

XUBIAN
HE
SHOUSUO
YINGXIANG
GANG HUIJINGTU
ZUHELIANG
CHANGQI
LIXUE
JISUAN

徐变和收缩影响下 钢-混凝土组合梁长期力学计算

韩春秀 ■ 著



重庆大学出版社

本专著受国家自然科学基金项目资助（项目批准号：51468026, 51708486）

The monograph is sponsored by National Natural
Science Foundation of China. (No. 51468026, 51708486)

徐变和收缩影响下钢-混凝土组合梁长期力学计算

Long-term mechanical calculation of steel and
concrete composite beams caused by creep and shrinkage

Han Chunxiu

韩春秀

著

重庆大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

徐变和收缩影响下钢-混凝土组合梁长期力学计算/

韩春秀著.--重庆:重庆大学出版社,2018.3

ISBN 978-7-5689-0482-7

I.①徐… II.①韩… III.①钢筋混凝土梁—组合梁
—结构力学—计算方法 IV.①TU375.102

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 063217 号

徐变和收缩影响下钢-混凝土组合梁长期力学计算

韩春秀 著

策划编辑:林青山

责任编辑:文 鹏 版式设计:莫 西

责任校对:贾 梅 责任印制:张 策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆长虹印务有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:9 字数:166 千

2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5689-0482-7 定价:48.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

钢-混凝土组合梁在世界各国的桥梁、多高层建筑、多层工业厂房中的应用越来越广,已成为结构体系的重要发展方向之一,具有显著的技术经济效益和广泛的应用前景。组合梁由钢材和混凝土两种性质完全不同的材料组合而成,钢是一种比较理想的均质材料,而混凝土则是一种复杂的多相复合材料,在长期荷载作用下,混凝土会发生徐变、收缩、应力松弛等复杂的耦合现象。其中,徐变的最终应变一般会达到初始应变的1~3倍,而钢材在常温且应力低于屈服强度时不产生徐变,二者之间通过抗剪连接件相连,钢梁会阻止混凝土的徐变变形,导致组合梁内部发生应力重分布,进一步使结构变形发生改变。这对挠度要求比较严格的结构,如轨道交通梁是非常不利的,直接影响结构的使用功能,甚至危及人身安全。在超静定结构中,结构变形的改变会导致约束次内力的产生,增加了应力方程求解的难度;对于预应力组合梁就更复杂了,徐变会引起钢索预应力损失,预应力的损失又会影响组合截面应力,将使预应力组合梁长期受力性能更加复杂。

目前我国的规范还未对组合梁徐变应力重分布的计算进行介绍,相关的文献也很少,不成体系;在国外,见过一些研究的相关报道,但是这些研究不够深入,未达到普遍统一的认识,各国设计规范也未给出相应的计算条款,这方面的理论研究严重滞后于组合梁的应用和发展。因此,提出组合梁徐变应力重分布的计算方法成为亟待解决的问题,准确估计组合梁在徐变作用下的应力重分布大小,预测混凝土的徐变时效行为特征对保证组合梁的耐久性和安全性有着重要的理论意义和实用价值。

通过对组合结构力学计算的多年深入研究,结合数值分析和试验,本书提出了钢-混凝土组合结构在徐变收缩影响下的力学计算方法,具体内容和章节如下:

第1章 绪论

本章提出了研究背景和存在的问题,总结了研究的方法,包括混凝土徐变和收缩的时程关系、考虑徐变和收缩的混凝土本构关系、混凝土徐变和收缩效应的结构分析方法,明确了国内外研究现状及研究意义。

第2章 解析计算——组合梁徐变和收缩效应计算的解析方法推导

本章采用两种方法(内力分配法和直接法)从解析方面系统地推导了组合梁重分布

内力的计算公式,获得了内力分配法的精确解和实用近似解,提出的直接法实用简便,并获得与内力分配法吻合性好的计算结果。

第3章 数值模拟——验证解析计算结果和关键影响因素分析

本章通过求解徐变(收缩)本构方程系数,采用 APDL 流程编写,在 ANSYS 中实现了准确模拟混凝土的徐变(收缩)本构关系,并通过算例进行验证。采用解析方法和 ANSYS 对比分析了算例中的相关内容。内力对比(内力分配法与 ANSYS 对比):①混凝土和钢梁各自截面形心处的轴力随时间变化的规律;②混凝土和钢梁各自截面形心处的弯矩随时间变化的规律。变形对比(内力分配法、直接法与 ANSYS 对比):①组合梁跨中挠度随时间变化的规律;②组合梁截面应变随时间变化的规律。提出判别钢梁对混凝土的约束程度的系数,并对不同约束程度的 8 种组合梁截面进行有限元分析,获得了重分布内力和跨中挠度的时随规律。

第4章 试验分析——对比解析和数值计算结果及组合梁力学规律分析

本章根据组合梁中钢梁对混凝土约束程度的不同,设计了 4 根简支组合梁;对试验梁进行了为期 300 天的长期力学观测,获得了组合梁混凝土上表面应变、钢梁下表面应变和跨中挠度值;对实测数据的有效性进行分析,获得了能反映组合梁力学性能的有效数据,并对数据进行定性对比分析,得到 4 根试验梁随参数变化的力学规律。根据前面章节推导的解析计算方法和数值分析方法,对试验梁进行计算,并在混凝土上表面应变、钢梁下表面应变和跨中挠度值 3 方面与实测数据对比,验证了解析方法的正确性,揭示了组合梁长期力学变化规律。

本书通过讨论,希望能帮助读者了解钢-混凝土组合梁在受徐变和收缩影响下的力学计算方法,加深对组合梁长期受力特征规律的理解,在工程建设和试验研究工作中能掌握解决相关问题的方法。

本书采用了我近几年来已公开发表及尚未发表的研究成果,并获得国家自然科学基金项目资助(项目批准号:51468026,51708486);本书在编写过程中得到了昆明理工大学周东华教授、宋志刚教授的大力支持和悉心指导,得到了昆明理工大学抗震工程研究中心的苏何先老师的实验指导和帮助,在此一并向他们表示衷心的感谢。限于作者的水平,书中难免有不妥之处,欢迎读者批评指正(E-mail:hex4803@163.com)。

作者

2018 年 1 月于昆明

目 录

第 1 章 绪 论	001
1.1 钢-混凝土组合梁的长期力学性能	002
1.1.1 混凝土徐变和收缩的时程关系曲线	003
1.1.2 考虑徐变和收缩的混凝土本构关系	004
1.1.3 混凝土徐变和收缩效应的结构分析方法	005
1.2 目前存在和待解决的问题	006
1.3 国内外研究现状	009
第 2 章 解析计算——组合梁徐变和收缩效应计算的解析方法推导	011
2.1 计算中采用的基本理论和参数	011
2.1.1 基本假定	011
2.1.2 徐变系数与收缩应变	012
2.1.3 徐变(收缩)本构方程	015
2.2 内力分配法	016
2.2.1 内力分配法推导过程	017
2.2.2 内力分配法算例分析	036
2.3 直接法	047
2.3.1 材料换算系数 m_{Ae} 、 m_{Ie}	048
2.3.2 徐变调整系数 ψ_A 、 ψ_I	051
2.3.3 收缩调整系数 ψ_{Ash} 、 ψ_{Ish}	056
2.3.4 混凝土截面有效厚度 d_{er}	058
2.3.5 直接法算例分析	059
2.4 本章小结	065

2.4.1	主要完成内容	065
2.4.2	结论和规律	066
第3章 数值模拟——验证解析计算结果和关键影响因素分析		067
3.1	混凝土徐变(收缩)本构关系在软件中的实现	067
3.1.1	徐变本构方程系数	068
3.1.2	收缩本构方程系数	069
3.1.3	算例验证	072
3.2	考虑徐变和收缩影响的组合梁数值模拟分析	076
3.2.1	模型单元	076
3.2.2	模型材料	077
3.2.3	收敛控制	077
3.2.4	模型建立	077
3.2.5	结果分析	078
3.3	影响组合梁徐变的关键因素分析	090
3.4	本章小结	094
3.4.1	主要完成内容	094
3.4.2	结论和规律	095
第4章 试验分析——对比解析和数值计算结果及组合梁力学规律分析		096
4.1	试验设计方案	096
4.2	试验前期准备	098
4.2.1	小型预试验,观测应变仪的准确性和适用性	098
4.2.2	试验厂房搭建	099
4.3	试件制作及测试	100
4.4	材料基本力学性能	102
4.4.1	混凝土基本力学性能	102
4.4.2	钢材基本力学性能	103
4.5	试验结果与分析	105
4.5.1	实测数据的有效性分析	105

4.5.2 实测数据定性对比分析	108
4.5.3 解析、数值和试验结果定量对比分析	109
4.6 本章小结	117
4.6.1 主要完成内容	117
4.6.2 结论和规律	118
附录 组合梁徐变收缩重分布内力的微分方程组求解过程	119
参考文献	123

图目录

图 1.1	素混凝土三维时程力学曲线	001
图 1.2	分析组合梁徐变和收缩应力重分布的整体思路	003
图 1.3	混凝土徐变应变-时间关系曲线	003
图 1.4	混凝土收缩应变-时间关系曲线	004
图 1.5	混凝土徐变和收缩效应的结构分析方法	006
图 2.1	组合梁典型计算截面	017
图 2.2	静定组合梁徐变和收缩效应计算简图	018
图 2.3	加载初始 t_0 时刻组合梁截面内力分配图	018
图 2.4	组合梁截面的内力重分布平衡相容关系图(微分)	020
图 2.5	组合梁截面参数	026
图 2.6	组合梁内力重分布平衡相容关系图(代数)	031
图 2.7	组合梁截面参数	036
图 2.8	徐变引起的重分布轴力的 4 种解	039
图 2.9	徐变引起的重分布弯矩的 4 种解	039
图 2.10	收缩引起的重分布轴力的 4 种解	039
图 2.11	收缩引起的重分布弯矩的 4 种解	040
图 2.12	徐变引起的混凝土和钢梁截面最终轴力变化(微分精确解)	043
图 2.13	徐变引起的混凝土和钢梁截面最终弯矩变化(微分精确解)	043
图 2.14	徐变引起的混凝土和钢梁截面重分布轴力(微分精确解)	044
图 2.15	徐变引起的混凝土和钢梁截面重分布弯矩(微分精确解)	044
图 2.16	收缩引起的混凝土和钢梁截面重分布轴力(微分精确解)	044
图 2.17	收缩引起的混凝土和钢梁截面重分布弯矩(微分精确解)	045
图 2.18	徐变前后组合梁的应力、应变对比(微分精确解)	046
图 2.19	收缩引起组合梁的附加应力、应变(微分精确解)	046
图 2.20	组合梁截面受力和变形关系(只考虑徐变)	052

图 2.21	组合梁截面受力和变形关系(只考虑收缩)	056
图 2.22	混凝土有效厚度换算图	058
图 2.23	组合梁截面参数(例 2.3)	059
图 2.24	组合梁截面惯性矩计算简图	060
图 2.25	组合梁截面应力(徐变系数变化)	064
图 3.1	考虑徐变的有限元计算	069
图 3.2	徐变系数计算流程图	070
图 3.3	收缩应变计算流程图	071
图 3.4	ANSYS 计算结构徐变(收缩)效应的流程图	071
图 3.5	计算模型(例 3.1)	072
图 3.6	徐变系数计算值对比	073
图 3.7	收缩应变计算值对比	073
图 3.8	上表面应变计算结果对比	073
图 3.9	上表面应变曲线对比	075
图 3.10	建立 1/4 计算模型	078
图 3.11	计算模型的约束和加载	078
图 3.12	混凝土截面轴力的时随曲线(ANSYS 原始输出图)	081
图 3.13	钢梁截面轴力的时随曲线(ANSYS 原始输出图)	081
图 3.14	混凝土截面弯矩的时随曲线(ANSYS 原始输出图)	082
图 3.15	钢梁截面弯矩的时随曲线(ANSYS 原始输出图)	082
图 3.16	混凝土截面轴力的时随规律对比	083
图 3.17	钢梁截面轴力的时随规律对比	083
图 3.18	混凝土和钢梁截面的弯矩时随规律对比	083
图 3.19	模型的竖向位移($t=0$, ANSYS 原始输出图)	085
图 3.20	模型的竖向位移($t=407$, ANSYS 原始输出图)	086
图 3.21	跨中挠度的时随规律对比	086
图 3.22	截面应变($t=0$, ANSYS 原始输出图)	088
图 3.23	截面应变($t=407$, ANSYS 原始输出图)	088
图 3.24	跨中截面混凝土上表面应变对比	089
图 3.25	跨中截面钢梁下表面应变对比	089
图 3.26	组合梁截面参数(例 3.2)	091

图 3.27	不同截面的混凝土重分布轴力对比	093
图 3.28	不同截面的钢梁重分配弯矩对比	093
图 3.29	不同截面的跨中挠度对比	094
图 3.30	不同截面的跨中挠度增大倍数对比	094
图 4.1	试件方案设计图	097
图 4.2	试件测试内容	098
图 4.3	小型预试验图片	099
图 4.4	组合梁长期力学试验工作厂房	099
图 4.5	支模板和绑扎钢筋	100
图 4.6	混凝土浇筑和养护	100
图 4.7	拆模板和安装支座、仪器	101
图 4.8	加载和仪器测试	101
图 4.9	电子温湿度计	102
图 4.10	混凝土收缩试件	102
图 4.11	混凝土力学性能测定	103
图 4.12	钢材力学性能测定	104
图 4.13	试验梁的混凝土上表面应变实测数据	105
图 4.14	试验梁的钢梁下表面应变实测数据	106
图 4.15	试验梁跨中挠度实测数据	107
图 4.16	收缩应变实测数据	108
图 4.17	SCB-1~SCB-4 混凝土上表面应变对比	108
图 4.18	SCB-1~SCB-4 钢梁下表面应变对比	108
图 4.19	SCB-1~SCB-4 跨中挠度对比	108
图 4.20	混凝土收缩应变的不同规范计算值与试验值对比	109
图 4.21	试件 1/4 模型的加载和约束	110
图 4.22	模型中的钢筋和钢梁单元	110
图 4.23	徐变系数随时间变化的规律	114
图 4.24	SCB-1~SCB-4 混凝土上表面应变值的解析、数值和试验结果对比	114
图 4.25	SCB-1~SCB-4 钢梁下表面应变值的解析、数值和试验结果对比	116
图 4.26	SCB-1~SCB-4 跨中挠度值的解析、数值和试验结果对比	117

表目录

表 2.1	不同截面的详细参数(例 2.1)	027
表 2.2	不同截面的重分布内力(精确解和近似解)	028
表 2.3	不同徐变系数的截面重分布内力(精确解和近似解)	030
表 2.4	不同方法求解的重分布内力	034
表 2.5	基本计算参数(例 2.2)	036
表 2.6	徐变引起的截面重分布内力(4 种方程解)	037
表 2.7	收缩引起的截面重分布内力(4 种方程解)	038
表 2.8(a)	徐变引起的截面内力(微分精确解)	041
表 2.8(b)	收缩引起的截面内力(微分精确解)	042
表 2.9	素混凝土柱与钢筋混凝土柱应力计算对比	047
表 2.10	单一材料结构和组合结构的应力(应变)计算	049
表 2.11	组合梁徐变调整系数 ψ_A 、 ψ_I	055
表 2.12	组合梁收缩调整系数 ψ_{Ash} 、 ψ_{Ish}	057
表 2.13	基本计算参数(例 2.3)	060
表 2.14	组合梁截面惯性矩计算	060
表 2.15	内力分配法计算截面内力	063
表 2.16	内力分配法与直接法对比(截面应力)	063
表 3.1	试件上表面的应变值对比	074
表 3.2	组合梁有限元模拟单元及单元特性	076
表 3.3	混凝土和钢梁各自截面形心处的轴力计算值(解析和 ANSYS 对比)	079
表 3.4	混凝土和钢梁各自截面形心处的弯矩计算值(解析和 ANSYS 对比)	080
表 3.5	基本计算参数(直接法)	084
表 3.6	8 种截面的混凝土重分布轴力 N_{cr} 随时间变化值(N)	091
表 3.7	8 种截面的钢梁重分布弯矩 M_{sr} 随时间变化值(N · mm)	092
表 3.8	8 种截面跨中挠度 w_{st} 随时间变化值(mm)	092
表 4.1	试验梁的基本参数	096
表 4.2	混凝土基本力学性能	103
表 4.3	钢材基本力学性能	104
表 4.4	试件的混凝土上表面应变值	111

第 1 章 绪 论

钢-混凝土组合梁(Steel and Concrete Composite Beam,简称组合梁)是通过抗剪连接件将钢梁与混凝土板连成整体而共同工作的抗弯构件,通常混凝土板受压而钢梁受拉,充分发挥了两种材料的优势,形成强度高、刚度大、延性好的特点,在世界各国的桥梁、多高层建筑、多层工业厂房中应用越来越广,具有显著的技术经济效益和广泛的应用前景^[1-11]。

然而,随着时间推移,混凝土在(长期)荷载作用下会产生徐变(Creep),由于自身的材料特性会引起收缩(Shrinkage),若维持加载的应变不变会导致应力松弛(Stress Relaxation)^[2, 12, 13],如图 1.1 所示。

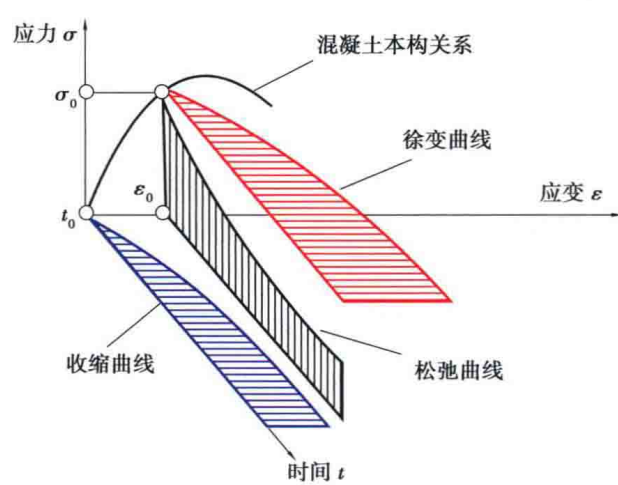


图 1.1 素混凝土三维时程力学曲线

图 1.1 包含了工程应用中的两类问题：一类是徐变、收缩问题；另一类是应力松弛问题。本书研究的是第一类问题。

在混凝土构件中,徐变(收缩)未受到其他外部构件的约束,称为自由徐变(收缩);而组合梁中混凝土的徐变(收缩)受到钢梁的约束,是一种约束徐变(收缩),这种约束变形将导致静定组合梁内部发生截面应力重分布,对于超静定组合梁还会额外引起随时间变化的徐变(收缩)次内力,由此出现结构内力重分布,从而导致最终应力状态的改

变。应力重分布的结果使得组合梁中的混凝土板和钢梁截面应力均重新进行调整,同时各自截面的应变和曲率也发生变化,导致组合梁变形(挠度和转角)增大,其值可达弹性变形的数倍之多,这对挠度要求严格的结构(如轨道交通梁)是非常不利的^[14-23]。同时,组合梁与一般的钢筋混凝土梁有很大的区别,钢梁的截面面积和抗弯刚度远比混凝土中的钢筋大,对混凝土的约束更大,引起的应力重分布将更加显著,若不能有效地计算应力重分布,将是不安全的^[24-26]。

1.1 钢-混凝土组合梁的长期力学性能

组合梁与一般的钢筋混凝土梁一样,要进行承载力极限状态和正常使用极限状态计算。其中,承载力极限状态有弹性和塑性两种计算方法。对于承受动荷载(如吊车梁、桥梁等)较小或组合梁的钢梁板件宽厚比较小(容易失稳)的情况,应采用弹性设计。在进行弹性计算和正常使用极限状态的变形计算时,应充分考虑混凝土的徐变和收缩的影响。国内外规范都作出相应规定:对大跨度、重荷载的混凝土结构必须考虑混凝土徐变问题^[27]。然而,如何准确又方便地计算组合梁由徐变和收缩引起的应力重分布以及由此产生的一系列的结构效应,至今仍未得到较好解决。

我国目前还未见相关规范对组合梁徐变应力重分布的计算进行介绍,相关的文献也很少,不成体系。现行的规范^[28]是通过降低混凝土弹性模量的方法来考虑组合梁的荷载长期效应,这种处理方法过于简单粗略,不能很好地反映组合梁实际应力和应变的变化。研究表明^[13, 24, 25, 27, 29, 30],混凝土的徐变受到很多内在因素(如水泥品种、水胶比、骨料、构件尺寸等)和外部条件(如环境的温度和湿度,加载的龄期和荷载持续时间等)影响,在组合梁中还受到钢梁以及支座的约束作用。我国不同地区的自然环境条件相差很大,结构的约束条件互不相同,用一个统一粗略的降低系数来考虑混凝土徐变的影响是不合理的,对结构尤其是复杂结构的应力计算将带来很大的误差^[30]。

在国外,已有一些相关研究的报道,但是不够深入,未达到普遍统一的认识,各国设计规范针对“组合梁徐变应力重分布计算”的内容至今空缺,这方面的理论研究严重滞后于组合梁的应用和发展。因此,提出组合梁徐变和收缩应力重分布的有效计算方法成为亟待解决的问题,它对预估组合梁长期使用中可能出现的危害、完善组合梁徐变和收缩效应的计算理论有重要的意义和实用价值^[31-40]。

解决组合梁的徐变和收缩的应力重分布效应问题,要涉及3方面的内容:①明确混凝土徐变和收缩随时间变化的关系;②建立相应的本构关系;③利用本构关系、变形协调和平衡条件形成组合梁三大基本控制方程进行结构的效应分析,通过边界条件进行求解。如图1.2所示。

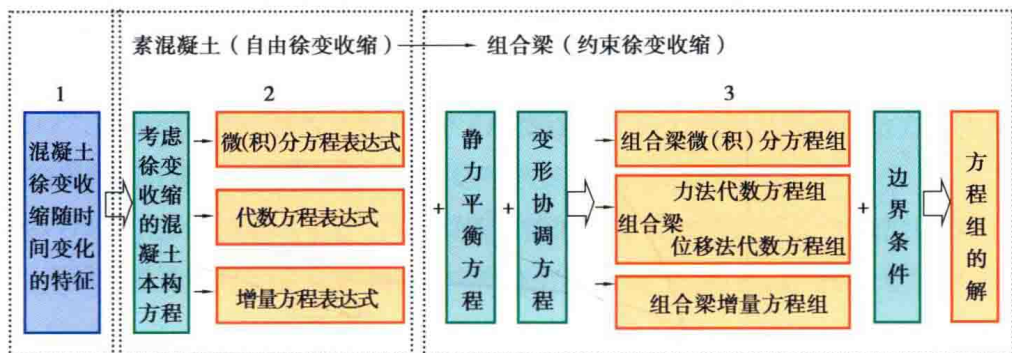


图 1.2 分析组合梁徐变和收缩应力重分布的整体思路

图1.2中的第1和第2方面至今已累积了较成熟的研究成果,可直接采用,而第3方面的研究成果很少,也是本书研究的核心内容。这3部分的每一步计算都将影响最终结果的准确性和可靠性,为了对其有清晰的认识,下面对每个部分取得的研究成果和进展作简要叙述。

1.1.1 混凝土徐变和收缩的时程关系曲线

此部分的研究已经很成熟,已获得大量的理论和试验成果^[12, 13, 25, 27, 41-43]。对于徐变的机理和行为,普遍认同的特点是:在常应力作用下,混凝土时程总应变由加载即出现的弹性应变(瞬时弹变)和徐变组成;徐变又由两部分组成,即卸载后不可恢复的塑性应变(徐塑应变)和可延迟恢复的弹性应变(滞后弹变),如图1.3所示。收缩主要由干燥收缩所致,其余的自发收缩和碳化收缩只占很小的比例,由试验可获得收缩时程曲线,如图1.4所示。这些曲线除了表现出混凝土徐变受材料内部的特性(水泥品种、水胶比、混凝土的几何尺

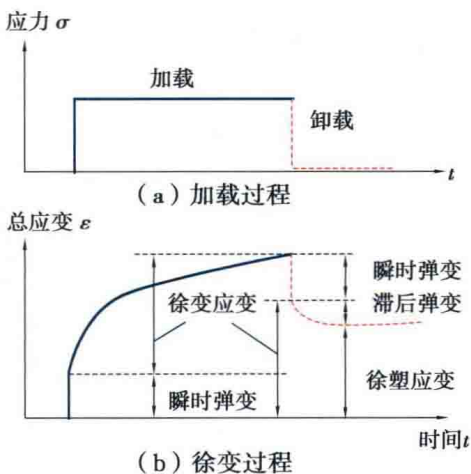


图 1.3 混凝土徐变应变-时间关系曲线

寸等)影响外,还反映了外在条件(环境的湿度和温度、加载的龄期和方式等)的影响。各国规范给出了计算徐变和收缩时程曲线的数学表达式^[28, 44-53],由这些表达式可以计算徐变系数和收缩应变。

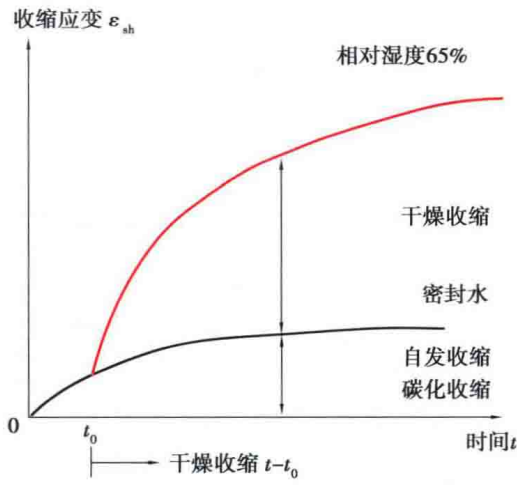


图 1.4 混凝土收缩应变-时间关系曲线

1.1.2 考虑徐变和收缩的混凝土本构关系

混凝土本构关系由 3 部分组成,分别是瞬时弹性本构、徐变本构和收缩本构。关键是建立徐变本构关系,收缩与应力无关,为了简化计算,通常假定收缩发展速度和徐变相同^[54-57]。

由试验通常只能得到常应力(通常 $\sigma_0 = 1 \text{ N/mm}^2$)作用下的徐变时程曲线,而变应力的徐变时程曲线很难由试验获得,但是可以观察到:当混凝土的应力不大于其强度的 0.4~0.5 倍时,混凝土的徐变行为近似于一种粘弹性材料,应力与应变呈线性关系,可以用粘弹性材料的波尔兹曼(Boltzmann)叠加原理来构建变应力作用下的混凝土徐变本构关系,而由此建立的方程是 Stieltjes 积分方程,属于非连续函数积分,求解较为复杂,难以应用和解析求解。为了寻求和建立方便应用的徐变本构关系,前人曾有很多尝试和假设,其中最具有代表性的是以下 4 种:

①1937 年,迪辛格尔(Dischinger H)^[58]提出了徐变速率与加载龄期无关的简化假设,使得积分本构方程可转化为微分本构方程,并成为最早能实际求解徐变问题的本构方程。该法的假设意味着,混凝土的徐变变形随着加载龄期推后会大为减小(常称老化理论),对于加载龄期很晚的混凝土会低估最终徐变值。另外,该法的徐变不含滞后应变,卸载时会高估徐变变形。该方法也称为徐变率法,即 RCM 法(Rate of Creep

Method)。

②1963年,吕休(Rüsch F)^[59]对迪辛格尔的假设进行了修正,将本构方程中徐变系数分解为两项,即徐塑应变和滞后弹变。该方程也称为改进的迪辛格尔微分方程,即IDM法(Improved Dischinger Method)。虽然用吕休本构求解得到的结果更接近实际,但仍然是微分方程,求解十分不便。

③1967年,特劳斯德(Trost H)^[60]通过计算积分方程引入“松弛系数(Relaxation Coefficient)”,并假定弹性模量为常数,推导了应变增量和应力增量之间的代数方程本构关系,使徐变问题计算大大简化,可以说这是对徐变计算的一次革新。

④1972年,巴增(Bazant Z P)^[61]对特劳斯德的计算公式进行了论证和扩展,将它推广应用于弹性模量随时间变化的情况,并将特劳斯德的“松弛系数”改称为“老化系数(Aging Coefficient)”。该法称为龄期调整有效模量法,即AEMM法(Age-Adjusted Effective Modulus Method)。该方法除了考虑弹性随时间变化外,与Trost的方法没有本质区别。

国际上通常将特劳斯德-巴增的方法称为TB法(Trost-Bazant Method)。1981年,我国建筑科学研究院的陈永春^[12]将应力-应变积分方程关系用积分中值定理转化为代数方程,提出了“中值系数法”,但该法没有像TB法那样得到广泛的认同和应用。除了微分本构和代数本构外,还有用增量形式表达的本构关系,此类本构关系适合于数值计算。

概括地说,迪辛格尔理论和吕休理论是根据徐变时程关系得到的解析函数,所建立的微分方程可以获得解析解,但求解过程比较复杂;特劳斯德理论和巴增理论的代数本构方程分别需要基于徐变函数先求得松弛系数和老化系数,用这些系数反映的徐变本构关系虽然是一种近似,但使得计算简化了很多。这4种混凝土的徐变本构关系仍将是计算徐变问题的基础,各国规范未给出混凝土徐变本构关系,仅是给出了在单位常应力作用下的徐变时程关系,需要结合结构的实际情况考虑适合的本构方程。

1.1.3 混凝土徐变和收缩效应的结构分析方法

混凝土徐变和收缩的时程效应关系为建立混凝土的徐变本构关系奠定了基础,混凝土的徐变本构关系又为徐变问题的结构分析提供了先决条件,其采用的结构层次分析方法大致有图1.5中的几种。