

# 基于等效时间的混凝土徐变

张子明<sup>1</sup>,周红军<sup>2</sup>,殷 波<sup>3</sup>

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.南京银城房地产开发公司,江苏 南京 210024;  
3.扬州大学水利建筑学院,江苏 扬州 225009)

**摘要** 对不同养护温度下的混凝土徐变进行了研究,用化学反应速率描述温度对混凝土徐变的影响.用最小二乘法回归分析实验数据,探讨了养护温度与混凝土徐变之间的关系,提出了用等效时间表示混凝土弹性模量和徐变度的公式.

**关键词** 混凝土 徐变度 等效时间 最小二乘回归分析法 反演分析

**中图分类号** TV431 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2005)02-0173-04

温度影响混凝土徐变,尤其对大体积混凝土结构,如大坝、核反应堆和放射性废料贮藏器等混凝土结构的影响更为严重.一方面,温度升高加速了混凝土徐变,即徐变速率增加;另一方面,温度升高加速了水泥的水化反应速率,从而降低了徐变的发展.等效时间就是在参考温度下,达到相同水化程度所需要的时间等效于在其他温度下所需要的时间,因此,可以用等效时间描述温度对混凝土成熟快慢的影响.一般情况下,温度越高,水化反应越快,达到相同水化程度所需要的实际时间越短,反之亦然.对于混凝土徐变而言,等效持荷时间就是在其他温度下,达到相同徐变所需要的持荷时间等效于在参考温度下所需要的持荷时间<sup>[1]</sup>.

## 1 徐变特性参数的反演分析

### 1.1 徐变公式的选用

混凝土徐变与应力历史有关,因此 Bazant 教授提出的双幂徐变函数式不便于计算大型工程的应力和位移.本文在拟合徐变参数时采用指数函数瞬时弹性模量和徐变度表达式<sup>[2]</sup>,分别对瞬时弹性模量和徐变度进行拟合.由于指数函数存在递推关系,不必记录应力历史,大大提高了有限元程序的计算效率,具有很好的实际应用价值.

### 1.2 反演分析的方法

常用的反演分析方法有:最小二乘法、单钝形加速法、变量轮换法、模式搜索法、鲍威尔法、可变容差法、复合形法等,本文采用最小二乘法.

### 1.3 瞬时弹性模量和徐变度公式中温度参数的反演分析

#### 1.3.1 $Q$ 的确定

根据 Arrhenius 方程提出等效时间与温度关系的表达式<sup>[3]</sup>,即

$$\tau_e = \int \beta_T dt \quad (1)$$

$$\beta_T = \exp \left[ Q \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

$$Q = \frac{E}{R}$$

式中: $Q$ ——化学活动能与气体常数之比; $T_r$ ——参考温度,一般取 293 K; $T$ ——混凝土的当前温度,K;  
 $\beta_T$ ——类比系数; $\tau_e$ ——等效时间,d.

一般认为,化学活动能是随着温度的升高而增大,文献[4]根据绝热温升实验结果,采用 Arrhenius 方程对热学参数  $Q$  在 3 种温度下的值进行了拟合,如表 1 所示.

根据表 1 中  $T$  与  $Q$  的关系对其进行回归分析,分析结果如图 1 所示, $Q$  与  $T$  的关系式为

$$Q = 16.187T^{1.0002}$$

(3)

1.3.2 瞬时弹性模量参数的反演分析

对于给定的混凝土,瞬时弹性模量和等效加载龄期之间存在唯一关系,因此,混凝土瞬时弹性模量可以表示为等效加载龄期的函数.基于等效加载龄期的混凝土瞬时弹性模量可用复合指数式表示:

$$E(\tau_e) = E_0[1 - \exp(-a\tau_e^b)]$$

(4)

式中: $\tau_e$ ——等效加载龄期,d; $E_0$ —— $\tau_e \rightarrow \infty$  时的混凝土最终弹性模量; $a, b$ ——待定参数.

实验研究表明<sup>[5]</sup>,不同养护温度下混凝土的早期强度和最终强度差异很大.因此,对于某种固定配合比的混凝土, $E_0$  是一个变量,受到养护温度的影响.在实际时间域,瞬时弹性模量在不同温度下的拟合曲线如图 2(a)所示.

参考温度取为 293 K,首先计算不同养护温度下的  $Q$  值,再将  $Q$  代入式(2)计算  $\beta_T$  值,进而得到等效加载龄期  $\tau_e$ .计算结果、实验数据、不同养护温度下单独拟合的最终弹性模量值以及整体拟合的瞬时弹性模量值如表 2 所示<sup>[1]</sup>.

表 1  $Q$  与  $T$  的关系

Table 1 Relation between  $Q$  and  $T$

| 绝对温度<br>$T/K$ | $Q/K$ |
|---------------|-------|
| 277.4         | 4 495 |
| 296.3         | 4 801 |
| 313.0         | 5 072 |

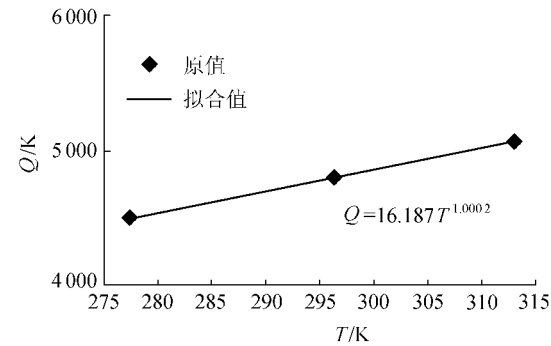


图 1  $Q$  与  $T$  的关系  
Fig.1 Relation between  $Q$  and  $T$

表 2 不同养护温度、不同加载龄期下的瞬时弹性模量及其拟合值

Table 2 Modulus of elasticity and-best fit curves for different curing temperatures and loading ages

| 养护温度<br>$T/K$ | 实际加载龄期<br>$\tau/d$ | $Q/K$    | 类比系数<br>$\beta_T$ | 等效加载龄期<br>$\tau_e/d$ | 弹性模量实验值<br>$E/GPa$ | 不同养护温度下的最终弹性模量值<br>$E_0/GPa$ | 弹性模量拟合值<br>$E(\tau_e)/GPa$ |
|---------------|--------------------|----------|-------------------|----------------------|--------------------|------------------------------|----------------------------|
| 293           | 7                  | 4 748.18 | 1.00              | 7.00                 | 18.53              | 32.61                        | 19.73                      |
|               | 28                 | 4 748.18 | 1.00              | 28.00                | 30.11              | 32.61                        | 25.20                      |
|               | 60                 | 4 748.18 | 1.00              | 60.00                | 29.98              | 32.61                        | 27.81                      |
|               | 180                | 4 748.18 | 1.00              | 180.00               | 33.63              | 32.61                        | 30.57                      |
| 313           | 7                  | 5 072.36 | 3.02              | 21.16                | 18.00              | 27.89                        | 20.65                      |
|               | 28                 | 5 072.36 | 3.02              | 84.64                | 20.16              | 27.89                        | 24.64                      |
|               | 60                 | 5 072.36 | 3.02              | 181.37               | 23.29              | 27.89                        | 26.16                      |
|               | 180                | 5 072.36 | 3.02              | 544.10               | 24.28              | 27.89                        | 27.39                      |
| 338           | 7                  | 5 477.58 | 12.05             | 84.34                | 16.57              | 18.86                        | 16.66                      |
|               | 28                 | 5 477.58 | 12.05             | 337.36               | 19.05              | 18.86                        | 18.25                      |
|               | 60                 | 5 477.58 | 12.05             | 722.92               | 19.10              | 18.86                        | 18.64                      |
|               | 180                | 5 477.58 | 12.05             | 2 168.76             | 18.44              | 18.86                        | 18.83                      |

应用最小二乘法进行曲面拟合,得到瞬时弹性模量在各种温度下整体拟合的参数: $a = 0.482, b = 0.337$ ,其拟合曲面如图 2(b)所示.

用等效加载龄期表示的瞬时弹性模量公式为

$$E(\tau_e) = E_0[1 - \exp(-0.482\tau_e^{0.337})]$$

(5)

1.3.3 徐变度参数的反演分析

采用指数徐变度公式,即

$$C(t_e, \tau_e) = \left(A_1 + \frac{B_1}{\tau_e^{G_1}}\right)\left\{1 - \exp[-r_1(t_e - \tau_e)]\right\} + \left(A_2 + \frac{B_2}{\tau_e^{G_2}}\right)\left\{1 - \exp[-r_2(t_e - \tau_e)]\right\}$$

(6)

式中: $C$ ——徐变度; $A_1, B_1, G_1, r_1, A_2, B_2, G_2, r_2$ ——待定参数; $t_e$ ——等效时间,d; $\tau_e$ ——等效加载龄期,d.

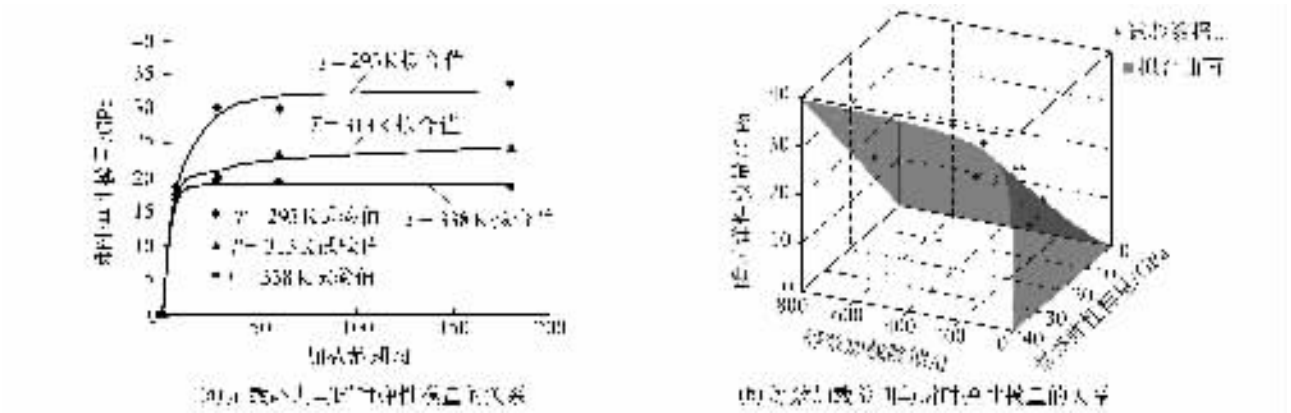


图 2 加载龄期以及等效加载龄期与瞬时弹性模量之间的关系

Fig.2 Relation between modulus of elasticity, loading age and equivalent loading age

同样根据式(3)计算出不同养护温度下的  $Q$  值,代入式(2)计算出不同养护温度下的  $\beta_T$  值,再将  $\beta_T$  代入式(1),得到等效加载时间  $\tau_e$  和等效持荷时间  $(t_e - \tau_e)$ 。

应用最小二乘法对徐变度进行全域曲线拟合,采用与拟合瞬时弹性模量相同的步骤,其拟合曲线、曲面分别见图 3 和图 4。图 3(a), 3(b), 3(c)是在不同养护温度下分别绘制的拟合曲线,图 4 是任意养护温度下等效加载龄期、等效持荷时间与徐变度之间的空间拟合曲面图。

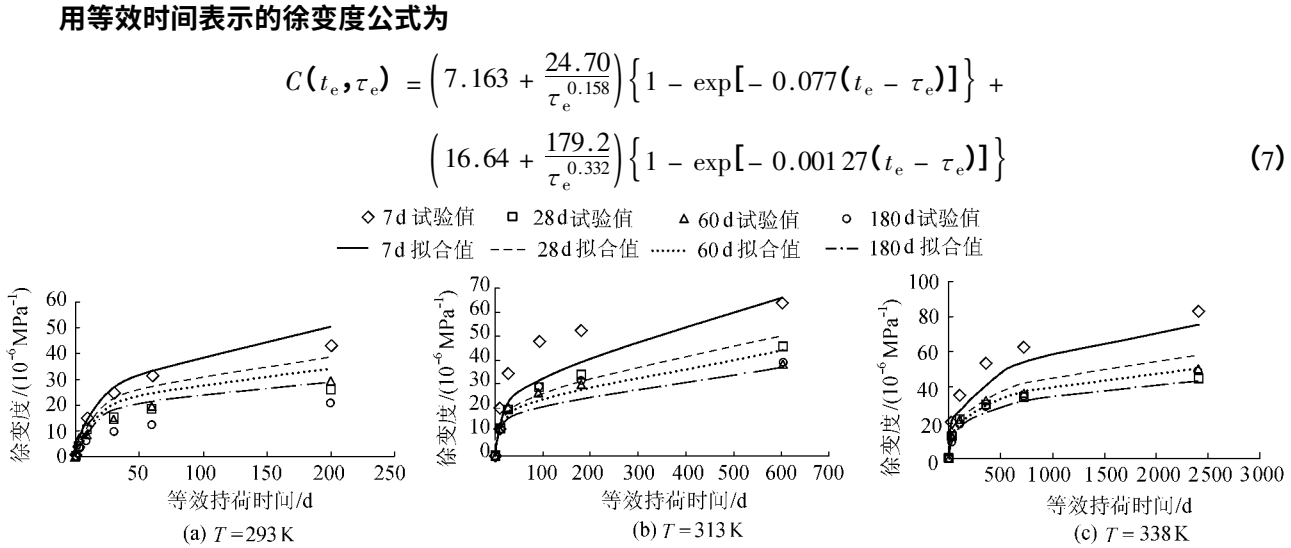


图 3 复合指数式表示的基于等效时间的徐变度

Fig.3 Specific creep based on equivalent time

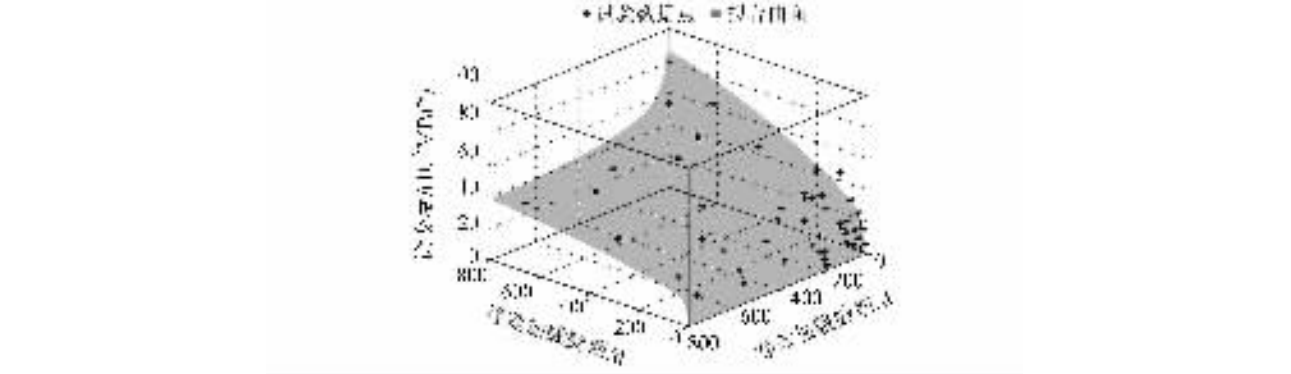


图 4 等效加载龄期、等效持荷时间与徐变度之间的空间关系

Fig.4 Relation between specific creep, equivalent loading age and equivalent load bearing time

2 结 语

用最小二乘法回归分析瞬时弹性模量和徐变度的实验数据,提出了基于等效时间的混凝土徐变模型.等效时间反应了水泥水化学反应速率随温度的变化,因此,温度对混凝土徐变特性的影响可用混凝土的等效龄期定量表示.可以看出,拟合值与实验值吻合较好.存在误差的主要原因为:(a)目前还没有比较成熟的方法直接确定  $Q$  值,只能根据试验数据回归分析;(b)瞬时弹性模量和徐变度的计算模型不够精确,需要进一步寻求更为符合实际情况的计算模型;(c)混凝土徐变试验经历的时间长,试验资料本身的规律性较差.

参考文献:

[1] BAZANT Z P,KIM J K. Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete :Part 4-Temperature effects [J] . Material and Structures,1992,(25) 84—94.  
[2] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制 [M] .北京:中国电力出版社,1999. 165—204.  
[3] 张子明,宋智通,黄海燕. 混凝土绝热温升和热传导方程的新理论 [J] .河海大学学报(自然科学版),2002,30(3) 1—6.  
[4] 张子明,王嘉航,周红军,等. 混凝土温度特性参数的反演分析 [J] .红水河,2003,22(1) 24—27.  
[5] 周红军,张子明. 温度对混凝土徐变的影响 [J] .河海大学学报(自然科学版),2003,31(增刊) 134—137.

Equivalent time-based concrete creep

ZHANG Zi-ming<sup>1</sup>, ZHOU Hong-jun<sup>2</sup>, YIN Bo<sup>3</sup>

- (1. College of Civil Engineering, Hohai Univ. , Nanjing 210098, China ;  
2. Nanjing Yincheng Real Estate Development Co. Ltd. , Nanjing 210024, China ;  
3. College of Architectural Science and Engineering, Yangzhou Univ. , Yangzhou 225009, China)

**Abstract** :A study was made on concrete creep under different curing temperatures, and the comprehensive effects of time and temperature on creep development were expressed with the chemical reaction rate. By regression analysis of experimental data with the least square method, the relationship between curing temperature and concrete creep was discussed, and formulas for the elastic modulus and specific creep of concrete expressed with equivalent time were put forward.

**Key words** :concrete ; specific creep ; equivalent time ; least square regression method ; back analysis