

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.03.012

基于等效时间的混凝土徐变模型

陈 忠^{1,2}, 张 研², 周红军²

(1.中天建设集团有限公司,浙江 杭州 310008;2.河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098)

摘要:基于水泥浆的微观结构,研究了混凝土徐变发生的几种机理,指出徐变是由于荷载作用下混凝土内部水的运动以及与外界发生水交换而引起的.采用国外学者的试验数据,提出了基于等效时间的混凝土徐变模型,研究了不同养护温度(20℃、40℃、65℃)对混凝土徐变的影响.研究结果表明,环境温度升高加快了水泥的水化反应速率和水分的蒸发速率,混凝土的早期强度发展加快,收缩减小,因而徐变减少;温度升高降低了水泥浆中水的黏滞性,增加了混凝土的徐变;高温环境中(<70℃)混凝土的徐变将随温度的升高而增大.

关键词:混凝土;徐变;等效时间;收缩;温度

中图分类号: TU502 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)03-0302-04

徐变是指固体在不变的荷载作用下,变形随时间增长的现象.试验表明,混凝土的徐变可能达到瞬时弹性变形的几倍^[1-2].通常,混凝土总徐变包括由干燥引起的徐变和混凝土处于湿平衡状态下由荷载引起的基本徐变.徐变变形分为可恢复变形和不可恢复变形^[3-4].卸载时,由于弹性恢复,应变立刻减少,应变减少引起的恢复称为“徐变恢复”.徐变恢复不是完全的恢复,残留的应变被称为“不可恢复徐变”.因为环境温度影响混凝土的干燥速率和混凝土强度的发展,所以必然影响混凝土的徐变^[5-6].

本文研究了混凝土徐变发生的几种机理,采用国外学者的试验数据,提出了基于等效时间的混凝土徐变模型,研究了养护温度对混凝土徐变的影响,为混凝土结构温度应力的施工仿真分析提供理论依据.

1 徐变机理

1.1 黏性流动理论

黏性流动理论^[1-2]认为,弹性水泥凝胶骨架和孔隙中充满弹性液体.在施加荷载初期,一部分荷载由孔隙中的水承受,延缓了固体的变形.当水从压力高处向低处流动时,固体承受的荷载逐渐增大,致使固体的变形增大,引起混凝土徐变.卸载时,水向相反方向流动,从而引起徐变恢复.该理论认为承受外部荷载的水的流动是产生徐变的根本原因,可以说明混凝土加载初期的徐变速率较大和徐变恢复现象,但不能解释完全干燥情况下混凝土的徐变现象.

1.2 微裂缝理论

该理论认为,在混凝土硬化过程中,骨料沉降、拌和水的析出以及干燥收缩应力都会在骨料表面引起微裂纹.施加荷载后,微裂纹扩展,弹性应变能和新裂缝表面能随着裂缝的扩展不断增加.由于吸附水的进入,使表面能降低,进而又引起裂缝的进一步扩展,使混凝土徐变继续增大.但是,该理论不能解释混凝土的徐变恢复现象^[3].

1.3 内力平衡理论

该理论认为,混凝土徐变是由于荷载破坏了水泥浆体中原有的内力平衡状态,并达到新的平衡的变化过程.这些内力包括凝胶颗粒产生的收缩表面张力、凝胶之间的范德华力和凝胶颗粒表面的静水压力等.只要荷载、温度或湿度的变化导致内力平衡状态破坏,使水产生流动,就会引起混凝土徐变.但是,该理论不能解

释干燥混凝土徐变产生的原因^[4].

1.4 层间滑移理论

该理论认为,混凝土徐变的物理本质在于水化硅酸钙凝胶体,凝胶体内包含大部分吸附水和结合水.混凝土承受的切应力可以使水化硅酸钙凝胶体粒子之间产生滑移,范德华力越小,水化硅酸钙凝胶体粒子就越容易滑动.层间滑动理论可以说明混凝土徐变随加载龄期的增加而逐渐减少的现象,但不能解释混凝土徐变随外界湿度降低而逐渐增大的原因^[5].

2 温度对徐变的影响

高温环境加快了混凝土干燥的速率,徐变包括由于干燥引起的徐变,因此混凝土徐变随着环境温度的升高而增大;另一方面,徐变与水泥浆中水的运动有关,温度升高降低了水泥浆中水的黏滞性,因此也加剧了混凝土徐变.下面从这两个方面分析温度影响混凝土徐变的机理.

2.1 新浇混凝土暴露在炎热干燥条件下的徐变效应

暴露在炎热干燥气候下的新浇混凝土,由于水化反应和水分蒸发的加快,混凝土在预硬阶段脱水引起毛细管张力变化,从而在混凝土内部产生压应力,导致混凝土塑性收缩.早期干燥实际上减小了有效水灰比,增大了新浇混凝土的强度,因而混凝土强度增长,收缩减少.然而在干燥后期,混凝土凝结后不能适应其体积的改变,产生内部裂缝,降低了混凝土的强度,甚至抵消了早期干燥所带来的强度增长的效应.因此,炎热干燥气候对混凝土强度发展的净效应是降低了混凝土的强度.

混凝土的强度和收缩都影响混凝土的徐变,新浇混凝土早期暴露在炎热干燥气候下能够增大混凝土的强度,减小其收缩和徐变.

2.2 水泥浆中水的运动对徐变的影响

水泥浆中水的运动在徐变中起着重要作用^[5],温度升高时,由于胶体粒子聚合度的变化,较多的粒子能够滑移,也就是说,液体分子的定向运动受到温度的干扰,在较高温度时发生黏性流动,水的黏滞性降低.

温度是影响混凝土徐变的主要外部因素之一.在荷载作用期间,如果混凝土保持较高的温度,则其徐变随温度的升高而明显增加.Hauggaard 等^[6-8]通过研究发现,在温度低于 80℃ 时,混凝土徐变与温度成正比,温度变化影响混凝土徐变速率,因此影响混凝土最终徐变值.在其他条件相同的情况下,混凝土徐变值随温度的升高而增加.

混凝土徐变随着温度(约达 60℃)的升高而增大,当环境温度高于 70℃ 后,徐变发生逆转,随着温度的升高而减小.这是由于温度对徐变的两个相反的效应:一方面,温度升高,水的黏滞性降低,徐变增加;另一方面,徐变与混凝土的强度相关,强度高的混凝土弹性模量大,徐变小.而温度升高加快了水化反应速率,从而加快了混凝土强度的发展,徐变随着温度的升高而减小.

很明显,在相对低的温度范围内,混凝土强度的增长对徐变的减小效应小于水的黏滞性的降低对徐变的增大效应,因而在较低的温度范围内,徐变随温度的升高增加.在较高的温度范围内,这两个方面的净效应正好逆转,徐变随温度升高而减小.应该指出,在炎热气候下,外界环境温度一般不超过 70℃,因此可以认为,炎热气候下混凝土的徐变随着温度的升高而增大^[9-10].

3 基于等效时间的混凝土徐变模型

3.1 等效时间的概念

温度对混凝土徐变的影响较大.在老混凝土中,因为绝大部分水泥已经水化,水化促进混凝土成熟的效应不能弥补由于温度升高而引起的混凝土的徐变增加.在早龄期混凝土中,产生大量的水化反应,促进混凝土成熟的效应大大抵消了徐变的加速.因此,可以用等效时间考虑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,达到相同的水化程度所需要的实际时间越短,即对于相同的实际龄期,温度越高,等效时间越长,反之亦然.对于混凝土徐变,等效时间就是在其他温度下,达到相同徐变所需要的时间等效于在参考温度下所需要的时间^[10].

1970 年, Bazant 教授根据 Arrhenius 方程提出了等效时间与温度关系的表达式^[11],即

$$t_e = \int \beta_r dt \tag{1}$$

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

(2)

式中： t_e ——等效时间，d； β_T ——类比系数； Q ——化学活动能与气体常数之比（ $Q = E/R$ ）； T_r ——参考温度，取 293 K（20℃）； T ——混凝土的当前温度，K。

Q 值与化学反应活动能有关，化学活动能随着温度的升高而增大， Q 值可以通过对混凝土绝热温升的反演分析得到，其值在 2000~7000 K 之间。

3.2 混凝土徐变模型

由于指数函数存在递推关系，不必记录应力历史，减少了所需计算机的储存容量和计算工作量，大大提高了有限单元法程序的计算效率，具有很好的实际应用价值^[11-13]，因此，采用具有递推关系的指数函数徐变度表达式，即

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

(3)

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，根据试验值确定； τ_e ——混凝土等效加载龄期，d。

通过对 Browne 等^[14]得到的不同养护温度（20℃、40℃、65℃）下混凝土的徐变试验数据对徐变度进行拟合，可以得到徐变度公式中的待定参数。

由于徐变度的试验数据较多，而且需要拟合的参数达到 8 个，若某些参数初值的偏离较大，拟合结果可能不收敛，因此需要参考有关徐变度公式的资料，选择参数范围。在拟合过程中，依次调整参数，根据徐变度误差平方和最小的原则，确定所有参数。经过 8 次拟合迭代计算，得到用等效时间表示的徐变度公式，即

$$\alpha(t_e, \tau_e) = \left(9.173 + \frac{23.48}{\tau_e^{0.19}}\right)\{1 - \exp[-0.077(t_e - \tau_e)]\} +$$

$$\left(15.73 + \frac{178.6}{\tau_e^{0.325}}\right)\{1 - \exp[-0.00127(t_e - \tau_e)]\}$$

(4)

根据式(4)的拟合曲线和试验值如图 1 所示，可见拟合曲线与试验值吻合较好。

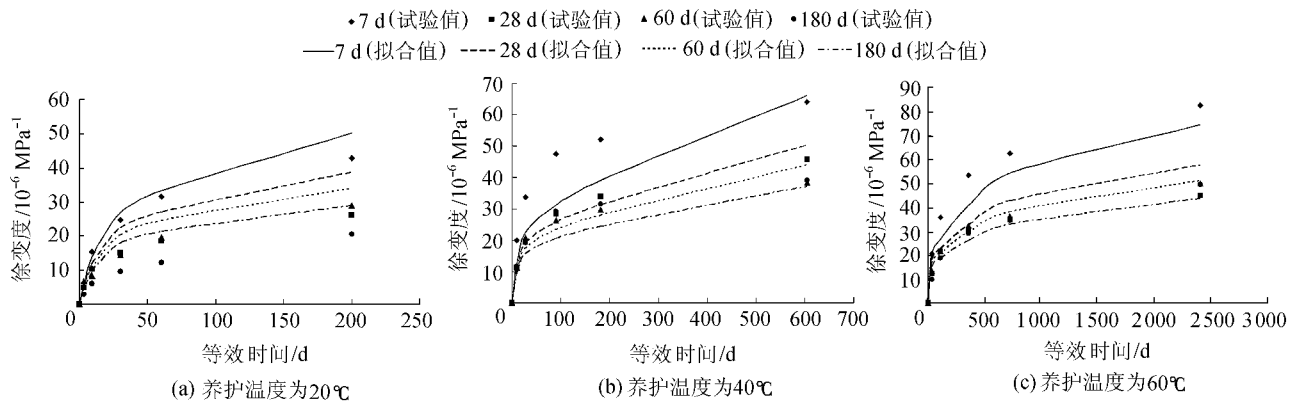


图 1 基于等效时间的混凝土徐变度

Fig. 1 Creep factors of concrete based on equivalent time

4 结 论

a. 提出了基于等效时间的混凝土徐变模型，应用最小二乘法回归分析徐变度的试验数据，拟合值与试验值吻合较好。

b. 等效时间反映了水泥水化热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以用等效时间定量表示。

c. 影响徐变参数拟合精度的主要原因有：缺乏成熟的方法确定 Q 值，需要寻求更为符合实际情况的徐变度公式；混凝土徐变试验历时长，试验资料的规律性较差。

参考文献:

- [1] GOEL R , KUMAR R , PAUL D K. Comparative study of various creep and shrinkage prediction models for concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering 2007 , 19(3) 249-260.
- [2] 惠荣炎 , 黄国兴 , 易冰若. 混凝土的徐变[M]. 北京 : 中国铁道出版社 , 1988.
- [3] GAWIN D , PASAVENTO F , SCHREFLER B A. Modelling creep and shrinkage of concrete by means of effective stresses[J]. Materials and Structures 2007 , 40(6) 579-591.
- [4] BAZANT Z P. Prediction of concrete creep and shrinkage : past , present and future[J]. Nuclear Engineering and Design 2001 , 203(1) 27-38.
- [5] TAMBOUE B T. The role of C-S-I microstructure and calcium hydroxide on creep and shrinkage of hardened portland cement paste[D]. Ottawa : University of Ottawa 2001.
- [6] HAUGGAARD A B , DAMKILDE L , HANSEN P F. Transitional thermal creep of early age concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics 1999 , 125(4) 458-465.
- [7] BAZANT Z P , CUSATIS C. Temperature effect on concrete creep modeled by microprestress solidification theory[J]. Journal of Engineering Mechanics 2004 , 130(6) 691-699.
- [8] UMEHARA H , UEHARA T. Effect of creep in concrete at early ages on thermal stresses[C]//In Thermal Cracking in Concrete at Early Ages , Proceedings of the International RILEM Symposium. London : E & FN Spon , 1995 : 79-86.
- [9] NEVILLE A M , DILGER W H , BROOKS J J. Creep of plain and structural concrete[M]. London : Construction Press , 1983.
- [10] 朱伯芳. 混凝土坝温度控制与防止裂缝的现状与展望[J]. 水利学报 2006 , 37(12) : 1424-1432. (ZHU Bo-fang. Current situation and prospect of temperature control and cracking prevention technology for concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2006 , 37(12) : 1424-1432. (in Chinese))
- [11] 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. (ZHANG Zi-ming , SONG Zhi-tong , HUANG Hai-yan. New theory on adiabatic temperature rise and heat conduction equation of concrete [J]. Journal of Hohai University : Natural Sciences 2002 , 30(3) : 1-6. (in Chinese))
- [12] 宋玉普. 多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M]. 北京 : 中国水利水电出版社 , 2002.
- [13] 朱岳明 , 贺金仁 , 石青春. 龙滩大坝仓面长间歇和寒潮冷击的温控防裂分析[J]. 水力发电 2003 , 29(5) : 6-9. (ZHU Yue-ming , HE Jin-ren , SHI Qing-chun. Analysis of temperature control and cracking prevention during long downtime on placement surface and cold wave strike for Longtan High RCC Gravity Dam[J]. Water Power 2003 , 29(5) : 6-9. (in Chinese))
- [14] BAZANT Z P , JOONG-KOO K. Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete : part 4 : temperature effects[J]. Material and Structures 1992 , 25(1) 84-94.

Creep model for concrete based on equivalent time

CHEN Zhong^{1,2} , ZHANG Yan² , ZHOU Hong-jun²

(1. Zhongtian Construction Group Co. , Ltd. , Hangzhou 310008 , China ;

2. College of Mechanics and Materials , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Based on the microstructure of cement paste , several kinds of creep mechanisms of concrete were studied. It was put forward that the creep was aroused by the motion of the internal water in the concrete and the moisture exchange with the external environment under sustained load. By use of the foreign scholar s ' experimental data , a creep model for concrete based on the equivalent time was established. The influences of different curing temperatures (20℃ , 40℃ , 65℃) on the concrete creep were investigated. The results show that the rise in ambient temperature accelerates the hydration rate of cement and the evaporation rate of water , consequently , the development of early-age strength of concrete increases and its shrinkage decreases , so concrete creep decreases. The temperature rise reduces the viscosity of water and thus raises the concrete creep. The creep of concrete in high temperature (< 70℃) increases with the increase of temperature.

Key words : concrete ; creep ; equivalent time ; shrinkage ; temperature