

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.003

# 配筋超高强混凝土柱徐变试验研究

王涛, 唐信

(深圳大学 土木工程学院, 广东 深圳 518000)

**摘要:**对6个混凝土强度等级为C80~C120的配筋超高强混凝土柱进行了徐变试验,比较了不同强度混凝土的徐变特性。根据混凝土变形计算公式以及混凝土与钢筋之间的力平衡条件与变形协调条件,推导出钢筋对混凝土徐变系数的影响系数计算公式。对常用的4种徐变模型进行了比较分析,基于ACI 209R(1992)模型进行了配筋和强度的修正,得到修正徐变系数预测模型。

**关键词:**混凝土徐变;超高强混凝土;钢筋影响系数

**中图分类号:**TU528.572 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)S2-0013-05

## Experimental research on creep of reinforcement ultral high strength concrete columns

Wang Tao, Tang Xin

(College of Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518000, Guangdong, P. R. China)

**Abstract:** Experiment on shrinkage and creep properties of six large size ultra-high strength reinforced concrete columns were carried out. According to the condition of force balance and deformation coordination between concrete and steel, the influence coefficient formula of reinforced concrete creep coefficient is derived. Based on the 209R ACI (1992) creep model, the modified creep prediction model was proposed by introducing the influence coefficient of the strength correction factor and the reinforcement effect coefficient.

**Key words:** creep of concrete; ultra high strength concrete; steel bar influence coefficient

超高强混凝土由于其强度高、致密性良好、耐腐蚀性、耐久性好等优点被广泛地应用在高层建筑的底层结构柱、大跨桥梁工程以及海洋建筑等<sup>[1]</sup>。在高层建筑中,低层柱通常承受着较大的轴向压力(可达1/3抗压强度),在长期轴压力作用下,构件可能发生瞬时弹性变形数倍的收缩徐变变形,再加上钢筋混凝土柱可能出现不等量的徐变,导致主体结构竖向构件不同的竖向变形,引起附加荷载,加剧构件长期的损伤变形。准确分析构件长期荷载作用下的竖向变形,并采取有效措施减少徐变变形,对整体建筑的结构受力分析有重要意义<sup>[2]</sup>。当前学者们

通过长期的混凝土收缩徐变研究,提出了一系列理论和相应的预测模型。但是,这些预测模型基本是基于普通强度的混凝土试验研究提出的,而针对高强混凝土的适用性还有待研究。有的预测模型没有考虑钢筋影响,而钢筋与混凝土有不同的弹性模量,在长期高轴压应力下,它们之间产生的附加应力会在一定程度上影响预测模型对混凝土收缩徐变估算值的准确性<sup>[3]</sup>。所以,为更深入了解徐变预测模型对有配筋的高强混凝土的徐变预测精度,在超高强混凝土长期力学性能研究的基础上,分析了钢筋对混凝土徐变的影响,并基于ACI 209R

收稿日期:2016-12-12

基金项目:国家自然科学基金(513783112)

作者简介:王涛(1990-),男,主要从事超高强混凝土柱长期力学性能研究,(E-mail)516541836@qq.com。

(1992)提出更加符合配筋高强混凝土的徐变预测模型<sup>[4]</sup>。

## 1 超高强混凝土配筋柱徐变试验

### 1.1 试验材料

水泥:华润牌 P. II52. 5R 硅酸盐水泥;掺合料: SiO<sub>2</sub> 含量为 88% 的 S95 级矿渣、比表面积为 2.4 × 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>/kg 的硅灰;粗骨料:抗压强度 180 ~ 200 MPa、粒径为 5 ~ 15 mm 的玄武岩碎石;细骨料:细

度模数 2.4、最大粒径 5 mm、含泥量低于 1% 的中砂;减水剂:减水率为 28% 的 Sika Viscocrete 3300 系列的高效聚羧酸减水剂;消泡剂:深圳市德沃尔特科技有限公司生产的 Defo-B-ET 型消泡剂;PVA 纤维:日本可乐丽公司生产,其长度为 12 mm,单丝直径为 40 μm,抗拉强度为 1 800 MPa,杨氏模量:≥ 380 cN/dtex,线密度为 0.91 g/cm<sup>3</sup>;用于实验的配合比参见表 1。

表 1 混凝土配合比

强度等级	水泥	硅灰	矿粉	石子	砂	水	减水剂	消泡剂
C80	480	60	60	1 095	730	144	12	0.06
C100	455	65	130	1 065	710	130	16.9	0.085
C120	490	70	140	1 050	700	112	21	0.105

### 1.2 实验设计

实验共制作了 6 个了尺寸为 300 mm × 300 mm × 750 mm 的配筋超高强混凝土方形短柱,其中包括用于实验的 3 个混凝土柱,以及 3 个收缩对比柱。混凝土强度由同期浇筑的标准立方体试块(150 mm × 150 mm × 150 mm)测得,其中用于徐变试验的 3 个构件的详细参数如表 2。

表 2 试验柱基本参数

试件编号	立方体强度/MPa	轴力比	长期轴压力/kN	持荷时间/d	纵筋配筋率/%	体积配筋率/%
HSC-N-A	82.5	0.3	1 449	112	2.18	1.54
HSC-N-B	98.4	0.3	1 651	112	2.18	1.54
HSC-N-C	116.8	0.3	1 861	112	2.18	1.54

### 1.3 徐变加载装置

用于试验的高强混凝土柱子强度比较大,满足实验要求的最大长期荷载就达到 180 kN。一般常规徐变实验加载装置的实验荷载多在 50 kN 以下,为此,设计了满足实验要求的最大荷载值为 200 kN 的加载装置,该装置主要由反力框架、荷载传感器和千斤顶组成。其中反力框架由上下钢承力板及 4 根直径为 8 cm 的丝杆组成,荷载传感器为 300 kN 的多柱式荷载传感器。

### 1.4 构件的加载与测试

在自然养护 60 d 后,试验构件开始加载,由于高层建筑物的底层柱的正常工作荷载一般不超过其极限荷载的 1/3,因此,在试验中所加轴力为其各等级混凝土轴心抗压强度的 0.33 倍。为防止构件柱

发生偏心受压,使用高强石膏对试验柱两端表面进行平整处理。构件的轴向应变通过测定固定在试件对侧的机械千分表的数据并经过换算得出。为防止荷载值退减,定期监控荷载传感器的数值,损失率控制在 5% 以内,否则,及时补载。为减小温湿度带来的误差,数据在相同的时间点进行记录。

## 2 试验结果分析

### 2.1 测试结果

混凝土徐变应变是由总变形值减去加载时的瞬时弹性应变和对应的收缩应变值得到。由于构件养护环境的相对湿度较大,养护时间较长、比较充分,超过 28 d,加载时养护龄期已经是 60 d,构件在加载时可能基本完成了收缩,而加载后实际测得的收缩值非常小,因此,可以忽略加载后收缩值的影响。试件 HSC-N-A、HSC-N-B、HSC-N-C 在加载时产生的瞬时弹性应变值分别为  $330 \times 10^{-6}$ 、 $346 \times 10^{-6}$ 、 $368 \times 10^{-6}$ ,到 112 d 龄期时其构件的徐变值分别为  $241 \times 10^{-6}$ 、 $223 \times 10^{-6}$ 、 $212 \times 10^{-6}$ 。不同强度等级试件轴向应变时效曲线如图 1 所示。

由图 1 可知,不同强度构件的徐变曲线很相似,徐变速率在持荷前期发展较快,之后逐渐降低,徐变曲线在加载 80 d 后逐渐平缓,曲线增长缓慢。在同轴力比下,构件所承受的应力随着混凝土构件强度的增大而增大,而其弹性模量并不随着混凝土抗压强度的提高而线性增加,故构件的弹性应变也随混凝土强度的增大而增大。而试验试件的徐变值并没有明显差别,这与轴压比相同时较高水胶比的混凝

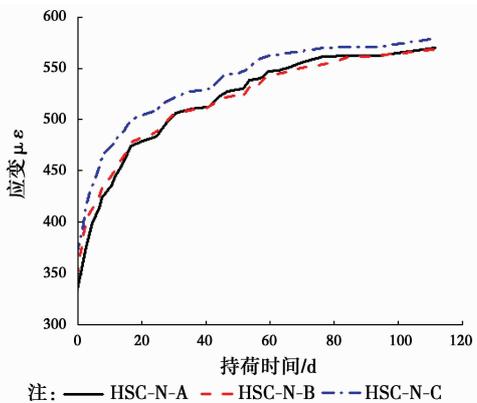


图 1 不同强度等级试件的轴向应变曲线

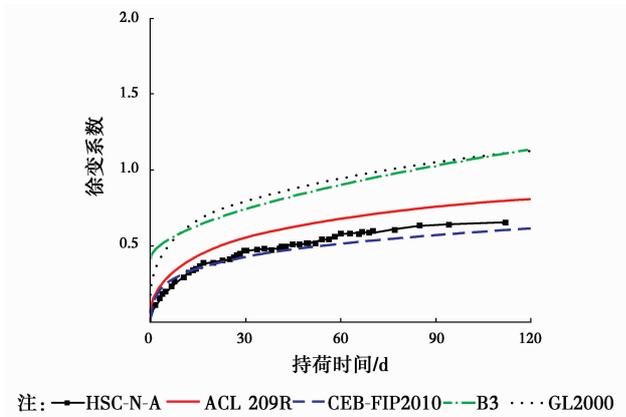


图 3 试件 HSC-N-B 与预测模型的比较

土比低水胶比的混凝土的强度发展速度快的观点不符。这种现象可能是本试验构件得到了充分的养护,并且又由于加载龄期比较晚,高强混凝土低水胶比、孔隙率低的特性,综合影响徐变值小。

### 2.2 徐变系数预测曲线比较分析

一般混凝土徐变发展规律的预测模型通常满足两种因素:一是反映徐变机理的因素,二是徐变时变效应。徐变模型通常建立在多因素影响系数与时间影响函数乘积模式的基础上。将试验数据与常见的 ACI 209R (1992)、CEB-FIP (2010)<sup>[5]</sup>、B3<sup>[6]</sup>、GL2000<sup>[7]</sup> 4 种徐变预测模型进行分析对比,如图 2~4 所示。

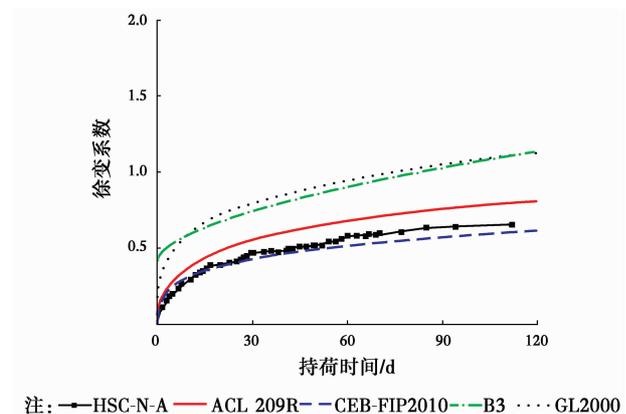


图 4 试件 HSC-N-C 与预测模型的比较

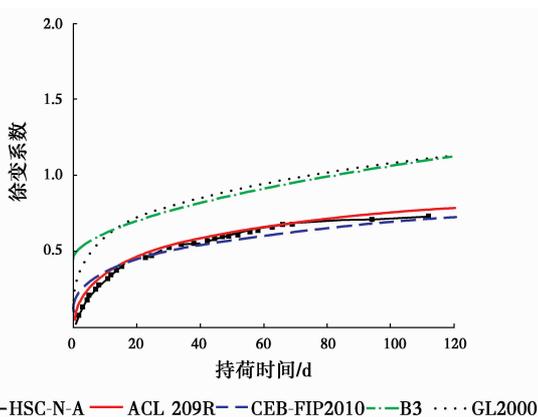


图 2 试件 HSC-N-A 与预测模型的比较

由图 2~4 可知,各预测模型曲线的发展趋势相似,都在发展前期发展较快,一段时间后速度变慢,同时徐变系数的增长率也随之缓慢。GL2000 与 B3 两种徐变模型均认为徐变没有极值,从图 2~4 可以看出他们的预测结果相近。ACI 209R(1992)、B3 及 GL2000 徐变预测模型均高估了试验中配筋高强混凝土柱的徐变,而 CEB-FIP(2010)预测模型比试验徐变值低。ACI 209R(1992)模型缺少混凝土强

度影响系数,也通常低估了低强度混凝土的徐变值。CEB-FIP(1990)模型通过对环境相对湿度  $\varphi_{RH}$  与强度参数  $\beta_H$  进行修正,提出了 CEB-FIP(2010)模型,该模型更加能够对高强高性能混凝土进行徐变预测,不足之处是混凝土强度对徐变值的估计值过高。B3 徐变模型对低强度混凝土徐变预测的准确性要比其他预测模型高,并且该模型也充分考虑了各参数对徐变的影响,但是该模型认为混凝土早龄期徐变值过大,与试验值与其他预测模型的结果差别明显。GL2000 模型更适用于低强度混凝土(大量的试验基础为 16~82 MPa 的混凝土),并且很合理地考虑了相关影响参数,但是该模型也缺少考虑混凝土强度变化对徐变值的影响。

### 2.3 基于试验数据建立 ACI 209R(1992)模型修正徐变预测模型

通过以上 4 种徐变预测模型与试验数据的分析比较得知 ACI 209R(1992)模型中考虑的影响因素比较充分合理,并且计算模型简单,预测效果与试验曲线基本一致。因此,考虑在 ACI 209R(1992)模型的基础上进行影响参数的分析与修正。由于配筋与

混凝土强度对混凝土的收缩徐变都有不同影响,并且混凝土强度增加,相应的徐变系数会减少,因此,要对 ACI 209R(1992)模型进行配筋和强度的修正。根据龄期调整模量法<sup>[8]</sup>,为提高计算精度而引入了混凝土老化系数,在假设钢筋与混凝土的充分粘结的条件下,结合钢筋与混凝土的内力重分布、变形协调条件通过一系列的计算最终的得出配筋对混凝土徐变影响系数  $k_\varphi$  (其中:  $\varphi$  为徐变系数,  $\rho$  为混凝土含钢率,  $n$  为钢筋与混凝土的弹性模量的比值)。

$$k_\varphi = \frac{1}{1 + \rho n (1 + 0.8\varphi)} \quad (1)$$

在 ACI 209R(1992)原模型的基础乘以配筋影响系数  $k_\varphi$  得到新的预测模型,再通过该模型与各试验曲线比较,得到各强度对徐变系数的影响系数。通过各影响系数与混凝土强度关系曲线的拟合,得到新的混凝土强度与强度影响系数之间的关系,拟合公式见式(2)。

$$\gamma_c = 13.4 f_c'^{-0.6} \quad (2)$$

式中:  $\gamma_c$  为强度影响系数;  $f_c'$  为加载时混凝土圆柱体抗压强度。

ACI 209R(1992)模型的修正徐变系数预测模型为

$$\varphi(t, t_0) = k_\varphi \varphi(t, t_0) \quad (3)$$

$$k_\varphi = \frac{1}{1 + \rho n (1 + 0.8\varphi(t, t_0))} \quad (4)$$

$$\varphi(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^{0.6}}{10 + (t - t_0)^{0.6}} \varphi_\infty \quad (5)$$

$$\varphi_\infty = 2.35 \gamma_{la} \cdot \gamma_\lambda \cdot \gamma_h \cdot \gamma_c \cdot \gamma_s \cdot \gamma_\varphi \cdot \gamma_a \quad (6)$$

式中:  $\varphi(t, t_0)$  为徐变系数;  $\varphi_\infty$  为偏离标准状态的徐变系数终值;  $k_\varphi$  为配筋对徐变系数校正系数;  $\rho$  为纵筋配筋率;  $n = E_s/E_c$ ;  $\gamma_{la}$  为加载龄期修正系数,潮湿养护下,混凝土加载龄期大于 7 d 时,  $\gamma_{la} = 1.25 t_0^{-0.118}$ , 蒸汽养护下的加载龄期大于 1~3 d 时,  $\gamma_{la} = 1.13 t_0^{-0.094}$ ;  $\gamma_\lambda$  为构件尺寸的修正系数;  $\gamma_h$  为环境相对湿度的修正系数,  $\gamma_h = 1.27 - 0.006 7h$ ,  $h(\%) > 40$ ;  $\gamma_s$  为坍落度的修正系数;  $\gamma_s = 0.82 + 0.002 64 s$ ,  $s$  为坍落度, mm;  $\gamma_c$  为强度的修正系数,  $\gamma_c = 13.4 f_c'^{-0.6}$ ;  $\gamma_\varphi$  为细骨料的修正系数;  $\gamma_\varphi = 0.88 + 0.002 4 \psi$ ,  $\psi(\%)$  为细骨料含量;  $\gamma_a$  为空气含量的修正系数;  $\gamma_a = 0.46 + 0.09 \alpha$ ,  $\alpha$  为空气含量, 不小于 1。

修正后的预测模型不仅具有公式简单、考虑因素合理的优点,还增加了钢筋及混凝土强度对徐变系数的影响因子,使得综合考虑因素更加合理全面,

新的模型曲线与试验曲线的比较见图 5~7,由图 5~7 可知,修正徐变预测模型更能准确地预测试验中有配筋的超高强混凝土柱的徐变变形。

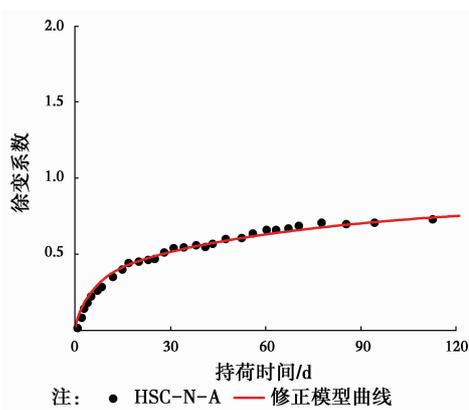


图 5 试件 HSC-N-A 与修正模型曲线比较

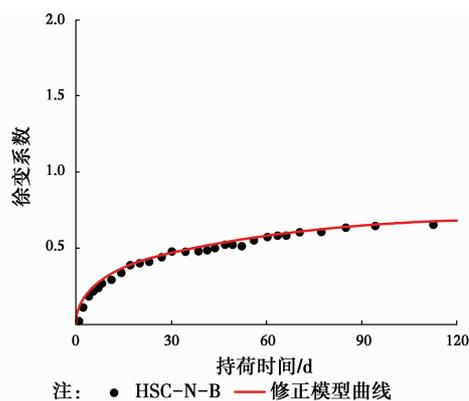


图 6 试件 HSC-N-B 与修正模型曲线比较

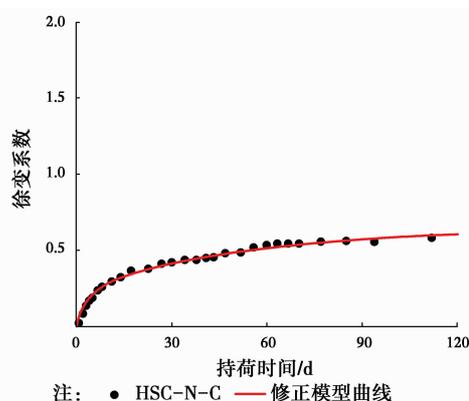


图 7 试件 HSC-N-C 与修正模型曲线比较

### 3 结论

1) ACI 209R(1992)与 CEB-FIP(2010)的徐变模型的预测值与试验数值较为接近, B3 与 GL2000 徐变模型对配筋超高强混凝土徐变值估计偏差较大。

2) 通过考虑分析钢筋与混凝土之间因力的平衡

条件与变形协调条件而发生的应力重分布对混凝土徐变产生的影响,得出影响徐变的配筋影响系数  $k_{\varphi}$

$$= \frac{1}{1 + \rho n (1 + 0.8\varphi)}。$$

3)在 ACI 209R(1992)徐变模型的基础上,加入混凝土强度修正系数与配筋影响系数,提出新的预测修正模型,其预测结果与试验数据的曲线基本一致。

#### 参考文献:

- [1] 傅学怡,高洪. 钢筋混凝土柱收缩徐变分析[J]. 建筑结构学报,2009(Sup1):191-199.
- [2] 张克波,许康,吕毅刚,等. 配筋混凝土柱徐变试验[J]. 长沙理工大学报,2011,8(2):17-20.
- [3] 黄浩良,王佶,范剑锋,等. 钢筋对混凝土徐变影响的计算[J]. 混凝土与水泥制品,2009(1):14-16.
- [4] ACI Committee 209R. Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures, Manual

of concrete Practice Part 1: 209R1-92 [S]. American Concrete Institute, 1992.

- [5] CEB-FIP. Model code 2010 first complete draft-Volume 1 [S]. Lausanne, Switzerland, 2010: 146-150.
- [6] BAZANT Z P, BAWEJA S. Creep and shrinkage prediction model for analysis and de-sign of concrete structures-Model B3 [J]. Materials and Structures, 1995,28:357-365.
- [7] 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.
- [8] BAZANT Z P. Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus method [J]. ACI Journal, 1972, 69: 212-217.

(编辑 胡英奎)