

桥梁结构设计原理

Qiaoliang Jiegou Sheji Yuanli

蒋志刚 严波 宋殿义 编



国防科技大学出版社

桥梁结构设计原理

蒋志刚 严 波 宋殿义 编

国防科技大学出版社
·长沙·

图书在版编目 (CIP) 数据

桥梁结构设计原理/蒋志刚, 严波, 宋殿义编. —长沙: 国防科技大学出版社, 2008.10
ISBN 978-7-81099-567-2

I. 桥… II. ①蒋… ②严… ③宋… III. 桥梁结构—结构设计 IV. U443

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 157686 号

国防科技大学出版社出版发行

电话: (0731) 4572640 邮政编码: 410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑: 徐 飞 责任校对: 唐卫葳

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 20.5 字数: 512 千

2008 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数: 1-1000 册

ISBN 978-7-81099-567-2

定价: 38.00 元

前 言

本书参照普通高等学校土木工程专业“结构设计原理”和“钢结构”教学大纲,以国防科学技术大学工程兵(渡河)指挥专业四年制本科培养方案及课程标准为依据,结合教学实际,在不断完善讲义的基础上编写而成。本书主要作为工程兵专业本科“桥梁结构设计原理”课程教材,亦可作为其他专业“钢结构设计原理”课程教材,还可供相关专业工程技术人员参考。

本书包括总论和三篇,共十二章。总论(第一章)主要介绍课程的任务和概率极限状态设计法;第一篇(第二章至第七章)介绍钢结构,包括钢材物理力学性能、钢结构的破坏形式、钢结构基本构件及其连接的设计计算原理;第二篇(第八章至第十章)介绍钢筋混凝土结构的基本概念、材料性能、受弯构件的计算和预应力混凝土结构的基本原理;第三篇(第十一章、第十二章)介绍圬工结构和木结构。教材内容的主要依据为:现行国家标准《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)和交通部部颁标准《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2004)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62-2004)、《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61-2005)、《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》(JTJ 025-86)。

与现有普通高等学校相关教材相比,本书的主要特点是:(1)根据军用桥梁结构的特点和土木工程结构设计理论的发展趋势,在内容选择上,以钢结构基本构件为主,兼顾混凝土结构、圬工结构和木结构;在设计理论上,以概率极限状态设计法为主,兼顾容许应力设计法。(2)将钢结构、混凝土结构和圬工结构设计的共同理论基础——概率极限状态设计法放在第一章总论,避免了目前普遍存在的重复讲解问题。(3)既可满足工程兵专业本科“结构设计原理”教学的需要,又考虑了内容体系的完整性。

本书由蒋志刚主编、统稿。第一、十一、十二章由蒋志刚编写;第二章至第七章由严波编写;第八章至第十章由宋殿义编写。

限于编者的水平和经验有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。来信请寄:湖南长沙国防科技大学指挥军官基础教育学院渡河指挥系(邮编 410072)。

编 者
2008年8月

目 录

第一章 总 论	(1)
第一节 各种材料结构的特点及使用范围.....	(2)
第二节 结构设计的基本要求及结构可靠性.....	(4)
第三节 结构设计理论的发展与应用.....	(4)
第四节 结构设计的概率极限状态法基本原理.....	(8)
第五节 承载能力和正常使用极限状态设计原则.....	(11)
习 题.....	(16)

第一篇 钢 结 构

第二章 钢结构的基本概念与钢材的基本性能.....	(18)
第一节 钢结构的特点及应用.....	(18)
第二节 钢材单向拉伸时的工作性能.....	(23)
第三节 钢材反复应力下的工作性能.....	(25)
第四节 钢材复杂应力下的工作性能.....	(26)
第五节 钢材抗冲击性能及冷弯性能.....	(28)
第六节 影响钢材性能的因素.....	(29)
第七节 钢材的分类及选用原则.....	(33)
习 题.....	(36)
第三章 钢结构的破坏形式	(38)
第一节 整体失稳破坏.....	(38)
第二节 局部失稳破坏.....	(41)
第三节 塑性破坏和脆性破坏.....	(42)

第四节 损伤积累破坏和疲劳破坏·····	(44)
习 题·····	(48)
第四章 钢结构轴心受力构件·····	(49)
第一节 轴心受力构件的特点和截面形式·····	(49)
第二节 轴心受力构件的强度、刚度及主要破坏形式·····	(50)
第三节 轴心受压构件的整体稳定分析·····	(52)
第四节 轴心受压构件整体稳定计算·····	(56)
第五节 轴心受压构件的局部稳定·····	(64)
第六节 实腹式轴心受压构件的设计·····	(69)
第七节 格构式轴心受压构件的设计·····	(71)
习 题·····	(76)
第五章 钢结构受弯构件 ·····	(79)
第一节 概 述·····	(79)
第二节 受弯构件的截面强度·····	(82)
第三节 受弯构件整体稳定基本理论·····	(89)
第四节 受弯构件整体稳定的计算·····	(95)
第五节 受弯构件的局部稳定和加劲肋设计·····	(98)
第六节 受弯构件的变形·····	(111)
习 题·····	(112)
第六章 钢结构偏心受力构件·····	(115)
第一节 概 述·····	(115)
第二节 拉弯构件和压弯构件的强度计算·····	(116)
第三节 实腹式压弯构件的整体稳定·····	(119)
第四节 实腹式压弯构件的局部稳定·····	(126)
第五节 格构式压弯构件的稳定计算·····	(129)
习 题·····	(130)
第七章 钢结构的连接 ·····	(133)
第一节 钢结构的连接方式·····	(133)

第二节	焊接方法和焊接连接形式·····	(133)
第三节	焊接残余应力和残余变形·····	(139)
第四节	对接焊缝的构造和计算·····	(143)
第五节	角焊缝的构造与计算·····	(146)
第六节	普通螺栓连接·····	(159)
第七节	高强度螺栓连接·····	(171)
习 题	·····	(176)

第二篇 钢筋混凝土及预应力混凝土结构

第八章 钢筋混凝土结构的基本概念与材料····· (180)

第一节	钢筋混凝土结构的基本概念·····	(180)
第二节	钢筋和混凝土的物理力学性能·····	(182)
第三节	钢筋与混凝土的共同工作·····	(195)
习 题	·····	(198)

第九章 钢筋混凝土受弯构件承载力计算····· (199)

第一节	截面形式与钢筋构造·····	(199)
第二节	钢筋混凝土梁正截面受力和破坏过程·····	(202)
第三节	正截面受弯承载力计算的基本原则·····	(205)
第四节	单筋矩形截面梁正截面受弯承载力计算·····	(209)
第五节	双筋矩形截面梁正截面受弯承载力计算·····	(213)
第六节	T形截面受弯构件正截面受弯承载力计算·····	(217)
第七节	受弯构件斜截面承载力计算·····	(222)
习 题	·····	(232)

第十章 预应力混凝土结构的基本知识····· (234)

第一节	预应力混凝土的基本概念·····	(234)
第二节	施加预应力的方法·····	(236)
第三节	预应力混凝土的材料·····	(238)
第四节	预应力的计算与预应力损失·····	(243)
第五节	受弯构件的受力特点和计算内容·····	(251)

习 题.....	(254)
----------	-------

第三篇 圬工结构和木结构

第十一章 圬工结构	(256)
第一节 圬工结构的基本概念与材料.....	(256)
第二节 圬工结构构件的强度计算.....	(265)
习 题.....	(274)
第十二章 木结构	(275)
第一节 木结构的基本概念与材料.....	(275)
第二节 木结构的连接与构件计算.....	(279)
习 题.....	(294)
附录 A 钢结构基本数据.....	(295)
附录 B 混凝土结构基本数据	(311)
附录 C 木结构基本数据	(315)
参考文献.....	(318)

第一章 总 论

桥梁或其他建筑物都要受到各种外力的作用,例如车辆荷载、人群荷载、风荷载以及结构自重等。建筑物中承受和传递荷载的各个部件的总和统称为结构,即结构由若干基本构件联结而成。由基本构件可以组合成各式各样的桥梁或其他人工构造物。各种桥梁结构一般由板(如桥面板)、梁、柱、拱、索等基本构件组成。《桥梁结构设计原理》就是以这些基本构件为主要研究对象的一门科学。其主要内容包括合理选择构件截面及构件联结方式,并根据承受荷载的情况对构件的强度、刚度、稳定性和耐久性等问题进行计算。

根据所采用材料的不同,桥梁结构分为:钢结构、混凝土结构(主要指钢筋混凝土和预应力混凝土结构)、木结构和圬工结构(包括砖、石和素混凝土结构)。根据构件的受力和变形特点,基本构件的受力图式可归纳为:轴心受力(轴心受拉和轴心受压)、受弯、受剪和受扭等几种基本形式。在工程实际中,有些构件受力和变形比较简单,可以简化为以上所述基本受力图式进行设计计算;但有些构件受力和变形比较复杂,常常为几种基本受力图式的复合,如梁既受弯又受剪,拱圈和偏心受压直杆既承受较大的轴向压力又有较大的弯矩。《桥梁结构设计原理》主要研究钢结构、混凝土结构、木结构和圬工结构的基本构件在基本受力图式及复合受力状态下的设计计算原理。由于军用桥梁主要采用钢结构,且钢结构在民用桥梁和建筑结构中的应用也越来越多,故本教材主要介绍钢结构基本构件及其联结的设计计算,并适当介绍混凝土结构、木结构和圬工结构基本构件的设计计算原理。

在外荷载或其他原因(如温度变化、地基不均匀沉陷)的作用下,结构将产生内力和变形(统称为“作用效应”),构件有可能由于强度或刚度不足而发生破坏,或因变形过大而不能正常使用。因而,在设计基本构件时,要求构件本身具有一定的抵抗破坏和变形的能力(称为“抗力”)。构件抗力的大小与构件的材料性质、几何形状、截面尺寸、受力特点、工作条件、构造特点以及施工质量等因素有关。当其他条件确定时,若截面尺寸过小,则构件有可能因过大的变形而不能正常使用,或因强度不够而导致结构崩塌;反之,若截面尺寸过大,则构件的抗力又将过分“富裕”,从而造成人力、物力上的过大浪费。因此,如何正确处理好构件的作用效应与抗力之间的关系是构件设计的主要内容。

《桥梁结构设计原理》是一门“介于基础课和专业课之间的专业技术基础课”。它不仅是后续专业课程学习的重要基础,而且与《土木工程材料》、《材料力学》等先修课程关系密切。因此,在学习过程中,应注意与先修课程,特别是与《材料力学》的区别和联系。

结构设计既有较强的理论性,又与工程实践、科学实验联系紧密。在学习过程中,应着重了解构件的受力和变形特点,以及在此基础上建立的符合实际受力情况的力学计算图式。由于构件的受力和变形与材料性能密切相关,而各种材料(钢、木、混凝土、石等)的性

能各不相同,故构件的力学计算图式往往依赖于科学实验结果,其计算公式具有一定的经验性和近似性,要特别注意公式的适用条件。

结构设计的另一显著特点是设计的多方案性和综合性。满足结构设计要求的答案往往不是惟一的,确定方案时要综合考虑功能、材料、造价、施工等方面的因素,而且设计工作常常不是一次就可以获得成功,需要多次修改和不断完善设计。此外,在设计中还应注意与现行设计规范或规程相结合,但也不要完全被规范所束缚,要充分发挥主动性和创造性。

第一节 各种材料结构的特点及使用范围

目前,国内外桥梁结构发展的总趋势是:轻型化、标准化和机械化。桥梁结构基本构件的设计也应符合上述要求。

一、各种材料结构的特点

(一) 结构重量

为了达到轻型化和增大结构的跨越能力,构件应力求采用高强材料和薄壁结构。就常用的结构材料而言,钢材虽然单位体积重量较大,但强度高;而木材的单位体积重量和强度均较低。通常,可以用材料的强度指标与其相对密度之比(称为比强度)作为结构相对重量的比较标准。

以钢材为基准,其他结构材料的比强度与钢材比强度之比大致为:受压构件:木材 0.40~0.67,钢筋混凝土 0.09~0.25,砖、石 0.04~0.11;受弯构件:木材 0.40~0.67,钢筋混凝土 0.10~0.33,预应力混凝土 0.33~0.50。由此可见,砖、石和钢筋混凝土结构的比强度最低,结构的相对重量最大,而木材的比强度约为钢材的一半,预应力混凝土的比强度约为钢材的 $1/3 \sim 1/2$ 。因此,从结构重量方面考虑,桥梁结构采用钢结构、木结构和预应力混凝土结构是合理的。

(二) 使用性能

就结构的耐久性而言,预应力混凝土结构最好,钢筋混凝土结构和圬工结构次之;而钢结构和木结构较差,两者均需要采取适当的防护措施和定期进行维修保养。此外,木材的耐火性很差;而钢材由于相对重量较小,构件的截面尺寸和刚度也较小,钢结构容易产生过大的变形和振动。

(三) 建筑速度

圬工结构和混凝土结构易于就地取材,而钢、木结构则便于快速施工。由于混凝土的凝结硬化需要较长的时间,因而混凝土结构的施工工期一般较长,尽管装配式混凝土结构可以在预制场进行工业化批量生产,但建筑速度仍然比钢、木结构慢。

二、各种材料结构的使用范围

(一) 钢结构

由于钢材材质均匀、力学性能稳定、强度高、结构重量轻,故钢结构跨越能力大,适用于修建高、大建筑物。钢结构构件可预制或定型杆件,易于标准化,且装配、拆卸十分方便,故在军用桥梁和临时性的辅助工程中得到广泛应用。

(二) 钢筋混凝土结构

钢筋混凝土具有易于就地取材、耐久性好、刚度大和可模性(即可根据工程需要浇筑成各种几何形状)等优点,采用标准化、装配化的预制构件,能较好地保证工程质量和加快施工进度。因此,钢筋混凝土结构的应用范围十分广泛,如各种桥梁、涵洞、挡土墙、路面、水工结构和房屋建筑等。但是,由于混凝土材料的抗拉强度(约为抗压强度的 $1/8 \sim 1/18$)比抗压强度低得多,构件受力后,在受拉区一般会产生裂缝,因而结构刚度将有所减小;而且由于受裂缝宽度不能过大的限制,钢筋混凝土结构不利于高强钢材的利用,同时也限制了高强混凝土的应用。因而,钢筋混凝土结构构件的截面尺寸偏大,结构自重也相应较大。

(三) 预应力混凝土结构

构件在承受荷载之前预先对混凝土受拉区施加了适当的压应力的结构称为预应力混凝土结构。在正常使用条件下,可以人为地控制预应力混凝土构件截面上只出现很小的拉应力或不出现拉应力,从而延缓裂缝的产生和发展。预应力混凝土结构可充分利用高强度钢材和高标号混凝土的“高强”,减小结构自重,增大跨越能力。因此,预应力混凝土结构的适用范围比钢筋混凝土结构更为广泛,特别适用于大跨度和不允许出现裂缝的混凝土结构,如大跨度桥梁和楼(屋)盖结构等。但值得注意的是,预应力混凝土结构需要专门的预应力设备,其施工难度比钢筋混凝土结构大。

(四) 圬工结构

混凝土、石、砖等材料抗压强度较高,而抗拉强度很低,因而圬工结构主要用于受压为主的结构构件,如拱圈、桥墩(台)、基础和挡土墙等。

(五) 木结构

木结构在古建筑中应用十分普遍。但是,由于我国木材资源不足和木材的耐久性、耐火性差等因素,在现代工程中,木结构一般不用于永久性结构,而主要应用于临时性抢险抢修工程、军用桥梁以及施工过程中的辅助性工程,如便桥、工棚、支架、模板等。

此外,高强铝合金、复合材料的相对重量比钢材小得多,铝合金的比强度约为钢材的 $2 \sim 3$ 倍,而玻璃纤维、碳纤维的比强度可达钢材的 30 倍左右。但是,由于造价太高,复合材料目前主要应用于航天航空、军用装备和特殊结构或构件。

第二节 结构设计的基本要求及结构可靠性

公路桥涵的设计应符合“技术先进、安全可靠、适用耐久、经济合理”的总要求。结构设计的基本目的是：以最经济的途径，使结构在预定的使用期限内满足各种预定功能的要求，即在结构的可靠与经济之间选择一种合理的平衡。

一般来说，结构应满足安全性、适用性和耐久性的要求。结构的可靠问题，用可靠性来描述。结构的安全性、适用性和耐久性总称为结构的可靠性。

结构的安全性是指在规定的期限内，在正常施工和正常使用情况下，结构能承受可能出现的各种作用（包括直接施加于结构上的荷载及间接施加于结构的引起结构外加变形或约束变形的原因）；在偶然事件（如罕遇地震，撞击等）发生时及发生后，结构虽然发生局部损坏，但不致于出现整体破坏或连续倒塌，仍能保持必需的整体稳定性。结构的适用性是指在正常使用情况下，结构具有良好的工作性能，结构或结构构件不发生过大的变形或振动。结构的耐久性是指结构在正常维护情况下，材料性能虽然随时间变化，但结构仍能满足预定功能的要求。因此，结构可靠性也可定义为：“结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定功能的能力。”

结构的可靠性要求结构物的整体及其各个组成部分在规定期限内具有足够的强度、稳定性、刚度和耐久性。强度要求是指结构物在使用期内，它的各个部件及其联结的各个细部都符合规定的要求或具有足够的安全储备，如最大应力或截面弯矩不超过规定值。稳定性要求是指整个结构物及其各个部件，在计算荷载作用下都处于稳定的平衡状态，不发生整体或局部失稳。结构的刚度要求是指在计算荷载作用下，结构物的变形必须控制在允许的范围内。结构的耐久性要求是指在正常维护和正常使用的情况下，在规定的时期内，结构的强度、稳定性和刚度都能满足要求。

为了实现结构的可靠性与经济性的合理平衡，结构物的所有受力构件和联结细部都必须进行设计和验算。在进行结构设计时，首先应根据材料的性质、受力特点、使用环境和施工条件等因素，进行综合分析；然后采取合理的构造措施，确定构件的几何形状和尺寸；最后进行验算和修正。此外，结构物的结构形式必须受力明确（传力路线合理、清晰）、构造简单、施工方便和易于养护等。必须强调的是，正确处理好结构构造十分重要，这与进行结构计算同等重要，有时甚至更为重要。

第三节 结构设计理论的发展与应用

最早的结构设计以纯经验或生物比拟为依据，只要所建造的结构在施工后不破坏，就认为是安全可用的。到19世纪，由于材料力学、弹性力学和材料试验科学的发展，建立了以弹性理论为基础的容许应力设计法。20世纪初期，随着对工程结构破坏性质的深入研究，人们提出了破坏阶段设计法，最初为破坏荷载法（最大荷载法），后改为破坏应力法，又称为新的容许应力设计法。到20世纪50年代，苏联学者明确提出了结构极限状态

的概念,随后,出现了单一系数或多项系数表达的极限状态设计法,但其系数主要依据经验确定,因而实际上为“经验极限状态设计法”。容许应力设计法和极限状态设计法都将影响结构可靠性的各种因素视为确定性的量,因而国际上统称为“定值设计法”。实际上,影响结构可靠性的各种因素不是确定的量,而是具有不确定性的随机变量。20世纪70年代以来,随着人们对结构可靠性认识的不断深入以及工程实践和科学实验资料的积累,逐步形成了以结构可靠性理论为基础的概率极限状态设计法,也称为“可靠度设计法”。

一、容许应力设计法

容许应力设计法的基本原则是:结构构件的实际应力小于或等于结构设计规范所规定的容许应力。其表达式为

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

式中: σ_j 为结构构件的计算应力,按结构规范规定的标准荷载,采用线弹性理论计算; $[\sigma]$ 为材料的容许应力。

材料容许应力的一般表达式为

$$[\sigma] = \frac{\sigma_R}{K} \quad (1-2)$$

式中: σ_R 为结构构件的极限应力,塑性材料取为屈服极限,脆性材料取为强度极限; K 为结构构件的安全系数,其数值大于1,一般由经验判断确定:塑性材料取1.4~1.6,脆性材料取2.5~3.0。

新的容许应力设计法仍然采用式(1-1)的形式,但在确定容许应力时按极限状态考虑,并计入了荷载的变异性、构件强度的变异性、构件重要性等因素的影响。对于钢筋,容许应力的表达式为

$$[\sigma] = \frac{R_s^b}{K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4} \quad (1-3)$$

式中: K_0 为经验系数; K_1 为荷载变异系数,主要考虑实际荷载超过规范给定标准荷载的影响; K_2 为构件强度变异的材料强度影响系数,主要考虑材料的实际强度与规范给定标准值不同的影响; K_3 为构件强度变异的其他影响系数,主要考虑设计计算公式与实际的出入; K_4 为构件重要性系数。

容许应力设计法具有一些明显的优点:一是应用方便,设计者对其比较熟悉;二是大多数工程结构在使用过程中基本处于弹性阶段,按容许应力法设计一般可以满足正常使用的要求。由于我国目前钢、木结构桥梁的应用相对较少,科研和工程实践积累的资料也较少,并考虑到容许应力设计法的上述优点,现行《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》(JTJ 025-86)和军用桥梁结构仍然采用此法。

但是,容许应力设计法存在两方面的突出缺点:一是按线性弹性理论计算结构应力,并以构件危险截面的某一点或某一局部的应力作为其强度条件或屈服条件,对于截面应力分布不均匀的情况或超静定结构,其设计过于保守;二是不能较好地反映结构的可靠性,此法所给定的容许应力不能保证各种结构具有比较一致的可靠水平。

二、极限状态设计法

结构整体或其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时,此特定状态称为该功能的极限状态,通常分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。此外,破坏—安全极限状态尚处于研究阶段,由于缺乏足够的统计资料和工程实践经验,规范中还没有作为一种独立的极限状态。

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出现不适于继续承载的变形或变位。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) 结构或结构的一部分作为刚体失去平衡(例如,倾覆、滑移等);
- (2) 结构构件或其连接,因超过材料强度而破坏(包括疲劳破坏),或因过度的塑性变形而不能继续承载;
- (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)。

承载能力极限状态的计算以塑性理论或弹塑性理论为基础,其设计原则是:荷载效应不利组合的设计值小于或等于结构抗力效应的设计值,其通用表达式为

$$S_d(\gamma_{s0}\psi\sum\gamma_{s1}Q)\leq R_d\left(\frac{R}{\gamma_m}, a_k\right) \quad (1-4)$$

式中: $S_d(\cdot)$ 为荷载效应函数; Q 为荷载在结构上产生的效应,如轴力、剪力、弯矩等; ψ 为荷载组合系数,按规范采用; γ_{s0} 为结构的重要性系数; γ_{s1} 为荷载安全系数; $R_d(\cdot)$ 为结构抗力效应函数; γ_m 为材料安全系数; R 为材料的极限强度; a_k 为结构的几何尺寸。

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的某项规定的限值。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(如出现过大的裂缝);
- (3) 影响正常使用的振动;
- (4) 影响正常使用的其他特定状态。

正常使用极限状态的计算以弹性理论或塑性理论为基础,并进行下列三项校核:

1. 限制应力

$$\sigma_d \leq \sigma_L \quad (1-5)$$

2. 限制短期荷载下的变形

$$f_d \leq f_L \quad (1-6)$$

3. 限制裂缝宽度

$$\delta_d \leq \delta_L \quad (1-7)$$

式中: σ_d 、 f_d 、 δ_d 分别为计算得到的应力、变形和裂缝宽度,按弹性理论或塑性理论计算; σ_L 、 f_L 、 δ_L 分别为应力、变形和裂缝宽度的限值,按相关规范采用。

极限状态设计法较为全面地考虑了材料的塑性,提出了极限状态的概念和类型,给出

了设计表达式和限值,在理论上比容许应力设计法前进了一大步,且其设计表达式也易于掌握和应用。但是,极限状态设计法对结构可靠性问题的考虑,仍然采用安全系数的定值描述方法,且在确定各分项安全系数时还是以工程经验为主。因此,在对结构可靠性的描述和表达上,极限状态设计法仍然存在严重的缺陷。

三、概率极限状态设计法

容许应力设计法与极限状态设计法在对结构可靠性的描述和表达上基本相同,只是在取值的处理方法上,由于当时的条件不同而有一定的差异。容许应力设计法采用单一的安全系数,或由分项安全系数合成的单一安全系数来描述结构的可靠度(当时称为安全度),根据工程实践经验确定结构的容许应力。极限状态设计法采用分项安全系数来描述结构的可靠度,各分项安全系数根据经验和部分统计分析确定。这两种设计方法均采用了确定性的量来描述结构的可靠度,属于“定值设计法”。

尽管用安全系数来描述结构的可靠度,在结构理论发展史上起到了一定的作用,但是,科学技术的发展和人们对结构设计理论研究的不断深入,揭示出定值设计法存在的严重缺陷:

(1) 影响结构设计的诸变量,如各种荷载、结构抗力等,都是具有不确定性的随机变量,而定值设计法将其视为确定性的普通变量;

(2) 结构可靠度应采用结构完成预定功能的概率来表示,而定值设计法错误地认为结构安全系数就是结构可靠度;

(3) 安全系数的取值大多以工程实践经验为主,没有足够的实际统计分析数据作为依据,且各种设计理论所设计的结构构件,采用的安全系数不统一,相互之间没有可比性。

以可靠性理论为基础的概率极限状态设计法具有以下主要特点:

(1) 以结构完成预定功能概率的大小来度量结构可靠度,从统计数学的观点比较科学地给出了可靠度的概率定义,较全面地考虑了影响结构可靠度诸因素(荷载、材料性能、几何参数和计算模型等)的客观变异性或不确定性。

(2) 根据结构施工及使用阶段的特点,明确地将结构所处环境与使用要求用三种设计状况(持久状况、短暂状况、偶然状况)和两种极限状态(承载能力极限状态、正常使用极限状态)加以描述,对每种设计状况和极限状态可以采用相应的结构体系(弹性体系、弹塑性体系、塑性体系)与可靠度水平,充分体现了结构可靠度设计区别对待的辩证思想。

(3) 为了实现预期的结构设计可靠度,对结构材料及结构构件提出了明确的质量要求。所谓结构构件及材料的质量,系指有关质量特征的全体,包括构件强度变异、构件尺寸误差、局部缺陷大小等,并用质量特征的概率分布和统计参数描述。材料与构件的质量,因受各种偶然因素的影响,不可避免地存在一定幅度的波动,从而直接影响到结构设计可靠度。为了实现预期的结构设计目的,必须依据结构可靠度要求对结构材料及构件的质量提出明确的要求,对其波动幅度提出限制性规定。

国际上将概率极限状态设计法按精度不同分为三个水准:水准Ⅰ——半概率法;水准Ⅱ——近似概率法;水准Ⅲ——全概率法。目前,大部分国家的设计规范以及我国大部分

现行公路桥涵结构设计规范都属于水准Ⅰ；近似概率法也已经进入实用阶段，我国《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153-92)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068-2001)、《铁道工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50216-94)以及《公路工程可靠度设计统一标准》(GB/J 50283-1999)等属于水准Ⅱ；而全概率法尚未进入实用阶段。

第五节 结构设计的概率极限状态法基本原理

一、结构可靠度定义及其相关概念

结构可靠度的定义为：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。结构可靠度是结构可靠性的概率度量，是建立在统计数学基础上，经过大量的调查、数据统计分析和计算所确定的。

结构可靠度定义中的“规定的时间”是指分析结构可靠度时考虑各基本变量与时间关系所取用的基准时间参数，称为设计基准期。其作用是：作为结构可靠度计算的参考时间坐标，即只有在此时间域内所计算的可靠度结果有效。结构可靠度是时间的函数，一般而言，设计基准期越长，其相应的可靠度越高。同类结构可根据结构的重要程度采用不同的设计基准期。《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2004)规定：公路桥涵结构的设计基准期为100年。需指出，设计基准期与结构的实际使用寿命有一定的联系，但不能简单地等同起来。当结构使用年限超过设计基准期后，结构的失效概率将比设计时的预期值增大，但并不等于结构丧失功能或报废。

“规定的条件”是指结构设计时所确定的正常设计、正常施工和正常使用的条件。即在设计基准期内，结构所受到的作用（直接作用和间接作用）、结构构件及材料的质量等都要符合相关规范或规程的要求，而人为的过失不在考虑之列。

“预定功能”是指结构的安全性、适用性和耐久性要求，即在设计基准期内，结构应满足其承载能力和正常使用功能。完成各项功能的标志用“极限状态”来衡量。

工程结构设计的根本目的就是要使结构能以适当的可靠度满足各项预定功能的要求，也就是要使所设计结构的失效概率小到可以被接受的程度。结构的失效概率愈小，其完成预定功能的概率就愈大。因此，通常采用失效概率或破坏概率作为结构的可靠指标。

可以被接受的失效概率与结构破坏后造成损失的严重程度有关。承载能力极限状态涉及结构的安全问题，可能导致人员伤亡和大量财产损失，必须具有较高的可靠度或较低的失效概率。因此，《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283)规定：在桥梁结构承载能力极限状态设计时，应根据结构破坏可能产生后果的严重程度，划分为以下三个安全等级：

- 特大桥、重要大桥的安全等级为一级，其破坏后果很严重，设计可靠度最高；
- 大桥、中桥、重要小桥的安全等级为二级，其破坏后果严重，设计可靠度中等；
- 小桥、涵洞的安全等级为三级，其破坏后果不严重，设计可靠度较低。

二、结构功能函数和极限状态方程

结构可靠度通常受各种作用（或荷载）效应、材料性能、结构几何参数等诸多因素的影响，以这些因素为基本变量 $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ ，可建立极限状态方程

$$Z = g(Z_1, Z_2, \dots, Z_n) = 0 \quad (1-8)$$

式中： $Z = g(\cdot)$ 称为结构功能函数。

结构功能函数用来描述结构的各种功能，是相应功能基本变量的函数。就承载功能而言，极限状态设计法以功能函数不取负值为可靠条件进行设计，即 $Z = g(Z_1, Z_2, \dots, Z_n) \geq 0$ ，式（1-8）称为承载能力极限状态方程。

概率极限状态设计法的基本变量为随机变量，若功能函数中仅包含结构抗力 R 和作用综合效应 S 两个基本变量，则功能函数可写为

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (1-9)$$

概率极限状态方程为

$$Z = g(R, S) = R - S = 0 \quad (1-10)$$

概率极限状态设计法的特点，就是按结构功能函数的取值，严格地把结构区分为下列三种不同状态：

- (1) $Z = R - S > 0$ ，意味着结构抗力大于作用效应，结构处于可靠状态；
- (2) $Z = R - S = 0$ ，意味着结构抗力等于作用效应，结构处于极限状态；
- (3) $Z = R - S < 0$ ，意味着结构抗力小于作用效应，结构处于失效状态。

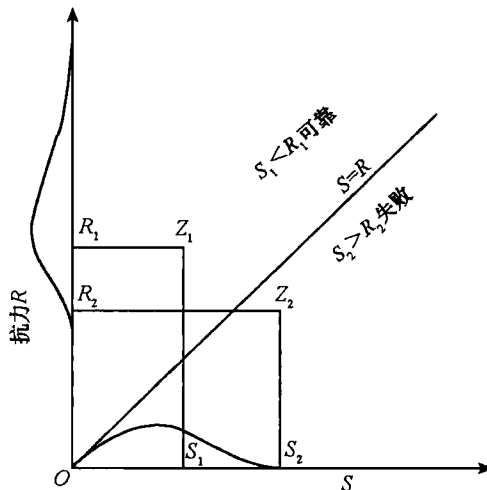


图 1-1 结构所处状态

图 1-1 示出了这三种状态。图中竖坐标表示抗力 R ，并给出了 R 的概率密度函数曲线， R 值取其概率分布的低分位值；横坐标表示荷载效应 S ，并给出了 S 的概率密度函数曲线， S 值取其概率分布的高分位值。图中斜率为 45° 的直线表示极限状态 $Z = R - S = 0$ ；直线上方区域， $S < R$ ，表示结构处于可靠状态；直线下方区域， $S > R$ ，表示结构处于失