

土木工程系列教材

钢结构基本原理

(第二版)

主编 王仕统

参编 韩小雷 陈 兰 裴若娟

季 静 徐忠根

主审 钟善桐

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 简 介

本书根据全国土木工程专业指导委员会 1999 年 10 月制定的《钢结构设计原理》教学大纲以及建设部颁布的最新规范编写。主要内容包括钢结构材料、连接、轴心受力构件与索、实腹式受弯构件、抗弯和压弯构件、钢-砼组合梁、塑性设计、构件和结点的抗震性能等。侧重于基本原理的阐述,并有适量的例题和习题,书末附有钢结构设计中常用的资料。

本书适合于高等院校土木工程专业本科教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构基本原理/王仕统主编 韩小雷等编. —2 版. —广州:华南理工大学出版社, 2007.6

(土木工程系列教材)

ISBN 978-7-5623-2197-2

I. 钢... II. ①王... ②韩... III. 钢结构-高等学校-教材 IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 038848 号

总 发 行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼 邮编 510640)

营销部电话 020-87113487 87111048(传真)

E-mail scut202@scut.edu.cn

http://www.scutpress.com.cn

责任编辑 赖淑华

印 刷 者 湛江日报社印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 24.75 字数 603 千

版 次 2007 年 6 月第 2 版 2007 年 6 月第 2 次印刷

印 数 3001~5000 册

定 价 38.50 元

版权所有 盗版必究

前 言

本书根据现行《钢结构设计规范(GB 50017—2003)》编写,可作为土木工程专业大学本科生的教材,也可用于大学专升本、专科和函授的教材,讲授内容可根据具体情况取舍。由于钢结构具有许多优点,在我国建筑工程中,钢结构从大跨度空间钢结构、高层钢结构、轻钢结构、钢-砼组合结构及住宅钢结构等五个方面发挥了独特作用。建设部总工程师姚兵指出:21世纪是钢结构的世纪。

由于土木工程专业涉及面较广,在课程设置上,土木工程专业教学指导委员会采纳了教育部“面向21世纪土建类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”课题组的建议,将原来的钢结构课程分为基本原理和设计两大部分。本书为《钢结构基本原理》,不久将出版《钢结构设计》。

本教材十分注意钢结构基本理论的阐述,通过典型例题加深钢结构的基本概念。学生学完后,能应用钢结构设计规范,进行钢结构基本构件的设计。

本书共9章、10个附录。主要内容为:第1章绪论,第2章钢结构材料,第3章钢结构连接,第4章轴心受力构件与索,第5章实腹式受弯构件,第6章拉弯和梁-柱,第7章钢-砼组合梁,第8章塑性设计,第9章构件和结点的抗震性能。

本书由华南理工大学王仕统教授主编,第1、4、5、6章由王仕统教授编写,第2章2.1节、2.2节由华中科技大学裴若娟教授编写,第2、3章由华南理工大学陈兰副教授编写,第7章由华南理工大学季静副教授编写,第8章由华南理工大学韩小雷教授编写,第9章由广州大学徐忠根副教授编写。

哈尔滨工业大学钟善桐教授仔细审阅了全书,并提出了许多中肯的修改意见,在此表示衷心的感谢。

编 者

2005.5 于广州

目 录

第 1 章 绪论.....	(1)
1.1 钢结构的特点和应用范围	(1)
1.1.1 钢结构的特点	(1)
1.1.2 钢结构的应用范围	(2)
1.2 钢结构的设计计算方法	(3)
1.2.1 概述	(3)
1.2.2 数理统计中的有关名词	(5)
1.2.3 有关极限状态设计的几点说明	(9)
1.2.4 结构可靠度的计算方法	(11)
1.2.5 实用分项系数 γ 的结构设计表达式	(13)
1.3 纯钢结构工程一览表.....	(14)
第 2 章 钢结构材料	(18)
2.1 钢结构对材料的要求.....	(18)
2.2 钢材的工作性能.....	(18)
2.2.1 单向拉伸时的工作性能	(18)
2.2.2 受压、受剪时的工作性能	(19)
2.2.3 钢材的破坏形式	(20)
2.3 钢材的主要性能及其测定.....	(20)
2.4 影响钢材性能的因素.....	(22)
2.4.1 化学成分的影响	(22)
2.4.2 冶炼、浇铸、轧制过程的影响	(23)
2.4.3 钢材缺陷的影响	(23)
2.4.4 钢材硬化的影响	(24)
2.4.5 温度的影响	(24)
2.4.6 应力集中的影响	(25)
2.5 复杂应力状态下的屈服条件.....	(26)
2.6 钢材的疲劳.....	(26)
2.6.1 常幅疲劳	(27)
2.6.2 变幅疲劳	(28)
2.7 建筑钢材的种类和规格.....	(29)
2.7.1 建筑钢材的种类	(29)
2.7.2 钢材的选择	(30)
2.7.3 钢材的规格	(31)
习题	(32)
第 3 章 连接	(33)
3.1 钢结构的连接方法.....	(33)

3.2	焊缝及其连接形式.....	(35)
3.2.1	焊接方法.....	(35)
3.2.2	焊缝连接形式.....	(36)
3.2.3	焊缝类别.....	(37)
3.2.4	焊接位置.....	(37)
3.2.5	焊缝符号.....	(38)
3.3	角焊缝的构造和计算.....	(40)
3.3.1	角焊缝的形式和受力性能.....	(40)
3.3.2	角焊缝的构造要求.....	(41)
3.3.3	角焊缝的强度计算公式.....	(43)
3.3.4	直角角焊缝连接的计算.....	(46)
3.3.5	斜角角焊缝连接的计算.....	(55)
3.4	对接焊缝的构造和计算.....	(56)
3.4.1	对接焊缝的构造.....	(56)
3.4.2	对接焊缝的计算.....	(56)
3.5	焊接应力和焊接变形.....	(61)
3.5.1	焊接应力的分类和产生原因.....	(61)
3.5.2	焊接应力对结构性能的影响.....	(62)
3.5.3	焊接变形.....	(63)
3.6	螺栓连接的构造.....	(64)
3.6.1	螺栓的直径.....	(64)
3.6.2	螺栓的排列和间距.....	(65)
3.7	普通螺栓连接的计算.....	(67)
3.7.1	抗剪螺栓.....	(67)
3.7.2	抗拉螺栓.....	(75)
3.7.3	螺栓同时受拉和受剪.....	(79)
3.8	高强度螺栓连接的计算.....	(81)
3.8.1	高强度螺栓连接的分类和工作性能.....	(81)
3.8.2	高强度螺栓摩擦型连接的计算.....	(83)
3.8.3	高强度螺栓承压型连接的计算.....	(85)
	习题.....	(88)
第4章	轴心受力构件与索.....	(91)
4.1	轴心受力构件的强度(strength)和刚度(stiffness)计算.....	(92)
4.1.1	强度.....	(92)
4.1.2	刚度.....	(93)
4.2	实腹式轴心受压构件的弯曲屈曲(flexural buckling).....	(96)
4.2.1	理想轴心压杆的弯曲屈曲.....	(97)
4.2.2	工程压杆的弯曲屈曲.....	(100)
4.2.3	柱子曲线的确定方法.....	(108)

目 录

4.2.4 我国规范的整体稳定计算	(110)
4.3 实腹式轴心受压构件的局部屈曲	(114)
4.3.1 矩形薄板的屈曲	(114)
4.3.2 组合工字形截面构件的腹板和翼缘板的局部屈曲	(117)
4.3.3 组合工字形截面构件的板件宽厚比限值	(118)
4.3.4 其他组合截面杆的板件宽厚比限值	(119)
4.4 实腹式轴心压杆的截面设计	(121)
4.4.1 截面形式	(121)
4.4.2 截面选择和验算	(122)
4.4.3 板件的连接焊缝	(122)
4.5 格构式轴心受压构件的设计	(126)
4.5.1 对虚轴的换算长细比	(127)
4.5.2 截面选择	(132)
4.5.3 缀材计算	(132)
4.6 柱头和柱脚	(139)
4.6.1 柱头	(139)
4.6.2 柱脚	(143)
4.7 实腹式轴心压杆的扭转屈曲(torsional buckling)	(147)
4.7.1 外力 N 对扭转变形杆的任意截面的作用扭矩 M_{T1}	(148)
4.7.2 自由扭转力矩 M_s	(149)
4.7.3 约束扭转力矩 M_w	(149)
4.7.4 杆扭转后扭转力矩的平衡方程	(149)
4.8 实腹式轴心压杆的弯扭屈曲(torsional - flexural buckling)	(151)
4.9 钢索计算简介	(154)
4.9.1 柔性单索	(154)
4.9.2 劲性索	(163)
4.9.3 马鞍形索网概念	(165)
习题	(166)
第5章 实腹式受弯构件	(168)
5.1 梁格的布置	(168)
5.2 抗弯强度(bending strength)	(169)
5.3 规范[1]采用的强度计算公式	(172)
5.3.1 弯曲正应力和剪应力	(172)
5.3.2 局部压应力	(173)
5.3.3 折算应力	(174)
5.4 开口薄壁构件的弯曲和扭转	(175)
5.4.1 剪力流理论和剪力中心 S	(175)
5.4.2 开口薄壁杆的扭转	(180)
5.5 闭口薄壁构件的自由扭转	(187)

5.6	梁的整体稳定性(弯扭屈曲)	(188)
5.6.1	基本概念	(188)
5.6.2	临界弯矩 M_{xcr}	(189)
5.6.3	整体稳定系数 φ_b	(192)
5.6.4	整体稳定性的保证	(195)
5.7	焊接组合梁的局部稳定和加劲肋(stiffening rib)设计	(197)
5.7.1	受压翼缘板的屈曲	(197)
5.7.2	腹板的屈曲与加劲肋(rib)的配置	(198)
5.8	薄板的屈曲后强度	(207)
5.8.1	受压板的屈曲后强度	(207)
5.8.2	梁腹板的屈曲后强度	(208)
5.9	考虑腹板屈曲后强度的梁设计	(211)
5.9.1	腹板的 V_u 值计算	(212)
5.9.2	抗弯承载力 M_{eu}	(212)
5.9.3	梁的计算式	(213)
5.9.4	横肋设计特点	(213)
5.10	梁的刚度验算	(214)
5.11	型钢梁的截面选择	(214)
5.11.1	单向弯曲型钢梁	(215)
5.11.2	双向弯曲型钢梁	(217)
5.12	焊接组合梁的截面设计	(222)
5.12.1	截面高度	(222)
5.12.2	腹板和翼缘板的尺寸	(224)
5.12.3	翼缘焊缝的计算	(224)
5.12.4	焊接组合梁的截面改变	(231)
5.13	梁的拼接	(233)
5.14	主、次梁连接和梁的支座	(235)
5.14.1	主、次梁连接	(235)
5.14.2	梁的支座	(236)
	习题	(237)
第6章	拉弯和压弯构件(梁-柱)	(238)
6.1	实腹式拉弯和梁-柱构件	(238)
6.1.1	破坏形式	(238)
6.1.2	强度计算	(239)
6.1.3	梁-柱构件的整体稳定性	(241)
6.1.4	梁-柱的局部屈曲	(248)
6.1.5	梁-柱的构造要求	(250)
6.2	格构式梁-柱的计算	(254)
6.2.1	弯矩绕实轴 x 作用	(254)

目 录

6.2.2 弯矩绕虚轴 y 作用.....	(255)
6.3 柱脚设计	(257)
习题.....	(260)
第7章 钢-砼组合梁.....	(262)
7.1 钢-砼组合构件的分类和发展	(262)
7.1.1 组合构件的分类	(262)
7.1.2 组合结构的发展与应用	(265)
7.2 钢-砼组合梁分析	(266)
7.2.1 概述	(266)
7.2.2 组合梁截面的弹性分析	(267)
7.2.3 组合梁截面的塑性分析	(274)
7.2.4 抗剪连接件的设计	(282)
第8章 塑性设计.....	(286)
8.1 塑性设计的基本思想	(286)
8.1.1 截面全塑性弯矩 M_p	(286)
8.1.2 内力重分布	(287)
8.2 塑性设计对钢材的要求	(287)
8.3 受弯构件塑性设计	(288)
8.3.1 抗弯强度计算	(288)
8.3.2 抗剪强度计算	(288)
8.4 梁-柱构件塑性设计	(288)
8.4.1 抗弯强度计算	(288)
8.4.2 抗剪强度计算	(288)
8.4.3 弯矩作用平面内稳定计算	(288)
8.4.4 弯矩作用平面外稳定计算	(289)
8.5 塑性设计的构造要求	(289)
8.5.1 板件宽厚比限值	(289)
8.5.2 构件设计长细比	(289)
8.6 塑性内力分析方法	(290)
8.6.1 静力法	(290)
8.6.2 机构法	(291)
第9章 构件和节点的抗震性能.....	(303)
9.1 抗震钢结构的材质要求及结构破坏断裂的主要原因	(303)
9.2 构件的抗震性能	(304)
9.3 节点的抗震性能	(308)
9.4 节点的设计	(312)
9.4.1 梁与柱的连接	(313)
9.4.2 柱与柱的连接	(315)
9.4.3 梁与梁的连接	(316)

附录 1	钢材的化学成分、机械性能和钢材、连接的强度设计值	(317)
附录 2	型钢表	(321)
附录 3	几种截面回转半径 i 的近似值	(354)
附录 4	轴心受压构件的稳定系数 φ	(355)
附录 5	受弯构件的容许挠度	(359)
附录 6	实腹式梁的整体稳定系数 φ_b	(360)
附录 7	柱的计算长度系数 μ	(364)
附录 8	疲劳计算时的构件和连接分类	(376)
附录 9	螺栓和锚栓规格	(379)
附录 10	扇形惯性矩 I_w 及剪心 S 的位置	(380)
参考文献	(381)

第 1 章 绪 论

从 1996 年开始,中国钢产量超过 1 亿 t,一直居世界之首。

1997 年 11 月,建设部发布《中国建筑技术政策(1996—2010)》,提出大力推广应用钢结构,这在我国还是第一次,这实际上就是将“节约用钢”(限制用钢)的政策转变为“合理用钢”的政策。我国钢结构将从高层钢结构、大跨度空间钢结构、轻型钢结构、钢-砼组合结构和房屋住宅钢结构等五大方面,在建筑工程中发挥独特作用。

1998 年 10 月,建设部发文《关于建筑业进行推广应用 10 项新技术的通知》,其中第 8 项新技术就是钢结构技术。

2000 年 5 月,建设部、国家冶金工业局建筑用钢协调组在北京召开了全国建筑钢结构技术发展研讨会,提出 2005 年和 2010 年建筑钢结构用钢量分别达到钢材总产量的 3% 和 6% (世界工业发达国家建筑钢结构用钢量占钢材总产量 30% 以上,美国和日本高达 50%)。

2003 年中国钢材消费超过美国和日本的总和,中国钢材市场销售旺盛,钢厂库存下降。2003 年销售上升、价格上涨。

2003 年 5 月,建设部编制 2010 年建设事业技术政策(草稿),第八章为推进建筑工业化、现代化、提高行业创业综合实力,其中第 35 条政策是加大推广应用钢结构的力度。

2004 年我国生产钢材 2.8 亿吨、2005 年 3.5 亿吨、2006 年 4.2 亿吨。

“就建筑结构来说,21 世纪是钢结构的世纪”。在 2003 年 4 月全国建筑钢结构行业大会上,建设部总工程师姚兵同志就钢结构研究提出 9 大课题:① 钢结构体系的创新;② 钢结构设计的理念和实践;③ 钢结构的施工工业化、施工和检测机具的革新;④ 与钢结构匹配的建筑材料开发;⑤ 钢结构的设计、施工、防火与抗震标准的补充、修订和完善;⑥ 钢结构制造安装企业国内市场竞争力有待解决;⑦ 钢结构产业化和产业的各种技术经济政策;⑧ 各类钢结构的技术经济指标测算、分析和优化;⑨ 钢结构的信息化和发展战略。

1.1 钢结构的特点和应用范围

1.1.1 钢结构的特点

1. 钢材强度高、塑性大

由于钢材的塑性大(伸长率: $\delta \geq 20\%$),故钢结构的抗震性能好,是公认的强震地区合适的结构(图 1-1)。

由表 1-1 可见,通过精心设计的钢结构是最轻的结构,相应的地基基础也较省。

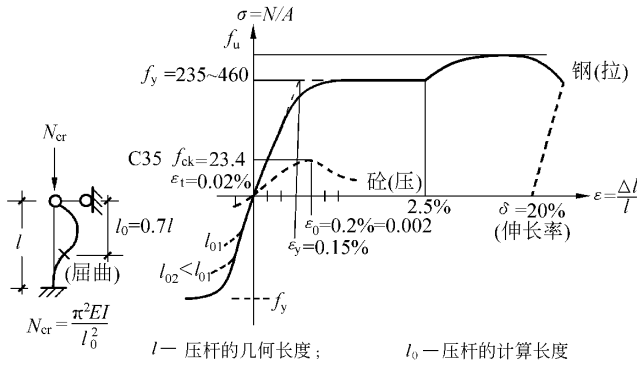


图 1-1 钢和砼 $\sigma - \epsilon$ 曲线的比较

表 1-1 $\gamma_s / \gamma_c, f_y / f_{ck}$ 比值

质量密度(kg/m ³)		强度(N/mm ²)	
钢 γ_s	砼 γ_c	f_y	f_{ck}
7580	2400	235(Q235)	23.4(C35)
$\gamma_s / \gamma_c \approx 3.27$ 倍		$f_y / f_{ck} \approx 10$ 倍	

2. 材质均匀、可靠性高

钢材的内部组织比较均匀、可视为各向同性材料(厚钢板除外),弹性模量较大(钢: $E_s = 200 \sim 210 \text{kN/mm}^2$, 砼: $E_c = 22 \sim 38 \text{kN/mm}^2$),最符合结构分析中的基本假定和计算方法,结构分析可靠性高。

3. 工业化程度高,建造工期短

钢结构一般采用工厂制造、工地安装的施工方法,精确度高,建造工期短,投资回收快。

4. 密封性好

钢材具有不渗漏性和可焊性。焊接连接后,可做到完全密封。如高压容器、大型油库、煤气柜、大型输气管等板壳钢结构等。

5. 耐热不耐火

当钢材辐射热 $\leq 150^\circ\text{C}$ 时,物理力学性能变化很小,钢结构能正常工作。但钢结构在火灾中的表现很差,因此,应对钢结构采取防火措施,如外包混凝土,或在钢材表面喷涂防火涂料等。

6. 易锈蚀

钢结构的最大缺点是容易锈蚀,因此,对钢结构构件必须先严格除锈(人工、抛丸等),然后刷防锈涂料或热镀锌(铝)等。也可采用耐候钢,但价格较贵。

1.1.2 钢结构的应用范围

钢结构的应用范围可用五个字来概括“高、大、重、特、轻”。

1. “高”——高层(tall building)与高耸(high rise)钢结构

由于钢材强度高,钢结构重量轻、构件体积小,装配化程度高,对高层建筑和高耸结构

(塔、桅结构)的水平抗震和抗风有利。

2. “大”——大跨度(long span)($l \geq 60\text{m}$)空间钢结构

大跨度空间钢结构广泛用于飞机库、体育场馆、展览厅、影剧院和大型交易市场等屋盖结构。其中刚性空间钢结构有平板网架和网壳;柔性空间钢结构有索、膜结构;杂交空间钢结构由刚、柔结构组合而成,可以形成多种多样的结构形式。

3. “重”(heavy)——重型厂房、重型吊车梁结构

重型厂房、大型钢铁企业的炼钢和轧钢车间、水压车间、造船厂的船体车间、重型机械厂、锻压车间、发电厂的锅炉车间等。炼钢厂浇铸车间吊车吨位可达 440t。在这里,钢结构的轻质高强、耐高温、冲击韧性好等优点可以得到最充分的发挥。

4. “特”(special)——高压的密封性容器的管道钢结构

由于钢结构的气密性好、耐高压,在特种结构,如煤气管道、输油管道、锅炉、储气罐和储油罐等上的应用很广泛。

5. “轻”(light)——轻型钢结构

轻型钢结构包括:①由圆钢、小角钢、薄壁型钢组成的结构;②门式钢架、拱型波纹钢屋盖结构,板厚 $t \leq 8\text{mm}$,用钢量一般不大于 30kg/m^2 。

1.2 钢结构的设计计算方法

1.2.1 概 述

结构物的安全与经济关键在于选择正确的结构方案,即概念设计(conceptual design),构件的设计在很大程度上取决于设计计算方法,过去曾采用过的计算方法有“容许应力法”和“破坏阶段法”,前法以线弹性理论为基础,它要求在规定的标准荷载 P_k 作用下,计算应力不大于规定的容许应力值,即 $\sigma \leq [\sigma] = f_{yk}/K$;而后法则考虑了材料的塑性性能,它要求由最大荷载 KP_k 产生的结构内力不大于构件的极限承载能力。上述两法中的安全系数 K (safety factor)主要凭经验和人的主观判断确定。

极限状态法是破坏阶段法的发展,它规定了结构的两种极限状态:承载能力极限状态和正常使用极限状态,并引入荷载系数、材料强度系数和构件工作条件系数,我国 20 世纪 60 年代制定的规范就采用了这个“三系数法”。我国《钢结构设计规范(TJ 17—74)》保留了极限状态法中对结构物的两种极限状态的规定,并对承载能力采用半概率(实为半统计)半经验的容许应力表达式:

$$\sigma \leq \frac{f_{yk}}{K_1 K_2 K_3} = \frac{f_{yk}}{K} = [\sigma] \quad (1-1)$$

式中 f_{yk} ——钢材屈服强度(yield strength)的标准值 $f_{yk} = \mu_f - \alpha_f \sigma_{f_0}$,其中 μ_f 、 σ_{f_0} 分别为材料强度的平均值、标准差; α_f 为材料强度的保证系数,当保证率 $\omega = 95\%$ 时, $\alpha_f = 1.645$;

K_1 、 K_2 、 K_3 ——荷载系数、材料系数、工作条件系数。

式(1-1)中 σ 中的荷载标准值: $Q_k = \mu_Q + \alpha_Q \sigma_Q$ (μ_Q 和 σ_Q 分别是荷载的平均值和标准差)。

上述传统设计法对安全所下的定义是：“在正常设计、施工和使用条件下，结构物对抵抗各种影响安全的不利因素所必须的安全储备的大小。”这个定义指出了结构所处的条件必须是“正常的”。这里的各种不利因素，事实上是对不定性的承认，但最后却规定一个定值的安全储备，仍然摆脱不出定值设计法(deterministic design method)的范畴。

马克思说过：“一种科学只有在成功地运用数学时，才算达到了真正完善的地步。”目前，国际上在应用概率论可靠度(reliability)理论解决结构安全度问题并统一各类结构的基本设计方法方面取得了显著的进展。结构可靠度理论研究者的增长速度差不多每 10 年增加一个数量级。

为了合理地统一我国各类建筑结构设计规范的基本设计原则，促进结构设计理论的发展，我国工程界也顺应国际工程界的总潮流，在中国建筑科学研究院的领导下，成立领导小组，下属设计、荷载、材料三大组(30 个单位)，对可靠度进行了有成效的研究，编制了《建筑结构设计统一标准(GBJ 68—84)》，并于 1985 年 1 月 1 日由国家计委批准试行。标准 GBJ 68—84 采用了“国际标准化组织”(International Standardization Organization, 简称 ISO)颁布的国际通用符号和国际单位制，编制过程中主要借鉴了下列国际文件：ISO 提出的《结构可靠性设计总原则》(ISO2394 修正草案)，国际“结构安全度联合委员会”(JCSS)编制的《结构统一标准规范的国际体系》(共 6 卷)，其中第一卷是《对各类构件和各种材料的共同统一规则》^[2]。

标准(GBJ 68—84)所采用的结构可靠度计算方法，通常称为“考虑基本变量概率分布类型的一次二阶矩法”。为了使所设计的结构构件在不同情况下，具有比较一致的可靠度，标准(GBJ 68—84)对荷载效应的基本组合，采用了多个分项系数(partial coefficient)的极限状态设计表达式：

$$\gamma_0(\gamma_G C_G G_k + \gamma_{Q_1} C_{Q_1} Q_{1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Q_i} C_{Q_i} \psi_{Ci} Q_{ik}) \leq R(\gamma_R, f_k, \alpha_k, \dots) \quad (1-2)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数(表 1-4 和表 1-5)，对安全等级为一、二、三级的结构构件可分别取 1.1、1.0、0.9；

γ_G ——永久荷载分项系数，一般情况下为 1.2；

γ_{Q_1} 、 γ_{Q_i} ——第 1 个和第 i 个可变荷载分项系数，一般情况下为 1.4；

G_k ——永久荷载的标准值；

Q_{1k} ——第 1 个可变荷载的标准值，该可变荷载标准值的效应大于其他第 i 个可变荷载标准值的效应；

Q_{ik} ——第 i 个可变荷载的标准值；

C_G 、 C_{Q_1} 、 C_{Q_i} ——永久荷载、第一个可变荷载和其他第 i 个可变荷载的荷载效应系数；

ψ_{Ci} ——第 i 个可变荷载的组合值系数，当风荷载与其他可变荷载组合时，采用 0.6；

$R(\cdot)$ ——结构构件的抗力函数；

γ_R ——结构构件抗力分项系数，其值应符合各类材料的结构设计规范的规定；

f_k ——材料性能的标准值；

a_k ——几何参数的标准值,当几何参数的变异性对结构性能有明显影响时,可另增减一个附加值 Δ_a 考虑其不利影响。

根据式(1-2),由冶金工业部主编的《钢结构设计规范(GBJ 17—88)》,自 1989 年 7 月 1 日起施行。

借鉴最新版国际标准 ISO2394:1998《结构可靠度总原则》,由中国建设部主编的《建筑结构可靠度设计统一标准(GB 50068—2001)》(Unified Standard for Reliability Design of Building Structures),自 2002 年 3 月 1 日起施行,相应的《钢结构设计规范(GB 50017—2003)》(Code for Design of Steel Structures),自 2003 年 12 月 1 日起实施,规范(GBJ 17—88)同时废除。

根据运用概率理论处理结构安全问题的广度和深度,可将概率设计法(probabilistic design method)划分为三个水准:

水准 I——半概率(实为半统计)法。此法只对影响结构安全的某些参数,如材料强度、荷载等,采用了数理统计分析,因此,这种方法对结构的可靠度还不能作出定量的估计。我国 20 世纪 60 年代制定的 66 规范和 70 年代制定的各种材料的结构设计规范如《钢结构设计规范(TJ 17—74)》等,与世界各国 20 世纪 70 年代大多数规范一样,都属于这一水准。

水准 II——近似概率法。此法对建筑结构的可靠程度用失效概率 P_f (probability of failure)或可靠指标 β (reliability index)来估计。 β 指标与 P_f 的直接关系(表 1-6),首先由美国人 Cornell 于 1969 年建立,西方国家称 β 为 Cornell 系数。标准(GBJ 68—84)和按此标准而制定的各种材料的结构规范,如《钢结构设计规范(GBJ17—88)》就属于这一水准。新规范[1]也属于这一水准,但新规范的编制原则采用文献[45]。

水准 III——全概率设计法。此法是将影响结构安全的各种参数分别采用随机变量或随机过程的概率模型来描述,对整个结构体系进行精确的概率分析后,求得结构的失效概率用以直接度量整个结构的安全性,而不一定借助于可靠指标 β 。水准 III 处于研究阶段,世界各国均未列入规范中。

1.2.2 数理统计中的有关名词

自然界中存在的各种客观现象可分为确定性现象(必然现象)和非确定性现象(在概率论中称为随机现象)两大类。在某条件下,前者必然发生某种确定的结果,而后者并不总是发生相同的结果,例如,观察某种结构物的寿命就是一个随机现象。由于非确定性现象的不确定性(也称随机性),当用少量观察结果(或试验结果)来研究某一随机现象时,似乎没有规律性,若用大量结果来分析时,就会发现随机现象也会呈现某些确定的、严格的、非偶然的规律性。在结构设计中,需要考虑各种因素,如荷载、材料强度、几何尺寸、计算精度、施工质量等非确定现象,因此,需要运用概率论和数理统计的知识。

1. 随机事件、概率和随机变量

在一定条件下,可能出现或可能不出现的事件称为随机事件,描述随机事件出现的可能性的量称为概率,一般用 P 表示,由随机事件所决定的变量,称为随机变量。例如,在 10 根钢筋中抽一根作试验,每一根钢筋都可能被抽到,故抽样是随机事件,其抽到的概率是 10%,而钢筋的强度指标则是随机变量,它随抽样的不同而取不同的数值,形成所谓随机变量数列。

随机变量的定义是:如果每次试验的结果可以用一个数 X 表示,而对于任何实数 x ,

$X < x$ 时都有确定的概率,则称 X 为随机变量。随机变量可用分布函数来完整地描述。设 X 为随机变量,显然 $X < x$ 的随机事件的概率 $P\{X < x\}$ 是 x 的一个函数,称为 X 的分布函数 $F(x)$,即

$$F(x) = P\{X < x\} \quad (1-3a)$$

对于连续型随机变量,则有:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (1-3b)$$

式中 $f(x)$ ——密度函数,由它所表达的曲线称为分布曲线(图 1-2a)。

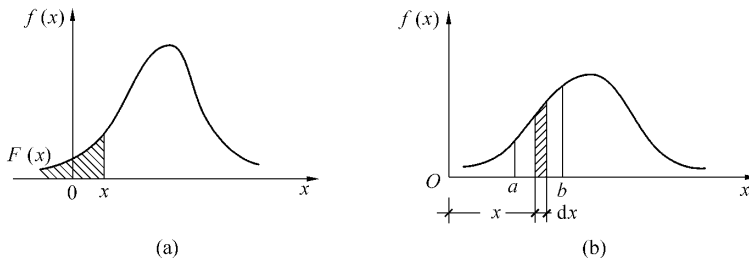


图 1-2 密度函数 $f(x)$

由图 1-2a 可见, $F(x)$ 为阴影面积,是一个概率; $f(x)$ 为 x 处曲线的坐标高度,它表示 x 处概率密度或出现频率。

如已知分布函数或密度函数,则随机变量 X 在任何区间 (a, b) 内的概率 $P\{a \leq X \leq b\}$ 就可马上用积分求得(图 1-2b):

$$\begin{aligned} P\{a \leq X \leq b\} &= \int_a^b f(x)dx \\ &= \int_{-\infty}^b f(x)dx - \int_{-\infty}^a f(x)dx \\ &= F(b) - F(a) \end{aligned} \quad (1-4)$$

2. 随机变量的统计参数

在概率论和数理统计中,把反映随机变量某种特征的量叫随机变量的统计参数(也叫数字特征或特征数)。统计参数可分为两类:一类表示随机变量数列的代表值,如算术平均值(数学期望) μ ;另一类用来衡量随机变量数列离散(波动)程度的特征值,如标准差 σ 、变异系数(离散系数) δ 等。表 1-2 所示为三组试件的强度试验计算结果。

表 1-2 μ 、 σ 和 δ 值

组别 试件	X	随机变量			$\mu = \frac{\sum_i x_i}{n}$ (N/mm ²)	标准差 σ_i (N/mm ²)	变异系数 δ_i
		x_1 (N/mm ²)	x_2 (N/mm ²)	x_3 (N/mm ²)			
钢	第 I 组	382	374	360	372	9.1	0.024
	第 II 组	443	362	311	372	16.6	0.045
砼	第 III 组	20	21	25	22	2.6	0.118

由表 1-2 可见,当两组算术平均值相等; $\mu_I = \mu_{II} = 372\text{N/mm}^2$,而每组各试验值对平均值的偏差之和又等于零(偏差有正有负,互相抵消),因而,就看不出哪一组的离散程度大些,但如果将每个偏差平方,则将消去负号,然后总和再除以试件数 n ,可得方差,为了使其量纲与随机变量相同,将方差开方,即得标准差:

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-5)$$

式中 x_i ——随机变量值;

n ——试件数,当试件数较小时,上式分母 n 一般改为 $n-1$ 。

上述两组试验的标准差分别为(表 1-2):

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{(382-372)^2 + (374-372)^2 + (360-372)^2}{3}} = 9.1\text{N/mm}^2, \sigma_{II} = 16.6\text{N/mm}^2$$

可见,第 II 组钢筋屈服强度的离散程度比第 I 组大,即第 II 组比第 I 组质量差。

标准差 σ 只反映绝对离散的大小(有量纲),即绝对误差的大小。因此,对于各组数列的平均值不相等的情况,如 $\mu_{III} = 22\text{N/mm}^2 < \mu_I = \mu_{II} = 372\text{N/mm}^2$,离散程度的判别必须用相对误差(无量纲),这在统计学上可用离散系数(变异系数) δ 来表示:

$$\delta = \frac{\sigma}{\mu} \quad (1-6)$$

从而,可得上述数列的变异系数(表 1-2):

$$\delta_I = \frac{9.1}{372} = 0.024, \delta_{II} = \frac{16.6}{372} = 0.045, \delta_{III} = \frac{2.6}{22} = 0.118$$

可见,第 III 组的质量最差,第 I 组最好,顺序是 $\delta_{III} > \delta_{II} > \delta_I$ 。

3. 直方图与概率密度函数 $f(x)$

举例:某 $n=100$ 个砧立方体试件,实测结果 f_{cu}^0 分组(组距 $C=1\text{N/mm}^2$)列于表 1-3。

表 1-3 测试结果

项 目 \ 组别	1	2	3	4	5	6
f_{cu}^0 范围(N/mm^2)	18~19	19~20	20~21	21~22	22~23	23~24
频数(出现次数) m	1	14	34	36	13	2
概率 $P = \frac{m}{n} = \frac{m}{100}$	0.01	0.14	0.34	0.36	0.13	0.02
概率密度 $f(x) = \frac{P}{C}$	0.01	0.14	0.34	0.36	0.13	0.02

由图 1-3 可以想像,当测试试件数 n 愈大(成千上万)、组距 C 愈小时,直方图的上部就会变成一条连续的光滑曲线 $f(x)$ ——概率密度曲线。

4. 正态分布与保证率 ω

正态分布记作 $N(\mu, \sigma)$,它的分布函数:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

$$= \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad (1-7)$$

相应的密度函数

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-8)$$

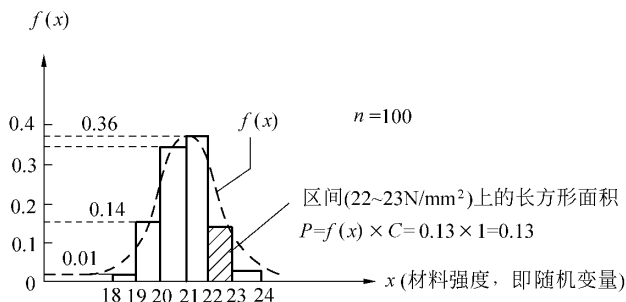


图 1-3 直方图与概率密度曲线

图 1-4a 所示两个正态分布,这类分布曲线呈钟形,对称于算术平均值,在 $x = \mu \pm \sigma$ 处是曲线的拐点(反弯点),用 \times 号表示;当标准差 σ 愈小,随机变量就愈集中在平均值 μ 的左

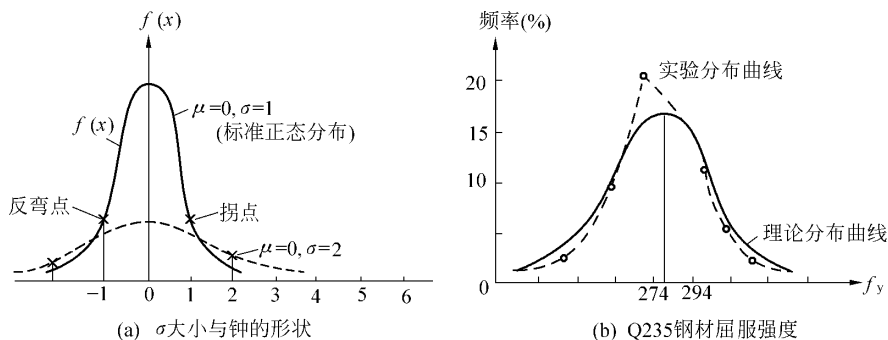


图 1-4 正态分布

右,当 $\mu=0, \sigma=1$ 时称 $N(0,1)$ 为标准正态分布,其函数值可查概率积分表得到。图 1-4b 表示某钢厂生产的 Q235 钢材屈服强度统计的分布曲线。

如果在某一随机变量中取一定值(如图 1-5 的 $\mu-2\sigma$) 随机变量出现大于、等于它的概率,就称为关于这一取值的保证率 ω 。曲线与横轴 x 之间的总面积代表总概率为 100%,显然,对于算术平均值 μ 的保证率为 $\omega=50\%$,由定义可知,图 1-5 中正态分布函

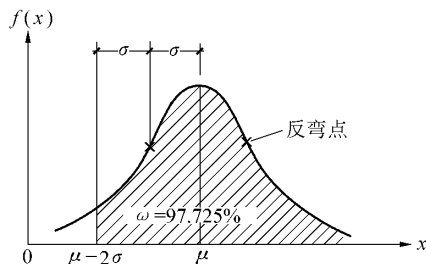


图 1-5 正态分布与保证率 ω