

# 持续荷载下混凝土抗压强度的时效模型

彭 凯<sup>1</sup>, 黄志堂<sup>1</sup>, 肖盛燮<sup>1</sup>, 陈山林<sup>2</sup>, 王家林<sup>1,2</sup>

(1.重庆交通学院 土木建筑学院,重庆 400074;2.重庆大学 土木工程学院,重庆 400044)

**摘要:**从现有混凝土棱柱体单调加载的应力—应变全曲线和混凝土徐变计算模型出发,综合考虑持续荷载下混凝土抗压强度的徐变衰减效应和龄期增强效应,构建混凝土抗压时效强度的估算模型并编制了相应的计算机程序。通过对 C20、C30 和 C40 混凝土在持续荷载下多个性能指标及其变化规律进行计算分析,并与以往试验观察数据和有限元数值分析结果进行比较,验证了模型的合理性和实用性。

**关键词:**持续荷载;混凝土;徐变;龄期;抗压强度;时效模型

**中图分类号:** TB301; TU528.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7329(2004)04-0029-06

## A Time-effect Model for Concrete Compressive Strength under Sustained Load

PENG Kai<sup>1</sup>, HUANG Zhi-tang<sup>1</sup>, XIAO Sheng-xie<sup>1</sup>

CHEN Shan-lin<sup>2</sup>, WANG Jia-lin<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Based on the existed stress - strain curve of concrete prism under one - off short - term load and the concrete creep model, a new time - effect model for evaluation of concrete compressive strength is established through the synthesis of the concrete creep attenuating effect under sustained load and the concrete strength enhancing effect by age, a corresponding computer program has been developed. The computation of related indices and their change rules of several different - grade concrete materials with the program was carried out and the results were compared with experimental data and finite element numerical results reported in the literature, the reasonableness and practicality of the proposed new model have been verified.

**Keywords:** sustained load; concrete; creep; age; compressive strength; time - effect model

在土木工程领域,混凝土结构是应用最为广泛的一类结构,但混凝土材料性能的离散性和变异性给工程界提出了很多难题和挑战。混凝土在持续荷载下的徐变效应就是很难准确估计的一种复杂特性。徐变主要是混凝土内部未充分水化的水泥凝胶体的塑性流(滑)动以及骨料界面与砂浆内部微裂缝发展的结果<sup>[1]</sup>,因而本质上应视为一个材料内部损伤积累、材料性能衰变的过程;而现阶段对混凝土徐变效应的研究主要集中在其引起的结构恒载变形放大、构件截面应力应变重分布以及超静定结构二次内力效应等方面,对徐变引起的混凝土自身强度衰减研究较少。模式规范 CEB - FIP MC90<sup>[2]</sup>(以下简称“模式规范”)建议用一个系数  $\beta_t$  来对混凝土强度的徐变效应加以考虑,但  $\beta_t$  的表达式中只含有时间变量,不计与徐变发展密切相关的持续应力水平、材料组成及制作养护条件、使用环境、构件尺寸等因素的影响,因而是一个相当粗略的估计。文献[3]将描述混凝土本构关系的微观平面模型(microplane model)和

\* 收稿日期:2004-03-28

作者简介:彭 凯(1974-),男,重庆忠县人,讲师,硕士,主要从事桥梁及结构工程研究。

线性徐变模型耦合,考虑混凝土内部初始缺陷和不均匀性,以有限元方法对混凝土长期强度进行数值分析,获得了一些结果,但该文只考虑了高应力水平下徐变发散造成混凝土破坏的情况,未涉及收敛性徐变对混凝土强度的影响,也未考虑混凝土强度龄期效应,且模型和计算过程均较为复杂,不易操作。

在徐变发生的同时,由于混凝土内部水化作用的持续进行,若不考虑其它因素的影响,材料强度将随着龄期增长而单调递增。模式规范用另一个系数  $\beta_t$  来考虑混凝土强度的龄期效应。这样,估算持续荷载下混凝土长期强度就应同时考虑徐变效应  $\beta_l$  和  $\beta_t$  龄期效应,模式规范将  $\beta_l$  和  $\beta_t$  直接相乘以综合考虑这两种效应。

在上述工作的基础上,全面考虑影响徐变的各主要因素,建立混凝土抗压强度徐变效应计算模型的精细化形式,再将其与强度龄期效应模型进行迭代耦合,形成较为完善的混凝土强度时效模型;最后利用计算机编程实现模型的运行,给出了相关算例。

## 1 混凝土抗压强度的徐变效应

### 1.1 混凝土徐变计算

徐变的发展规律与初始应力水平  $\alpha = \sigma(t_0)/f_c(t_0)$  密切相关<sup>[2]</sup>。一般认为,当初始应力水平较低( $\alpha \leq 0.4 \sim 0.6$ )时发生的徐变,称为线性徐变,且徐变会收敛;当  $\alpha > 0.4 \sim 0.6$  时,称为非线性徐变,若  $\alpha \leq 0.8$  时徐变也会收敛,但当  $\alpha > 0.8$  时,荷载持续一段时间后混凝土会因徐变变形过大而破坏,徐变是发散的。

混凝土徐变有多种计算公式,模式规范推荐如下公式:

$$\epsilon_{cr}(t, t_0) = \epsilon_e(t_0) \cdot \varphi(t, t_0) \quad (1)$$

式中:  $t$  为计算时刻混凝土的龄期;  $t_0$  为加载时混凝土的龄期;  $\epsilon_{cr, t_0}$  为徐变值;  $\epsilon_e(t_0)$  瞬时弹性变形;  $\varphi(t, t_0)$  为徐变系数,  $\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot f(t)$ ;  $\varphi_0$  为名义徐变系数;  $f(t)$  为与时间有关的函数。

公式(1)适用于  $\alpha \leq 0.4$  (线性徐变)的情况。当  $0.4 < \alpha \leq 0.6$  时,模式规范通过一个与初始应力水平相关的系数  $\varphi_0$  与名义徐变系数相乘来对公式(1)进行修正。

混凝土徐变应变值的大小实质是持续荷载下材料内部损伤积累的外在表象,而材料内部损伤积累的直接度量是很难实现的,因而以徐变值作为估算混凝土时效强度的依据,是既合理又方便的选择。

### 1.2 混凝土棱柱体一次短期加压的全曲线

混凝土棱柱体短期加压的  $\sigma - \epsilon$  全曲线的表达形式很多,有多项式、指数式、三角函数、有理分式和分段函数式等形式,文献[1]对此进行了汇总,结合实际情况并参照文献[4],采用由过镇海等人提出的无量纲坐标分段式曲线方程:

$$\begin{cases} x \leq 1 & y = ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3 \\ x \geq 1 & y = \frac{x}{b(x - 1)^2 + x} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $x = \frac{\epsilon}{\epsilon_p}$ ,  $y = \frac{\sigma}{f_c}$ ;  $\epsilon_p$  为混凝土棱柱体单调静载峰值应变;  $f_c$  为混凝土棱柱体单调静载抗压强度。

(2)式中  $a$ 、 $b$  的具体取值详见文献[4]。据(2)式得到的典型曲线形式如图1。

### 1.3 混凝土抗压强度徐变效应的两种类型

1.3.1 混凝土徐变破坏 文献[1]总结出混凝土在各种重复荷载下应力—应变曲线的包络线都与单调加载全曲线非常接近的结论。文献[10]在预测岩石蠕(徐)变破坏时认为,蠕变轨迹不会超出单调加载全曲线,而一旦二者相交,则预示着岩石即将发生蠕变破坏。由于徐变应变增长在表征材料内部损伤积累方面与重复加卸载下塑性应变的增长本质上极为相似,又混凝土与岩石在诸多基本力学性质上很接近,因而借鉴文献[1]和[10],引入如下合理假定:混凝土单调加载全曲线也是考虑

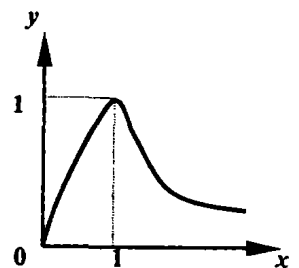


图1 混凝土单调加载全曲线

徐变效应的各种应力—应变曲线(包括徐变后再加载的情况)的包络线,当后者一旦与前者的下降段相交,则材料将出现应变发散而失效破坏。依据这一假设,可建立各种条件下混凝土抗压强度的徐变效应模型。

如图2示,混凝土在某一初始应力水平下,徐变发展一定时间后加载曲线OAA'与单调加载全曲线交于A'点,则认为此时混凝土会发生徐变发散而破坏;很明显,此时材料的时效强度水平为 $y_f$ ,对应的荷载持续时间 $t_f$ 称为安全持荷时间。当在某一应力水平 $y_{cr}$ 下持荷规定时间 $t_{cr}$ 后混凝土刚好发生徐变破坏,则称 $y_{cr}$ 为对应于 $t_{cr}$ 的徐变破坏临界应力水平,也即是通常所谓的混凝土长期抗压强度与加载时刻单调静载强度的比值。当初始应力水平高于 $y_{cr}$ ,则混凝土将在持荷时间 $t_{cr}$ 结束前发生徐变破坏,反之则不会。

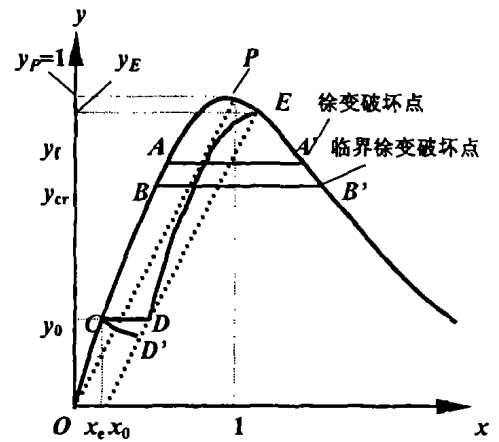


图2 混凝土徐变的应力—应变关系

1.3.2 混凝土徐变后再加载 设混凝土在初始应力水平 $y_0$ 下持荷至时刻 $t$ 而并未发生徐变破坏,如图2中曲线OCD示,CD的长度就是此时的徐变应变水平 $x_c$ ,计算如下:

$$x_c = x_e \cdot \varphi(t, t_0) \tag{3}$$

式中: $x_e$ 为应力水平对应的混凝土加载瞬时应变水平; $\varphi(t, t_0)$ 为徐变系数,见(1)式。

从D点开始可再加载,但再加载曲线DE的准确描述比较困难。文献[5]对再加载曲线的形式进行过概述:无论何种曲线形式,其延伸不会超出包络线(单调加载全曲线)。显然,再加载曲线的峰值点靠近包络线,该点对应的应力水平就是徐变后混凝土时效强度水平。为简化问题,本文假定连接再加载起点D和峰值点的直线DE平行于OP,OP为连接单调加载曲线起点O和峰值点P的直线。则直线DE与包络线交点E的纵坐标与再加载曲线峰值应力水平非常接近,可用于近似表达徐变后混凝土时效强度水平。按几何条件可得直线DE的方程为:

$$y = x - x_0 \tag{4}$$

式中: $x_0 = x_e + x_c - y_0 = x_e [1 + \varphi(t, t_0)] - y_0$ ;  $x_e$ 、 $x_c$ 、 $\varphi(t, t_0)$ 同前。

## 2 混凝土抗压强度的龄期效应

根据模式规范,混凝土短期静载抗压强度随龄期增长的计算公式为:

$$f_c(t) = \beta_t f_c \tag{5}$$

式中: $\beta_t = e^{s(1-\sqrt{28/t})} \geq 1$ 为龄期效应系数, $s$ 取决于水泥品种,普通水泥和快硬水泥取为0.25,快硬高强水泥取为0.20; $f_c(t)$ 为龄期为 $t$ 时混凝土的单调静载强度; $f_c$ 为初始加载时刻混凝土的单调静载强度。

混凝土强度龄期增强效应主要为材料化学成熟度效应,和徐变衰减效应同时发生且共同作用于材料物理力学性能。本文采取按一定时间步长将二者迭代耦合的方法来近似处理二者的综合效应。

当加载持续至任一时刻 $t$ ,先单独考虑混凝土龄期效应:该时刻材料单调加载的峰值应力与峰值应变相比初始时刻均会提高,但经无量纲化以后,其应力—应变曲线仍可用(2)式表达;因强度龄期增强效应不会很高,(2)式中方程参数取值可不变,因而曲线形状仍保持原样。再考虑徐变效应:由于初始应力值持续不变,此时材料化学成熟度和单调静载强度提高,因而在此时的应力—应变全曲线(徐变加载包络线)图中,相对而言持续应力水平降低。假定初始应力水平为 $y_0$ ,则在 $t$ 时刻的应力水平应为:

$$y_{0t} = y_0 / \beta_t \tag{6}$$

在接下来的时间段 $(t, t + \Delta t)$ 内,用(6)式表示的应力水平计算包络线上对应的瞬时弹性应变水平 $x_e$ ,再按(3)式计算该时段徐变应变水平的增量。按此方法从加载时刻起依次迭代,如图2示,则会得到一条递降的持荷曲线CD',区别于原来不计龄期效应时的水平持荷线CD;再由D'点按2.3节所述再加

载路径即可求出计算时刻混凝土时效强度水平  $y_E$  值。但由于  $y_E$  是一个相对于计算时刻材料单调静载强度(已发生龄期增强效应)的强度水平,若相对于加载初始时刻材料单调静载强度(尚无龄期增强效应)而言,混凝土时效强度水平应修正为:

$$y_r = \beta_t \cdot y_E \tag{7}$$

式中:  $y_r$  为相对于加载初始时刻材料单调静载强度的时效强度水平;  $\beta_t$  为计算时刻材料强度龄期效应系数,见(5)式。

计算过程中迭代时间步长按照混凝土强度随龄期增长的时间特性(先快后慢)来确定:计算时段越靠近初始加载龄期则步长划分越细密。

### 3 持续荷载下混凝土抗压强度的时效模型

将(1)、(2)、(4)、(6)和(7)式联立,就形成了持续荷载下混凝土抗压强度的时效数学模型,其中(1)式当应力水平较高( $\alpha > 0.4$ )时,应按模式规范规定进行修正。联立模型如下:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{cr}(t, t_0) &= \varepsilon_e(t_0) \cdot \varphi(t, t_0) \\ \left\{ \begin{aligned} x \leq 1 & \quad y = ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3 \\ x \geq 1 & \quad y = \frac{x}{b(x - 1)^2 + x} \end{aligned} \right. \\ y &= x - x_0, x_0 = x_e[1 + \varphi(t, t_0)] - y_0 \\ y_{0t} &= y_0/\beta_t \\ y_r &= \beta_t \cdot y_E \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

数学模型(8)中对应公式(1)的应力水平适用范围为  $\alpha \leq 0.6$ ,而对  $\alpha > 0.6$  的情况,模式规范考虑到材料在持荷较短时间后可能出现徐变发散而破坏(如图 2A' 点示),未作适用说明。为保证问题的完整性和连续性,本文将公式(1)对应于  $0.4 < \alpha \leq 0.6$  的修正形式外推到  $\alpha > 0.6$  的情况,以计算高应力水平下材料徐变发散前的徐变系数以及相应的安全持荷时间和徐变破坏临界应力水平等指标。

模型(8)全面考虑了持续荷载下影响混凝土抗压强度的多种因素及其相互关系,其中包含一些合理假定以简化计算;该模型相比现有的方法而言更完整、更精细,且易于通过编程在计算机上实现。利用该模型主要可计算如下指标:

- 1) 混凝土对应于规定持荷时间  $t_{cr}$  的徐变破坏临界应力水平  $y_{cr}$ ;
- 2) 高应力水平(超过徐变破坏临界应力水平)下混凝土安全持荷时间  $t_s$ ;
- 3) 持续荷载作用后混凝土时效强度水平  $y_r$ 。

### 4 程序算法及算例说明

按照模型(8),设计程序算法,粗略表示为流程图 3,具体细节此不赘述。

利用计算机程序,分别计算 C20、C30 和 C40 混凝土在不同应力水平下多个指标随持荷时间增长的变化情况。构件的尺寸为截面积  $A_c = 2.0 \times 10^6 \text{ mm}^2$ ,截面周界长  $u = 6\ 000 \text{ mm}$ ,相对湿度  $RH = 60$ ,加载龄期  $t_0 = 28 \text{ d}$ 。不同强度等级混凝土分别在考虑和不

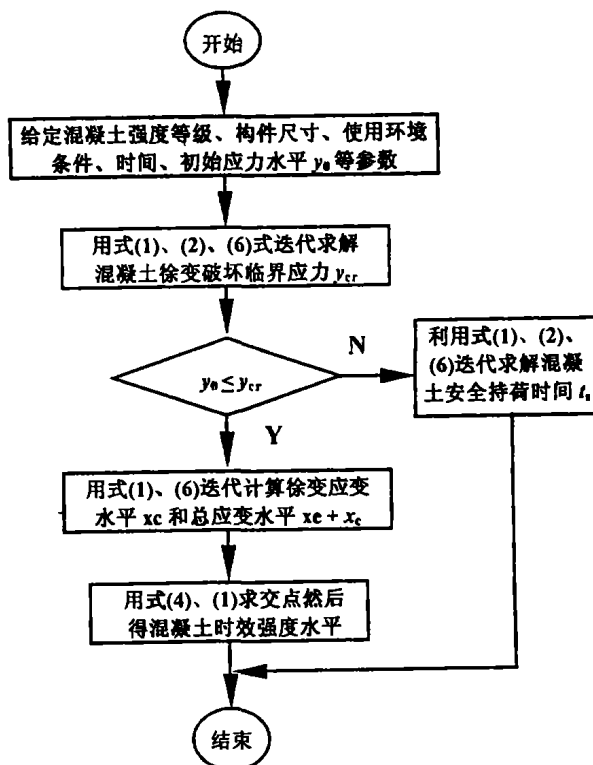


图 3 程序算法流程图

考虑强度龄期效应情况下的徐变破坏临界应力水平  $y_{cr}$  见表 1; 综合考虑徐变和龄期效应, 在高应力水平下混凝土安全持荷时间  $t_s$  见表 2。

表 1 混凝土徐变破坏临界应力水平  $y_{cr}$ 

年限	C20	C30	C40
20	0.745 5	0.783 0	0.729 5
30	0.744 0	0.781 6	0.727 8
50	0.743 0	0.780 7	0.726 5
70	0.742 8	0.780 4	0.726 0
100	0.742 5	0.780 2	0.725 8
无穷时间	0.743 8	0.781 6	0.726 6
不计龄期效应	0.632	0.666	0.627

表 2 高应力水平下混凝土安全持荷时间  $t_s$ 

应力水平	不同砼强度等级对应的 $t_s$ 值/d			文献[3]计算结果
	C20	C30	C40	
0.95	0.41	0.85	0.53	
0.90	3.55	9.77	4.32	211
0.85	31.77	151.49	30.97	
0.80	286.18	1 385.52	206.25	2 111
0.75	3 714.09		1 330.99	
0.70				8 111

由表 1 可见, 考虑龄期效应后混凝土  $y_{cr}$  值相比未考虑时有明显提高; 而 C30 混凝土的值  $y_{cr}$  在两种情况下均比其他两种混凝土要高, 究其原因在于: C20 混凝土因强度较低, 相同应力水平下徐变应变水平较高<sup>[2]</sup>, 因而在图 2 中徐变曲线 BB' 更易靠近包络线; C40 混凝土脆性较大, 单调加载全曲线(包络线)的下降段较陡<sup>[1]</sup>, 在图 2 中包络线更易接触到徐变曲线 BB'; 而 C30 混凝土强度较高且塑性也较好, 因而会比其它二者有更高的  $y_{cr}$  值。

文献[1]、[2]均认为混凝土在使用年限内长期强度水平(相当于上文中的  $y_{cr}$  值)可取为 0.8。文献[3]不计龄期效应得出 0.8 初始应力水平下混凝土安全持荷时间为 2 111 d, 接近 6 年; 而从文献[7]等介绍的实测结果来看, 当初始应力水平为 0.8 时混凝土仅持荷几天时间就出现徐变发散而破坏; 本文综合考虑徐变衰减和龄期增强效应计算的对应值为 206~1 385 d(见表 2), 小于文献[3]的对应值, 更接近现有的实测值。由上述, 可认为将 0.8 作为混凝土长期强度水平是偏于危险的。此外, 文献[3]给出的混凝土长期强度水平(对应持荷时间 25 年)约为 0.70; 文献[7]给出值约为 0.75; 文献[8]认为混凝土长期强度水平介于 0.7 到 0.9 之间; 本文的计算结果(见表 1)表明不同强度等级混凝土当规定持荷时间超过 20 年后, 对应的长期强度水平均不会再有大的改变, 大小为 0.72 至 0.78 之间, 与文献[3]的数值解和文献[7]、[8]的实测值均接近, 因而本文偏于安全地推荐混凝土长期强度水平约为 0.72。

由表 2 可见, 初始应力水平越高, 混凝土安全持荷时间  $t_s$  值越小; 而在相同应力水平下 C30 混凝土对应的  $t_s$  值比其它两种混凝土大, 这与前面其徐变破坏临界应力水平较高相对应, 可归于相同原因。

利用本文计算模型, 得到只考虑徐变效应、不考虑龄期效应时混凝土在持续荷载下时效强度水平随时间变化如图 4 曲线示; 得到同时考虑两种效应时时效强度水平随时间变化如图 5 中上方 6 条曲线所示。考察图 4 和 5, 可看出: (1) 持续荷载下, 不考虑龄期效应时混凝土时效强度水平低于相同条件下考虑龄期效应时的时效强度水平。(2) 初始应力水平越高, 则在相同时刻材料时效强度水平越低。(3) 相同初始应力水平下, 持荷时间越长, 材料时效强度水平越低。(4) 在初始应力水平、持荷时间均相同的条件下, C30 混凝土时效强度水平比 C40、C20 混凝土均高, 与前面其徐变破坏临界应力水平较高、安全持荷时间较长的计算结果相符, 而后两者时效强度水平接近。

综合考虑混凝土强度的龄期增强效应和徐变衰减效应, 根据模式规范的公式绘出的混凝土时效强度水平如图 5 中最低的实曲线所示。根据该曲线, 可见混凝土(不分强度等级)长期(20 年以上)使用后的时效(不计初始应力水平、温度、湿度、构件几何等影响因素的变化)强度约为 0.92 左右; 文献[6]指

出,由于前述两种时效作用相互抵消,混凝土的长期强度可近似视为随时间不变;文献[9]认为长期使用的混凝土的强度较28 d强度会有约10%~40%的增长;从图5中按本文模型得出的计算曲线来看,在常见持续应力水平下各种混凝土长期强度相比加载初期(28 d)单调静载强度可有约10%~20%的增长,倾向于支持文献[8]的结论。

必须说明的是,混凝土持续受载后时效强度的试验观测和理论分析资料目前尚很少见,因而前面的相关计算结果目前还缺乏足够的验证。

## 5 结语

本文模型是综合利用现有成熟的混凝土材料相关数学模型,引入适当简化假定建立起来的,算例的一部分结果与现有文献介绍的实测数据符合较好,且在精细度、完备性和适应性方面有所改善;其余结果虽符合逻辑但还缺乏试验验证。因而,本文模型从总体上讲是合理的,且程序计算操作简单,方便实际应用;但由于混凝土徐变试验的困难性,与本文主题有关的现有试验数据资料和理论成果均极为少见,因而本文模型的建立意在抛砖引玉,为混凝土长期工作性能的探索研究提供一定借鉴,其正确性和准确性仍需在进一步的试验和实践中接受检验、加以改进。

## 参考文献:

- [1] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- [2] Comité Euro-International du Béton. Bulletin D'information No.213/214 CEB-FIP Model Code 1990(Concrete Structures)[S]. Lausanne, May 1993,51-57.
- [3] J.Ozbölt and H. W. Reinhardt. Sustained Loading Strength of Concrete Modelled by Creep-Cracking Interaction[J]. Otto-Graf-Journal,2001,12:9-20.
- [4] GB 50010-2002, 混凝土结构设计规范[S].
- [5] 朱伯龙,董振祥. 钢筋混凝土非线性分析[M]. 上海:同济大学出版社,1985.
- [6] 韩林海,陶忠,刘威,陈宝春. 长期荷载作用对方钢管混凝土柱承载力的影响[J]. 中国公路学报,2001,07(3):57-66.
- [7] The Concrete Society. The Creep of Structural Concrete[R]. Report of a Working Party of the Materials Technology Divisional Committee, January 1973.
- [8] American Concrete Institute. Concrete for Nuclear Reactors[S]. Sp-34, Vol. I. III, 1972.
- [9] 交通部第二公路勘察设计院. 公路旧桥承载能力鉴定方法(试行)[M]. 北京:人民交通出版社,1991.
- [10] Goodman R E. Introduction to Rock Mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.

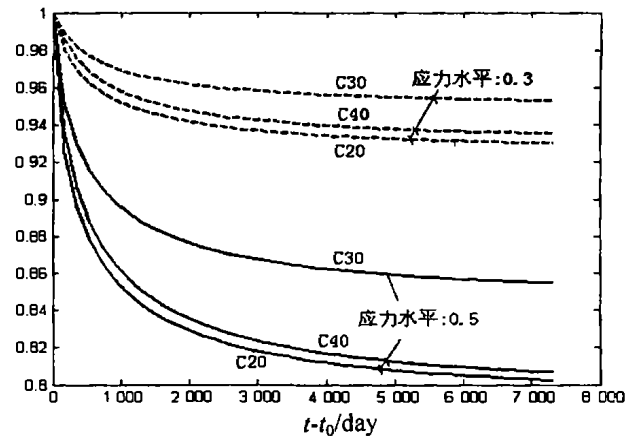


图4 只考虑徐变效应时混凝土时效强度水平

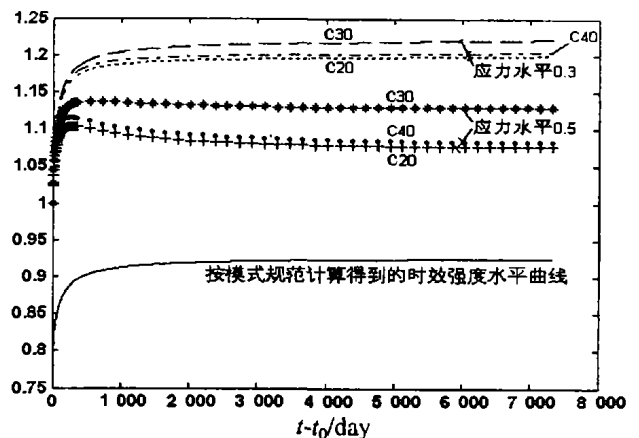


图5 综合考虑徐变和龄期效应时混凝土时效强度水平