

公路工程结构

可靠度理论及其应用

张建仁 张起森 编著



人民交通出版社

公路工程结构可靠度 理论及其应用

Gonglu Gongcheng Jiegou Kekaodu

Lilun Ti Qi Yingyong



张建仁 张起森 编著

人民交通出版社

公路工程结构可靠度理论及其应用

张建仁 张起森 编著

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

北京顺义牛栏山印刷厂印刷

开本:787×1092 1/32 印张:9.375 字数:213千

1995年9月 第1版

1995年9月 第1版 第1次印刷

印数:0001—3000册 定价:13.00元

ISBN 7-114-02158-5

U·01474

内 容 提 要

本书既全面介绍了结构可靠度的基本概念、基本理论和实用计算方法,又结合桥梁、路面、路基、桩基、挡土墙等公路工程结构讨论了可靠度理论的应用问题。书中还列举了较多的计算示例,便于读者自学。

本书可供高等院校公路、桥梁、水利、建筑等专业的本科和研究生使用,亦可供从事上述专业的教学、设计、科研及施工人员参考。

前 言

20 世纪 70 年代以来,国际上以概率论和数理统计为基础的结构可靠度理论在土木工程领域逐步进入实用阶段。例如,加拿大分别于 1975 年和 1979 年率先颁发了基于可靠度理论的房屋建筑和桥梁结构设计规范;英国于 1982 年在 BS5400 桥梁设计规范中引入了结构可靠度理论的内容;美国于 1985 年在 AASHO 路面结构设计指南中正式引入可靠度概念。

我国虽然于 70 年代中期才开始在建筑结构领域开展结构可靠度理论和应用研究工作,但进展很快,1984 年国家计委批准《建筑结构设计统一标准》(GBJ68—84)出版发行,该标准提出了以可靠性理论为基础的概率极限状态设计统一原则,达到了国际先进水平。1989 年后,根据该统一标准修订的各种建筑结构设计专业规范陆续出版使用。为了更广泛地在工程结构设计领域内推广,1985 年国家计委下达了由中国建筑科学研究院主持编制全国《工程结构可靠度设计统一标准》的任务,经过多年努力,此标准即将出版发行。在编制全国统一标准的同时,1986 年国家计委又先后下达了其他土木工程结构可靠度设计统一标准的编制任务,例如,《公路工程结构设计统一标准》就是其中之一,目前该标准已三易其稿,正在作进一步修改。这一标准将明确提出以结构可靠性理论为基础的概率极限状态设计法作为结构设计的总原则,从而为各种公路工程结构专业设计规范提供共同遵守的准则,它将使公路工程结构设计进一步科学化、合理化、标准化。

鉴于公路工程结构由定值设计法向概率设计法转变已势

在必行,且迫在眉睫,而目前还没有一本全面介绍可靠度理论在桥梁结构、路面结构、路基及基础工程中应用的书籍,作者特地编写了《公路工程结构可靠度理论及其应用》一书,供公路工程结构设计人员、科学研究人员和高等院校师生阅读、参考,书中既汇集了作者从事结构可靠度理论与应用研究和探讨十年来所取得的些许成果,又总结了作者多年来在结构可靠度设计教学工作中积累的点滴经验。

全书内容由八章正文,一篇附录及若干附表组成。在内容编排上,由浅入深,循序渐进,注重理论联系实际,既讲清一般原理和基本概念,又介绍便于应用的实用方法,并列举了大量的实例。此外,还以结语的形式对每章的内容进行简明扼要的总结。因此,本书不但适合于课堂教学,而且便于读者自学。

由于我们水平有限,时间又较紧张,纰漏、不妥之处难免,敬请有关专家和读者批评指正。

编 著 者

一九九四年十月

目 录

第一章 结构可靠度的度量方法	1
1.1 引言	1
1.2 定值度量设计方法简介	5
1.3 概率极限状态度量方法	12
1.4 结构可靠度度量的三个水准	33
1.5 结语	35
第二章 公路工程结构中的不定性	36
2.1 引言	36
2.2 不定性	37
2.3 风险可接受性准则	44
2.4 结语	48
第三章 概率积分和模拟方法	49
3.1 引言	49
3.2 双变量正态积分	51
3.3 多变量正态积分	54
3.4 Monte Carlo(蒙特卡罗)模拟	56
3.5 结语	71
第四章 结构可靠度的实用计算方法	72
4.1 引言	72
4.2 一次二阶矩中心点法	72
4.3 改进的一次二阶矩法	84
4.4 JC 方法	89
4.5 一次二阶矩理论的实用分析法	99

4.6	相关随机变量的结构可靠度计算	106
4.7	结语	113
第五章	结构体系的可靠度	114
5.1	引言	114
5.2	多重失效模式	115
5.3	一阶方法	116
5.4	二阶方法	120
5.5	串联和并联体系	128
5.6	概率网络估算技术(PNET)方法和蒙特 卡罗方法	133
5.7	结语	136
第六章	结构可靠度理论在桥梁结构中的应用	137
6.1	引言	137
6.2	桥梁结构上作用的概率模型	139
6.3	桥梁结构构件抗力的统计特征	152
6.4	桥梁结构概率极限状态设计	161
6.5	基于可靠度的桥梁结构优化设计	169
6.6	结语	171
第七章	结构可靠度理论在路面结构中的应用	172
7.1	引言	172
7.2	水泥混凝土路面结构可靠度分析	174
7.3	柔性路面结构可靠度分析	185
7.4	路面结构可靠度理论发展中的几个问题	203
7.5	结语	204
第八章	结构可靠度理论在路基及基础工程中的 应用	205
8.1	引言	205
8.2	桩基承载能力可靠度分析	206

8.3	基础非均匀沉降的可靠度分析	209
8.4	路基边坡稳定的可靠度分析	211
8.5	挡土墙结构可靠度分析	217
8.6	结语	220
附录 A	概率论及数理统计基础	221
A.1	概率论的基本概念	221
A.2	随机变量及其分布函数	227
A.3	数理统计基础	251
附录 B	各种附表	265
附表 1	标准正态分布表	265
附表 2	补充标准正态分布表	270
附表 3	标准正态分布的密度函数表	274
附表 4	χ^2 分布表	277
附表 5	柯尔莫哥洛夫检验的临界值(D_{na})表	278
附表 6	Γ 函数表	280
附表 7	计算统计量 W 所必需的系数 $a_K(W)$ 表	281
参考文献		288

第一章 结构可靠度的度量方法

1.1 引言

桥梁结构、路面结构、隧道结构和其它支挡结构等统称为公路工程结构。本书主要讨论公路工程结构中的桥梁结构和路面的结构可靠度理论及其应用问题。在以下各章中所述的结构主要系指这两类结构。

有关结构可靠度理论研究的历史概况已经有许多文献作了详细的介绍,因此,本书不再赘述。

结构设计要解决的根本问题是:在安全适用与经济合理之间选择一种合理的平衡,力求以最经济的途径,使建造的结构能满足下列各项预定功能的要求。

1. 结构能承受在施工和使用期内可能出现的各种作用^①;
2. 在正常使用时,结构及其组成构件具有良好的工作性能;
3. 结构在正常维护下具有足够的耐久性;
4. 在偶然事件发生时及发生后,结构能保持必需的整体稳定性。

上述要求中,第1、4两项,关系到人身安全,结构具有的这种性质一般称为结构的安全性、第2项关系到结构的适用

^① “作用”比通常所说的“荷载”具有更广泛的含义,例如约束变形、沉降等都是作用。

性,第3项则关系到结构的耐久性。结构的安全性、适用性和耐久性这三者总称为结构的可靠性。结构可靠性的数值度量用可靠度;其安全性的数值度量则用安全度。由此可见,可靠度比安全度具有更广泛的内涵和外延。

根据当前国际上的一致看法,结构可靠度定义为:“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”。这里的规定时间,指的是分析结构可靠度时考虑各项基本变量与时间关系所取用的时间参数,称为设计基准期,它的作用是计算结构可靠度时的参考时间坐标,即在这个时间域内所计算的完成预定功能的概率不会改变。因此,设计基准期与结构的使用寿命有一定的联系,但不能简单地把两者等同起来。若结构的使用时间超过了设计基准期,只意味着所计算的完成预定功能的概率发生了变化,但并不等于结构丧失了功能或不能使用了,例如某桥梁的设计基准期定为 $T=100$ 年,但到了 100 年时不一定该桥梁就不能使用了。就以下将要提到的承载能力极限状态而论,一般寿命长,设计基准期也可长一些,寿命短,设计基准期应短一些,通常设计基准期应该小于寿命期,而不应该大于寿命期。规定的条件指的是正常设计、正常施工、正常使用的条件。预定的功能指上面提到的四项基本功能。完成各项功能的标志用极限状态来衡量。若结构的整体或其一部分超过某一特定的状态时,结构就不能满足设计规定的某一功能,则称这种特定的状态为极限状态。极限状态是区分结构工作状态为可靠或不可靠的标志。

结构的极限状态一般分为下列三类:

1. 承载能力极限状态。这种极限状态对应于结构或构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形。当结构或构件出现下列情况之一时,即认为超过了承载能力极限状态。

- 1) 整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡(如滑动、

倾覆等)；

2) 结构构件或连接处因超过了材料的强度而破坏(包括疲劳破坏),或因过度变形而不适于继续承载；

3) 结构转变为机动体系；

4) 结构或结构构件丧失稳定(如压屈等)。

2. 正常使用极限状态。这种结构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。当结构或结构构件出现下列状态之一时,即认为超过了正常使用极限状态：

1) 影响正常使用或外观的变形；

2) 影响正常使用或耐久性能的局部损坏(包括裂缝)；

3) 影响正常使用的振动；

4) 影响正常使用的其它特定状态。

3. “破坏——安全”极限状态(或称条件极限状态),其中所指的破坏,是指容许结构物可以发生的局部破坏,而对已发生局部破坏的结构其余部分,应能具有适当的可靠度,能继续承受降低了的设计荷载。其指导思想是,当偶然事件发生后,要求结构仍保持完整无缺是不现实的,也是不必要和不经济的,故只能要求结构不致因此而造成更严重的损失。所以,这种设计理论可应用于桥梁抗震和连拱推力墩的计算等方面。

以上前两类极限状态在我国现行的公路桥梁设计规范中已经被采用,国际上也广泛采用。至于第三类极限状态,目前由于在计算方面还缺乏必要的统计资料 and 实践经验,所以在实际应用时还未作为一个独立的极限状态提出,只是在承载能力极限状态中补充了防止结构连续倒塌的设计原则。

在结构可靠度分析中,结构的极限状态一般由功能函数加以描述。当有 n 个随机变量影响结构的可靠度时,结构的功能函数为：

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1-1)$$

式中: $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为基本变量, 指结构上的作用效应、结构构件的性能等基本变量。

当: $Z > 0$ 时, 结构处于可靠状态;
 $Z = 0$ 时, 结构达到极限状态;
 $Z < 0$ 时, 结构处于失效状态。

其中方程:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (1-2)$$

称为结构的极限状态方程, 它是结构可靠度分析的重要依据。

当一个桥梁结构或路面结构以某种方式承受荷载时, 它将对此做出响应, 响应的方式取决于荷载的形状和大小以及结构的强度和刚度, 而能否令人满意地对这个响应做出考虑则取决于必须满足的要求。如前所述, 这些要求可能包括结构抵抗破坏的安全度, 损坏、裂缝或挠度的限值, 或者其他准则中的任何一种, 而这些要求中的每一个都可称为一个极限状态。因此, 超过一个极限状态就被定义为结构达到了一个不合乎要求的状态。

人们从日常的观察中可以看到, 很少有结构发生破坏, 或短期内要求大修等, 因此, 超过最严重的极限状态是很少发生的。可是, 当确实发生超过一个极限状态的情形时, 其后果将会是十分严重的。有关文献报道的惊人的结构破坏示例有, 英国的浮桥 (Ferrybridge) 冷却塔, 第一座 Tacoma 海峡大桥, Kielland 近海平台等。

结构可靠度主要研究所设计的结构在其基准期内的任何阶段超过极限状态的概率的计算和预测问题。而结构安全度的研究主要与结构超过承载能力极限状态的问题有关。从概率论这个角度而言, 任何一个事件, 例如超过一个极限状态, 发生的概率是它发生的可能性大小的一种数值度量。就通常

具有相似性的结构来说,这种度量可从事件发生的长期频率的度量中得到,或者简单地用一个数值作主观估计。实际上,要进行足够长时间的观测通常是不可能的,所以,就结构构件及其性能而言。常常将主观估计和观测频率结合起来以预测结构从整体上超过各种极限状态的概率。

在以概率论为基础的可靠度评价中,我们试图对每一个变量的不定性做出清晰的描述。这与传统的安全性度量,例如“安全系数”或“荷载系数”,具有本质上的差别。由于传统的方法通常将描述结构及其强度的变量取为没有不定性的已知值,所以将传统的方法称为“确定性”度量。尽管传统的设计方法存在很多缺陷,但在几个世纪的发展中,由于其自身不断完善和改进,目前在世界各国的工程结构实际中仍然占有重要的位置,所以在引入概率度量以前,有必要对定值安全性度量作一个简要的回顾。

1.2 定值度量设计方法简介

1.2.1 容许应力法中的安全系数

容许应力法通常是用一个与弹性应力有关的“安全系数”来确定结构或构件的安全性的。它的基本表达式为:

$$\sigma_i(\epsilon) \leq [\sigma_i] \quad (1-3)$$

式中, $\sigma_i(\epsilon)$ 是作用在结构中一般点 ϵ 处的第 i 个作用应力分量,而 $[\sigma_i]$ 是第 i 个应力分量的容许应力。

容许应力 $[\sigma_i]$ 通常在结构设计规范中做出了规定。它们是从结构构件的极限应力中得到的(如极限弯矩、屈服点弯矩、破坏荷载等),常以应力 σ_{lim} 表达,但通过一个系数 K 将其予以降低:

$$[\sigma_i] = \frac{\sigma_{ui}}{K} \quad (1-4)$$

式中, K 就是“安全系数”, 它通常根据实验观测以前的实践经验、经济以及政治因素来选定。

根据式(1-3), 当结构的任何一个部分作用的应力达到局部的 $[\sigma_i]$ 时, 这个结构就应当破坏。破坏是否真正发生, 完全取决于在实际结构中的 ϵ 点处 $\sigma_i(\epsilon)$ 代表实际应力的程度和 $[\sigma_i]$ 代表实际材料破坏的程度。众所周知, 实际观察到的应力总是不能很好地与由设计中所采用的线弹性结构分析计算出来的应力相吻合的。应力重分布、应力集中、边界效应引起的变化和构件的实际尺寸效应都将会产生差异。此外, 结构设计中所采用的材料, 也不可能与试验室事先检验而预知其强度的材料完全一样, 所用材料的强度, 可能比设计时预定的数值大或者小。因此, 即使结构的某一局部的 $\sigma_i(\epsilon)$ 达到了该点处的 $[\sigma_i]$, 该结构也不一定发生破坏。

1.2.2 破坏阶段设计法的荷载系数

破坏阶段设计法与容许应力设计法的区别主要有两点: 一是力学计算, 前者考虑了材料的弹塑性; 二是安全系数的表现形式。破坏阶段设计法采用荷载系数, 通过这个系数将一组作用在结构上的荷载从理论上扩大 K 倍从而保证结构有足够的储备。

就某一给定的破坏模式而言, 例如单筋矩形截面受弯构件的正截面强度计算, 当乘以安全系数的荷载与塑性抗力有以下关系时, 就认为该结构安全。即:

$$KM \leq M_p \quad (1-5)$$

式中, M 为标准(使用)荷载作用下的截面弯矩; K 为经验安全系数(荷载系数); M_p 为截面破坏时的抵抗弯矩。

综上所述,容许应力法不容许截面上任一点的应力大于容许应力 $[\sigma_i]$,而破坏阶段法考虑材料的塑性变形,设计时,要求截面弯矩(考虑安全系数 K),不大于该截面抵抗破坏的弯矩 M_F 。这种力学计算上的改进是破坏阶段法的优点,可用结构试验加以验证。

1.2.3 分项系数的极限状态设计

容许应力法和破坏阶段法采用的单一安全系数 K ,是一个笼统的粗略的经验系数,对不同的材料(如混凝土和钢筋),不同荷载(如恒载和活载),以及其它影响结构安全度的因素,不能区别对待、细致分析,以致于可能使结构在某些情况下过分安全,而在另一些情况下却反而不安全。在以上两种安全性度量基础上的进一步发展就是所谓的“分项系数极限状态设计”法。目前在世界范围内,大量的结构设计规范都已采用这种方法,我国现行的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023—85)^[3]就是其中之一。该规范的承载能力极限状态计算以塑性理论为基础,总的设计原则是:荷载效应最不利组合的设计值应小于或等于结构抗力的设计值,以公式表达为:

$$S_d(\gamma_g G; \gamma_q \Sigma Q) \leq \gamma_b R_d \left(\frac{R_c}{\gamma_c}; \frac{R_s}{\gamma_s} \right) \quad (1-6)$$

式中: G ——永久荷载(结构重力);

γ_g ——永久荷载(结构重力)安全系数;

Q ——可变荷载及永久荷载中混凝土收缩、徐变影响力、基础变位影响力;

γ_q ——荷载 Q 的安全系数;

S_d ——荷载效应函数;

R_c ——混凝土强度设计采用值;

γ_c ——在混凝土强度设计采用值基础上的混凝土安全系数；

R_s ——预应力钢筋或非预应力钢筋强度设计采用值；

γ_s ——在钢筋强度设计采用值基础上的钢筋安全系数；

R_d ——结构抗力函数；

γ_b ——结构工作条件系数。

式(1-6)系参考国际预应力混凝土协会(FIP)根据 CEB/FIP 模式规范 MC78 编制的《混凝土与预应力混凝土实用设计建议(草案)》而确定出来的。但目前国际上比较通用的分项系数设计表达式为：

$$\gamma_R R_K \geq \gamma_G G_K + \gamma_Q Q_K + \dots \quad (1-7)$$

式中： γ_R ——抗力分项系数；

R_K ——抗力的标准值；

γ_G ——永久荷载效应分项系数；

G_K ——永久荷载效应的标准值；

γ_Q ——活载效应分项系数；

Q_K ——活载效应的标准值。

以上两个表达式的形式最初是本世纪 60 年代期间为钢筋混凝土规范而推导出来的，它们能使汽车、人群等活载具有比结构自重等永久荷载更大的分项系数，因为前者的不定性较后者大，并能对制作变异性和与抗力 R 有关的抗力计算模式的不定性进行度量。式(1-7)的优点在于能对荷载和抗力中的不定性进行清楚的分离，区别对待。

例 1-1^[1] 图 1-1a) 的简单门式框架，受荷载 Q_1 和 Q_2 的作用，如果已知构件的相对惯性矩，就可求得如图 1-1b) 所示的弹性弯矩图。因此，弯矩承载能力的极限状态为：

$$\text{截面 2: } \gamma_R M_{C2} = \gamma_{Q_1} \frac{3l}{16} Q_1 + \gamma_{Q_2} \frac{3l}{16} Q_2$$