

● 钢筋混凝土结构设计理论丛书



收缩 徐变

周 履 陈永春 ● 中国铁道出版社

钢筋混凝土结构设计理论丛书

收缩 徐变

中国铁道出版社

1994年·北京

(京) 新登字063号

内 容 提 要

本书是钢筋混凝土结构设计理论丛书之一。主要介绍钢筋混凝土(包括预应力混凝土)结构中混凝土收缩、徐变的性能,以及它们对结构的影响。其中包括理论分析、计算方法以及混凝土收缩、徐变导致超静定结构的内力重分配问题。上述各点都是十分复杂,包含了很多不确定的条件,并与时间因素有关,难以求得精确的答案。

近年来,预应力超静定结构的发展、部分预应力理论的应用,使结构设计中考虑收缩、徐变的影响成为不可缺少的内容。本书较详尽地介绍了国内外在混凝土收缩、徐变方面的研究成果。着重以实验数据和数学模式来说明在工作应力下混凝土应力与应变关系,并讨论了工程实践中的有关问题。还附有算例以帮助读者加深理解与掌握解决实际问题的方法。

本书可供从事钢筋混凝土(包括预应力混凝土)结构设计、施工、维修工作的工程技术人员使用,亦可作为研究人员及高等院校有关专业人员参考书。

钢筋混凝土结构设计理论丛书

收缩 徐变

周 履 陈永春

*

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 翁大厚 封面设计 王毓平

各地新华书店经售

北京顺义县燕华印刷厂印

开本: 787×1092毫米1/32 印张: 13 插页: 1 字数: 295千

1994年1月 第1版 第1次印刷

印数: 1—1500册

ISBN7-113-01367-8/TU·296 定价: 8.35元

前 言

十九世纪二十年代在英国开始了波特兰水泥的工厂化生产。随着就开始了一个混凝土结构在世界范围内的发展时期。但是直到二十世纪初混凝土结构的设计还是因袭钢结构的习惯、以弹性反应为依据。徐变现象之被认识和重视实始于本世纪初，而对它的系统研究则始于本世纪30年代，其应用于实际结构则更晚。正如A.M.Neville教授在1973年的文章中所说的那样，直到40年代后期，多数设计人员认为徐变只是一个单纯的学术问题，属于材料科学的范围，而不属于实用工程的范围。但是，目前的情况已完全不同了，国际预应力协会-欧洲混凝土委员会（CEB-FIP）提出的《混凝土结构设计施工的国际建议》及许多国家的设计规范对混凝土的收缩、徐变都给予详细的考虑。关于混凝土收缩、徐变的知识已经成为结构设计人员所应该掌握的专业知识的一部分。

经过几十年实践经验和浩繁的研究试验资料的积累，人们对混凝土收缩、徐变的认识和它们对结构影响的分析、计算理论和方法也在不断发展。从70年代开始至今，CEBFIP对徐变系数的计算公式就修改了三次：从5个系数联乘之积改为滞后弹变与流变之和，又改为初始急变、滞后弹变与流变三者之和。而美国的Z.P.Bazant教授等，于1978及1980年提出了将徐变区分为基本徐变与干燥徐变的BP模式和BP2模式，并提出了复杂但宜于电算的计算公式。

对于由混凝土收缩、徐变所导致的配筋构件或钢与混凝土

土共同工作的超静定结构的内力重分配计算,首先是由F. Dischinger在30年代提出的微分方程解。这种方法对于多层钢筋的配筋构件及多次超静定结构的计算、十分复杂,而且为了便于求解所作的假定与实际出入较大。1967年,H. Trost教授引入了当时他称为松弛参数(1972年Bazant提出改称老化系数)的概念。提出了由徐变导致的应力变化与应变变化之间关系的代数方程表达式。使内力重分配计算从微分方程解法转变为代数方程的解法。不仅简化了计算,而且提高了精度。1972年Z.P. Bazant对H. Trost的公式进行了严密的证明并将它推广应用到变化的弹性模量与无限界的徐变系数。Trost-Bazant的按龄期调整的有效模量法与有限单元法相结合,使得混凝土结构的收缩徐变计算能够采用更逼近实际的有限单元、逐步计算法。在Trost-Bazant理论基础上,W.H. Dilger教授在1982年提出的“徐变换算截面性质法”,使得构件内部配筋影响的计算获得很大简化。当然,上述的老化系数或按龄期调整的有效模量的计算,以及有限单元逐步计算等都需借助于电子计算机的运算。

我国混凝土结构设计考虑收缩、徐变影响,始于50年代预应力简支梁的预应力损失和上拱度计算。在60年代,对混凝土收缩、徐变性能进行了较系统的试验研究,提出了数学计算模式。超静定结构收缩徐变分析的国内文献。以1964年劳远昌教授的专著与张忠岳研究员等的试验报告为最早,但应用于实际结构则在70年代中期以后。至80年代,在Trost-Bazant理论基础上,提出了中值系数法。近年来,超静定结构的发展与部分预应力理论的应用更促使收缩、徐变影响的计算成为结构设计所不可缺少的内容。

本书着眼于在混凝土结构设计施工中的实际应用,主要考虑收缩、徐变对结构使用性能的影响。所引用的从30年代

到80年代的理论和方法都属于线性关系和迭加原理的范畴。

本书第一章对混凝土的组成、内部结构和物理力学性质作了简要的叙述,并在此基础上探讨了收缩、徐变的机理和影响收缩、徐变的各种因素。第二章着重于通过实验数据和数学模式来说明在工作应力下的混凝土应力-应变关系,并且讨论了工程实践中的徐变和松弛问题。第三章则着重于实际应用。

书中对引用的理论和方法均在文中或附录内进行了阐述,并附有算例以帮助读者加深理解与掌握解决实际问题的方法。书中内容既考虑了历史发展的轨迹,又力求反映这一领域国内外的最新成果。

但是,还必须指出:混凝土的收缩徐变及其对结构性能的影响的预计和控制是十分复杂又难以获得精确答案的问题。正如美国混凝土学会第209委员会1982年的报告所指出的那样,在这些问题中,包含了相当数量的不定因素。几乎所有影响收缩、徐变的因素,连同它们所产生的结果本身就是随机变量,它们的变异系数最好也要达到15%~20%左右。此外,对于卸载时的徐变恢复,用线性关系和迭加原理来处理,也会产生较大的偏差。因此,对于一些特别重要的工程,应该通过模型试验或实物测量来校核计算中所用参数,以提高计算结果与接近实际的程度。

另一方面,从徐变和收缩的数学模型到结构分析的理论和方法,国内、外的学者和学术团体都在进行研究改进的工作,例如根据统计学的原理对混凝土结构的收缩、徐变问题进行“不定性”分析的研究,对于卸载时徐变恢复的非线性问题的研究等。他们的研究成果肯定会有助于在今后提高这一领域的理论水平与实践水平。这些在当前属于研究探索的问题都未列入本书讨论的范围。

本书第一章、第三章及附录由周履执笔，第二章由陈永春执笔。全书由周履整理，由陈永春校核。其中附录六、八与算例 3—4—3 承诸林工程师供稿，谨表谢忱。

书中引用了一些高等院校和科研单位的试验研究资料，在此一并表示感谢。本书可能有不少缺点和错误，热情欢迎读者提出批评指正。

作 者

一九九二年七月

目 录

基本符号	1
第一章 混凝土的组成及其物理力学性质	7
第一节 混凝土的成分	7
一、原材料	7
二、混凝土的制备	18
三、凝固水泥浆(即水泥石)的结构	19
第二节 混凝土的物理力学性质	22
一、混凝土的强度	22
二、混凝土的弹性模量	29
三、混凝土的泊松比	32
四、混凝土的收缩徐变	32
五、混凝土的导热性和温度膨胀系数	33
第三节 混凝土收缩、徐变的机理及影响收缩、徐变的因素	33
一、混凝土收缩、徐变的机理	33
二、影响收缩徐变的因素	36
参考文献	61
第二章 混凝土的应力和应变	65
第一节 概 述	65
第二节 混凝土应力和应变的分类	70
一、应 力	70
二、应 变	70
第三节 预计混凝土弹性模量、徐变及收缩的数学表达式	72

一、预计混凝土弹性模量的数学表达式	72
二、预计混凝土徐变系数的数学表达式	73
三、预计混凝土收缩应变的数学表达式	82
四、收缩应变时间函数的表达式	83
第四节 混凝土应力和应变的关系	83
一、关于线性与非线性关系的讨论	83
二、徐变和松弛	90
三、线性关系和叠加原理	91
四、应力、应变关系的微分方程表达式	95
五、应力-应变关系的代数方程表达式	95
参考文献	110
第三章 收缩、徐变对混凝土结构性能的影响	114
第一节 概 述	114
第二节 配筋构件因收缩、徐变导致的内力重分布	115
一、迪辛格尔微分方程解	116
二、改进的迪辛格尔法微分方程解	137
三、利用老化系数或中值系数进行代数方程解	145
四、徐变换算截面性质法	170
五、逐步计算法	179
第三节 叠合梁因收缩徐变差所导致的内力重分布 计算	194
一、钢与混凝土叠合梁的内力重分布计算	195
二、混凝土叠合梁的内力重分布计算	202
第四节 超静定结构因收缩、徐变导致的力的重分布 计算	230
一、解微分方程或微分方程组法	232
二、解代数方程法	246
三、利用按龄期调整的有效模量进行拟弹性分析	

的有限单元、逐步计算法	250
四、考虑体内配筋影响的超静定结构内力重分布	
计算	285
第五节 收缩、徐变对结构变形的影响	289
一、未裂混凝土结构及构件的变形计算	290
二、收缩、徐变对已裂状态（状态Ⅱ）的钢筋混	
凝土梁及单向板的变形影响	300
三、徐变对压杆稳定的影响	307
参考文献	323
附 录	
附录一 关于混凝土弹性模量、徐变与收缩计算的国	
外规范条款和建议	327
附录二 特劳斯德·巴曾公式的推导及老化系数的计	
算	363
附录三 力筋对梁体的作用以及预应力的	
等效节点荷载	374
附录四 利用古典流变理论描述混凝土的收缩、徐变	
和松弛问题	380
附录五 预应力钢筋的松弛及其所产生的预应力损失	384
附录六 龙格-库塔法简介	388
附录七 用“代换棱体法”求解配筋构件与叠合梁因	
收缩、徐变导致的内力重分布问题	392
附录八 用有限单元、逐步计算法对分阶段施工的结	
构进行徐变分析的计算程序框图	403
参考文献	406

基 本 符 号

本书所用符号主要根据中华人民共和国国家标准：《混凝土结构设计规范》（GBJ10-89）中所用符号以及国家标准《建筑结构设计通用符号、计量单位和基本术语》（GBJ83-85）的规定。当采用两个下标表示由某种原因产生于某种材料的应力时，则以表示材料（即应力所在的本体）的下标为第一下标，位置在前，以表示原因的下标为第二下标，位置在后。例如：由预加应力产生的混凝土法向应力，本书中所采用的符号为 $\sigma_{\sigma, p}$ ，由恒载产生的混凝土法向应力则用 $\sigma_{\sigma, c}$... 这一点和国内外的习惯用法是一致的，但与上述（GBJ10-89）规范所用符号略有出入。

E_c ——混凝土弹性模量（静、割线模量）

E_{cd} ——混凝土动弹性模量

E_s ——普通钢筋的弹性模量

E_p ——预应力钢筋的弹性模量

G_c ——混凝土剪变模量

ν_c ——混凝土泊松比

C_{20} ——表示立方体强度标准值为 20N/mm^2 的混凝土强度等级

f_{cu} ——边长为 150mm 的混凝土立方体抗压强度

$f_{cu, h}$ ——边长为 150mm 的混凝土立方体抗压强度的标准值

f_{ch}, f_c ——混凝土轴心抗压强度标准值、设计值

f_{cmh}, f_{cm} ——混凝土弯曲抗压强度标准值、设计值

f_{th}, f_t ——混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值

f_{tmk}, f_{tm} ——混凝土弯曲抗拉强度标准值、设计值

f_{yk}, f_{pyk} ——普通钢筋、预应力钢筋强度标准值

f_y, f'_y ——普通钢筋的抗拉、抗压强度设计值

f_{py}, f'_{py} ——预应力钢筋的抗拉、抗压强度设计值

σ_c ——混凝土法向应力

τ_c ——混凝土剪应力

σ_{cp} ——由预加应力产生的混凝土法向应力

$\sigma_{c,j}$ ——由恒载或持久荷载产生的混凝土法向应力

σ_s, σ_p ——普通钢筋、预应力钢筋的应力

$\sigma_{p(0)}$ ——预应力钢筋的初始预应力

σ_L ——预应力钢筋的预应力损失

σ_{pe} ——预应力钢筋的有效预应力

σ_{con} ——预应力钢筋张拉控制应力

$\Delta\sigma_s(t, \tau), \Delta\sigma_p(t, \tau)$ ——普通钢筋、预应力钢筋在 (t, τ) 的时间间隔内的应力变化

σ_{pr} ——预应力钢筋的固有松弛应力

$\Delta\sigma_{pr}(t, \tau)$ ——预应力钢筋在 (t, τ) 的时间间隔内的固有松弛应力增量

ε_c ——混凝土法向应变

ν_c ——混凝土剪应变

ε_e ——混凝土弹性应变

ε_{er} ——混凝土徐变应变

$\varepsilon_s, \varepsilon_p$ ——普通钢筋、预应力钢筋应变

c ——混凝土徐变度 (即单位应力产生的徐变应变)

δ ——变位、挠度

δ_{ij} ——柔度系数, 即 j 点的单位力产生于 i 点的变位

θ ——角变位

ψ ——曲率

r ——半径、曲率半径

ε_{sh} ——混凝土收缩应变

$\varphi(t)$ ——混凝土从开始受荷经过时间 t 的徐变系数

$\varphi(t, \tau)$ ——混凝土从 τ 至 t 的时间间隔内的徐变系数

$\varphi(t, t_1, \tau)$ ——加载龄期为 τ 的混凝土从时刻 t_1 至 t 的时间间隔内的徐变系数

$\Phi(t, \tau)$ ——徐变函数，即在龄期为 τ 时施加的单位应力至龄期 t 时的混凝土总应变

$$\Phi(t, \tau) = \frac{1}{E_c(\tau)} (1 + \varphi(t, \tau))$$

$\xi(t, t')$ ——混凝土松弛系数，即从时刻 t' 施加的应变保持为常数时，至时刻 t 应力的降低值对初始

$$\text{应力的比值 } \xi = \frac{\sigma_c(t') - \sigma_c(t)}{\sigma_c(t')}$$

$E_R(t, t')$ ——混凝土的松弛函数，即在时刻 t' 施加单位应变保持不变时在时刻 t 所产生的应力

$$E_R(t, t') = E_c(t') (1 - \xi(t, t'))$$

$\alpha(t, \tau)$ ——混凝土的老化系数（参见附录二）

$E_\varphi(t, \tau)$ ——按龄期调整的有效模量

$$E_\varphi(t, \tau) = \frac{E_c(\tau)}{1 + \alpha(t, \tau) \varphi(t, \tau)}$$

α_{Es}, α_{Ep} ——截面内普通钢筋的弹性模量、预应力钢筋的弹性模量对混凝土弹性模量之比

A_c ——构件截面毛截面面积

A_n ——构件净截面面积

A_0 ——构件换算截面面积

A_s, A'_s ——受拉区、受压区纵向非预应力钢筋的截面面积

A_p, A'_p ——受拉区、受压区纵向预应力钢筋的截面面积

A_{sp}, A'_{sp} ——受拉区、受压区纵向预应力及非预应力钢筋换算成一种钢筋的截面面积

I_c, I_n ——构件毛截面、净截面的截面惯性矩

I_0 ——换算截面惯性矩

W ——截面受拉边缘的弹性抵抗矩（截面模量）

W_0 ——换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩

W_n ——净截面受拉边缘的弹性抵抗矩

i ——回转半径

a_s, a'_s ——纵向非预应力受拉钢筋合力点、受压钢筋合力点至截面近边的距离

a_p, a'_p ——受拉区纵向预应力钢筋合力点，受压区纵向预应力钢筋合力点至截面近边的距离

b, h ——截面宽度、高度

h_0 ——截面有效高度

l ——跨度或长度

x ——混凝土受压区高度

y_0, y_n ——换算截面重心、净截面重心至所计算纤维的距离

e_n, e_0 ——轴向力至净截面重心、换算截面重心的偏心距

e_{pn}, e_{p0} ——轴向预加力至净截面重心、换算截面重心的偏心距

z ——纵向受拉钢筋合力点至混凝土受压区合力点的距离

ρ_s, ρ_p ——非预应力钢筋、预应力钢筋的配筋比

ρ ——密度

F_s ——在钢筋混凝土构件中，沿钢筋轴线方向，钢筋作用于混凝土的力

F_p ——在预应力混凝土构件中，预应力钢筋沿其轴线方向作用于混凝土的力

N ——轴向力

N_p ——轴向预加力

V ——剪力

M ——弯矩

M_p ——由预加力产生于截面的弯矩

M_g ——由恒载或持久荷载产生于截面的弯矩

Q ——荷载

采用“徐变换算截面性质法”所用的特殊符号：

A_c^* ——徐变换算截面面积

I_c^* ——徐变换算截面惯性矩

i^* ——徐变换算截面回转半径

$$(i^* = \sqrt{I_c^* / A_c^*})$$

y^* ——徐变换算截面重心至所计算纤维的距离

σ_s^*, σ_p^* ——赋予非预应力钢筋、预应力钢筋的虚拟应力

N_s^*, N_p^* ——赋予非预应力钢筋、预应力钢筋的虚拟轴向力

M_s^*, M_p^* ——非预应力钢筋、预应力钢筋的虚拟力对徐变换算截面重心轴的虚拟弯矩

M_{sp}^* ——非预应力钢筋、预应力钢筋的虚拟力对徐变换算截面的虚拟弯矩之和

$\alpha_{Es}^*, \alpha_{Ep}^*$ ——非预应力钢筋的弹性模量、预应力钢筋的弹性模量对混凝土的按龄期调整的有效模量之比

σ_2^* ——在叠合梁中，赋予现浇混凝土板的虚拟应力

N_2^* ——在叠合梁中，赋予现浇混凝土板的虚拟轴向力

M_2^* ——在叠合梁中，现浇板的虚拟力对徐变换算截面重心轴的虚拟弯矩

第一章 混凝土的组成及其物理力学性质

第一节 混凝土的成分

混凝土是一种多相组合材料，它包含作为母体的水泥砂浆和包含在其中的粗骨料，而水泥砂浆本身又包括作为母体的水泥浆和包含在其中的细骨料。大多数骨料本身也是多相组合材料，包括各种结晶的或非结晶的成份，并含有不同程度的空隙率。水泥的水化反应使新鲜的塑性水泥浆转变为凝固水泥浆或水泥石，同时使新鲜混凝土转变为凝固混凝土。这是一种复杂的化学和物理的变化过程。凝固水泥浆或水泥石包括水泥的水化产物、未水化的水泥、空气和水份等。在混凝土中，水泥石是产生收缩徐变的主要成份，而骨料的收缩徐变一般是微小得可以忽略不计。骨料往往成为抑制收缩徐变的因素。

一、原材料

(一) 水泥

混凝土最常用的水泥是硅酸盐族水泥，是用硅酸盐水泥熟料加入不同品种、不同数量的混合材料磨细制成的水硬性胶凝材料。

硅酸盐水泥熟料是由石灰石、陶土或其他含有氧化钙、氧化硅、氧化铝、氧化铁等原料磨细拌匀，煅烧至 $1300\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 达到部分熔融得到的以硅酸钙为主要成份的熔渣。冷