第18卷第3期 佳木斯大学学报(自然科学版) Vol.18 No.3 2000 年 9 月 Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition) Sep. 2000

文章编号:1008-1402(2000)03-0285-04

# 混凝土干燥收缩经验公式研究◎

## **邢艳芳<sup>1</sup>**, 徐新生<sup>2</sup>

(1.佳木斯大学职业技术学院 黑龙江 佳木斯 154007 2.山东建材学院 山东 济南 250022)

摘 要: 介绍了国外关于混凝土干燥收缩经验公式方面最新研究成果,并进行了分析比较,供研究 设计人员参考.

关键词: 干燥收缩;ACI式;CEB式;BP式;BP-KX式 中图分类号: TU511.3 文献标识码:A

#### 0 引 言

置于未饱和空气中的混凝土因水分失散而引起的体积缩小变形称为干燥收缩变形,是砼固有的性质. 当砼处于自由状态时,干燥收缩不会导致什么不良后果,当砼处于不同程度约束状态的结构工程中,干燥 收缩易引起砼开裂,影响砼强度和耐久性,设计中应引起足够的重视.但是,砼干燥收缩时间较长,实验室 测度十分困难,而且也不可能再现砼构件现场湿度和温度环境,应用中通常采用经验公式来预测干燥收 缩.

至今为止,世界各国已提出许多干燥收缩经验公式,其中最具代表性的可列举 ACI209 委员会提出 ACI 式<sup>11</sup>、欧洲流行 CEB 式<sup>21</sup>及 Bazant 和 Panula 提出的 BP 式<sup>[3]</sup>等.在我国目前采用中国建筑科学研究院 砼所负责的《混凝土收缩与徐变试验研究》专题协作组提出的多函数方程<sup>91</sup>来进行计算.

上述经验公式均是通过实测数据把握各种影响因素所提出的 精度方面势必会受到测定误差的影响, 为进一步提高预测精度,人们在不断地进行经验公式的修正和完善工作,据资料分析目前国外采取提高预 测精度的有效措施可归纳为两点(1),以扩散理论为基础,推测干燥收缩的发展过程(2),使用可测得较 精确值的短期(28天或一年)干燥收缩实测值预测干燥收缩最终值.下面本文论述砼干燥收缩方面最近研 究成果供参考.

#### 1 以往的砼干燥收缩经验公式

鉴于篇幅 本文仅扼要介绍 ACI 式和 BP 式 ,公式的细部请参阅有关文献.

1.1 ACI 式

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{t}{\alpha + t} \varepsilon_{sh\,\infty} \tag{1}$$

其中  $: \epsilon_{t}(t)$  — 干燥时间 t 时的干燥收缩应变值;

ε.

 $\epsilon_{shoo}$  —干燥收缩应变最终值.

$$_{h\infty} = 780 \times \beta_{cp} \cdot \beta_{H} \cdot \beta_{\alpha} \cdot \beta_{s} \cdot \beta_{p} \cdot \beta_{ce} \cdot \beta_{Ac} \times 10^{-6}$$
(2)

α— 初期养护决定的常数(湿润养护为 35 蒸气养护为 50);

t—干燥时间;

 $\beta_{cp}$ , $\beta_{H}$ , $\beta_{a}$ , $\beta_{s}$ , $\beta_{p}$ , $\beta_{ce}$ , $\beta_{Ac}$ 分别是干燥前养护时间、湿度条件、试件的平均厚度或体积—表面积率、塌落

① 收稿日期 2000 - 07 - 03 作者简介 :师艳芳(1963-),女 黑龙江佳木斯人,佳木斯大学职业技术学院讲师.

度、砂率、单位水泥量、含气量影响修整系数.

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh\,\infty} \cdot K_h \, S(t) \tag{3}$$

其中: $\epsilon_{sh}(t)$ :干燥时间 t 时的干燥收缩应变值.  $\epsilon_{sh\infty}$ :干燥收缩应变的最终值(与 ACI 式不同 ,由砼配合比 及抗压强度、弹性模量等因素决定 ,但不包含形状、尺寸、湿度等因素 ,这些因素在(3)式中体现 ).

K<sub>h</sub>—湿度相关系数;

h--环境湿度;

 $h \leq 0.98$  时  $K_h = 1 - h^3$ ;

h = 1.00 时 , $K_h = -0.2$ ;

S( t )— 与干缩时间 t 有关的干缩过程函数;

τ— 与构件形状、构件尺寸(体积 — 表面积率),温度、湿度有关的常数.

#### 2 干燥收缩经验公式最近的研究成果

ACI 式和 BP 式均是把干缩的最终值和应变随时间的进行过程以合适的形式构成数式来表达砼干燥时间 *t* 时的应变 ,最近的研究仍不改变这类经验公式的形式 ,而是在增加预测精度方面尝试改进以往经验 公式.

2.1 ACI 式的修正

Almudaiheem 等对不同形状、尺寸的试件进行了干缩试验 结果表明干缩应变的最终值与试件的尺寸、 形状无关 ,形状、尺寸仅影响干缩的进行过程<sup>[.4</sup>据此 Almudaiheem 等提出了修正 ACI 式的收缩经验公式 (4),该式以变量 N 取代了 ACI 式中相应的干燥前养护条件决定的常量  $\alpha$ .依据试验结果 , N 与体积 – – 表体积率 V/S 存在如图 1 所示的关系.因此在式(5)中 ,当 V/S  $\geq$  7.6mm 和 V/S < 7.6mm 时 N 用两种形 式的函数式表式.

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{t}{N+t} \varepsilon_{sh\,\infty} \tag{4}$$

其中: $\varepsilon_{sh}(t)$ ,  $\varepsilon_{sh\infty}$ 、t含义同 ACI 式当

$$V/S \ge 7.6 \text{mm} \, \text{If} \, N = 13.28 \exp(0.03 V/S)$$

$$V/S < 7.6 \text{mm} \text{ PJ} N = 0.33 \exp(0.322 V/S)$$
 (5)

之后 ,Almudaiheem 等又用 Bryant 等提出的相应厚度函数  $Ld^{[6]}$ 取代了 V/S,进一步改善了 N 和试件 的关系<sup>[5]</sup>, N 和 Ld 关系如图 2 所示 ,经线性回归 ,提出了以 Ld 的函数 N 所示的经验公式(6),简称 AH 式. 而且 ,考虑试件的表面比内部的干缩进行速度快 ,为预测表面和中心部的干燥收缩提出了两种 N 式.

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{t}{N+t} \varepsilon_{sh\,\infty} \tag{6}$$

试件表面:  $N = 16.6e \times P(0.00177Ld)$ , 试件中心部:  $N = 20.1e \times P(0.00248Ld)$ . Ld: 由 Bryant 提出的与构件平均厚度 d 相关的系数 单位为 mm.

进而 ,Almudaiheem 等指出 ,以往的预测式是考虑了材料、配合等因素用经验公式表示干燥收缩最终值 ,误差较大 ,可考虑采用短期干燥收缩实测值预测砼干燥收缩的最终值 .

为使用短期干燥收缩的实测数据预测干燥收缩的最终值,必须高精度地预测干燥收缩的发展过程,特别是以往的干燥收缩预测中,不被重视的初期材龄时的精度,它将关系到干燥收缩应变最终值的预测精度的提高.Almudaiheem 等指出以往过高地估计了材龄初期的干燥收缩,而在式(7)中当 *t* < *N* 时以*Ne* 取代*N* 以降低对材龄初期的干燥收缩估计<sup>[5]</sup>.

t < N时以Ne 代替N,

Ne/N = 1.015 + 0.129n(t/N)(7)

Almudaiheem 等还从以往的文献中抽出砼干燥收缩的实测值和 AH 式、ACI 式、BP 式的预测结果进行 比较,比较条件包括变换形状、尺寸和变换湿度条件<sup>[5]</sup>,结果表明 AH 式和 BP 式均能高精度地反映实测 值,而 ACI 式在很多情况下偏离实测值,特别是变换形式、尺寸时,预测误差变大.



2.2 BP 式的修正

ZP.Bazant 等指出,干燥收缩的进行依赖于砼中水分的扩散.按照扩散理论,砼初期干燥收缩应变与 ( $T/\tau$ )<sup>1</sup> 成正比,  $\tau$  与构件的形状、尺寸相关系数 D = 2V/S 的平方成正比.而后期的干燥收缩不管形状、 尺寸如何均渐近于干燥收缩应变的最终值<sup>[8]</sup>.ZP.Bazant 等在对推导 BP 式时的原有数据新加 23 组干燥收 缩数据分析后,提出了试件断面的干燥收缩应变的经验公式(8),简称 BP – KX 式<sup>71</sup>.BP – KX 式主要特点 是由扩散理论预测干燥收缩应变,但是,干燥收缩应变最终值预测式(9)则仍是由大量的实测数据提出的 经验公式,在材料和配合方面存在误差.为此,如果能通过短期测定高精度的实测值来预测干燥收缩的最 终值,将会大大改善预测精度.

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh\infty} K_h S(t)$$

$$S(t) = \tan h \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = (1.15\alpha_1 + 0.16) \cdot \alpha_2 \alpha_3$$
(9)

其中:K<sub>h</sub>--湿度相关系数;

h— 环境相对湿度料厂;

τ---构件形状、尺寸(体积---表面积率)相关系数;

t-干燥时间(日);

 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  — 混凝土配合比及养护条件相关系数.

文献 7 中 ZP. Bazant 等还对各文献中的干燥收缩应变的实测值与 BP – KX 式的预测值进行了比较, 表明 BP – KX 式良好地反映了干缩应变与干燥时间的关系曲线,但由该式求得的干缩最终值与实测值有 偏离,可见采用 BP – KX 式预测干燥收缩最终值误差较大.

### 3 结束语

本文介绍了对 ACI 式和 BP 式进行修正和改进方面的研究.为了提高预测精度,研究者们收集了大量 实测数据进行研究,不断改进各种因素的参与方式和系数.这样以来,实际上预测式基本上是由实测数据 归纳的经验公式,因此必然会产生预测误差.ZP.Bazant 等提出的 BP – KX 式纳入了物理扩散理论概念,便 得预测精度有所提高,然而干燥收缩的最终值仍采用实测数据归纳的经验公式.但是就目前情况而言,部 分地应用物理扩散理论仍不失为一项提高预测精度的有效措施.此外,在 AH 式中使用了短期的干燥收缩 实测值求最终值的方法也值得研究,因为较短时间内容易测得精确值,也许可以成为一种有效的预测手 段.

#### 参考文献

- [1] ACI Committee 209 , Prediction of Creep , Shrinkage and Temperature Effects on Concrete Structure [J]. ACI SP 76 , 1982.
- [2] CEB FIP ,Model Code for Concrete Structures ,Vol.2, International System of Unified Standard ,Cordes of Practice for Structures [J]. Comite Enrointemational deBeton ,1978.
- [3] ZP Bazant JL Panula, Practical Prediction of Time Dependent Deformation of Concrete, Part[J]. Shrinkage Materials and structures, Vol. 11. No. 65, Page 307 – 328, 1978.
- [4] JA Almudaiheem and Will Ilansen ,Effect of Specimen Size and Shape on Drying shrinkage of Concrete J]. ACI Materials Journal Vol. 84, No. 2, page. 130-135, 1987.
- [5] JA Almudaiheem and W. hansen ,Prediction of Concrete Drying Shrinkage from Short Term Measurement J]. ACI Materials Journal. Vol. 86, No. 4, page. 401 – 408, 1989.
- [6] Anthony H. Bryant and Chayatit Vadhanavikkit ;Creep ,Shrinkage – Size , and Age at Loading Effects [J]. ACI Materials Jouenal ,Vol. 84 ,No. 2 page. 117 123 ,1987.
- [7] ZP Bazant and JK. Kim; Improved Prediction Model for Time Dependent Deformations of Concerte :part 1 shrincage[J]. Materials and structures, Vol. 24, No. 143, page. 327 – 345, 1991.
- [8] ZP Bazant and JK Kim ; Consequences of Difusion Theory for Shrinkage of Concrete[J]. Materials and structures , Vol. 24, No. 143, page. 323 - 326. 1991.
- [9] 中国建筑科学研究院砼所.混凝土收缩与徐变试验研究[M].

## STUDY ON EXPERIENTIAL FORMULA OF CONCRETE DRYING AND SHRINKING

 $XING Yan - fang^1$ ,  $XU Xin - sheng^2$ 

(1. College of Vocational Technology , Jianusi University , Jianusi 154007 , China ; 2. Building Material Institute , Jinan 250022 , China. )

**ABSTRACT**: The thesis presents the last research achievement in the foreign country about the aspect of concrete drying and shrinking experiential formula , and carries out analysis and comparison. It provides as a reference for researching and designing staff.

KEY WORDS: drying and shrinking ; ACI mode ; CEB mode ; BP mode ; BP – KX mode