高强混凝土收缩徐变试验及模型比较分析^{*}

杨健辉¹² 汪洪菊² 王建生² 董春敏² 毕福利² (1.河南理工大学深部矿井建设重点学科开放实验室,河南焦作 454000; 2.河南理工大学士木工程学院,河南焦作 454000)

摘 要:为了得到能够满足工程要求的 C80、C100 高强混凝土收缩与徐变预测计算模型,分别对 C80、 C100 高强混凝土进行标准条件下 150 d 徐变和 28 d 的收缩试验,然后分别采取 CEB-FIP(1990) 模型、B3 模 型、GL 2000 模型计算收缩和徐变值。通过相对误差分析发现,只有 B3 模型相对较好,据此进行了模型修正。 结果表明,高强混凝土徐变系数随龄期增长而变大,但后期的变化率逐渐减小并趋于平缓(120 d 后);而收缩 变形则主要发生在早期(3 d 内) 最高可达 28 d 收缩量的 79%,14 d 后就发展较慢,但较普通高强混凝土(未 掺矿物掺和料)低些; B3 修正模型的相对误差绝对值基本在 10% 左右,因此可以满足工程要求。

关键词: 高强混凝土; 收缩; 徐变; 模型预测; 修正系数

DOI: 10.13204/j.gyjz201503025

SHRINKAGE AND CREEP TEST AND COMPARATIVE ANALYSIS OF MODELS ON HIGH STRENGTH CONCRETE

Yang Jianhui^{1 2} Wang Hongju² Wang Jiansheng² Dong Chunmin² Bi Fuli²

(1. Opening Project of Key Laboratory of Deep Mine Construction, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
 2. School of Civil Engineering of Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to obtain C80, C100 high-strength concrete shrinkage and creep prediction models that meet project requirements, the 150 d creep and 28 d shrinkage tests were carried out under standard test conditions for C80 and C100 high-strength concrete respectively, then the theoretical shrinkage and creep values were calculated by CEB-FIP (1990) model, B3 model and GL 2000 model respectively. The best model was B3 model by relative error analysis, so the model was accordingly amended. The results showed that the creep coefficients of high-strength concrete increased with age and became larger, but gradually decreased in the later and the rate of change level off (120 d later); while the shrinkage mainly occurred in the early 3 d, the amount of shrinkage was up to 79% by 28 d, but the development was slower after 14 d, and lower than normal strength concrete (with out mineral admixtures); the absolute values of relative errors were about 10% or so calculated by amended B3 model , which could meet the engineering requirements.

Keywords: high-strength concrete; shrinkage; creep; model prediction; correction factor

混凝土徐变是指在持续荷载作用下 混凝土及其 结构的变形随时间不断增加的现象,并具有时间效 应^[1-4]。一般地,徐变要比瞬时弹性变形大1倍~ 3倍 因此在结构设计中,徐变是一个不可忽视的重 要因素^[5]。收缩是指混凝土在凝结硬化过程中自 发地 不可避免地产生的体积变形^[6]。其中,收缩 包括温度收缩、自由收缩、干燥收缩和塑性收缩 4类,可见混凝土的收缩也是一个时间函数。一般 地,初期收缩变形发展较快2周内可完成全部收缩 量的25%,1个月内可完成50%,3个月后增长缓 慢2年后一般可趋于稳定。当混凝土收缩受到限 制时 将在混凝土中产生拉应力;而当拉应力大于混 凝土抗拉强度时,则产生裂缝,从而影响建筑物的安 全性及耐久性。由此可见,收缩和徐变是混凝土的 固有特性,其对混凝土的作用贯穿于其整个施工期 和服役期。譬如,正是由于收缩和徐变才成为大跨 度桥梁预应力损失、跨中长期变形及内力重分布的 一个主要原因^[7]。

第一作者:杨健辉,男,1969年出生,博士(后)教授。 电子信箱: yangjianhui@ hpu. edu. cn 收稿日期: 2014 - 08 - 15

120 Industrial Construction Vol. 45 No. 3 2015

工业建筑 2015 年第45 卷第3 期

^{*} 国家自然科学基金项目(41172317); 深部矿井建设省重点学科开 放实验室开放基金(2011KF - 01); 河南省教育厅科技攻关项目 (2010A560010)。

由于以往关于高强混凝土的相关研究主要针对 C60 级 而根据 2020 年中国科技发展中期目标纲要, C60 级已划分到普通混凝土序列,而目前在土木工程 中广泛应用的 C70 级及以上高强混凝土 却对其收缩 和徐变特性还不太清楚。因此,高强混凝土的收缩和 徐变特性已经成为目前工程应用领域亟待解决的课 题,故本文进行了一些相关试验探讨和理论分析。

1 试验概况

1.1 原材料

1) 水泥:采用焦作坚固牌 P•O52.5 水泥。根据 长期使用经验,其强度稳定性好、且与外加剂相容性 也较好。

2) 砂: 采用焦作本地河砂, 细度模数介于 2.6~ 3.0。

3) 粉煤灰:选用平顶山姚孟电厂产 [级粉煤灰。

4) 硅灰: 采用巩义产市售硅灰 ,SiO₂ 含量 92% 以上。

5) 高效减水剂:采用河南美亚公司生产的聚羧酸高效减水剂。该减水剂除了掺量小(一般为胶凝材料的 0.4%),减水率高(40%)等优点外,还具有保塑性较强,能有效控制混凝土拌和物的坍落度经时损失,且对混凝土硬化时间影响不大,并具有抗缩性,可有效提高混凝土的耐久性。

1.2 试验方案及试验配合比

徐变试验采用棱柱体试件,规格为 100 mm × 100 mm × 400 mm。试验环境相对湿度为(60 ± 5)%, 试验前放入恒温(20 ± 2) °C徐变试验室内养护,到规 定加荷龄期 28 d 时再进行加载。根据GB/T 50082— 2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标 准》徐变试验加荷应力 σ_c 为轴压强度 f_c 的 40%,试验 时按规范取值。总持荷时间为 150 d。

收缩试验采用 100 mm × 100 mm × 515 mm 的棱 柱体 试 件,每 组 为 3 块。试 验 在 相 对 湿 度 为 (60 ±5)%、温度为(20 ±2)℃的恒温恒湿条件下进行。

本试验采用交通运输部公路科学研究所研发的 ZJXB - 50T 静态徐变试验机和收缩装置,并在该研 究所完成所有试验项目。C80、C100 高强混凝土配 合比如表1 所示。

表 1 C80 与 C100 高强混凝土配合比

```
Table 1 The ratios of high strength concrete for C80 and C100
```

强度等级	胶凝材料/ (kg•m ⁻³)	硅灰/ %	粉煤灰/ %	水胶比	减水剂/ %	砂率 S _p / %
C80	580	10	15	0.24	0. 9	38
C100	600	12	20	0.22	1.2	40

高强混凝土收缩徐变试验及模型比较分析——杨健辉,等

2 试验结果

采用 GB/T 50082—2009 中的相关计算式(1)— 式(5) 对通过计算机连续采集到的各时间点混凝土 试件变形值,分别计算出徐变系数及收缩系数。 2.1 徐变公式

$$\varepsilon_{\rm ct} = \frac{\Delta L_{\rm t} - \Delta L_0}{L_{\rm b}} - \varepsilon_{\rm t}$$
(1)

式中: ε_{et} 为加载 t 时的混凝土徐变应变值 ,mm/m; ΔL_t 为加载 t_d 时的混凝土总变形值 ,mm; ΔL_0 为加 载混凝土初始变形 ,mm; L_b 为测量标距 ,mm ,本试 验中为 200 mm; ε_t 为同龄期 t 时混凝土收缩应变 值 ,mm/m。

$$C_{\rm t} = \frac{\varepsilon_{\rm ct}}{\delta} \tag{2}$$

式中: C_t 为加载 t 时的混凝土徐变度 $MPa; \delta$ 为徐变 应力 MPa。

加载 t 时后的徐变系数 φ_{1} :

$$\varphi_{t} = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{0}} \tag{3}$$

其中 $\varepsilon_0 = \frac{\Delta L_0}{L_b}$

式中: ε_0 为初始应变值,mm/m。

2.2 收缩公式

$$\varepsilon_{\rm st} = \frac{\Delta \varepsilon_{\rm st} - \Delta \varepsilon_{\rm s0}}{L_0} \tag{4}$$

式中: ε_{st} 为加荷后 t 时的混凝土收缩率; $\Delta \varepsilon_{st}$ 为 t 时 的混凝土千分表读数; $\Delta \varepsilon_{s0}$ 为混凝土初始千分表读 数; L_0 为收缩测量标距 ,mm。

2.3 试验结果及分析

C80、C100 徐变系数见表 2。

Table 2The creep coefficients calculated by formulasfrom GB/T 50082—2009 for C80 and C100

混凝土强			徐变	系数		
度等级	28 d	45 d	60 d	90 d	120 d	150 d
C80	0.17	0.38	0.45	0.56	0.66	0.72
C100	0.13	0.34	0.37	0.52	0.61	0.67
C60 ^[8]	0.22	0.45	0.64	0.80	0.92	1.06

由表2可知,C80、C100高强混凝土随着龄期增 长,徐变系数逐渐变大。其特征是早期发展较快,后 期发展缓慢,并逐渐趋于平缓。这是因为混凝土早 期强度低,变形较快;但随着时间发展,强度提高,而 且在较小荷载作用下内部结构紧密,缺陷减少,徐变 变形缓慢。此外,从表2中也可以看出,C80、C100 的徐变系数低于文献[8]中的C60。其原因在于 C80、C100高强混凝土的低水胶比决定了水泥水化 反应程度较低,水化产物量减少。其次,由于混凝土的自干燥作用,进一步导致自由水减少,从而导致强度较高的高强混凝土徐变系数较低。

C80、C100 收缩系数见表 3。

表 3 C80 与 C100 的计算收缩值

Table 3 The deformation values calculated by formulasfrom GB/T 50082—2009 for C80 and C100

混凝土强				收缩值	1 /10 ⁻⁶			
度等级	1 h	3 h	12 h	1 d	3 d	7 d	14 d	28 d
C80	8	31	59	91	126	147	158	169
C100	11	38	64	105	139	155	164	176
C80 ^[9]	25	61	112	157	184	202	263	301

而由表3可知,C80、C100高强混凝土3d内收缩 值发展较快达到28d收缩值的79%,远高于普通混 凝土;后期收缩变形依然有增长趋势,但发展相对缓 慢。究其原因,是由于高强混凝土水胶比较低,干燥 硬化阶段自由水迅速减少,致使试件变形较大。此 外本文C80收缩试验值相对于文献[9]中的C80较 小。其原因在于:采用了硅灰、粉煤灰替代了部分水 泥。正是由于这些矿物掺和料粒度细、质地致密、内 比表面积小不仅可减小水泥浆的需水量和非蒸发水 量,而且往往填充于水泥浆空隙中,从而提高了混凝 土的密实性。其次,由于微集料反应降低了硬化后的 孔隙率,从而又进一步地提高了混凝土的密实度^[10]。

3 高强混凝土常用收缩徐变模型

3.1 收缩徐变 CEB-FIP(1990) 模型

3.1.1 徐变模型^[11]

欧洲标准 CEB – FIP(1990) 建议的混凝土徐变 系数计算式适用范围为: 应力水平 $\sigma_c/f_c(t_0) < 0.4$, 且暴露在温度 5 ~ 30 ℃和相对湿度 40% ~ 100% 的 环境中。其计算式为:

$$\varphi(t t_0) = \varphi_0 \beta_c(t) \pi \qquad (5)$$

其中 $\varphi_0 = \varphi_{\rm RH} \beta(f_c) \beta(r)$

式中: t_0 为干燥时的龄期; φ_{RH} 为环境相对湿度修正系数; f_c 为混凝土轴心抗压强度 MPa; $\beta(f_c)$ 为混凝土轴 心抗压强度修正系数; 为加载龄期 d; $\beta(r)$ 为加载龄期 修正系数; $\beta_c(t)$ 为徐变的时间函数。

3.1.2 收 缩

收缩应变值计算式为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\rm cs} \left(t \ \boldsymbol{t}_{\rm s} \right) = \boldsymbol{\varepsilon}_{\rm cso} \boldsymbol{\beta}_{\rm s} \left(t - t_{\rm s} \right) \tag{6}$$

其中 $\varepsilon_{cso} = \beta_{RH} [160 + \beta_{sc} (90 - f_o)] \times 10^{-6}$ 式中: β_{sc} 的值取决于水泥品种,其中,慢硬水泥取 4,普通水泥和快硬水泥取5,快硬高强水泥取8; β_{RH} 为取决于环境的相对湿度,%。 3.2 混凝土收缩徐变 B3 模型^[12]

3.2.1 徐变模型

1995 年,Bazant 提出的 RILEM B3 模型(以下简称"B3 模型") 是根据混凝土固化理论建立的。该理论综合了弹性理论、黏弹性理论和流变理论,提出了混凝土宏观物理力学性质因水泥水化、固相物增多而随时间不断变化的新理论,并综合考虑了混凝土水泥含量、水灰比、骨料与水泥重量之比等混凝土配比情况,因而对收缩和徐变预测比较合理。

假设混凝土在恒定单轴压应力 R 作用下(作用 时刻为 t。压应力小于 0.4f。时) 在任意时刻 t 的应 变是由应力作用、收缩影响、温度作用共同导致的应 变组成,即:

 $\varepsilon(t) = J(t t_c) \sigma + \varepsilon_{sh}(t) + \alpha \Delta T(t)$ (7) 式中: $J(t t_c)$ 为柔度函数 ,为单位应力下混凝土的应 力应变; $\varepsilon_{sh}(t)$ 为收缩应变; $\alpha \Delta T(t)$ 为温度应变。

3.2.2 收缩模型

混凝土收缩的 B3 模型是根据扩散理论对参数 进行分析,并继承了前期预测模型(BP-KX)的形式, 如式(8)所示:

$$\varepsilon_{\rm sh} (t \ t_0) = -\varepsilon_{\rm sh\infty} k_{\rm h} S(t) \qquad (8)$$

其中
$$\varepsilon_{\text{sho}} = \varepsilon_{\text{so}} \frac{60/E}{(t_0 + s_{\text{f}})}$$

 $k_{\text{h}} = \begin{cases} 1 - h^3 & h \leq 0.98\\ x & 0.98 \leq h \leq 1\\ -0.2 & h = 1 \end{cases}$

式中: $\varepsilon_{sh\infty}$ 为收缩终极值; k_h 为环境修正系数; x 线性插值; E 为混凝土弹性模量; h 为环境相对湿度, \mathscr{H} ; $\varepsilon_{s\infty}$ 及 τ_h (修正收缩时间)计算参见文献[13]。

3.3 混凝土收缩徐变 GL 2000 模型^[14]

3.3.1 徐变模型

徐变系数表达式为:

$$\varphi_{28} = \varphi(t_c) \left[2 \left(\frac{(t-t_0)}{(t-t_0)^3 + 14} \right) + \left(\frac{7}{t_0} \right)^{0.5} \times \left(\frac{t-t_0}{t-t_0 + 7} \right)^{0.5} + 2.5(1-1.086h^2) \times \left(\frac{t-t_0}{t-t_0 + 0.5(v/s)^{0.5}} \right)^{0.5} \right]$$
(9)

其中

$$\varphi(t_{c}) = \begin{cases} 1 & t_{0} = t_{c} \\ \left[1 - \left(\frac{t_{0} - t_{c}}{t_{0} - t_{c} + 0.15(v/s)^{2}}\right)^{0.5}\right]^{0.5} & t_{0} > t_{c} \end{cases}$$

式中: t 为混凝土计算龄期,d; t₀为混凝土加载龄期, d; t_c为混凝土开始干燥时的龄期,或者混凝土潮湿

工业建筑 2015 年第45 卷第3 期

养护结束时的龄期 d; v/s 为混凝土构件体表比 m; h 为环境相对湿度 ,%。

3.3.2 收缩模型

混凝土收缩应变按式(10) 计算:

- o(h) o(h)

式中: K 为与水泥类型有关的系数。其中 I 类水 泥取 1.0,Ⅱ类水泥取 0.70,Ⅲ类水泥取 1.15; ƒ²⁸ cm 为混凝土龄期为 28 d 时的圆柱体抗压强度平均 值 "MPa。

4 理论计算结果及分析

4.1 模型预测

利用上述模型 CEB-FIP(1990)、B3 和 GL 2000,分别计算徐变系数如表4所示,收缩值如表 5 所示。

衣 4 个问候型拟测的保受系数及相对误

Table 4 The creep coefficients calculated by different predicting models and the relative errors for C80 and C100

模型	混凝土强 度等级	28 d	45 d	60 d	90 d	120 d	150 d
CEB-FIP(1990)	C80	0.27/-59	0.60/-58	0.73/-62	0.83/-48	0.89/-35	0.95/-32
	C100	0.24/-140	0.53/-56	0.66/-78	0.75/-44	0.84/-38	0.91/-36
B3	C80	0.21/-110	0.47/-24	0.54/-20	0.68/-21	0.79/-20	0.88/-22
	C100	0.16/-24	0.42/-24	0.44/-19	0.63/-21	0.75/-23	0.82/-22
GL 2000	C80	0.33/-94	0.69/-82	0.79/-76	0.95/-70	1.05/-59	1.08/-50
	C100	0.24/-140	0.62/-82	0.64/-73	0.85/-63	0.95/-56	1.03/-54
试验数据	C80	0.17/100	0.38/100	0.45/100	0.56/100	0.66/100	0.72/100
	C100	0.1/100	0.34/100	0.37/100	0.52/100	0.61/100	0.67/100
修正后 B3	C80	0.19/-2	0.43/-13	0.52/-16	0.63/-13	0.73/-11	0.80/-11
	C100	0.15/-50	0.38/-12	0.42/-14	0.58/-12	0.67/-10	0.74/-10

注 "/"左右两边数据分别表示徐变系数、相对误差值;相对误差 = [(试验值 - 计算值)/试验值]×100%。

表 5 不同模型预测的收缩值及相对误差

Table 5 The deformation values calculated by different predicting models and the relative errors for C80 and C100

模型	混凝土强 度等级	1 h	3 h	12 h	1 d	3 d	7 d	14 d	28 d
CEB-FIP(1990)	C80	5/38	19/39	41/31	63/31	80/37	97/34	111/30	115/32
	C100	7/36	25/34	45/30	70/33	94/32	105/32	113/31	119/32
В3	C80	10/-25	36/-16	70/-19	106 / - 16	145 / -15	175 / - 19	186/-18	203 / - 20
	C100	14/-27	46/-21	76/-19	121 / - 15	163 / - 17	180/-16	198/-21	208 / - 18
GL2000	C80	12/-50	44/-42	85/-44	141 / - 55	189 / - 50	198 / - 35	207/-31	210/-24
	C100	16/-45	57 / - 50	99/-55	162 / - 54	208 / - 50	225/-45	230/-40	238 / - 35
试验数据	C80	8/100	31/100	59/100	91/100	126/100	147/100	158/100	169/100
	C100	11/100	38/100	64/100	105/100	139/100	155/100	164/100	176/100
修正后 B3	C80	9/-13	35/-13	66 / - 12	103 / - 13	140/-11	163 / - 11	172/-9	185 / - 9
	C100	12/-9	43 / - 13	71 / - 11	118 / - 12	154 / - 11	171 / - 10	179/-9	191 / - 9

注 "/"左右两边数据分别表示收缩值、相对误差值;相对误差 = [(试验值 - 计算值)/试验值]×100%。

4.2 结果分析

由表4、表5可知 在同一试验条件及同一预测 模型下 C80、C100 混凝土徐变系数、收缩值相对于 试验数据具有相似的变化趋势,如图1、图2所示。 如在 CEB-FIP(1990) 预测模型下, C80 混凝土理论 计算徐变系数远大于试验值 ,C100 的计算徐变系数 误差较大,但仍远大于试验值。而 B3 模型的预测 值相对接近于试验值。由于 B3 模型仍属于半理论 半经验公式 因此为了提高模型对 C80 及以上高强

混凝土的预测精度,在水胶比、矿物掺和料、湿度、温 度等方面需要进行综合修正。首先,对试验数据线 性回归,然后再在 B3 基础上乘以相应修正系数。 如在 B3 徐变模型中乘以修正系数 r1 ,收缩计算式中 乘以修正系数 r₂(修正系数要根据具体施工、使用 环境、工作状态等定值,本试验r₁为0.921,r₂为 0.934) 则修正后 B3 模型的预测值精确度得到 提高。

由图 1a、图 2a 可知 ,混凝土徐变随着龄期增长







Fig. 2 The curves of C100 creep coefficients and shrinkage values calculated by different predicting models

而变大。其中,前期增长速度较快,后期增长缓慢。 CEB-FIP(1990)、B3、GL 2000 三种模型的理论计算 值均大于试验值。CEB-FIP(1990)、GL 2000 早期徐 变预测偏差较大,其中,GL 2000 模型的误差最大, 达到140%;B3 模型早期(90 d内)、后期(90 d 后)









预测值均接近于试验值,修正后 B3 模型的预测值 更接近于试验值。根据图 3a 可知,CEB-FIP (1990)、GL 2000 早期徐变系数相对误差较大,随着 龄期增加,逐渐平缓;而 B3、修正 B3 早期、后期相对 误差范围较小。由图 4a 可知,C100 徐变系数早期 相对误差较大,后期相对误差趋于稳定。

由图 1b、图 2b 可知,混凝土收缩在 3 d 内发展

工业建筑 2015 年第45 卷第3 期

较快,最高达到 28 d 收缩值的 79%,14 d 后收缩发 展较慢。模型 GL 2000 高估了混凝土收缩值,且误 差较大;而 CEB-FIP(1990)、B3 则低估了混凝土收 缩值。其中,B3 模型的预测精确度较 CEB-FIP (1990)高,而其经过修正后的模型则更接近试验 值。由图 3b、图 4b 可知,混凝土收缩值早期(3 d 内)相对误差变化幅度较大,高强混凝土早期强度 增长迅速,因不同的矿物掺合料比例、施工工艺、凝 结硬化快慢等原因而导致混凝土早期收缩值预测难 以达到较高精度,而后期(3 d 后)相对误差变化幅 度不大。

综上所述,修正后 B3 模型在原 B3 模型的基础 上对环境、温度、材料等进行综合修正后,提高了预 测精度,如相对误差的绝对值基本在10% 左右,能 够满足工程要求。

5 结 语

通过对 C80、C100 高强混凝土进行的收缩和徐 变试验,并与模型 CEB-FIP(1990)、B3 和 GL 2000 的理论预测值进行了比较,得到了以下结论:

 C80 及以上高强混凝土的收缩、徐变特征同 普通混凝土,即早期收缩、徐变发展较快,后期发展 缓慢,强度越高则徐变变形系数越小。其中,同强度 等级、不同配合比的高强混凝土(是否掺入矿物掺 合料),其收缩变形相差较大,本文 C80 较文献[9] 中 C80 的收缩值要低些;

2) 比较 CEB-FIP(1990)、B3 和 GL 2000 三种 收缩、徐变模型的预测值和试验值,可以发现:B3 模 型经过修正后,即在徐变计算公式中乘以修正系数 r₁,收缩公式中乘以修正系数 r₂(本试验 r₁ 为 0.921 r₂ 为 0.934)则修正后的模型预测值精度得 到提高,其相对误差的绝对值基本在 10% 左右,能 够满足工程要求; CEB-FIP(1990)、B3、GL 2000 三 种徐变预测模型的理论计算值均大于试验值,且 GL 2000 模型的误差为最大。CEB-FIP(1990)、 GL 2000 早期徐变系数相对误差较大,但随着龄期 增长而逐渐平缓;而 B3、修正 B3 早期、后期相对误 差范围较小。早期收缩相对误差变化幅度较大,后 期变化幅度则趋于稳定;GL 2000 模型高估了混凝 土收缩值,且误差较大;CEB-FIP(1990)和 B3 模型 则低估了收缩值。其中,B3 模型的精度较 CEB-FIP (1990)高,而其修正后的 B3 模型则可保证工程的 可靠性及安全性。

参考文献

- [1] 颜东煌,田仲初,李学文,等. 混凝土桥梁收缩徐变计算的有 限元方法与应用[J]. 中国公路学报,2004,17(2):55-58.
- [2] 王骅, 薛伟辰. 考虑收缩徐变的钢 混凝土组合梁变形计算 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004 24(1): 56-60.
- [3] 陈太聪,苏成,韩大建.桥梁节段施工过程中混凝土收缩徐 变效应仿真计算[J].中国公路学报,2003,16(4):55-58.
- [4] 陈志华,彭少民,蒋沧如,等. 荆州长江公路大桥主梁高性能 混凝土徐变试验[J]. 中国公路学报,2006,19(4):98-102.
- [5] 蒲心诚. 超高强高性能混凝土[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004.
- [6] 欧阳华林,白云山.高性能混凝土收缩徐变性能的试验研究[J].桥梁建设 2006(2):4-6.
- [7] 孟凡利,何智海,钱春香,等.等强条件下混凝土收缩徐变试验研究与现场监测[J]. 混凝土与水泥制品,2011,177(2): 13-17.
- [8] 谢春辉.大跨度无碴轨道桥梁的混凝土徐变试验研究[J].中 国西部科技 2009 168(7): 26-27.
- [9] 徐真剑 祝昌憞 杨杨 ,等. 高强混凝土的早期力学性能及收缩 特性[J]. 混凝土 ,2005 ,194(12): 45-48.
- [10] 安小平. 粉煤灰徐变性能研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [11] 赵齐林 陈立 濯可为 等.复杂状态下桥用高强混凝土收缩徐 变性能试验[J].解放军理工大学学报:自然科学报 2011,12 (5):459-464.
- [12] 丁文胜, 吕志涛, 孟少平, 等. 混凝土收缩徐变预测模型的分析 比较[J]. 桥梁建设 2004(6): 26-27.
- [13] Bazant Z P , Bwe Ja S. Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures-Model B3 [J]. Materials and Structures ,1995 (28): 357 - 365.
- [14] 谢楠 杨成永 欧阳杰 ,等. 喷射混凝土早龄期徐变试验研究及 预测[J]. 工程力学 2013 30(3): 365 370.

(上接第61页)

参考文献

- [1] Jacobs J. 美国大城市的死与生[M]. 金衡山,译. 南京: 译林出版社 2006.
- [2] 冯·格康.建筑和可持续性[J].世界建筑,2000(4):23-24.
- [3] 孙巍巍. 高科技下当代西方建筑美学的新拓展[D]. 哈尔滨:

哈尔滨工业大学 2006: 21-30.

- [4] Bell D. 后工业社会的来临[M]. 北京: 新华出版社,1997.
- [5] 克里斯汀·史蒂西. 改扩建[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2009.