

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.03.016



# 粉煤灰对高强混凝土收缩徐变的影响试验 研究及其修正模型

汪建群<sup>1,2</sup>, 方志<sup>3</sup>, 邓波<sup>4</sup>, 马占飞<sup>5</sup>, 祝明桥<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 长沙理工大学 桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室, 长沙 410004; 3. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 4. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 武汉 430040; 5. 中国水利水电第十四工程局有限公司, 昆明 650041)

**摘要:**粉煤灰对高强混凝土收缩徐变的影响直接关系到结构长期性能的合理确定。制作粉煤灰掺量分别为 0、12% 和 24% 的 100 mm×100 mm×400 mm 的 C50 混凝土棱柱体试件, 在试验室条件下进行收缩及不同加载龄期的徐变试验, 研究了粉煤灰对高强混凝土收缩徐变的影响。根据试验结果评估了目前常用的 4 种相关规范公式对高强混凝土收缩徐变的适用性, 并引入粉煤灰影响系数以综合反映粉煤灰掺量和加载龄期对高强混凝土收缩徐变的影响, 根据试验结果和现有研究成果提出了其修正模型。分析结果表明, JTG D 62 和 GL 2000 推荐的收缩徐变预测模式与基准试件实测结果较为吻合, 验证结论亦说明所引入的粉煤灰影响系数可应用于掺粉煤灰高强混凝土的收缩徐变预测。

**关键词:**粉煤灰; 高强混凝土; 收缩; 徐变; 长期性能

**中图分类号:** TU528.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)03-0110-08

## Experimental analysis of shrinkage and creep of high strength concrete with fly ash and the correction model

Wang Jianqun<sup>1,2</sup>, Fang Zhi<sup>3</sup>, Deng Bo<sup>4</sup>, Ma Zhanfei<sup>5</sup>, Zhu Mingqiao<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, Hunan, P. R. China; 2. Key Laboratory of Bridge Engineering Safety Control Built by Hunan Province and Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, P. R. China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China; 4. CCCC WuHan Harbour Engineering Design And Research Co. Ltd, Wuhan, 430040, P. R. China; 5. Sinohydro Bureau 14 Co. Ltd., Kunming 650041, P. R. China)

**Abstract:** The shrinkage and creep of high strength concrete was affected by the mixed fly ash. The influence was directly related to the long-term behavior of structures. The shrinkage and creep experiment of C50 concrete with fly ash content 0, 12%, 24% were conducted with 100 mm×100 mm×400 mm prism specimens in the laboratory. Four kinds of current commonly used specifications for the shrinkage and

**收稿日期:** 2015-11-11

**基金项目:** 国家自然科学基金(51408218); 长沙理工大学桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室开放基金(13KB02); 湖南省教育厅资助项目(12C0135)

**作者简介:** 汪建群(1982-), 男, 博士, 主要从事大跨桥梁设计基本理论研究, (E-mail) 121095359@qq.com.

**Received:** 2015-11-11

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51408218); Foundation of Key Laboratory of "Bridge Engineering Safety Control" Built by Hunan Province and Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology (No. 13KB02); Education Department Foundation of Hunan Province (No. 12C0135)

**Author brief:** Wang Jianqun(1982-), PhD, main research interest: the basic design theory of large-span bridge, (E-mail) 121095359@qq.com.

creep of high strength concrete were assessed. With the experiment results and other existing research referenced, the fly ash influence coefficient and its correction model were introduced to reflect the influence of different load age and fly ash content. The analysis showed that the shrinkage and creep mode recommended from JTG D62 and GL 2000 agreed well with the measured results form the reference specimens. And the verification conclusion demonstrated that the introduced fly ash influence coefficient could be applied to the shrinkage and creep of high strength concrete with fly ash.

**Keywords:** fly ash; high strength concrete; shrinkage; creep; long-term behavior

粉煤灰作为矿物掺合料掺入到高强混凝土中,在早期可改善混凝土的泵送性能并降低其水化热,在后期又可增强结构的耐久性<sup>[1]</sup>。粉煤灰在混凝土结构如桥梁工程中的应用极为普遍,可以实现变废为宝,有利于环境保护。但掺粉煤灰高强混凝土的收缩徐变较难预测,一方面是由于早期提出的收缩徐变模式对于高强混凝土的适用性值得商榷;此外,粉煤灰的掺入改变了混凝土的配合比,其收缩徐变亦受到影响<sup>[2]</sup>。

目前常用的收缩徐变预测模型如 JTG D 62—2004<sup>[3]</sup>、GL 2000<sup>[4]</sup>、ACI 209R<sup>[5]</sup>、AASHTO<sup>[6]</sup>以及 B3<sup>[7]</sup>模型均未考虑粉煤灰的影响。但粉煤灰对混凝土收缩徐变的影响可见相关文献报道:Padvet 等<sup>[8]</sup>和 Wang 等<sup>[9]</sup>的研究表明,粉煤灰混凝土的徐变明显低于基准混凝土;Alexander 等<sup>[10]</sup>的研究表明,粉煤灰掺量为 25% 的混凝土在持荷 2 a 后,其徐变为基准混凝土的 2/3。万纯斌等<sup>[11]</sup>、邓宗才等<sup>[12]</sup>、罗许国等<sup>[13]</sup>、李益进等<sup>[14]</sup>和李北星等<sup>[15]</sup>对不同粉煤灰掺量的高强混凝土徐变性能进行了实验研究。既有研究表明:粉煤灰对混凝土的收缩徐变具有较大影响,一定掺量粉煤灰混凝土的收缩徐变均小于基准混凝土。但现有研究一方面多专注于粉煤灰掺量

对混凝土徐变的作用,少有关关注加载龄期的影响,且研究成果较为离散;另一方面,缺乏针对不同加载龄期和不同粉煤灰掺量这两个参数提出的影响系数及计算公式,以方便用于现有预测模型的修正。

笔者采用 100 mm×100 mm×400 mm 的 C50 混凝土棱柱体试件,在试验室条件下进行了收缩和不同加载龄期的徐变试验研究。基于试验结果评估了目前常用的 4 种相关规范公式对高强混凝土的适用性。针对外掺粉煤灰的高强混凝土引入了粉煤灰影响系数,以综合反映粉煤灰掺量和加载龄期对高强混凝土收缩徐变的影响,并根据试验研究和现有研究成果回归了其计算公式,以期合理确定掺粉煤灰高强混凝土的收缩徐变模式,为相关设计提供试验依据。

## 1 实验

### 1.1 试验原材料

试验原材料取自于某施工现场,设计的混凝土强度等级为 C50,其配合比如表 1 所示。所采用的粉煤灰为 I 级,其细度、含水量、需水量比和烧失量分别为 8.1%、0.8%、94% 和 4.34%。粉煤灰的化学组成见表 2。

表 1 试验 C50 混凝土配合比

Table 1 The mixture ratio of C50

| 组别   | FA/% | 碎石              | 砂                      | 外加剂                | 水         | 水泥                      | 粉煤灰          |
|------|------|-----------------|------------------------|--------------------|-----------|-------------------------|--------------|
| FA0  | 0    | 1 092           | 660                    | 5.5                | 165       | 519                     | 0            |
| FA12 | 12   | 1 162           | 650                    | 5.6                | 165       | 465                     | 63           |
| FA24 | 24   | 1 132           | 645                    | 5.8                | 165       | 414                     | 131          |
| 材料来源 |      | 5~25 mm<br>连续级配 | 洞庭湖中砂,细<br>度模数 $f=2.8$ | 西卡(Sika)<br>聚羧酸外加剂 | 长江<br>自来水 | 华新水泥厂,<br>P.O 42.5 普硅水泥 | 荆门电厂<br>I 级灰 |

注:组别中,FA 表示粉煤灰,数字表示混凝土的粉煤灰掺量。粉煤灰掺量按照等量取代水泥用量的 0、12% 和 24% 设计。其中 FA0、FA12 和 FA24 分别表示粉煤灰掺量为 0(基准试件)、12% 和 24% 的试件。

表 2 粉煤灰的化学组成

Table 2 The chemical composition of fly ash %

| SiO <sub>2</sub> | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | 烧失量  |
|------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------------------|------------------|------|
| 47.61            | 1.02 | 33.56                          | 4.34                           | 4.11 | 0.57              | 1.59             | 4.34 |

### 1.2 试验方法

试验共制作了 5 组棱柱体试件,用于 7、14、28、50 d 的徐变加载和收缩测试。试验室的温、湿度条件维持在 20±2 °C,湿度为(85±5)%,载荷水平为

40%棱柱体抗压强度,持荷 360 d。

徐变试验采用自制弹簧式徐变仪加载。在试件的两相对侧面上安装机械式千分表,在余下两相对侧面安装弦式应变计,用以测试试件的徐变应变和收缩应变。同一试件的千分表和弦式应变计实测数据相互校正。在加载 1 个月内,每天采集一次数据;

2~3 个月内每 2 d 采集一次数据;之后每 3 d 采集一次数据,直至试验结束。

为获得混凝土的力学性能,同批次制作试件对其立方体抗压强度、棱柱体抗压强度混凝土和弹性模量等力学性能进行测试。混凝土的力学性能如表 3 所示。

表 3 混凝土力学性能

Table 3 The mechanical property of C50

| 组别   | 立方体抗压强度/MPa |      |      |      | 棱柱体抗压强度/MPa |      |      |      | 弹性模量/ $10^4$ MPa |      |      |      |
|------|-------------|------|------|------|-------------|------|------|------|------------------|------|------|------|
|      | 7 d         | 14 d | 28 d | 90 d | 7 d         | 14 d | 28 d | 90 d | 7 d              | 14 d | 28 d | 90 d |
| FA0  | 51.8        | 54.5 | 58.2 | 64.3 | 40.7        | 44.3 | 46.5 | 54.2 | 3.5              | 3.75 | 4.15 | 4.45 |
| FA12 | 50.8        | 55.2 | 61.1 | 68.0 | 39.9        | 45.8 | 48.6 | 56.3 | 3.48             | 3.8  | 4.21 | 4.57 |
| FA24 | 50.0        | 56.1 | 63.8 | 72.3 | 39.5        | 46.5 | 50.3 | 59.5 | 3.45             | 3.89 | 4.35 | 4.68 |

由表 3 可知,粉煤灰对混凝土早期力学性能有较大影响。相对于基准试件 FA0,FA12(FA24)的早期强度较低,7 d 立方体抗压强度为 FA0 的 98.1%(96.5%),14 d 为 101.3%(102.9%),90 d 为 105.8%(112.4%)。棱柱体抗压强度和弹性模量亦呈现类似的规律。说明掺粉煤灰试件早期强度(弹性模量)低于基准试件,但随着龄期的发展,后期强度(弹性模量)高于基准试件。且粉煤灰掺量越

高,对强度的影响越大。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验结果

7、14、28、90 d 的徐变系数及收缩应变测试结果分别如图 1 和图 2 所示。在对试验结果的阐述中,FA0-7 表示粉煤灰掺量为 0、7 d 加载的基准试件。

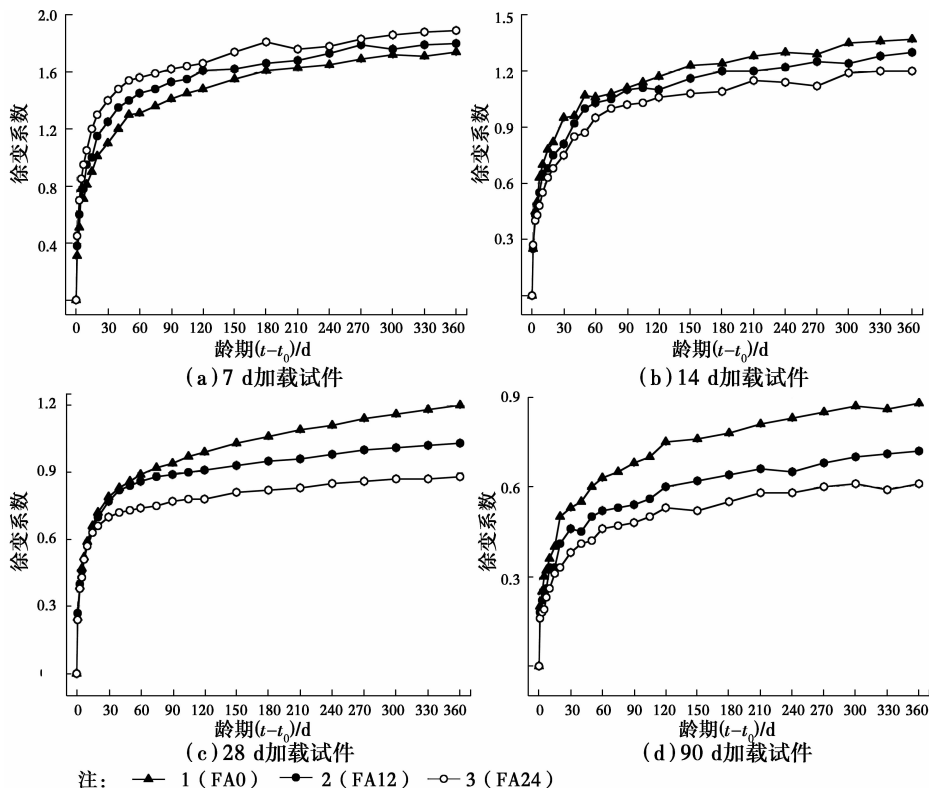


图 1 不同加载龄期的试件徐变系数测试结果

Fig. 1 The measured creep coefficient for specimens with different loading age

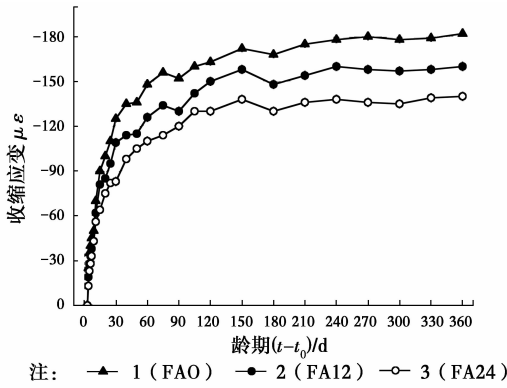


图2 收缩应变测试结果

Fig. 2 The measured shrinkage strain

由图1和图2可知:

1)对于基准试件FA0而言,随着加载龄期的增大,其360 d徐变系数减小。FA0-14、FA0-28和FA0-90持荷360 d的徐变系数分别为1.37、1.21和0.88,分别为FA0-7试件的78.7%、69.0%、50.6%。

2)徐变系数在最初3个月增长较快,后期发展相对较缓。如就FA0-7而言,其30、60和90 d徐变系数分别为360 d的60.2%、71.6%和77.3%,其他各组试件亦呈现类似的规律。

3)粉煤灰增大了早龄期加载试件的徐变系数,但减小了晚龄期加载试件的徐变系数。如持荷360 d时,FA12-7的徐变系数较FA0-7增大了3.4%;但FA12-14较FA0-14降低了5.2%;FA12-90较FA0-90降低了18.2%。这说明粉煤灰对徐变系数降低的幅度随着加载龄期的增长有增加的趋势。

4)对于收缩试件而言,收缩应变在前90 d发展较快,粉煤灰对混凝土的收缩具有抑制作用。对于基准收缩试件FA0-sh,30、60和90 d分别完成了360 d收缩的68.7%、81.3%和83.5%;FA12-sh和FA24-sh试件360 d收缩应变分别为FA0-sh的87.9%和76.9%。

## 2.2 收缩徐变计算模式

目前,几种代表性的收缩徐变计算模式有JTG D 62—2004、GL 2000、ACI 209R及AASHTO规范公式。其中GL2000徐变计算表达式为<sup>[4]</sup>

$$\varphi(t, t_0) = \varphi(t_c)\varphi(t) \quad (1)$$

$$\varphi(t) = \left[ 2 \left( \frac{(t-t_0)^{0.3}}{(t-t_0)^{0.3} + 14} \right) + \left( \frac{7}{t_0} \right)^{0.5} \right] \cdot$$

$$\left( \frac{t-t_0}{t-t_0+7} \right)^{0.5} + 2.5(1-1.086RH^2) \cdot \left( \frac{t-t_0}{t-t_0+0.15(V/S)^2} \right)^{0.5} \quad (2)$$

当  $t_0 = t_c$  时,  $\varphi(t_c) = 1$ , 当  $t_0 > t_c$  时

$$\varphi(t_c) = \left[ 1 - \left( \frac{t_0-t_c}{t_0-t_c+0.15(V/S)^2} \right)^{0.5} \right]^{0.5} \quad (3)$$

式中:  $\varphi(t, t_0)$  为  $t_0$  时刻加载,  $t$  时刻的徐变系数;  $t_c$  为混凝土始干燥龄期;  $V/S$  为混凝土的体表面积比;  $RH$  为相对湿度。

ACI 209R模型的徐变计算公式为<sup>[5]</sup>

$$\varphi(t, t_0) = \left( \frac{(t-t_0)^{0.6}}{10+(t-t_0)^{0.6}} \right) \varphi(\infty) \quad (4)$$

式中:  $\varphi(\infty)$  为徐变系数终值,  $\varphi(\infty) = 2.35\beta_1\beta_2\beta_3\beta_4\beta_5\beta_6$ ;  $\beta_1 \sim \beta_6$  分别为与混凝土加载龄期、环境湿度、构件体表面积、混凝土坍落度、细集料含量、空气含量等6个参数相关的影响系数。

AASHTO模型的徐变计算公式为<sup>[6]</sup>

$$\varphi(t, t_0) = 3.5k_c k_f \left( 1.58 - \frac{RH}{120} \right) t_0^{-0.118} \cdot \left( \frac{(t-t_0)^{0.6}}{10+(t-t_0)^{0.6}} \right) \quad (5)$$

$$k_c = \left[ \frac{t}{26e^{0.36(V/S)} + t} \right] \cdot \left[ \frac{1.80 + 1.77e^{-0.54(V/S)}}{2.587} \right] \quad (6)$$

$$k_f = 62/(42 + f_{cm}) \quad (7)$$

式中:  $f_{cm}$  为混凝土28 d的抗压强度,其他参数意义同GL 2000模型。

采用上述几种规范公式对试件的收缩、徐变进行预测,并与基准试件的收缩、徐变试验结果进行比较,对规范相应计算公式的适用性进行验证。其结果如图3和图4所示。

由图3和图4可知:

1)JTG D 62和GL 2000基本能适用于各加载龄期的试件徐变预测。7 d加载时,JTG D62和GL 2000预测的360 d徐变系数与实测徐变系数误差分别为-1.7%和5.7%,其他加载龄期的预测误差亦不超过20%;JTG D62和GL 2000预测360 d收缩应变误差仅分别为11.4%和6.3%。

2)ACI 209R所推荐的徐变计算模式只适用于加载龄期较小的情形。7 d加载时,360 d徐变系数预测值误差仅为-3.3%,而14、28和90 d加载时,误差分别达15.5%、21.5%和44.4%。此外,ACI

209R 的 360 d 收缩应变预测值误差达 88.2%。

3) 对于 AASHTO 模型, 7 d 和 90 d 加载时, 其误差分别达 -17.9% 和 22.1%, 这说明 AASHTO

不适用于加载龄期较小 ( $\leq 7$  d) 或较大 ( $\geq 28$  d) 的徐变预测; 此外, AASHTO 模型 360 d 收缩应变误差高达 76.3%。

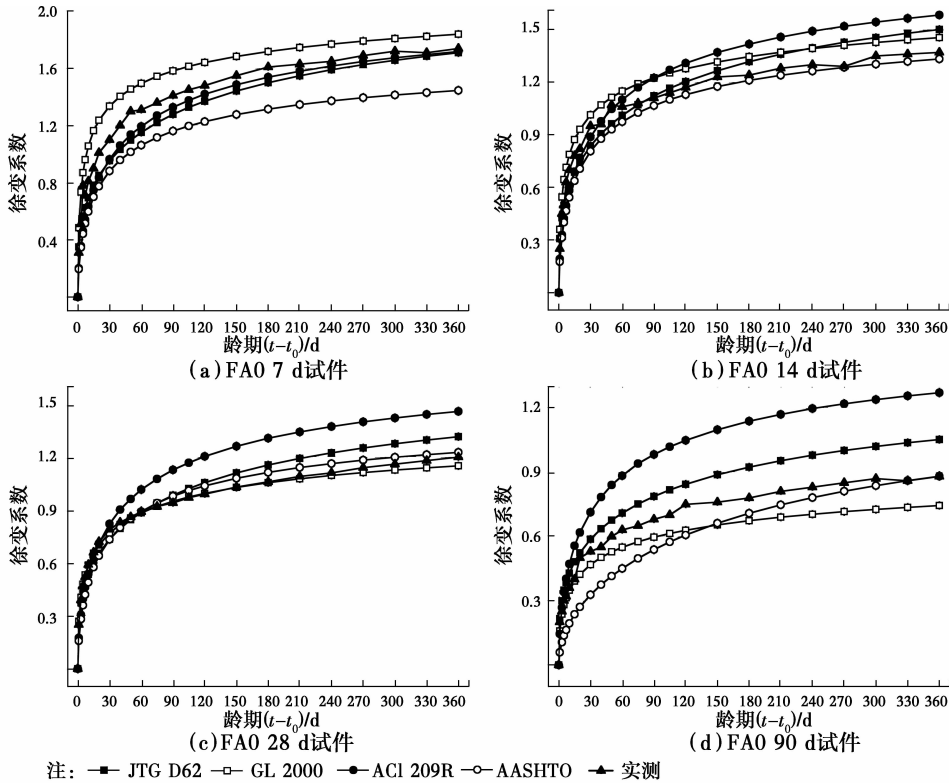


图 3 徐变试验结果与各规范进行比较

Fig. 3 The comparison of creep with 4 specifications

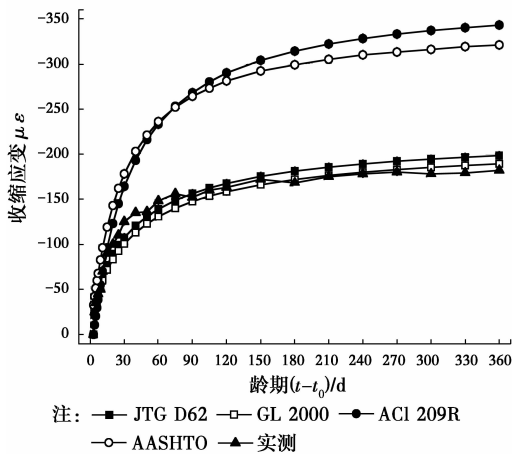


图 4 收缩试验结果比较

Fig. 4 The comparison of shrinkage with 4 specifications

基于室内恒温、恒湿试验结果, 建议高强混凝土的收缩徐变预测采用 GL 2000 和 JTG D62 收缩徐变模型进行计算。

### 2.3 粉煤灰影响系数及其修正模型

由图 1 不同加载龄期的试件徐变系数测试结果

可知: 相对于基准混凝土而言, 外掺粉煤灰混凝土的徐变随不同的粉煤灰掺量和加载龄期呈现不同规律; 由图 2 收缩应变测试结果可知: 外掺粉煤灰混凝土的收缩应变亦小于基准混凝土。因此, 在此引入粉煤灰影响系数  $k_f$ , 以修正外掺粉煤灰高强混凝土的收缩徐变。定义

$$k_{fc}(t, t_0) = \frac{\varphi(t, t_0)_{w\%}}{\varphi(t, t_0)_0} \quad (8)$$

$$k_{fs}(t, t_c) = \frac{\varepsilon(t, t_c)_{w\%}}{\varepsilon(t, t_c)_0} \quad (9)$$

式(8)中:  $k_{fc}(t, t_0)$  表示加载龄期为  $t_0$ 、持荷时间为  $t$  的粉煤灰徐变影响系数;  $\varphi(t, t_0)_{w\%}$  和  $\varphi(t, t_0)_0$  分别表示粉煤灰含量为  $w\%$  和基准混凝土在加载龄期为  $t_0$ 、持荷时间为  $t$  的徐变系数。式(9)中:  $k_{fs}(t, t_c)$  表示干燥龄期为  $t_c$ 、持续时间为  $t$  的粉煤灰收缩影响系数,  $\varepsilon(t, t_c)_{w\%}$  和  $\varepsilon(t, t_c)_0$  分别表示粉煤灰含量为  $w\%$  和基准混凝土在干燥龄期为  $t_c$ 、持续时间为  $t$  的收缩应变。由该定义和试验结果可得到粉煤灰影响系数  $k_f$  如表 4 所示。

表4 粉煤灰影响系数  $k_f$

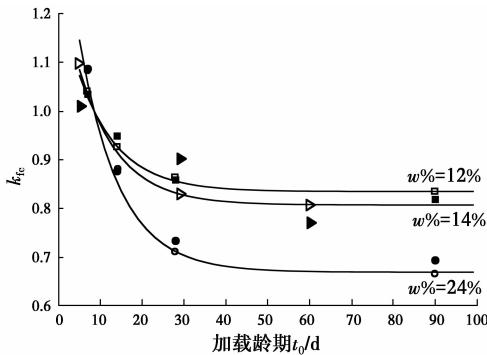
Table 4 The fly ash influence coefficient  $k_f$

| 试件粉煤灰掺量/% | 徐变试件加载龄期/d |       |       |       | 收缩试件  |
|-----------|------------|-------|-------|-------|-------|
|           | 7          | 14    | 28    | 90    |       |
| 12        | 1.034      | 0.948 | 0.858 | 0.818 | 0.879 |
| 24        | 1.086      | 0.876 | 0.733 | 0.693 | 0.769 |

由试验结果可知,对于徐变而言,  $k_{fc}$  与加载龄期  $t_0$  及粉煤灰掺量  $w\%$  相关。当龄期小于 28 d 时,不同加载龄期对外掺粉煤灰的高强混凝土徐变影响显著;但龄期大于 28 d 后,加载龄期的影响不大。根据试验结果和参考文献[11、15-17]研究成果回归分析得到

$$k_{fc} = 1 - (1.38 - 3.36 \times 0.9^{t_0}) \cdot w\% \quad (0 \leq w\% \leq 30\%) \quad (10)$$

式中:参考相关文献<sup>[2,3,11-15]</sup>确定  $w\%$  在 30% 以内。将回归结果与试验及文献[15]结果(因该参考文献数据点较多)进行比较,如图 5 所示。另外,表 5 亦给出修正模型与各参考文献的吻合程度。



注: ■实测值( $w\%=12\%$ ) □拟合值( $w\%=12\%$ ) ●实测值( $w\%=24\%$ )  
○拟合值( $w\%=24\%$ ) ▽拟合值( $w\%=14\%$ ) ▶参考文献[15]( $w\%=14\%$ )

图5  $k_{fc}$  拟合值与实测值比较

Fig. 5 The comparison of fitting with measured one  $k_{fc}$

由图 5 可知,  $k_{fc}$  拟合值与试验实测值较为吻合,仅在个别点有最大误差达到 4.6%。与文献[15]的最大误差亦仅为 -7.6%。对于徐变影响因子  $k_{fc}$ , 加载龄期超过 28 d 后,其数值变化较小,如粉煤灰掺量为 24% 的试件 90 d 加载时的影响因子与 28 d 加载影响因子仅有 4.0% 的差别。

由表 5 可知,参考文献混凝土强度等级为 C50~C60,加载龄期为 5~60 d,粉煤灰掺量为 12%~25%。 $k_{fc}$  拟合值与参考文献数据较为吻合,仅在个别点最大误差达到 16.9%,但误差均值仅为 0.4%。

因此,所提出的拟合公式可适用于不同粉煤灰掺量以及不同加载龄期的高强粉煤灰混凝土。

表5  $k_{fc}$  拟合值与参考文献对比

Table 5 The comparison between the fitted and reference value

| 参考文献 | 混凝土标号 | 加载龄期/d | 粉煤灰含量/% | 粉煤灰影响系数 |      | 误差/% |
|------|-------|--------|---------|---------|------|------|
|      |       |        |         | 实测值     | 计算值  |      |
| 11   | C50   | 14     | 15.0    | 0.77    | 0.90 | 16.9 |
|      |       | 14     | 22.5    | 0.84    | 0.86 | 2.7  |
| 12   | C50   | 28     | 19.9    | 0.80    | 0.77 | -3.8 |
| 13   | C50   | 30     | 21.9    | 0.80    | 0.74 | -7.9 |
| 14   | C60   | 28     | 25.0    | 0.78    | 0.71 | -9.0 |
|      | C60   | 5      |         | 1.02    | 1.10 | 7.5  |
| 15   |       | 28     | 14.0    | 0.91    | 0.84 | -7.6 |
|      |       | 60     |         | 0.77    | 0.81 | 4.7  |
| 误差均值 |       |        |         |         |      | 0.4  |

注:误差=(计算值-实测值)/实测值×100%。

由表 5 可知,对于收缩影响因子  $k_{fc}$ , 其数值与相同粉煤灰掺量混凝土 28 d 加载的徐变影响因子基本一致。因此,可近似取

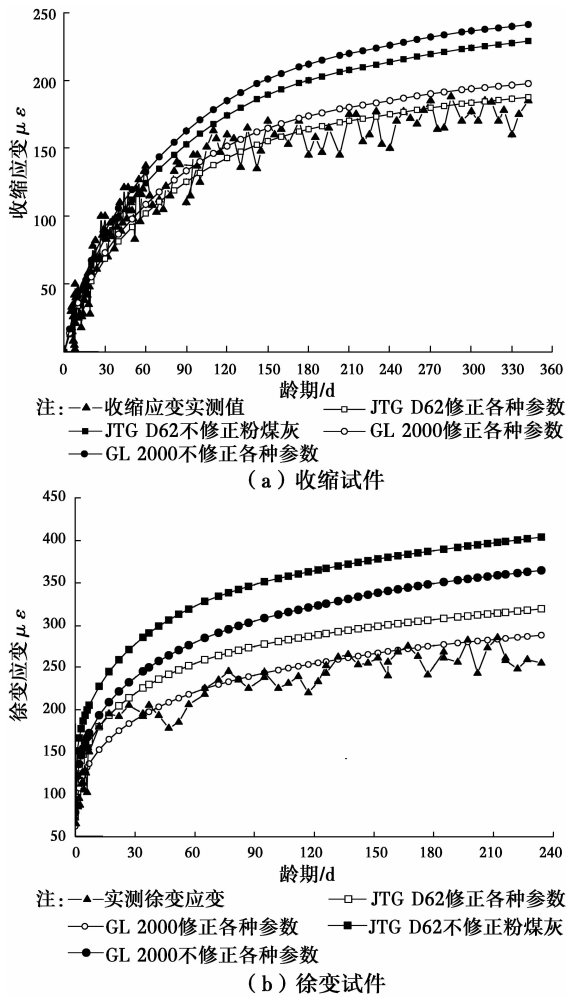
$$k_{fs} = k_{fc, t_0=28} \quad (11)$$

式中:  $k_{fc, t_0=28}$  为 28 d 加载徐变试件的粉煤灰影响因子。与参考文献[11、15、16]相比,采用该式得到的收缩影响因子与实测结果最大误差为 6.6%,均值为 -1.0%。

## 2.4 应用及分析

为验证上述粉煤灰影响因子的适用性,对参考文献[17]中的试验结果进行了验证,其结果如图 6 所示。图 6 中的收缩试件及徐变试块 1 均为 200 mm×200 mm×515 mm 棱柱体,试验在自然环境中进行,详细过程可见参考文献[17]。

由图 6(a)可知,按本文方法考虑粉煤灰影响系数后的 GL 2000 和 JTG D62 收缩、徐变模型基本能够反映试件的收缩徐变,342 d 的收缩误差分别为 1.5% 和 8.2%,234 d 的徐变应变与实测值误差为 19.7% 和 12.9%。如不考虑粉煤灰影响系数,就收缩试件而言,GL 2000 和 JTG D62 的预测误差会增大 22.0%;对于徐变试块其误差亦会增大 26.6%。因此,考虑粉煤灰影响系数,能够较好地反映外掺粉煤灰高强混凝土的收缩、徐变。

图 6  $k_r$  的适用性验证Fig. 6 The verification for the application of  $k_r$ 

### 3 结 论

1) 粉煤灰对高强混凝土的力学性能有较大影响。就实测结果而言,掺粉煤灰试件早期(龄期 $<7$  d)强度(弹性模量)低于基准试件,但随着龄期的发展,后期强度(弹性模量)高于基准试件。且粉煤灰掺量越高,对强度的影响越大。

2) 据基准试件的实测结果对 JTG D62—2004、GL 2000、ACI 209R 及 AASHTO 收缩徐变计算模式的适用性进行了验证。结果表明, JTG D62—2004 和 GL 2000 对收缩徐变的预测误差在 19.6% 以内。因此,高强混凝土的收缩徐变预测宜采用 GL 2000 和 JTG D62 收缩徐变模型进行计算。

3) 设计了不同粉煤灰掺量和不同加载龄期的高强混凝土徐变试验,研究结果表明,粉煤灰增大了早龄期加载试件的徐变系数,但减小了晚龄期加载试件的徐变系数。因此,粉煤灰对高强混凝土徐变的

影响与加载龄期相关:当龄期小于 28 d 时,不同加载龄期对外掺粉煤灰的高强混凝土徐变影响显著;但龄期大于 28 d 后,加载龄期的影响不大。

4) 由试验及参考文献的实测结果,引入了粉煤灰影响系数,以综合反映粉煤灰掺量和加载龄期对高强混凝土徐变的影响,并提出其修正模型。

5) 验证结果表明采用 GL 2000 和 JTG D62 收缩徐变模型进行计算并考虑粉煤灰影响系数,收缩和徐变应变的误差分别降低了 22.0% 和 26.6%,使预测精度在 20% 以内。因此,所提的粉煤灰影响系数能较好地适用于外掺粉煤灰高强混凝土的收缩徐变预测。

### 参考文献:

- [1] BARRETT T, DE LA VARGA I, WEISS W. Reducing cracking in concrete structures by using internal curing with high volumes of fly ash [C]// Structures Congress, 2012: 699-707.
- [2] NATH P, SARKER P. Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete [J]. Procedia Engineering, 2011, 7(144): 1149-1156.
- [3] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D 62—2012 [S]. 北京:人民交通出版社, 2012: 160-164.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG D 62—2012 [S]. Beijing: China Communications Press, 2012: 160-164. (in Chinese)
- [4] AL-MANASEER A, PRADO A. Statistical comparisons of creep and shrinkage prediction models using RILEM and NU-ITI databases [J]. ACI Materials Journal, 2014, 112(1): 125-136.
- [5] AL-ATTAR T S, AL-JALEELI A J. Prediction of ultimate shrinkage and shrinkage half-time for concrete poured in hot climates: development of the ACI 209 committee shrinkage model [J]. American Society of Civil Engineers, 2014, 25(12): 1-8.
- [6] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [S]. 3rd Edition, 2004: 278-285.
- [7] HUBLER M H, WENDNER R, BAŽANT Z P. Statistical justification of Model B4 for drying and autogenous shrinkage of concrete and comparisons to other models [J]. Materials and Structures, 2015, 48

- (4): 797-814.
- [8] PADEVET P, BITTNAR P. Influence of fly ash content in cement paste on size of creep [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 48: 520-524.
- [9] WANG Y F, MA Y S, ZHOU L. Creep of FRP-wrapped concrete columns with or without fly ash under axial load [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(2): 697-704.
- [10] SIVAKUMAR B, JALADURGAM M. Strength and deformation characteristics of fly ash mixed with randomly distributed plastic waste [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(12): 1-7.
- [11] 万纯斌,唐凯,何伟兵,等. 九江长江公路大桥索塔高性能粉煤灰混凝土的早期抗裂与长期变形性能[J]. *公路*, 2012(9): 168-172.  
WANG C B, TANG K, HE W B, et al. Early-age crack resistance and long-term deformation of high performance fly ash concrete for cable support tower in Jiujiang Yangtze River Highway Bridge [J]. *Highway*, 2012(9): 168-172. (in Chinese)
- [12] 邓宗才,徐海滨,李辉,等. 高性能混凝土徐变规律的试验研究[J]. *北京工业大学学报*, 2013, 39(6): 897-901.  
DENG Z C, XU H B, LI H, et al. Creep law of high-performance concrete [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2013, 39(6): 897-901. (in Chinese)
- [13] 罗许国,钟新谷,戴公连. 无粘结预应力高性能粉煤灰混凝土桥梁收缩与徐变变形试验研究[J]. *工程力学*, 2006, 23(7): 136-141.  
LUO X G, ZHONG X G, DAI G L. Experimental study on the deformations for shrinkage and creep of beams in non-glued prestressed high performance fly ash concrete bridges [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(7): 136-141. (in Chinese)
- [14] 李益进,周士琼,尹健,等. 超细粉煤灰高性能混凝土的力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2005, 8(1): 7-13.  
LI Y J, ZHOU S Q, YIN J, et al. Study on mechanical properties of high performance concrete containing ultra-fine fly ash [J]. *Journal of Building Materials*, 2005, 8(1): 7-13. (in Chinese)
- [15] 李北星,周明凯,王稷良. 巴东长江大桥主梁 C60 高性能混凝土的研究与应用[J]. *世界桥梁*, 2008(2): 51-54.  
LI B X, ZHOU M K, WANG J L. Research and application of C60 high performance concrete for main girders of Badong Changjiang River Highway Bridge [J]. *World Bridges*, 2008(2): 51-54. (in Chinese)
- [16] 李北星,田晓彬,关爱军,等. 鄂东长江公路大桥宽箱梁 C55 高性能混凝土试验研究[J]. *中国港湾建设*, 2009(6): 42-45.  
LI B X, TIAN X B, GUAN A J, et al. Experimental study on C55 high performance concrete for wide box girder of Edong Yangtze River Highway Bridge [J]. *China Harbour Engineering*, 2009(6): 42-45. (in Chinese)
- [17] 汪建群. 大跨预应力混凝土箱梁桥早期开裂和远期下挠控制[D]. 长沙:湖南大学,2011.  
WANG J Q. Early crack and long-term deflection control for long span prestress concrete box girder bridge [D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)