

低模量合成纤维对混凝土基本徐变的影响

李天伦¹, 吴永根¹, 吴豪祥²

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 中国人民解放军 94831 部队, 福建武夷山, 354300)

摘要 为了研究低模量合成纤维对混凝土基本徐变的影响,进行了3种不同掺量低模量合成纤维混凝土徐变试验,并将试验结果与相关预测模型计算结果进行了对比。结果表明,低模量合成纤维的掺入对混凝土抗压强度和弹性模量影响较小,但会增大混凝土的基本徐变。相对于未掺纤维的混凝土试样,0.8 kg/m³、1.2 kg/m³和1.6 kg/m³掺量的混凝土试样的徐变度分别增加了7.9%、10.1%和10.0%,徐变系数分别增加了15.3%、17.2%和1.9%,单位应力下的总压缩应变分别增加了1.1%、2.3%和8.9%。混凝土徐变度实测结果与ACI-209R模型的吻合度最高,与CEB-FIP模型的吻合度次之,但两者均无法直接用于低模量纤维混凝土基本徐变的预测,公式相关参数需要依靠短期测试进行回归,GL-2000模型的误差较大,不适用于低模量合成纤维混凝土徐变的预测。

关键词 合成纤维;混凝土;基本徐变;徐变度;徐变系数

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.03.015

中图分类号 TU528.572 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)03-0097-06

Effect of Low Modulus Synthetic Fiber on Basic Creep of Concrete

LI Tianlun¹, WU Yonggen¹, WU Haoxiang²

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Unit 94831, Wuyishan 354300, Fujian, China)

Abstract In order to study the effect of low modulus synthetic fiber on basic creep of concrete, three creep tests of low modulus synthetic fiber concrete with different dosage are carried out, and the test results are compared with the calculation results of relevant prediction models. The results show that though the addition of low modulus synthetic fiber has little effect on the compressive strength and elastic modulus of concrete, the basic creep of concrete increases. Compared with the concrete samples without fiber, the creep degree of 0.8 kg/m³, 1.2 kg/m³ and 1.6 kg/m³ concrete samples increase by 7.9%, 10.1% and 10.0% respectively. The creep coefficient increases by 15.3%, 17.2% and 1.9%, and the total compressive strain per unit stress increases by 1.1%, 2.3% and 8.9% respectively. The measured result of concrete creep degree has the highest agreement with ACI-209R model, followed by CEB-FIP model. However, neither of them can be directly used to predict basic creep of low-modulus fiber reinforced concrete, and the relevant parameters of the formula need to rely on short-term test for regression. However, the GL-2000 model has a large error and is not suitable for the prediction of creep of low modulus synthetic fiber concrete.

收稿日期: 2021-12-04

作者简介: 李天伦(1994—),男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士生,研究方向为工程施工与材料。E-mail:litianlun2020@163.com

通信作者: 吴永根(1969—),男,上海人,教授,研究方向为工程施工与材料。E-mail:wuyonggen1@163.com

引用格式: 李天伦,吴永根,吴豪祥,等.低模量合成纤维对混凝土基本徐变的影响[J].空军工程大学学报(自然科学版),2022,23(3):97-102. LI Tianlun, WU Yonggen, WU Haoxiang. Effect of Low Modulus Synthetic Fiber on Basic Creep of Concrete[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(3): 97-102.

Key words synthetic fiber, concrete, basic creep, creep coefficient, creep compliance

徐变是混凝土自身固有的性能,徐变会引起预应力混凝土结构的预应力损失、长期变形和内力重分布的显著增加,对安全性和耐久性造成严重影响^[1-2],其自发现以来就引起了人们的高度重视。

在混凝土中掺入适量的纤维能够很好地提升混凝土的使用性能,提高混凝土的强度,纤维混凝土作为一种新型复合材料已经广泛应用于道路、桥梁、隧道和建筑等^[3-4]。关于纤维混凝土徐变的研究最早主要针对钢纤维,1989年Chern等对钢纤维对混凝土徐变的影响进行了试验,试验结果表明,随着纤维体积掺量的增加,徐变有所降低^[5]。近年来,随着高性能合成纤维混凝土的发展,徐变相关研究逐渐增多。于俊超等研究了钢纤维和聚丙烯纤维混凝土的徐变特点,认为聚丙烯粗纤维只能改善混凝土的延性,无法抑制混凝土的徐变^[6]。王玉清等测试了不同掺量聚乙烯醇纤维的混凝土徐变,测试数据表明,聚乙烯醇纤维体积含量在0.5%~2.0%范围时,纤维混凝土的徐变均大于普通混凝土,且徐变随纤维掺量的增大呈现两头大中间小的趋势^[7]。已有研究表明,高模量纤维对混凝土的桥接作用比较明显,可以提高混凝土开裂后的韧性和抗冲击性能,并已被证明能够有效地减小混凝土的徐变^[8]。目前已有较多模型可用于预测混凝土的徐变效应,如CEB-FIP模型^[9]、GL-2000模型^[10]、ACI-209模型^[11]、GL-2000改进模型和B3模型^[12]等。除此之外,Zhang则基于cox的剪滞理论,提出了在普通混凝土基本徐变基础上乘以纤维填充因子作为纤维混凝土徐变的预测公式,但该表达式只适用于高模量纤维混凝土,并不能满足低模量纤维混凝土^[13]。虽然目前已有较多模型可对混凝土徐变进行预测,但由于各模型考虑因素不同,使上述模型之间存在较大区别,其对混凝土徐变计算适用性仍需进一步探讨。

可以看出,针对合成纤维混凝土徐变的研究,目前还处于起始阶段,试验数据不够充分,也没有完整的理论,尤其是对于低模量合成纤维对混凝土徐变性能的影响仍缺乏研究。为此,本文选取清华大学生产

的低模量合成纤维,研究了不同掺量低模量合成纤维对混凝土基本徐变的影响,并将试验结果与混凝土徐变预测模型计算结果进行了比较,希望能为低模量合成纤维混凝土徐变预测模型的应用提供参考。

1 材料与试验

1.1 材料

普通混凝土的配合比见表1,编号为F0。其中,水泥为42.5级普通硅酸盐水泥;粗集料为石灰石,采用5~10 mm、10~20 mm和20~40 mm 3个级配,按照1:3:6的质量比进行配制;细集料为河砂,细度模数为2.7;水为普通自来水。在普通混凝土中分别掺入0.8 kg/m³、1.2 kg/m³和1.6 kg/m³的纤维即可得到相对应的纤维混凝土,工作性能试验结果见表2,编号分别为F8、F12和F16。

表1 普通混凝土配合比 单位:kg/m³

编号	水泥	水	砂	石
F0	330	148.5	595	1 389

表2 混凝土试件工作性能试验结果 单位:s

编号	F0	F8	F12	F16
Vb稠度	18	21	25	33

本文选取的低模量合成纤维为清华大学国家“863”研究项目中的新型高性能合成纤维见图1,纤维的具体性能指标见表3。



图1 新型高性能合成纤维

表3 低模量合成纤维技术指标

长度/mm	比重	弹性模量/GPa	断裂伸长率/%	抗拉强度/MPa	吸水性/%	熔点/°C
5~20	0.9~1.31	6.1	3.1	760	0.7	257

1.2 试验方法

1.2.1 力学实验

参照《水工混凝土试验规程》^[14],成型3组150 mm×150 mm×150 mm的立方体试样,24 h脱

模后移入标准养护室,达到28 d龄期后测量其抗压强度。

1.2.2 徐变试验

参照《水工混凝土试验规程》^[14],每个配合比制

作3个徐变试样和2个补偿试样,试样规格为 $\Phi 150\text{ mm}\times 450\text{ mm}$ 。混凝土试样浇筑振捣完成后,24 h进行脱模,并用紫铜皮密封以达到绝湿状态,充气法检查密封性后移入 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 的徐变室。徐变仪器为弹簧式压缩徐变仪,加荷龄期为28 d,加载荷载为对应龄期同尺寸试件轴心抗压强度的40%。量测设备为DI-25型差动式电阻应变计,加荷设备为油压千斤顶,在加载后第1 d、7 d、30 d和90 d各调荷一次。

采用徐变度、徐变系数以及单位应力下的总压缩应变来评价混凝土的徐变性能。其中,徐变度是指单位应力下的徐变变形,为徐变应变与持荷应力之比;徐变系数是指在恒应力作用下,试件某一时刻的徐变变形与其加载时刻的瞬时弹性变形的比值;单位应力下的总压缩应变是指单位应力下的徐变变形与弹性变形之和,按式(1)^[11]计算。

$$\epsilon_c' = (1/E_c) + C_c \quad (1)$$

式中: ϵ_c' 为单位应力下的总压缩应变, 10^{-6} ; $1/E_c$ 为单位应力下的弹性变形, 10^{-6} ; C_c 为徐变度, $10^{-6}/\text{MPa}$ 。

2 试验结果分析

2.1 纤维掺量对混凝土力学性能的影响

F0、F8、F12和F16试样28 d的立方体抗压强度分别为42.61 MPa、42.82 MPa、43.50 MPa和42.25 MPa,可以看出立方体抗压强度呈现先增大后减小的变化趋势,F12的立方体抗压强度最大,F16的立方体抗压强度较F0略有下降,但影响幅度均在2%以内,说明该种纤维的掺入对混凝土28 d的立方体抗压强度影响较小。

根据立方体抗压强度与轴心抗压强度的关系,换算系数取为0.53,各组混凝土试件轴心抗压强度和加载荷载如表4所示。F0、F8、F12和F16的弹性模量分别为41.0 GPa、41.9 GPa、43.5 GPa和37.9 GPa,虽然也呈现先增大后减小的变化趋势,但影响幅度均不超过8%,掺入纤维的混凝土试样弹性模量与空白混凝土偏差较小。

表4 28 d轴心抗压强度和加载荷载 单位:MPa

编号	轴心抗压强度	加载荷载
F0	22.58	9.03
F8	22.69	9.08
F12	23.06	9.22
F16	22.39	8.96

2.2 纤维掺量对混凝土徐变的影响

徐变度、徐变系数以及单位应力下的总压缩应

变随时间变化的曲线,见图2~4。

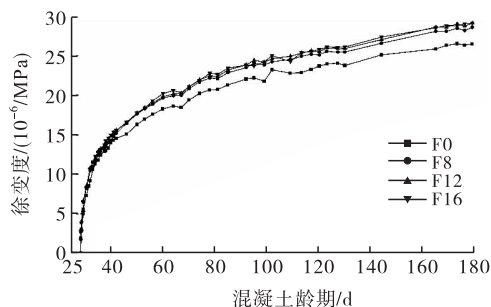


图2 徐变度

由图2可以看出,随着龄期的增长,混凝土的徐变逐渐增大,呈现出前期快后期慢的增长趋势,这是因为混凝土承受荷载时,水泥浆体的徐变与加荷应力成正比,早期徐变发展较快,而后骨料会阻碍水泥浆体的流动,加载应力逐渐转移到由骨料来承受,导致徐变速率逐渐减小^[15]。F8、F12和F16的最终徐变度相比于F0分别增加了7.9%、10.1%和10.0%,表明低模量合成纤维的掺入增大了混凝土的徐变变形,主要原因是纤维的掺入增加了混凝土内部缺陷,加载状态又造成凝胶吸附水和层间水迁移和渗出,延缓混凝土的水化^[16]。低模量合成纤维不能像钢纤维一样抵抗混凝土的变形,从而增大了混凝土徐变。但在试验纤维掺量范围内,由于在加荷的往复过程中由纤维引起的部分孔隙被压实,导致F12和F16的徐变差距不大。

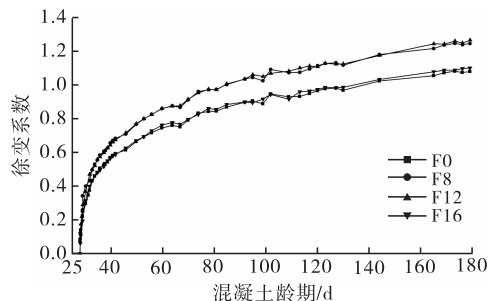


图3 徐变系数

由图3可以看出,F8、F12和F16的徐变系数相比于F0分别增大了15.3%、17.2%和1.9%,在徐变度差异不大的情况下,说明F16和F8、F12的弹性变形差异明显,F8和F12的弹性变形较F0分别减小了 15×10^{-6} 、 19×10^{-6} ,F16的弹性变形较F0却增大了 5×10^{-6} ,主要原因是合成纤维在混凝土中形成了较好的三维搭接结构,改善了微观结构,提高了混凝土的韧性,但是过大的掺量导致纤维的重叠交织,对混凝土界面的弱化作用增强,增大了混凝土被“压密”的可能性,对于混凝土基体而言是一种不容忽视的缺陷^[15]。

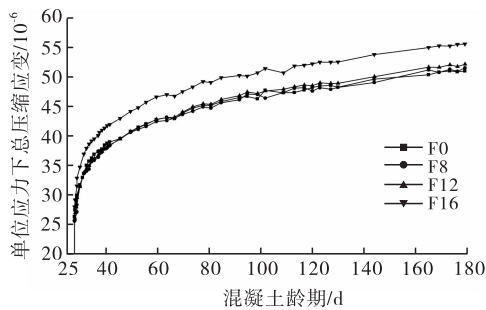


图4 单位应力下的总压缩应变

由图4可以看出,F8、F12和F16单位应力下的总压缩应变相比于F0分别增加了1.1%、2.3%和8.9%,其相对大小关系与图2有明显差异,其原因在于徐变系数是以“除”的形式引入弹性变形,而单位应力下的总压缩应变则是以“加”的形式引入弹性变形。F8、F12和F0的变化曲线基本重合,表明掺量在 $0.8\sim 1.2\text{ kg/m}^3$ 范围的低模量合成纤维虽然能提高混凝土的抗压承载能力,但无法提高混凝土抵抗长期压力变形的能力,而 1.6 kg/m^3 的纤维掺量明显降低了混凝土抵抗长期压力变形的能力。

纤维对混凝土基本徐变的影响主要体现在两个方面,一是对混凝土内部结构的影响;二是发挥混凝土内部变形的“阻挡”作用。纤维的掺入会增大混凝土的内部孔隙率^[17],增加混凝土内部的“多害孔”^[18-19],这些较大孔隙对混凝土基本徐变的影响

随时间变化呈现两种作用,一是在加荷过程中孔隙增多给孔壁两侧C-S-H的滑移提供了更多的可能,同时会产生更多的初始微裂缝和缺陷,微裂缝会引起混凝土内部湿度的不平衡,导致毛细孔周围的水分向毛细孔移动,进而引起周围的水泥浆体干燥收缩,增大混凝土变形,而缺陷则会降低混凝土抵抗变形的能力;二是随着水泥的进一步水化,混凝土中的孔隙逐渐变小,当缩小到毛细孔大小后,水泥的继续水化便会引起混凝土进一步的收缩变形^[20]。因此,在同等应力水平下,该种低模量合成纤维的掺入增大了混凝土的徐变。

3 徐变预测模型对纤维混凝土徐变的适用性

针对混凝土徐变的预测模型较多,使用广泛的有双幂函数模型、幂函数模型、对数函数模型和指数函数模型^[21],针对混凝土基本徐变的主要有CEB-FIP模型和GL-2000模型。本文将测试结果与上述模型拟合结果进行对比,其中,双幂函数模型采用ACI-209R模型,对数函数模型采用CEB-FIP模型,GL-2000模型公式乘以修正系数 m 。拟合结果见表5,拟合曲线见图5~8。

表5 徐变系数拟合曲线相关参数

拟合曲线	公式	编号	$a/d/f/h/m$	$b/e/g/k$	c	R^2
双幂函数	$y = a \cdot x^c / (b + x^c)$	F0	2.022	7.462	0.426	0.998
		F8	2.543	9.827	0.413	0.998
		F12	2.543	8.264	0.416	0.998
		F16	1.960	7.410	0.444	0.997
幂函数	$y = d \cdot x^e$	F0	0.281	0.274		0.992
		F8	0.270	0.292		0.994
		F12	0.318	0.279		0.993
		F16	0.278	0.279		0.990
对数函数	$y = f \cdot \ln(g \cdot x + 1)$	F0	0.193	1.600		0.993
		F8	0.213	1.195		0.990
		F12	0.226	1.512		0.992
		F16	0.196	1.565		0.994
指数函数	$y = h(1 - e^{-kx})$	F0	0.937	0.081		0.877
		F8	0.963	0.076		0.881
		F12	1.092	0.075		0.875
		F16	0.951	0.077		0.883
GL-2000	$y = m \cdot [2(\frac{x^{0.3}}{x^{0.3} + 14}) + (\frac{7}{28})^{0.5}(\frac{x}{x+7})^{0.5}]$	F0	0.997			0.927
		F8	1.088			0.928
		F12	1.152			0.921
		F16	1.007			0.926

注: y 为徐变系数; x 为加载天数。

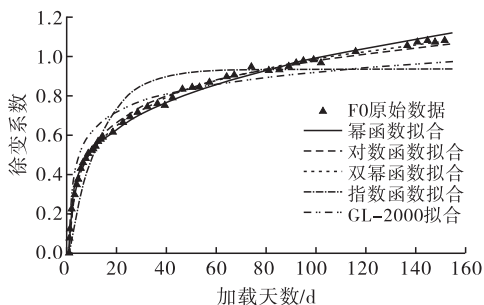


图 5 F0 徐变系数拟合图

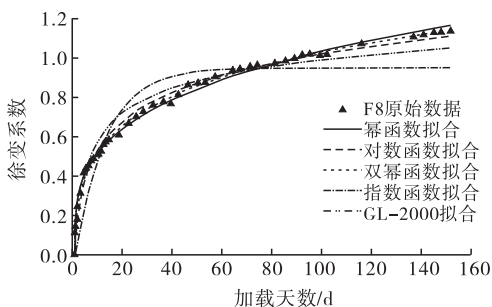


图 6 F8 徐变系数拟合图

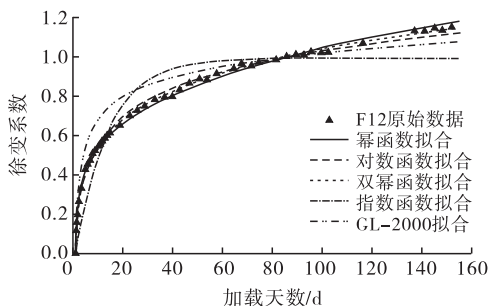


图 7 F12 徐变系数拟合图

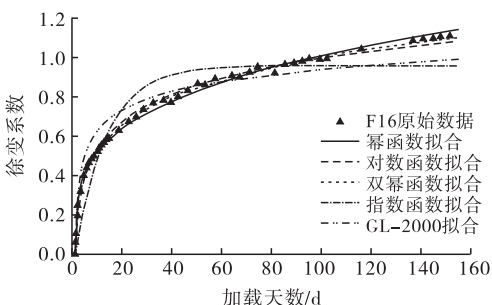


图 8 F16 徐变系数拟合图

由拟合曲线可以看出,对于混凝土前 180 d 龄期的徐变,双幂函数的拟合效果最好, R^2 均大于 0.997;对数函数和幂函数也有较好的拟合效果, R^2 均大于 0.990,但对数函数后期曲线有低于实际曲线的趋势,而幂函数后期曲线则有高于实际曲线的趋势;指数函数的拟合效果最差,不适宜作为预测函数。GL-2000 模型拟合后 R^2 均大于 0.92,拟合效果也不错。根据拟合结果,本文对 ACI-209R、CEB-FIP 和 GL-2000 这 3 个模型的适用性进行进一步分析。

ACI-209R 模型公式中,参数 a 为最终徐变系数,应在 1.30~4.15 范围内;参数 b 和 c 是从试验

中获得的拟合数据,应分别在 6~30 d 和 0.40~0.80 范围内。虽然该公式主要针对混凝土的总徐变即基本徐变和干燥徐变之和,但根据拟合效果,其在基本徐变数据拟合上仍有很好的效果,且回归参数值均在合理范围内,因此认为 ACI-209R 可以作为低模量合成纤维混凝土徐变的预测模型。由于其相关参数无法根据材料性能和环境等进行计算,需要通过短期测试数据进行回归。本文分别利用前 14 d (16 组)、前 60 d (26 组)和前 100 d (38 组)数据进行回归,结果表明,F0、F8、F12 和 F16 后续徐变系数的最大相对误差均在 7%以内,预测效果很好。

CEB-FIP 模型公式按式(2)^[13]计算。

$$\varphi_{lx}(t, t_0) = \frac{1.8}{f_{cm}^{0.7}} \cdot \ln \left(\left(\frac{30}{t_{0,adj}} + 0.035 \right)^2 (t - t_0) + 1 \right) \quad (2)$$

式中: φ_{lx} 为时间增长函数; f_{cm} 为混凝土 28 d 龄期的强度; $t_{0,adj}$ 为调整后的龄期。

同样,分别利用前 14 d (16 组)、前 60 d (26 组)和前 100 d (38 组)数据进行回归,结果表明,F0、F8、F12 和 F16 后续基本徐变度的最大相对误差分别为 17%、12%、9%和 6%。

对于 GL-2000 模型公式,当修正系数 $m=1$ (即采用原公式)时,能够直接计算混凝土的徐变系数,但 60 d 后的徐变系数,F0、F8、F12 和 F16 的最大相对误差分别为 11%、12%、13%和 12%。可以看出,GL-2000 直接预测混凝土的徐变系数有较大的误差,即使采用前 100 d (38 组)数据进行回归,其后续徐变系数最大相对误差仍达到了 15%,因此认为 GL-2000 模型不适合用于低模量合成纤维混凝土徐变的预测。

4 结论

通过试验数据的分析与讨论,可以得出以下结论。

1)适量的低模量合成纤维能够提高混凝土的强度和弹性模量,但当纤维掺量过大时,混凝土的强度和弹性模量均有所下降。

2)低模量合成纤维的掺入增大了混凝土的徐变变形,降低了混凝土抵抗徐变的能力,当纤维掺量为 0.8 kg/m³、1.2 kg/m³和 1.6 kg/m³时,徐变度分别增加 7.9%、10.1%和 10.0%。

3)当纤维掺量为 1.6 kg/m³时,混凝土在反复加荷过程中出现较大的弹性变形,混凝土被“压密”的程度较高,导致单位应力下的总压缩应变出现明显增长。

4)目前采用的混凝土徐变预测模型中,ACI-209R模型的效果最好,CEB-FIP模型也取得较好效果,但两者均无法直接进行计算,具体参数需要利用短期试验数据回归得到。而GL-2000模型的预测结果误差较大,不适合用于低模量合成纤维混凝土徐变的预测。

参考文献

- [1] FRECH-BARONET J, SORELLI L, CHEN Z. A Closer Look at the Temperature Effect on Basic Creep of Cement Pastes by Microindentation[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 258: 119455.
- [2] TORRENTI J M. Basic Creep of Concrete-Coupling between High Stresses and Elevated Temperatures [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2018, 22(12): 1419-1428.
- [3] 徐超. 纤维混杂效应对混凝土复合材料的力学及耐久性能的影响 [J]. *功能材料*, 2021, 52(1): 1202-1207.
- [4] MEHTA P K, MONTEIRO P. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* [M]. [S. l.]: Prentice-Hall, 2013:3-10.
- [5] CHERN J C, YOUNG C H. Compressive Creep and Shrinkage of Steel Fibre Reinforced Concrete[J]. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 1989, 11(4): 205-214.
- [6] 于俊超,赵庆新,李迎华,等. 聚丙烯粗纤维对混凝土徐变性能的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(9): 1723-1728.
- [7] 王玉清,孙亮,刘曙光,等. 不同纤维掺量下聚乙烯醇纤维/水泥复合材料徐变性能试验[J]. *复合材料学报*, 2020(1):205-213.
- [8] ZHAO Q X, YU J C, GENG G Q, et al. Effect of Fiber Types on Creep Behavior of Concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 105: 416-422.
- [9] AFROUGHSABET V, BIOLZI L, OZBAKKALOGLU T. High-Performance Fiber-Reinforced Concrete: A Review [J]. *Journal of Materials Science*, 2016, 51: 6517-6551.
- [10] GARDNER N J, LOCKMAN M J. Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(2): 159-167.
- [11] ACI Committee. Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures[J]. *Symposium Paper*, 1982, 76: 193-300.
- [12] BAZANT Z P, MURPHY W P. Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures-Model B3[J]. *Materials and Structures*, 1996, 29(2):126-126.
- [13] ZHANG J. Modeling of the Influence of Fibers on Creep of Fiber Reinforced Cementitious Composite [J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(13): 1877-1884.
- [14] 国家能源局. 水工混凝土试验规程: DL/T 5150—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017:51-57.
- [15] 肖佳,陈雷,邢昊. 掺合料和粗骨料对C60高性能混凝土徐变性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2011(11): 11-15.
- [16] 何智海,钱春香,钱桂枫,等. 聚乙烯醇纤维和减缩剂对等强度混凝土徐变性能的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010, 40((S2)):155-159.
- [17] HANNAWI K, BIAN H, PRINCE-AGBODJAN W, et al. Effect of Different Types of Fibers on the Microstructure and the Mechanical Behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes [J]. *Composites Part B*, 2016, 86: 214-220.
- [18] WANG K J, SHAH S P, PHUAKSUK P. Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Materials-Influence of Fly Ash and Fibers [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(6):458-464.
- [19] 江朝华,赵晖,张玮,等. 玄武岩纤维对水泥砂浆性能及水泥石微观结构的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2008, 26(5): 765-769.
- [20] ROSSI P, TAILHAN J L, LE MAOU F, et al. Basic Creep Behavior of Concretes Investigation of the Physical Mechanisms by Using Acoustic Emission [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(1): 61-73.
- [21] 黄国兴,惠荣炎,王秀军. 混凝土徐变与收缩[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012:95-104.

(编辑:姚树峰)