

工程结构可靠性设计

Gongcheng Jiegou Kekaoxing Sheji

黄兴棣 编著

人民交通出版社

励，还得到出版社吴德心和丁香云同志的支持和帮助；中国建筑科学研究院结构研究所、冶金部北京钢铁设计总院、福建师范大学和重庆建筑工程学院等单位提供了有关资料；舒昌浓、吕小勇两同志帮助描绘了底图，在此一并申谢。

由于编者学识和经验均有限，加之时间仓促，书中难免有错误和欠妥之处，热忱期望读者批评指正。

黄兴棣

于南京工学院

内 容 提 要

本书共分八章，内容包括：工程结构可靠性概念及可靠度研究概况，统计数学基础，结构可靠性设计的理论基础，结构构件抗力的统计分析，结构可靠性设计，荷载和荷载效应组合，结构体系的可靠性，结构材料的质量要求及质量管理和控制等。

本书可供有关专业的设计、科研及施工人员参考。也可作为高等院校路桥工程、建筑结构工程和工业与民用建筑等专业高年级学生及研究生的教学参考书。

序

随着对荷载效应和构件抗力研究的不断深入,即随着结构内力确定和构件强度计算的不断准确化,因而工程结构设计得以逐步向更为经济合理的方向发展。我们知道,荷载效应和构件抗力都是随机变量,有着各自的分布规律。为了合理地确定结构的可靠性,近30年来国外对统计数学在结构设计中的应用进行了大量的工作,并不断取得重要的进展。50年代中,苏联首先提出半概率的极限状态设计方法,即我们所熟知的“三系数”法,在此引进了超载系数(荷载系数)、匀质系数(材料系数)和工作条件系数。限于当时的条件,对材料系数的确定应用了概率原则,但用材料试件强度的不定性代替构件抗力的不定性,而对荷载取值,除少数外,一般仍沿用传统值,荷载系数基本上是根据试设计反算的。60年代末,美国提出用与结构失效概率相联系的结构可靠指标作为衡量结构可靠性的统一数量指标,而后逐步发展成为今天的近似概率设计方法。我国自己制订、并于1983年颁布试行的《建筑结构设计统一标准》就是以这一最新科学技术成果作为基础,并考虑我国实践提出的,它已成为各种材料结构设计的原则。

我系工程结构教研组黄兴棣同志早在该《标准》制订前的调查研究阶段和编制过程中,即为有关这一课题教学作准备,并于1981年编写出《统计数学基础与结构可靠性设计》,介绍这一新的设计方法及其理论基础。该讲义曾一再在其他几所院校翻印,同时他还曾在一些城市为设计人员作了专题讲座,为学习新的《标准》作了有益的贡献。今应人民交通出版社之约,将原讲义重写并作了必要的补充,这包括他在南京工学院结构试验室所进行

的钢筋混凝土受弯和轴心受拉构件裂缝概率分布试验研究的新内容。

本书的特点是由浅入深，较全面地阐述了这一新的设计方法。首先从工程概率和数理统计的基础理论开始，引出结构可靠性设计理论及方法，进而阐述了构件抗力的统计分析和荷载概率模型及荷载效应组合；同时除截面可靠性设计外，也涉及结构体系的可靠性。我们知道，可靠性指标是紧密地与材料性能质量管理、控制和验收制度有关的，所以在本书的最后一章，对这一问题作了必要的阐述，使工程设计人员和施工管理等方面人员能互相配合，经济合理地胜利完成共同的任务。今趁本书即将出版之际，为缀数言，以示将与从事土建工作的同志们共同学习这一新的理论，为我国工程结构设计水平的不断提高而努力。

丁大钧

于南京工学院

前 言

70年代以来,在工程结构设计中,国际上已在发展和推广以统计数学为基础的结构可靠性理论和概率极限状态设计法,并已进入工程实用阶段。许多国家和国际组织已开始根据结构可靠性理论制订新的设计标准和规范。我国从70年代中期开始,也已有计划地开展这方面的研究工作,取得了显著的成果,并于1983年完成了以概率极限状态设计法的《建筑结构设计统一标准》的编制工作。这本标准是制定工业与民用建筑各结构设计规范应遵守的准则,也可供制定其它土木工程结构设计规范参考。因此,我国工程结构设计规范将处于一个变革时期。掌握近代的结构可靠性理论和新的设计方法已成为当前的迫切任务。

为了及时向土木工程系有关专业学生介绍结构可靠性理论和新的设计方法笔者于1981年编写了《统计数学基础与结构可靠性设计》讲义以此作为“结构可靠性设计”课程的试用教材。该讲义先后在南京工学院印了二版(讲授了五次),在武汉水利电力学院、山东矿业学院各翻印一次,还作为向设计人员开设专题讲座时的讲义翻印过多次。今应出版社之约,为了适应新情况下的较高要求,并根据讲义编写以来新的资料(包括我们的部分研究成果)和授课经验,增加了路桥等方面的新内容,重写成本书以应读者的需要。如果本书能在“四化”建设中起到一些作用,将是作者最大的心愿。

本书在取材和编写时,力求符合由浅入深、循序渐进的认识规律,并紧密结合工程实际和我国新编设计标准和规范,文字论述做到通顺易懂,同时给出较多数量的算例,以便自学。

本书在编写过程中,得到南京工学院丁大钧教授的关心和鼓

目 录

第一章 绪论	1
第一节 工程结构可靠性概念.....	1
第二节 极限状态和极限状态方程.....	3
第三节 结构可靠度研究概况.....	9
第二章 工程概率和数理统计基础	20
第一节 引言.....	20
第二节 概率论的基本概念.....	21
第三节 随机变量及其分布.....	51
第四节 随机变量的数字特征.....	68
第五节 结构可靠性中常用的概率分布.....	77
第六节 多维随机变量及其分布.....	89
第七节 数理统计基本知识.....	109
第三章 结构可靠性设计的理论基础	142
第一节 引言.....	142
第二节 基于随机变量概率模型的结构可靠度概念.....	143
第三节 一次二阶矩模式之一——中心点法.....	152
第四节 一次二阶矩模式之二——验算点法.....	163
第四章 结构构件抗力的统计分析	186
第一节 结构构件抗力统计分析的一般概念.....	186
第二节 结构构件抗力不定性因素的分析.....	188
第三节 结构构件抗力的统计参数和概率分布类型.....	196
第五章 结构可靠性设计	202
第一节 确定设计可靠指标的方法.....	202
第二节 我国《标准》采用的设计可靠指标.....	204

第三节	截面设计和截面复核	218
第四节	实用设计表达式	220
第五节	各分项系数确定的原则和方法	223
第六节	材料用量的比较	231
第七节	正常使用极限状态下的可靠度分析	232
第八节	结构可靠性设计中需要注意的几个问题	241
第六章	荷载与荷载效应组合	243
第一节	作用(荷载)分类	243
第二节	荷载的概率模型	246
第三节	荷载统计分析方法	248
第四节	几种常遇荷载统计分析结果	250
第五节	荷载代表值	262
第六节	荷载效应组合	267
第七节	荷载效应组合系数	275
第七章	结构体系的可靠性	282
第一节	基本概念	282
第二节	静定结构体系的可靠度	288
第三节	超静定结构体系的可靠度	291
第八章	工程结构材料性能的质量要求和质量管理及控制	302
第一节	材料性能的质量要求	302
第二节	材料性能的质量管理、控制和验收	308
结束语		324
附录		326
附表 1	标准正态分布表	326
附表 1a	标准正态分布的密度函数表	330
附表 2	χ^2 分布表	332
附表 3	t 分布的双侧分位数(t_α)表	333
附表 4	柯尔莫哥洛夫(КОЛМОГОРОВ)检验的临界值($D_{n\alpha}$)表	334
主要参考文献		336

第一章 绪 论

第一节 工程结构可靠性概念

一、工程结构的功能、可靠性和可靠度

从事工程结构设计的基本目的,是在一定的经济条件下,赋予结构以适当的可靠度,使结构在预定的使用期限内,能满足设计所预期的各种功能要求。一般说来,工程结构必须满足下列各项功能要求:

- 1.能承受在正常施工和正常使用时,可能出现的各种作用^①;
- 2.在正常使用时,具有良好的工作性能;
- 3.在正常维修和保护下,具有足够的耐久性能;
- 4.在偶然事件(如地震、爆炸、撞击、龙卷风及冰凌等)发生时及发生后,仍能保持必需的整体稳定性。

第1、4两项通常是指结构的强度、稳定,即所谓的安全性,第2项是指结构的适用性,第3项是指结构的耐久性,三者总称为结构的可靠性。

所谓足够的耐久性能,系指结构在化学的、生物的或其他不利因素的作用下,在预定时期内,其材料性能的恶化不至导致结构出现不可接受的失效概率。从工程概念上说,足够的耐久性能就是指在正常维护条件下结构能够使用到预期的耐久年限。

所谓整体稳定性,系指结构在偶然事件发生时和发生后,结构仅产生局部损坏而不致发生整体的破坏,如整体连续倒塌。

^① 作用是施加在结构上的荷载及引起结构外加变形或约束变形的总称,详见第六章。

现在我们对结构可靠性下一明确的定义：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，称为结构可靠性。

度量结构可靠性的数量指标称为结构可靠度，其定义为：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。由此可见，结构可靠度是结构可靠性的概率度量。这是基于统计学观点所下的比较科学的定义，因为在各种随机因素的影响下，结构完成预定功能的能力，只有用概率来度量才符合客观实际。

这里所说的“规定时间”，是指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设计基准期；所说的“规定条件”，是指设计时所确定的结构的正常设计、正常施工和正常使用的条件，即不考虑人为过失的影响；所说的“预定功能”，一般是以结构是否达到“极限状态”来标志的。如果结构达到极限状态的概率超过允许限值，结构就失效，即不可靠。结构的失效概率越小，则其可靠度就越大。

二、设计基准期

结构可靠度与结构的使用期长短有关。上述结构可靠度或失效概率，是对设计基准期而言的。

我们知道，作用在结构上的各种荷载是随时间而变动的随机过程，结构材料性能亦是以时间为变量的随机函数，所以结构可靠度应是时间的函数。例如，预定使用期为30、50、100年的结构，若欲使他们有相同的可靠度，则结构所需的截面尺寸或所用的材料用量必然是使用期长者大于使用期短者；反之，若结构的截面尺寸和材料强度均相同，则必然是使用期长者可靠度小于使用期短者。

目前，国际上对设计基准期的取值并不统一，例如国际“结构安全度联合委员会”（JCSS）建议的结构设计基准期为50年，加拿大“国家建筑法规”取30年。我国现行几本结构设计规范虽然没有明确规定结构的设计基准期，但在计算吊车运行次数时通

常是以50年作为参考基准的，在确定结构耐久性指标时亦有按50年考虑的说法。我国《建筑结构设计统一标准》(草案)^①(以下简称《统一标准》)明确规定建筑结构设计基准期为50年^②。

必须指出，设计基准期只是计算结构失效概率的参考时间坐标，即在这个时间域内计算结果有效。设计基准期与结构实际的使用寿命有一定的联系，但不能简单地将两者等同起来。当结构的使用年限超过设计基准期后，结构失效概率将会较设计时的预期值增大，但并不等于结构丧失功能或报废。

最后必需指出，结构可靠与否这一问题的产生，是由于存在着“不定性”。因此，结构不可能是绝对可靠的，至多是说它的失效概率极小。换言之，结构设计是要冒一定风险的，只是所冒的风险即失效概率，要小到能被人们所乐于接受。例如，假使失效概率为1%，人们将肯定不会接受；如果失效概率降到1‰，人们还将有恐惧心理而不予接受；如果失效概率进一步降至0.1‰，则人们将可能比较放心而予以接受。对于这个问题将在第三章详细论述。

第二节 极限状态和极限状态方程

一、极限状态的定义和分类

本世纪50年代初期，苏联学者已提出了极限状态的概念和与此相应的极限状态设计法^③，这个概念已为世界工程界所公认。目前对极限状态的一般定义是：整个结构或结构的一部分超过某一特定状态，就不能满足设计规定的某一功能要求，此特定状态称为该功能的极限状态。极限状态实质上是结构可靠（有效）或不可靠（失效）的界限，所以也有称为“界限状态”的。

欧洲混凝土委员会（CEB）、国际预应力混凝土协会（FIP）、国际标准化组织（ISO）等国际组织，一般将极限状态分为两类，

^① 对于桥梁结构，现行规范未作明确规定，不过，习惯上对大桥有按100年以上考虑的。

即承载能力和正常使用极限状态。加拿大曾提出三种极限状态，即破坏极限状态、损伤极限状态 (Damaged Limit State) 和使用或功能极限状态。其中损伤极限状态系由于混凝土的裂缝或碎裂而引起的损坏，因其对人身安全的危险性较小，故可允许比破坏极限状态有较大的发生概率。此外，鉴于近10余年间出现了几起结构逐渐破坏和倒塌的工程事故，国外还提出了一种新的极限状态，即“破坏-安全极限状态”。其概念是结构在偶然作用下，结构局部破坏而不倒塌。显然，这对于抗震结构是十分重要的。

我国《统一标准》将极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。不过，在前者中还包括了“破坏-安全”极限状态的概念。

对于结构的各种极限状态，均应规定明确的标志及限值。

二、承载能力极限状态

这种极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形。

当结构或结构构件出现下列状态之一时，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（例如倾复、滑移等）；
2. 结构构件或其连接，因材料强度被超过而破坏（包括疲劳破坏），或因过度的塑性变形而不适于继续承载；
- 疲劳破坏是在使用中由于荷载多次重复作用而使构件丧失承载能力。结构构件由于塑性变形过大而使其几何形状发生显著改变，这时虽未达到最大承载能力，但已彻底不能使用，当然应属于这种极限状态。
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）。

承载能力极限状态的出现概率应当很低，因为它可能导致人身伤亡和大量财产损失。

三、正常使用极限状态

这种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。

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. 影响正常使用或其他特定状态。

正常使用极限状态可理解为结构或结构构件使用功能的破坏或损害，或结构质量的恶化。与承载能力极限状态相比较，由于其对生命的危害较小，故允许出现的概率可较高。虽如此，但仍应予以足够的重视。因为结构构件过大变形虽然一般不会导致破坏，但是会造成房屋内粉刷剥落、填充墙和隔断墙开裂及屋面积水等不良后果；由于梁的竖向挠度过大，将会导致桥面行车的不平整性，且使桥面易于积水和破坏，由于梁端过大的旋转而使支承面积的改变，车辆行驶时将会引起过大的冲击和振动，并且会伴随着产生过大的噪声等不良后果。此外，过大的变形和裂缝，也会引起人们心理上的不安全感。对于钢筋混凝土结构，过大的裂缝不仅有损建筑物观瞻和影响结构的耐久性，而且有时也会导致重大的工程事故。例如，1986年5月一个上午，西柏林会议厅的马鞍形壳顶突然倒塌。该会议厅于1957年建成，跨度约30m，采用悬索支承的薄壳屋面，壳板混凝土厚约6.5cm。分析认为，破坏的起因是由于拱与壳板交接处裂缝开展，不断渗水，终于导致钢筋锈蚀，悬索断裂，引起世界震惊的倒塌事故。又如，奥地利维也纳帝国桥，系1937年建成的自锚式吊桥，中跨243m，由于桥墩底部混凝土浇灌不良，内部浸水，经过反复冻融，混凝土裂缝不断扩大，而镶面石又未产生异常，因而未能及时发现，以致于1976年8月三跨突然全部倒塌。

四、破坏-安全极限状态

如果说,结构的承载能力极限状态,是对应于完整结构的最大承载能力的话,那么破坏-安全极限状态,则对应于已出现局部破坏的结构的最大承载能力。因为是在局部破坏条件下的承载能力极限状态,所以也称为“条件极限状态”。

当局部破坏的结构出现下列状态之一时,即认为达到了破坏-安全极限状态:

1. 局部破坏结构转变为机动体系;
2. 局部破坏结构的关键部位,因超过材料强度而破坏;
3. 局部破坏结构的构件,丧失弹塑性平衡的稳定性(压屈、侧向翘曲等)或作为刚体失稳;
4. 局部破坏结构的一部分或整体,丧失刚体平衡的稳定性。

整个结构或其大部分结构的连续倒塌是由于偶然事件造成的局部破坏的扩展和蔓延而导致的。

1968年5月,英国伦敦坎宁镇(Canning Town)的一幢23层装配式大板结构公寓大楼,由于第18层的一个房间发生了家用瓦斯爆炸,将该层的一块外墙板炸坏,致使这一很小的初始局部破坏没有得到有效的控制,而沿建筑物竖向蔓延,一层一层地连续倒塌直至地面(图1-1)。

图1-2所示为瑞典1974年报导的一个汽车修理库的连续倒塌事故。该修理库系由20榀单层门架结构组成。由于超大的雪荷载首先引起一榀门架超载倒塌,接着相邻门架又因超载而倒塌,最后造成20榀全部倒塌。

又如,美国日光高架公路桥(Sunshine Sky-Way Bridge),位于佛罗里达州坦帕湾入口,为桁架桥,全长6830m。通航孔主跨263m,全桥有数以百计的混凝土桥墩,均无防护设施。1980年5月9日一艘2万吨空载货轮正试图进湾,由于水势汹涌,且倾盆大雨,船首突然猛撞上通航孔南110m的引跨桥墩,致使两根3m见方的混凝土墩柱完全剪断,几秒钟内主跨长186m一段和两个

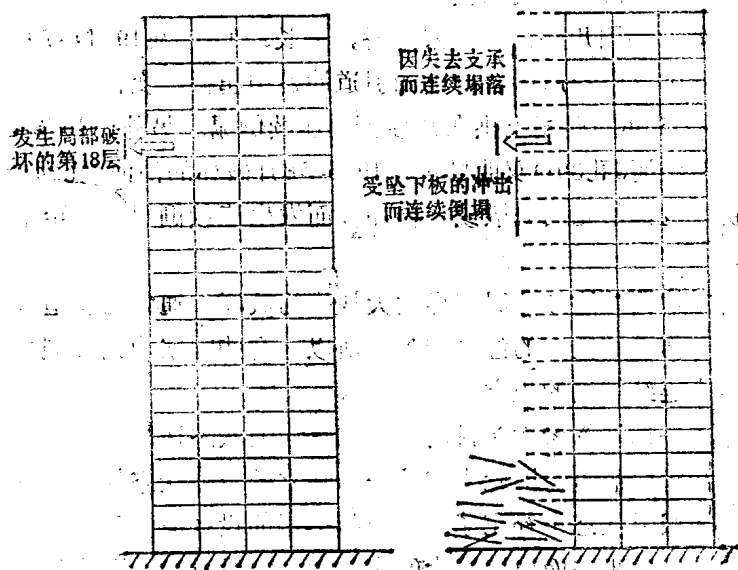


图 1-1

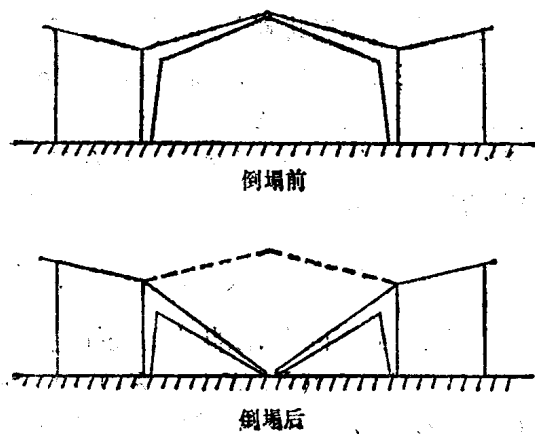


图 1-2

引跨（一个长110m，另一长88m）倒塌海中。桥上几辆小车和一辆公共汽车坠落，35人死亡。

再如，我国川陕公路王家渡桥，全长249m，在1981年7月的一次洪水中，因一岸桥台冲刷和引道冲毁引起桥台变位，最终导致4孔各为55m的混凝土拱在几秒钟内连续倒塌。另外，1973年4月破坏的泾河5孔30m双曲拱桥和1976年8月破坏的渭河8孔24m双曲拱桥，也都是先因一墩或一台冲毁而发生连续倒塌，直至全桥破坏。

由于结构的连续倒塌将导致大规模的破坏，通常必将造成大量的人身伤亡和重大的经济损失。所以，有些国家的设计规范增加了防止连续倒塌的规定。

《统一标准》考虑到目前计算这种极限状态还缺乏必要的统计资料 and 实践经验，因此未作为一个独立的极限状态提出，仅在承载能力极限状态中补充了防止连续倒塌的设计原则。

由于偶然事件而出现特大的作用时，一般说来，要求结构仍保持完整无缺是不现实的，只能要求结构不致因此而造成与其起因不相称的破坏后果。例如，仅由于局部的爆炸或撞击事故，不应导致整个结构发生灾难性的连续倒塌。为此，当按承载能力极限状态的偶然组合设计主要承重结构在经济上不利时，可考虑采用允许结构发生局部破坏而其剩余部分仍具有适当的可靠度，在一段时间内不致发生连续倒塌，以避免生命和经济的重大损失，并为修复提供条件。实际上这就是破坏-安全的设计原则。按此原则设计时，通常可采取构造措施来实现，例如可对结构体系采取有效的超静定措施，以限制结构因偶然事件而造成破坏的范围。

五、极限状态方程

结构的极限状态可用下列极限状态方程描述：

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

式中， X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为基本变量，系指结构上的各种作用（荷载）和材料性能、几何参数等，均应作为随机变量考虑； $Z =$

$g(\cdot)$ 称为结构的“功能函数”或“功效函数”。

对于承载能力极限状态，若令 R 为结构抗力， S 为作用（荷载）综合效应，则式(1-1)可写成：

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (1-2)$$

如果对 R, S 作一具体观测，相应的 Z 值可能出现三种情况：

$Z = R - S > 0$ ，结构处于可靠状态；

$Z = R - S < 0$ ，结构处于失效状态；

$Z = R - S = 0$ ，结构恰处于极限状态。

由于 R, S 均为随机变量，则 Z 亦为随机变量，其取值“ $Z > 0$ ”、“ $Z < 0$ ”和“ $Z = 0$ ”都是随机事件。如果 Z 的概率密度函数或概率分布函数可求得，则出现各种状态的概率就可确定，即结构可靠度的数量指标便可基于各种状态出现的概率求得。这将在第三章中具体阐述。

第三节 结构可靠度研究概况

一、结构设计方法的演变

历史上早期的结构承载能力的设计方法，是以纯经验的生物比拟为依据的，之后采用了结构整体直接的荷载试验方法来设计结构。16世纪末意大利人伽里略(Galilei)曾制作了世界上第一个粗糙的结构试验机，用来进行结构设计。到了19世纪，由于材料力学、弹性力学和材料试验科学的发展，以及比较理想的弹性材料——钢的广泛应用，对结构设计理论起了促进作用，在纳维叶(Navier)等人的共同努力下，提出了基于弹性理论的容许应力设计法。此后，在结构设计中广泛应用此法。

该法要求结构构件在使用期间内截面任何一点的应力 σ （ σ 一般按材料力学的公式求得）不得超过某一容许应力值，其表达式为：

$$\sigma \leq [\sigma] = f/K \quad (1-3)$$

式中： f ——结构材料性能，其值由试验确定；