

混凝土现代技术丛书

混凝土的徐变

惠荣炎 黄国兴 易冰若 编著

中国铁道出版社

1988年·北京

混凝土现代技术丛书

混凝土的徐变

惠荣炎 黄国兴 易冰若 编著

中国铁道出版社

1988年·北京

内 容 提 要

本书系统地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、特种混凝土的徐变、徐变机理、试验设备、流变模型、常荷载下徐变的计算方法、变荷载下徐变计算理论、应力松弛及数值徐变分析方法等。

本书阐述了作者多年工作的研究成果,同时也介绍了国内外其他学者的有关文献资料。可供水利、土建部门及预制品厂的工程技术人员与高等院校有关专业师生参考。

混凝土现代技术丛书

混 凝 土 的 徐 变

惠荣炎 黄国兴 易冰若 编著

中国铁道出版社出版

责任编辑 安鸿逵 封面设计 安宏

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 8.5 字数: 191 千

1988年8月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—5,500册 定价: 2.05元

“混凝土现代技术丛书”序

自从波特兰水泥问世以来，混凝土与钢筋混凝土很快就成为主要的建筑材料，广泛地应用于各种建筑工程中，第二次世界大战以后，水泥混凝土的用量迅速增加。目前世界混凝土年产量已达60亿吨左右，不仅是用量最多的建筑材料，而且也是当代最大量的人造材料。对这样的大宗材料进行有效的研究开发工作，致力于增加品种、改进工艺、提高性能、降低成本、节约能耗，不断扩大其应用范围，充分发挥其社会效益与经济效益，已成为混凝土科技工作者的光荣职责。

我们正处于新的技术革命的伟大时代，各项技术都在互相渗透、互相促进，形成日新月异之势。混凝土技术也不例外，新技术新成就不断涌现。本丛书为了加速混凝土科学技术水平的提高，使混凝土这种主要材料在我国经济建设中发挥更大作用，对于实用意义较大的混凝土现代技术，分期分批出版专册（著）。近期内将陆续出版的有：

1. 新品种与特种混凝土方面

《膨胀混凝土》，《流态混凝土》，《三向应力混凝土》，《沸石岩为气体载体的多孔混凝土》，《粉煤灰混凝土》，《轻骨料混凝土》，《聚合物浸渍混凝土》，《高强度混凝土》，《防腐蚀混凝土》，《硫铝酸盐水泥混凝土的性质和应用》等。

2. 新工艺、新设备方面

《混凝土养护节能技术》，《真空混凝土工艺及设备》，《混凝土中钢筋腐蚀与防护》，《混凝土冬季施工》，《混

凝土快速硬化》等。

3. 性能与测试技术方面

《混凝土力学性能与测定》，《混凝土强度综合法测试技术》等。

4. 应用理论方面

《混凝土材料科学》，《数理统计在混凝土试验中的应用》，《混凝土的徐变》，《混凝土的收缩》，《混凝土的耐久性》，《混凝土力学》等。

本丛书除了传播新知识以外，还将发挥宣传教育的作用。解放以来，我国混凝土科学技术进步很快，混凝土工程数量庞大，混凝土构件与各种水泥制品品种繁多，满足了基本建设与国民经济发展的需要，成绩是巨大的。但也不能否认，混凝土新技术的开发和普及工作还不能令人满意。至今我国高中标号混凝土用得不多，外加剂使用得还很少，商品混凝土还刚刚起步，而混凝土工程质量问题，尤其是耐久性问题，还亟待唤起重视。总的来说，当前我国混凝土技术水平还落后于发达的工业国家，因此，必须加速信息的传播，加强宣传教育工作，尽快赶上国际先进水平，保证我国高速度的建设事业对混凝土的需要。

随着科学技术的进步与我国在混凝土科研与生产经验的积累，本丛书的选题范围将继续扩大，希望同行专家与广大读者，给予支持，共同为加速混凝土新技术的发展贡献力量。

吴中伟 姚明初

一九八八年元月

前 言

我国混凝土徐变的试验研究工作，是水利水电科学研究院、中国科学院及建筑科学研究院等单位于1958年首先开始的，随后不少兄弟单位也相继开展了这方面的工作。在近三十年的工作中，已积累了大量混凝土徐变的研究成果。虽然1982年出版了唐崇钊工程师编著的《混凝土的徐变力学与试验技术》和1985年出版了傅作新教授编著的《工程徐变力学》，但这两本书的重点都是徐变力学，对混凝土徐变没有作系统的论述。为此，我们编写了《混凝土的徐变》这本书。

从事混凝土徐变的试验研究工作以来，进行了水工大体积（大坝）混凝土、港工混凝土、粉煤灰混凝土、膨胀混凝土、防渗墙混凝土（掺粘土）、高强混凝土及轻骨料混凝土等的徐变试验研究。本书就是以上述研究成果为基础，参考近年来国内外有关文献资料，加以取舍、补充，系统整理而成的。希望本书能为我国混凝土工程建设和试验研究起到一定作用。

全书共分十三章。第一章介绍混凝土徐变的基本概念及变形的种类。第二章叙述影响混凝土徐变的内部因素，如水泥、骨料、水灰比、灰浆率、外加剂及粉煤灰等。第三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、湿度、温度、构件尺寸、浸泡介质及碳化等。第四章介绍拉伸、多轴、扭转、周期应力及高应力作用下的徐变，还介绍了横向徐变和徐变泊松比。第五章简单介绍特种（浸

目 录

第一章 混凝土徐变的基本概念及变形的种类	1
第一节 基本概念	1
第二节 变形的种类	5
第二章 影响混凝土徐变的内部因素	18
第一节 水 泥	18
第二节 骨 料	23
第三节 水 灰 比	28
第四节 灰 浆 率	30
第五节 外 加 剂	31
第六节 粉 煤 灰	36
第三章 影响混凝土徐变的外部因素	42
第一节 加荷龄期	42
第二节 加荷应力	45
第三节 持荷时间	49
第四节 湿 度	51
第五节 温 度	57
第六节 试件尺寸、形状及各向异性	64
第七节 浸泡的介质	67
第八节 碳 化	68
第四章 不同应力状态下的徐变	70
第一节 拉伸徐变	70
第二节 多轴徐变	80
第三节 扭转徐变	84

第四节	周期应力徐变·····	86
第五节	高应力徐变·····	91
第六节	横向徐变及徐变泊松比·····	92
第五章	特种混凝土的徐变·····	98
第一节	聚合物浸渍混凝土·····	98
第二节	糠醛树脂混凝土·····	100
第三节	环氧树脂混凝土·····	102
第四节	聚酯树脂混凝土·····	103
第六章	徐变恢复·····	105
第一节	基本概念·····	105
第二节	影响因素·····	111
第三节	不同应力状态下的徐变恢复·····	118
第七章	徐变机理·····	121
第一节	徐变理论·····	121
第二节	徐变假设·····	127
第八章	徐变试验设备·····	133
第一节	压缩徐变设备·····	133
第二节	拉伸徐变设备·····	137
第三节	多轴压缩徐变设备·····	140
第四节	扭转和弯曲徐变设备·····	144
第五节	量测仪器·····	145
第九章	流变模型·····	147
第一节	基本模型·····	147
第二节	混凝土徐变流变模型·····	151
第十章	常荷载作用下的徐变·····	159
第一节	徐变表达式·····	159
第二节	徐变的估算方法·····	169
第三节	从短期试验资料预报长期徐变·····	183

第四节	原级配大体积混凝土的徐变	186
第十一章	徐变计算理论和方法	193
第一节	有效模量法	194
第二节	老化理论	195
第三节	弹性徐变理论	197
第四节	弹性老化理论	198
第五节	继效流动理论	201
第六节	龄期调整有效模量法	204
第七节	徐变计算理论的比较	208
第十二章	混凝土的应力松弛	210
第一节	基本概念	210
第二节	松弛系数的计算方法	211
第三节	松弛系数与徐变系数的关系	222
第十三章	数值徐变的分析方法	226
第一节	结构徐变分析的有限元公式	226
第二节	混凝土徐变的基本规律	233
第三节	数值分析的步骤	240
第四节	应用实例	242
附录	应力松弛系数计算程序	249
参 考 文 献		258

第一章 混凝土徐变的基本概念 及变形的种类

第一节 基 本 概 念

早在十九世纪以前,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)首先报导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〕。

从本世纪三十年代到现在的五十多年中,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。

上面已提及混凝土徐变,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少混凝土徐变。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。

一、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，从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—1 所示。对大体积混凝土来说，其内部水份不易蒸发，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。

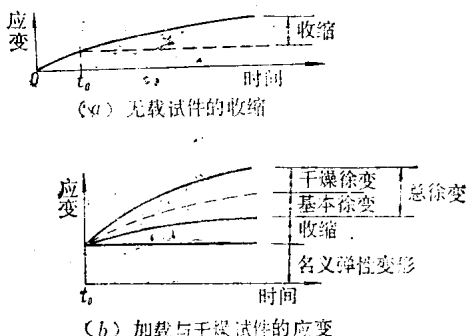


图 1—1 受持续荷载及干燥作用下混凝土的变形曲线

二、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—2所示。图中 ε_T 为总变形， ε_e 为瞬时弹性变形， ε_p 为瞬时塑性变形。

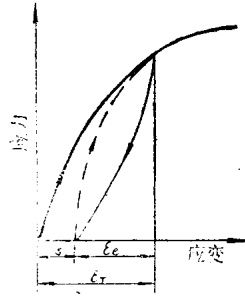


图1—2 混凝土的应力-应变曲线

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5秒增至2分钟左右，应变的增加可达15%；但加荷时间在2~10分钟范围内（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5秒钟所增加的应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，作了人为区分：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，徐变应看作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，就把徐变看作是超过加荷时初始弹性应变的那部分变形。

三、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 。随着时间的增长，混凝土变形逐渐增加，该变形扣除补偿变形即

为徐变变形 (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

$$C(t, \tau) = (\varepsilon_T - \varepsilon_0) / \sigma$$

式中 $C(t, \tau)$ ——在龄期 τ 加荷, t 时刻的徐变度 (10^{-6} / 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_v (图 1—3),

这里 $\varepsilon_v < \varepsilon_0$ 。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

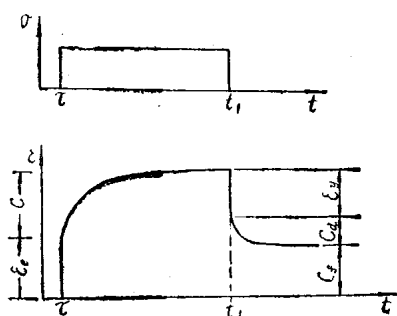


图 1—3 混凝土的徐变与徐变恢复

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 (图 1—4), 即

$$C = C_d + C_f$$

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弹性变形和

不可恢复的塑性变形；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，可用下表来表示^[1]。

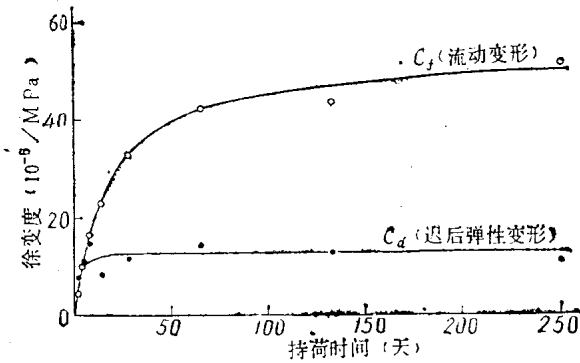


图 1—4 徐变的迟后弹性变形与流动变形

变 形	瞬 时	随时间变化的徐变
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

四、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(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。

第二节 变形的种类

徐变仅是混凝土在长期荷载作用下的一种变形性能。实际上混凝土的变形有好多种，在混凝土或钢筋混凝土结构

的应力计算中，要同时考虑几种混凝土的变形。因此，把混凝土的几种变形性能简单介绍一下，使读者对混凝土的变形性能有个比较完整的概念。

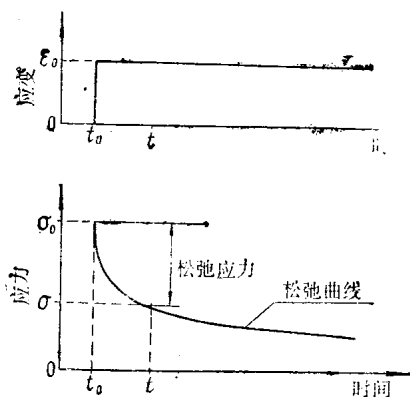


图 1—5 混凝土的应力松弛曲线

混凝土的变形主要有：混凝土拌合物初期的凝缩变形；由于混凝土内部物理化学反应引起的自生体积变形；由于湿度变化引起的干燥收缩变形；混凝土浸泡后的湿胀变形；由于温度变化产生的温度变形；由于碳化作用引起的碳化收缩变形。另外，还有在短期外荷载作用下的弹性变形、塑性变形、假塑性变形及极限拉伸变形；在长期外荷载作用下的徐变变形。因此，混凝土的变形总计有以上十一种之多。下面把在没有外荷载作用下的六种体积变形简单作一介绍。

一、凝缩变形

混凝土拌合物在浇筑之后，由于其中固体颗粒的沉降而逐步密实。水泥开始水化，在凝胶粒子间内聚力的作用下，一部分水从混凝土中析出，混凝土逐渐凝聚，并产生凝聚性体积收缩，这就是混凝土的凝缩变形。凝缩变形一般发生在

混凝土拌合后 3 ~ 12 小时以内, 即在其终凝前比较明显。因为这种凝缩发生时混凝土仍处于塑性状态, 故有人把这种凝缩称为塑性收缩。

凝缩与混凝土的材料组成、成型振捣条件及温度等因素有关。水灰比大、水泥用量低者凝缩大; 用高频振捣器振捣者凝缩小; 温度低时凝缩大, 且凝缩延续时间长。另外, 混凝土表面因蒸发失水或因基底吸水引起的失水均能增加混凝土的凝缩, 并且可能导致混凝土表面开裂。

由于混凝土浇筑后不久, 从凝胶体中析出的晶体不多, 所以凝胶体粒子间主要是物理性接触, 塑性变形能力较大。因此, 只要加强初期养护, 不使混凝土表面干燥, 一般不会开裂。

二、自生体积变形

混凝土在恒温绝湿条件下, 由于胶凝材料的水化作用引起的体积变形称为自生体积变形 (以下简称自变)。

自变有的是收缩型, 有的是膨胀型, 也有先缩后胀或先胀后缩的。这与水泥品种和化学成分有关。一般来说, 普通水泥混凝土的自变是收缩, 矿渣水泥混凝土的自变为膨胀 (图 1—6) [3]。自变还与粉煤灰掺量有关。一般收缩型自变随粉煤灰掺量的增加而减小 (图 1—7) [4]。

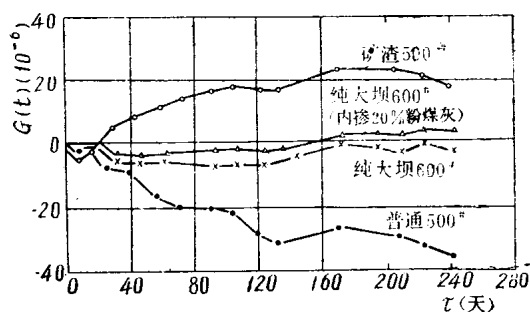


图 1—6 不同水泥混凝土的自生体积变形

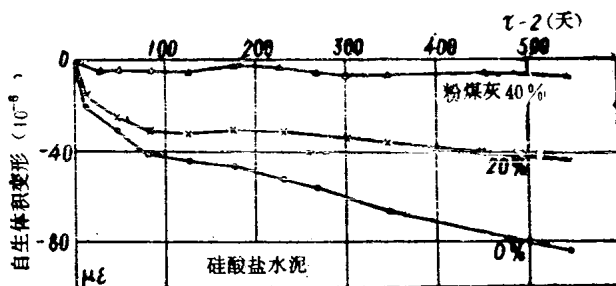


图 1—7 粉煤灰对混凝土自生体积变形的影响

混凝土的自变值一般在 $(-100 \sim +100) \times 10^{-6}$ ，抚顺矿渣大坝水泥中 MgO 含量高达 4.5%，3 年实测自变值为膨胀 100×10^{-6} [5] 因此，抚顺矿渣大坝水泥具有微膨胀性。适用于大体积混凝土结构。

用膨胀水泥拌制的混凝土，自生体积变形较大，几天内可达 $100 \sim 400$ 微应变。表 1—1 是秦皇岛港工混凝土自生体积变形试验结果，膨胀混凝土比普通混凝土的自变在开始约大 10 倍，但随着龄期增加，膨胀量减小。这种混凝土只有在水中才能维持膨胀量不减小。图 1—8 是膨胀混凝土的自生体积变形曲线。

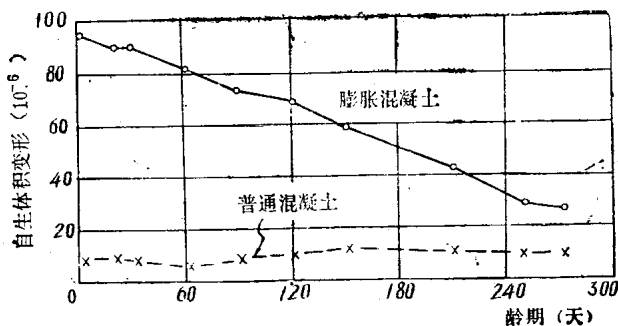


图 1—8 膨胀混凝土的自生体积变形