

广州新电视塔结构健康监测应变修正计算的研究^{*}

林健富 黄建亮 程瀛 陈树辉

(中山大学 应用力学与工程系, 广州 510275)

摘要 大型钢筋混凝土结构做长期的结构健康监测, 需要综合考虑混凝土的收缩徐变影响. 对应变传感器采集的原始应变数据做适当的修正, 可提高监测的准确度. 本文以广州新电视塔结构健康监测中应变修正的计算为例, 阐述了美国混凝土学会 (ACI) 推荐的收缩徐变分析理论在结构健康监测中的应用, 并结合实验室的试件测试数据, 修正徐变和收缩的具体计算公式, 最终得到修正后的实测应变与理论应变吻合得很好.

关键词 广州新电视塔, 结构健康监测, 应变, 徐变, 收缩

引言

结构健康监测系统研究已经成为航空航天、国防、复合材料、土木工程等领域的热点研究方向, 各国均在新建和已服役的重要工程结构上增设健康监测系统. 美国 20 世纪 80 年代中后期开始在多座桥梁上布设监测传感器, 监视施工质量; 挪威在主跨 530m 的 Skarnsundet 斜拉桥上安装全自动数据采集系统能对风、加速度、倾斜度、应变、温度、位移进行自动监测; 香港青马大桥安装了 500 个加速度传感器、粘贴了大量的应变片, 并安装了一套 GPS 系统, 用以长期监测桥梁服役的安全性; 内地的虎门大桥、徐浦大桥、江阴长江大桥等在施工阶段也安设传感设备, 以备运营期间的实时监测^[1-3].

在大型的钢筋混凝土结构中, 由于收缩徐变很大程度的影响着结构的应力和变形状态, 从而影响结构的施工和运营维护. 近年来发表的有关高层建筑进行收缩徐变实测的结果表明^[4], 当收缩徐变被忽略时, 往往会产生工程所不允许的误差. 因此在开发结构健康监测系统时, 有必要考虑应用精确度高和便于编程的收缩徐变分析模型修正应变传感器采集到的原始应变数据.

本文将要介绍的广州电视塔结构超高, 形态奇异, 为了在结构健康监测中得到较高精度的实测应变, 使用 ACI 推荐的收缩徐变分析模型进行分析, 并结合实验室相关试件的测试数据修正计算公式, 得到可信度较高的结果. 这在高层建筑的结构健康

监测中有重要的工程意义:

高耸结构在施工阶段, 由于其结构超高, 构件体积庞大, 混凝土用量很大, 所以混凝土的徐变收缩对结构的竖向变形有很大影响. 结构竖向变形严重影响结构竖向标高、预埋件的位置及其他装配式构件的安装. 如果不能有效控制和调整, 会给结构施工带来很大不便, 并在结构中产生很大的次应力, 进而可能影响结构的使用寿命^[5,6].

同时在日常结构监测中, 譬如在遇到台风载荷的作用下, 高耸结构的横向应变是十分明显的. 要准确的反映结构的实际变形和受力情况, 在计算应变和应力时有必要剔除徐变收缩的影响, 进而为决策系统提供更加准确可靠的参考数值.

1 American Concrete Institute (ACI) 预测徐变和收缩模型的应用

目前国内外进行了很多钢筋混凝土结构的长期变形的试验和研究, 提出了很多实用简化的计算方法, 并在有关设计规范中进行了规定. 计算徐变主要有老化理论、弹性徐变理论、弹性老化理论、有效模量法、龄期调整有效模量法、继效流动理论等^[7-8,11]. Bazant 把混凝土线性徐变理论中的几种简化方法与精确解作了比较^[9], 计算表明龄期调整的有效模量法是所有简化方法中最为完善和便于工程应用, ACI-209 委员会的报告也推荐此法用于精度要求高的计算^[15], 所以本文将采用 ACI 推荐的按龄期调整有效模量法来计算混凝土的徐变.

徐变和收缩是引起长期变形增大的主要原因,徐变变形与荷载有关,而收缩变形与荷载无关,两者导致长期变形增大的机理并不相同.因此一般建议将徐变变形和收缩变形分开计算^[11],ACI-209委员会的报告给出了收缩计算的经验公式.

1.1 徐变应变的预测计算

1.1.1 考虑龄期的徐变的分段叠加

在低应力状态下,混凝土分段施工加载时,混凝土徐变应变计算符合叠加原理,用 Trost - Bazant 的按龄期调整的有效模量法进行徐变分析^[10-14],混凝土任意时刻的总应变变量可按下式计算^[15-17]:

$$\Phi(t, t_0) = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_c(t_i)}{Ec(t_i)} [1 + \phi(t, t_i)] \quad (1)$$

$$f_c(t_i) = \frac{t_i}{A + Bt_i} f_{c28} \quad (2)$$

其中 t_0 为徐变开始时间, $\Phi(t, t_0)$ 为 t 时刻的总的徐变, $\Delta\sigma_c(t_i)$ 为混凝土预应力的变化量, $Ec(t_i) = 0.043 \times [\rho^3 f_c(t_i)]^{1/2}$ 为弹性模量, $\phi(t, t_i)$ 为徐变系数, f_{c28} 为混凝土养护 28 天抗压强度, ρ 为混凝土的密度, 养护条件参数和的取值见下表 1.

表 1 养护条件参数 A, B 取值表

Table 1 Parameter table of curing condition

Cement Type	Curing Condition	A	B
I	moist curing	4.00	0.85
	Steam curing	1.00	0.95
III	moist curing	2.30	0.92
	Steam curing	0.70	0.98

1.1.2 徐变系数和影响因子的计算

$$\phi(t, t_i) = \frac{(t - t_0)^{0.6}}{10 + (t - t_0)^{0.6}} \phi_{\infty}(t_0) \quad (3)$$

其中 $\phi(t, t_i)$ 为时刻的徐变系数, $\phi_{\infty}(t_0)$ 为徐变系数终值, 其表达式为:

$$\phi_{\infty}(t_0) = 2.35 \gamma_{la} \gamma_{\lambda} \gamma_h \gamma_s \gamma_{\psi} \gamma_{\alpha} \quad (4)$$

其中 γ_{la} 为徐变加载龄期校正系数, γ_{λ} 为徐变相对湿度校正系数, λ 为相对湿度, γ_h 为徐变形状和尺寸校正系数, h 为构件平均厚度, γ_s 为徐变塌落度校正系数, s 为坍塌度, γ_{ψ} 为徐变细集料含量校正系数, ψ 为细集料含量, γ_{α} 为徐变空气含量校正系数, α 为空隙率(%), α 取值为 5, 各系数有如下表达式:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{la} &= 1.25 t_{la}^{-0.118} \quad (\text{湿润养生}) \\ \gamma_{la} &= 1.13 t_{la}^{-0.095} \quad (\text{蒸汽养生}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\gamma_{\lambda} = 1.27 - 0.0067 \lambda \quad (\lambda \geq 40) \quad (6)$$

其中 t_{la} 为加载龄期, λ 为相对湿度.

当构件平均厚度 $h \leq 150\text{mm}$ 时, 参数 γ_h 取值参见表 2, 其中间的数值可以由线性插值得得.

表 2 构件徐变参数 γ_h 取值表

Table 2 Creep parameters of γ_h

Component's average thickness (mm)	Creep shape and size correction γ_h coefficient
50	1.30
75	1.17
100	1.11
125	1.04
150	1.00

当 $150\text{mm} < h < 380\text{mm}$ 时, 有表达式:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_h &= 1.14 - 0.00092h, (t - t_0) < 1 \\ \gamma_h &= 1.10 - 0.00067h, (t - t_0) > 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

当 $h \geq 380\text{mm}$ 时, 有以下表达式:

$$\gamma_h = \frac{2}{3} [1 + 1.13e^{-0.0213v/s}] \quad (8)$$

其中上式子中, v/s 为体积表面积比.

$$\gamma_s = 0.82 + 0.00264s \quad (9)$$

$$\gamma_{\psi} = 0.88 + 0.0024\psi \quad (10)$$

$$\gamma_{\alpha} = 0.46 + 0.09\alpha \geq 1 \quad (11)$$

1.2 收缩应变的预测计算

根据 ACI 的相关规范, 考虑龄期的收缩应变的经验公式^[15-17], 在 t 时刻的收缩应变可表示为:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) = \frac{(t - t_{sh,0})}{35 + (t - t_{sh,0})} \varepsilon_{sh\infty} \quad (12)$$

$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0})$ 为 t 时刻的总收缩应变, $t_{sh,0}$ 为收缩开始的时间, $\varepsilon_{sh\infty}$ 为收缩的终极值, 其表达式为:

$$\varepsilon_{sh\infty} = 780 \times 10^{-6} \gamma_{cp} \gamma_{\lambda} \gamma_h \gamma_s \gamma_{\psi} \gamma_c \gamma_{\alpha} \quad (13)$$

其中 γ_{cp} 为收缩加载龄期校正系数, γ_{λ} 为收缩相对湿度校正系数, γ 为相对湿度, γ_h 为收缩形状和尺寸校正系数, h 为构件平均厚度, γ_s 为收缩塌落度校正系数, s 为坍塌度, γ_{ψ} 为徐变细集料含量校正系数, ψ 变量为细集料含量, γ_c 为收缩水泥含量校正

表 3 构件收缩参数 γ_{cp} 取值表

Table 3 Shrinkage Parameter of γ_{cp}

moist curing time (day)	γ_{cp}
1	1.20
3	1.10
7	1.00
14	0.93
28	0.86
90	0.75

系数, c 为水泥含量, γ_α 为收缩空气含量校正系数, α 为空隙率(%), α 取值为 5.

当混凝土为蒸汽养护时, $\gamma_{cp} = 1$. 当混凝土为湿润养护时, γ_{cp} 取值参见表 3, 其中间的数值可由线性插值得到.

$$\left. \begin{aligned} \gamma_\lambda &= 1.40 - 0.010\lambda, (40 \leq \lambda \leq 80) \\ \gamma_\lambda &= 3.00 - 0.030\lambda, (80 \leq \lambda \leq 100) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

γ_h 参数取值见表 4, 其中间的值可由线性插值得到.

表 4 构件收缩参数 λ_h 取值表

Table 4 Shrinkage Parameter of λ_h

Component's average thickness (mm)	Shrinkage shape and size correction coefficient λ_h
50	1.35
75	1.25
100	1.17
125	1.08
150	1.00

当 $150\text{mm} < h < 380\text{mm}$ 时, 有表达式:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_h &= 1.23 - 0.00015h, (t - t_0) < 1 \\ \gamma_h &= 1.17 - 0.00114h, (t - t_0) > 1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

当 $h \geq 380\text{mm}$ 时, 有以下表达式:

$$\lambda_h = 1.2e^{-0.00472v/s} \quad (16)$$

其中上式中 v/s 为体积表面积比.

$$\gamma_s = 0.89 + 0.00161s \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_\psi &= 0.30 + 0.014\psi, (\psi \leq 50) \\ \gamma_\psi &= 0.90 + 0.002\psi, (\psi > 50) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\gamma_c = 0.75 + 0.00061c \quad (19)$$

$$\gamma_\alpha = 0.95 + 0.008\alpha \quad (20)$$

1.3 实际实验中徐变收缩应变的计算公式的拟合修正

本文主要是针对广州新电视塔内框筒的钢筋混凝土结构做健康监测, 其中上述预测徐变和收缩应变的计算公式, 需要根据工程实际选取典型的试件进行试验得到相关的拟合数据, 然后对计算公式做适当的修正. 内框筒监测的截面主要有 12 个, 钢筋混凝土内框筒混凝土强度等级分别为: 截面 1 为 C80, 截面 2 为 C75, 截面 3 为 C70, 截面 4-6 为 C60, 截面 7-8 为 C50, 截面 9-12 为 C45. 这里主要由香港理工大学的实验室选取了强度为 C45, C60 的混凝土试件按照相关的规范做试验.

1) 根据试验的数据拟合分别得到 C45, C60 试件的徐变系数和徐变系数终值的表达式:

$$\phi(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^{0.6}}{1.952 + (t - t_0)^{0.6}} \phi_\infty(t_0) \quad (21)$$

$$\phi_\infty(t_0) = 0.558\gamma_{ta}\gamma_\lambda\gamma_h\gamma_s\gamma_\psi\gamma_\alpha \quad (22)$$

$$\phi(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^{0.6}}{1.537 + (t - t_0)^{0.6}} \phi_\infty(t_0) \quad (23)$$

$$\phi_\infty(t_0) = 0.542\gamma_{ta}\gamma_\lambda\gamma_h\gamma_s\gamma_\psi\gamma_\alpha \quad (24)$$

2) 根据试验的数据拟合分别得到 C45, C60, 试件的收缩应变公式和收缩终值的表达式:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) = \frac{(t - t_{sh,0})}{15.5 + (t - t_{sh,0})} \varepsilon_{sh\infty} \quad (25)$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = 432.8 \times 10^{-6} \gamma_{cp}\gamma_\lambda\gamma_h\gamma_s\gamma_\psi\gamma_c\gamma_\alpha \quad (26)$$

$$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) = \frac{(t - t_{sh,0})}{13.3 + (t - t_{sh,0})} \varepsilon_{sh\infty} \quad (27)$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = 389 \times 10^{-6} \gamma_{cp}\gamma_\lambda\gamma_h\gamma_s\gamma_\psi\gamma_c\gamma_\alpha \quad (28)$$

根据 C45, C60 试件的测试结果拟合公式, 在修正的徐变和收缩计算公式(21) - (28)中, 徐变系数, 徐变系数终值, 收缩应变公式和收缩终值表达式中相关的系数, 最后分别取两试件拟合系数的均值作为最终参数, 用于各个截面的徐变和收缩的计算.

2 工程实例

2.1 工程概况

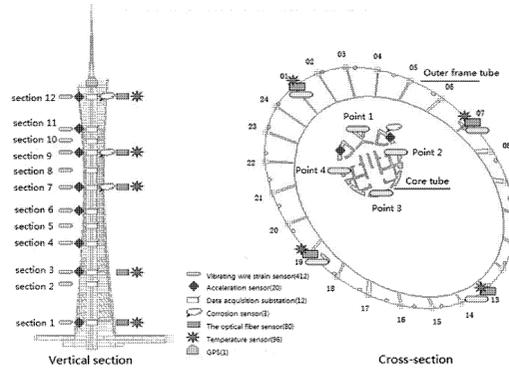


图 1 广州新电视塔传感器分布图

Fig. 1 Distribution of sensors in the Guangzhou New TV Tower

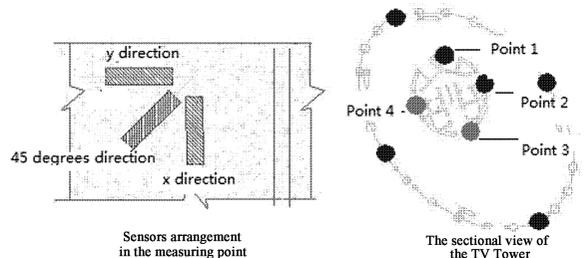


图 2 广州新电视塔振弦式应变传感器安装图

Fig. 2 Vibrating wire strain sensor installation diagram in Guangzhou New TV Tower

广州新电视塔是广州市新的地标性的重点工程,矗立于城市的中轴线上,建成后将承担 2010 年的亚运会转播任务.新电视塔高 610m,其中主塔体高 454m,天线桅杆高 156m,属于超高耸建筑.为了把握该塔运营期间的服役状态,香港理工-中山大学联合体在该塔中安装运营可视化的结构健康监测系统.在监测中广泛的采用了振弦式应变传感器,温度传感器,加速度传感器,风速仪,GPS 等仪器,其分布见图 1 所示.

在结构健康监测里,使用振弦应变传感器监测结构的应变十分常见和有效,因此在广州新电视内框筒的关键部位布置了大量的振弦应变传感器,用于施工监测系统和长期运营健康监测系统.整塔有 12 个监测截面,每个截面有 4 组测点(每组测点包含 3 个振弦式应变传感器和 1 个温度传感器),共 192 个传感器,采样频率为 1/60HZ.其中采集到的

数据的后处理,采用上述的按龄期调整的有效模量法和预测收缩使用跟龄期有关的经验公式,计算出混凝土结构中的徐变和收缩,最终得到剔除徐变和收缩影响的应变,计算结果经与理论值对比,能较准确的反映工程实际.

2.2 实例计算

现分别选取广州新电视塔内框筒的截面 3 和截面 6 的测点 3 和测点 4 的数据进行计算说明,其传感器的具体位置分布见图 2.计算徐变的加载龄期开始时间取 $t_0 = 16$,收缩的加载龄期开始时间取 $t_0 = 7$.水泥的类型为 III,护养条件为湿润护养,即 $A = 2.30, B = 0.92$.表 5-a,表 5-b 分别为截面 3 和截面 6 分段计算徐变应变时用到的混凝土结构中实测应力在该龄期时的增量数据的测量值. $\Delta\sigma_x, \Delta\tau_{xy}, \Delta\sigma_y$ 分别为竖直方向,45 度方向,水平方向应力的增量.表 6 为计算徐变和收缩应变时对应的参数值.

表 5a 截面 3 混凝土结构中实测应力的增量数据

Table 5a Measured data of section 3 for the incremental stress of concrete

Height(m)	Loading time (day)	Measuring point 3	Measuring point 3	Measuring point 3	Measuring point 4	Measuring point 4	Measuring point 4
		$\Delta\sigma_x$ (MPa)	$\Delta\tau_{xy}$ (MPa)	$\Delta\sigma_y$ (MPa)	$\Delta\sigma_x$ (MPa)	$\Delta\tau_{xy}$ (MPa)	$\Delta\sigma_y$ (MPa)
121.2	33	-0.3410	-0.0220	0.0541	-0.5650	0.0513	0.0290
121.2	61	-1.0600	-0.0285	0.0655	-1.2200	0.0972	0.0156
121.2	131	-2.9690	0.0631	-0.1150	-2.8740	0.0631	0.0676
121.2	194	-4.1560	-0.1440	0.1070	-3.9000	0.0480	0.0902
121.2	222	-4.7420	-0.1740	0.1302	-4.5488	0.04592	0.11252
121.2	306	-5.6210	-0.2190	0.1650	-5.5220	0.0428	0.1460
121.2	376	-6.5470	-0.2570	0.1870	-6.4950	0.0262	0.1840
121.2	495	-6.7520	-0.2810	0.2010	-6.8650	-0.0051	0.2070
121.2	579	-7.1710	-0.3110	0.2220	-7.4420	-0.0430	0.2480
121.2	649	-7.4050	-0.3160	0.2230	-7.6840	-0.0390	0.2530
121.2	775	-7.8380	-0.3320	0.2240	-8.1060	-0.0226	0.2570
121.2	866	-7.8910	-0.3240	0.2240	-8.1740	-0.0210	0.2580

表 5b 截面 6 混凝土结构中实测应力的增量数据

Table 5b Measured data of section 6 for the incremental stress of concrete

Height(m)	Loading time (day)	Measuring point 3	Measuring point 3	Measuring point 3	Measuring point 4	Measuring point 4	Measuring point 4
		$\Delta\sigma_x$ (MPa)	$\Delta\tau_{xy}$ (MPa)	$\Delta\sigma_y$ (MPa)	$\Delta\sigma_x$ (MPa)	$\Delta\tau_{xy}$ (MPa)	$\Delta\sigma_y$ (MPa)
230.4	67	-1.8912	0.0148	0.2255	-1.9350	-0.0023	0.0310
230.4	95	-2.5843	-0.0302	0.2918	-2.6744	-0.0098	0.0748
230.4	179	-3.6239	-0.0977	0.3913	-3.7835	-0.0210	0.1404
230.4	249	-4.7308	-0.2031	0.5283	-5.0252	-0.1638	0.2453
230.4	368	-5.1423	-0.3200	0.6119	-5.8975	-0.2990	0.3033
230.4	452	-5.4213	-0.4232	0.6703	-6.6025	-0.4005	0.3940
230.4	522	-5.6956	-0.4274	0.6991	-6.9613	-0.4099	0.4099
230.4	648	-6.1955	-0.4233	0.7479	-7.5529	-0.4115	0.4313
230.4	739	-6.2403	-0.4268	0.7533	-7.6603	-0.4161	0.4378

表6 计算徐变和收缩的参数表

Table 6 The parameters for calculation of creep and shrinkage

Section number	Component's average thickness h (mm)	Relative humidity λ (%)	Slump constant s	Fine aggregate content ψ (%)	Cement factor c (km/m ³)	Density ρ (km/m ³)	Measuring compressive strength $f_{c,28}$ (MPa)
3	1071	75	240	42.86	337	2412	82.3
6	1071	75	240	37.99	380	2380	72.5

这里分别选取了第3和第6监测截面的测点3和测点4,2009年10月25日的数据做算例计算,计算线弹性应变,徐变收缩和剔除徐变收缩后的应变的值(传感器的采样频率为1/60Hz,这里的应变都是指一天内应变的均值),其中 $\varepsilon_x, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_y$ 分别代

表竖直方向,45度方向,水平方向所对应的应变, T 为温度值.工程应用里计算混凝土结构中的应变主要考虑线弹性应变,这里取线弹性应变为应变计算的参考理论值,而实测应变是指剔除了徐变应变和收缩应变后的实际应变.

表7a 截面3测点3和测点4的理论应变与实测应变的对比

Table 7a The comparison for theoretical strain and measured strain in section 3 for point 3 and point 4

Strain comparison	Measuring point3 ε_x ($\mu\varepsilon$)	Measuring point3 ε_{xy} ($\mu\varepsilon$)	Measuring point3 ε_y ($\mu\varepsilon$)	Measuring point3 T (°C)	Measuring point4 ε_x ($\mu\varepsilon$)	Measuring point4 ε_{xy} ($\mu\varepsilon$)	Measuring point4 ε_y ($\mu\varepsilon$)	Measuring point4 T (°C)
Elastic strain (theoretical value)	-198.83	-86.54	45.17	25.65	-206.22	-79.91	47.45	26.83
Mesured total strain	-272.97	-142.26	36.93	25.65	-307.51	-113.68	50.03	26.83
Creep strain	-43.15	-18.75	9.66	25.65	-44.01	-17.11	10.07	26.83
Shrinkage strain	-33.42	-33.42	-33.42	25.65	-33.42	-33.42	-33.42	26.83
Strain eliminated creep and shrinkage (corrected strain)	-196.4	-90.1	60.69	25.65	-230.09	-63.16	73.37	26.83

表7b 截面6测点3和测点4的理论应变与实测应变的对比

Table 7b The comparison for theoretical strain and measured strain in section 6 for point 3 and point 4

Strain comparison	Measuring point3 ε_x ($\mu\varepsilon$)	Measuring point3 ε_{xy} ($\mu\varepsilon$)	Measuring point3 ε_y ($\mu\varepsilon$)	Measuring point3 T (°C)	Measuring point4 ε_x ($\mu\varepsilon$)	Measuring point4 ε_{xy} ($\mu\varepsilon$)	Measuring point4 ε_y ($\mu\varepsilon$)	Measuring point4 T (°C)
Elastic strain (theoretical value)	-177.37	-74.92	55.53	25.43	-214.46	-93.67	54.44	25.26
Mesured total strain	-256.06	-108.83	3.34	25.43	-322.82	-126.97	25.56	25.26
Creep strain	-37.83	-15.94	11.82	25.43	-45.18	-19.66	11.45	25.26
Shrinkage strain	-41.79	-41.79	-41.79	25.43	-41.79	-41.79	-41.79	25.26
Strain eliminated creep and shrinkage (corrected strain)	-176.26	-50.95	33.31	25.43	-235.62	-65.43	55.89	25.26

从表7-a,表7-b中的计算结果,可以得出以下的分析结果:

1) 振弦应变传感器直接测量出来的总应变值跟线弹性应变理论参考值相差很大,如果不经过适当的数据处理,很有可能会得出错误的分析结果.

2) 在大型的混凝土结构中,徐变应变,收缩应变在计算中有明显的影响作用的.

3) 剔除了徐变和收缩影响后应变的实测值,跟

线弹性应变理论值吻合的较好,反映出本文使用的计算徐变和收缩应变的方法能很好的符合工程实际,能计算出准确的数值.

3 结论

本文结合具体工程项目系统的开发,对振弦应变传感器中应变修正的后处理的计算做了研究,得到如下结论:

1) 振弦应变传感器采集来的数据一般不能直接应用,必须经过相关的处理才能作为分析的依据,否则可能产生较大的工程误差,甚至导致错误的结论.

2) 准确计算混凝土结构由于收缩徐变引起的结构变形,对混凝土结构的设计、正常使用及维护都具有重要的意义.

3) 使用考虑龄期的有效模量法计算徐变和根据收缩应变的经验公式计算收缩,并结合具体的实验室的试件测试数据,修正计算公式,算法简便可行,容易实现计算机编程,很好的提高了应变计算的准确性,为进一步的受力分析等后续工作做好了准备.

总的来说对传感器采集的数据的后处理的方法研究,在健康监测系统的开发上是一个重要的环节,这将关系到能否精确的反映实际,切实的监测结构的健康状态.

参 考 文 献

- Shi W Z , Ko J M , Zhao C Y , et al . A bridge structural health monitoring information system based on GIS and DBMS, Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil , Mechanical, and Aerospace Systems , San Diego ,CA ,USA ,edited by Masayoshi Tomizuka, Proc. SPIE,2005, 5765: 1012 ~ 1020
- Chan T H T , Ko J M , Li Z X. Fatigue evaluation for Tsing Ma bridge using structural health monitoring data, Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems, Newport Beach, CA ,USA, edited by Steven B. Chase, A. Emin Aktan . Proc. SPIE, 2001,4337: 335 ~ 346
- 李惠,周文松,欧进萍. 大型桥梁结构智能健康监测系统集成技术研究. 土木工程学报, 2006, 39(2):46 ~ 52 (Li H , Zhou W S , Ou J P . A study on system integration technique of intelligent monitoring systems for soundness of long-span bridges . *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(2):46 ~ 52(in Chinese))
- 林南薰,陈叶军. 高层钢筋混凝土结构靠里建造过程的收缩徐变效应. 华南理工大学学报,2003,31(2):71 ~ 76 (Lin N X,Chen Y J. Effect of shrinkage and creep of reinforced concrete tall buildings in view of construction Procedures . *Journal of south china university of technology*, 2003,31(2):71 ~ 76 (in Chinese))
- 崔晓强,石端学,胡玉银. 广州新电视塔核心筒施工阶段收缩徐变研究. 施工技术, 2009,38(5):13 ~ 14 (Cui X Q, Shi D X , Hu Y Y . Analysis on shrinkage and creep of Guangzhou New TV tower core tube in construction . *Construction Technology*, 2009,38(5):13 ~ 14 (in Chinese))
- 沈蒲生,方辉,夏心红. 混凝土收缩徐变对高层混合结构的影响及对策. 湖南大学学报, 2008,35(1):1 ~ 5 (Shen P S , Fang H , Xia X H. Influence of creep and shrinkage on tall hybrid structures and its countermeasures. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2008,35(1):1 ~ 5 (in Chinese))
- Z P Bazant. Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future. *Nuclear Engineering and Design*, 2001, 203: 27 ~ 38
- R K Sharma, S Maru , A K Nagpal. Simplified procedure for creep and shrinkage effects in reinforced concrete frames. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(10):1545 ~ 1552
- Z P Bazant, Robert L. Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete. *Chichester Wiley Press*,1988:99 ~ 176
- Z P Bazant. Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus method. *ACI, Proceedings*, 1972, 69(4): 212 ~ 217
- 孙海林,叶列平,冯鹏. 钢筋混凝土梁长期变形的计算. 工程力学,2007,24(11):88 ~ 91 (Sun H L ,Ye L P , Feng P. Long-term deflection prediction of reinforced concrete beams. *Engineering mechanics*, 2007,24(11):88 ~ 91 (in Chinese))
- 张治成. 大跨度钢管混凝土拱桥的徐变分析. 工程力学,2007,24(5):151 ~ 160 (Zhang Z C. Creep analysis of long span concrete-filled steel tubular arch bridges. *Engineering Mechanics*, 2007,24(5):151 ~ 160 (in Chinese))
- 孙永明,黄侨,任远. 基于组合单元的混凝土结构徐变分析方法. 工程力学,2009,26(1):98 ~ 103 (Sun Y G, Huang Q, Ren Y. Creep analysis method of concrete structures based on composite elements. *Engineering Mechanics*, 2009,26(1):98 ~ 103 (in Chinese))
- 胡狄,陈政清. 预应力混凝土桥梁徐变分析的全量形式自动递进法. 工程力学,2004,21(5):41 ~ 45 (Hu D, Chen Z Q . Automatically step-up method for creep analysis of prestressed concrete bridges. *Engineering Mechanics*, 2004,21(5):41 ~ 45 (in Chinese))
- ACI 209R-92. Prediction of Creep ,Shrinkage , and Temperature Effects in Concrete Structures . USA: American

- Concrete Institute, 1992,1-12;32 ~ 37
- 16 ACI 435R-95. Control of deflection in concrete structures. USA; American Concrete Institute, 1995;3 ~ 7
- 17 ACI 318M-05. Building code requirements for structural concrete and commentary. USA; American Concrete Institute, 2005;95 ~ 104

STUDY ON THE MODIFIED STRAIN OF GUANGZHOU NEW TV TOWER STRUCTURAL HEALTH MONITORING *

Lin Jianfu Huang Jianliang Cheng Ying Chen Shuhui

(*Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*)

Abstract In the long-term structural health monitoring for large-scale steel reinforced concrete structure, the creep and shrinkage effect must be considered. Otherwise it can cause inaccurate or wrong results. The modification on the original data from strain sensors can improve the monitoring precision. The influence of creep and shrinkage on the engineering project was studied. Then using the data from the Guangzhou New TV Tower structural health monitoring system, how to use the method from ACI to predict the creep and shrinkage was explained. Finally, a specific project example for Guangzhou New TV Tower was used to verify that the modified strain can fit the theoretical strain very well and has higher reliability.

Key words Guangzhou new TV tower, structural health monitoring, strain, creep, shrinkage