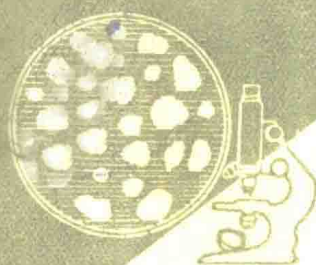


混凝土的徐变

И. И. 烏利茨基 著



建筑工程出版社

混 凝 土 的 徐 变

卢秉俭 王开顺 陈锐铨 译

建筑工程出版社出版

• 1959 •

內容提要 本書敘述混凝土徐變現象的構成，徐變對混凝土變形的影響，闡述影響混凝土徐變的諸因素。最後作者結合各國學者提出的計算混凝土徐變的公式，提出了自己創立的公式，並且用試驗證明該公式的準確性。本書可供建築專業研究人員、高等學校教師和設計人員參考。

原本說明

書 名 ПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНА

著 者 И. И. Улицкий

出版者 Государственное издательство технической литературы Украины

出版地點及年份 Киев 1948 Львов

混 凝 土 的 徐 變

戶榮儉 王开順 陈銳鏘 譯

1959年10月第1版 1959年10月第1次印刷 3,045冊

787×1092 1/32 • 90千字 • 印張 4³/16 • 定價 (10) 0.55元

建築工程出版社印刷廠印刷 • 新華書店發行 • 書號: 1633

建築工程出版社出版 (北京市西郊百萬莊)

(北京市書刊出版業營業許可証出字第052號)

目 录

前 言	(1)
緒 論	(3)
第 一 章 基本定义	(8)
第 二 章 混凝土徐变现象的构成	(11)
第 三 章 混凝土在加荷过程中的徐变及其对試驗中求出的混凝土变形特性的影响	(28)
第 四 章 混凝土徐变的計算特性	(36)
第 五 章 混凝土軸向受压时的徐变及各种因素对它的影响	(41)
第 六 章 混凝土軸向拉伸、弯曲、剪移和扭轉时的徐变	(62)
第 七 章 鋼筋滑动时混凝土的徐变	(68)
第 八 章 彈性后效	(71)
第 九 章 徐变对混凝土彈性性能与强度的影响	(73)
第 十 章 混凝土徐变規律的分析公式	(75)
第 十 一 章 考虑混凝土徐变时鋼筋混凝土梁及剛架的挠度計算	(109)
参考書籍	(129)

前 言

为了进一步发展混凝土和钢筋混凝土科学，必須从各方面研究混凝土徐变现象，这一事实看来已无可非议。另外一方面，早就有必要使广大的建筑师、设计师和生产人员，熟悉混凝土徐变的现象和性能，以便在设计、建筑和使用混凝土和钢筋混凝土结构时能考虑这个现象。

本书试图通过对国内和国外的试验者所进行的试验结果的分析，及作者本人一些理论上的研究，来说明混凝土的徐变现象。

作者的任务并不是对徐变现象的构成和徐变的物理性质进行深入研究，这部分工作将有待物理学家和化学家的研究。因为类似问题的解决超出了个人可能的范围，且惟有对水泥石、砂浆和混凝土进行广泛试验后，方能进行研究。然而，作者在工作期间里力求得出关于混凝土徐变构成的假定，这个假定对于工程师是十分适合的，同时还符合近代物理和化学的观点。

在第一章至第四章里说明徐变的基本定义和徐变现象的构成，通过试验证明在加荷过程中徐变对混凝土变形特性的影响，并探讨了徐变的计算特性。

第五章至第九章是叙述各种应力状态下混凝土的徐变现象（压力、拉力、弯曲、剪力、扭转、钢筋的滑动），解释了弹性后效现象，和徐变对混凝土的弹性和强度的影响。

第十章叙述混凝土徐变规律的分析公式，除简要评介这方面已有的原理外，还包括作者所提出的一些关系。

第十一章研究现代建筑中最急待解决的一个问题——考虑混凝土徐变时，混凝土梁和刚架挠度的测定以及介绍作者的计算方法。

这本小册子简单地叙述了作者在基辅土木工程学院里所完成的工作。

作者对功勋技术科学家、技术科学博士 В. М. 克耳迪什 (В. М. Келдыш) 教授、功勋技术科学家 В. Н. 雅林 (В. Н. Ярин) 教授、技术科学博士 А. А. 皮科夫斯基 (А. А. Пиковский) 教授和技术科学硕士 М. С. 胡托良斯基 (М. С. Хуторянский) 讲师在编著工作中所给予的宝贵意见表示感谢。

作 者

緒 論

到目前為止，對混凝土徐變，亦即長期荷載下（甚至在不大的荷載下）混凝土會出現非彈性變形的這種性能，我們還未給予應有的注意。

我們可以毫不夸大的設想，如果混凝土徐變能更早、更正確地被揭示出來，如果它的數值能適當地立即被測出的話，那麼混凝土與鋼筋混凝土這門科學就會達到非常高的水平。

實際上，不能準確確定混凝土變形（極限壓縮性和極限拉伸度、變形模量等等）的特性主要是由於在實驗時沒有考慮時間的因素。同時，在混凝土和鋼筋混凝土科學發展現階段上，缺乏混凝土真正變形數值是一個重要的障礙。

無數試驗者所進行的幾千次單獨的實驗和幾十個表示應力與應變關係之經驗公式，過去不能現在也不能被歸納為一個結論，這是在進行實驗時忽略了時間因素。

當談到剛度和裂縫條件的極限狀態時，混凝土和鋼筋混凝土的變形是很有意義的，對靜不定體系的計算，至少要按工作使用階段來計算這種變形。因為混凝土和鋼筋的結合，甚至能使最簡單的構件具有靜不定性，所以徐變顯然改變了用鋼筋混凝土制成的任意體系的應力狀態，從最簡單的構件到複雜的結構都是這樣。

在混凝土使用初期，必須把混凝土視為彈-粘-塑性體材料。因此，研究混凝土的性能時應當把混凝土看作是這樣的材

料，这种材料在空間有三个坐标，其中一个为時間坐标。并且必須从流变学之观点（物質流动之科学）来研究混凝土的性能。当彈性理論定律应用到彈-粘-塑性体材料上，而不考虑時間因素，那末就不能得到滿意的結果，这是大家非常清楚的。

在混凝土和鋼筋混凝土結構中，混凝土的徐变表現在使用期內撓度的增加，由于徐变，梁式結構、剛架結構和拱形結構构件的撓度較彈性（即瞬时的）撓度增加了好几倍。这种撓度的增加在早期期齡的混凝土中特別显著。这样，徐变在拆模早或特早时，亦即在快速施工时对撓度增加的作用特別大。采用高級水泥和鋼筋以及預应力配筋能使构件跨度增大和截面減小，因此在确定撓度时，考虑徐变还具有更大的现实意义。

在混凝土和鋼筋混凝土結構中，混凝土徐变的內部現象是十分复杂的，徐变首先会改变鋼筋混凝土結構构件（柱、梁）的应力状态，使混凝土和鋼筋間的內力重新分布。考虑徐变，就可以研究构件全部使用过程中的应力状态，从制作时起至破坏时止。这情况对結構重建和加固的有关工作有实际的价值。考虑徐变时，按破坏阶段計算之安全系数在某些情况下能更准确地确定，因为在工作荷載和破坏荷載下的应力状态随時間变化的一般趋向已被查明了。

混凝土徐变能够改变靜不定結構的使用应力状态。这样的結構物，首先包括拱及組合系統，混凝土徐变会大大改变由溫度、收縮和支座移动等作用而引起的应力状态。

計算徐变能解釋混凝土拱桥良好的实际情况与按現行标准进行溫度和收縮計算結果之間的矛盾。現行标准規定必須配筋。

采用以强迫变形作为調整拱及組合系統应力状态手段的方法的有效程度已經确定，考虑徐变迫使我們在許多情况中重新研究这种已确定了观点。

同时，考虑混凝土徐变对应力配筋結構有头等重要的意义，因为在这些結構中徐变会导致拉力效能之局部損失。

混凝土徐变对大体积結構物（水坝、桥墩）和道路路面由于收縮、放热和外界溫度作用而产生的应力状况有着十分重要的影响。

由于徐变会增加混凝土的延伸度，所以在計算使用时不允许出現裂縫的結構（水池及其他）时徐变应有所反映。

应该注意徐变对用混凝土或鋼筋混凝土和其它材料一起制成的联合結構中（具有飾面石的柱或大体积墩子）的应力重分布的影响。

在解决混凝土和鋼筋混凝土的稳定性問題时必须考虑混凝土的徐变。同时，最好能引用長期稳定性和极限長期稳定性的概念。

上面所述已足以充分証明，只有在考虑混凝土徐变时，才可能合理地設計混凝土和鋼筋混凝土結構物，正确地建筑和使用这些結構物。在現在，不但必須会制作“条件”混凝土，而且还要会制作除了具有一定强度外，并有完全一定的彈性和塑性变形特征的混凝土。这种混凝土适用于一定的結構物、一定的施工方法和使用条件。

我們現在簡單地来介紹一下混凝土徐变現象研究的历史。

在苏联，混凝土徐变現象曾經引起了技术科学博士Ю. А. 尼連捷尔（Ю. А. Нилендер）教授的注意，以后又引起技术科学博士Я. В. 斯托略罗夫（Я. В. Столяров）教授的注

意。Я. В. 斯托路罗夫教授在他的著作中闡明了时间在混凝土与钢筋混凝土工作中的作用〔2, 19〕。

必須指出，在苏联所进行的一系列独创的有关混凝土徐变的試驗工作。

中央工业建筑科学研究所（ЦНИПС）、中央建筑材料科学研究所（ЦНИИСМ）、交通人民委员会中央建筑科学研究所（ЦИИС НКПС）、列宁格勒铁路运输工程学院、梯比利斯结构和水利科学研究所（ТНИСГЭИ）等都曾进行过这些試驗工作。

1937年莫斯科中央工业建筑科学研究所曾研究了長期荷載对柔性的偏心受压钢筋混凝土柱的性能和对混凝土变形图的影响。試驗是在技术科学博士 А. А. 格沃兹杰夫（А. А. Гвоздев）教授领导下，由技术科学副博士 М. С. 博里善斯基（М. С. Боришанский）、А. Н. 庫茲涅佐夫（А. Н. Кузнецов）和 Е. А. 特罗依茨基（Е. А. Троицкий）等进行的〔5, 7, 10〕。

1939年中央建筑材料科学研究所（哈尔科夫）在技术科学博士 С. Е. 弗賴菲勒德（С. Е. Фрайфельд）教授领导下，对受压混凝土圓柱体徐变的研究和钢筋混凝土梁受弯时的徐变研究〔15〕，进行了一系列的試驗。

中央建筑材料科学研究所的試驗首先研究了輕集料（陶礫与水渣^①）混凝土的徐变。

1940年交通人民委员会中央建筑科学研究所（莫斯科）在技术科学碩士 А. П. 科罗夫金（А. П. Коровкин）领导下，进行了研究陶礫集料混凝土徐变的实验。受压的棱柱体和受弯的梁都曾被研究过。

^① 水渣（Тормозит）为多孔碎体，在冶金工厂中用水快速冷却酸性爐鐵爐矿渣而获得。——譯者注

1940年在列宁格勒铁路运输工程学院力学試驗室开始进行混凝土徐变的試驗研究。技术科学碩士 А. В. 薩塔爾金 (А. В. Саталкин) 进行的这些研究主要是关于混凝土受拉时的徐变〔18〕。在列宁格勒铁道运输工程学院所作的試驗中，特別研究了早期加荷的混凝土的性能。

同样应该指出，許多值得注意的理論研究工作（在1937～1941年所发表的），其中包括技术科学博士 Н. А. 布达諾夫 (Н. А. Буданов)、А. А. 格沃茲杰夫教授、Н. Г. 馬斯洛夫 (Н. Г. Маслов) 教授、В. В. 米哈伊洛夫 (В. В. Михайлов) 教授、С. Е. 弗賴菲勒德教授和技术科学碩士 В. Л. 菲多罗夫 (В. Л. Федоров) 等的工作。

以后技术科学博士 А. Е. 謝依庚 (А. Е. Шейкин) 教授确立了水泥石各构造成分間的重要关系及其在混凝土物理机械性能形成中的作用，因此，还說明了水泥石徐变的問題〔21, 23〕。

在外国康西捷尔 (Консидер) 和伏尔松 (Вулсон) 指出了混凝土的非彈性变形。随后，В. 赫特 (В. Хэтт) 报导了由于混凝土的徐变增加梁撓度試驗的結果。以后 Р. 戴維斯 (Р. Дэвис)、格棱韋勒 (Глэнвил)、托馬斯 (Томас)、生克 (шэнка)、佛列新涅 (Фрейсинэ)、裘特郎 (Дютрона)、季申格尔 (Дишингера) 等也进行了混凝土徐变的試驗和理論研究工作。

第一章 基本定义

由于混凝土組織結構复杂，对混凝土來說，能引起应力状态和变形的因素数量就比其他任何建筑材料（金屬、木材、石材）更多。下列因素能引起混凝土的应力与变形：

1. 外界溫度的变化；
2. 外界湿度的变化；
3. 收縮与膨脹現象；
4. 由于放热而生的自应力；
5. 外加荷載（固定的、暫时的）；
6. 强制应力；
7. 支承的移动。

所有上述因素（除了一次作用及短期的暫时外加荷載以外）都会在混凝土中引起長时期或短时期的应力状态。例如，固定荷載与溫度变化就能在結構物整个使用期內引起应力状态。由于膨脹或收縮、自身应力、强制应力及支座移动所引起的应力状态，虽然在某些情况下会随着時間而急剧下降，但仍然要保持一个很長的时期。

長期处于应力状态的混凝土（如果应力状态是由外加荷載或强制应力所引起），在加荷时产生瞬时的彈性变形，但是，在此之后，即使作用应力不大，变形也不会处于靜止状态，正如观察指出，在很長的时间內，混凝土繼續产生非彈性变形。当由于溫度、收縮或膨脹、支座移动而产生应力时，亦同样能观察到类似的情况。

混凝土在荷載（不超過使用荷載）的長期作用下所產生的非彈性變形的性能稱為徐變。

“徐變”這個名詞是最恰當不過的了，因為它表示混凝土中所發生的一種現象，根據外部特征，這種現象與早已知道的金屬工藝中的徐變^①現象很相似。

大家知道，對金屬來說，當溫度較高時，在較低的應力（與流限相比）作用下所產生的塑性剩餘變形稱為徐變。

不僅金屬及混凝土具有徐變的性質，而且大多數現有的材料（如木材、玻璃、陶瓷、塑料、岩石、土等）都具有同樣的徐變性質。

順便談談，塑性體在常溫下的徐變另有一個恰當的名稱“冷流”。

然而在金屬、木材、大部天然石材等材料中，在正常溫度及使用荷載下，徐變變形都是不顯著的，而且在大多數的情況下是可以忽略的。

在混凝土中則完全是另一種情況，它的徐變變形通常都超過彈性變形（有時超過幾倍），所以，混凝土的徐變變形是不能忽略的。

許多試驗和對現有的混凝土及鋼筋混凝土結構所進行的觀察指出：由於長期使用壓縮荷載的作用，混凝土發生非彈性變形（徐變變形），這種變形在長時期內延續，最後才停止。徐變變形停止以後，受荷載作用的混凝土進入靜止狀態，穩定下來，並且在附加荷載的作用下能再受彈性變形（當然，重加之荷載要有一定的界限）。

象上面所指出，徐變這個現象的特點就在於：在非常小的長期應力作用下混凝土中也會發生塑性變形。

① 原文為 крип и ползучесть，兩者義同，均譯作徐變。——譯者

后来很多的試驗表明，塑性变形不仅在受压情况下得以发展，而且在長期拉伸与扭轉下亦会得到发展。最后发现，在鋼筋的長期滑动作用下混凝土仍然具有塑性粘結性能。

因此，应当肯定混凝土具有广义的塑性性能。

从这里看出，混凝土与其他材料有着原則上的区别，而且應該強調的是：混凝土是一种合成材料，这种材料是在使用过程中合成的。

實踐証明：根据長期应力（荷載）的大小来区分混凝土的塑性变形是合理的。

試驗指出，長期塑性变形是逐漸停止下来的。很显然，只在应力不超过一定界限时，这种塑性变形才会停止。当作用的荷載接近破坏荷載时，情况就完全不同。这时長期荷載作用下所引起的塑性变形，不但不停止，相反地会一直发展，以至破坏。現在还很难找出这两种塑性变形之間的严格界限。

現在还存在着，格棱韋勒与托馬斯的一种观点，这种观点認為，这两种塑性一般不应被区分开，因为这两种現象的构成似乎是相同的。如果支持这种观点，那末任何荷載（由零到破坏荷載的範圍）作用下所产生的塑性变形，都應該被称为徐变变形。暫且不談这样提問的矛盾性，在实际上更是很不恰当的。

在設計結構物时，必須解决兩組不同的問題，第一組問題是强度安全系数的确定，当然，这时要利用破坏荷載。第二組問題就是要求出变形，以便复核剛度及計算靜不定系統。这时就要談到使用期間所作用的荷載。

对于第一組問題考虑塑性变形是为了反映出这些变形对破坏荷載的影响，而对第二組問題是为了能求出真实的变形，并且計算使用条件下的靜不定系統。划分塑性变形的合

理性还在于：在使用荷載範圍內，可以大致地認為，塑性變形與作用應力為直線關係（這在下面就會講到）。在更大的應力下，就不再保持直線關係。

最後，將非彈性變形劃分為兩部分（塑性變形與徐變變形），是合乎規律的，因為這兩種變形的構成（與格棱韋勒及托馬斯的錯誤論點相反）是完全不同的。

根據以上所述，我們可以得出下列定義：

混凝土在超過使用荷載的荷載長期作用下，所產生的非彈性變形，稱為塑性變形。

混凝土在任何溫度及不超過極限使用荷載的應力長期作用下所產生的塑性性能稱為混凝土的徐變。長期應力狀態可以是外加荷載、溫度、收縮及其他因素所形成的。

由於混凝土徐變而出現的非彈性變形稱為徐變變形。

徐變性質可以在混凝土中不同種類的長期應力即壓縮、拉伸、扭轉、粘結下發生。因此亦可以說，壓縮徐變變形、拉伸徐變變形、扭轉徐變變形等。

本書所研究的徐變變形，就是在使用條件下所產生的非彈性變形。

下面將講到、水泥石凝膠體組織成分的粘度是徐變發生的主要因素。這樣，徐變變形不是材料力學中所說的那種塑性變形，而是具有迅速粘結性質的塑性變形。

第二章 混凝土徐變現象的構成

1. 概 論

現在還沒有一種理論能夠完全揭露徐變現象的實質，通過實驗可反映出影響徐變的許多因素，它們能夠給予它以質

量及数量的估价。

假如已经知道制备所用的材料之特征，以及由该种混凝土制成的构件或混凝土结构的使用、养护及制作规程，现在仍然不能很精确地预先计算出徐变变形的数值。为了阐明徐变现象的构成，曾提出了一系列的理论。这些理论的数量之多及彼此间互相矛盾再一次证明，这种现象的复杂性和这种现象的研究还不充分。

所提出的大多数理论都有其工作假设，而没有自己充分的理论与实验的根据。

现在我們简单地看一下现有的假定，然后再来叙述所采用的工作假定〔24, 26〕。

2. 关于混凝土徐变构成的各种假说的评述

在佛列新涅的理论中，他认为混凝土是一种假固体，是由固相、液相与气相组成的三相分散系统的物体。应用分子物理定律来研究上述的物体性质，对于更深一步洞察混凝土的构造和实质是十分有效的。

此理论认为，徐变（及收缩）现象完全是由于水泥石中为水湿润并有弯液面的小气孔内毛细管张力的作用而发生的。

利用分子物理方程式即可导出孔壁的毛细管压力、气孔的大小及空气相对湿度之间的关系。这就使我们可以写出相对体积收缩变形的公式。

至于混凝土徐变，则可看作是混凝土潮湿状态因压力作用而增加的普通收缩。根据该作者的意见，潮湿状态的变化过程是由于混凝土受长期压力荷载的作用，部分微孔中的水开始在细管内移动，由于水的粘性，此移动即变慢并且渐渐停止。在水移动时具有弯液面的气孔增大，相应地增加潮湿状

态，即提高湿度。

此时不能理解的是，为什么气孔口径增大而毛细管张力随之减少仍会导致收缩的加剧，也即徐变的发生。

该作者认为，压缩时孔径（即气孔之体积）之增加，是由于压缩时混凝土体积的增加。这个说法他是根据法国委员会的试验而得出的，他们从这些试验中观察到了横向膨胀值增加很大。而后来没有一个研究工作者得到过这种可能使混凝土在受压时发生体积增大的横向膨胀。

如果同意受压时气孔的体积增加，那末，很明显，受拉时体积则应减小。在孔径减小时就会发生毛细管张力增大和收缩增大的现象。实际上，正如一系列的试验所指出，拉伸时产生徐变变形。该作者将自己的观点推广到扭转上去，在扭转时不应产生气孔体积的变化，作者指出，由作用荷载所产生的混凝土湿度状态并不改变，并且在简单的剪移下，同样没有产生后期变形。

其实以后的试验完全推翻了这个说法。

所以说，佛列新涅将徐变归结于微孔之体积变化及在应力作用影响下其潮湿表面变化的理论，并不能解释受压、受拉及扭转时的徐变现象。

这个理论，将混凝土当作浸满水的惰性海绵来研究及将收缩与徐变仅仅归结为毛细管现象它是片面的，因为其中完全忽略了化学过程的影响。特别令人不能同意佛列新涅的是，他对徐变现象的解释及把徐变与收缩的构成同等看待。

累奈姆仅以凝胶体水平衡的变化来解释混凝土的徐变及收缩现象。他将正在硬化的水泥石中的水进行假设分类，以此作为假设的基础。根据这种分类，正在硬化的水泥石中的水可分为下列三部分：1.在水化过程及结晶过程所用的化学