

电力科技专著出版资金资助项目

NINGTU
BIAN YU SHOUSUO

混凝土 徐变与收缩

黄国兴 惠荣炎 王秀军 编著●



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



混凝土 徐变与收缩

黄国兴 惠荣炎 王秀军 编著 ●

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书分为上下两篇。上篇系统论述了混凝土的徐变问题,包括基本概念、影响因素、各种应力状态下的徐变及徐变恢复、徐变机理与流变模型、试验仪器设备、常荷载下徐变的计算方法、变荷载下徐变计算理论、各种混凝土的徐变,以及混凝土应力松弛系数计算方法等。

下篇系统论述了混凝土收缩问题,包括收缩变形种类、影响因素、收缩机理、试验仪器设备及试验方法、估算收缩的方法,以及各种混凝土的收缩与减小收缩的措施等。

本书阐述了作者的多年研究成果,同时也介绍了国内外学者有关文献资料。本书可供水利、水电、铁道、交通、冶金等土建工程技术人员及高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土徐变与收缩/黄国兴,惠荣炎,王秀军编著. —北京:
中国电力出版社, 2011. 11

ISBN 978-7-5123-2405-3

I. ①混… II. ①黄… ②惠… ③王… III. ①混凝土—物理
性质 IV. ①TU528.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 244188 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 5 月第一版 2012 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 385 千字

印数 0001—3000 册 定价 56.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

由黄国兴执笔编写, 1988 年 8 月出版的《混凝土的徐变》和 1990 年 3 月出版的《混凝土的收缩》两本专著主要是搜集 1990 年以前的有关资料并经整理编写而成。近 20 年来, 混凝土的徐变与收缩方面进行了大量试验研究工作, 积累了很多资料。在混凝土徐变方面, 主要有水工大体积全级配混凝土、碾压混凝土、溜槽(面板)混凝土、泵送混凝土、膨胀混凝土等徐变特性, 以及成功研制 2000kN 压缩徐变试验机、应力松弛试验机与徐变自动化测量系统等。在混凝土收缩方面, 主要有水工大体积全级配混凝土、碾压混凝土、溜槽(面板)混凝土、泵送混凝土、纤维混凝土等收缩特性, 以及高强高性能混凝土自收缩的收缩机理、试验仪器设备与试验方法等。为此作者认为, 在原有《混凝土的徐变》与《混凝土的收缩》两本专著的基础上, 吸收近 20 年来混凝土徐变与收缩的试验研究成果重新编写一本《混凝土徐变与收缩》很有必要。

本书共分两篇 18 章。上篇(第 1 章~第 11 章)为混凝土徐变部分, 下篇(第 12 章~第 18 章)为混凝土收缩部分。第 1 章介绍混凝土徐变的基本概念; 第 2 章叙述影响混凝土徐变的内部因素, 如水泥、骨料、水胶比、灰浆率、外加剂、粉煤灰等; 第 3 章叙述影响混凝土徐变的外部因素, 如加荷龄期、加荷应力、持荷时间、相对湿度、温度、试件尺寸、浸泡的介质及碳化等; 第 4 章介绍拉伸、多轴、扭转、周期应力及高应力作用下的徐变等; 第 5 章叙述徐变恢复的影响因素及不同应力状态下的徐变恢复特性; 第 6 章简述徐变机理与流变模型; 第 7 章介绍压缩、拉伸、多轴、扭转等徐变试验加荷设备与变形测量仪器, 以及徐变自动化测量系统; 第 8 章叙述常荷载作用下的徐变表达式、估算方法, 以及从短期试验资料预报长期徐变; 第 9 章扼要介绍徐变计算理论与方法; 第 10 章介绍水工大体积全级配混凝土、碾压混凝土、溜槽(面板)混凝土、泵送混凝土、膨胀混凝土等混凝土徐变特性; 第 11 章介绍混凝土应力松弛的基本概念、松弛系数的计算方法、松弛系数与徐变系数的关系, 以及松弛试验设备等; 第 12 章介绍混凝土收缩的种类; 第 13 章叙述混凝土收缩的影响因素, 如水泥、掺合料、骨料、外加剂、混凝土配合比、周围介质条件、养护方法、龄期、结构特征、碳化等; 第 14 章简述混凝土干燥收缩、化学收缩、自收缩的收缩机理等; 第 15 章介绍混凝土干燥收缩、自生体积收缩、自收缩与凝缩等量测仪器及试验方法等; 第 16 章介绍混凝土收缩表达式、估算混凝土收缩的方法, 以及从短期收缩资料推断长期收缩等; 第 17 章扼要介绍水工大体积全级配混凝土、碾压混凝土、面板(溜槽)混凝土、泵送混凝土与纤维混凝土等混凝土收缩特性; 第 18 章叙述减小混凝土干燥收缩与温度收缩的技术措施。

通过本书的讨论, 希望读者不但从中能了解有关混凝土徐变与收缩的系统知识, 而且还

能掌握解决实际问题的方法。

中国水利水电科学研究院结构材料研究所早在 1958 年就开始进行混凝土徐变的试验研究工作，在 20 世纪 50 年代末到 60 年代初，伍国梁、周乾父等研制了弹簧式徐变试验机，金学龙等开展了混凝土徐变恢复（弹性后效）试验研究，后来惠荣炎、易冰若、黄国兴、王秀军、张承志等都先后从事混凝土徐变试验研究工作，取得大量研究成果。

书中有很多资料引自许多单位的研究成果或个人的论文著作，在此，谨向有关单位及个人表示衷心感谢。

本书由黄国兴执笔。在编写本书过程中，曾得到中国水利水电科学研究院结构材料研究所领导及同志们热情支持与帮助，在此表示感谢！

由于作者理论知识和实践经验的限制，书中可能存在一些缺点与错误，诚恳希望读者给予指正。

作者

2012 年 3 月

目 录

前言

上篇 混凝土徐变

1 基本概念	3
1.1 瞬时变形	3
1.2 基本徐变及干燥徐变	4
1.3 徐变恢复	5
1.4 应力松弛	6
2 影响混凝土徐变的内部因素	7
2.1 水泥	7
2.2 骨料	10
2.3 水胶比	13
2.4 灰浆率	14
2.5 外加剂	14
2.6 粉煤灰	17
3 影响混凝土徐变的外部因素	21
3.1 加荷龄期	21
3.2 加荷应力	23
3.3 持荷时间	25
3.4 相对湿度	26
3.5 温度	30
3.6 试件尺寸、形状及各向异性	34
3.7 浸泡的介质	36
3.8 碳化	37
4 不同应力状态下的徐变	38
4.1 拉伸徐变	38
4.2 多轴徐变	45
4.3 扭转徐变	47

4.4	周期应力徐变	49
4.5	高应力徐变	51
4.6	横向徐变及徐变泊松比	52
5	徐变恢复	56
5.1	基本概念	56
5.2	影响因素	60
5.3	不同应力状态下的徐变恢复	64
6	徐变机理与流变模型	66
6.1	徐变理论	66
6.2	徐变假设	69
6.3	流变模型	72
7	徐变试验仪器设备	79
7.1	压缩徐变设备	79
7.2	拉伸徐变设备	81
7.3	多轴压缩徐变设备	83
7.4	扭转和弯曲徐变设备	85
7.5	徐变量测仪器	86
7.6	徐变自动化测量系统	87
8	常荷载作用下的徐变	89
8.1	徐变表达式	89
8.2	徐变的估算方法	95
8.3	从短期试验资料预报长期徐变	104
9	徐变计算理论和方法	107
9.1	有效模量法	108
9.2	老化理论	108
9.3	弹性徐变理论	110
9.4	弹性老化理论	110
9.5	继效流动理论	112
9.6	龄期调整有效模量法	113
9.7	徐变计算理论的比较	118
10	各种混凝土的徐变	119
10.1	水工大体积混凝土	119
10.2	碾压混凝土	131
10.3	溜槽(面板)混凝土	135
10.4	泵送混凝土	137
10.5	膨胀混凝土	137

10.6	聚合物浸渍混凝土	139
10.7	糠醛树脂混凝土	141
10.8	环氧树脂混凝土	141
10.9	聚酯树脂混凝土	142
11	混凝土的应力松弛	144
11.1	基本概念	144
11.2	松弛系数的计算方法	145
11.3	松弛系数与徐变系数的关系	151
11.4	混凝土应力松弛试验设备	153

下篇 混凝土收缩

12	混凝土收缩变形的种类	159
12.1	基本概念	159
12.2	收缩变形的种类	160
12.3	湿胀变形	167
13	影响混凝土收缩的因素	169
13.1	水泥品种的影响	169
13.2	掺合料种类及掺量的影响	171
13.3	骨料品种及含量的影响	176
13.4	混凝土配合比的影响	177
13.5	外加剂种类和掺量的影响	179
13.6	周围介质条件的影响	186
13.7	养护条件的影响	188
13.8	混凝土龄期的影响	189
13.9	结构特征的影响	189
13.10	碳化作用的影响	190
14	收缩机理	193
14.1	水泥浆体的结构	193
14.2	干燥收缩机理	196
14.3	化学收缩机理	199
14.4	自收缩机理	201
14.5	水泥石的收缩过程	201
15	试验仪器设备与试验方法	204
15.1	干缩试验室及基准值	204
15.2	干缩试验	205
15.3	自生体积收缩试验	209

15.4	自收缩试验	210
15.5	凝缩试验	211
16	估算收缩的方法	213
16.1	收缩表达式	213
16.2	估算收缩的方法	214
16.3	从短期收缩试验资料推断长期收缩变形	223
17	各种混凝土的收缩	227
17.1	水工大体积全级配混凝土	227
17.2	碾压混凝土	228
17.3	面板（溜槽）混凝土	232
17.4	泵送混凝土	233
17.5	高强混凝土	234
17.6	纤维混凝土	236
17.7	不同品种骨料混凝土干缩的比较	238
18	减小收缩的措施	240
18.1	减小干燥收缩的措施	240
18.2	减小温度收缩的措施	247
	参考文献	254

上 篇

混凝土徐变

1 基 本 概 念

早在 19 世纪以前,混凝土就作为结构材料得到应用。当时混凝土结构设计与钢结构设计相类似,假定混凝土是弹性材料。1905 年威尔逊 (I. H. Woolson) 发现,在高轴向应力作用下,钢管中的混凝土有流动现象。1907 年美国材料试验学会 (ASTM) 首先报道了钢筋混凝土梁的徐变资料。这些结果表明,混凝土还具有一定的塑性。1915 年姆克米莱 (F. R. Mcmillan) 进行了混凝土加荷与不加荷依时性变形的试验,1917 年史密斯 (E. B. Smith) 在美国混凝土学会 (ACI) 杂志上发表了混凝土徐变与徐变恢复的试验成果,直到 1931 年戴维斯 (R. E. Davis) 等人对混凝土的徐变性能进行了系统研究之后,才对徐变性能有了较明确的认识,前后历经近 30 年^[1]。

从 20 世纪 30 年代到现在的 80 多年中,混凝土徐变研究取得了巨大的成就,积累了大量有实用价值的试验研究资料,并出版了不少专著。

所谓徐变是在持续荷载作用下,混凝土结构的变形将随时间不断增加的现象。一般徐变变形比瞬时弹性变形大 1~3 倍。因此,在结构设计中徐变是一个不可忽略的重要因素。徐变对结构的影响有有利方面,也有不利方面。众所周知,徐变可以引起预应力混凝土结构的预应力损失;在大跨度梁中,徐变增加了梁的挠度,这些都是徐变对结构的有害影响,故在这些结构中应尽量减小混凝土徐变。然而在大体积混凝土结构中,徐变能降低温度应力,减少收缩裂缝;在结构应力集中区和因基础不均匀沉降引起局部应力的结构中,徐变能削减这类结构的应力峰值,这些都是徐变对结构的有利影响。因此,在这类结构中,在保持强度不变条件下,要设法提高混凝土的徐变。

1.1 瞬 时 变 形

混凝土试件受压 (或受拉) 及卸荷时典型的应力—应变曲线如图 1-1 所示。图中 ϵ_T 为总变形, ϵ_e 为瞬时弹性变形, ϵ_s 为瞬时塑性变形。

实测应变的大小及应力—应变曲线的曲率决定于加荷速度。当加荷速度极快,譬如加荷速度小于 0.01s 时,应变读数则大大减小,应力—应变曲线的曲率也极小 (近似成直线);当加荷时间从 5s 增至 2min 左右,应变的增加可达 15%;但加荷时间在 2~10min 范围内 (普通试验机上所需的正常时间),应变的增加却很微小。这里加荷时间超过 5s 所增加的应

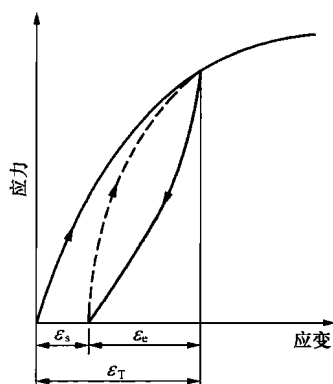


图 1-1 混凝土的
应力—应变曲线

变是混凝土徐变引起的。瞬时应变与加荷速度有关，这样就难以把弹性应变与徐变区分开来，为了实用目的，进行了人为区分：在加荷时刻产生的变形定为弹性变形，而把随后增加的应变定为徐变^[2]。不过，用反复加荷和卸荷的方法做弹性模量试验，可以减小徐变对弹性模量测值的影响，这样测得的弹性变形比较接近真值。

这里还应提出，混凝土弹性模量随龄期增加而增加，相应的弹性变形随龄期而减小。因此，严格地说，徐变应看做是测定徐变时所超过弹性变形的那部分应变。可是，不同龄期的弹性模量往往是不测定的，因此，为了方便起见，就把徐变看做是超过加荷时初始弹性应变的那部分变形。

1.2 基本徐变及干燥徐变

混凝土徐变试验多数是在混凝土边干燥边受荷载情况下进行的。因此，随时间的变形中包括荷载和干燥两种影响在内。一般把总变形减去不加荷试件（对比试件）的体积变形（补偿变形）称为总徐变变形。混凝土在密封条件下（与周围介质没有湿度交换）受持续荷载产生的徐变称为基本徐变，总徐变值减去基本徐变后的部分称为干燥徐变^[2]，即

$$\text{总徐变} = \text{基本徐变} + \text{干燥徐变}$$

受持续荷载及干燥作用的混凝土变形曲线如图 1-2 所示。对大体积混凝土来说，其内

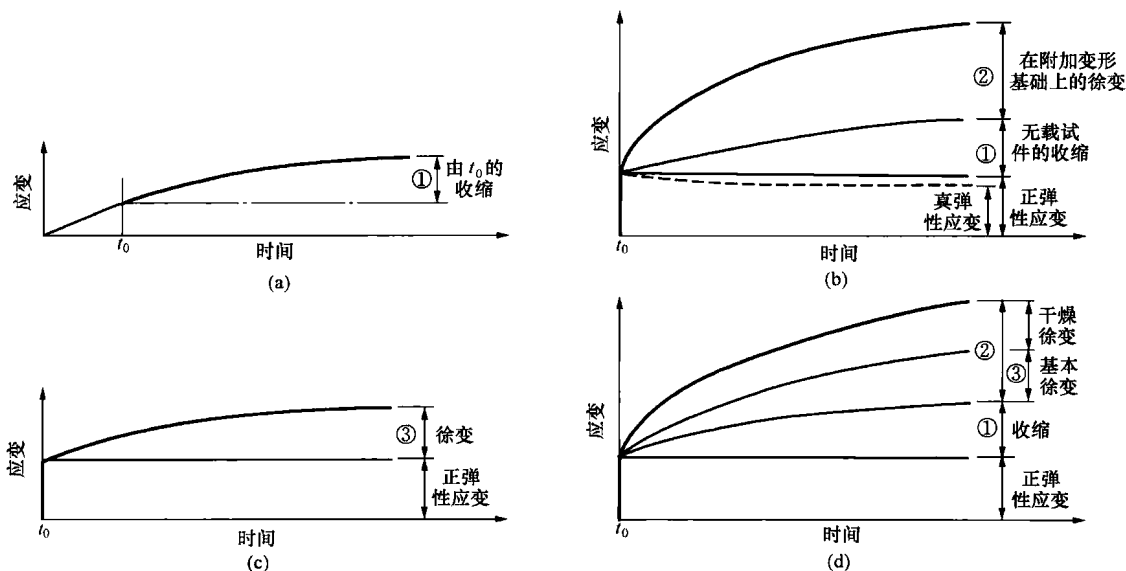


图 1-2 受持续荷载及干燥作用下混凝土的变形曲线

(a) 无载试件的收缩；(b) 加载与干燥试件的应变变化；(c) 与周围介质湿度平衡时加载试件的徐变；

(d) 加载与干燥试件的应变变化

部水分不易蒸发，几乎是绝湿状态。因此，大体积混凝土徐变试验都在密封状态下进行，由上述定义，该试验得出的徐变属基本徐变。

1.3 徐 变 恢 复

混凝土在外荷载作用下，立即产生瞬时弹性变形 ϵ_e 。随时间的增长，混凝土变形逐渐增加，该变形扣除补偿变形即为徐变变形（见图 1-3）。为应用方便起见，定义单位应力作用下的徐变变形为徐变度（亦称比徐变），即

$$C(t, \tau) = (\epsilon_T - \epsilon_0) / \sigma$$

式中 $C(t, \tau)$ ——在龄期 τ 加荷， t 时刻的徐变度， $10^{-6}/\text{MPa}$ ；

ϵ_T ——徐变变形与补偿变形之和， 10^{-6} ；

ϵ_0 ——补偿变形， 10^{-6} ；

σ ——加荷应力， MPa 。

当外荷载去掉后，立即产生弹性恢复 ϵ_y （见图 1-3），这里 $\epsilon_y < \epsilon_e$ 。随着时间的增长，便产生徐变恢复，又称迟后弹性变形。为应用方便起见，定义单位应力下的迟后弹性变形为弹性后效 C_d 。徐变恢复仅为卸荷前徐变的 5%~30%。因此，还有大部分徐变不可恢复，这部分不可恢复徐变也称流动变形 C_f （单位应力下）。这样徐变可分成两部分（见图 1-4），即

$$C = C_d + C_f$$

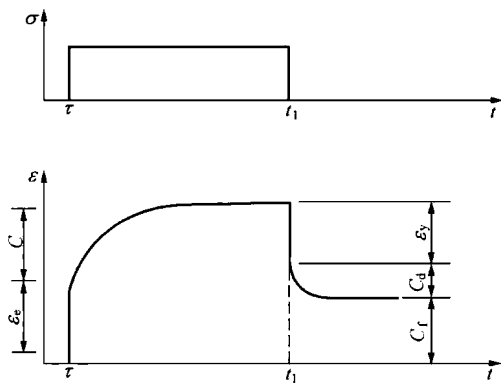


图 1-3 混凝土的徐变与徐变恢复

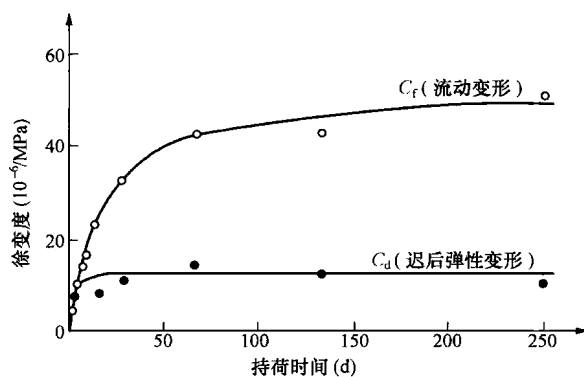


图 1-4 徐变的迟后弹性变形与流动变形

从图 1-4 可以明显地看出，迟后弹性变形曲线（卸荷徐变恢复曲线）与加荷徐变增长曲线形状相似，但前者在卸荷后约 1~2 个月就趋于稳定，且与加荷龄期基本无关。

从图 1-4 可见，流动变形随时间不断增长，但其增长速率却逐渐减小。

综上所述，混凝土在正常工作应力持续作用下，将产生瞬时变形和徐变变形，而瞬时变形包括可恢复的塑性变形；徐变变形包括可恢复的迟后弹性变形和不可恢复的流动变形，可用表 1-1 来表示^[1]。

表 1-1

混凝土的变形

变 形	瞬 时 变 形	随时间变化的徐变变形
可恢复	弹性变形	迟后弹性变形
不可恢复	塑性变形	流动变形

1.4 应 力 松 弛

混凝土结构在荷载作用下,如果保持变形为常量,则结构应力将随时间逐渐减小,这现象称为应力松弛(见图 1-5)。这是由混凝土的徐变特性引起的。定义任意时刻应力与初始应力之比称为应力松弛系数。松弛试验是保持变形不变,逐渐减小荷载,试验比较费事。因此,应力松弛系数一般根据常荷载作用下的徐变资料直接由徐变方程求解而得。

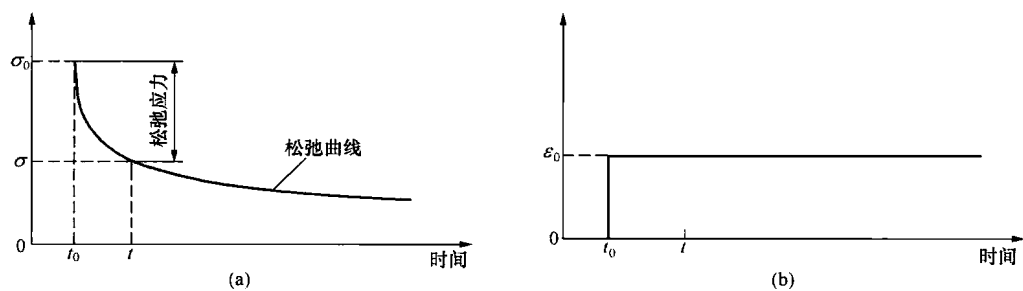


图 1-5 混凝土的应力松弛曲线

(a) 应力; (b) 应变

2

影响混凝土徐变的内部因素

影响混凝土徐变的因素很多,归纳起来可分为内部和外部因素两部分。内部因素主要指混凝土原材料及配合比;外部因素主要指加荷龄期、加荷应力比(加荷应力与混凝土强度之比)、持荷时间、环境相对湿度与温度、结构尺寸等。本章介绍内部因素,第三章介绍外部因素。

2.1 水 泥

2.1.1 水泥品种

水泥品种对混凝土徐变的影响不大,水泥品种对徐变的影响是就它对混凝土强度有影响这一点来说的。因此,在早龄期加荷情况下,徐变以快硬、普通和低热水泥的次序增加。具体来说,徐变增加的次序是矾土水泥、速凝水泥、硅酸盐水泥、矿渣水泥、低热水泥和火山灰质水泥(见图2-1)^[1]。

在配合比、加荷龄期及加荷应力都相同的情况下,矿渣水泥混凝土与普通水泥混凝土徐变比较如图2-2所示^[1]。从图2-2可以明显地看出,前者的变形比后者大得多,而两者的干缩变形基本相同。这里,两种混凝土的强度是不同的,28d强度分别是17.6MPa和20.0MPa。加荷应力为2.7MPa。

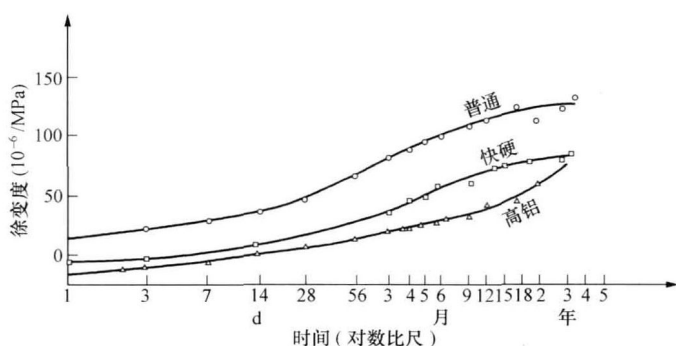


图 2-1 水泥品种对徐变的影响

苏联学者沙塔林曾进行水泥熟料矿物组成对混凝土徐变的影响试验,其试验结果列于表2-1^[3]。从表2-1可以看出,熟料中硅酸二钙(C_2S)及硅酸三钙(C_3S)的含量对混凝土徐变影响较大,混凝土徐变随 C_2S 含量的增加而增大,而随 C_3S 含量的增加而减小。

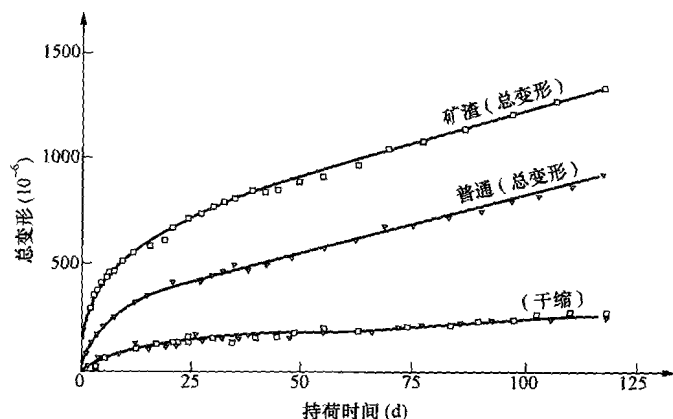


图 2-2 矿渣水泥与普通水泥混凝土的徐变与干缩

普通水泥中 C_2S 含量比快硬水泥的高，因此，普通水泥混凝土的徐变比快硬水泥混凝土的大。水泥中石膏含量对徐变影响较大，高铝水泥的石膏含量高，用该水泥配制的混凝土表现出最小徐变特性。

火山灰质水泥混凝土的徐变最大，这可能是火山灰质水泥混凝土的早期强度低的缘故。

奈加塔凯 (S. Nagataki) 等人曾对膨胀混凝土的徐变特性进行

过研究，他们采用膨胀水泥替代普通水泥量为 11%~17%，混凝土水灰比 0.40，加荷龄期为 10d，其试验结果如图 2-3^[1] 所示。从图 2-3 可以看出，在水中，膨胀混凝土徐变随膨胀水泥掺量的增加而增大；而在相对湿度 50%、温度 20℃ 的空气中，膨胀水泥掺量为 11% 的

表 2-1 熟料矿物组成对混凝土徐变的影响

矿物组成 (%)				徐变度 ($10^{-6}/\text{MPa}$)
C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	
46	26	14	10	10.2
41	33	6	16	13.4
12	60	8	12	19.2

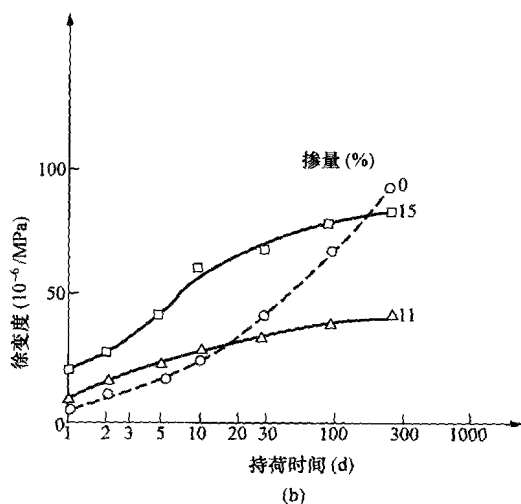
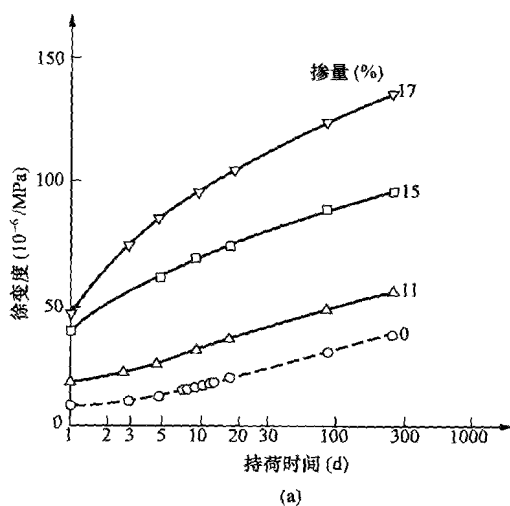


图 2-3 膨胀水泥掺量对徐变的影响

(a) 水中, 20℃; (b) 相对湿度 50%, 20℃