

基于不确定性推理 的 既有结构可靠性评定

姚继涛 © 著



科学出版社

内 容 简 介

工程结构可靠性分析与控制中,判定结构可靠与否的实际依据并非结构客观的可靠度,而是可靠度分析预测的结果,它既决定于事物变化的随机性,也决定于对事物认知的水平。本书旨在建立基于不确定性推理的既有结构可靠性评定的基本理论,其基本方法不仅包括随机现象的概率推理方法,也包括主观不确定现象的信度推理方法。主要内容包括:结构可靠性理论中的基本概念、主观不确定性及其测度、基于信度的结构可靠性度量与控制方法、信度分布的生成方法、结构可靠度的概率和信度分析方法、结构可靠度设计与评定的通用方法、既有结构可靠性评定的基本原则和方法、随机现象和主观不确定现象的推断方法、既有结构性能和荷载的信度推断方法等。最后,对国际标准 ISO13822:2003《结构设计基础——既有结构的评定》进行了评述。

本书可供土木工程领域的研究工作者、工程技术人员以及其他领域的统计工作者参考,亦可作为高等院校相关专业研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于不确定性推理的既有结构可靠性评定/姚继涛著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-031444-4

I. 基… II. 姚… III. 工程结构-结构可靠性-研究 IV. TU311.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 108718 号

责任编辑:汤 枫 刘宝莉 / 责任校对:张小霞

责任印制:赵 博 / 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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 6 月第一次印刷 印张:14 3/4

印数:1—2 000 字数:287 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自人类开始建造房屋起,结构安全始终是一个重要的问题。历史上人们主要根据过去积累的经验完善房屋建造的方法,这种经验方法经历了一个非常漫长的发展时期。1638年,意大利物理学家伽利略(Galileo)出版专著《关于力学和运动两种新科学的谈话》,将科学实验方法引入力学,使得现代建筑力学得以产生和发展;但是,现代建筑力学的建立以及后期结构分析方法的发展并未解决房屋结构设计中的安全控制问题,因为工程实际中存在着许多不确定的因素,这些是严密的力学分析方法所不能定量分析的,人们对房屋结构的安全控制主要是通过设置经验性的安全系数来保证的。

1926年,德国学者迈耶(Mayer)首次应用概率方法研究了结构的安全度问题,建议根据随机变量的均值和方差进行结构设计。这是一项具有划时代意义的工作,人们开始应用科学的方法认识和分析结构设计中的不确定因素,并根据它们的特性进行结构设计,它标志着结构可靠性理论的诞生,但迈耶的工作在相当长的一段时间里被忽视了。1954年和1955年,苏联在先后颁布的建筑法规中,首次采用概率统计方法确定材料强度和风、雪荷载的取值,但对安全度的度量和控制依然采用经验性的安全系数,被称为半概率半经验的极限状态设计方法。1954年,苏联学者尔然尼采(Ржаницын)在出版的《考虑材料塑性的结构计算》一书中,明确地提出了与结构破坏概率相联系的数字特征,并建立了与安全系数之间的联系。这是结构可靠性理论发展的一个里程碑,人们开始应用概率直接度量和控制结构失效的可能性,而不仅仅是在结构性能和荷载的取值方面采用概率方法。1969年,美国学者康奈尔(Cornell)从实用角度改进和发展了尔然尼采的方法,建议采用计算简便且与失效概率相关联的可靠指标度量和控制结构的可靠性,使得近似概率极限状态设计方法进入实用研究阶段。1984年,我国在国内外研究的基础上,通过全国范围的调查统计工作,建立了分项系数表达的近似概率极限状态设计方法,即基于概率的分项系数法,并颁布国家标准《建筑结构设计统一标准》GBJ68—84以及各类建筑结构设计规范,成为世界上第一个在设计规范中采用这一先进设计方法的国家。1986年该方法被纳入国际标准《结构可靠度总原则》ISO2394;1998中,成为世界上通行的近似概率设计方法。

纵观结构可靠性理论的发展,概率理论与结构工程学的结合是结构可靠性理论诞生与发展的起源,它使得人们对结构可靠性的度量和控制由经验方法飞跃到科学的概率方法,在很大程度上摆脱了主观因素的影响。但是,从现实角度讲,概

率设计方法只是一种理想的方法,它要求对随机因素以及其他影响因素必须有相对准确和全面的认识。由于受认识手段、信息资源、知识水平、自然和社会环境等条件的制约,人们不可能对所有事物的所有方面都有准确、全面的认识,特别是对复杂的随机事物,存在着主观认识上的不确定性,即本书所归纳的主观不确定性。虽然结构的可靠度(可靠概率)具有客观的数值,但在工程决策中,人们实际依据的并不是这种客观的可靠度,而是可靠度分析预测的结果,即人们主观认识的结果。它既决定于事物变化的随机性,也决定于对事物认知的水平。认知水平越低,对结构可靠度的预测和控制则越粗略,结构额外的失效风险越大。认知水平的这种影响在现实中是难以避免且不可忽略的。因此,在实际的可靠性分析与设计中,除了事物的随机性,还必须考虑另外一种不确定性,即人们认识事物的主观不确定性,对这种不确定性的考虑将使结构可靠性的度量和控制更具有现实意义。

由于概率理论的成功应用,人们已习惯将结构可靠性分析中的不确定因素视为随机因素,完全采用概率的方法分析,包括主观不确定因素。实际上,主观不确定性不仅概念上与随机性存在本质差别,分析和推理方法上也存在着差异,它们在既有结构的可靠性分析和评定方面显得更为突出,土木工程领域的许多学者已注意到结构可靠性分析预测中的主观不确定性。1975年,美籍华人学者洪华生(Ang)在结构可靠性理论的研究中,将现实世界中不确定性的成因划分为两类:客观随机性、建模和参数估计的不完善性(与主观不确定性有关)。1985年,钱令希对结构优化设计中的主观信息进行了专门研究。20世纪80年代我国受国际研究趋势的影响,对结构分析、设计与评定中的模糊性进行了集中的研究,特别是结构失效准则的模糊性以及结构损伤的模糊评价和推理方法,取得了一批显著的成果。自1990年开始,王光远等在工程软设计理论中提出了主观认识的未确知性,阐述了未确知性与随机性、模糊性的关系及其数学处理方法,并在工程结构优化的研究中考虑了主观认识的未确知性。1992年和1996年,赵国藩等对影响结构可靠性的不确定性作了系统的阐述,指出不确定性中的随机性、模糊性和知识的不完善性。作者在总结国内外研究成果的基础上,于2002年将各种主观认识上的不确定性归纳为主观不确定性,并且借鉴美国学者登普斯特(Dempster)1967年和他的学生沙菲尔(Shafer)1976年共同创立的证据理论,利用信度和未确知量建立了统一描述和分析各种主观不确定性(包括模糊性)的数学方法以及考虑主观不确定性的结构可靠度分析方法,并提出基于信度的可靠性控制指标,指出在结构可靠度的分析中形式上可将未确知量视为随机变量采用概率的方法分析,为结构可靠度的信度分析和控制提供了现实途径。

概率理论与工程结构学的结合曾经推动结构可靠性理论的诞生和发展,信度理论与传统结构可靠性理论的结合将使人们从现实的角度考虑人类自身认知水平对结构可靠度分析结果的影响,这将使结构可靠性理论的发展扩展到思维科学

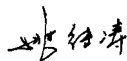
领域。

由于主观不确定性在既有结构的可靠性分析和评定中显得尤为突出,因此,本书主要针对既有结构阐述结构可靠性分析中的主观不确定性,其目的是建立基于不确定性推理的既有结构可靠性评定的基本理论。该理论在采用传统的概率推理方法分析和推断各种随机现象的同时,采用信度推理方法分析和推断各种主观不确定现象,并综合利用概率和信度量度和控制结构的可靠性,使结构可靠性的设计与评定既遵循事物随机变化的客观规律,也考虑人类现实的认知水平。为保证理论的完整性,本书对传统结构可靠性理论中的一些基本问题也进行了进一步的研究和阐述。

本书的主要工作包括:综合国内外研究的成果,讨论了结构可靠性和耐久性的概念,特别是耐久性与安全性、适用性之间的关系;根据当前土木工程领域的研究趋势,拓展了结构状态、结构性能、作用和作用效应的概念;通过对各种不确定性的分析,将人们认识上的不确定性归纳为主观不确定性,并利用信度和未确知量建立了统一的描述和分析主观不确定现象的数学方法;通过对结构可靠度的信度分析,建立了基于信度的结构可靠性的度量与控制方法;针对结构可靠性分析的需要,建立了未确知量信度分布的生成方法;针对当前可靠性分析与控制方法的缺陷,发展了拟建结构和既有结构可靠度的分析方法,提出结构可靠度设计与评定的通用方法,以及既有结构可靠性评定的基本原则和方法;发展了随机现象的统计推断方法,建立了主观不确定现象的基本推断方法,并针对既有结构,提出了荷载和结构性能的信度推断方法。

本书总结了作者自1990年以来在主观不确定性和既有结构可靠性评定方面的研究成果,包括2003年和2009年先后完成的国家自然科学基金项目“人-结构系统可靠性的基础研究”和“基于不确定性推理的既有结构可靠性评定”的研究成果,内容较2008年出版的学术专著《既有结构可靠性理论及应用》(科学出版社)更为系统和深入。由于本书的许多内容是探索性的,难免有不妥之处,诚挚期望读者批评指正,不吝赐教。

作者研究和写作过程中,得到赵彦辉、喻磊、解耀魁、信任、付强、陈旭东、高常欢、吴增良、卜凡国、刘虎堂等同仁的帮助,解耀魁参与了“结构可靠度设计与评定的通用方法”部分的研究和写作工作,并绘制了书中的部分插图,这里谨向他们表示诚挚的谢意!



2011年春于西安建筑科技大学

目 录

前言

第 1 章 基本概念	1
1.1 结构可靠性	1
1.2 结构耐久性	10
1.3 结构可靠性影响因素	14
参考文献	17
第 2 章 不确定性及其测度	19
2.1 概述	19
2.2 随机性	21
2.3 主观不确定性	23
2.4 不确定性的测度	26
参考文献	34
第 3 章 结构可靠性的度量与控制	35
3.1 结构可靠性的概率度量	35
3.2 结构可靠度的信度	39
3.3 基于信度的可靠性控制指标	45
参考文献	48
第 4 章 基本变量的概率分布和信度分布	50
4.1 随机变量的概率分布	50
4.2 随机变量分布参数的信度分布	58
4.3 既有事物的信度分布	72
4.4 未确知边界和补集的信度分布	75
参考文献	77
第 5 章 结构可靠度分析	78
5.1 作用分析模型	78
5.2 结构抗力分析模型	84
5.3 结构可靠度的分析和计算	93
参考文献	120
第 6 章 结构可靠度设计与评定的通用方法	123
6.1 当前结构可靠度设计与评定方法评价	123
6.2 设计值法	124

6.3 承载能力极限状态的设计表达式	125
6.4 正常使用极限状态的设计表达式	127
6.5 灵敏度系数	130
6.6 结构可靠度设计与评定的通用表达式	136
6.7 进一步的讨论	143
6.8 通用方法的特点	146
参考文献	147
第7章 既有结构可靠性的评定	149
7.1 基本原则和方法	149
7.2 既有结构可靠性评定	160
参考文献	165
第8章 不确定现象的推断	166
8.1 随机现象的概率推断方法	166
8.2 随机现象的信度推断方法	178
8.3 既有事物的信度推断	184
8.4 考虑测量不确定度和空间不确定性的推断方法	186
参考文献	190
第9章 既有结构性能和荷载的推断	191
9.1 永久作用和几何尺寸的推断	191
9.2 材料强度的推断	193
9.3 抗力的推断	196
参考文献	205
第10章 国际标准 ISO13822:2003 评述	207
10.1 范围和规范性文献	208
10.2 术语和定义	209
10.3 基本评定框架	211
10.4 用于评定的资料	215
10.5 被测变量的校正	216
10.6 结构静力和动力特性试验	218
10.7 结构分析和校核	220
10.8 基于良好历史性能的评定	221
10.9 时域可靠度的评定	222
10.10 目标可靠度水平	223
10.11 措施、判断、决策和报告	224
10.12 改善设计	226
参考文献	228

第 1 章 基本概念

工程结构可被划分为两类:设计中虚拟的结构——拟建结构(structures in design),建成后现实的结构——既有结构(existing structures)。前者指尚未建成的“图纸上的结构”;后者则指已建成的结构实体,也称为“服役结构”、“现有结构”、“已有结构”等。

相对于拟建结构,既有结构已转化为现实的空间实体,结构可靠性分析和评定的对象发生了根本性的转变,而且在实际的分析和评定工作中,人们对既有结构使用时间、使用条件、使用功能等方面的要求也往往不同,这些使得既有结构可靠性的具体含义与拟建结构存在一定的差别^[1~3]。本章将结合目前国内外结构可靠性理论的发展,对既有结构可靠性的概念作专门的讨论,并阐述和扩展结构可靠性的其他相关概念,包括结构耐久性、结构状态、结构性能、作用、作用效应等,在此基础上分析影响既有结构可靠性的基本因素。

1.1 结构可靠性

1.1.1 定义

20 世纪 70 年代前,国际上对结构可靠性问题的研究主要集中于拟建结构,目的是为工程结构的可靠性设计提供理论基础,先后应用的可靠性度量和控制方法包括经验法、半概率法(水准一方法)和近似概率法(水准二方法)^[4],目前的近似概率极限状态设计方法便是建立在拟建结构可靠性理论的基础上的^[5~10]。“拟建结构”是相对于后来的“既有结构”提出的,当时并无这样的称谓。

目前对结构可靠性概念的定义和理解主要是针对拟建结构而言的。作为术语,国际标准《结构可靠性总原则》(*General Principles on Reliability for Structures*)ISO2394:1998 和欧洲规范《结构设计基础》(*Basic of Structure Design*)EN1990:2002,将结构或结构构件满足规定要求的能力,包括满足使用寿命要求的能力,定义为结构的可靠性^[11,12]。我国标准在将结构可靠性理论引入工程结构的设计之后,则一直将结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的能力,定义为结构的可靠性^[5~10,13,14]。

国内外对结构可靠性的定义和理解基本一致,只是对于结构应满足的时间和功能要求,国外是综合表述的,我国则是分别表述的。

1.1.2 既有结构可靠性

对于既有结构而言,目前对结构可靠性的定义同样适用,但具体含义不同。下面通过阐述可靠性概念中的三个关键要素,即时间、条件和功能,说明既有结构可靠性的具体含义。

1. 时间

工程结构的可靠性总是相对一定的时间区域而言的。如果判定结构的可靠性满足或不满足要求,一定指结构在设定的时间区域内的可靠性满足或不满足要求,而在结构可靠性的分析中,对所有随机因素的分析也应以该时间区域为共同的参数。设定的时间区域不同,结构的可靠性不同。一般而言,设定的时间区域越长,结构的可靠性越低。时间区域是直接影响结构可靠性的重要参数。

结构可靠性分析中的时间区域实际上就是可靠性定义中的“规定的使用年限”或“规定的时间”,它代表了对结构使用时间的要求。如果结构在设定的时间区域内的可靠性不满足要求,也就意味着结构的可靠性不满足使用时间方面的要求。由于结构可靠性分析的目的是预测结构在未来时间里满足预定功能的能力,因此,无论是对于拟建结构还是既有结构,设定的时间区域或要求的使用时间均应指未来的时间。

在拟建结构的可靠性设计中,国内外标准均规定了统一的时间区域或时间要求,即设计使用年限(design working life),它指设计规定的结构或结构构件不需进行大修即可按预定目的使用的年数^[5,11,12],其中,国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153—2008 对各类工程结构规定的设计使用年限见表 1.1^[5],国际标准 ISO2394:1998 建议的设计使用年限见表 1.2^[11],两者的要求基本一致。

表 1.1 国家标准 GB50153—2008 规定的设计使用年限

结构用途	类别	设计使用年限/年	示 例
房屋建筑结构	1	5	临时性结构
	2	25	易于替换的结构构件
	3	50	普通房屋和构筑物
	4	100	纪念性建筑和特别重要的建筑结构
铁路桥涵结构	\	100	\
公路桥涵结构	1	30	小桥、涵洞
	2	50	中桥、重要小桥
	3	100	特大桥、大桥、重要中桥
港口工程结构	1	5~10	临时性港口建筑物
	2	100	永久性港口建筑物

表 1.2 国际标准 ISO2394:1998 建议的设计使用年限

类别	设计使用年限/年	示 例
1	1~5	临时性结构
2	25	易于替换的结构构件,如吊车梁、支撑
3	50	下列之外的建筑和其他公共结构
4	100 或更长	纪念性建筑和其他特殊或重要结构,大型桥梁

国内外标准过去一直使用的“设计基准期”(reference period)术语目前仍在使用,但其含义不同于设计使用年限。设计基准期是为确定可变作用及与时间有关的材料性能等的取值而选用的时间参数^[5,11,12]。它是人们约定的一个时间基准,用于确定与时间相关的作用和材料性能的代表值,特别是标准值,以便它们在时间上具有同样的意义,能够在同一时间基准下相互比较,因此,对某类工程结构规定的设计基准期只能是一个值,这不同于对设计使用年限的规定。例如,国家标准 GB50153—2008 对房屋建筑结构、港口工程结构规定的设计基准期为 50 年,对铁路桥涵结构、公路桥涵结构规定的设计基准期为 100 年^[5]。

设计基准期与结构的可靠性并无直接的关系,虽然作用和材料性能的代表值理论上应根据随机因素在设计基准期内的概率特性确定,但在结构可靠性的分析中,对随机因素的分析仍应以设计使用年限而不是设计基准期作为时间区域,因为只有这样才能确定结构在设定时间区域内的可靠性。

对于既有结构的可靠性分析和评定,国内外标准对其所考虑的时间区域有不同的称谓和定义。国际标准《结构设计基础——既有结构的评定》(*Bases for Design of Structures—Assessment of Existing Structures*) ISO13822:2003 称其为剩余使用年限(remaining working life),指预期或期望既有结构在拟定的维护条件下工作的周期^[15]。国家标准 GB50153—2008 则称其为评估使用年限(assessed working life),指可靠性评定所预估的既有结构在规定条件下的使用年限^[5]。它们都是与设计使用年限并行的概念。

既有结构可靠性评定所考虑的时间区域,正如国际标准 ISO2394:1998 和欧洲规范 EN1990:2002 针对可靠性设计所指出的,代表了对结构使用时间的要求。虽然该时间区域的确定可与结构使用寿命(working life)的预测结合,但其本身的含义并不是结构的使用寿命,而是对结构使用寿命的要求。为区别这种含义,这里将既有结构可靠性分析和评定所考虑的时间区域称为目标使用期(target working life),指预先规定的结构或结构构件不需进行大修即可按预定目的继续使用的年数^[16]。既有结构在使用时间方面是否满足要求,应通过对比结构的使用寿命和目标使用期判定。

目前对既有结构的目标使用期并无统一规定,取值方法上也存在不同观点。

若记结构原先建成的时刻为 t_0 , 当前时刻为 t'_0 , 原先的设计使用年限为 T , 则对既有结构目标使用期 T' 的取值存在式(1.1)和式(1.2)所示的两种观点:

$$T' = T \quad (1.1)$$

$$T' = T - (t'_0 - t_0) \quad (1.2)$$

第一种观点主要是针对新建成的既有结构提出的。当因质量缺陷或事故而需对新建成结构的可靠性进行评定时, 常以原先的设计使用年限 T 作为既有结构的目标使用期 T' 。这种观点以实现原先的设计目标为目的, 类似于设计中的校核。第二种观点则主要是针对使用时间未超出设计使用年限 T 的既有结构而提出的, 以原先设计使用年限 T 中尚未完成的年数作为目标使用期 T' 。这种观点仍以实现原先的设计目标为目的, 但考虑了结构已使用的时间, 可包容第一种观点。

这两种观点均以原先的设计使用年限 T 为参照, 适合于使用时间未超出设计使用年限 T 的情形, 即 $t'_0 - t_0 < T$ 的情形。当既有结构的使用时间已超出原先设定的设计使用年限时, 按这两种观点均无法确定既有结构的目标使用期。

既有结构可靠性评定的目的是判定结构在未来的目标使用期 T' 内能否像预期的那样安全和适用, 能否完成预定的功能。虽然既有结构的可靠性与其使用历史有关, 但其评定的目的与过去的使用时间及原先的设计使用年限 T 并无特定的关系。从工程角度讲, 无论既有结构的使用时间是否超出设计使用年限 T , 其目标使用期 T' 都应根据既有结构未来具体的使用要求重新确定, 需综合考虑结构具体的使用目的、使用历史、当前技术状况、未来维修和使用计划(如工艺改造周期和计划)等^[17]。因此, 既有结构目标使用期 T' 的确定并非一定要以原先的设计使用年限 T 为参照, 也不宜对其作统一的规定, 其取值方法应具有一定的灵活性, 以适应不同的使用要求, 这不同于设计中对设计使用年限的规定^[5, 11, 12]。

按照工程习惯, 对于新建成的既有结构, 一般侧重考虑原先的设计目标, 可按式(1.1)确定目标使用期 T' , 以保证结构的使用年限不低于原设计的要求。对于已使用一定时间的既有结构, 则宜考虑未来具体的使用要求, 重新确定目标使用期 T' , 它的数值一般较设计使用年限 T 短^[16]。

既有结构的可靠性分析和评定一般均应按预定的目标使用期 T' 考虑, 但国际标准 ISO13822:2003 对不同的评定内容采用了不同的时间区域: 对于结构适用性和疲劳, 建议按预定的剩余使用年限分析和评定; 对于承载能力极限状态, 国际标准 ISO13822:2003 并未给出具体的时间区域, 但认为取较短的时间区域更合理一些^[15]。这些规定并不是很明确, 而且会导致适用性、安全性所对应的时间区域不一致。

2. 条件

工程结构的可靠性与未来场景(scenario)有关。所谓未来场景是国际标准

ISO13822:2003 在既有结构可靠性评定程序中提出的一个概念,指与结构有关的各种可能的危急情况^[15]。用途的变更、环境的变化等都可能使结构未来的状态和结构上的作用发生显著变化,导致危急情况的发生。所设定的未来场景不同,结构所具有的可靠性也将不同。例如,是否考虑居住房屋变更为图书馆的藏书用房,是否考虑房屋遭受爆炸的威胁,对结构的可靠性都会产生显著的影响。

对未来场景考虑得越周全,结构在各种危急情况下完成其预定功能的能力越强。但是,无限制地考虑结构可能遭遇的未来场景是不现实和不经济的。例如,在房屋的设计中人们并不考虑陨石的冲击。因此,在结构可靠性的分析中,有必要对所要考虑的未来场景作出一定的限定。这些限定实际上也是结构可靠性分析的前提和条件,可靠性定义中的“规定的条件”即属于这样的前提和条件,或设定的未来场景。

对于拟建结构,我国标准设定结构能够得到正常的设计、施工、使用和维护^[5~10],诸如设计失误、施工缺陷、使用不当、维护不周等现象均不在考虑之列,即在未来场景中不考虑这些不规范的行为。国际标准 ISO2394:1998 在其适用范围中间接地指出,该标准仅考虑已知或可预见的各类作用,并不无限制地考虑所有的作用^[11]。欧洲规范 EN1990:2002 则明确采用了下列假定^[12]:

- (1) 结构体系的选择和结构的设计由有相应资格和经验的人员承担;
- (2) 施工由有相应技能和经验的人员承担;
- (3) 建设过程有相应的监督和质量控制;
- (4) 建筑材料和制品的使用符合欧洲规范 EN1990 和 EN1991~EN1999 的规定,或相关施工标准的规定,或参考性的材料和制品规程的规定;
- (5) 结构能够得到适当的维护;
- (6) 结构能够按设计规定使用。

这些限定不仅是结构可靠性分析、设计的前提和条件,也是对设计、施工、使用、维护等活动的要求,一般需要通过管理和技术手段保障。

对于既有结构,其原始的设计工作、施工工程已完成,并经历了一定时间的使用,曾经出现的设计失误、施工缺陷、使用不当、维护不周等已成为既定的事实,分析和评定既有结构的可靠性时不能想当然地认为结构得到了正常的设计、施工、使用或维护,而应以现实的态度考虑设计失误、施工缺陷、使用不当、维护不周等可能产生的不利影响^[16]。但是,既有结构的可靠性分析和评定也有其前提和条件,也需要设定其未来的场景。对于既有结构,一般要求其在未来的目标使用期内能够得到正常的使用和维护。除此之外,在一些场合下,还可能对既有结构的使用和维护提出特殊的要求,其目的主要是提高结构的可靠性,或延长结构加固、更新的周期,亦属于既有结构可靠性分析、评定的前提和条件^[16]。

例如,对于重级工作制(A6 和 A7 工作级别)吊车梁,国家标准《钢结构设计规

范》GB50017—2003 要求吊车梁上翼缘与制动桁架传递水平力的连接,宜采用高强度螺栓的摩擦型连接^[18]。假设既有的吊车梁已采用了焊缝连接,且目前未出现疲劳破坏现象。对于这一工程问题,彻底的解决方案当然是更换吊车梁的连接,但这将影响结构的使用,更换过程中还可能损害吊车梁、制动桁架的性能,因此并不是现实中理想的方案。可考虑的另一种方案是观察使用,即不更换吊车梁的连接,但要求在后期的使用中对吊车梁的连接进行有效的监控,保证及时发现吊车梁连接的异常状况,待发现异常时再按预定方案修复,从而延长加固或更换的周期。因此,从减小工程措施的角度考虑,评定中可接受吊车梁目前的连接方式和状况,但要求后期必须对吊车梁的连接采取有效的监控措施,并以其作为可靠性评定的前提和条件,这是对后期使用和维护的一种特殊要求。

再例如,计划 n 年后对桥梁结构进行加固,目前需对桥梁结构这 n 年里的可靠性进行评定,以避免采取加固措施之前发生意外。为此,评定中可要求限定车辆荷载,规定更严格的检查和维护规则,监控桥梁结构关键部位的状态,并以此为前提或条件分析和评定桥梁结构的可靠性,使桥梁结构在这 n 年里的可靠性尽可能满足要求,能够安全使用到采取加固措施之时。这些管理和技术上的特殊要求亦属于既有结构可靠性分析、评定的前提和条件。

既有结构可靠性分析、评定的前提和条件对评定结论有直接的影响,在既有结构可靠性评定的结论中,明确所依附的前提和条件对于完整阐述可靠性评定的结论,准确理解既有结构所具有的可靠度水平,都是必要和极其重要的。

3. 功能

结构可靠性的核心是结构完成预定功能的能力,国内外标准对结构预定功能的规定基本一致。针对拟建结构的可靠性设计,国家标准 GB50153—2009 等要求结构在规定的设计使用年限内满足下列功能要求,它们习惯上被分为安全性(safety)、适用性(serviceability)、耐久性(durability)三个方面^[5~10]:

- (1) 在正常施工和正常使用时,能承受可能出现的各种作用(安全性);
- (2) 在正常使用时具有良好的工作性能(适用性);
- (3) 在正常维护下具有足够的耐久性能(耐久性);
- (4) 在设计规定的偶然事件发生时及发生后,仍能保持必需的整体稳定性(安全性)。

国际上将结构应满足的要求一般也划分为三类。国际标准 ISO2394:1998 规定,结构和结构构件应以适当的可靠度满足下列要求^[11]:

- (1) 能够在所有预期的作用下良好地工作,即正常使用极限状态要求(serviceability limit state requirement);
- (2) 能够承受施工和预期用途的使用中出现的极端和/或高周循环作用,即承

载能力极限状态要求(ultimate limit state requirement);

(3) 不会因洪水、滑坡、火灾、爆炸、撞击等偶然事件或人为错误而发生与起因不相称的破坏,即结构整体性要求(structural integrity requirement)。

国际组织“结构安全度联合委员会”(JCSS)在2001年颁布的规范《JCSS 概率模式规范》(JCSS Probabilistic Model Code)中也将结构应满足的要求划分为这样的三类,但称第三类要求为坚固性要求(robustness requirement)^[19]。

上述对结构预定功能的要求都是原则性的,结构能否完成预定的功能具体是以极限状态(limit state)为标准来判定的。所谓极限状态是指其被超越时结构不再满足功能要求的状态^[5~12]。如果整个结构或结构的一部分超过某一特定状态便不再满足设计规定的某一功能要求,则称此特定状态为该功能的极限状态^[5]。极限状态相当于结构或结构构件的失效准则,是判定结构失效与否的物理标准,它们应具有明确的标志和限值。

对于既有结构,其原则上应完成的预定功能与拟建结构一致。国际标准 ISO13822:2003 规定,既有结构可靠性评定的目的应根据下列性能水准确定,它们间接地表述了既有结构原则上应满足的要求^[15]:

- (1) 安全性能水准,其为结构的使用者提供适当的安全性;
- (2) 继续工作性能水准,其为诸如医院、通信建筑物或主干桥梁等特殊结构在遭受地震、撞击或其他可预见的灾害时,提供继续工作的能力;
- (3) 委托人提出的与财产保护(经济损失)或适用性相关的特殊性能要求,该性能水准通常根据寿命周期费用和特殊的功能要求确定。

由于规范的修订和变化,既有结构原先设计时所考虑的极限状态或失效准则,可能与现行规范的规定存在差异,具体表现为两个方面:极限状态或失效准则的设置发生了变化,即现行规范可能增设新的控制指标,对结构提出新的要求;极限状态或失效准则的具体控制标准发生了变化,现行规范可能规定更严格的限值。

极限状态或失效准则直接影响着既有结构可靠性分析和评定的结果,也决定着既有结构可靠性具体的含义。对于既有结构的可靠性评定,国内外的标准,包括国际标准 ISO2394:1998、ISO13822:2003 以及国家标准《工业厂房可靠性鉴定标准》GB50144—2008、《民用建筑可靠性鉴定标准》GB50292—1999、《建筑抗震鉴定标准》GB50023—2009 等,在失效准则方面有着一致的规定,即以现行规范规定的极限状态作为判定结构失效与否的标准^[11,15,17,20,21]。有关这种规定的依据,将在 6.1.3 节结合既有结构可靠性评定的依据和标准综合阐述。

综上所述,对于既有结构的可靠性,可采用目前对拟建结构可靠性的定义,但它所考虑的时间区域,即目标使用期,应根据既有结构未来具体的使用要求重新确定,取值上具有更大的灵活性,一般较设计使用年限短;可靠性分析的前提和条件仅涉及未来的使用和维护方面,并可能包含一些特殊的要求,以提高结构的可靠性

或延长结构加固、更新的周期;其预定功能与拟建结构一致,但相应的极限状态应按现行规范的规定确定,它们可能与原先设计时所考虑的极限状态存在差异,可能出现新的要求或更严格的要求。

1.1.3 结构时域可靠性

时间、条件和功能是判定结构可靠与否的三大要素,无论是对拟建结构还是既有结构,它们均应满足相应的要求,即所谓“规定的时间”、“规定的条件”和“预定功能”。在判定结构可靠与否的过程中,一般需限定其中的两个要素,在此条件下通过第三个要素来判定结构是否可靠。

按照常规的方法,一般限定的是时间和条件,而判定结构可靠与否的依据是结构功能与预定功能之间的关系。目前的结构可靠性术语正是根据这种判定方法定义的,其中,“规定的时间”、“规定的条件”分别是对结构使用时间以及结构设计、施工、使用、维护等条件的限定,而“完成预定功能”则是对结构功能与预定功能之间关系的一种特定要求。

对于同一命题,实际上还可从另一角度来判定,即限定条件和功能,根据结构使用时间与规定时间之间的关系,判定结构是否可靠。这种判定方法与前述方法完全等效,其判定结果也应一致^[22,23]。

根据这种判定方法,可定义结构的另一种能力,即结构在规定的条件下,在完成预定功能的前提下,满足时间要求的能力,文献[24]称其为结构时域可靠性(structural time-domain reliability)。如果定义结构在完成预定功能前提下的最长使用时间为结构相对预定功能的使用寿命,可更简捷地定义其为结构在规定的条件下,其相对预定功能的使用寿命满足时间要求的能力。结构时域可靠性的概念既适用于拟建结构,也适用于既有结构。

结构可靠性和结构时域可靠性实质上是从不同角度对同一内容的描述,即结构在规定条件下满足时间、功能两方面要求的能力。前者从功能的角度描述,后者则从时间的角度描述,它们是一对关系紧密的耦合概念,3.1.2节将进一步揭示两者之间的定量关系。

需要说明,结构时域可靠性并非结构的时变可靠性(structural time-depended reliability)。时变可靠性是根据结构可靠性随时间变化的性质而提出的,而时域可靠性则是从描述结构可靠性的时间参数角度提出的,无论结构的可靠性是否随时间变化,均可利用时域可靠性描述结构的可靠性。

1.1.4 结构安全性和适用性

结构可靠性的核心是结构完成预定功能的能力,而结构能否完成预定的功能是以极限状态为标准来判定的。在国内外的标准中,极限状态均被明确地划分为

两类:承载能力极限状态(ultimate limit state)和正常使用极限状态(serviceability limit state)。

国际标准 ISO2394:1998 规定,与倒塌或结构其他类似失效形式相关的状态为承载能力极限状态,包括^[11]:

- (1) 结构或结构的一部分作为刚体失去平衡(如倾覆等);
- (2) 因开裂、破碎(在某些情况下受到疲劳、腐蚀等的影响)或过度变形而导致截面、构件或连接达到最大承载能力;
- (3) 结构或结构的一部分转变为机动体系;
- (4) 结构或结构的一部分丧失稳定;
- (5) 设定的结构体系突然转变为新的体系(如折断)。

被超越后结构或结构构件便不再满足特定使用要求(specified service requirements)的状态为正常使用极限状态,包括^[11]:

- (1) 缩短结构使用年限,或影响结构或非结构构件功效(efficiency),或外观的局部损坏(包括开裂);
- (2) 影响结构或非结构构件的有效使用或外观,或者影响设备功能的不可接受的变形;
- (3) 引起人员不适或者影响非结构构件或设备功能的过大振动。

国家标准 GB50068—2001 在解释两类极限状态时指出:承载能力极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形;正常使用极限状态对应于结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值^[10]。国家标准 GB50068—2001 对两类状态的具体说明与国际标准 ISO2394:1998 基本相同。

极限状态与结构功能之间具有明确的对应关系,对极限状态的划分实质上也是对结构功能的划分。由两类极限状态的含义和具体说明可见,承载能力极限状态和正常使用极限状态分别对应于结构的安全功能和适用功能,它们之间有着明确的界定原则。与结构功能的类别相对应,描述结构完成预定功能能力的结构可靠性,也应据此被划分为两类,即所谓的安全性和适用性,它们分别指结构完成预定安全功能、适用功能的能力,分别对应于承载能力极限状态和正常使用极限状态。它们是对结构可靠性最基本的分类^[22~24]。

与结构可靠性相同,对于结构的安全性和适用性,同样可从功能、时间两个角度进行考察和定义,其实质内容完全相同。

1.2 结构耐久性

1.2.1 概述

结构耐久性理论主要研究结构材料在机械、物理、化学、生物等方面的损伤,包括钢材、混凝土、砌体块材和砂浆、木材等结构材料的腐蚀,混凝土的碱-集料反应和冻融循环损伤,砌体材料的风化,结构表层的磨损,钢材表面的空蚀等,其目的是通过对这些损伤现象的分析和控制,保证结构在足够长的时间内保持良好的性能。

结构耐久性的概念虽然使用已久,但尚无公认的定义,这给结构耐久性问题的界定带来一定的困难。下面简要介绍目前国内外对结构耐久性概念的认识。

在国际标准 ISO2394:1998 和欧洲规范 EN1990:2002 中,结构耐久性并未被作为术语使用,但指出耐久性是满足结构可靠性要求的基本条件,在适当的维护下,结构和结构构件的耐久性应保证它们在设计使用年限内始终适用,不影响预定的结构功能^[11,12]。

欧洲混凝土委员会(CEB)和国际预应力混凝土协会(FIP)在联合颁布的《CEB-FIP 模式规范 1990》(CEB-FIP Model Code 1990)中指出,混凝土结构的设计、施工和使用应符合下列要求:在预期的环境影响下,在明确或隐含的时间周期内,不需要以意外的高额成本进行维修或修复,混凝土结构即可保持它们的安全性、适用性和可接受的外观^[25]。

国家标准《建筑结构设计通用符号计量单位和基本术语》GBJ83—85 规定:“结构的耐久性指结构在正常设计、正常施工、正常使用和正常维护的条件下,在规定的时间内,由于结构构件性能随时间的劣化,但仍能满足预定功能的能力”^[26]。

国家标准 GB50068—2001 对所谓“足够的耐久性能”作出如下解释:“结构在规定的工作环境中,在预定时期内,其材料性能的恶化不致导致结构出现不可接受的失效概率”,“在正常维护条件下,结构能够正常使用到规定的设计使用年限”^[10]。

我国《混凝土结构耐久性设计与施工指南》对结构耐久性给出如下定义:“结构及其部件在可能引起材料性能劣化的各种作用下能够长期维持其应有性能的能力”,“预定作用和预期的维修与使用条件下,结构及其部件能在预定的期限内维持其所需的最低性能要求的能力”^[27]。

龚洛书等针对混凝土材料的耐久性指出,混凝土的耐久性是指在使用过程中,在内部的或外部的、人为的或自然的因素作用下,混凝土保持自身工作能力的一种性能^[28]。

邸小坛等在总结混凝土结构耐久性问题的特点时指出,有关结构耐久性的多