

桥梁结构可靠性分析与设计

常大民 江克斌 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1995 年 • 北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

国家有关技术政策规定:结构设计应逐步采用可靠度(可靠性)理论。为此,本书介绍了桥梁结构可靠性分析和可靠性设计的原理及方法。可靠性分析内容有:结构可靠性分析的历史、结构可靠性原理及结构体系的可靠性等;可靠性设计内容有:目标可靠指标、设计表达式和分项系数的确定,以及结构疲劳可靠性设计等。书中除着重介绍基本概念和原理外,还列举了较多的实例,以求做到理论联系实际。

桥梁结构可靠性分析与设计

常大民 江克斌 编著

*

中国铁道出版社出版发行

(北京市东单三条 14 号)

责任编辑 安鸿逵 封面设计 翟 达

各地新华书店经售

北京市顺义县燕华印刷厂印刷

开本:850×1168 毫米 1/32 印张:10.375 字数:272 千

1995 年 2 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:1—2,000 册

ISBN7-113-01801-7/TU·389 定价:12.20 元

前 言

随着科学技术的发展,可靠性问题在各种工程学科中占有日益重要的地位。桥梁结构,因其在交通运输和人身安全方面的特殊作用,其可靠性问题尤为重要。我国目前的有关技术政策规定:结构设计应逐步采用可靠度(可靠性)理论。

近 20 年来,国内外对于结构可靠性理论的研究和应用进展很快,这必将对结构设计理论和方法的现代化以有力的推动。有鉴于此,作者把自己研修和应用这一理论的体会,以及收集到的有关资料编写成书,期望对读者掌握和运用这一先进理论,尤其对于已经或即将颁布的新一代设计标准和规范的理解与实施,能有所帮助。

本书包括七章及附录,大体可区分为桥梁结构可靠性分析与可靠性设计两大部分。

第一章简要介绍桥梁结构设计方法的演进和结构可靠性分析的历史。第二章阐述功能函数、可靠指标等基本概念,及一次二阶矩理论的中心点法和验算点法。第三、四章分别对荷载及构件抗力作了详细讨论,包括它们的概率模型、调查统计方法及统计参数。第五章讨论结构体系可靠性。以上构成了结构可靠性分析的主要内容。第六章讨论了桥梁结构可靠性设计的有关问题,包括目标可靠指标、设计表达式及分项系数的确定。第七章概括了目前关于桥梁结构疲劳可靠性分析与设计的研究成果,这在当前已出版的一些有关著作中尚不多见,相信会引起读者的关注和兴趣。

本书虽着重基本概念和原理的阐述,但同时列举较多的工程实例,力求做到理论联系实际。书末将工程概率和数理统计的基础

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 概 述.....	1
第二节 桥梁结构设计方法的演进与评述.....	7
第三节 结构可靠性的发展概况	15
第二章 桥梁结构可靠性原理	22
第一节 极限状态和极限状态方程	22
第二节 失效概率和可靠指标	27
第三节 一次二阶矩理论之一——中心点法	34
第四节 一次二阶矩理论之二——验算点法	43
第五节 结构可靠性设计初步	68
第六节 Monte-Carlo 方法	73
第三章 桥梁结构的荷载和荷载效应	82
第一节 作用和作用效应	83
第二节 荷载的概率模型	87
第三节 荷载的调查统计.....	102
第四节 荷载的各种代表值.....	122
第五节 荷载效应组合.....	128
第四章 桥梁结构抗力的统计分析	137
第一节 抗力统计分析的基本概念.....	137
第二节 结构构件抗力的不定性因素.....	139
第三节 结构构件抗力的分布类型和统计参数.....	157
第五章 结构体系的可靠性	164
第一节 基本概念.....	164

第二节 串联系统的可靠度..... 170

第三节 并联系统的可靠度..... 180

第四节 计算结构系统可靠度的割集法..... 186

第六章 桥梁结构可靠性设计..... 189

第一节 确定目标可靠指标的方法..... 189

第二节 截面设计和截面复核..... 192

第三节 确定分项系数的原则和方法..... 207

第四节 正常使用极限状态下的可靠度..... 212

第五节 应用中的几个问题..... 222

第七章 桥梁结构疲劳可靠性..... 225

第一节 疲劳问题的重要性及其历史..... 225

第二节 疲劳的基本概念..... 231

第三节 疲劳可靠性分析..... 245

第四节 疲劳可靠性设计..... 262

附录 工程概率与数理统计概要..... 273

第一节 随机现象与概率..... 273

第二节 随机变量及其分布函数..... 279

第三节 随机变量的统计参数..... 281

第四节 结构可靠度常用的概率分布..... 285

第五节 数理统计..... 296

附表一 正态分布表..... 311

附表二 Γ 函数表..... 313

附表三 t 分布的双侧分位数(t_α)表..... 314

附表四 χ^2 分布表..... 315

附表五 参数已知的 $K-S$ 检验临界值 $D_{n,\alpha}$ 表..... 316

附表六 参数未知的 $K-S$ 检验临界值 $D_{n,\alpha}$ 表..... 317

附表七 随机数表..... 318

参考文献..... 322

第一章 绪 论

第一节 概 述

一、桥梁结构的功能要求

由各种材料建造的公路及铁路桥梁、涵洞、隧道等承重结构,军队战时架设的各种固定桥和浮桥,是一种人工结构物,它们在野外的自然环境下,在相当长(或一定的)使用期内,需要安全地承受车辆、人群、装备等使用荷载,经受风、雪、雨、日照等自然作用,以及波浪、水流、土压力、地震乃至炮炸弹作用。它们的安全与否,不但影响到交通运输任务及工农业生产,而且还关系到人身安全,特别是对一些重要的交通枢纽,如长江、黄河上的特大桥梁,作为国民经济的大动脉和一定历史时期的文化表征,将留传久远,对安全、适用、美观、耐久方面,还有更高的要求。

桥梁设计者的任务,就是应用最新的科学技术手段,使所设计的结构在设计基准期内,经济合理地满足下列功能要求:

1. 能承受正常施工和正常使用时可能出现的各种作用(包括荷载及温度作用等);
2. 在正常使用时具有良好的工作性能,如抵抗产生过大变形和裂缝的能力;
3. 具有足够的耐久性,即在使用期内不发生严重的风化、腐蚀和老化;
4. 在偶然事件发生时及发生后,能保持必要的稳定性。

这四项基本功能要求中,第1、4两项是安全要求;第2项是结构的适用性;第3项是结构的耐久性。安全性、适用性、耐久性三者

可总称为结构的可靠性(广义可靠性),但耐久性因涉及材料的老化、锈蚀等物理化学因素,目前倾向于作为专门问题加以研究,故本书重点讨论与安全、适用有关的可靠性(狭义可靠性)。

二、可靠性定义

随着科学技术的发展,可靠性问题在各种工程学科中占有日益重要的地位。就像要求桥梁结构具有较好的使用性能(足够的承载能力、良好的通行性等)、便于施工架设、费用较低一样,总是伴随着要求结构失效的概率最小。在结构设计中,人们越来越注意到,一方面是相当精确的力学分析,借助电子计算机可以对各种复杂的结构体系进行线性、非线性、静力和动力分析,一方面是相当“粗糙”的荷载、材料强度及安全系数 K 或容许应力 $[\sigma]$ 的取值,两者的精度不相适应。一个基本的事实是,结构设计中的各种基本变量,如荷载大小、材料强度、截面尺寸等,由于多种因素的影响,都带有或大或小的变异性(或称不定性),它们都是随机变量。尽管人们充分运用工程经验,经过安全与经济的慎重权衡,选择尽可能大的安全系数,然而设计出来的结构仍然不可能绝对安全可靠。这就说明,安全性这一概念也是相对的。再联系到设计变量的随机性,而处理随机变量的数学方法是概率论,于是,把可靠性定量地定义为概率是十分必要而科学的。

目前国内外一般公认的可靠性定义是:结构的可靠性(reliability)是指结构物(系统或构件)在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的能力。

所谓规定的时间,是指结构设计时所取用的设计基准期 T ,例如 30 年、50 年、100 年等。

所谓规定的条件,是指结构正常的设计、正常的施工、正常的使用维修等条件。

所谓完成预定功能,是指结构应具备的各种功能的总体。

研究结构的可靠性首先要解决的问题,就是如何度量可靠性的大小。由于影响结构可靠性的各种因素,如荷载效应 S (指荷载引起的内力、变形等)与结构抗力 R (指结构抵抗荷载和变形的能力),因各种偶然因素的影响,都是随时间或空间而变动的随机函数,因此,对结构完成预定功能的能力,即结构的可靠性,只能用概率的形式来描述。

结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率称为结构的可靠度。就是说,可靠度是结构可靠性的度量。这种从统计数学观点给出的结构可靠性的数量描述是比较科学的,反映了当代对可靠性问题的最新见解,它与以往从定值法观点出发的安全系数有本质的区别。与可靠概率相对应的是失效概率,即结构不能完成预定功能的概率。由概率论知,可靠概率与失效概率是互补的,即二者的总和为 1。以结构的可靠概率为目标的设计方法,称为“概率设计法”。目前,国际上已公认采用概率设计法较过去的定值法是一个很大的进步,它标志着在解决可靠度问题上开始从以经验为基础的定性分析阶段进入以概率论和统计数学为基础的定量分析阶段,结构设计将开始由长期采用的定值法向概率法转变,这是结构设计思想和设计方法上的一个重要演进。

结构的可靠性与安全性(safety)是有区别的。结构可靠性的 大小,是对结构本身而言;而安全性问题,是对使用结构的人而言,就是说,它关系到人身安全和经济损失。结构的失效是某一功能的丧失,并不等同于结构倒塌和完全破坏;只有结构的倒塌和破坏才会造成人员的伤亡和财产的损失。可靠性比安全性的含义更为广泛。当然,安全性问题无疑地是可靠性中最重要的内容,亦须给予 特殊注意。相应地,把度量安全性的指标称为安全度。

由于作用在桥梁结构上的荷载或其它作用是随时间而变动的随机过程,材料性能有时也是以时间为变量的随机函数,因而结构可靠度应是时间的函数。例如,使用期分别为 30、50、100 年的桥梁

结构,若要保证到使用期末都具有相同的可靠概率,则所选择的截面尺寸或所用的材料强度必然是使用期长者大于使用期短者。这也是可靠性定义中要规定时间因素的一个原因。这个时间因素就是设计基准期。这里需要指出,规定设计基准期只是为了明确计算结构失效概率所必须的时间参数,它并不简单地等同于结构的实际寿命,超过设计基准期的结构并不见得立即破坏,而仅仅是它的失效概率有所增大,或可靠概率有所降低而已。对不同的结构或构件可以有不同的设计基准期,具体数值由设计规范规定。

采用概率设计法的主要优点是可以更全面地考虑影响结构可靠性诸因素的客观变异性,使所设计的结构更加符合客观实际。同时,由于有了具体度量结构可靠性的数量指标(即可靠度),就可以依据桥梁结构的不同特点恰当地划分和选择安全等级,并具体规定各级结构的可靠度水准,从而做到安全、适用、耐久及经济等方面的最佳平衡,使所设计的同类结构构件在不同的受荷情况下具有较佳的可靠度一致性。正如后文所指出的(见本章第二节),定值法往往难以做到同类构件的可靠度一致性,其原因就在于它或者未考虑到基本变量的变异性,或者虽顾及基本变量的变异性,但只是用经验的方法给以估计,缺乏定量的计算。

可靠性与桥梁结构的其它性能是相伴随的。就是说,它不仅具有使用性能,同时还应具备必要的可靠性。显然这两种属性并不完全等同,但是相互联系而又有区别的。因此,可靠性要求应当贯穿于桥梁结构的全寿命过程,包括规划、设计、施工及使用维护等环节。可靠性要求应当是设计时赋予、施工中体现、使用中检验的。一座桥梁结构,如果其它性能很好,但可靠性很差,当然是不可取的,必将造成浪费。可以说,可靠性问题就是桥梁结构的质量问题,可靠性管理已成为现代工程质量管理的核心。以可靠性理论为基础的全寿命管理,对于桥梁结构的质量保证、效费研究、科学管理提供了统一的准则。本书所讨论的主要是结构设计或分析中的可靠

性问题,对于施工、使用中的可靠性问题涉及较少,但其重要性和分析方法则是相通的。忽庸讳言,结构设计和分析是建造桥梁结构首要的一环。

三、基本变量的不确定性

在进行结构计算时,必然要引用若干参数,如外荷载、材料强度、构件尺寸等,这些称为基本变量。如前所述,这些基本变量由于各种随机因素的影响,都带有不确定性(*uncertainty*)。在结构分析中存在着下述几种类型的不确定性:

物理性的不确定性 指结构分析中各物理量的客观变异性,例如荷载大小、材料强度、几何尺寸等。这种变异性可以用随机变量或随机过程予以描述。对不随时间变化或随时间变化很小的量(例如恒载、几何尺寸),可用随机变量描述,对随时间变化的量(例如活荷载)用随机过程描述。

统计性的不确定性 统计是根据观测样本而做出的推断。数理统计方法是对某些物理量收集一定量的实测数据,选择适当的概率模型并对其分布类型进行检验,求得其统计参数。但是对统计参数做出可信估计时要有大量的样本。对于一组给定的样本数据,统计参数本身也是随机变量,它的不定性依赖于样本的容量和置信区间的大小,存在弃真和取伪两种错误的可能。这种不确定性称为统计性的不定性,它是由于缺乏信息资料而造成的。有时,一组样本可能对几种概率分布类型都不拒绝,但为了便于计算,常取用较为简捷的分布函数类型,这样也会造成不定性(分布类型的不定性)。

模型不定性 在结构分析中,总要对实际结构加以模型化,例如对荷载情况、截面型式、支承条件、材料的本构关系常加以简化,从而得到相应的计算简图及力学关系式,其计算结果往往与实际情况有一定出入。这样所得到的结构响应(内力、变形等)包含有不

确定性因素,这种不确定性称为模型不定性(或计算模式不定性)。这些常将其分别考虑在荷载效应或构件抗力变量的不确定性因素之内,它是由计算模型的简化假设、复杂的边界条件以及其它未能充分考虑到因素等等引起的。例如常将桁架结构简化为铰接体系,将钢材视为理想弹性体或弹塑性体,以及对构件初挠曲、焊接残余力、混凝土收缩徐变的简化考虑等等。计算模型的不定性可用精确计算或实验测定的方法予以确定。

上述不定性都会对结构的可靠性产生很大影响,是不可忽略的。可以说,桥梁结构之所以存在可靠性问题,根本原因就在于基本变量的不确定性。在以后的讨论中我们将具体看到它对结构可靠度计算的影响。不定性的数学表示通常可用变异系数(C. O. V) δ 来表征,它表示随机变量对于其平均值的变异,即

$$\delta = \frac{\sigma}{\mu} \tag{1-1}$$

式中 σ ——标准差;
 μ ——变量的平均值。

有的文献^[1,2]又将不确定性分为客观不确定性和主观不确定性两种。所谓客观不确定性是指与基本变量有关的不定性,例如材料强度、几何尺寸、焊接变形等等,这种不定性可以通过实测数据经统计计算检验而求得,其统计结果不受人的主观意识干预。主观不定性是与资料缺乏或知识不足有关的不定性,只能根据人的主观判断确定,例如对结构模型、环境荷载、强度分析所做的假设等等的定性,其中由于人们认识客观事物的阶段性所限,尚存在一些未被认识的领域,而不能确切描述其变异性规律,只能根据工程经验加以判断,随着认识的深化,可以使这种主观不定性因素逐步减少,但要完全消除也非易事,在很多情况下还不能完全排除经验性数据。

获得不定性数据的唯一方法便是根据实验和观测的样本进行

统计分析和计算。由于结构分析中涉及的基本变量甚多,加之构件类型、荷载及材料种类繁多,收集样本和统计分析的工作量是十分浩大的。过去受定值法的影响,人们往往只注意到各种变量的标准值,而关于它们变异性的资料相当缺乏,这便增加了工作的难度。但掌握这些数据,对于结构可靠度的研究和应用又是必不可少的一环。舍此我们便无法解决桥梁结构可靠性设计与分析这一课题,因此对各种数据的调查、收集是十分重要的。本书后面所举的实例就是近年来我国桥梁可靠度研究方面的初步成果,其中也包括本书作者的部分工作。随着国民经济的发展及研究工作的深入,这些调查统计数据还会有动态的变化及不断的更新和充实。

第二节 桥梁结构设计方法的演进与评述

桥梁结构设计的基本任务就是以最经济的途径来满足结构的功能要求,使桥梁结构在施工和使用期间能承受预期的各种作用,并且具有必要的可靠性。简言之,作用、抗力、可靠性便构成了结构设计的三要素,当然并不排除其它方面的因素(如施工等等)。具体地说,在结构设计中需要综合考虑下面两个方面的内容:

1. 正确认识作用效应与结构抗力的关系。就是对结构的输入和响应之间的规律予以明确揭示。为此,需要进行结构计算,根据力学原理并结合材料性能,计算结构的内力、应力、变形、开裂等,从而进行截面设计。这就是通常所说的结构分析。

2. 同时还必须考虑结构的可靠性问题。这是与结构分析或设计同时出现而又不等同的问题。所设计的结构,在满足力学原理的条件下,由于不定性的存在,其安全储备可能是不同的。若可靠性太小,会导致功能不足或丧失;若在设计上采取保守的措施,盲目增大构件的截面,但这样过分的可靠性,又导致经济上的不合理。时至今日,很多工程设计都提出了可靠性的要求,不仅是定性的描述,而且是定量的、合理的可靠性指标,可靠性理论的发展和应用

已达到工程实用的阶段,能够从结构设计时便赋予预期的可靠性。

因此,结构设计方法的演进就是结构设计在这两个方面的发展。大体说来,在结构分析方面,曾经历了弹性分析、塑性分析并将发展到全面的极限状态分析。在可靠性方面是从经验的安全系数法进入到概率的分析,今后还要发展到更合理的效益(*utility*)分析。

长期以来,结构设计者的兴趣比较多地倾注于与结构分析有关的问题,桥梁结构设计的发展过程及与之密切相关的建筑力学的发展过程可以构成一部色彩绚丽的历史画卷。计算机的应用使结构分析达到高度精确和自动化的程度。而相对说来,对可靠性分析却重视不够,更多地凭借人们的工程经验加以判断和处理,使得这两个密切相关的方面形成了强烈的反差。显然,如果可靠性问题处理不当,精确的结构分析被粗糙的安全系数所淹没,便难以达到总体的协调和优化。因此在发展结构分析方法的同时,还必须充分注意可靠性的研究,使两者相得益彰,从而使结构设计方法更加臻于完善。在下面的历史回顾中,将着重于可靠性方面的讨论。

一、容许应力法

容许应力法是一种传统的设计方法。自从 1826 年纳维叶(Navier)提出这种方法以来,为世界各国设计者广泛采用,至今已沿用 100 多年。目前,我国公路及铁路的设计规范,如《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》JTJ025—86、《铁路桥梁设计规范》TBJ2—85,以及新近出版的国家军用标准《军用桥梁设计准则》GJB1162—91 仍采用容许应力设计法。

容许应力设计法是将材料视为理想弹性体,用弹性力学方法,算出结构或构件在标准荷载作用下的应力,要求任一点的应力 σ , 不超过材料的容许应力 $[\sigma]$, 即

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1-2)$$

材料的容许应力,是由材料的屈服强度 σ_y (如钢材),或极限强度 σ_b (如混凝土),除以安全系数 K 而得。即

$$[\sigma] = \frac{\sigma_y}{K} \quad \text{或} \quad \frac{\sigma_b}{K} \quad (1-3)$$

在容许应力设计方法中,可以清楚地看到它所包含的两个方面:(1)结构分析采用的是线性弹性理论,以此确定结构的荷载效应(应力),(2)通过安全系数 K 的取值来考虑结构的安全性。

容许应力法的优点是它的设计表达式比较简洁,为设计者习惯采用。但是,从现代的观点来看,它有下列几个方面的不足。

1. 从结构分析方面看,按线弹性理论进行应力计算时,只限于材料的弹性阶段,这对于像钢材、混凝土这类具有一定塑性性质的材料来说,没有考虑其塑性阶段继续承受荷载的潜力,因而其设计结果未免偏于保守。后来在某些方面有了改进,在考虑塑性的基础上修改相应的容许应力。例如对钢梁(受弯构件),考虑到出现塑性铰时抵抗矩大于弹性抵抗矩,故规定弯曲容许应力 $[\sigma_w]$ 高于拉压容许应力 $[\sigma]$ 。这样在结构分析方面已部分地突破了弹性理论的界线。

2. 在可靠性方面,用一个大于 1 的安全系数 K 除材料强度,使构件强度有一定的安全储备,这种考虑自然是合理的,也易于为人们理解和接受。但安全系数的取值是经验的,在不同的历史时期有不同的值。例如英国在 1840 年规定房屋建筑的安全系数为 4,桥梁为 6(铸铁材料)。德国在 1907 年的规范中,混凝土的安全系数为 10,1916 年减小为 5,以后又降为 3。到 20 世纪 50 年代,前苏联和我国的钢筋混凝土结构的安全系数约为 2 左右。我国现行公路及铁路桥梁规范中,钢材的安全系数 $K=1.7\sim 1.85$,钢筋混凝土的安全系数 $K=2.0\sim 2.5$,砖石结构的 $K=2.5\sim 3.0$ 。大体而言,铁路规范的 K 值比公路规范的 K 值要大,即前者的容许应力值比后者低。这里的问题是,所规定的安全系数是靠经验估计的,

并不能真正定量地度量结构的可靠度。例如,砖石结构的 $K=2.5$,钢筋混凝土结构的 $K=2.0$,这并不意味着砖石结构的可靠度高于钢筋混凝土结构。恰恰相反,应用可靠度理论计算结果表明,前者可靠指标为3.45,后者可靠指标为3.84,前者的可靠度反而低于后者。究其原因,在于砖石结构材料强度的变异性较大,虽然规定了较大的安全系数,仍不足以抵消变异性大给结构可靠性带来的影响,致使其可靠度仍低。安全系数法常常使人们误认为,只要在设计中采用了某一给定的安全系数,结构就是百分之百地可靠,将安全系数与结构可靠度简单地等同起来。大量工程实践表明,用安全系数法设计的结构,仍有少量结构遭到破坏,因此安全系数不是结构可靠性的直接表征。如何度量可靠性,长期以来是人们十分关注的问题,是结构设计理论上要解决的一个迫切问题,这个问题不解决,结构设计的合理性难以全面实现,精确的结构分析便丧失了应有的意义和作用。

3. 安全系数中还包含与材料性能无关的因素,例如荷载的变异性,通过安全系数也纳入材料的容许应力内。在后来的安全系数中,有 $K=K_1K_2K_3$ 的形式,式中 K_1 是材料系数, K_2 是荷载系数, K_3 是工作条件系数。若将 K 取为定值,就无法对不同的荷载区别对待。例如,恒载的不定性比活载的不定性要小,设计中对前者的取值估计比后者要准确得多,对不同的恒载与活载比例的结构,其安全水平会相差很多。因此,在容许应力法中,不能区分荷载情况,仅根据所使用的材料取用统一的容许应力值,实际上是不合理的。

此外还应指出,设计中所取的标准荷载的含义也不甚明确,一般都出于当时的理解水平,给出不同的规定。例如恒载,多以材料的平均密度乘以图纸尺寸计算荷载值,而对活载的标准值,有时取实际可能的最大值,有的按统计的估计值取用,在没有明确的概率分布函数及统一的分位值取用标准时,标准荷载的取值水平就不一致,这使得安全系数所隐含的可靠潜力,又增加了一种不明确的

不确定性因素。

二、破坏阶段法

这一方法是在本世纪 30 年代后期,由前苏联学者罗列依特(А. Лолейт)、格沃兹捷夫(А. А. Гвоздев)等人提出,并编入前苏联的设计规范中。该方法的设计原则是:结构构件到达破坏阶段时的设计承载能力 R 不低于标准荷载引起的构件内力 S 乘以由经验判断的安全系数 K ,即

$$KS \leq R \quad (1-4)$$

设计承载能力 R 是根据破坏阶段的实际工作条件来确定的,这时已考虑了材料的塑性性质及其极限强度;它不是以点应力为考察对象,而是以构件上某个截面的内力为依据的。构件内力的计算,一般仍采用弹性力学方法,少量结构则考虑了材料的塑性影响。

由于在承载能力的计算中,采用了由实验得到的结果(例如钢筋混凝土梁的破坏弯矩,可由实验测得,而不是按弹性假设推算),并对一定批量数据进行统计,故破坏阶段法比容许应力法是一种改进。但在结构可靠性方面,还是用单一的安全系数来保证,这与容许应力法相同,也存在上述几个方面的缺点。由于安全系数是伴随着荷载效应,因此本方法又称为荷载系数法。

三、极限状态法

这是 20 世纪 50 年代前苏联学者首先提出,后来在欧洲许多国家中得到发展和采用的。我国 60 年代初开始也采用了这种极限状态法。

这一方法在确定设计状态上,不论是在认识上或在实践上都有较大的突破。第一次明确地提出了结构“极限状态”的概念,并规定了两种极限状态:(1)承载能力极限状态;(2)正常使用极限状态(包括变形极限状态、裂缝开展极限状态)。极限状态设计法就是要

求通过设计,保证结构不致进入上述的极限状态。

在结构可靠性方面,极限状态设计法中采用了半概率方法,并将单一的安全系数分别用三个系数考虑由于荷载、材料、工作条件等方面产生的不定性影响。对荷载和材料强度的取值,开始引入统计数学的方法。但在总体上,对于结构可靠度的定义和计算方法都还没有给出明确的回答。

所谓半概率方法,是指这种设计方法并不要求结构以规定的小概率进入极限状态,而只要求其极限状态设计表达式中的各项设计值,都在概率的意义上取值。例如,在设计表达式中,对荷载效应项,以一个较小的超载概率取其设计值;对抗力项,以一个较小的低强概率取其设计值。换言之,它对各设计变量的认识已应用了概率论方法,但在设计方法的总体上,还不能回答结构可靠性的问题。

我国新近修改的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023—85)就是采用的这种多系数极限状态设计法。该规范规定,承载能力极限状态计算以塑性理论为基础,正常使用极限状态计算以弹性理论或弹塑性理论为基础。承载能力极限状态的设计原则是:荷载效应不利组合的设计值小于或等于结构抗力的设计值,即

$$S_d(\gamma_g G, \gamma_q Q) \leq \gamma_b R_d\left(\frac{R_c}{\gamma_c}, \frac{R_s}{\gamma_s}\right) \quad (1-5)$$

式中 G 、 Q ——分别为永久荷载及可变荷载(含混凝土收缩、徐变及基础变位影响力);

R_c 、 R_s ——分别为混凝土和钢筋的设计强度;

γ_g 、 γ_q ——分别为永久荷载和可变荷载的安全系数;

γ_c 、 γ_s ——分别为混凝土强度设计值和钢筋强度设计值基础上的安全系数,均取 1.25;

γ_b ——工作条件系数,受拉及受弯构件取为 1,受剪、