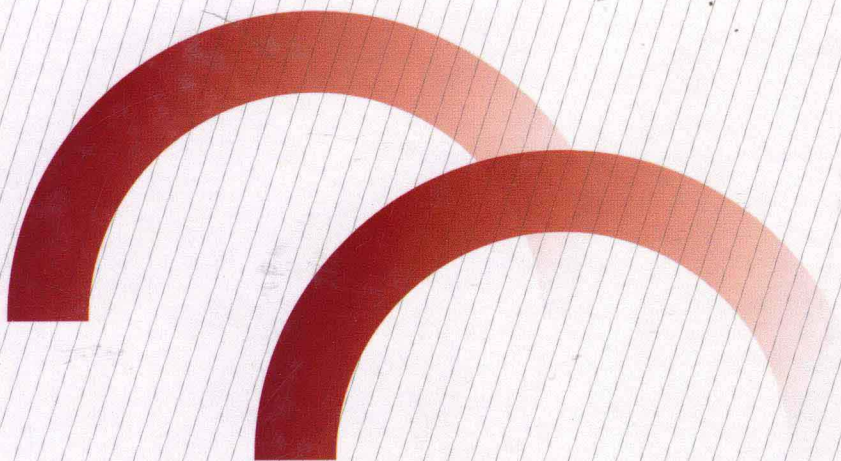




21世纪技术与工程著作系列·土木工程

钢管混凝土 徐变理论

王元丰 著



科学出版社

21 世纪技术与工程著作系列·土木工程



钢管混凝土徐变理论

王元丰 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书重点阐述钢管混凝土徐变理论。本书主要内容包括钢管混凝土轴心受压、偏心受压、受弯构件以及钢管混凝土构件在温度影响下的徐变行为分析,钢管混凝土结构在考虑几何非线性、温度效应等因素作用下的徐变效应分析,钢管混凝土结构徐变效应的概率分析以及徐变对钢管混凝土结构适用性可靠度的影响,徐变对钢管混凝土结构动力特性、确定性动力响应、随机振动响应和动力可靠度的影响等内容。本书的研究内容属于钢管混凝土徐变研究的前沿问题。本书按照研究问题划分章节,每一章都独立、完整地叙述了一类问题,包括相应的研究背景、研究方法和过程、研究结论等。

本书可供从事土木工程领域研究的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢管混凝土徐变理论/王元丰著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-037755-5

I. ①钢… II. ①王… III. ①钢管混凝土-形变压力-研究
IV. ①TU528.59

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 122604 号

责任编辑:童安齐 闫洪霞 / 责任校对:柏连海
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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年6月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2013年6月第一次印刷 印张:18 1/4

字数:350 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137154

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303



献给我的研究生导师钟善桐教授

前 言

科学研究的主要目的是探究未知世界。尽管在持续荷载作用下混凝土的徐变被发现和研究已百年有余,但其机理还不完全被人们所认识。而且,随着工程技术的发展和运用,一些与其相关联的新问题也不断出现。钢管混凝土徐变,就是随着钢管混凝土组合结构在 20 世纪七八十年代后逐渐得到广泛应用,而成为特别需要研究的问题。

我们课题组是在 1996 年开始钢管混凝土徐变的研究。2006 年出版的《钢管混凝土徐变》一书对我们在此之前十年的工作成果进行了梳理和总结。而在过去的七年多时间里,我们课题组进一步开展钢管混凝土徐变问题的研究,对这一问题的认识继续深化,研究的范围进一步拓展。这些研究成果在这本书中主要体现在以下几个方面:

(1) 基于混凝土徐变固结理论和微预应力固结理论,在材料层次分析了混凝土徐变的基本性质,提出了含不同掺和材料混凝土徐变的数学模型。结合钢管混凝土的受力特点,采用混凝土徐变 B3 模型,建立的钢管混凝土轴心受压、偏心受压和受弯构件徐变分析方法的数学物理基础更坚实,考虑影响混凝土徐变的因素拓展到混凝土的内部组分,如水灰比、骨料水泥比和水泥类型等。此外,进一步分析了环境温度对混凝土长期变形性能的影响,建立了在温度作用下钢管混凝土轴心受压、偏心受压构件徐变的计算模型,给出了各种参数的影响规律。对于在实际工程中应用日益增多的钢管高强混凝土开展了试验研究,测试了轴心受压构件的徐变规律,并建立了徐变计算的方法。

(2) 在结构分析方面,将混凝土徐变这种长期荷载作用下的静力问题与地震作用引起的结构动力问题以及结构在静荷载、动荷载下的可靠度这种不确定性问题相结合,使对徐变这种贯穿混凝土结构全寿命周期问题的分析,与其他问题耦合统筹进行。

(3) 在徐变对结构的静力行为影响方面,建立了同时考虑几何非线性和环境温度两种因素影响的钢管混凝土结构徐变效应的确定性分析方法。进一步引入来源于混凝土徐变模型、材料以及结构几何尺寸三方面的不确定性因素,利用基于拉丁超立方体抽样方法的 Monte Carlo 法,对考虑输入变量随机性的钢管混凝土结构进行了徐变效应的概率分析,同时给出了徐变对结构时变可靠度影响的评价方法,以及结构徐变效应的敏感性分析方法。

(4) 在混凝土徐变对结构的动力行为影响方面,分析了持续荷载与瞬时荷载

效应、静力与动力响应之间的联系,阐释了徐变对结构动力行为影响的机制,以长期持续荷载作用后混凝土力学性能试验为基础,提出了混凝土徐变后弹性模量的预测模型。以此为基础,分析了徐变对钢管混凝土结构动力特性以及不同激励作用下确定性动力响应的影响。然后采用结构随机振动分析的虚拟激励方法,以钢管混凝土结构在一致、非一致地震激励作用下的随机振动分析结果为依据,在均方响应的意义上揭示了徐变对其随机地震响应的影响规律,对徐变与结构动力性能关系的研究作了进一步深化。最后,以考虑徐变影响的结构随机振动分析结果为基础,依据符合 Poisson 假设的首次超越破坏准则,分析和评价了徐变对钢管混凝土结构动力可靠性的影响。

虽然经过 16 年的努力,我们对混凝土和钢管混凝土的徐变有了一定的认识,但距离真正清楚了解混凝土徐变的机理,把握钢管混凝土徐变的本质,还有很长的路要走。希望这本书的出版能够对从事混凝土和钢管混凝土徐变研究的人员有一定借鉴作用,能够吸引更多对这方面问题感兴趣的青年学者开展相关研究,使人类早日解开混凝土徐变的谜底。

在我们课题组开展钢管混凝土徐变研究的过程中,韩冰教授起到非常重要的作用。他最初的硕士论文工作开启了我们课题组这方面的研究,而他这些年在钢管混凝土徐变方面的研究和组织工作,使我们的研究能够不断向前进展。感谢刘保东教授,这些年大家在课题组集思广益、相互交流,彼此受益良多。感谢马伊硕博士扎实和富有开拓性的工作,使得我们能够在较广的领域内研究混凝土徐变这一并不新颖的问题,并取得新颖的成果,而她认真、负责的编辑工作,是推动本书得以尽快出版的关键因素。感谢刘明辉博士这些年在课题组的组织管理和研究工作,这对保障课题组工作的顺利进行起到特别重要的作用。还要感谢参与钢管混凝土徐变相关研究的博士和硕士研究生张电杰、曹健、雷阳、王茜、刘可为、陈晨、毛忠坤、邓思溢、李紫宇、巩健和张杰超,他们辛勤和富有创新性的工作,使我们能够不断攀登新的科学高峰。

限于作者水平,书中难免存在不当之处,恳请读者批评指正。

王元丰

于 2013 年春节

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 钢管混凝土徐变研究概述	2
1.1.1 钢管混凝土构件徐变研究	2
1.1.2 钢管混凝土结构徐变研究	7
1.1.3 考虑温度效应的钢管混凝土徐变研究	8
1.1.4 钢管混凝土徐变不确定性研究	9
1.1.5 钢管混凝土徐变研究总结与展望	10
1.2 本书主要研究内容	11
第 2 章 混凝土徐变理论	13
2.1 引言	13
2.2 混凝土材料的徐变	13
2.2.1 混凝土变形性能	13
2.2.2 混凝土徐变机理	16
2.2.3 温度对混凝土徐变的影响	17
2.2.4 混凝土徐变流变模型	19
2.3 混凝土徐变的微观本构模型	23
2.3.1 混凝土徐变的固结理论	23
2.3.2 混凝土徐变的微预应力固结理论	26
2.4 混凝土徐变的数学模型	28
2.4.1 普通混凝土徐变的 B3 模型	28
2.4.2 硅粉混凝土徐变的 B3 修正模型	30
2.4.3 粉煤灰混凝土徐变的 B3 修正模型	33
2.4.4 混凝土徐变的微预应力固结理论数学模型	35
2.4.5 考虑温度效应的微预应力固结理论数学模型及其数值解法	36
2.4.6 考虑温度效应的混凝土徐变 B3 修正模型	42
2.5 多轴应力状态下的混凝土徐变	46
2.6 小结	47
第 3 章 钢管混凝土构件徐变	48
3.1 引言	48

3.2	钢管混凝土轴心受压构件的徐变	48
3.2.1	钢管混凝土轴心受压构件的受力分析	48
3.2.2	钢管混凝土轴心受压构件的紧箍应力	49
3.2.3	钢管混凝土轴心受压构件的徐变	50
3.2.4	模型验证	53
3.2.5	参数分析	57
3.3	钢管混凝土偏心受压构件的徐变	63
3.3.1	钢管混凝土偏心受压构件的受力分析	63
3.3.2	钢管混凝土偏心受压构件的紧箍应力	65
3.3.3	钢管混凝土偏心受压构件的初始应力	67
3.3.4	钢管混凝土小偏心受压构件的徐变	69
3.3.5	钢管混凝土大偏心受压构件的徐变	70
3.3.6	模型验证	72
3.3.7	参数分析	78
3.4	钢管混凝土受弯构件的徐变	87
3.4.1	钢管混凝土受弯构件的工作原理	87
3.4.2	钢管混凝土受弯构件的受力分析	88
3.4.3	钢管混凝土受弯构件的徐变	89
3.4.4	参数分析	90
3.5	考虑温度效应的钢管混凝土构件徐变	94
3.5.1	考虑温度效应的钢管混凝土轴心受压构件徐变	94
3.5.2	考虑温度效应的钢管混凝土小偏心受压构件徐变	95
3.5.3	考虑温度效应的钢管混凝土大偏心受压构件徐变	97
3.5.4	参数分析	99
3.6	钢管高强混凝土轴心受压构件的徐变	117
3.6.1	试验内容及方法	118
3.6.2	试验结果及分析	119
3.6.3	模型建立	121
3.6.4	模型验证	125
3.6.5	参数分析	127
3.7	小结	129
第4章	钢管混凝土结构徐变	130
4.1	引言	130
4.2	结构徐变效应的确定性分析	131
4.2.1	增量型类弹性本构关系和简化方法	132

4.2.2	结构徐变效应分析方法	133
4.2.3	考虑几何非线性的结构徐变效应分析方法	135
4.2.4	考虑温度作用的结构徐变效应分析方法	137
4.3	结构徐变效应的概率分析	139
4.3.1	结构徐变效应分析的不确定性	139
4.3.2	结构徐变效应的概率分析方法	139
4.3.3	敏感性分析方法	141
4.4	确定性徐变效应数值模拟	142
4.4.1	工程概况	142
4.4.2	有限元模型	144
4.4.3	考虑几何非线性的徐变效应分析结果	146
4.4.4	考虑温度作用的徐变效应分析结果	153
4.4.5	参数分析	159
4.5	概率性徐变效应数值模拟	175
4.5.1	计算模型	175
4.5.2	极限状态定义	176
4.5.3	模型验证	176
4.5.4	结果与分析	180
4.6	小结	187
第 5 章	徐变对钢管混凝土结构确定性地震响应的影响	189
5.1	引言	189
5.2	徐变对结构动力性能影响的关键问题	190
5.2.1	徐变对结构动力性能的影响机制	190
5.2.2	混凝土徐变后效	191
5.2.3	徐变后几何非线性梁单元的切线刚度矩阵	195
5.3	考虑徐变效应的结构动力分析	197
5.3.1	运动方程的建立	197
5.3.2	特征问题数值解法	199
5.3.3	结构动力响应数值解法	201
5.4	徐变对钢管混凝土结构确定性地震响应影响的数值模拟	203
5.4.1	计算模型	203
5.4.2	徐变对结构动力特性的影响	204
5.4.3	徐变对结构地震响应的影响	206
5.5	小结	217

第 6 章 徐变对钢管混凝土结构随机地震响应的影响	219
6.1 引言	219
6.2 地震地面运动的随机模型	219
6.2.1 随机地震动的谱描述	219
6.2.2 地震地面运动加速度功率谱密度模型	221
6.2.3 地震地面运动空间变化效应	222
6.2.4 地震激励功率谱的分解	223
6.3 结构随机地震响应分析的数值方法	224
6.3.1 一致激励下结构随机地震响应	224
6.3.2 非一致激励下结构随机地震响应	225
6.4 徐变对钢管混凝土结构随机地震响应影响的数值模拟	226
6.4.1 计算模型	226
6.4.2 徐变对结构随机地震响应的影响	226
6.5 小结	249
第 7 章 徐变对钢管混凝土结构动力可靠性的影响	250
7.1 引言	250
7.2 结构的首次超越破坏准则	250
7.3 随机反应超越界限的概率分析	251
7.4 基于 Poisson 假设的动力可靠性分析	253
7.4.1 随机反应最大值的概率分布	253
7.4.2 确定界限下的动力可靠性	254
7.4.3 随机界限下的动力可靠性	255
7.5 徐变对钢管混凝土结构动力可靠性影响的数值模拟	256
7.5.1 徐变对随机反应最大值的影响	256
7.5.2 徐变对动力可靠性的影响	261
7.6 小结	265
参考文献	267

Contents

1 Introduction	1
1.1 Creep of concrete filled steel tube (CFST)	2
1.1.1 Study of creep of CFST members	2
1.1.2 Study of creep of CFST structures	7
1.1.3 Study of creep of CFST considering temperature effect	8
1.1.4 Study of uncertainty of creep of CFST	9
1.1.5 Summaries and prospects of the study of CFST creep	10
1.2 Main contents	11
2 Theories of concrete creep and creep under multiaxial stress	13
2.1 Introduction	13
2.2 Creep of concrete	13
2.2.1 Deformation of concrete	13
2.2.2 Mechanisms of concrete creep	16
2.2.3 Influence of temperature on concrete creep	17
2.2.4 Rheological models of concrete creep	19
2.3 Theories of concrete creep	23
2.3.1 Solidification theory for concrete creep	23
2.3.2 Microprestress-solidification theory for concrete creep	26
2.4 Mathematical models of concrete creep	28
2.4.1 Model B3 for creep of plain concrete	28
2.4.2 Modified model B3 for creep of concrete with silica fume	30
2.4.3 Modified model B3 for creep of concrete with fly ash	33
2.4.4 Mathematical model based on microprestress-solidification theory	35
2.4.5 Mathematical model based on microprestress-solidification theory considering temperature effect on concrete creep and its numerical solution	36
2.4.6 Modified model B3 for concrete creep considering temperature effect	42
2.5 Creep of concrete under multiaxial stress	46
2.6 Summaries	47

3 Creep of CFST members	48
3.1 Introduction	48
3.2 Creep of axially compressed CFST members	48
3.2.1 Mechanical analysis of axially compressed CFST members	48
3.2.2 Confining stress of axially compressed CFST members	49
3.2.3 Creep of axially compressed CFST members	50
3.2.4 Model validation	53
3.2.5 Parametric analysis	57
3.3 Creep of eccentrically compressed CFST members	63
3.3.1 Mechanical analysis of eccentrically compressed CFST members	63
3.3.2 Confining stress of eccentrically compressed CFST members	65
3.3.3 Initial stress of eccentrically compressed CFST members	67
3.3.4 Creep of compressed CFST members with small eccentricity	69
3.3.5 Creep of compressed CFST members with large eccentricity	70
3.3.6 Model validation	72
3.3.7 Parametric analysis	78
3.4 Creep of flexural CFST members	87
3.4.1 Working principle of flexural CFST members	87
3.4.2 Mechanical analysis of flexural CFST members	88
3.4.3 Creep of flexural CFST members	89
3.4.4 Parametric analysis	90
3.5 Creep of CFST members with temperature effect	94
3.5.1 Creep of axially compressed CFST members with temperature effect	94
3.5.2 Creep of compressed CFST members with small eccentricity considering temperature effect	95
3.5.3 Creep of compressed CFST members with large eccentricity considering temperature effect	97
3.5.4 Parametric analysis	99
3.6 Creep of axially compressed high-strength concrete filled steel tube members	117
3.6.1 Experimental setup	118
3.6.2 Experimental results	119
3.6.3 Model development	121
3.6.4 Model validation	125
3.6.5 Parametric analysis	127

3.7	Summaries	129
4	Creep of CFST structures	130
4.1	Introduction	130
4.2	Deterministic analysis of structural creep effect	131
4.2.1	Incremental quasi-elastic stress-strain relation and simplification method	132
4.2.2	Analytical method for structural creep	133
4.2.3	Analytical method for structural creep with geometric nonlinearity	135
4.2.4	Analytical method for structural creep with temperature effect	137
4.3	Probabilistic analysis of structural creep effect	139
4.3.1	Uncertainties in structural creep analysis	139
4.3.2	Probabilistic analysis of structural creep effect	139
4.3.3	Sensitivity analysis	141
4.4	Numerical simulation of deterministic creep effect	142
4.4.1	Bridge profile	142
4.4.2	Finite element modeling	144
4.4.3	Results of structural creep with geometric nonlinearity	146
4.4.4	Results of structural creep with temperature effect	153
4.4.5	Parametric analysis	159
4.5	Numerical simulation of probabilistic creep effect	175
4.5.1	Computational model	175
4.5.2	Definition of limit state	176
4.5.3	Model validation	176
4.5.4	Results and analysis	180
4.6	Summaries	187
5	Influence of creep on deterministic seismic response of CFST structures	189
5.1	Introduction	189
5.2	Key points about creep influence on structural dynamic behavior	190
5.2.1	Influencing mechanisms of creep on structural dynamic behavior	190
5.2.2	After-effect of creep	191
5.2.3	Tangent stiffness matrix of beam elements after creep considering geometric nonlinearity	195
5.3	Dynamic analysis of structures with creep effect	197
5.3.1	Equations of motion	197

5.3.2	Numerical solution for eigenvalue problem	199
5.3.3	Numerical solution for dynamic response of structures	201
5.4	Numerical simulation of creep influence on deterministic seismic response of CFST structures	203
5.4.1	Computational model	203
5.4.2	Influence of creep on structural dynamic characteristics	204
5.4.3	Influence of creep on structural seismic response	206
5.5	Summaries	217
6	Influence of creep on stochastic seismic response of CFST structures	219
6.1	Introduction	219
6.2	Stochastic models of earthquake ground motion	219
6.2.1	Spectrum description of stochastic earthquake ground motion	219
6.2.2	Models of acceleration power spectrum of earthquake ground motion	221
6.2.3	Spatial effect of earthquake ground motion	222
6.2.4	Decomposition of seismic power spectrum	223
6.3	Stochastic seismic response analysis of structures	224
6.3.1	Stochastic seismic response of structures with uniform excitation	224
6.3.2	Stochastic seismic response of structures with non-uniform excitation	225
6.4	Numerical simulation of creep influence on stochastic seismic response of CFST structures	226
6.4.1	Computational model	226
6.4.2	Influence of creep on stochastic seismic response of CFST structures	226
6.5	Summaries	249
7	Influence of creep on dynamic reliability of CFST structures	250
7.1	Introduction	250
7.2	First excursion failure criterion	250
7.3	Probabilistic analysis of excursion of stochastic response	251
7.4	Dynamic reliability based on Poisson hypothesis	253
7.4.1	Probability distribution of maximum stochastic response	253
7.4.2	Dynamic reliability with deterministic boundary	254
7.4.3	Dynamic reliability with random boundary	255

7.5	Numerical simulation of creep influence on dynamic reliability of CFST structures	256
7.5.1	Influence of creep on maximum stochastic response	256
7.5.2	Influence of creep on dynamic reliability	261
7.6	Summaries	265
References		267

第 1 章 绪 论

目前中国正处在土木工程基础设施的大规模建设时期,得益于材料和施工工艺等研究的不断深入,钢管混凝土结构在我国工程建设中的应用范围不断拓展,现已广泛应用于地铁工程、建筑工程和桥梁工程之中。地铁车站是我国最早采用钢管混凝土结构的工程项目,北京地铁一号线东段工程中,天安门东站和永安里站均采用了钢管混凝土柱作为主要承力构件。在民用建筑中,钢管混凝土柱由于具有承载能力高、抗震性能好的特点,多用于高层和超高层建筑,如澳大利亚墨尔本的联邦中心大厦、美国西雅图的联合广场大厦、中国深圳的赛格广场大厦等。在单层、多层工业厂房结构中,为充分发挥钢管混凝土柱的优势,一般将钢管混凝土柱设计为格构式组合柱以承受偏心压力,如 1972 年建成的本溪钢铁公司二炼钢轧辊钢锭模车间采用了四肢钢管混凝土柱,1980 年建成的太原钢铁公司第一轧钢厂第二小型厂的下柱采用了双肢钢管混凝土柱。在桥梁工程中,钢管混凝土已经被广泛地应用于拱桥结构,自 1990 年在四川省旺苍县建成跨度 115m 的我国第一座钢管混凝土拱桥以来,20 余年间我国已建和在建的钢管混凝土拱桥已有 300 余座之多,且其中很多都是跨径超过 200m 乃至 300m 的大跨度桥梁^[1]。

钢管混凝土构件中,钢管与核心混凝土相互作用、协同互补,两者的组合克服了钢管结构易发生局部屈曲的缺点,同时为核心混凝土提供了外部约束,使混凝土处于三向受压状态,有效地抑制了混凝土的脆性行为,提高了混凝土的抗压强度,使钢管混凝土构件在整体力学性能上具有一定优势^[2,3],成为在土木工程中得到广泛应用的组合材料^[4,5]。但是另一方面也应该看到,尽管钢管混凝土结构建设仍然在持续推进中,既有钢管混凝土结构的徐变、耐久性等长期效应问题已显现出来,其长期性能已开始成为影响该种结构发展的重要因素。

安全、适用、耐久是结构设计的基本原则,这一原则应贯穿于结构从施工建设到建成后运营的全生命过程。当将结构置于时间维度研究时,作用、结构、效应三者均成为时变体系^[6]。应该指出,这里结构的变化并非仅指结构体系的转变,而应理解为包括结构构型、刚度分布、承载能力以及其他力学特征在内的变化过程。所谓时效问题,主要是指随时间变化的某些因素,如温湿度变化、混凝土碳化、钢材锈蚀,以及混凝土自身老化引起的力学性质变化等,对结构服役期行为产生的不可忽略的影响,其中作为混凝土的重要依时特性,徐变成为结构时效问题的重点研究对象。

已有研究证明,徐变对混凝土结构^[7-10]和复合结构^[11,12]均有重要影响,以下

工程实例即为考证徐变效应影响的典型案例。英国预应力混凝土箱梁桥——Kingston 桥于 1970 年建成后 143.3m 主跨跨中挠度缓慢加大,至 1998 年已超过 300mm^[13];1978 年竣工的美国预应力混凝土连续刚构桥——Parrots 渡桥在使用 12 年后,195m 的主跨跨中下挠达 635mm^[14];1978 年建成的帕劳共和国三跨连续预应力混凝土刚架桥——Koror-Babeldaob 桥在 1990 年已完成 1200mm 的主跨跨中下挠,后因加固处理不当而倒塌^[13];我国预应力混凝土连续刚构桥——虎门大桥辅航道桥于 1997 年建成通车后,主跨跨中挠度因混凝土徐变等因素而逐年增长,截至 2003 年 11 月跨中累计下挠达 222mm^[15];经计算分析,预计 2014 年竣工的上海中心大厦塔楼结构封顶一年后巨型柱最大竖向变形将达 123mm,核心筒翼墙最大变形达 141mm,均发生在 84 层,其中由混凝土收缩徐变产生的非弹性变形占到结构竖向总变形的 50%以上,巨型柱与核心筒剪力墙的最大竖向变形差发生在 101 层,将达到 22mm^[16]。具体到钢管混凝土结构,由于徐变等因素的影响,采用钢管混凝土外框架-钢筋混凝土核心筒结构体系的超高层建筑将发生竖向变形差,从而导致结构水平构件产生初始附加应力^[17,18]。计算结果表明,采用该结构体系的广州新电视塔施工完成时,最大位移差为 96.35mm,发生在结构中部,在施工完成后 1000 天时,位移差值进一步增大,最大位移差达到 117.98mm^[19]。对于钢管混凝土拱桥而言,在静力方面,徐变会引起挠度的增加以及结构内力和截面应力的重分布^[20,21];在动力方面,徐变会改变结构的自振频率以及动力响应^[22,23]。主跨 360m 的中承式钢管混凝土拱桥丫髻沙大桥运营一年后的跨中徐变挠度为 120mm^[24],跨长 288m 的梅溪河大桥通车两年后的跨中徐变挠度达 63.4mm,占总挠度的 19%^[25],跨长 308m 的钢管混凝土拱桥南浦大桥运营一年后跨中挠度增长 36.7%^[26],而由徐变引起的钢管应力增加和混凝土应力减小则一般分别在 5%~27%和 20%~52%^[21]。

由此可见,徐变对钢管混凝土结构的性能具有显著影响。持续荷载作用下,钢管混凝土结构的力学行为随时间持续变化,与初始受力、变形状态相比变化较大,研究徐变对钢管混凝土结构的影响具有重要的理论及实践意义。

1.1 钢管混凝土徐变研究概述

1.1.1 钢管混凝土构件徐变研究

长期荷载作用下,钢管混凝土构件的组成部分之一核心混凝土发生徐变,外部钢管与核心混凝土协调变形,同时轴向应力在钢管与混凝土之间不断发生重分布。可以说,钢管混凝土构件的徐变行为是混凝土徐变与钢管和混凝土之间应力重分布相互作用的结果。已有研究证明,核心混凝土的收缩和徐变会削弱钢管和混凝土