

混凝土收缩徐变效应预测模型及影响因素

孟 江^{1,2}, 赵宝俊^{1,3}, 刘建梅²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省公路勘察设计院,
陕西 西安 710071; 3. 陕西省交通建设集团公司, 陕西 西安 710075)

摘 要:为了提前预见混凝土的收缩和徐变对结构物使用性能的影响,分别采用 CEB-FIP 模型、ACI 模型、BP 模型和 GL—2000 模型等方法对混凝土的收缩、徐变进行计算分析,并对相同条件下各种计算方法得出的结果进行对比。结果表明:混凝土收缩应变对构件理论厚度比较敏感,而徐变系数对构件理论厚度敏感度较小,混凝土徐变效应随着加荷龄期的增加而减小;当加荷龄期由 3 d 增加到 28 d 时,混凝土的徐变效应终值减小 80% 左右;收缩徐变效应对环境平均相对湿度比较敏感,当环境平均相对湿度从 50% 升至 80% 时,徐变系数减小近 30%,而收缩应变减小达 50%,比较而言,环境相对湿度变化对混凝土收缩效应较徐变效应更大。

关键词:桥梁工程;混凝土;收缩徐变;预测模型;影响因素

中图分类号:U414.1

文献标志码:A

Prediction model and influencing factors for concrete shrinkage and creep effects

MENG Jiang^{1,2}, ZHAO Bao-jun^{1,3}, LIU Jian-mei²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shaanxi
Provincial Highway Survey and Design Institute, Xi'an 710071, Shaanxi, China; 3. Shaanxi
Provincial Communication Construction Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: In order to forecast the influence of concrete shrinkage and creep on the performance of structures, the CEB-FIP model, ACI model, BP model and GL—2000 model were adopted respectively to calculate and analyze the shrinkage and creep of concrete and the results acquired with various calculating methods were compared under identical conditions. The results show that the theoretical thickness of structures is very sensitive to shrinkage and creep of concrete, but the creep coefficient is not sensitive to theoretical thickness of structures; the creep effect of concrete decreases with the increase of loading period; when loading period increases from 3 days to 28 days, the final value of concrete creep effect is reduced by about 80%; shrinkage and creep effect are very sensitive to average relative humidity of environment, when the average relative humidity of environment is enhanced from 50% to 80%, the creep effect is reduced by approximately 30%, while the shrinkage effect is reduced by as much as 50%; comparatively, the change of environmental relative humidity imposes greater influence on shrinkage effect than on creep effect of concrete. 1 tab, 4 figs, 23 refs.

Key words: bridge engineering; concrete; shrinkage and creep; prediction model; influencing factor

0 引言

一直以来,国内外众多专家和学者对混凝土的收缩徐变开展了长期的研究工作,并取得了一批重要的成果。但是预计和控制混凝土的收缩和徐变及其对结构物性能的影响仍然是十分复杂而又难以获得精确答案的问题,国内外不乏因为混凝土的收缩和徐变影响结构使用寿命、甚至造成工程事故的例子^[1]。

CEB 调查了大量混凝土悬臂梁桥的变形资料,部分桥梁在建造完成 8~10 年后挠度仍有明显增长趋势,这些桥梁的后期挠度增长均由混凝土的收缩徐变效应引起,所以研究混凝土收缩徐变对结构的影响非常重要。在一般情况下,缺乏试验资料时,混凝土收缩应变效应的分析更多的依赖于已有的收缩徐变预测模型^[2-3]。

随着研究的不断深入,混凝土收缩和徐变的各种预测模型不断被提出和更新,其中影响较大、应用较广泛的有 CEB-FIP 系列模型、ACI 209 系列模型、GL—2000 模型、JTJ—85 模型和 JTG D62—2004 模型等^[4-7]。这些模型基本上都是建立在实验室试验数据基础上的经验公式,由于实验室特定条件(恒温、恒湿)的局限或研究者侧重点的不同,不同的研究者提出的模型所考虑的影响因素也不尽相同,以这些结果作为依据确定的混凝土收缩徐变模型能否直接应用于实际工程结构的分析,须进一步审视。为此,本文对比分析常用的各系列预测模型,并对混凝土收缩徐变效应的主要影响因素进行分析。

1 混凝土收缩徐变基本理论

1.1 收缩徐变机理

混凝土的收缩徐变是混凝土材料本身固有的特性,是混凝土结构设计计算的一个重要内容。对于桥梁结构混凝土的收缩徐变计算更加重要,它对桥梁结构影响的时间跨度长,且与桥梁结构形式、构造截面组成方式以及施工方法等有关。

混凝土徐变是指在混凝土中应力保持不变的情况下混凝土的应变随时间增长的现象。国内外对混凝土徐变的分析存在各种不同的理论,考虑的具体因素也大不相同,采用了各自的计算模式。对于混凝土的徐变大小,通常采用徐变系数来描述。

混凝土收缩是其在非荷载作用因素下体积变化而产生的变形。混凝土收缩的影响因素很多,变化幅度大,一般难以准确定量。对于重大的大型混凝土结构,需要对混凝土收缩变形值进行定量分析,有条件可以进行混凝土试块的短期收缩试验,可以推断其收缩变形极值,否则按照有关设计规范提供的计算公式和参数进行计算。混凝土的收缩大小由收缩应变来反映,通常采用收缩应变终止时间函数的乘积^[8-10]。

1.2 混凝土收缩徐变的影响因素

影响混凝土收缩徐变性能的因素很多,在混凝土制品设计制造及使用整个过程中所涉及的各因素都会对其产生影响。影响混凝土收缩的主要因素为结构所处环境的相对湿度、混凝土成分和构件的理论厚度等因素。而影响徐变的因素可分为内部因素和外部因素 2 类。内部因素主要指:水泥品种、水灰比、水泥用量、灰浆率、骨料、外加剂等;外部因素主要指:加荷龄期、加荷应力、持荷时间、环境温度、湿度、试件尺寸、碳化等^[11-14]。

2 混凝土收缩徐变的预测模型

当前,预应力混凝土桥梁收缩徐变效应的分析取决于混凝土收缩应变和徐变系数的确定,在工程实践中往往直接选用已有的收缩徐变模型,或者根据已有混凝土试件的徐变试验资料,对已有的模型进行修正,以此来预测混凝土收缩徐变的长期特性。国内外学者已经提出了较多的混凝土收缩徐变模型,其中应用较多的有 CEB-FIP 系列模型、ACI 209 系列模型、GL—2000 模型、JTJ—85 模型和 JTG D62—2004 模型等^[15-18]。

2.1 CEB-FIP(1990)模型

CEB-FIP(1990)模型建议的混凝土徐变系数的计算公式适用范围为:应力水平 $\sigma_c/f_c(t_0) < 0.4$,暴露的平均温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和平均相对湿度 RH 为 $40\% \sim 100\%$ 的环境中。

该模型徐变函数 $\phi(t, t_0)$ 表达式为

$$\phi(t, t_0) = \phi(\infty, t_0) \beta_c(t - t_0)$$

$$\phi(\infty, t_0) = \beta(f_c) \beta(t_0) \phi_{RH}$$

$$\beta(f_c) = 16.76 / \sqrt{f_c}$$

$$\beta(t_0) = 1 / (0.1 + t_0^{0.2})$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - I_{RH}/100}{0.1(2A_c/u)^{1/3}} \quad (1)$$

式中: $\phi(\infty, t_0)$ 为徐变系数; t 为计算考虑时刻的混凝土的龄期(d); t_0 为混凝土加载龄期(d); $\beta(f_c)$ 为混凝土抗压强度 f_c 的参数; $\beta(t_0)$ 为加载龄期 t_0 的参数; ϕ_{RH} 为取决于环境相对湿度的参数; f_c 为混凝土的圆柱体抗压强度(N/mm²); A_c 为构件的横截面面积(mm²); u 为与大气接触的截面周长长度(mm); I_{RH} 为环境平均相对湿度值^[19]。

徐变随时间发展的系数 $\beta_c(t-t_0)$ 为

$$\beta_c(t-t_0) = \left[\frac{(t-t_0)}{\beta_{RH} + (t-t_0)} \right]^{0.3} \quad (2)$$

$$\beta_{RH} = 1.5 \left[1 + (1.2 \frac{I_{RH}}{100})^{18} \right] \frac{2A_c}{u} + 250 \leq 1500 \quad (3)$$

式中: β_{RH} 为年平均湿度相关系数。

CEB-FIP(1990)模型建议的混凝土收缩计算公式适用范围:普通混凝土在正常温度下,湿养护不超过14 d,暴露在平均温度5℃~30℃和平均相对湿度为40%~50%的环境中。

该模型收缩应变 $\epsilon_{cs}(t, t_s)$ 的表达式为

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cso} \beta_s(t-t_s) \quad (4)$$

$$\epsilon_{cso} = \beta_{RH} [160 + \beta_{sc}(90 - f_c)] \times 10^{-6}$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55 \left[1 - \left(\frac{I_{RH}}{100} \right)^3 \right] & 40\% \leq I_{RH} \leq 99\% \\ 1.25 & I_{RH} > 99\% \end{cases} \quad (5)$$

式中: β_{sc} 取决于水泥品种: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; t_s 为开始收缩时的混凝土的龄期(d); β_{RH} 为参数。

收缩应变随时间变化的系数 $\beta_s(t-t_s)$ 取为

$$\beta_s(t-t_s) = \sqrt{\frac{(t-t_s)}{0.035(2A_c/u) + (t-t_s)}} \quad (6)$$

2.2 ACI 模型

ACI 模型徐变函数 $\varphi(t, t_0)$ 表达式为

$$\phi(t, t_0) = 2.35 K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 \frac{(t-t_0)^{0.6}}{10 + (t-t_0)^{0.6}} \quad (7)$$

式中: $t_0 \geq 7$ d; K_1 为混凝土的加载龄期影响系数, $K_1 = 1.25 t_0^{-0.118}$; K_2 为环境相对湿度的影响系数, $K_2 = 1.27 - 0.0067 I_{RH} (I_{RH} > 40\%)$; K_3 为混凝土构件平均厚度的影响系数; K_4 为混凝土稠度的影响系数, $K_4 = 0.82 + 0.0264S$, S 为新鲜混凝土的坍塌度(mm); K_5 为细骨料含量影响系数, $K_5 = 0.88 + 0.0024f$, f 为细骨料($f < 4.8$ mm) 占总骨料分率; K_6 为空气含量影响系数, $K_6 = 0.46 + 0.09A_d \geq 1$, A_d 为新鲜混凝土中所含空气的体积(%)。

ACI 模型收缩应变表达式为

$$(\epsilon_{sh})_t = \left(\frac{t}{35+t} \right) (\epsilon_{sh})_{\max} \quad (8)$$

式中: $(\epsilon_{sh})_{\max}$ 为应变终值^[20]。

2.3 GL—2000 模型

GL—2000 模型徐变函数 $\phi(t, t_0)$ 表达式为

$$\phi(t, t_0) = \frac{1}{E_{cmto}} + \frac{\phi_{28}}{E_{cm28}} \quad (9)$$

$$\phi_{28} = \phi(t_c) \left[2 \left(\frac{(t-t_0)}{(t-t_0)^3 + 14} \right) + \left(\frac{7}{t_0} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{t-t_0}{t-t_0+7} \right)^{0.5} + 2.5(1-1.086(I_{RH})^2) \cdot \left(\frac{t-t_0}{t-t_0+0.5(v/s)^2} \right)^{0.5} \right] \quad (10)$$

式中: E_{cmto} 为混凝土加载时的弹性模量(MPa); E_{cm28} 为混凝土28 d的弹性模量(MPa); ϕ_{28} 为徐变系数; t_c 为混凝土开始干燥时的龄期,或者混凝土潮湿养护结束时的龄期(d); v/s 为混凝土构件体表面积(mm)。

该模型收缩应变 ϵ_{sp} 表达式为

$$\epsilon_{sp} = \epsilon_{shu} \beta_{RH} \beta(t_0) \quad (11)$$

$$\beta_{RH} = 1 - 1.18(I_{RH})^4$$

$$\epsilon_{shu} = 1000K \left(\frac{30}{f_{cm28}} \right) 10^{-6}$$

$$\beta(t_0) = \left[\frac{(t-t_0)}{t-t_0+0.15(v/s)^2} \right]^{0.5}$$

式中: ϵ_{shu} 为收缩应变系数; K 为与水泥类型有关的系数,对Ⅰ类水泥取1.0,对Ⅱ类水泥取0.70,对Ⅲ类水泥取1.15; f_{cm28} 为混凝土龄期为28 d时的圆柱体抗压强度平均值(MPa)^[21-23]。

2.4 JTJ—85 模型

JTJ—85 模型徐变函数表达式为

$$\phi(t, t_0) = \beta(t_0) + 0.4\beta_d(t-t_0) + \varphi_1[\beta_1(t) - \beta_1(t_0)] \quad (12)$$

$$\beta(t_0) = 0.8 \left(1 - \frac{R_1}{R_\infty} \right)$$

$$\varphi_1 = \varphi_{f1} \varphi_{f2}$$

式中: $\beta_d(t-t_0)$ 为随时间而增长的滞后弹性应变; R_1/R_∞ 为混凝土龄期为 t 时的强度与最终强度之比; φ_1 为流塑系数; φ_{f1} 为依周围环境而定的系数; φ_{f2} 为依理论厚度而定的系数; $\beta_1(t)$ 、 $\beta_1(t_0)$ 为随混凝土龄期而增长的滞后塑性应变,与理论厚度 h 有关。

收缩应变终值 $\epsilon_{(\infty, t_0)}$ 可采用规范(JTJ 023—85)附表4.2的数值。

2.5 JTG D62—2004 模型

JTG D62—2004 模型徐变函数表达式为

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \beta_c(t-t_0)$$

$$\phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cu}) \beta(t_0)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - I_{RH}/100_0}{0.46(h/h_0)^{1/3}}$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}}$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0/t_1)^{0.2}}$$

$$\beta_s(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_{RH} + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3}$$

$$\beta_{RH} = 150 \left[1 + (1.2 \frac{I_{RH}}{100})^{18} \right] \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1\ 500$$

$$h = 2A_c/u$$

$$f_{cm} = 0.8f_{cu,k} + 8 \quad (13)$$

式中: ϕ_0 为名义徐变系数; $\beta(f_{cm})$ 为强度等级 C20 ~ C50 混凝土在 28 d 时平均立方体抗压强度 f_{cm} 的参数; f_{cm} 为强度等级 C20 ~ C50 混凝土在 28 d 时平均立方体抗压强度(MPa); $f_{cu,k}$ 为 28 d 混凝土立方体抗压强度标准值(MPa); h 为构件的理论厚度(mm); h_0 为 100 mm; t_1 为 1 d; f_{cm0} 为 10 MPa。

该模型收缩应变 $\epsilon_s(t, t_0)$ 表达式为

$$\epsilon_s(t, t_0) = \epsilon_{0,s} \beta_s(t - t_0)$$

$$\epsilon_{0,s} = \epsilon_s(f_{cu}) \beta_{RH}$$

$$\epsilon_s(f_{cu}) = 10^{-6} [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cu}/f_{cu,k})]$$

$$\beta_{RH} = 1.55 [1 - (I_{RH}/100)^3]$$

$$\beta_s(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.5} \quad (14)$$

式中: $\epsilon_{0,s}$ 为名义收缩系数; $\epsilon_s(f_{cu})$ 为收缩应变系数; $\beta_s(t - t_0)$ 为收缩随时间发展系数。

3 算例分析

混凝土收缩徐变对结构的使用寿命影响非常大,如何合理选择计算模型是关键。为了比较同等条件下,各预测模型的徐变系数和收缩应变差异,计算参数选择如下:混凝土的 28 d 抗压强度为 5.5×10^4 kN/m²,环境相对湿度 70%,构件理论厚度 $h = 1$ m,水泥为普通硅酸盐水泥,收缩开始时混凝土龄期为 3 d,加载龄期为 10 d。绘制各预测模型徐变系数和收缩应变的变化规律如图 1 所示。

由图 1 可见,JTJ—85 模型 10 000 d 徐变系数比 JTG D62 模型大 40% 左右;JTJ—85 模型认为收缩应变在 2 000 d 达到终值,比较而言,JTJ—85 模型对收缩徐变效应计算偏于保守。JTG D62 模型和 CEB-FIP 模型徐变系数和收缩应变基本一致;ACI 209 模型的精度较差,低估了混凝土的收缩徐

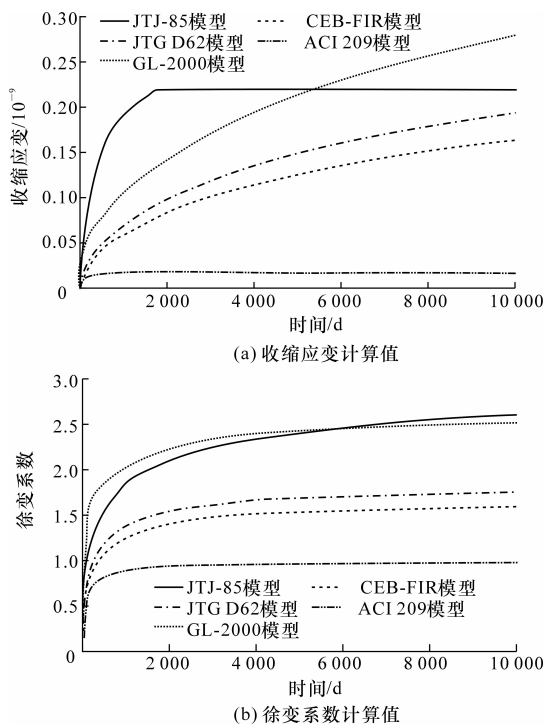


图 1 各预测模型徐变系数和收缩应变的比较

Fig. 1 Comparison of creep coefficients and shrinkage strains in different prediction models

变效应。这正如 ACI 209 委员会 1982 报告所指出的那样,该模型是为设计目的提出的一种简化方法,它们在任何意义上都是不确定的^[21]。

研究资料表明,CEB-FIP(1990)预测徐变函数的平均变异系数估算为 20%^[5]。这种模型形式被《中国公路桥涵规范》(JTG D62—2004)所选用,同时法国标准化协会(AFNOR)编制的规范(AFNOR-1999)也采用了该种模型。

4 混凝土收缩徐变效应各影响因素分析

4.1 理论厚度计算模式

混凝土构件与大气接触的湿周周长是影响理论厚度的重要参数。在桥梁合龙后,箱梁闭合室内的空气相对湿度变化较小,导致箱梁闭合室内表面混凝土与其所接触空气间的水分交换速率有所减缓,因此,其理论厚度计算中的表面周长应有所折减,与合龙前应有所区别。此外,桥面铺装层施工完后,使得箱梁顶板外表面与空气间几乎不存在水分的交换,其理论厚度发生显著的变化,因此,对于合龙前和合龙后,本文采用的理论厚度计算式见下页表 1^[16]。

表 1 箱梁理论厚度计算公式		
Tab. 1 Box-girder theoretical thickness calculation formula		
理论厚度	公式	说明
A 模式	$h=\frac{2A_c}{u_{in}+u_{out}}$	悬臂阶段
B 模式	$h=\frac{2A_c}{0.5u_{in}+u_{out}}$	箱梁合龙后,桥面铺装前
C 模式	$h=\frac{2A_c}{0.5u_{in}+u'_{out}}$	桥面铺装后以及整个运营期

注: A_c 为箱梁截面面积; u_{in} 为箱梁内表面周长; u_{out} 为箱梁外表面周长; u'_{out} 为箱梁出去顶面后外表面周长。

在 3 种不同的理论厚度计算模式下,本文采用 JTG D62—2004 模型计算的混凝土收缩应变和徐变系数,如图 2 所示。

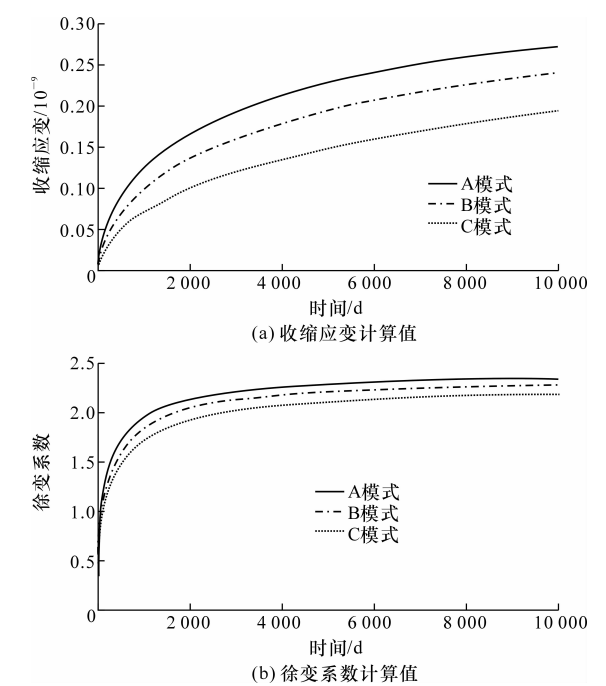


图 2 不同湿周计算模式对混凝土收缩徐变效应的影响
Fig. 2 Different parameter calculation models for concrete shrinkage and creep effect of concrete

由图 2 可看出,构件理论厚度对混凝土收缩应变比较敏感,A 模式比 C 模式的收缩应变终值大 30%左右;而徐变系数对构件理论厚度敏感度较小。因而,徐变系数和收缩应变随构件与大气接触周长增加而增大。

4.2 加荷龄期

加荷龄期是影响混凝土收缩徐变效应的一个重要因素,对同样截面的混凝土梁(各参数如前所述)的徐变系数和收缩应变采用 JTG D62-2004 模型进行计算,加荷龄期分别取为 3、7、10、14、28 d。

混凝土的收缩与水灰比、温度、湿度、集料、水灰

比、配筋等因素相关,与外荷载施加无关。而混凝土的徐变效应随着加荷龄期的增加而减小,当加荷龄期由 3 d 增加到 28 d 时,混凝土的徐变效应终值减小 80%左右,如图 3 所示。

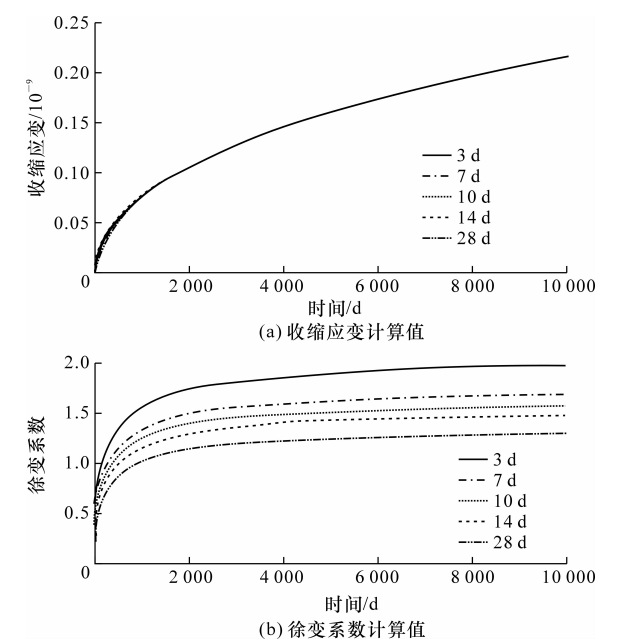


图 3 不同加荷龄期对混凝土收缩徐变效应的影响
Fig. 3 Influences of different loading periods on concrete shrinkage and creep effect of concrete

4.3 相对湿度

在 JTG D62—2004 模型中已考虑了环境平均相对湿度的影响,对同样截面的混凝土梁(各参数如前所述)的徐变系数和收缩应变进行计算,相对湿度分别取为 50%、60%、70%、80%,分析结果如下页图 4 所示。

由图 4 可以看出,模型对环境平均相对湿度的比较敏感,当环境平均相对湿度 RH 从 50%升至 80%时,徐变系数减小近 30%,而收缩应变减小达 50%。相比较而言,环境相对湿度变化对混凝土收缩效应较徐变效应更大。

5 结 语

(1)JTJ—85 模型 10 000 d 徐变系数比 JTG D62 模型大 40%左右,JTJ—85 模型认为收缩应变在 2 000 d 达到终值,比较而言,JTJ—85 模型对收缩徐变效应计算偏于保守;JTG D62 模型和 CEB-FIP 模型徐变系数和收缩应变基本一致,ACI 209 模型的精度较差,低估了混凝土的收缩徐变效应。

(2)构件理论厚度对混凝土收缩应变比较敏感,而徐变系数对构件理论厚度敏感度较小,因而,徐变

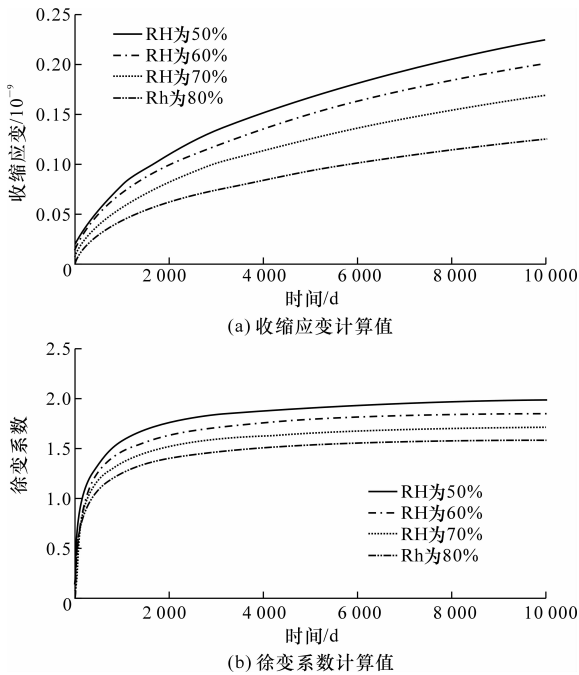


图4 不同相对湿度 RH 对混凝土收缩徐变效应的影响

Fig. 4 Influences of different relative humidities on shrinkage and creep effect of concrete

系数和收缩应变随构件与大气接触周长增加而增大。

(3)混凝土的收缩与水灰比、温度、湿度、集料、水灰比、配筋等因素相关,与外荷载施加无关;而混凝土的徐变效应随着加荷龄期的增加而减小,当加荷龄期由 3 d 增加到 28 d 时,混凝土的徐变效应终值减小 80%左右。

(4)收缩徐变效应对环境平均相对湿度的比较敏感,当环境平均相对湿度从 50%升至 80%时,徐变系数减小近 30%,而收缩应变减小达 50%;相比较而言,环境相对湿度变化对混凝土收缩效应较徐变效应更大。

参考文献:

References:

- [1] 汪 剑. 大跨径预应力混凝土箱梁桥非荷载效应及预应力损失研究[D]. 长沙:湖南大学,2006.
WANG Jian. Large-span prestressed concrete box girder bridge with non-loading effects and study on prestress loss[D]. Changsha: Hunan University, 2006. (in Chinese)
- [2] 汪维安. 高墩大跨连续刚构桥的收缩徐变效应分析[D]. 长沙:长沙理工大学,2005.
WANG Wei-an. Analysis of shrinkage and creep effect large span rigid frame bridge with high piers

- [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [3] 胡 狄. 预应力混凝土桥梁徐变效应分析[D]. 长沙:中南大学,2003.
HU Di. Analysis of creep effect in prestressed concrete bridge[D]. Changsha: Central South University, 2003. (in Chinese)
- [4] Banant Z P, Baweja S. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: model B3[J]. Materials and Structures, 1995, 28(1): 357-365.
- [5] CEB-FIP model code for concrete structures 1990, Committee Euro-international du Beton/Federation International de la Precon-strainte, Paris, 1990[S].
- [6] AASHTO, 美国公路桥梁设计规范(1994)[S].
AASHTO, United States Code for design of highway bridges (1994)[S]. (in Chinese)
- [7] ACI Committee 209, Prediction of creep shrinkage and temperature effects in concrete structures(209R-92). America Concrete Institute, Farmington Hills, Mich. 1992[S].
- [8] Song H W, Song Y C, Byum K J, et al. Modification of creep prediction equation of concrete utilizing short term creep tests[J]. Transaction, SMIRT 1 6, 2001, 28(2): 1-7.
- [9] 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, 10(6): 13-16.
DING Wen-sheng, LU Zhi-tao, MENG Shao-ping, et al. Analysis and comparison of prediction models for concrete shrinkage and creep[J]. Bridge Construction, 2004, 10(6): 13-16. (in Chinese)
- [10] Lam J P. Evaluation of concrete shrinkage and creep prediction models[D]. San Jose: San Jose State University, 2002.
- [11] Neville A M, Dilger W H, Brooks J J. Creep of plain and structural concrete[M]. London & New York: Construction Press, 1983.
- [12] Macgregor J G. Concrete structures: stresses and deformations[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1988, 15(1): 141.
- [13] 周 履, 陈永春. 收缩徐变[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
ZHOU Lv, CHEN Yong-chun. Shrinkage and creep [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994. (in Chinese)
- [14] 惠荣炎, 黄国兴, 易若冰. 混凝土的徐变[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.

HUI Rong-yan, HUNG Guo-xing, YI Ruo-bing. Concrete creep [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1988. (in Chinese)

[15] 杨小兵. 混凝土收缩徐变预测模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.

YANG Xiao-bing. Study on prediction model of concrete shrinkage and creep[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese)

[16] Takács P F. Deformations in concrete cantilever bridges: observations and theoretical modelling[D]. Norway: The Norwegian University of Sciences and Technology, 2002.

[17] 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.

YAN Dong-huang, TIAN Zhong-chu, LI Xue-wen, et al. Calculation of shrinkage and creep of concrete bridge finite element method and application of [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17 (2): 55-58. (in Chinese)

[18] 周绪红, 乔朋, 狄谨, 等. 大跨径简支转连续箱梁

.....

(上接第 55 页)

[6] 宋玉普. 混凝土结构的疲劳性能及设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

SONG Yu-pu. Fatigue behavior and design principle of concrete structures [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006. (in Chinese)

[7] Batchelor B V, Hewitt B E, Csagoly P. An investigation of the fatigue strength of deck slabs of composite steel/concrete bridge[J]. Transportation Research Record, 1978(664): 153-161.

[8] Okada K, Okamura H, Sonoda K. Fatigue failure mechanism of reinforced concrete bridge deck slabs[J]. Transportation Research Record, 1978(664): 136-144.

[9] Sonoda K, Horikawa T. Fatigue strength of reinforced concrete slabs under moving loads[C]//IABSE. Proceedings of the IABSE colloquium, Fatigue of steel and concrete structures. Lausanne: IABSE, 1982: 455-462.

[10] Tanihira T, Sonoda K, Horikawa T, Kitoh H. Low cycle fatigue characteristics of bridge deck RC slabs under the repetition of wheel loads[C]//New Zealand Concrete Society. Proceedings of Pacific concrete conference. New Zealand: New Zealand Concrete Society, 1988: 381-392.

[11] Perdikaris P C, Beim S, Bousias S. Slab continuity effect on and fatigue strength of R/C bridge deck models[J]. ACI Structural Journal, 1989, 86 (4): 483-491.

[12] Matsui S. Fatigue deterioration mechanism and durability of highway bridge RC slabs[R]. Osaka: Osaka University, 1991.

[13] Perdikaris P C, Petrou M F, Wang A. Fatigue strength and stiffness of reinforced concrete bridge decks[R]. Cleveland: Case Western Reserve University, 1993.

[14] JTG D60—2004, 公路桥涵设计通用规范[S].

JTG D60—2004, General code for design of highway bridges and culverts[S]. (in Chinese)

[15] LRFD, Bridge design specifications[S].

[16] BS5400, Part 10, Steel, concrete and composite bridges-part 10; Code of practice for fatigue[S].

[17] Eurocode 3, Design of steel structures-Part 1-9; Fatigue[S].

桥收缩徐变效应[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(2): 39-44.

ZHOU Xu-hong, QIAO Peng, DI Jin, et al. Shrinkage and creep effects of long-span simple-supported-to-continuous box girder bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9 (2): 39-44. (in Chinese)

[19] Dezi L, Leoni G, Tarantino A M. Time-dependent analysis of prestressed composite beams[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(4): 621-633.

[20] Meyerson R. Compressive creep of prestressed concrete mixtures with and without mineral admixtures [D]. Blacksburg: Virginal Tech, 2001.

[21] Mcdonald D B, Roper H. Accuracy of predication models for shrinkage of concrete[J]. ACI Materials Journal, 1993, 56(5): 265-271.

[22] Gardner N J, Zhao J W. Creep and shrinkage revisited [J]. ACI Materials Journal, 1993, 90(3): 36-46.

[23] 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.