

混凝土结构徐变模型试验与原型对比关系

王永宝^{1,2}, 原元³, 赵成功³, 赵人达³

(1. 太原理工大学土木工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西省交通科技研发有限公司桥梁工程防灾减灾山西省重点实验室, 山西 太原 030006; 3. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要 目的 研究采用徐变模型试验方法预测原型混凝土结构徐变变形比例关系。方法 基于弹性相似理论和混凝土结构徐变变形计算公式, 提出徐变相似常数调整系数的概念, 并推导素混凝土柱、钢筋混凝土柱、钢管混凝土柱、钢筋和预应力混凝土梁的徐变相似常数调整系数公式; 通过算例计算不同缩尺比例混凝土构件的调整系数; 探讨徐变模型、混凝土强度、温度、相对湿度和加载龄期对徐变相似常数调整系数的影响。结果 混凝土结构的徐变相似常数调整系数随时间变化逐渐降低, 然后趋于稳定; 模型相似比越小, 徐变相似常数越小。结论 原型与模型采用相同的混凝土强度、相似的温度和相对湿度环境能使得徐变相似常数可控。

关键词 混凝土; 模型; 原型; 徐变; 相似常数调整系数

中图分类号 TU375; U444

文献标志码 A

Comparison of Relationship between Model Test and Prototype in Creep Behavior of Concrete Structures

WANG Yongbao^{1,2}, YUAN Yuan³, ZHAO Chenggong³, ZHAO Renda³

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, China, 030024; 2. Shanxi Key Laboratory of Bridge Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shanxi Transportation Technology Research & Development Co. Ltd., Taiyuan, China, 030006; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 610031)

Abstract: To investigate the creep deformation ratios of concrete structures between the prototype and model by the model test method. Based on the elastic similarity theory and the creep deformation formula of concrete structure, the concept of Adjustment Coefficient of Creep Similarity Constant (ACCSC) was put forward. And the ACCSC formula of plain concrete column, reinforced concrete column, concrete filled steel tubular column, reinforced and prestressed concrete beam were proposed. Then, the ACCSC of concrete members with different scale were calculated by several examples. The ACCSC of concrete structures influenced by creep model, concrete strength, temperature, relative humidity and loading age were also discussed. The results show that, the ACCSC of concrete structures gradually decrease with time, and then tend to be

收稿日期: 2019-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778531); 山西省高等学校科技创新项目(2019L0295)

作者简介: 王永宝(1989—), 男, 博士, 主要从事混凝土结构桥梁行为方面研究。

stable. The smaller the similarity ratio of the model, the smaller the ACCSC. If the prototype and model have the same parameters, such as concrete strength, temperature and relative humidity, the ACCSC can be controllable.

Key words: concrete; model; prototype; creep; ACCSC

混凝土结构桥梁的长期变形是影响列车安全运营的关键^[1],通过设计合理的模型试验来分析桥梁结构的长期变形可弥补现有理论分析方法的不足^[2-4],并准确预测桥梁变形.结构模型试验的主要目的是利用模型试验测试的数据和结果推算原型的工作性能.而现有模型试验设计重点关注如何将模型试验验证计算公式或有限元模型的正确性,忽略了模型与原型的相似关系^[3].对于结构弹性模型试验,混凝土梁的挠度比为几何相似比^[5],但当考虑混凝土徐变后,该相似比是否仍然成立,需进一步分析^[5-6].如何将现有混凝土模型梁的徐变计算公式直接用于预测原型梁变形尚需开展深入研究.探讨模型与原型徐变相似关系对于准确预测原型徐变性能具有重要现实意义.

目前已有相关学者对混凝土结构的徐变相似关系进行过研究.石挺丰等^[5]通过试验对预应力混凝土简支梁的长期变形模型与原型跨中挠度比例关系进行了分析,结果表明,该比例关系受混凝土徐变系数影响.杨基好等^[7]推导的考虑徐变效应的原型与模型比例关系仅是在弹性挠度关系基础上乘以徐变系数获得的,并未考虑原型与模型徐变系数之间的差异性,且推导过程复杂.张双洋等^[8]认为将模型桥的长期变形测试结果乘以7.5用于反推原型桥梁长期变形的方法存在一定缺陷.潘钻峰^[9]从混凝土材料、受压柱和梁结构三层次对混凝土结构长期变形进行预测,但未专门对徐变模型试验相似关系进行探讨.当考虑混凝土徐变后,由于构件理论厚度的有量纲特性^[6],原型与模型之间徐变系数存在差异,因此其相似比例关系与弹性阶段不同.

多数学者仅对素混凝土、钢筋混凝土、钢管混凝土、钢筋混凝土或预应力混凝土梁进行过徐变试验^[10-14],很少有学者对徐变模型试验与原型之间的关系进行过探讨.基于此,笔者首先通过理论方法探讨了素混凝土柱、钢筋混凝土柱、钢管混凝土、钢筋混凝土梁和预应力混凝土梁的徐变相似常数公式,通过参数分析,进一步探讨了徐变预测模型、混凝土强度、温度、相对湿度和加载龄期对徐变相似常数的影响,研究成果可为用模型试验方法进行混凝土结构徐变特性研究提供参考.

1 徐变相似理论

根据弹性相似关系,混凝土弹性应力和应变相似常数为1^[3,5],则下式成立:

$$\frac{\varepsilon_{e,p}}{\varepsilon_{e,m}} = C_\varepsilon = C_\sigma = 1. \quad (1)$$

式中: p 和 m 分别表示原型和模型; C_σ 和 C_ε 分别为弹性应力和应变相似常数; $\varepsilon_{e,p}$ 和 $\varepsilon_{e,m}$ 分别为模型和原型的弹性应变.

1.1 素混凝土受压柱

对轴压素混凝土柱,由徐变引起的原型与模型加载端的位移关系为

$$\frac{d_{c,p}}{d_{c,m}} = \frac{\varepsilon_{c,p} \cdot l_p}{\varepsilon_{c,m} \cdot l_m} = \frac{\varepsilon_{e,p} \cdot \varphi_p}{\varepsilon_{e,m} \cdot \varphi_m} \cdot C_l = C_l \cdot C_\varepsilon \cdot \frac{\varphi_p}{\varphi_m} = C_l \cdot \frac{\varphi_p}{\varphi_m}. \quad (2)$$

式中: $d_{c,p}$ 和 $d_{c,m}$ 分别为原型和模型徐变位移; $\varepsilon_{c,p}$ 和 $\varepsilon_{c,m}$ 分别为原型和模型的徐变应变; l_p 和 l_m 分别为原型和模型的长度; φ_p 和 φ_m 分别为原型和模型的徐变系数; C_l 为几何相似常数.

$$\frac{d_{all,p}}{d_{all,m}} = \frac{d_{c,p} + d_{e,p}}{d_{c,m} + d_{e,m}} = C_l \cdot \frac{1 + \varphi_p}{1 + \varphi_m}. \quad (3)$$

式中: $d_{e,p}$ 和 $d_{e,m}$ 分别为原型和模型弹性

位移.

则定义徐变相似常数调整系数为

$$\eta = \frac{1 + \varphi_p}{1 + \varphi_m}. \quad (4)$$

当考虑温度变形时, η 可表示为

$$\eta = \frac{1 + \varphi_p + \alpha_T \cdot \Delta_p / \varepsilon_{e,p}}{1 + \varphi_m + \alpha_T \cdot \Delta_m / \varepsilon_{e,m}}. \quad (5)$$

式中: α_T 为温度线膨胀系数; Δ_p 和 Δ_m 分别为原型与模型与参考温度的温差.

由式(4)可知, 当 $\varphi_p = \varphi_m$ 时, 总变形相似常数即为弹性相似常数, 但实际上, 模型结构设计时, 原型与模型很难有相同的徐变系数^[5].

1.2 钢筋混凝土受压柱

张克波等^[13]基于钢筋混凝土柱的徐变试验结果获得了考虑钢筋折减作用的徐变系数公式. 张运涛^[14]也认为直接将素混凝土徐变系数 $\varphi_c(t, \tau)$ 乘以钢筋效应调整系数 γ 即可描述钢筋混凝土徐变.

$$\varphi_r(t, \tau) = \gamma \cdot \varphi_c(t, \tau). \quad (6)$$

式中: γ 为考虑含筋率的徐变系数调整系数, 取 0.866^[13].

因此将式(6)代替式(4)中的 φ 即可得钢筋混凝土柱的徐变相似常数调整系数.

1.3 钢管混凝土受压柱

受管内混凝土徐变影响, 钢管混凝土徐变与普通混凝土有较大差异^[15], 文献[4]推导了 t_k 时刻的徐变应变 $\varepsilon(t_k)$ 公式, 将其转化可得:

$$\varepsilon(t_k) = \frac{1 + \varphi + n\alpha(1 + \chi\varphi)}{1 + n\alpha(1 + \chi\varphi)} \varepsilon(t_0). \quad (7)$$

式中: α 和 n 分别为钢管与混凝土的面积和弹性模量比; χ 为老化系数^[15].

考虑式(7)后, 钢管混凝土的徐变相似常数调整系数可表示为

$$\eta = \frac{\varepsilon_p(t_0) + \varepsilon_p(t_k)}{\varepsilon_m(t_0) + \varepsilon_m(t_k)} = \frac{1 + \frac{1 + \varphi_p + n\alpha(1 + \chi_p\varphi_p)}{1 + n\alpha(1 + \chi_p\varphi_p)}}{1 + \frac{1 + \varphi_m + n\alpha(1 + \chi_m\varphi_m)}{1 + n\alpha(1 + \chi_m\varphi_m)}}. \quad (8)$$

由式(8)可知, 钢管混凝土的 η 不仅与徐变系数相关, 还与弹性模量和含钢率有关.

1.4 钢筋混凝土受弯梁

钢筋混凝土梁跨中截面挠度可表示^[18]

$$\delta_l = (1 + \lambda) \delta_e, \lambda = \frac{K \cdot \xi \varphi}{1 + 6.3 n \rho'}. \quad (9)$$

式中: δ_l 和 δ_e 分别为梁跨中截面长期和弹性挠度; K 为调整系数, 取 0.77; ξ 为相对界限受压区高度, 取 0.4; n 为钢筋与混凝土弹性模量比; ρ' 为受压区配筋率.

钢筋混凝土徐变相似常数调整系数为

$$\frac{\delta_{l,p}}{\delta_{l,m}} = \frac{(1 + \lambda_p) \delta_{e,p}}{(1 + \lambda_m) \delta_{e,m}} = \frac{1 + \lambda_p}{1 + \lambda_m} C_1. \quad (10)$$

当原型与模型采用相同配筋率和材料时, 原型与模型的 λ_c 除了 φ 以外, 其余参数均相等. 因此对钢筋混凝土梁而言, 曲率与挠度增大系数相同. 令

$$k = \frac{K \cdot \xi}{1 + 6.3 n \rho'}. \quad (11)$$

对钢筋混凝土梁:

$$\eta = \frac{1 + k \cdot \varphi_p}{1 + k \cdot \varphi_m}. \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可知, 钢筋混凝土梁的 η 与相对受压区高度 ξ 和受压区钢筋含筋率 ρ' 有关.

1.5 预应力钢筋混凝土梁

预应力混凝土梁的徐变挠度为^[19]

$$f_c = \frac{1}{2.586 - 1.611\beta} \varphi_c(t, t_0) \delta_e. \quad (13)$$

式中: β 为预应力度.

对一次加载的预应力混凝土构件, η 可表述为式(12)的形式, 但:

$$k = 1 + \frac{1}{2.586 - 1.611\beta}. \quad (14)$$

若构件为两次加载, η 为

$$\eta = \frac{1 + k_1 \varphi_p(t, t_1) - \varphi_p(t, t_2)}{1 + k_1 \varphi_m(t, t_1) - \varphi_m(t, t_2)}. \quad (15)$$

式中: t_1 和 t_2 分别为施加预应力及二期恒载时间; k_1 为由初始预应力、预应力损失、结构自重及二期恒载产生的弹性挠度比^[5].

由式(15)可知,若不考虑二期恒载,只考虑初始预应力,式(15)与(12)相同.

2 计算分析

笔者基于上述公式,研究不同缩尺比例下的模型与原型位移比例关系.素混凝土试块的相似比和参数见表 1,表中 M-10 指缩尺比例为 10 的模型.本次计算,混凝土 28 d 轴心抗压强度取 50 MPa,轴向应力 6 MPa,加载龄期 $t_0=7$ d,荷载持续时间 360 d,相对湿度 $RH=70\%$,徐变计算采用 CEB90 模型^[20-21].

表 1 试件相似比和参数

| 分组 | 相似比 | 直径/mm | 长度/mm | 钢管壁厚/mm |
|------|------|---------|---------|---------|
| 原型 | 1.0 | 1 000.0 | 2 000.0 | 60 |
| M10 | 10.0 | 100.0 | 200.0 | 6 |
| M7.5 | 7.5 | 133.3 | 266.6 | 8 |
| M5 | 5.0 | 200.0 | 400.0 | 12 |
| M4 | 4.0 | 250.0 | 500.0 | 15 |
| M3 | 3.0 | 333.3 | 666.6 | 20 |

图 1 为不同缩尺比例下 η 随时间变化曲线.由图可知, η 随持荷时间增加逐渐减小,然后趋于稳定,其变化趋势与徐变系数相反,受构件理论厚度影响,相似比越大, η 越小.当持荷 340 d 时,M3 的 η 比 M10 大 17%.当为 M7.5 时, η 减少 35%.由此可见,进行混凝土徐变模型试验时,若仍按原有几何相似常数估计原型的徐变变形,则明显高估原型变形.模型缩尺比例越大,误差越大.

另外,在上述素混凝土徐变试件基础上,按式(4)和式(6)计算的钢筋混凝土柱 η 随时间变化曲线见图 2.由图可知,钢筋混凝土的 η 随时间变化与素混凝土相同.但由于钢筋对混凝土徐变效应有一定抑制作用,其徐变相似常数调整系数较普通素混凝土有所增加,由此可见,钢筋的应力重分布可减小徐变模型测试结果对原型预测值的影响.

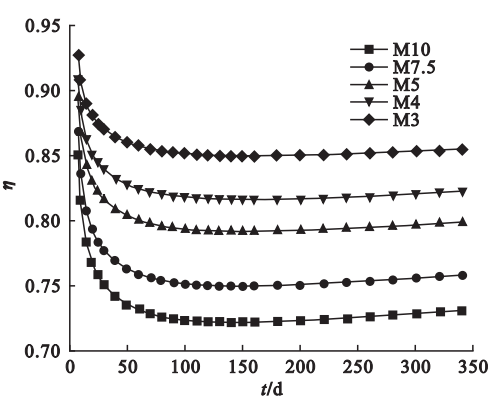


图 1 素混凝土结果

Fig. 1 Results of plain concrete

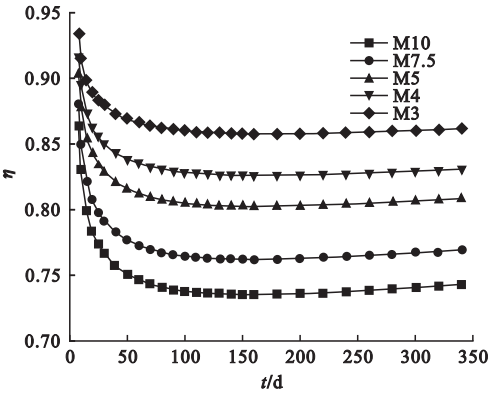


图 2 钢筋混凝土柱结果

Fig. 2 Results of reinforced concrete columns

计算采用的钢管混凝土构件的几何尺寸见表 1.其中,管内混凝土尺寸与表 1 中素混凝土相同,施加到管内混凝土应力为 6 MPa.受管内混凝土密封作用影响,相对湿度均取 96 %^[15].图 3 给出了采用式(8)计算的 η 随时间的变化关系.由图可知,受钢管影响, η

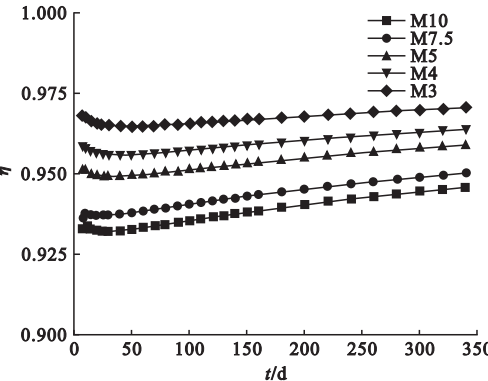


图 3 钢管混凝土结果

Fig. 3 Results of concrete filled steel tube

随时间缓慢增加;与素混凝土和钢筋混凝土相比, η 较大,M10时 η 可达0.94.M3时 η 为0.975.进一步证明了结构的应力重分布效应越大,徐变相似常数与几何相似常数越接近的结论.

与上述模型相同缩小比例的钢筋混凝土梁原型长40 m、高2 m、宽1 m,含筋率3.8%.徐变系数采用CEB90模型.图4给出了式(12)计算的钢筋混凝土梁跨中挠度 η 随时间变化关系.由图可知,与其他构件相似,钢筋混凝土的 η 随时间变化逐渐降低,然后趋于稳定.结构缩尺越大, η 越小,M10时 η 仅为0.87.除此以外,几何相似比越大, η 差值越大.在进行钢筋混凝土梁的徐变模型试验时,跨中截面位移应乘以调整系数,否则可能会高估原型徐变.

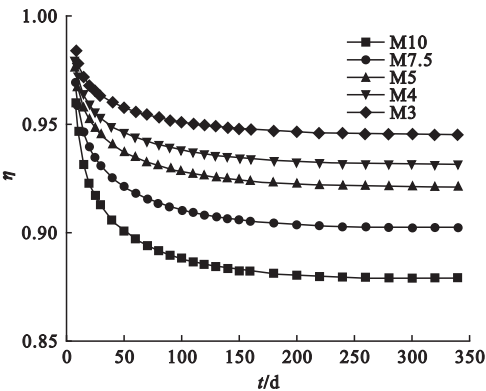


图4 钢筋混凝土梁结果

Fig. 4 Results of reinforced concrete beams

预应力混凝土梁徐变计算采用文献[6]的试验梁,一次性施加初始预应力、一期恒载和二期恒载,未考虑施工步骤.假设原型梁长63 m,顶板宽5 m,腹板底面宽2.5 m,腹板宽1.5 m,梁高5.5 m,模型梁的弹性相似比为10、7.5、5、4、3.缩尺比例为10的箱梁截面尺寸见文献[6].截面预应力钢筋配筋率为0.804%,普通钢筋配筋率为0.86%.预应力混凝土梁的上部承受均布荷载.采用式(14)和式(15)计算时预应力度取 $1.0^{[19]}$,持荷时间为365 d.图5给出了预应力混凝土梁 η 随时间变化曲线.

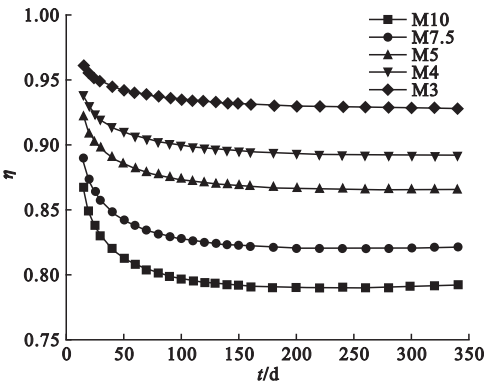


图5 预应力混凝土梁结果

Fig. 5 Results of pre-stressed concrete beams

由图5可知,一次加载的预应力混凝土梁 η 与其他构件变化趋势相同,但 η 较钢筋混凝土构件小.此外,预应力度会对计算结果产生较大影响,预应力度越小, η 越大.M10时 η 为0.70,M3时 η 为0.83.文献[5]实测缩尺比例为4的预应力混凝土构件,在浇筑10 d后施加预应力,50 d后的 η 为0.932.而采用式(14)、式(15)计算 η 为0.907,较实测结果小,但仍能较为准确地预测测试结果,进而验证了文中公式的正确性.

计算不同受力构件在徐变发生1年时的 η 对比结果见表2.由表可知,对受压混凝土柱而言,配筋率越高, η 越大;素混凝土柱的 η 与素混凝土相差不大,钢管混凝土结构由于配筋率较大, η 也较大.而梁的 η 与受压混凝土柱不同,普通钢筋混凝土梁的 η 大于预应力钢筋混凝土梁结构,增加预应力可减少 η 值.

表2 徐变1年后不同构件 η 值

Table 2 η of different members after 1 years of creep

| 编号 | η | | | | |
|------|--------|-------|-------|--------|-------|
| | 素混凝土 | 钢筋混凝土 | 钢管混凝土 | 钢筋混凝土梁 | 预应力梁 |
| M10 | 0.731 | 0.742 | 0.946 | 0.879 | 0.723 |
| M7.5 | 0.758 | 0.769 | 0.950 | 0.902 | 0.750 |
| M5 | 0.799 | 0.808 | 0.959 | 0.921 | 0.791 |
| M4 | 0.822 | 0.831 | 0.964 | 0.931 | 0.815 |
| M3 | 0.854 | 0.862 | 0.970 | 0.945 | 0.849 |

3 参数分析

3.1 徐变模型

图 6 给出了采用 ACI209、CEB90、

CEB10 和 GL2000 模型^[20-21] 计算的徐变相似常数调整系数随时间变化曲线。徐变系数计算与前文相同,且原型与模型采用相同徐变模型。

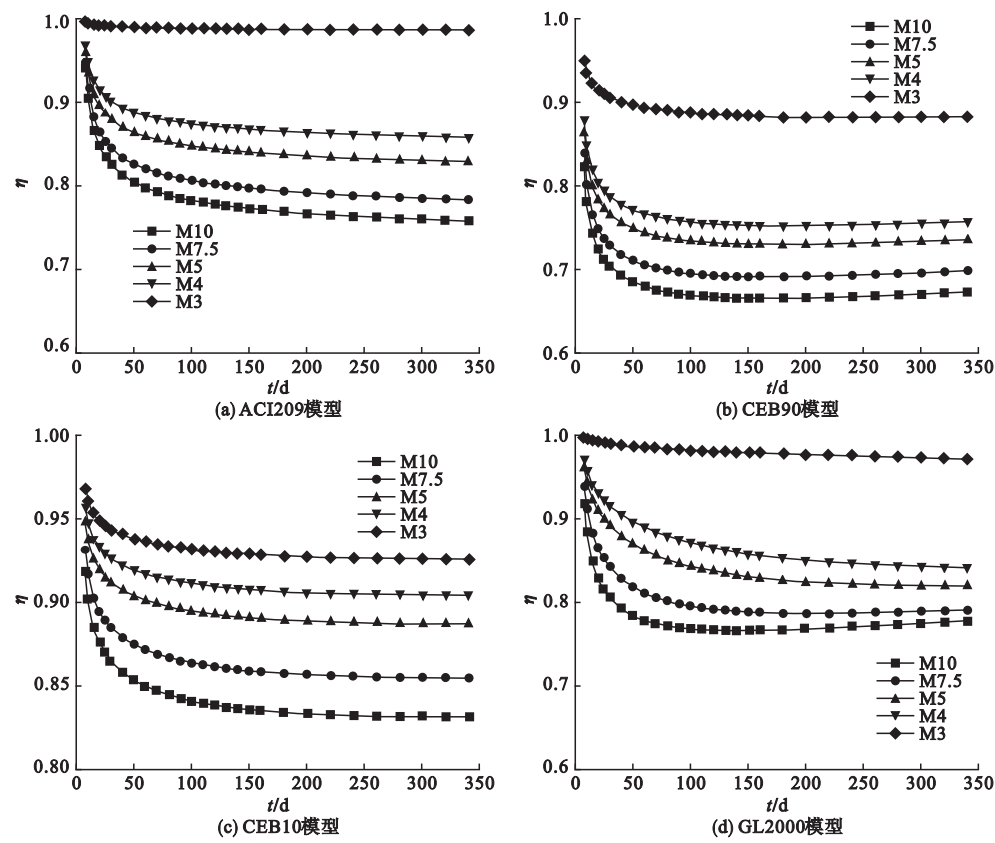


图 6 徐变模型对结果的影响

Fig. 6 Results influenced by creep models

由图 6 可知, η 受混凝土徐变模型影响较大,当相似比为 10、持荷时间为 340 d 时, ACI209、CEB90、CEB10 和 GL2000 模型^[20] 的 η 值分别为 0.76、0.67、0.83 和 0.78. 但当相似比为 3 时, ACI209 模型和 GL2000 模型计算的 η 值为 0.99 和 0.97, 而 CEB90 和 CEB10 模型则低于 0.90. 另外, 当相似常数大于 7.5 时, 随持荷时间增大, GL2000 模型的 η 先减小后增大, 但是增大幅度较小。

3.2 混凝土强度

在实际混凝土徐变模型试验过程中, 受试验模板和绑扎钢筋尺寸影响, 原型与模型采用不同混凝土配合比^[4], 因此强度也会存在差异, 主要表现为模型缩小比例越小, 混凝土

强度越低^[1,6]. 因此有必要探讨强度对 η 的影响. 计算时, 几何相似比取 5, 模型混凝土强度取 20 MPa、30 MPa、40 MPa、50 MPa、70 MPa, 原型混凝土强度取 70 MPa. 图 7 给出了 CEB90 和 CEB10^[21] 两种模型在不同混凝土强度下的计算结果对比情况. 由图可知, 模型与原型的混凝土强度相差越大(原型为 70 MPa, 模型为 20 MPa)时, η 越小; 若采用 CEB90 模型, 混凝土强度由 20 MPa 变为 70 MPa 时, η 由 0.53 增加到 0.81, 增幅达 52.8%. 与 CEB90 模型相比, CEB10 模型对混凝土强度更加敏感, 模型混凝土强度由 20 MPa 变为 70 MPa 时, η 由 0.40 增加到 0.91, 增幅达 128%. 由此可见, 混凝土强度将

显著影响 η 值,若模型与原型混凝土强度相差较大,则会明显低估原型徐变. 因此,在混凝土徐变试验时,应尽量选择模型的混凝土

强度大于原型混凝土强度,这样才能使模型变形反推原型变形结果较为准确.

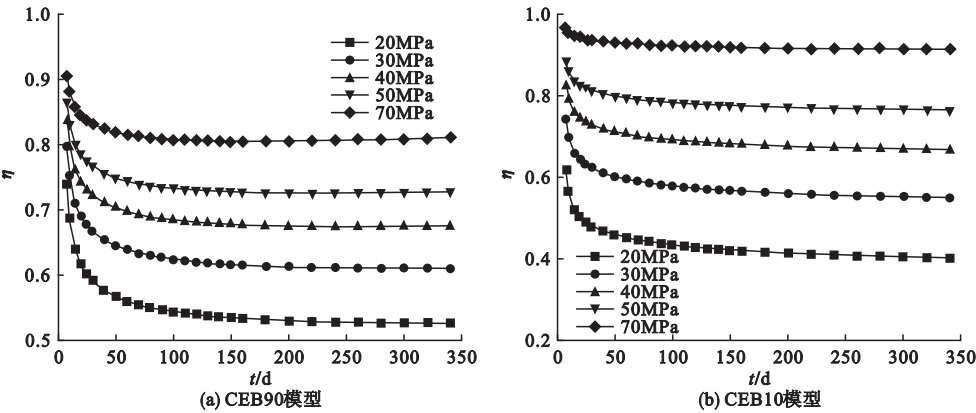


图 7 混凝土强度对结果的影响

Fig. 7 Results influenced by concrete strength

3.3 环境温度及相对湿度

式(5)给出了素混凝土构件受温度和徐变双重作用时,徐变相似常数调整系数随时间的变化规律. 计算时,温度取正弦函数^[22],温度变幅取 10 ℃,模型和原型的温度随时间变化按式(16)计算,徐变系数按 CEB90 模型计算.

$$\Delta = 10\sin(\frac{t-t_a}{365} \cdot 2\pi).$$
 (16)

式中: t 为计算时间;几何相似常数为 10、7.5、5、4、3、1 时的 t_a 值分别为 0 d、60 d、120 d、180 d、240 d、240 d.

以相对湿度为参数分析时,仍采用 CEB90

模型,原型相对湿度取 90%. 由于模型尺寸较小,较容易受周围环境影响,因此其相对湿度可取 60%、70%、80%、90% 和 95%. 几何相似比取 5,混凝土强度取 50 MPa.

图 8(a) 给出了考虑不同温度变化历程后(按式(5)计算)的 η 变化情况,图中温度 1、2、3、4、5 分别对应式(16)中的 t_a 为 0 d、60 d、120 d、180 d、240 d 时的计算结果. 图 8 同时考虑了温度和徐变效应对 η 的影响. 由图 8(a) 可知,当考虑原型与模型不同温度变化历程后, η 在 0.4 ~ 2.0 波动. 受温度影响, η 会超过 1.0. 模型温度低于原型越大时, η 越大;反之, η 越小;模型与原型之间温差

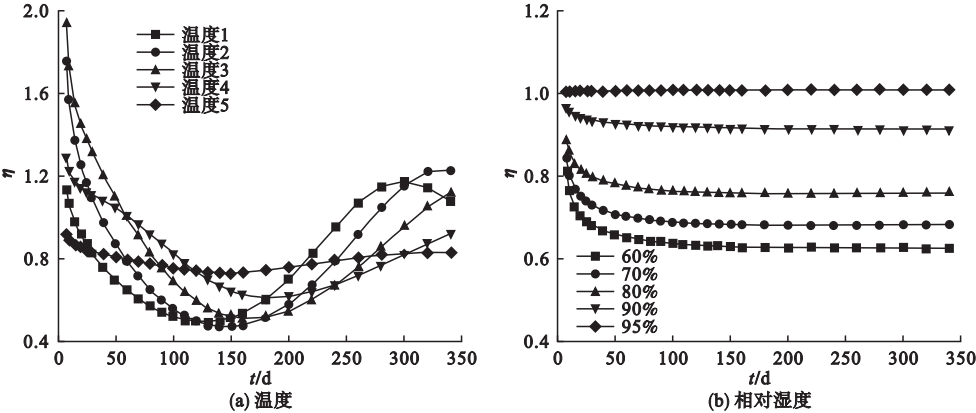


图 8 温度和相对湿度对结果的影响

Fig. 8 Results influenced by temperature and relative humidity

越大,波动越大.图中温度 5 的变化历程与模型相同,因此 η 较稳定.当考虑温度差异后,原型与模型的温差超过徐变系数对结果的影响.因此,混凝土徐变试验应严格控制试验周围环境的温度变化.

图 8(b) 给出了考虑不同相对湿度后的 η 对比结果.由图 8(b) 可知,若原型与模型放置到不同的环境中养护,模型环境的相对湿度小于原型越大, η 越小;当模型的相对湿度为 95 %,原型相对湿度 90 % 时,虽然模型的构件理论厚度存在差异,但 η 可达 1. 因此,通过调整原型与模型之间参数,可使 $\eta = 1$.

3.4 加载龄期

多数情况,模型由于体积小,施工步骤简单,周期短,而与之对应的原型由于结构复杂,其施工时间较长^[8]. 因此,徐变模型与原型之间较难采用完全相同的加载龄期^[3-4].

分析模型加载龄期取 1 d、3 d、7 d、14 d、28 d,原型加载龄期取 28 d,模型相似常数取 5. 徐变取 CEB90 模型,其余系数取值与上述相同.图 9 给出了模型采用不同加载龄期后的徐变相似常数调整系数随时间变化情况.由图可知,模型加载龄期越小,模型与原型之间的加载龄期相差越大,则 η 越小.当模型与原型采用相同加载龄期时, η 为 0.816. 若加载龄期为 1 d, η 为 0.533. 由此可见,若模型与原型采用不同的加载龄期,则可能会低估原型 34.6 % 的变形,对结果不利.

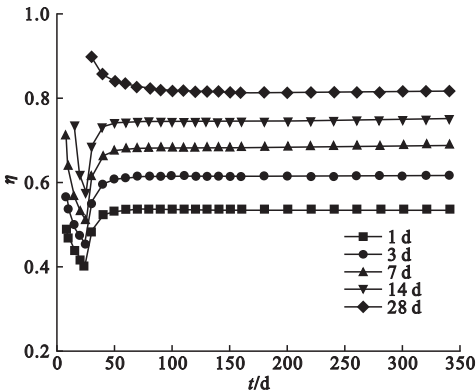


图 9 加载龄期对结果的影响

Fig. 9 Results influenced by loading age

4 结 论

(1) 可通过定义徐变相似常数调整系数的概念描述混凝土原型和模型的徐变比例关系;混凝土构件的调整系数为原型与模型徐变系数的函数,钢筋混凝土和钢管混凝土构件的调整系数与配筋率有关,预应力钢筋混凝土构件与徐变系数和预应力度有关.

(2) 不考虑温度效应时,调整系数小于 1,且随时间变化逐渐减小,并趋于稳定;用模型试验结果预测原型徐变变形时,若按照几何相似常数计算,则会高估原型变形结果.

(3) 相似比越大,调整系数越小;受压构件的配筋率对调整系数有提高作用;原型与模型的混凝土强度相差越大,调整系数越小,模型试验模拟效果越差.

(4) 环境温度变化将引起调整系数大于 1. 因此在模型试验时,应控制温度变化历程,否则会产生较大误差;增大加载龄期可减小误差.

参考文献

[1] BAZANT Z P, YU Q, LI G H. Excessive long-time deflections of prestressed box girders. I: Record-span bridge in Palau and other paradigms [J]. Journal of structural engineering, 2012, 138 (6): 676-686.

[2] HUANG Y, FU J, LIU A, et al. Model test and optimal design of the joint in a sunflower arch bridge [J]. Journal of bridge engineering, 2019, 24 (2): 1-16.

[3] 杨默涵. 劲性骨架钢筋混凝土拱桥的模型试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014. (YANG Mohan. Model test study of concrete arch bridge with CFST stiffened skeleton[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.)

[4] 王永宝. 自然环境条件下大跨度劲性骨架混凝土拱桥长期变形行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. (WANG Yongbao. Study on long-term behavior of long span concrete arch bridge with stiffened concrete filled steel tube in natural environment [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.)

[5] 石挺丰, 胡狄, 陈政清. 预应力混凝土桥梁徐变模型试验相似关系研究[J]. 华东交通大学学报, 2007, 24 (4): 30-33. (SHI Tingfeng, HU Di, CHEN Zhengqing.

- Research on similarity relationship for model-based creep experiment of prestressed concrete bridges [J]. Journal of east China jiaotong university, 2007, 24(4): 30-33.)
- [6] 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.)
- [7] 杨基好, 赵永军, 罗俊礼, 等. 沪杭客专 32m 箱梁徐变试验相似模型设计方法研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 5(7): 75-80.
(YANG Jihao, ZHAO Yongjun, LUO Junli, et al. Study on design method of similar model in 32 m-span box girder creep experiment of Shanghai-Hangzhou passenger dedicated line [J]. Journal of railway science and engineering, 2010, 5(7): 75-80.)
- [8] 张双洋, 赵人达, 占玉林, 等. 收缩徐变对高铁混凝土拱桥变形影响的模型试验研究 [J]. 铁道学报, 2016, 12: 102-110.
(ZHANG Shuangyang, ZHAO Renda, ZHAN Yulin, et al. Model test study on influence of creep and shrinkage on deformation of high-speed railway concrete arch bridge [J]. Journal of the China railway society, 2016, 12: 102-110.)
- [9] PAN Z F, MENG S P. Three-level experimental approach for creep and shrinkage of high-strength high-performance concrete [J]. Engineering structures, 2016, 120: 23-36.
- [10] 曹万林, 彭世阳, 乔琦云, 等. 钢筋高强再生混凝土足尺梁长期荷载作用下的变形性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(11): 142-148.
(CAO Wanlin, PENG Shiyang, QIAO Qiyun, et al. Experimental study on deformation performance of full-sized high strength recycled reinforced concrete beams under long-term loading [J]. Journal of building structures, 2017, 38(11): 142-148.)
- [11] XUE W, LIU T, ZENG M. Prediction of long-term deflections for high-speed railway prestressed concrete beams [J]. ACI structural journal, 2016, 113(4): 769-778.
- [12] SOUSA C, SOUSA H, NEVES A S, et al. Numerical evaluation of the long-term behavior of precast continuous bridge decks [J]. Journal of bridge engineering, 2012, 17(1): 89-96.
- [13] 张克波, 许康, 吕毅刚, 等. 配筋混凝土柱徐变试验 [J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2011, 8(2): 17-20, 27.
(ZHANG Kebo, XU Kang, Lü Yigang, et al. Experimental research on creep of reinforced concrete pillars [J]. Journal of Changsha university of science and technology (natural science), 2011, 8(2): 17-20, 27.)
- [14] 张运涛, 孟少平, 惠卓. 配筋高性能混凝土收缩徐变试验研究 [J]. 建筑科学, 2010, 26(3): 1-5.
(ZHANG Yuntao, MENG Shaoping, HUI Zhuo. Experimental study on creep and shrinkage of high-performance reinforced concrete [J]. Building science, 2010, 26(3): 1-5.)
- [15] 王永宝, 赵人达, 徐腾飞, 等. 钢管混凝土轴压构件徐变简化计算方法研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33(1): 57-63.
(WANG Yongbao, ZHAO Renda, XU Tengfei, et al. Study on simplified creep calculation method of CFST members under axial loading [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2016, 33(1): 57-63.)
- [16] WANG Y B, ZHAO R D. Experimental study on time-dependent behavior of concrete filled steel tubes in ambient environment [J]. KSCE Journal of civil engineering, 2019, 23(1): 200-209.
- [17] ZOU D, DU C, LIU T, et al. Time-dependent deformations of concrete columns under different construction load histories [J]. Advances in structural engineering, 2019: 1-10.
- [18] 孙海林, 叶列平, 冯鹏. 钢筋混凝土梁长期变形的计算 [J]. 工程力学, 2007, 24(11): 88-92.
(SUN Hailin, YE Lieping, FENG Peng. Long-term deflection prediction of reinforced concrete beams [J]. Engineering mechanics, 2007, 24(11): 88-92.
- [19] 王俊, 王博, 孔亚美. 预应力混凝土梁徐变挠度影响因素分析与计算模式构建 [J]. 建筑结构, 2016, 43(6): 95-99.
(WANG Jun, WANG Bo, KONG Yamei. Analysis of influencing factors of creep deflection of prestressed concrete beams and construction of the calculating model [J]. Building structure, 2016, 43(6): 95-99.
- [20] 王永宝, 贾毅, 廖平, 等. 混凝土收缩徐变预测模型对比分析 [J]. 铁道建筑, 2017, 57(8): 146-150.
(WANG Yongbao, JIA Yi, LIAO Ping, et al. Comparison and analysis of prediction model of concrete shrinkage and creep [J]. Railway engineering, 2017, 57(8): 146-150.)
- [21] Comité Euro-International Du Béton. CEB-FIP model code 2010 [S]. Lausanne: Thomas Telford, 2012.
- [22] 王永宝, 赵人达, 张双洋. 桥梁结构温度场测点布置方法 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(2): 271-278.
(WANG Yongbao, ZHAO Renda, ZHANG Shuangyang. Research on measuring points distribution in the temperature field of bridge structure [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(2): 271-278.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)