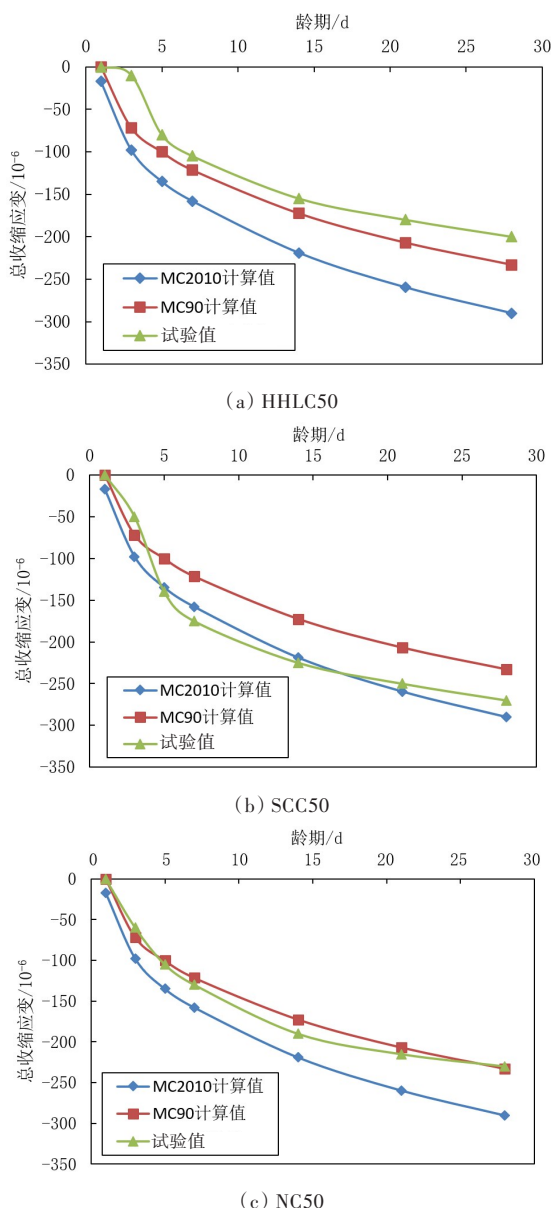


图 4 模型计算值与试验值对比

Fig. 4 Comparison between model calculation value and test value

$$\beta_s(t-t_s) = \begin{cases} k_c(t) \left[\frac{(t-t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t-t_s)/t_1} \right]^{0.5}, & t_1 \leq t \leq 7 \text{ d} \\ \frac{(t-t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t-t_s)/t_1}, & t > 7 \text{ d} \end{cases} \quad (7)$$

对前7 d的收缩应变试验值与MC90模型计算值的比值取均值,并对其进行统计分析得到修正函数 $k_c(t)$,如图5所示。

大量掺入粉煤灰是HHLC的收缩应变比其他两个配合比混凝土的收缩应变明显小的主要原因。粉煤灰的反应速度比水泥的慢,因而粉煤灰掺量越大,水泥水化反应速度越慢,水泥类型相关系数 β_{sc} 越小。因此,仍然采用式(3)计算MC90模型中混凝土的名义收缩系数 ε_{cs0} ,但考虑到粉煤灰对水泥水化反应速度的影响,需要修正式(4)中 β_{sc} 的取值。对于普通混凝土,《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)建议 β_{sc} 取5.0,试件HHLC50-1、HHLC50、HHLC50-2、HHLC50-3的粉煤灰掺量分别为20%、25%、30%和35%, β_{sc} 分别取4.5、4.0、2.7和1.8,将它们代入式(4)并计算 $\varepsilon_s(f_{cm})$ 。用修正后的MC90模型计算HHLC收缩值,并与试验值比较,结果如图6所示。

从图6可以看出,HHLC的收缩应变试验值与

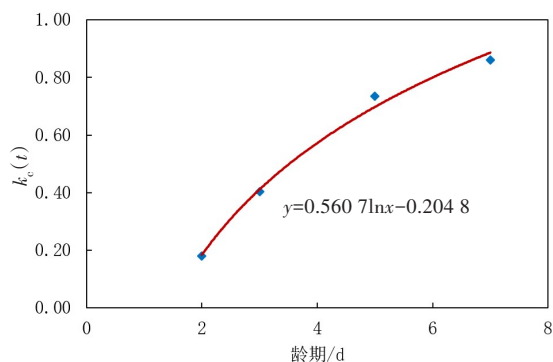
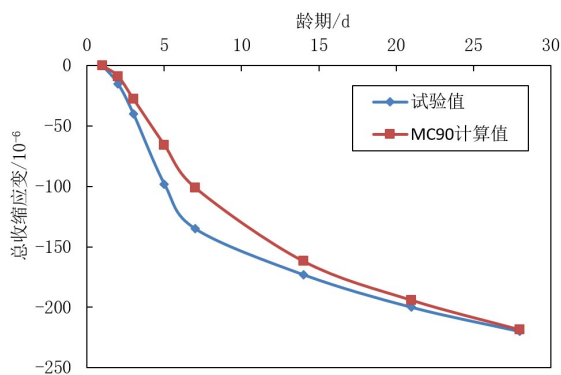
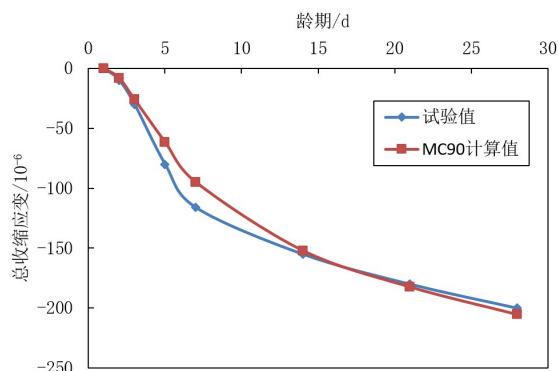


图5 修正函数 $k_c(t)$

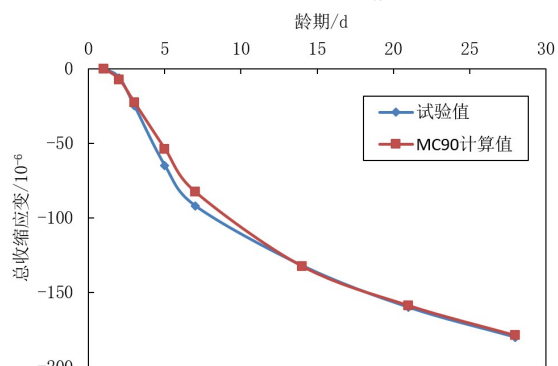
Fig. 5 Function of correction $k_c(t)$



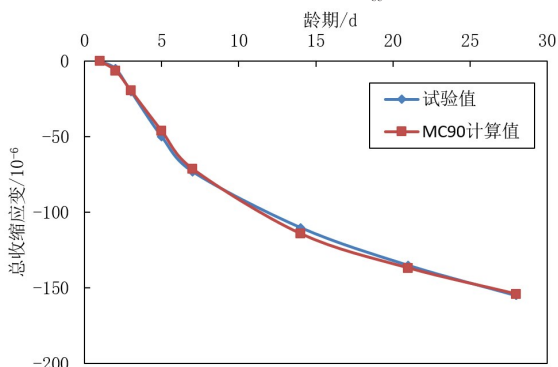
(a) 粉煤灰掺量为20%, $\beta_{sc}=4.5$



(b) 粉煤灰掺量为25%, $\beta_{sc}=4.0$



(c) 粉煤灰掺量为30%, $\beta_{sc}=2.7$



(d) 粉煤灰掺量为35%, $\beta_{sc}=1.8$

图6 HHLC收缩试验值与MC90修正模型计算值比较

Fig. 6 Comparison of HHLC shrinkage test value and modified MC90 calculation value

MC90修正模型的计算值吻合较好,说明修正后的MC90模型能适用于HHLC。因此,MC90修正模型适用于强度等级为C20~C50的高强轻集料混凝土。其中,环境年平均相对湿度 $40\% \leq R_H < 90\%$;水泥类型相关系数 β_{sc} 与水泥类型及矿物掺合料的类型、掺量相关,对一般的硅酸盐类水泥或快硬水

泥,矿物掺合料采用 I 级粉煤灰,当掺量分别为 20%、25%、30% 和 35% 时, β_{sc} 分别取 4.5、4.0、2.7 和 1.8;修正函数 $k_c(t)$ 与轻骨料类型、强度及吸水率相关。

4 讨论

用高强页岩陶粒制备轻骨料混凝土,再由其制备水胶比为 0.28~0.43 的混凝土试件,其 28 d 抗压强度达到了 30.4~51.2 MPa,可以满足结构混凝土的强度要求;各配合比新拌混凝土的坍落度为 260~285 mm、坍落扩展度为 660~765 mm、坍落度扩展时间 T_{50} 为 2.32~5.96 s, HHLC 的工作性能与相同水胶比的 SCC 的基本相当,表明 HHLC 既有轻质、高强的特点,也有高流动性、高填充性等特点。

与相同强度等级的 SCC 和 NC 比较, HHLC 早期收缩应变的发展规律与 SCC、NC 的基本一致,但 HHLC 的早期自生收缩应变与总收缩应变均明显比 NC 及 SCC 的小。本研究分析认为,无论是自生收缩还是干燥收缩,都是由混凝土内部相对湿度降低引起的,在外部环境因素相同的情况下,骨料特性、水胶比及掺合料是影响 HHLC 内部相对湿度的关键因素^[15]。HHLC 用高强页岩陶粒作为粗骨料,而高强页岩陶粒的筒压强度为 6.5 MPa, 1 h 吸水率为 3.2%, 24 h 吸水率为 6.0%,属于吸水率相对较低的高强陶粒。高强陶粒对水泥浆体的变形约束与普通骨料相当,而陶粒的吸水率要比普通沙石骨料的大,陶粒在水化早期的吸水膨胀及在水化过程中的补水效应对混凝土具有内养护作用^[21-23]。

对于文献[16]所研究的轻骨料混凝土,其骨料采用 24 h 吸水率为 4.0%、筒压强度为 6.0 MPa 的膨胀页岩陶粒,该骨料的特性与本研究 HHLC 的骨料特性相似。文献[16]的研究结果也表明,轻骨料混凝土的早期收缩变形始终比 SCC 和 NC 的小,至 6 个月龄期时三者接近。因此可以认为,由高强页岩陶粒制备的轻骨料混凝土的早期体积稳定性要比普通骨料制备的 SCC 和 NC 的好。

粉煤灰是高性能混凝土常用的矿物掺合料,一般认为粉煤灰的“形态效应”起到了滚珠轴承与解絮机的作用,即减小了混凝土内部骨料之间、浆体与骨料之间的内摩擦阻力,改善了混凝土的和

易性与流动性^[12-13]。本研究在 HHLC 和 SCC 中均掺入了优质粉煤灰,掺量为 20%~35% 不等,而在 NC 中没有掺入粉煤灰。研究结果表明,各配合比的 HHLC 和 SCC 的坍落度均大于 260 mm,坍落扩展度也均在 660 mm 以上,而 NC 的坍落度为 75 mm,坍落扩展度为 270 mm,这说明优质粉煤灰可以显著提高混凝土的工作性能。研究结果还表明,粉煤灰对混凝土的早期收缩变形及抗压强度也有重要影响。当粉煤灰掺量从 20% 增大到 35% 时,混凝土 28 d 的总收缩应变降低了 29.5%, 28 d 抗压强度降低了 14.1%。且当粉煤灰的掺量大于 25% 时,新拌混凝土的坍落度、坍落扩展度及坍落度扩展时间 T_{50} 等工作性能指标变化不大,但混凝土抗压强度却显著降低,如图 7 所示。因此,建议 HHLC 中的粉煤灰掺量不要超过 25%。

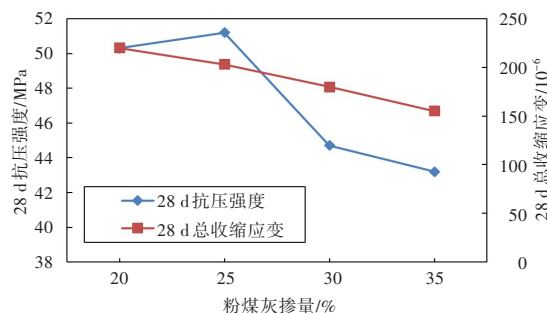


图7 粉煤灰掺量对 HHLC 28 d 抗压强度及总收缩应变的影响

Fig. 7 Effect of fly ash content on 28 d compressive strength and total shrinkage strain of HHLC

在 HHLC 的早期收缩应变中,自生收缩应变占比较小,外干燥失水引起的干燥收缩应变占比较大。对于相同强度等级的 HHLC50、SCC50 及 NC50,其自生收缩应变占总收缩应变的比值分别为 28.5%、50.0% 和 63.0%,这说明 HHLC 的总收缩应变主要为外干燥失水引起的干燥收缩应变。水胶比对 HHLC 的早期总收缩应变影响显著,但对早期自生收缩应变影响不大。由于陶粒在水化早期的补水内养护及陶粒吸水后发生的微膨胀, HHLC 因内干燥引起的自生收缩得到了缓解与抑制。本研究中水胶比分别为 0.28、0.33 和 0.43 的 HHLC 试件的 28 d 自生收缩应变分别为 57.0×10^{-6} 、 50.0×10^{-6} 和 40.0×10^{-6} ,这说明水胶比越小,自生收缩应变越大,但自生收缩应变总体变化不大。在干燥环境下,水胶比越小,外干燥失水导致混凝土内部相对湿度下降越快, HHLC 干燥收缩应变越大。因此,水胶比对 HHLC 的早期干燥收缩应变

影响显著。

在我国现行规范中,混凝土的收缩计算采用的是MC90模型。在用MC90模型计算HHLC的收缩变形值时,误差为11.4%~25.4%,而矿物掺合料及骨料特性是误差产生的主要原因。试验结果表明,轻骨料对混凝土收缩变形的影响主要发生在早期(前7 d)。因此,有必要对早期(前7 d)的收缩时间发展函数 $\beta_s(t-t_s)$ 进行修正,修正后的MC90模型对HHLC具有较好的适用性。

5 结论

1) 采用低吸水性的高强页岩陶粒制备的HHLC具有良好的工作性能及体积稳定性,在结构工程中应用前景广阔。

2) HHLC的收缩变形发展规律与SCC、NC的基本一致,但在前3 d出现微膨胀现象;在HHLC早期总收缩变形中,外干燥收缩应变在总收缩应变中占比较大,自生收缩应变占比相对较小。在HHLC的施工过程中应加强早期的保湿养护。

3) 粉煤灰能有效提高HHLC浆体的工作性能,对降低HHLC早期收缩应变也有明显效果,但掺量不宜超过25%。

4) 现行规范采用的混凝土收缩计算模型为MC90,对其进行修正后,对HHLC具有较好的适用性。

[参考文献]

- [1] LI J J, CHEN Y H, WAN C J. A mix-design method for lightweight aggregate self-compacting concrete based on packing and mortar film thickness theories [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 157: 621-634. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.141.
- [2] 张高展,王宇譔,葛竞成,等.轻集料对超高性能混凝土工作和力学性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24 (3): 499-507. DOI: 10.3969/j. issn. 1007-9629. 2021.03.008.
ZHANG Gaozhan, WANG Yuxuan, GE Jingcheng, et al. Effect of lightweight aggregate on workability and mechanical properties of ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24 (3): 499-507. DOI: 10.3969/j. issn. 1007-9629.2021. 03.008.
- [3] 韦莹.自密实轻骨料混凝土收缩及抗裂性能试验研究[D].长沙:长沙理工大学,2019. DOI: 10.26985/d. cnki.gcsjc.2019.000109.
- WEI Ying. Experimental study on shrinkage and crack resistance of self-compacting lightweight aggregate concrete [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019. DOI: 10.26985/d. cnki. gcsjc.2019.000109.
- [4] WANG X F, FANG C, KUANG W Q, et al. Experimental investigation on the compressive strength and shrinkage of concrete with pre-wetted lightweight aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 867-879. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2017.07.224.
- [5] 陈瑜,邓怡帆,唐旗,等.预湿轻骨料内养护功能及其对混凝土的影响[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 12 (3): 1-6. DOI: 10.3969/j. issn. 1007-9629.2021. 03.008.
CHEN Yu, DENG Yifan, TANG Qi, et al. Internal curing function of pre-wetted lightweight aggregates and its influences on concrete [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2015, 12 (3): 1-6. DOI: 10.3969/j. issn. 1007-9629. 2021. 03.008.
- [6] NIKNEZHAD D, KAMALI-BERNARD S, MESBAH H A. Self-compacting concretes with supplementary cementitious materials: shrinkage and cracking tendency [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29 (7): 04017033. DOI: 10.1061/(ASCE) MT. 1943-5533.0001852.
- [7] ALTOUBAT S, TALHA J M, LEBLOUBA M, et al. Effectiveness of fly ash on the restrained shrinkage cracking resistance of self-compacting concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 79: 9-20. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.01.010.
- [8] DEMIR İ, SEVİM Ö, TEKİN E. The effects of shrinkage-reducing admixtures used in self-compacting concrete on its strength and durability [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 172: 153-165. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.250.
- [9] RADLIŃSKA A, KASZYŃSKA M, ZIELIŃSKI A, et al. Early-age cracking of self-consolidating concrete with lightweight and normal aggregates [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30 (10): 04018242. DOI: 10.1061/(ASCE) MT. 1943-5533. 0002407.
- [10] 程书凯,水中和,杨荣辉,等.复掺偏高岭土-矿渣对轻骨料混凝土性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35 (5): 1349-1355. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625. 2016.05.004.
CHENG Shukai, SHUI Zhonghe, YANG Ronghui, et al. Effect of metakaolin mixed with slag on properties of lightweight concrete [J]. *Bulletin of the Chinese*

- Ceramic Society, 2016, 35 (5) : 1349-1355. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2016.05.004.
- [11] 石红磊,姚庚,高全青.LC30~LC60系列轻骨料混凝土的力学性能及耐久性能研究[J].混凝土,2021(8): 133-136.DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2021.08.030.
- SHI Honglei, YAO Geng, GAO Quanqing. Research on mechanical properties and durability of LC30-LC60 lightweight aggregate concrete [J]. Concrete, 2021 (8) : 133-136. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2021.08.030.
- [12] ESQUINAS A R, LEDESMA E F, OTERO R, et al. Mechanical behaviour of self-compacting concrete made with non-conforming fly ash from coal-fired power plants [J]. Construction and Building Materials, 2018, 182: 385-398. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.094.
- [13] 侯景鹏,刘俊龙,史巍,等.双掺矿物掺合料轻骨料混凝土性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2020(3): 70-72,90. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2020.03.070.04.
- HOU Jingpeng, LIU Junlong, SHI Wei, et al. Research of compound mineral admixtures on performance of lightweight aggregate concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2020(3) : 70-72, 90. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2020.03.070.04.
- [14] 张登祥,蒋晓明.大流动性高强轻集料混凝土约束收缩及抗裂性能研究[J].铁道学报,2021,43(5):190-196. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2021.05.023.
- ZHANG Dengxiang, JIANG Xiaoming. Study on constrained shrinkage and crack resistance of high workability and high strength lightweight aggregate concrete [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43 (5) : 190-196. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2021.05.023.
- [15] 周佳.自密实轻骨料混凝土早龄期温湿度发展及收缩变形试验研究[D].长沙:长沙理工大学,2018.
- ZHOU Jia. Experimental study on temperature and humidity development and early-age shrinkage of self-compacted lightweight aggregate concrete [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018.
- [16] 张云国,吴熙,毕巧巍.自密实轻骨料混凝土的收缩与徐变性能[J].材料科学与工程学报,2014,32(1):35-39. DOI: 10.14136/j.cnki.issn.1673-2812.2014.01.005.
- ZHANG Yunguo, WU Xi, BI Qiaowei. Shrinkage and creep performance of self-consolidating lightweight concrete [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2014, 32(1) : 35-39. DOI: 10.14136/j.cnki.issn.1673-2812.2014.01.005.
- [17] 张虎.自密实钢纤维轻骨料混凝土的早期性能与损伤分析[J].材料导报,2017,31(20):124-128. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2017.020026.
- ZHANG Hu. Early capability and damage analysis of self-compacting, steel-fiber-reinforced lightweight aggregate concrete [J]. Materials Review, 2017, 31(20) : 124-128. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2017.020026.
- [18] 汤灿,郑文忠.一个新的多系数混凝土收缩模型[J].建筑材料学报,2016,19(5):826-831. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2016.05.007.
- TANG Can, ZHENG Wenzhong. A new multi-coefficients shrinkage model for concrete [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19 (5) : 826-831. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2016.05.007.
- [19] 张欢,王玉银,耿悦,等.考虑基体混凝土抗压强度影响的再生粗(细)骨料混凝土干燥收缩模型[J].建筑结构学报,2020,41(12):156-164. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0111.
- ZHANG Huan, WANG Yuyin, GENG Yue, et al. Drying shrinkage model for recycled fine and coarse aggregate concrete considering compressive strength of matrix concrete [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41 (12) : 156-164. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0111.
- [20] LABBÉ S, LOPEZ M. Towards a more accurate shrinkage modeling of lightweight and infra-lightweight concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 246: 118369. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118369.
- [21] 张玉平,马超,李传习,等.基于改进BP算法的混凝土热学参数反演与预测[J].交通科学与工程,2021,37(1):42-50. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.007.
- ZHANG Yuping, MA Chao, LI Chuanxi, et al. Back analysis and prediction of thermal parameters of concrete based on improved BP algorithm [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1) : 42-50. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.007.
- [22] 张翔,张立兴.中承式钢管砼拱桥设计[J].公路与汽运,2021(5):114-117. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.05.030.
- ZHANG Xiang, ZHANG Lixing. Design of half-through concrete-filled steel tubular arch bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2021(5) : 114-117. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.05.030.
- [23] 凌波,陈婉君,张海忠.醴陵市枳上社区江华组滑坡稳定性分析及失稳机制[J].国土资源导刊,2021,18(4):7-11. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5603.2021.04.004.
- LING Bo, CHEN Wanjuan, ZHANG Haizhong. Stability analysis and instability mechanism of Jianghua formation landslide in Jianshang Community, Liling City [J]. Land & Resources Herald, 2021, 18(4) : 7-11. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5603.2021.04.004.

Study on early-age shrinkage characteristics of high workability and high strength lightweight aggregate concrete

ZHANG Dengxiang^{1,2}, WU Fei^{1,2}, XU Rongrong³, XIAO Niu³

(1.School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2.Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3.Hunan Changsha South Nanfang New Material Technology Co., Ltd.,

Changsha 410115, China)

Abstract: [Purposes] The shrinkage characteristics of high workability and high strength lightweight aggregate concrete (HHLC) were explored to provide reference for the popularization and application of HHLC. [Methods] HHLC was produced with high strength shale ceramsite, and the autogenous shrinkage and total shrinkage deformation were measured by laboratory test. [Findings] The 28 d autogenous shrinkage strain of HHLC is only 57×10^{-6} , and the total shrinkage strain is 203×10^{-6} . The early-age autogenous shrinkage strain and the total shrinkage strain of HHLC are the smallest compared with self-compacting concrete (SCC) and ordinary concrete (NC) of the same strength grade. The development law of HHLC shrinkage deformation is basically consistent with SCC and NC, but HHLC autogenous shrinkage appears micro expansion in the first three days, and the expansion value is about 10×10^{-6} . In the total shrinkage strain of HHLC, autogenous shrinkage accounts for a relatively small proportion. The shrinkage strain is mainly the drying shrinkage caused by external drying, and the smaller the water binder ratio is, the greater the drying shrinkage is. Fly ash has obvious effect on reducing the early shrinkage of HHLC, but the content should not exceed 25%. MC90 model is suitable for ordinary concrete, but the model has large calculation errors for SCC and HHLC. Considering the influence of admixture and aggregate characteristics on shrinkage of HHLC, a modified MC90 model is proposed. [Conclusions] HHLC produced with high strength shale ceramsite with low water absorption has good workability and volume stability, and it has a broad application prospect in structural engineering. The modified concrete shrinkage calculation model MC90 adopted in the current code also has good applicability to HHLC.

Key words: high workability and high strength lightweight aggregate concrete; shrink age deformation; water-binder ratio; fly ash; calculation model

Manuscript received: 2021-12-31; revised: 2022-05-18; accepted: 2022-05-26

Foundation item: Project (2017JJ2273) supported by Hunan Natural Science Foundation; Project (XSKJ2018179-26) supported by Hunan Water Conservancy Science and Technology Program

corresponding author: ZHANG Dengxiang (1971—) (ORCID: 0000-0002-9707-1678), male, associate professor, research interest: design theory of concrete structure. E-mail: zhangdx098@163.com

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:李岳林)