

钢筋混凝土构件组合体徐变系数的计算

黄卫兰¹, 陈灿明¹, 陈 程², 唐崇钊¹, 陆道彪¹

(1. 南京水利科学研究院 水利部水科学与水工程重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省苏科建设技术发展有限公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 钢筋混凝土构件的徐变可以用来估计结构物如大型桥梁的长期变形, 不仅与混凝土的徐变特征有关, 其取值还涉及构件配筋及受力状况. 以钢筋混凝土构件为对象, 推导了钢筋混凝土构件在轴向受压和压弯状态下徐变系数的计算方法, 分析了徐变可复、不可复和部分可复3种徐变方程计算结果的差异, 采用混凝土标准试件和钢筋混凝土配筋压柱进行了徐变试验, 并分析比较了计算结果. 结果表明, 文中介绍的3种徐变方程的计算结果与试验结果接近, 可以方便应用.

关 键 词: 钢筋混凝土; 组合体; 徐变系数; 计算方法

中图分类号: TV335

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)02-0064-07

承受长期荷载的钢筋混凝土构件, 荷载不变时钢筋应力增加而混凝土应力减小, 这种现象称混凝土徐变引起的构件应力重分布. 由于钢筋对混凝土徐变的影响, 钢筋混凝土构件的徐变变形将小于无配筋构件的变形. 在混凝土变形特征及工作环境给定时, 这种含筋构件的应力重分布及其变形特征主要与受力钢筋用量、布置及构件的受力状态有关^[1-2].

我国混凝土徐变研究最初有赖于大坝观测试验、大体积混凝土结构温度应力计算和钢筋混凝土构件预应力衰减估计等应力问题研究的开展, 松弛系数成了徐变试验结果, 应用于原观分析及温度应力的计算. 变形控制是现代桥梁建设和大跨径钢筋混凝土桥梁营运管理的重要技术. 轴压和弯曲是桥梁构件(塔柱、梁)的主要荷载变形, 有关规范和以往研究^[1,3]给出和讨论了钢筋用量对构件轴压变形的影响, 没有涉及到布筋状况和弯曲变形下的取值问题, 本研究认为由轴压修正的取值不能运用到弯曲变形的计算.

钢筋混凝土构件是非均质多连体, 在计算结构或构件体系的长期变形时将其简化为单体, 需要给出含筋混凝土的组合徐变系数. 在确定构件的组合徐变特征如徐变系数、徐变度及弹性模量时, 可以采用试验法、经验取值法、修正公式法等途径. 试验法可以通过典型布筋方式、构件尺寸形状和荷载状态等条件的构件变形和应力测试, 作为验证用. 经验取值是一种笼统的取值法, 运用时还有赖于工程师的经验与判断. 根据构件配筋状况及受力状况的不同, 采用修正公式确定配筋构件的组合徐变系数对于计算钢筋混凝土结构的长期变形具有重要的实用价值.

就计算分析而言, 同一问题的计算结果及演算推导的繁简, 会因采用的变荷载下混凝土徐变算法, 即徐变方程式的不同而有差异. 其中最简单的有效模量法和老化理论法(或流动率法); 考虑应力减少时徐变部分可复的计算方法和具体形式较多^[4], 弹性徐变理论(及类似的公式)在我国水利界是影响广、应用多的一种徐变算法, 该法可以考虑早龄期混凝土徐变部分不可复(晚期完全可复), 然而对本问题的推演计算却颇为繁难^[5], 要应用数值解析法. 本文以钢筋混凝土压柱和梁为例, 探讨计算方法和构件承载形式对计算结果的影响, 同时采用配筋压柱试件和纯混凝土压柱试件作徐变测试, 将试验结果与计算结果作对比分析, 提出较为简单而又接近实际的计算方法.

收稿日期: 2012-07-06

作者简介: 黄卫兰(1961-), 女, 安徽巢湖人, 高级工程师, 主要从事水工结构的试验、检测与安全评估.

E-mail: wlhuang@nhri.cn

1 钢筋混凝土压柱的组合徐变系数

1.1 基本方程

以 $E_g, \varepsilon_g, \sigma_g$ 表示钢筋(纵向)的弹性模量、应变及应力,以 E, ε, σ 表示混凝土的弹性模量、应变和应力. 其中除 E_g 外,其他各变量均可视为时间的函数. P, ω_g, ω, μ 分别为钢筋混凝土压柱上的轴向荷载、钢筋和混凝土截面积及压柱配筋率. 在线应力应变假设下,根据钢筋和混凝土的应变协调条件,有

$$\varepsilon_g = \varepsilon \quad (1)$$

有效模量法计算混凝土的应力应变,假定混凝土应力减小时徐变完全可复,将变形协调方程(1)变换成如下形式:

$$\frac{\sigma_g}{E_g} = \frac{\sigma}{E}(1 + \varphi) \quad (2)$$

式中: φ 为混凝土的徐变系数.

徐变曲线平行假说(老化理论)或流动假定,假设混凝土应力减少时徐变变形完全不可复,协调方程(1)可写成如下形式:

$$\frac{\sigma_g}{E_g} = \frac{\sigma}{E} + \int_{\tau_1}^t \sigma \frac{d}{d\tau} \left[C(\tau, \tau_1) - \frac{1}{E} \right] d\tau \quad (3)$$

式中: $C(\tau, \tau_1)$ 为混凝土徐变度,弹性模量 E 为时间变量 $E(t)$ 或 $E(\tau)$.

在计算钢筋混凝土构件变形及截面应力的重分布时,当混凝土应力减小,有效模量法假设徐变完全可复,老化理论假设徐变完全不可复,因此2种计算方法所得结果相差最大. 本文主要讨论方程(2)和(3)两种形式的协调方程;作为比较,还推演讨论了考虑徐变部分可复的继效流动率法的近似结果.

钢筋混凝土组合柱的常荷载 P 由钢筋与混凝土共同承担,有荷载平衡方程如下

$$\sigma + \mu \sigma_g = P/\omega \quad (4)$$

式中: $\mu = \omega_g/\omega$ 为截面配筋率. 应用平衡方程(4)与变形协调方程(2)或(3)可以解出应力 σ_g 或 σ . 由于构件的变形与钢筋应力成比例,在解出应力 σ_g 及其初始值 $\sigma_g|_{t=\tau_1}$ 后,即可得到构件组合体的徐变系数 φ_m :

$$\varphi_m = \frac{\sigma_g}{\sigma_g|_{t=\tau_1}} - 1 \quad (5)$$

1.2 按有效模量法求解方程

引入弹性模量比,并记以 $n = E_g/E(\tau_1)$,将协调方程(2)写成如下形式

$$\sigma = \frac{\sigma_g}{n(1 + \varphi)} \quad (6)$$

再将式(6)代入方程(4),经移项整理,即可得到钢筋应力 σ_g 计算公式如下

$$\sigma_g = n\sigma_0 \frac{(1 + \varphi)(1 + \mu n)}{1 + \mu n(1 + \varphi)} \quad (7)$$

式中: σ_0 为混凝土应力初始值; $\sigma_0 = P/(\omega(1 + \mu n))$.

注意到 $\varphi|_{t=\tau_1} = 0$,将式(7)代入方程(5),可得钢筋混凝土压柱综合徐变系数

$$\varphi_m = \frac{\varphi}{1 + \mu n(1 + \varphi)} \quad (8)$$

由于截面的初始应变为 $\sigma_g|_{t=\tau_1}/E_g$,平均应力为 $P/(\omega(1 + \mu))$,故而钢筋混凝土压柱的组合弹模 E_m 为

$$E_m = \frac{E(1 + \mu n)}{1 + \mu} \quad (9)$$

因 $\varphi \geq 0, \mu n > 0$,故由式(8)可得 $\varphi_m < \varphi$;又因 $n > 1$,由式(9)得 $E_m > E$.

1.3 按老化理论法求解方程

将方程(3)两边乘以 E_g , 再求导可得

$$\sigma'_g = \sigma' E_g / E + \sigma E_g C'(t, \tau_1) \quad (10)$$

改写平衡方程(4)为 $\sigma = P/\omega - \mu\sigma_g$, 然后用 σ 及其一次微分代入式(10), 可得到求解 σ_g 的一次变系数非齐次微分方程

$$\sigma'_g + \frac{\mu E_g C'(t, \tau_1)}{1 + \mu n(t)} \sigma_g = \frac{E_g C'(t, \tau_1)}{1 + \mu n(t)} \frac{P}{\omega} \quad (11)$$

式中: $n(t) = E_g/E(t)$. 此方程的初始条件仍为 $\sigma_g|_{t=\tau_1} = n\sigma_0$, 其中 $n = E_g/E(\tau_1)$, $\sigma_0 = \frac{P}{\omega(1 + \mu n)}$.

$$\text{方程(11)的解为: } \sigma_g = n\sigma_0 + \frac{\sigma_0}{\mu} \left\{ 1 - \exp\left(-\int_{\tau_1}^t \frac{\mu E_g C'(\tau, \tau_1)}{1 + \mu n(\tau)} d\tau\right) \right\} \quad (12)$$

式(12)等号右边第1项 $n\sigma_0$ 为钢筋的初始弹性应力, 第2项除以 $n\sigma_0$ 即为压柱的组体徐变系数 φ_m :

$$\varphi_m = \frac{1}{\mu n} \{ 1 - \exp(-\eta(t, \tau_1)) \} \quad (13)$$

式中: $\eta(t, \tau_1) = \int_{\tau_1}^t \frac{\mu E_g C'(\tau, \tau_1)}{1 + \mu n(\tau)} d\tau$.

由于 $\mu n(t)$ 值相对较小, 桥用高性能混凝土早期强度和弹性模量都较高, 3 d 后的弹性模量增长趋于缓慢^[6-9]. 当 $E(360)/E(3)$ 的比值在 1.3 ~ 1.4 范围以内时, 可以采用下式计算 $\eta(t, \tau_1)$:

$$\eta(t, \tau_1) = \frac{\mu E_g C(t, \tau_1)}{1 + \mu n} = \frac{\mu n \varphi}{1 + \mu n} \quad (14)$$

$$\text{此时压柱的徐变系数 } \varphi_m \text{ 可写成如下形式: } \varphi_m = \frac{1}{\mu n} \left(1 - \exp\left(-\frac{\mu n \varphi}{1 + \mu n}\right) \right) \quad (15)$$

1.4 徐变部分可复压柱综合徐变系数近似计算式

混凝土荷载应力减小或经历一段加载时间后卸载, 徐变部分可复已为试验普遍证实. 继效流动法^[10]将徐变度 C 分为可复变形 C_y (又称弹性后效) 和不可复徐变 C_n 两部分, 协调方程形式如下

$$\frac{\sigma_g}{E_g} = \frac{\sigma}{E} + \int_{\tau_1}^t \sigma \frac{\partial}{\partial \tau} \left[-C_y(t - \tau) + C_n(\tau, \tau_1) - \frac{1}{E} \right] d\tau \quad (16)$$

式中: 可复变形 C_y 和徐变度可直接由试验给出, 两者之差即为不可复徐变 C_n . 可复变形 C_y 与加载时的弹性瞬时变形相比一般在 0.12 ~ 0.18 范围内, 卸载后 48 h 可以达到徐变稳定值的 50% ~ 80%^[8,11]. 为简化推算计算, 将这一变形归并入弹性变形而采用迟后模量 $\bar{E}_y$ 代替弹性模量 E , 钢筋混凝土压柱的变形协调方程可以写成如下形式

$$\frac{\sigma_g}{E_g} = \frac{\sigma}{\bar{E}_y} + \int_{\tau_1}^t \sigma \frac{d}{d\tau} \left[C_n(\tau, \tau_1) - \frac{1}{\bar{E}_y} \right] d\tau \quad (17)$$

式中: 迟后模量 $\bar{E}_y = E/(1 + EC_y) = E(1 + \varphi_y)$, φ_y 为可复徐变系数, 其值为 EC_y .

上述方程(17)与老化理论法的协调方程(3)形式相同, 可以与平衡方程(4)一起联合求解, 结果如下

$$\sigma_g = \frac{\bar{n}_y P}{(1 + \mu \bar{n}_y) \omega} + \frac{P}{\mu(1 + \mu \bar{n}_y) \omega} [1 - \exp(-\eta)] \quad (18)$$

$$\text{取弹模 } E \text{ 为常量 } E(\tau_1), \eta \text{ 用下式计算: } \eta = \frac{\mu E_g C_n(t, \tau_1)}{1 + \mu \bar{n}_y} = \frac{\mu n \varphi_n}{1 + \mu \bar{n}_y} \quad (19)$$

式中: φ_n 为不可复徐变系数, 其值为 $E(\tau_1) C_n$.

将式(18)减去初始值 $n\sigma_0$, 得到依时间增加的应力值 $\Delta\sigma_g$ 如下

$$\Delta\sigma_g = n\sigma_0 \left\{ \frac{\varphi_y}{1 + \mu \bar{n}_y} + \frac{1 + \mu n}{\mu n(1 + \mu \bar{n}_y)} (1 - \exp(-\eta)) \right\} \quad (20)$$

两边除以应力初值 $n\sigma_0$,再以可复变形系数 $\varphi_y(t)$ 取代稳定值 φ_y ,可得压柱综合徐变系数 φ_m 如下

$$\varphi_m = \frac{\varphi_y(t)}{1 + \mu\bar{n}_y} + \frac{1 + \mu n}{\mu n(1 + \mu\bar{n}_y)}(1 - \exp(-\eta)) \quad (21)$$

式中: η 为 $\mu n\varphi_n(t, \tau_1)/(1 + \mu\bar{n}_y)$; n 为 $E_g/E(\tau_1)$; $\bar{n}_y$ 为 $E_g(1 + \varphi_y)/E(\tau_1)$; $\varphi_y(t)$ 为可复徐变系数, t 大于 5 d 后可取其稳定值 φ_y 计算。

2 算例与试验验证

制作 2 组试件,混凝土强度等级 C60,一组配置纵筋 u 为 2%,另一组未配筋,试件为直径 20 cm,高 60 cm 的圆柱体,内置标距 25 cm 的差动电阻应变计。配合比说明见表 1,具体材料为:江苏巨龙水泥集团有限公司生产的巨龙牌 P. II 52.5R 水泥;南京热电厂 I 级粉煤灰;宿迁洛马湖产的细骨料河砂;徐州睢宁产石灰岩碎石;UC-II 型高效减水剂;II 级钢。

表 1 每立方米混凝土材料用量

Tab. 1 Material dosages per cubic meter of concrete

组别	水 泥/ (kg · m ⁻³)	粉煤灰/ (kg · m ⁻³)	纤 维/ (kg · m ⁻³)	配筋率/ %	砂/ (kg · m ⁻³)	石/ (kg · m ⁻³)	用水量/ (kg · m ⁻³)	外加剂/ (kg · m ⁻³)	坍落度/ cm
基准组	490	54	0	0	660	1032	172	6.80	22.0
内置钢筋	490	54	0	2.0	660	1032	172	6.80	22.0

龄期 7 d 加载,测得的弹性模量及徐变系数,以及按上文计算的钢筋混凝土柱的组合弹模及徐变系数见表 2^[8]。计算时 E 及 φ 均用未配筋一组试件的相应值。

表 2 试验测值及计算值比较

Tab. 2 Comparison between measured and calculated values

名 称		E 或 E_m /10 ⁴ MPa	徐变系数			
			持载 30 d	持载 90 d	持载 180 d	持载 360 d
测试结果	纯混凝土	4.05	0.617	0.785	0.823	0.855
	配筋 2%	4.39	0.534	0.668	0.711	0.743
计算结果 ($\mu=0.02$)	按有效模量法解	4.36	0.532	0.667	0.697	0.723
	按老化理论法解	4.36	0.546	0.690	0.723	0.750
	按近似式(21)	4.36	0.540	0.681	0.713	0.740

从表 2 可见,有效模量法与老化理论法的推算结果相差不大,继效流动法和老化理论法的结果与试验值更为接近。由于钢筋的截面刚度($E_g\omega_g$)与截面混凝土刚度之比 μn 相对较小,钢筋对徐变的影响也小,这是 3 种徐变计算法结果相差较小且都与实际测值接近的主要原因;普遍的试验结果认为,徐变变形中可复部分所占比例较小,以不可复部分为主,这是表 2 中老化理论法较有效模量法结果更接近试验值的原因;由于继效流动法考虑了徐变的部分可复性,可复变形取用测试结果,其计算结果介于前两者之间并与实测值更接近,这是可以理解的。从计算结果的真实性及工作繁简看,3 种徐变计算方法都可以接受。

3 钢筋混凝土受弯构件的组合徐变系数

钢筋混凝土矩形梁高 h ,宽 b ,上下 2 层布置非预应力钢筋,其中心距为 h_0 ,上、下层钢筋面积 ω_g ;设混凝土拉压应力强度比均在线性变形范围内,且拉、压变形特征相同;徐变计算采用老化理论模型,截面变形采用平面假设。由以上假设,有变形协调方程如下

$$\frac{2y}{h_0} \frac{\sigma_g}{E_g} = \frac{\sigma}{E} + \int_{\tau_1}^t \sigma \frac{d}{d\tau} \left[C(\tau, \tau_1) - \frac{1}{E} \right] d\tau \quad (22)$$

式中: y 为截面应力计算点距中和轴的距离; σ 为混凝土应力, 为时间 t 和坐标 y 的变量.

上式等号两边乘以 $h_0 E_g/2$, 再对时间 t 求导, 得到微分方程

$$y\sigma'_g = \frac{1}{2}h_0 n(t)\sigma' + \frac{1}{2}h_0 n\varphi'\sigma \quad (23)$$

式中: φ 为混凝土的徐变系数 $\varphi = C(t, \tau_1) \cdot E(\tau_1)$.

方程两边乘以 y , 并积分, 因 σ'_g 与坐标 y 无关, 故有

$$J\sigma'_g = \frac{1}{2}h_0 n(t) \int_{-h/2}^{h/2} y\sigma'_g d\omega + \frac{1}{2}h_0 n\varphi' \int_{-h/2}^{h/2} y\sigma d\omega \quad (24)$$

截面矩平衡方程为

$$M = h_0 \omega_g \sigma_g + \int_{-h/2}^{h/2} y\sigma d\omega \quad (25)$$

然后用方程(25)及其时间微分式将方程(24)中含 σ 及 σ' 的积分项消去, 经整理移项得到微分方程和初始条件如下

$$\sigma'_g + \frac{3\xi^2 \mu n \varphi'}{1 + 3\xi^2 \mu n(t)} \sigma_g = \frac{3\xi^2 \mu n \varphi'}{1 + 3\xi^2 \mu n(t)} \frac{1 + 3\xi^2 \mu n}{3\xi \mu} \sigma_1 \quad (26)$$

$$\sigma_g|_{t=\tau_1} = \xi n \sigma_1 \quad (27)$$

式中: σ_1 为截面边缘的混凝土应力(极值), $\sigma_1 = \frac{h/2}{J + \frac{1}{2}h_0^2 \omega_g n} M$; $\mu = \frac{2\omega_g}{bh}$; $\xi = h_0/h$. 满足方程(26)及初始值条件(27)的解为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_g &= \xi n \sigma_1 + \frac{\sigma_1}{3\xi \mu} (1 - \exp(-\eta)) \\ \eta &= \int_{\tau_1}^t \frac{3\xi^2 \mu n \varphi' d\tau}{1 + 3\xi^2 \mu n(\tau)} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

$$\text{由式(28)可得钢筋混凝土组合体弯曲徐变系数} \quad \varphi_m = \frac{1}{3\xi^2 \mu n} (1 - \exp(-\eta)) \quad (29)$$

$$\text{当式(28)第二式积分号内的分母项为常量或近于常量时} \quad \eta = \frac{3\xi^2 \mu n \varphi}{1 + 3\xi^2 \mu n(x)} \quad (30)$$

式中: $n(x)$ 可用 n 或采用 28 d 的弹性模量计算, 即用 $E_g/E(28)$. 计算结果见表 3.

表 3 混凝土弹性模量变化与 $1/[1+3\xi^2 \mu n(t)]$ 变化

Tab. 3 Changes in concrete elasticity modulus and $1/[1+3\xi^2 \mu n(t)]$

混凝土名称	计算式	不同龄期混凝土的弹性模量/MPa				
		3 d	7 d	28 d	90 d	360 d
C55 桥用混凝土	$E(t)$	3.29	3.46	3.78	4.18	4.30
C50 桥用混凝土		3.31	3.38	3.52	3.75	3.90
C25 大坝用混凝土		2.10	2.71	3.22	3.62	4.08
C55 桥用混凝土	$E(t)/E(\tau_1)$	/	1.05	1.15	1.27	1.31
C50 桥用混凝土		/	1.02	1.06	1.13	1.18
C25 大坝用混凝土		/	1.29	1.53	1.72	1.94
C55 桥用混凝土	$\frac{1}{1+3\xi^2 \mu n(t)}$	0.811	0.818	0.831	0.845	0.848
C50 桥用混凝土		0.812	0.815	0.821	0.830	0.835
C25 大坝用混凝土		0.732	0.779	0.807	0.825	0.842
C55 桥用混凝土	$\frac{1+3\xi \mu n}{1+3\xi \mu n(t)}$	/	1.01	1.03	1.04	1.05
C50 桥用混凝土		/	1.00	1.01	1.02	1.03
C25 大坝用混凝土		/	1.06	1.10	1.13	1.15

注: $E_g = 2.0 \times 10^5$ MPa, $\mu = 0.02$, $\xi = 0.8$.

从表3可见,混凝土360 d或最终的弹性模量与初始加载时的相比在20%以内增加时,可不考虑其变化并采用 $n(x)=n$;当其在20%~40%增加时,可用28 d弹性模量计算, $n(x)=E_g/E(28)$.

设由前面算例中的钢筋混凝土柱受偏心荷载作用产生压弯变形,现计算弯曲徐变系数 φ_m 与压缩徐变系数进行比较,结果见表4.计算时,取 $n=n(x)=E_g/E(\tau_1)$, $\xi=0.9$, $\mu=0.02$.

表4 混凝土与构件压、弯徐变系数比较

Tab.4 Comparison between concrete and members compression and bending creep coefficients

参数	不同持载时间的徐变系数			
	30 d	90 d	180 d	360 d
纯混凝土 φ (按试验值)	0.617	0.785	0.823	0.855
压缩 φ_m (按式(15))	0.546	0.690	0.723	0.750
弯曲 φ_m (按式(29))	0.469	0.587	0.614	0.635

从表4可见,虽然截面上配筋率相同,钢筋混凝土压柱截面混凝土应力均匀分布,而受弯构件混凝土应力非均匀分布且钢筋集中在应力较大的区域(上、下层),弯曲状态下钢筋对徐变的阻滞作用要大于轴向压缩状态,混凝土弹性模量变化的影响也比前者要大;就本算例而言,取用轴压徐变系数代表弯曲徐变系数,偏差值达到18%以上.

4 结 语

计算钢筋混凝土构件组合体的徐变系数及弹性模量时,徐变方程采用有效模量法方程和老化理论法方程较为简单,计算结果也相差不大.

根据压柱3种徐变计算法结果与试验结果的对比,说明有效模量法方程推演计算最为简单;采用老化理论法方程时,计算结果比前者接近实际,需要求解一次微分方程但能给出封闭解;继效流动法的计算值则介于以上两者之间,最接近试验值.受弯构件截面应力为非均匀分布,钢筋主要集中在截面应力较高的部分,钢筋对混凝土徐变的阻碍效应增强.当钢筋混凝土构件以压弯荷载为主时,应同时给出这2种荷载状态的徐变特征.

参 考 文 献:

- [1] 苏清洪. 加筋混凝土收缩徐变的试验研究[J]. 桥梁建设, 1994(4): 11-18. (SU Qing-hong. Test study on the shrinkage and creep of reinforced concrete[J]. Bridge Construction, 1994(4): 11-18. (in Chinese))
- [2] 徐锋, 庞建栋. 混凝土的弯曲变形和损伤研究[J]. 公路工程, 2007(4): 107-109. (XU Feng, PANG Jian-dong. Research on deformation and damage of bending concrete[J]. Highway Engineering, 2007(4): 107-109. (in Chinese))
- [3] 周履, 陈永春. 收缩徐变[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994: 328-350. (ZHOU Lv, CHEN Yong-chun. Concrete shrinkage and creep[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994: 328-350. (in Chinese))
- [4] 惠荣炎, 黄国兴, 易冰若. 混凝土的徐变[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988: 64-66. (HUI Rong-yan, HUANG Guo-xing, YI Bing-ruo. Concrete creep[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1988: 64-66. (in Chinese))
- [5] 阿鲁久涅扬 H X. 蠕变理论中的若干问题[M]. 北京: 科学出版社, 1961. (ARUTJUNJAN H X. Some problems in theory of creep[M]. Beijing: Science Publishing House, 1961. (in Chinese))
- [6] 陈灿明, 黄卫兰, 唐崇钊, 等. 混凝土强度与弹模依时增长相关性公式的试验研究[J]. 公路工程, 2010(1): 51-55. (CHEN Can-ming, HUANG Wei-lan, TANG Chong-zhao, et al. Experimental study on the formula of the relevance between concrete strength and elasticity modulus[J]. Highway Engineering, 2010(1): 51-55. (in Chinese))
- [7] 陈灿明, 黄卫兰, 王宏, 等. 大跨径桥梁高强混凝土收缩徐变特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2010(4): 62-67. (CHEN Can-ming, HUANG Wei-lan, WANG Hong, et al. A study of high-strength concrete creep and shrinkage for long-span bridges[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(4): 62-67. (in Chinese))

- [8] 陆采荣, 王永安, 姜竹生, 等. 大跨度超宽幅桥梁高性能混凝土研究与应用报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006. (LU Cai-rong, WANG Yong-an, JIANG Zhu-sheng, et al. Research and application report of high-performance concrete for long-span and ultra-wide bridge[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese))
- [9] 陈灿明, 黄卫兰, 陆采荣, 等. 桥用高性能混凝土的徐变与应用[J]. 水利水运工程学报, 2007(2): 1-9. (CHEN Can-ming, HUANG Wei-lan, LU Cai-rong, et al. Creep of high-performance concrete for bridges and its application[J]. Hydro-Science and Engineering, 2007(2): 1-9. (in Chinese))
- [10] 唐崇钊. 混凝土的徐变力学与试验技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982: 203-204. (TANG Chong-zhao. Concrete creep mechanics and test technology[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1982: 203-204. (in Chinese))
- [11] 陈灿明, 黄卫兰, 唐崇钊, 等. 大跨径预应力混凝土桥梁高强度混凝土材料特性研究总报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010. (CHEN Can-ming, HUANG Wei-lan, TANG Chong-zhao, et al. General research report of high-strength concrete material characteristics for long-span pre-stressed concrete beam bridges[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010. (in Chinese))

Calculation method for creep coefficient of reinforced concrete composite members

HUANG Wei-lan¹, CHEN Can-ming¹, CHEN Cheng², TANG Chong-zhao¹, LU Dao-biao¹

(1. Key Laboratory of Water Science and Engineering, Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Jiangsu Suke Construction Technology Development Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: The creep of reinforced concrete member can be used to estimate the long-term deformation of structures such as large bridges. It is not only relevant to the creep characteristics of concrete, but its values involve the members' reinforcement and stress state. Reinforced concrete members are the object of study in this paper. The calculation method for the creep coefficient of reinforced concrete members under axial compression or compression-bending is derived. The difference of results, which are calculated by means of the creep equations under recoverable, unrecoverable and partly-recoverable creep deformation, is analyzed. The concrete standard specimens and reinforced concrete compression columns and rectangular beams are used for the creep tests, and the test results are compared with the calculation results. The analyses show that the calculation results by three creep equations presented in this paper are similar to the test results and can be applied expediently.

Key words: reinforced concrete; composite; creep coefficient; calculation method