

钢管混凝土徐变

王元丰 著



科学出版社

www.sciencep.com

钢管混凝土徐变

王元丰 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在对钢管混凝土构件进行力学分析的基础上,应用混凝土徐变的继效流动理论及多轴应力下混凝土徐变理论,对钢管混凝土构件的徐变进行了分析,并给出简便的设计公式,将其应用于钢管混凝土的格构柱、框架结构和拱桥结构中。

全书共分7章,主要内容包括绪论、钢管混凝土的轴心受压构件徐变、小偏心受压构件徐变、大偏心受压构件徐变、受弯构件徐变及钢管混凝土结构徐变等。

本书可供从事土木工程、力学研究等的科技人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢管混凝土徐变/王元丰著. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-016949-2

I. 钢… II. 王… III. 钢管结构:混凝土结构—结构设计 IV. ①TU375
②TU392.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第013557号

责任编辑:童安齐 何舒民/责任校对:郝岚

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年3月第一版 开本:B5(720×1000)

2006年3月第一次印刷 印张:19 3/4

印数:1—3 000 字数:382 000

定价:45.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

销售电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA03)

前 言

徐变是混凝土的重要材料性能。从 1905 年 Woolson 发现在高轴向应力作用下混凝土有流动现象, 1907 年美国 Purdue 大学 Hatt 在 ASTM 的会议文集中发表文章, 第一次给出混凝土徐变的数据至今, 混凝土徐变研究已有整整 100 年的时间。尽管在过去一个世纪中, 研究者对混凝土徐变进行了大量的理论与试验研究, 但由于混凝土材料的复杂性、人类研究能力与水平的局限性, 目前对于混凝土徐变的机理尚没有完全认识清楚。尽管如此, 由于工程科学的主要目的是指导应用, 科技工作者通过不断的研究积累, 还是建立了一些能够描述混凝土徐变宏观行为的方法, 推动了混凝土结构的发展。

对于组合结构, 徐变有着非常重要的影响。钢管混凝土作为一种新兴的复合材料, 具有多方面的优点, 在桥梁、高层建筑、工业厂房、住宅等结构中得到广泛的应用, 并具有良好的发展前景。由于钢管混凝土的工作机理非常复杂, 钢管和混凝土均处于多轴应力状态, 核心混凝土处于密闭的环境中, 这使得钢管混凝土的徐变研究较钢筋混凝土的徐变更复杂。在实际工程应用中, 对于钢管混凝土结构往往采用在混凝土中添加膨胀剂, 以抵消徐变的影响, 或者在设计中引进考虑徐变的折减系数, 而各国规范、规程, 对此问题的处理尚存在较大的差异, 研究工作者和工程技术人员迫切需要能够对钢管混凝土构件和结构徐变进行分析、设计的方法。

本书是作者多年对钢管混凝土徐变研究工作的总结。作者在对混凝土的徐变理论进行分析的基础上, 采用混凝土徐变的继效流动理论、三维应力状态下混凝土徐变理论, 结合钢管混凝土轴心受压、偏心受压和受弯构件的受力特点, 对钢管混凝土构件的徐变从理论上进行了研究, 推导出一维形式的钢管混凝土轴心受压、偏心受压和受弯构件的徐变计算公式。这些计算公式既考虑了核心混凝土三向受力特点, 又对影响钢管混凝土构件徐变的因素(含钢率、材料强度、应力级别等)进行合理考虑, 建立了分析钢管混凝土构件徐变的方法。上述理论分析得出

的钢管混凝土构件徐变计算方法比较复杂,需要计算机迭代计算,为了便于工程设计人员实际应用,作者将影响钢管混凝土构件的各种因素综合考虑,回归了钢管混凝土构件徐变的系列实用设计计算公式。最后,应用上述成果,对钢管混凝土格构柱、框架结构和拱桥结构的徐变影响进行了分析。

目前,由于对混凝土徐变的机理尚没有完全认识清楚,钢管混凝土的徐变有很多问题需要进一步开展深入细致的研究,另外,随着材料科学的发展、工程技术水平的提高及钢管混凝土结构应用的日益广泛,钢管混凝土徐变研究面临很多新的挑战。希望这本书的出版能够起到抛砖引玉的作用,吸引更多的科技工作者开展钢管混凝土徐变的研究,以促进钢管混凝土结构的发展。

在钢管混凝土徐变研究过程中,特别感谢韩冰讲师,10年前他的硕士论文是我们课题组研究钢管混凝土徐变和撰写本书的起点,这些年他无私的工作,使我们的研究水平不断提高。感谢研究生朱海斌、杜金生、雷阳、梁亚平、刘可为、朱淋峰,他们的辛勤工作为本书的出版打下良好的基础。感谢周长东博士、刘可为同学为本书出版所做的大量工作,没有他们的努力,本书的早日出版是不可能的。

王元丰

2005年元月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 混凝土徐变的基本理论	2
1.1.1 混凝土徐变的基本概念	2
1.1.2 徐变系数	2
1.1.3 徐变的计算理论和方法	4
1.1.4 多轴应力状态下的徐变	18
1.2 钢管混凝土的徐变.....	21
1.2.1 钢管混凝土徐变的特点	21
1.2.2 钢管混凝土徐变的研究现状	22
第二章 钢管混凝土轴心受压构件徐变	28
2.1 钢管混凝土轴心受压构件工作机理.....	28
2.2 钢管混凝土轴心受压构件的受力分析.....	30
2.2.1 弹性阶段的紧箍力	30
2.2.2 初始应力分析	33
2.2.3 承载力 N_0	35
2.3 钢管混凝土轴心受压构件徐变研究方法.....	36
2.3.1 忽略紧箍力	37
2.3.2 考虑紧箍力	39
2.4 徐变的影响因素.....	42
2.4.1 应力级别的影响	45
2.4.2 含钢率的影响	46
2.4.3 混凝土标号的影响	47
2.5 徐变对钢管混凝土轴心受压构件的影响.....	48
2.5.1 徐变对核心混凝土轴向应力的影响	48
2.5.2 徐变对承载力的影响	50
2.6 徐变设计计算公式.....	52
2.6.1 影响因素分析	52
2.6.2 回归分析.....	53

第三章 钢管混凝土小偏心受压构件徐变分析	83
3.1 偏心受压构件工作机理	83
3.2 钢管混凝土小偏心受压构件受力分析	84
3.2.1 受力分析	84
3.2.2 紧箍应力分析	87
3.2.3 初始应力计算	89
3.3 钢管混凝土小偏心受压构件的徐变分析	90
3.3.1 忽略紧箍力	91
3.3.2 考虑紧箍力	92
3.4 钢管混凝土小偏心受压构件徐变的影响因素	93
3.4.1 紧箍力的影响	93
3.4.2 含钢率的影响	94
3.4.3 偏心率的影响	95
3.4.4 作用荷载的影响	95
3.4.5 混凝土标号的影响	96
3.5 徐变对钢管混凝土小偏心受压构件的影响	96
3.5.1 徐变对核心混凝土轴向应力的影响	96
3.5.2 徐变对承载力的影响	97
3.5.3 徐变对挠度的影响	99
3.6 钢管混凝土小偏心受压构件徐变的设计计算公式	102
3.6.1 影响因素分析	102
3.6.2 徐变的回归分析	103
第四章 钢管混凝土大偏心受压构件徐变分析	126
4.1 钢管混凝土大偏心受压构件受力分析	126
4.1.1 受力分析	126
4.1.2 初始应力计算	127
4.2 钢管混凝土大偏心受压构件徐变分析	127
4.2.1 忽略紧箍力	128
4.2.2 考虑紧箍力	128
4.3 钢管混凝土大偏心受压构件徐变的影响因素	128
4.3.1 紧箍力的影响	129
4.3.2 含钢率的影响	129
4.3.3 偏心率的影响	130
4.3.4 作用荷载的影响	130
4.3.5 混凝土标号的影响	131

4.4	徐变对钢管混凝土大偏心受压构件的影响	131
4.4.1	徐变对受压区高度的影响	131
4.4.2	徐变对核心混凝土轴向应力的影响	133
4.4.3	徐变对承载力的影响	134
4.4.4	徐变对挠度的影响	136
4.5	钢管混凝土大偏心受压构件徐变设计计算公式	137
4.5.1	影响因素分析	137
4.5.2	徐变的回归分析	138
第五章	钢管混凝土受弯构件徐变分析	158
5.1	钢管混凝土受弯构件工作机理	158
5.2	钢管混凝土受弯构件受力分析	160
5.3	钢管混凝土受弯构件徐变分析	161
5.4	钢管混凝土受弯构件徐变的影响因素	163
5.4.1	含钢率的影响	163
5.4.2	弯矩的影响	164
5.4.3	混凝土标号的影响	164
5.5	徐变对钢管混凝土受弯构件的影响因素	165
5.5.1	徐变对核心混凝土轴向应力的影响	165
5.5.2	徐变对承载力的影响	165
5.5.3	徐变对挠度的影响	167
5.6	钢管混凝土受弯构件的徐变设计计算公式	170
5.6.1	影响因素分析	170
5.6.2	徐变的回归分析	170
第六章	钢管混凝土结构的徐变	188
6.1	钢管混凝土结构徐变的计算理论	188
6.1.1	钢管混凝土轴心受压构件	188
6.1.2	钢管混凝土压弯构件	189
6.2	钢管混凝土格构柱的徐变	192
6.2.1	徐变分析	192
6.2.2	程序编制	192
6.2.3	算例分析	194
6.3	钢管混凝土框架结构的徐变	223
6.3.1	徐变分析	223
6.3.2	程序编制	226
6.3.3	算例分析	228

6.4 钢管混凝土拱桥的徐变	273
6.4.1 徐变分析	273
6.4.2 算例分析	274
参考文献	298

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Basic theory for creep of concrete	2
1.1.1 Basic concept for creep of concrete	2
1.1.2 Creep coefficient	2
1.1.3 Calculated theories and methods for creep	4
1.1.4 Creep under multi-axial stresses	18
1.2 Creep of concrete filled steel tube (CFST)	21
1.2.1 Creep characteristics of CFST	21
1.2.2 Present studies on Creep of CFST	22
Chapter 2 Creep of axially compressed CFST members	28
2.1 Working mechanism of axially compressed CFST members	28
2.2 Analysis of behavior of axially compressed CFST members	30
2.2.1 Confining force in elastic stage	30
2.2.2 Analysis of initial stress	33
2.2.3 Analysis of the bearing capacity	35
2.3 Research methods of axially compressed CFST members	36
2.3.1 Without considering confining force	37
2.3.2 With considering confining force	39
2.4 Influencing factors of creep of axially compressed CFST members	42
2.4.1 Effect of stress grade	45
2.4.2 Effect of steel content	46
2.4.3 Effect of concrete grade	47
2.5 Effect of creep on axially compressed CFST members	48
2.5.1 Effect of creep on axial stress on core concrete	48
2.5.2 Effect of creep on bearing capacity	50
2.6 Designing formula for creep of axially compressed CFST members	52

2. 6. 1	Analysis of influencing factors	52
2. 6. 2	Regression analysis of creep data	53
Chapter 3	Creep of small eccentrically compressed CFST members	83
3. 1	Working mechanism of eccentrically compressed CFST members	83
3. 2	Analysis of behaviors of small eccentrically compressed CFST members	84
3. 2. 1	Analysis of behaviors	84
3. 2. 2	Analysis of confining stress	87
3. 2. 3	Calculation of initial stress	89
3. 3	Creep analysis of small eccentrically compressed CFST members	90
3. 3. 1	No consideration of confining force	91
3. 3. 2	Consideration of confining force	92
3. 4	Influencing factors of creep of small eccentrically compressed CFST members	93
3. 4. 1	Effect of confining force	93
3. 4. 2	Effect of steel content	94
3. 4. 3	Effect of eccentricity	95
3. 4. 4	Effect of service load	95
3. 4. 5	Effect of concrete grade	96
3. 5	Effect of creep on small eccentrically compressed CFST members	96
3. 5. 1	Effect of creep on axial stress on core concrete	96
3. 5. 2	Effect of creep on bearing capacity	97
3. 5. 3	Effect of creep on deflection	99
3. 6	Creep formula for design of small eccentrically compressed CFST members	102
3. 6. 1	Analysis of influencing factors	102
3. 6. 2	Regression analysis of creep data	103
Chapter 4	Creep of large eccentrically compressed CFST members	126
4. 1	Analysis of behaviors of large eccentrically compressed CFST members	126
4. 1. 1	Analysis of behaviors	126
4. 1. 2	Calculation of initial stress	127

4.2	Creep analysis of large eccentrically compressed	
	CFST members	127
4.2.1	No consideration of confining force	128
4.2.2	Consideration of confining force	128
4.3	Influencing factors of creep of large eccentrically compressed	
	CFST members	128
4.3.1	Effect of confining force	129
4.3.2	Effect of steel grade	129
4.3.3	Effect of eccentricity	130
4.3.4	Effect of loads	130
4.3.5	Effect of concrete grade	131
4.4	Effect of creep on large eccentrically compressed	
	CFST members	131
4.4.1	Effect of creep on height of compressed areas	131
4.4.2	Effect of creep on axial stress on core concrete	133
4.4.3	Effect of creep on bearing capacity	134
4.4.4	Effect of creep on deflection	136
4.5	Designing formula for creep of large eccentrically compressed	
	CFST members	137
4.5.1	Analysis of influencing factors	137
4.5.2	Regression analysis of creep data	138
Chapter 5	Creep of bending CFST members	158
5.1	Working mechanism of bending CFST members	158
5.2	Analysis of behaviors of bending CFST members	160
5.3	Creep analysis of bending CFST members	161
5.4	Influencing factors of creep of bending CFST members	163
5.4.1	Effect of steel grade	163
5.4.2	Effect of bending moment	164
5.4.3	Effect of concrete grade	164
5.5	Effect of creep on bending CFST members	165
5.5.1	Effect of creep on axial stress on core concrete	165
5.5.2	Effect of creep on bearing capacity	165
5.5.3	Effect of creep on deflection	167
5.6	Designing formula for creep of large eccentrically compressed	
	CFST members	170

5. 6. 1	Analysis of influencing factors	170
5. 6. 2	Regression analysis of creep data	170
Chapter 6	Creep of CFST structures	188
6. 1	Calculating theory of CFST structures	188
6. 6. 1	Axially compressed CFST members	188
6. 6. 2	Compressed-bending CFST members	189
6. 2	Creep of CFST	192
6. 2. 1	Creep analysis	192
6. 2. 2	Computer programming	192
6. 2. 3	Analysis of examples	194
6. 3	Creep of CFST frame structures	223
6. 3. 1	Creep analysis	223
6. 3. 2	Computer programming	226
6. 3. 3	Analysis of examples	228
6. 4	Creep of CFST arch bridges	273
6. 4. 1	Creep analysis	273
6. 4. 2	Analysis of examples	274
References	298

第一章 绪 论

徐变对组合结构的影响是相当显著的。当前,钢管混凝土结构的发展速度非常快,应用钢管混凝土的结构也越来越多。在实际工程应用中,往往在混凝土中添加膨胀剂,希望以此抵消徐变带来的影响,或者在设计中考虑徐变折减系数,但是在理论上计算徐变的较为合理的方法几乎没有。

由于钢管混凝土的工作机理非常复杂,钢管和混凝土均处于多轴应力状态,这使得钢管混凝土徐变问题的分析较钢筋混凝土及其他组合结构的徐变远为复杂。首先,钢管混凝土中核心混凝土处于复杂应力状态之下,这需要应用多轴应力状态的徐变理论;其次,徐变主要针对钢管混凝土中的混凝土,但钢管又要参与混凝土徐变的过程,在此徐变过程中,既要考虑混凝土的徐变特性,又要考虑钢管的参与作用,钢管与混凝土之间的各种影响因素相互耦合,相互关联。

文献(谭素杰,1987;Zhong S T,1988;王湛,1994;钟善桐,1994)对钢管混凝土构件徐变的研究得到一些初步的结果,这些结果可概括如下:钢管混凝土徐变与普通混凝土徐变相比较小;同时,徐变稳定阶段到达也要早得多;钢管混凝土的徐变早期发展较快,到五个月时趋于水平,一年以后几乎停止;徐变对紧箍力影响很小,在徐变过程中紧箍力基本不变或略有增加,在徐变计算中可以忽略紧箍力变化的影响;随含钢率的增加,钢管混凝土的徐变量减少。随着应力的增大,钢管混凝土受力状态由弹性阶段向塑性阶段过渡,钢管应力不断减小,变形不断增大;无论处于低应力还是高应力状态,徐变对钢管混凝土的承载力均无影响。

然而这些结论是值得商榷的。从混凝土的徐变理论可知,处于三向受压状态下的混凝土徐变小于单轴压应力状态下混凝土的徐变,若混凝土处于轴向受压、侧向受拉的应力状态下,其徐变大于单轴压应力状态下的混凝土徐变。在钢管混凝土构件的工作过程中,核心混凝土有时会处于轴向受压而侧向受拉的应力状态下,所以,此时钢管混凝土构件的徐变不一定小于素混凝土的徐变。在钢管混凝土构件的徐变过程中,截面上的应力重分布,核心混凝土上的应力逐渐向钢管上转移,这种应力重分布的状况将增加钢管的负担,若作用荷载达到一定程度时,钢管会提前发生塑性破坏,可见徐变会对钢管混凝土构件的承载力产生较大影响。

有关内容将在本书中作进一步论证。

1.1 混凝土徐变的基本理论

1.1.1 混凝土徐变的基本概念(Bazant Z P, Leonard J Nairn, 1984; 周履, 1987A; 惠荣炎等, 1988; 周履等, 1994)

早在 19 世纪前,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类似,假定混凝土是弹性材料。1905 年 Woolson I H 发现,在高轴向应力作用下,钢管中的混凝土有流变现象。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 Mcmillan F M 进行了混凝土加荷与不加荷依时性变形的试验,1917 年 Smith E B 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,但直到 1937 年 Davis R E 等人对混凝土的徐变性能进行了系统的研究之后,才对徐变性能有了较明确的认识,前后经历了 30 年(周履等,1994)。

混凝土徐变对结构的影响很大,一般徐变比瞬时弹性变形大 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的方面,也有不利的方面。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不利影响。故在这些结构设计中,应尽量减少混凝土的徐变。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陷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,在保持强度不变的条件下,要设法提高混凝土的徐变(周履等,1994;惠荣炎等,1998)。因而,多年来世界各国学者对混凝土的徐变问题进行了多方面的研究。

混凝土的徐变机理虽然尚未完全清晰,但从其徐变特点上来看,可以利用流变模型进行分析和研究徐变计算方法。水泥与混凝土凝固后的流变特性主要表现为强度、弹性、塑性和黏性。任何物体的流变现象,实质上表现的是能量转化。徐变是能量从动能缓慢转变为势能或同时部分地转变为热能的现象。

凝固后的水泥浆体或混凝土,都属于以粘弹性为主的非匀质组合固体。这种组合固体,既包含一种以高弹性模量组分埋在连续的低弹性模量组分中的结构,也包含一种在高弹性模量组分所构成的坚硬骨架中填充着低弹性模量组分的结构。混凝土的徐变包含可恢复徐变和不可恢复徐变两部分,可恢复徐变是一种滞后弹性变形;而不可恢复徐变则可能是黏性变形和塑性变形。黏性变形速度与作用应力成正比,而塑性变形则不存在这种线性关系(惠荣炎,1988;周光泉,1996)。

1.1.2 徐变系数(惠荣炎等,1988)

为了帮助确定混凝土的徐变,在许多徐变理论中引入了徐变系数。徐变系数的物理涵义就是混凝土徐变应变与弹性应变的比值。

目前国际上对徐变系数有两种不同的定义。

第一种定义可以用下式表达

$$\epsilon_c(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(28)} \varphi(t, t_0) \quad (1-1)$$

式中: $\epsilon_c(t, t_0)$ ——时刻 t_0 开始作用于混凝土的应力 $\sigma_c(t_0)$ 至时刻 t 所产生的徐变应变;

$\sigma_c(t_0)$ ——时刻 t_0 作用于混凝土的应力;

$E_{c(28)}$ ——混凝土在 28 天的弹性模量;

$\varphi(t, t_0)$ ——徐变系数。

第二种定义可用下式表达

$$\epsilon_c(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{c(t_0)}} \varphi(t, t_0) \quad (1-2)$$

式中: $E_{c(t_0)}$ ——混凝土在时刻 t_0 的弹性模量。

当前,国际上对于徐变系数的计算存在不同的数学表达式。其中一类将徐变系数表达为一系列系数的乘积,每一个系数表示一个影响徐变值的重要因素;另一类则将徐变系数表达为若干性质互异的徐变分项系数之和。

1) 将徐变系数表达为一系列系数的乘积

Trost H 与 Wiss Rat 在 1967 年提出的关于徐变系数的一般表达式可写成

$$\varphi = \varphi(t, t_i) = k_i \varphi_N f(t - t_i) \quad (1-3)$$

式中: t_i ——产生徐变的常应力开始引入(或开始加载)时混凝土的龄期,简称加载龄期;

$t - t_i$ ——常应力 $\sigma_c(t - t_i)$ 持续作用的时间;

k_i ——加载龄期的影响系数;

$f(t - t_i)$ ——加载持续时间的函数,表示徐变随时间发展的进程,当 $t = t_i$,

$$f(t - t_i) = 0; \text{ 当 } t = \infty, f(t - t_i) = 1.0.$$

$\varphi_N = \varphi_0 c_2 c_3$ = 徐变系数特征值,其中 φ_0 为取决于环境(如湿度)的系数, c_2 为取决于混凝土成分及稠度的系数, c_3 为取决构件尺寸的系数,故式(1-3)又可以写成

$$\varphi(t, t_i) = k_i c_2 c_3 \varphi_0 f(t - t_i) \quad (1-4)$$

或

$$\varphi(t, t_i) = \varphi(\infty, t_i) f(t - t_i) \quad (1-5)$$

式中: $\varphi(\infty, t_i) = k_i \varphi_N = k_i c_2 c_3 \varphi_0$ = 加载龄期为 t_i 时徐变系数终值。

目前,采用这种表达式的有英国桥梁规范 BS5400(1984 年版第四部分)及美国 ACI209 委员会的建议(1982 年版)。

2) 将徐变系数表达为若干分量之和

CEB-FIP 标准规范(1978 年版)采用下述的徐变系数表达式

$$\varphi(t, t_0) = \beta_a(t_0) + \varphi_a(t, t_0) + \varphi_f(t, t_0) \quad (1-6)$$

式中: $\beta_a(t_0)$ ——加载后最初几天产生的不可恢复的变形系数;

$\varphi_R(t, t_0)$ ——可恢复的滞后弹变系数,或徐弹系数;

$\varphi(t, t_0)$ ——不可恢复的流变系数,或徐塑系数。

与此同时, Bazant 提出了由基本徐变和干燥徐变组成的徐变表达式,称为 B-P 模式,用徐变函数 $\Phi(t, t', t_0)$, 即单位应力产生的总应变表达式

$$\Phi(t, t', t_0) = \frac{1}{E_c(t')} + c_0(t, t') + c_d(t, t', t_0) - c_p(t, t', t_0) \quad (1-7)$$

式中: $\frac{1}{E_c(t')}$ ——单位应力产生的初始弹性应变;

$c_0(t, t')$ ——单位应力产生的基本徐变,即无水分转移时的徐变应变;

$c_d(t, t', t_0)$ ——单位应力产生的干燥徐变,即有水分转移时的徐变应变;

$c_p(t, t', t_0)$ ——干燥以后徐变的减少。

1.1.3 徐变的计算理论和方法(唐崇钊,1980A;唐崇钊,1980B;唐崇钊,1982; Bazant Z P 等,1982; Neville A M 等,1983; Bazant Z P 等,1984; 周履,1987A; 周履,1987B; 惠荣炎等,1988; 赵林强,1991; 周履等,1994)

1.1.3.1 流变理论的基本模型(惠荣炎等,1988; 董哲仁,1993; 周光泉,1996)

流变理论模型由流变模型元件组成。流变模型元件主要包括弹簧、缓冲器(阻尼器)和摩擦器,它们分别表示物体的弹性、黏性和塑性。所谓弹性是指施加于物体上荷载卸荷时,可完全恢复的变形,塑性为不可恢复的变形,黏性为与时间相关的变形。理想弹性体为胡克固体,理想黏性物体为牛顿液体,理想塑性体为圣维南固体。

1) 理想弹性元件

如果材料是线弹性的,则有如下关系:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-8)$$

式中 E 是杨氏模量。上式就是著名的胡克定律。

图 1-1 中为理想弹性元件示意图。

在弹性体加荷和卸荷期间,显然不消耗能量,所做的功储存在弹性体内转化为势能,所以其变形是可恢复的。

2) 黏性元件(图 1-2)

对理想黏性体施加剪切应力的过程中,并不增加势能,将所有的功全部转化为热能消耗掉。理想黏性体由油壶和活塞组成,活塞在黏性液体中的位移与外荷载的关系为

$$P = \eta \frac{du}{dt} \quad (1-9)$$