

混凝土的徐变力学 与试验技术

唐崇钊 编著



水利电力出版社

混凝土的徐变力学 与试验技术

王勖德 主编

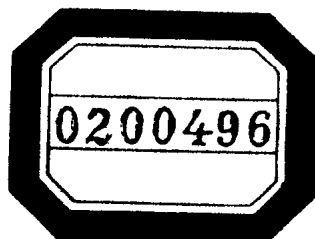


清华大学出版社

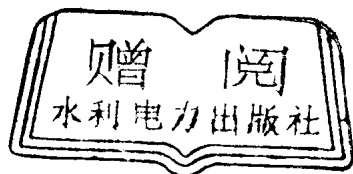
水电部科技情报所	
图书总号	12634
分类号	TU321

混凝土的徐变力学 与试验技术

唐崇钊 编著



006057 水利部信息所



水利电力出版社

混凝土的徐变力学与试验技术

唐崇钊 编著

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 7.75 印张 170 千字
1982年12月第一版 1982年12月北京第一次印刷
印数0001—6600册 定价0.85元
书号15143·5022

内 容 提 要

本书简述混凝土徐变计算的基本理论、解题方法与试验技术等方面的问题。其中包括混凝土的徐变规律、徐变方程、徐变定理的证明与徐变问题的分类、松弛问题与一般的混合边值问题的解法,以及徐变试验的原理与方法。

本书阐述了作者工作的有关成果,同时也介绍了其他学者的有关研究内容。可供水利、土建方面的工程技术人员与有关的高等院校师生参考。

3116/40 01

前 言

本书是为水利、土建方面的工程技术人员与试验研究工作者写的，目的是阐述混凝土徐变计算的基础理论、计算方法与试验技术。

全书共两篇分为六章。第一章介绍混凝土的徐变规律：其中包括常荷载、变荷载与三向应力状态下的徐变及常应变下的应力松弛，均为试验的结果等。第二章首先介绍几种常用的徐变理论，并着重讨论本书采用的徐变物理方程，根据第一章介绍的有关成果，分析了各种徐变物理方程的优缺点与适用范围；然后介绍线性徐变力学的基本方程，用积分型的物理方程证明了在混合边界条件下线性徐变体结构的两个定理，并根据两个定理将有关的徐变问题分为三类，指出其求解的途径，从而使得混凝土的线性徐变理论建立在比较严谨的基础上。第三章讨论松弛方程的求解方法（包括精确解法与近似解法），将各种徐变理论的松弛方程与松弛试验的结果进行了比较，证明了本书采用的物理方程与松弛试验结果的一致性。第四章以几个简单的结构为例，说明混合边值问题的求解方法，其中包括直接解法与松弛代数法，每一节的后面均附有算例，用来说明徐变对应力的影响和松弛代数法的精度。第五章叙述混凝土徐变试验的原理与技术。第六章讨论徐变试验中的成果整理。

通过本书的讨论，希望读者不但从中能了解混凝土徐变、徐变计算理论与试验的有关知识，而且能掌握解决实际问题的方法。

在编写本书时，曾得到我在南京水利科学研究所的同事与有关单位的同行的热情支持与帮助，朱伯芳高级工程师对初稿提出了宝贵的意见，傅作新教授对书稿作了详细的审阅，并提出了重要的改进意见，在此一并致谢。

编著者

1982年3月

目 录

前 言

第一篇 混凝土的徐变力学问题

第一章 长期荷载下混凝土的变形	1
第一节 常荷载下的轴向变形	2
第二节 常荷载下的横向变形	5
第三节 徐变的恢复	7
第四节 变荷载下的徐变	9
第五节 三向应力下混凝土的变形	13
第六节 常应变下混凝土的应力松弛	15
第二章 徐变力学的基本方程与基本问题	18
第一节 变荷载下的应变计算	19
第二节 徐变力学的基本方程	35
第三节 按位移求解的基本方程	39
第四节 线性徐变力学的基本定理	43
第五节 线性徐变力学中的三类问题及其求解途径	55
第三章 混凝土的应力松弛	58
第一节 松弛方程	58
第二节 继效方程(3-19)的积分	64
第三节 老混凝土松弛方程(3-20)的解	70
第四节 早龄期混凝土松弛方程的求解	82
第五节 松弛方程与试验的一致性	95
第四章 混凝土结构物的计算	101
第一节 组合圆管的荷载重分布	101
第二节 弹性支承圆拱的计算	123
第三节 弹性基础上混凝土刚架的温度内力	142

第四节	用松弛代数法解杆件结构的温度应力	157
第五节	弹粘性基础上梁的温度内力	173
第六节	用松弛代数法解实体结构的应力	185

第二篇 混凝土的徐变试验问题

第五章	试验的理论与技术	192
第一节	混凝土的非荷载变形	192
第二节	徐变试验要测定的数据	197
第三节	徐变与环境条件的关系	201
第四节	试件的制作与养护问题	210
第五节	加荷与量测问题	215
第六章	试验成果的整理	222
第一节	数据匀整与图表表示	222
第二节	变形函数的公式表示	225
第三节	徐变公式的图解作法	229
结语		234
参考文献		237

第一篇 混凝土的徐变力学问题

第一章 长期荷载下混凝土的变形

随着荷载持续时间的增长，材料随时间逐渐发展的变形，统称为徐变或徐变变形。混凝土试件在无荷载作用下，在一段较长的时间内，由于蒸发、温度改变和混凝土内部材料的化学物理变化，还会产生随时间变化的干缩、温度伸缩和自身变形。我们把同样尺寸形状的加荷试件和不加荷试件置于同一环境中，将加荷试件随时间发展的变形减去不加荷试件以加荷时刻为起点的随时间发展的变形，其差值称为混凝土的徐变。如果加荷的应力不太大以至可以略去加荷瞬间混凝土变形中的塑性部分时，其总的荷载变形只包括瞬时弹性变形和徐变变形两部分。

从混凝土硬化以后，在一段相当长的时间内，它的物理特性如强度、弹性模量、徐变等，还与浇筑后经历的时间的长短有关。为了说明上述属性，将要引入龄期这一概念。所谓混凝土的龄期是从混凝土浇筑时开始计算的。试件从加荷时刻开始，荷载持续时间的长短称为持荷时间或荷载历时。观测变形的时间可以从成型时刻算起，亦可以从加荷时刻算起。

为了建立徐变力学的物理方程（本构方程），本章将综述混凝土徐变试验的若干结果。

第一节 常荷载下的轴向变形

设混凝土在龄期 τ_1 受单向应力 $\sigma(\tau_1)$ 作用, 在加荷瞬时发生的应变称瞬时应变。当应力不大时(在强度的0.3~0.4倍以内), 应变几乎完全可逆, 即存在关系

$$\varepsilon(\tau_1) = \frac{\sigma(\tau_1)}{E(\tau_1)} \quad (1-1)$$

若保持应力不变, 应变将随时间增加, 这种随时间增长的荷载应变即为徐变, 其值与应力 $\sigma(\tau_1)$ 成正比, 可表示成

$$\sigma(\tau_1)c(t, \tau_1)$$

$c(t, \tau_1)$ 称徐变度, 量纲是厘米²/公斤, t 是变形观测时间, τ_1 是加荷龄期。因应力为常量, 故到 t 时刻的总应变 $\varepsilon(t)$ 为

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \frac{\sigma(\tau_1)}{E(\tau_1)} + \sigma(\tau_1)c(t, \tau_1) \\ &= \sigma(\tau_1)\delta(t, \tau_1) \end{aligned} \quad (1-2)$$

$\delta(t, \tau_1) = \frac{1}{E(\tau_1)} + c(t, \tau_1)$ 称单位应力的总变形。

如果分别在龄期 τ_1 、 τ_2 、……、 τ_n 时刻对同一混凝土不同试件施加常荷载, 就可以获得一族单位应力总变形曲线 $\delta(t, \tau_1)$ 、 $\delta(t, \tau_2)$ 、…… $\delta(t, \tau_n)$, 如图1-1所示。

单位应力总应变 $\delta(t, \tau_n)$ 与加荷龄期 τ_n 有关, 加荷龄期小, $\delta(t, \tau_n)$ 大, 加荷龄期大则反之。这种效应称老化。若加荷龄期足够大, 不同龄期下的单位应力总变形曲线会相近甚至相同, 这时称混凝土已趋老化或已充分老化。

因为龄期增长时混凝土的单位应力瞬时变形将减少, 所以混凝土的弹性模量是时间的增函数(图1-2)。瞬时弹性

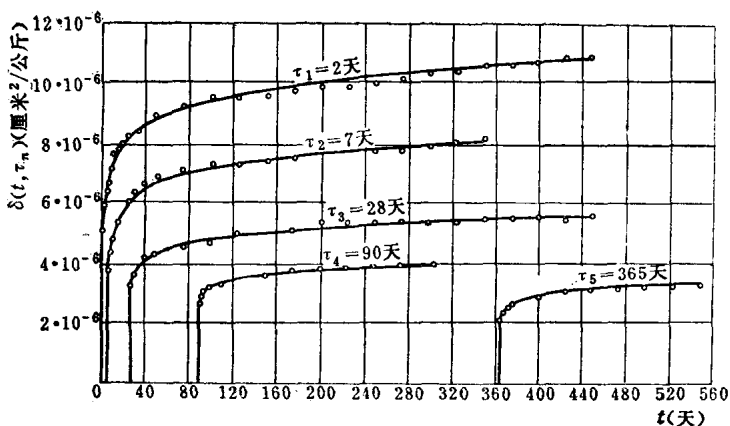


图 1-1 单位应力总变形 $\delta(t, \tau_n)$

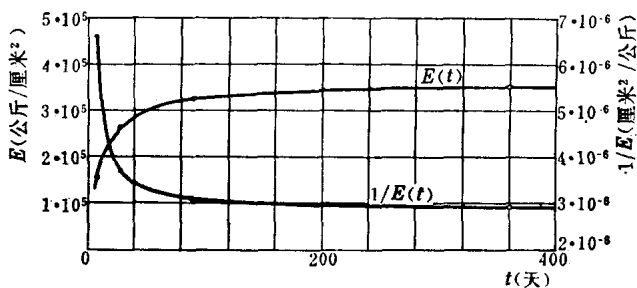


图 1-2 单位应力瞬时弹性变形和弹性模量曲线

变形是加荷时刻出现的变形，加荷时间、观测时间和材料龄期是相同的。

在单位应力的总变形曲线中，除去瞬时弹性变形部分外，即为常荷载的徐变变形。徐变应等于徐变曲线与单位应力瞬时弹性变形曲线之差值。在 τ_1 时刻对试件施加一个常应

力 $\sigma = 1$, t 时刻的徐变 $\delta_e(t, \tau_1)$ 为

$$\delta_e(t, \tau_1) = c(t, \tau_1) + \frac{1}{E(\tau_1)} - \frac{1}{E(t)} \quad (1-3)$$

若混凝土已充分老化, 则 $E(\tau_1) = E(t) = E$, E 为常量, 徐变是徐变曲线与通过徐变始点所作的水平线之差值, 即 $c(t, \tau_1)$ 。

徐变度 $c(t, \tau_1)$ 与下列因素有关:

(1) 荷载的历时 当荷载历时增加, 徐变变形增加, 但徐变速率 (t 时刻徐变曲线的斜率) 减小; 若荷载历时足够长, 徐变速率会趋于零, 这时徐变曲线趋向某一水平线 (徐变最终值)。故有

$$\begin{aligned} c(t, \tau_1) \big|_{t=\tau_1} &= 0 \\ c(t, \tau_1) \big|_{t-\tau_1 \rightarrow \infty} &= c_0(\tau_1) \end{aligned}$$

$c_0(\tau_1)$ 是与加荷龄期 τ_1 有关的最终徐变值。

(2) 加荷的龄期 加荷龄期小, 相同持荷时间的徐变大, 反之则小。加荷龄期小, 开始一段持荷时间里徐变发展快, 徐变速率衰减也快; 加荷龄期大, 在开始一段时间里徐变速率小, 但徐变速率随持荷时间的衰减也慢。所以不同加荷龄期的徐变度曲线是不相似的, 其原因是加荷过程中混凝土水化过程尚在继续进行。当加荷龄期足够大, 徐变度曲线实际上与龄期无关, 这时混凝土可认为已充分老化。

(3) 湿度的影响 湿度对徐变的影响很大。试件在比较干燥的环境中加荷, 其徐变变形可能是密封试件徐变的 2 ~ 3 倍甚至更多。非密封试件徐变变形会比密封试件徐变变形的延续时间长得多。试验室湿度变化较大, 非密封试件的徐变速率呈非单调变化 (图 1-3)。密封试件的徐变称基本徐变, 非密封试件的徐变与基本徐变之差称干徐变。

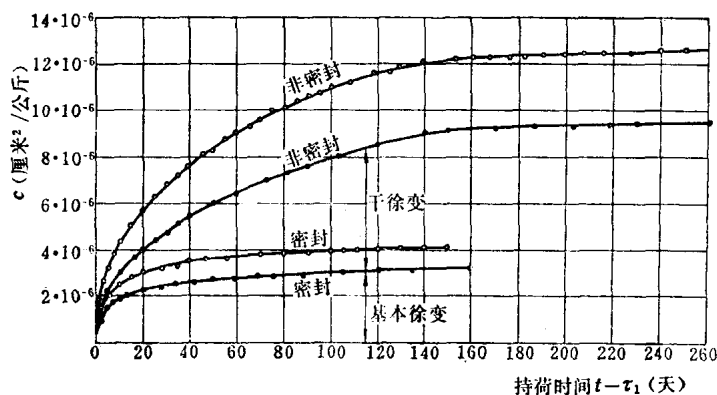


图 1-3 非密封试件与密封试件的徐变度曲线

(4) 温度的影响 在普通温度下, 温度高则徐变大, 即使在密封条件下亦是这样。温度还会促使混凝土的老化进程, 有使早龄期徐变减少的趋向。故其对早龄期混凝土徐变的影响是复杂的。

第二节 常荷载下的横向变形

如图1-4所示, 试件在龄期 τ_1 施加常应力 $\sigma_x(\tau_1)$, x 方向的瞬时弹性变形是 $\sigma_x(\tau_1)/E(\tau_1)$, 徐变应变为 $\sigma_x(\tau_1)c(t, \tau_1)$, 在 y 和 z 方向将产生横向变形。横向的瞬时应变是

$$-\mu_1(\tau_1) \frac{\sigma_x(\tau_1)}{E(\tau_1)}$$

横向的徐变应变为

$$-\mu_2(t, \tau_1) \sigma_x(\tau_1) c(t, \tau_1)$$

总的横向应变用下式表示

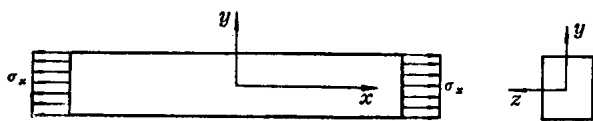


图 1-4

$$\varepsilon_y(t) = -\sigma_x(\tau_1) \left[\frac{\mu_1(\tau_1)}{E(\tau_1)} + \mu_2(t, \tau_1) c(t, \tau_1) \right] \quad (1-4)$$

$\mu_1(\tau_1)$ 是弹性泊松比, $\mu_2(t, \tau_1)$ 是徐变泊松比, 它们都与时间有关。根据有关试验^[12], 它们与龄期的关系大致如图 1-5 所示。

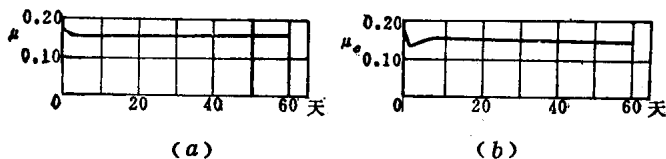


图 1-5

(a) 总变形(包括瞬时变形与徐变变形)的泊松比; (b) 徐变泊松比

在工程计算中, 由于 $\mu_1(\tau_1)$ 、 $\mu_2(t, \tau_1)$ 本身不大, 其值随时间的变化也不明显, 可以取为相等的常量 μ , 即

$$\mu_1(\tau_1) = \mu_2(t, \tau_1) = \mu \quad (1-5)$$

通常可用 $\mu = \frac{1}{6} \sim \frac{1}{7}$ 。

第三节 徐变的恢复

试件受固定荷载的长时间作用，卸荷以后将产生瞬时回弹应变和随时间发展的徐变恢复。徐变恢复曲线与水平线之间的值为可复徐变应变（图 1-6）。可复徐变应变与卸荷前施加的常应力成正比，单位应力的徐变恢复称弹性后效，又称可复变形。

弹性后效只是徐变变形的一部分，其形状虽然与徐变度曲线相近，但发展很快，大约在卸荷以后经过不长的时间（约 1~2 个月）即达到其最大恢复值 c_y 。

若试件在 τ_1 时刻加荷， τ 时刻卸荷，则 t 时刻观测的徐变恢复可以表示为

$$\sigma c_y(t, \tau, \tau_1)$$

$c_y(t, \tau, \tau_1)$ 是弹性后效， σ 是卸荷前的应力。

弹性后效与加荷龄期无明显关系^①，且卸荷时间对它的影响也很小（图 1-6）。对于在混凝土早龄期加荷的条件下，且持荷时间不太长时卸荷，其徐变恢复会较晚期的徐变恢复大，如图 1-6 中 $\tau_1 = 7$ 天一组曲线。此短期的增大效应是否带有普遍性，还有待进一步验证。

徐变恢复有最大恢复量的趋向。最大恢复量 c_y 在总的徐变变形中所占的比例不大。与持荷一年的徐变变形相比，相对值 $c_y/c(t, \tau_1)$ 大约在 5%~30% 左右。由于 c_y 比较稳定，而徐变度 $c(t, \tau_1)$ 因湿度、龄期 τ_1 不同有较大变动，所以上述比值也就有较大变动。设 E 为混凝土晚龄期的弹性模量，

① 读者可参阅有关文献。

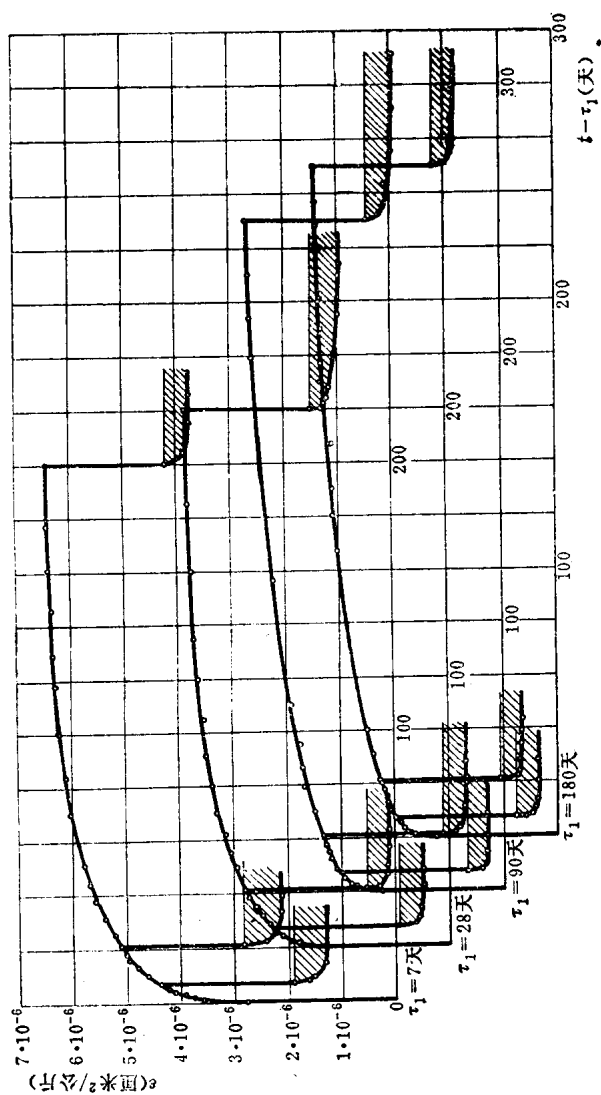


图 1-6 单位应力的总变形与卸荷后变形的恢复曲线