



普通高等教育土建类规划教材

混凝土结构 基本原理

● 秦力 魏春明 主编

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育土建类规划教材

混凝土结构基本原理

主 编 秦 力 魏春明
副主编 王 萱 刘士斌
参 编 肖 琦 孔 伟 胡威凜



机械工业出版社

本书为高等院校土木工程专业的专业基础课教材,是根据我国最新颁布的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)编写的。全书内容共分9章,包括绪论、混凝土结构材料的基本性能、混凝土结构设计方法、受弯构件正截面承载力计算、受弯构件斜截面承载力计算、偏心受力构件承载力计算、受扭构件扭曲截面承载力计算、混凝土构件的裂缝、变形和耐久性、预应力混凝土构件设计计算。为便于学生自学理解,本书给出了规范化的计算方法和详细实用的设计步骤,并设置了相当数量的计算例题;章前有学习要求,章后附有思考题和习题等。

本书可作为高等院校土木工程、工程管理及相关专业的教材,也可作为从事设计、施工、监理和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构基本原理/秦力,魏春明主编. —北京:机械工业出版社, 2015.1

普通高等教育土建类规划教材
ISBN 978-7-111-48559-9

I. ①混… II. ①秦… ②魏… III. ①混凝土结构—高等学校—教材
IV. ①TU37

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第266193号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平 版式设计:霍永明

责任校对:闫玥红 封面设计:张静 责任印制:乔宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2016年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.75印张·363千字

标准书号:ISBN 978-7-111-48559-9

定价:32.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前 言

我国是采用混凝土结构最多的国家，在高层建筑和多层框架结构中大多采用混凝土结构，在多层住宅中也广泛采用了混凝土-砌体混合结构；电视塔、水塔、水池、冷却塔、烟囱、贮罐、筒仓等构筑物中也普遍采用了钢筋混凝土和预应力混凝土结构。此外，在大跨度的公共建筑和工业建筑中也广泛采用混凝土结构。

混凝土结构基本原理是土木工程专业必修的一门专业基础课。该课程主要介绍混凝土结构基本构件受压、拉、弯、剪、扭作用的破坏形态、受力特点、构造要求、承载力计算，介绍钢筋混凝土裂缝、变形和耐久性问题以及预应力混凝土结构的基本知识。学生通过本课程的学习要掌握混凝土结构基本构件的基本概念、基本理论和设计方法，为深入学习土木工程专业知识打下扎实的理论基础。

本书是按照高等学校土木工程专业指导委员会编制的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》的要求组织内容的。为了便于学生使用，本书在编写过程中，理论部分条理清晰，概念清楚，力求简明扼要；结合最新行业规范，注重突出应用，给出了规范化的计算方法和详细实用的设计步骤，并具有相当数量的计算例题；章前有学习要求，章后有思考题和习题等，便于学生自学理解。

在本书的编写过程中，我们参考了国内外同行的著作，在参考文献中列出，在此向相关作者们顺致深深的谢意！限于编者水平，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 混凝土结构基本概念	1
1.2 混凝土结构的发展状况	3
1.3 结构功能与极限状态概述	4
1.4 本课程的特点与学习方法	13
思考题	14
第 2 章 混凝土结构材料的基本性能	15
2.1 混凝土	15
2.2 钢筋	26
2.3 混凝土与钢筋的黏结	33
思考题	38
第 3 章 轴心受力构件的正截面承载力	40
3.1 概述	40
3.2 轴心受力构件一般构造要求	41
3.3 轴心受拉构件正截面承载力计算	43
3.4 轴心受压普通箍筋柱的正截面承载力计算	45
3.5 轴心受压螺旋式(或焊接环式)箍筋柱的正截面承载力计算	50
思考题	53
习题	53
第 4 章 受弯构件正截面承载力	54
4.1 受弯构件一般构造要求	54
4.2 受弯构件正截面受力特点及试验研究	57
4.3 受弯构件正截面承载力计算原理	60
4.4 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	63
4.5 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	67
4.6 T形截面受弯构件正截面承载力计算	71
思考题	76
习题	77
第 5 章 受弯构件斜截面承载力	78
5.1 概述	78
5.2 无腹筋梁的斜截面受剪承载力	79
5.3 影响斜截面受剪承载力的主要因素	82
5.4 斜截面受剪承载力计算公式	83
5.5 基本计算公式的应用	87
5.6 箍筋的构造要求	93
5.7 斜截面受弯承载力	94
思考题	100
习题	100
第 6 章 偏心受力构件承载力	102
6.1 概述	102
6.2 受压构件一般构造要求	104
6.3 偏心受拉构件正截面承载力计算	105
6.4 偏心受压构件正截面受压破坏形态	110
6.5 偏心受压构件的二阶弯矩	113
6.6 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	115
6.7 非对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	118
6.8 对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	122
6.9 对称配筋 I 形截面偏心受压构件正截面承载力计算	123
6.10 正截面承载力 N_u-M_u 的相关曲线及其应用	126
6.11 偏心受拉构件斜截面受剪承载力计算	128
6.12 偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	129
思考题	130
习题	130
第 7 章 受扭构件扭曲截面承载力	132
7.1 概述	132
7.2 受扭构件的试验研究	133
7.3 矩形截面纯扭构件扭曲截面承载力计算	135
7.4 弯剪扭构件扭曲截面承载力计算	141

7.5 在轴向力、弯矩、剪力和扭矩共同作用下 钢筋混凝土矩形截面框架柱受扭承载力 计算	145	9.1 概述	172
7.6 协调扭转的钢筋混凝土构件扭曲截面 承载力	146	9.2 预应力混凝土轴心受拉构件的设计 计算	189
7.7 受扭构件的构造要求	147	9.3 预应力混凝土受弯构件设计计算	202
思考题	151	9.4 预应力混凝土构件的构造要求	214
习题	151	9.5 部分预应力混凝土与无黏结预应力混 凝土	216
第8章 混凝土构件的裂缝、变形和 耐久性	152	思考题	218
8.1 概述	152	习题	218
8.2 混凝土构件裂缝宽度验算	154	附录	219
8.3 混凝土构件变形验算	162	附录1 术语和符号	219
8.4 混凝土构件的耐久性	167	附录2 材料力学性能指标	222
思考题	170	附录3 钢筋、钢丝、钢绞线的公称直径、 公称截面面积及理论质量	226
习题	170	附录4 《混凝土结构设计规范》的有关 规定	227
第9章 预应力混凝土构件设计计算 ..	172	参考文献	230

第1章 绪 论

【教学要求】

1. 理解配筋的作用和要求；
2. 了解混凝土结构的主要优缺点和发展概况；
3. 了解混凝土结构的功能、极限状态知识和环境类别。

1.1 混凝土结构基本概念

1.1.1 混凝土结构的定义与分类

以混凝土为主制成的结构称为混凝土结构，包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构等。素混凝土结构是指由不配置钢筋或不配置受力钢筋的混凝土结构；钢筋混凝土结构是指由配置受力的普通钢筋、钢筋网或钢筋骨架的混凝土结构；由配置受力的预应力筋通过张拉或其他方法建立预加应力的混凝土制成的结构称为预应力混凝土结构。混凝土结构广泛应用于工业与民用建筑、桥梁、隧道、矿井以及水利、海港等工程中。

近几年发展起来的钢骨混凝土结构和钢管混凝土结构严格意义上属于钢-混凝土组合结构。钢骨混凝土结构是指用型钢或用钢板焊接而成的钢骨架作为配筋的混凝土结构（见图 1-1）。钢管混凝土结构是指在薄壁圆形或方形钢管内浇筑混凝土而形成的组合结构构件（见图 1-2）。

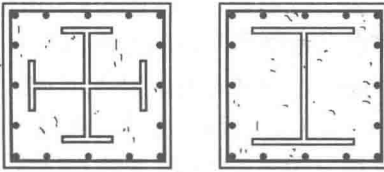


图 1-1 钢骨混凝土柱截面

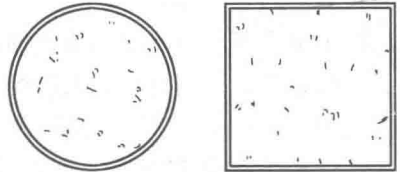


图 1-2 钢管混凝土柱截面

1.1.2 配筋的作用与要求

混凝土的抗压性能较强而抗拉性能很弱，钢筋的抗拉能力则很强。因此，在混凝土中配置适量的受力钢筋，并使得混凝土主要承受压力，钢筋主要承受拉力，就能起到充分利用材料，提高结构承载能力和变形能力的作用。

图 1-3a 所示的素混凝土简支梁在外加集中力和梁自身重力的作用下，梁截面的上部受压，下部受拉。由于混凝土的抗拉性能很差，只要梁的跨中附近截面的受拉边缘混凝土一开裂，梁就突然断裂，破坏前变形很小，没有预兆，属于脆性破坏类型，是工程中要避免的。梁破坏时，截面受压区的压应力还不大，混凝土抗压强度比较高的性能没有被利用。为了改变这种情况，在截面受拉区的外侧配置适量的受力钢筋构成钢筋混凝土梁（见图 1-3b）。钢

筋主要承受梁中和轴以下受拉区的拉力，混凝土主要承受中和轴以上受压区的压力。由于钢筋的抗拉能力和混凝土的抗压能力都很大，即使受拉区的混凝土开裂后梁还能继续承受相当大的荷载，并在受拉钢筋达到屈服强度以后，荷载还可略有增加，直到受压区边缘混凝土被压碎，梁才破坏。破坏前，变形较大，有明显预兆，属于延性破坏类型，是工程中所希望和要求的。可见，在素混凝土梁内合理配置受力钢筋构成钢筋混凝土梁以后，不仅改变了破坏类型，而且梁的承载能力和变形能力都有很大提高，钢筋与混凝土两种材料的强度也得到了较充分的利用。因此在英语中称钢筋混凝土结构为被加强了混凝土结构（reinforced concrete structure）。

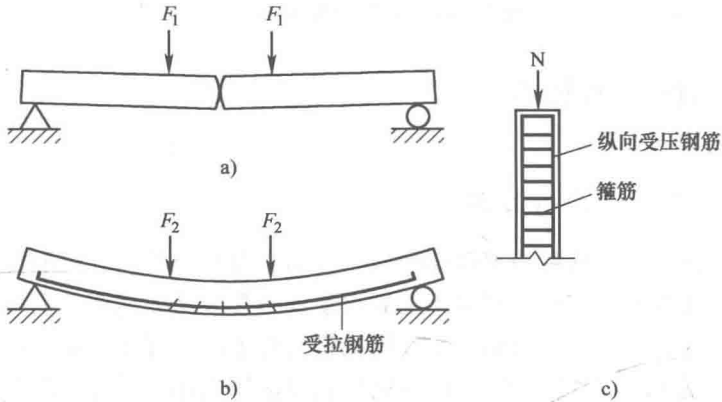


图 1-3 简支梁和轴心受压柱受力示意图

a) 素混凝土梁 b) 钢筋混凝土梁 c) 钢筋混凝土轴心受压柱

如图 1-3c 所示，在轴心受压的柱子中通常也配置抗压强度较高的钢筋协助混凝土承受压力，以提高柱子的承载能力和变形能力。由于钢筋的抗压强度比混凝土的高，所以柱子的截面尺寸可以小些。另外，配置了钢筋还能改善受压构件破坏时的脆性，并可以承受偶然因素产生的拉力。

在混凝土中设置受力钢筋构成钢筋混凝土，这就要求受力钢筋与混凝土必须可靠地黏结在一起，以保证两者共同变形，共同受力。由于钢筋和混凝土两种材料的温度线膨胀系数十分接近，钢为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，当温度变化时钢筋与混凝土之间不会产生较大的相对变形而破坏黏结，为满足两种材料共同受力的要求创造了前提条件。

同时，在钢筋混凝土结构和构件中，受力钢筋的布置和数量都应由计算和构造要求确定，施工也要正确。

1.1.3 钢筋混凝土结构的优缺点

钢筋混凝土结构的主要优点如下：

- 1) 取材容易。混凝土所用的砂、石一般易于就地取材。另外，还可有效利用矿渣、粉煤灰等工业废料。
- 2) 合理用材。钢筋混凝土结构合理地发挥了钢筋和混凝土两种材料的性能，与钢结构相比，可以降低造价。
- 3) 耐久性较好。密实的混凝土有较高的强度，同时由于钢筋被混凝土包裹，不易锈

蚀, 维修费用也很少, 所以钢筋混凝土结构的耐久性比较好。

4) 耐火性好。混凝土包裹在钢筋外面, 火灾时钢筋不会很快达到软化温度而导致结构破坏。与裸露的木结构、钢结构相比耐火性要好。

5) 可模性好。整浇或装配整体式钢筋混凝土结构有很好的整体性, 有利于抗震、抵抗振动和爆炸冲击波。

钢筋混凝土结构也存在一些缺点, 主要是:

1) 自重较大, 这对大跨度结构、高层建筑结构抗震不利, 也给运输和施工吊装带来困难。

2) 钢筋混凝土结构抗裂性较差, 受拉和受弯等构件在正常使用时往往带裂缝工作。当不允许出现裂缝或对裂缝宽度有严格限制时就要采用预应力混凝土结构。

3) 钢筋混凝土结构的施工复杂、工序多、隔热隔声性能较差。

针对这些缺点, 可采用轻质高强混凝土及预应力混凝土以减轻自重, 改善钢筋混凝土结构的抗裂性能。

1.2 混凝土结构的发展状况

混凝土结构约有 150 年的历史, 与钢、木和砌体结构相比, 由于它在物理力学性能、材料来源以及工程造价等方面有许多优点, 所以发展速度很快, 应用也最广泛。

我国是采用混凝土结构最多的国家, 在高层建筑和多层框架中大多采用混凝土结构。在多层住宅中也广泛采用了混凝土-砌体混合结构; 电视塔、水塔、水池、冷却塔、烟囱、贮罐、筒仓等构筑物中也普遍采用了钢筋混凝土和预应力混凝土结构。此外, 在大跨度的公共建筑和工业建筑中也广泛采用混凝土结构。

目前, 世界上最高的建筑是高 828m (162 层) 的位于阿拉伯联合酋长国迪拜市的哈利法塔 (见图 1-4), 以钢筋混凝土结构为主。我国最高的建筑是上海中心大厦 632m (地上 118 层), 结构高度 580m, 是世界第二高楼; 高 509m (101 层) 位于台北市的 101 大楼 (见图 1-5), 是世界第四高楼; 高 492m (101 层) 的上海环球金融中心, 是世界第五高楼。加

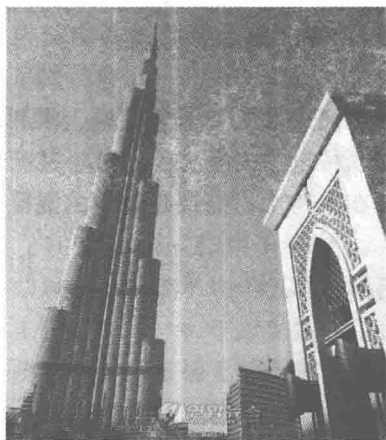


图 1-4 哈利法塔

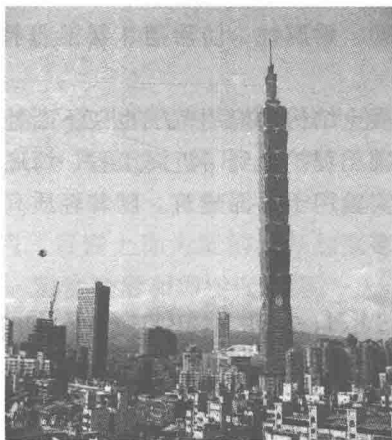


图 1-5 台北市的 101 大楼

拿大多伦多的预应力混凝土电视塔高达 549m，是有代表性的预应力混凝土构筑物。我国最高的电视塔为广州电视塔（见图 1-6），高 600m，主体为混凝土结构，是世界第二高自立式电视塔。

世界上最高的混凝土重力坝是瑞士狄克桑斯大坝，坝高 285m，坝顶宽 15m，坝底宽 225m，坝长 695m。我国长江三峡水利枢纽工程，是世界上最大的水利工程，混凝土大坝高 186m，坝体混凝土用量达 1527 万 m^3 。

我国在铁路、公路、城市的立交桥、高架桥、地铁隧道及水利港口等交通工程中用钢筋混凝土建造的水闸、水电站、船坞和码头已是星罗棋布。随着我国经济建设的快速发展，混凝土结构的应用将更加广泛，更加丰富多彩。

近年来，我国在混凝土基本理论与设计方法、结构可靠度与荷载分析、工业化建筑体系、结构抗震与有限元分析方法以及现代化测试技术等方面的研究也取得了很多新的成果，某些方面已达到或接近国际先进水平。混凝土结构的设计和研究向更完善更科学的方向发展。先进的现代测试技术保证了实验研究更精确、更系统。基于可靠度理论的分析方法也在逐步完善，并开始用于结构整体和使用全过程的分析。与此同时，计算机的普及和多功能化、CAD 等软件系统的开发，缩短了结构设计的时间，减少了工作量，提高了经济效益。

此外，通过大量研究，在混凝土结构设计理论和设计方法方面也取得了很大进展。现行《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2010）积累了半个多世纪以来丰富的工程实践经验和科研成果，提高了我国混凝土结构设计的水平，在工程设计中发挥着指导作用。

随着高强度钢筋、高强高性能混凝土（强度达到 $100\text{N}/\text{mm}^2$ ）及高性能外加剂和混合材料的研制使用，高强高性能混凝土的应用范围不断扩大，钢纤维混凝土和聚合物混凝土的研究和应用有了很大发展。轻质混凝土、加气混凝土、陶粒混凝土及利用工业废渣的“绿色混凝土”，不但改善了混凝土的性能，而且对节能和保护环境具有重要的意义。此外，防射线、耐磨、耐腐蚀、防渗透、保温等特殊需要的混凝土及智能型混凝土及其结构也正在研究中。

混凝土结构的应用范围也在不断地扩大，已从工业与民用建筑、交通设施、水利水电建筑和基础工程扩大到了近海工程、海底建筑、地下建筑、核电站安全壳等领域，甚至已开始构思和实验用于月面建筑。随着轻质高强材料的使用，在大跨度、高层建筑中的混凝土结构越来越多。



图 1-6 广州电视塔

1.3 结构功能与极限状态概述

1.3.1 结构的功能

为了保证设计的结构是安全可靠的，建筑结构应满足对其功能的要求。建筑结构的功能

包括安全性、适用性和耐久性三个方面,简称“三性”。安全性是指建筑结构承载能力的可靠性,即建筑结构应能承受正常施工和使用时的各种荷载和变形,在地震、爆炸等发生时和发生后保持整体稳定性;适用性要求结构在正常使用过程中不产生影响使用的过大变形及过宽裂缝等;耐久性要求在正常维护条件下结构不发生严重风化、腐蚀、脱落、炭化,钢筋不发生锈蚀等。

1.3.2 结构的极限状态

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,则此状态称为该功能的极限状态。所以极限状态就是区分结构可靠与失效的界限状态。

结构的极限状态可分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。

1. 承载能力极限状态

结构或构件达到最大承载能力或者变形达到不适于继续承载的状态,称为承载能力极限状态。当结构或构件由于材料强度不足而破坏,或因疲劳而破坏,或产生过大的塑性变形而不能继续承载,或丧失稳定,或结构转变为机动体系时,就认为结构或构件超过了承载能力极限状态。超过承载能力极限状态后,结构或构件就不能满足安全性的要求。

2. 正常使用极限状态

结构或构件达到正常使用或耐久性能中某项规定限度的状态称为正常使用极限状态。例如,当结构或构件出现影响正常使用的过大变形、过宽裂缝、局部损坏和振动时,可认为结构或构件超过了正常使用极限状态。超过了正常使用极限状态,结构或构件就不能保证适用性和耐久性的功能要求。

进行结构设计时,结构或构件按承载能力极限状态进行计算后,还应该按正常使用极限状态进行验算。也就是说,设计的结构或构件在满足承载能力极限状态的同时也要满足正常使用极限状态。

1.3.3 结构的作用、作用效应和结构抗力

1. 结构的作用与作用效应

(1) 作用的概念与类型 建筑结构在施工期间和使用期间要承受各种作用。所谓“作用”是使结构或构件产生内力(应力)、变形(位移、应变)和裂缝的各种原因的总称。作用就其形式而言,可分为两类:

1) 当以力的形式作用于结构上时,称为直接作用,也叫结构的荷载,分为永久荷载、可变荷载和偶然荷载,如结构自重、楼面上的人群及物品重量、风压力、雪压力、土压力等。

2) 当以变形形式作用于结构上时,称为间接作用,习惯上称为结构的外加变形或约束变形,如地震、基础不均匀沉降、混凝土收缩、徐变、温度变形和焊接变形等。

在工程结构中,由于常见的作用,多数是直接作用,即荷载,因此,对荷载的类型,又作进一步的区分。结构上的荷载,按其随时间的变异性不同,可分为下列三类:

1) 永久荷载(恒荷载):在结构使用期间,其值不随时间变化,或其变化与平均值相比可以忽略不计,或其变化是单调的并能趋于限值的荷载。例如,结构自重、土压力、预应力等。

2) 可变荷载 (活荷载): 在结构使用期间, 其值随时间变化, 且其变化量与平均值相比不可以忽略不计的荷载。例如, 楼面活荷载、屋面活荷载和积灰荷载、起重机 (吊车) 荷载、风荷载、雪荷载等。

3) 偶然荷载: 在结构使用期间不一定出现, 一旦出现, 其数值很大但持续时间很短的荷载。例如, 爆炸、撞击力等。

(2) 荷载的代表值 由于各种荷载都具有一定的变异性, 在结构设计时, 应根据各种极限状态的设计要求取用不同的荷载数值, 即所谓荷载的代表值。

1) 荷载的标准值: 一般是指结构在其设计基准期为 50 年的期间内, 在正常情况下可能出现具有一定保证率的最大荷载。它是荷载的基本代表值。由于结构上的各种荷载, 实际都是不确定的随机变量, 对其取值应具有一定的保证率, 也就是使得超过荷载标准值的概率要小于某一允许值。当有足够实测资料时, 荷载标准值由资料按统计分析加以确定, 即

$$S_k = S_m + \alpha_s \sigma_s = S_m (1 + \alpha_s \delta_s) \quad (1-1)$$

式中 S_m ——荷载平均值;

S_k ——荷载标准差;

δ_s ——荷载的变异系数, $\delta_s = \sigma_s / S_m$;

σ_s ——荷载的标准差;

α_s ——荷载标准值的保证率系数;

国际标准化组织 (ISO) 建议取 $\alpha_s = 1.645$, 即相当于具有 95% 保证率的上限分位值。

当没有足够统计资料时, 荷载标准值可根据历史经验估算计算。

GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》(以下简称《荷载规范》)对荷载的标准值的取值方法为: 永久荷载标准值, 对结构自重, 由于其变异性不大, 可按结构构件的设计尺寸与材料单位体积的自重计算确定。对常用材料和构件的自重可参照《荷载规范》附录一采用。对于某些自重变异性较大的材料和构件 (如现场制作的保温材料、混凝土薄壁结构等), 自重的标准值应根据对结构的不利状态, 取上限值或下限值。可变荷载标准值, 应按《荷载规范》各章中规定采用。

2) 可变荷载组合值: 是指几种可变荷载进行组合时, 其值不一定都同时达到最大, 因此, 需作适当调整。其调整方法为: 除其中最大荷载仍取其标准值外, 其他伴随的可变荷载均采用小于 1.0 的组合值系数乘以相应的标准值来表达其荷载代表值。这种经调整后的伴随可变荷载, 称为可变荷载的组合值。其值用可变荷载的组合系数 ψ_c 与相应可变荷载标准值的乘积来确定。可变荷载组合值是承载力极限状态设计和正常使用极限状态标准组合设计时荷载的代表值。

3) 可变荷载频遇值: 是指结构上时而出现的较大荷载。它与时间有较密切的关联, 即在规定的期限内 (如在设计基准期 T 内), 具有较短的总持续时间 T_x , 或较少的发生次数 η_x 的特性, 使结构的破坏性有所减缓, 因此, 可变荷载频遇值总是小于荷载的标准值 (国际标准化组织 ISO 2394 建议取 $\mu_x = T_x / T \leq 0.1$, 作为确定频遇值的控制条件)。《荷载规范》规定: 可变荷载频遇值是以荷载的频遇值系数 ψ_f 与相应的可变荷载标准值的乘积来确定。

4) 可变荷载的准永久值: 是指结构上经常作用的可变荷载。它与时间的变异性有一定的相关, 即在规定的期限内, 具有较长的总持续时间 T_x , 对结构的影响有如永久荷载的性能 (国际标准化组织建议取 $\mu_x \geq 0.5$, 作为确定准永久值的控制条件)。《荷载规范》规定:

可变荷载准永久值是以荷载的准永久值系数 ψ_q 与相应的可变荷载标准值的乘积来确定。

可变荷载频遇值、准永久值是正常使用极限状态按频遇组合设计，或按准永久组合设计时所采用的可变荷载代表值。上述系数 ψ_c 、 ψ_f 、 ψ_q 值的取用请参考《荷载规范》的有关章节。

(3) 作用效应 结构构件在上述各种作用因素的作用下所引起的内力（如轴力、弯矩、剪力、扭矩）、变形（挠度、转角）和裂缝等统称为“作用效应”，以 S 表示，当“作用”为“荷载”时，则称为荷载效应。由于结构上的作用是随着时间、地点和各种条件的改变而变化的，是一个不确定的随机变量，所以荷载效应 S 一般说来也是一个随机变量。

荷载 Q 与荷载效应 S 之间，一般可近似按线性关系考虑，即

$$S = CQ \quad (1-2)$$

式中 C ——荷载效应系数。

例如，受均布荷载作用的简支梁，其跨中弯矩 $M = (1/8)ql^2$ ，此处， M 相当于荷载效应 S ， q 相当于 Q ， $(1/8)l^2$ 则相当于荷载效应系数 C ， l 为梁的计算跨度。

荷载效应是结构设计的依据之一。由于它的统计规律与荷载的统计规律是一致的，因而我们以后将着重讨论荷载变异的情况。

(4) 荷载分项系数及荷载设计值 荷载分项系数是考虑荷载超过标准值的可能性，以及对不同变异性的荷载可能造成结构计算时可靠度严重不一致的调整系数。其选取是在各种荷载标准值已经给定的前提下，使所选取的数值在按极限状态设计中得到的各种结构构件所具有的可靠度（或失效概率），与规定的目标可靠度（或允许的失效概率）之间，在总体上误差最小为原则。若以 γ_c 及 γ_Q 分别表示永久荷载及可变荷载的分项系数，则按《荷载规范》规定：

1) 永久荷载的分项系数：当其效应对结构不利时，对由可变荷载效应控制的组合，取 1.2，对由永久荷载效应控制的组合，取 1.35；当其效应对结构有利时，不应大于 1.0。

2) 可变荷载的分项系数：一般情况下取 1.4；对标准值大于 4kN/m^2 的工业房屋楼面结构的活荷载，取 1.3。

3) 对结构的倾覆、滑移或漂浮验算，荷载的分项系数应满足有关的建筑结构设计规范的规定。

荷载的标准值与荷载分项系数的乘积称为荷载的设计值，也称为设计荷载，其数值大体相当于结构在非正常使用情况下荷载的最大值，它比荷载的标准值具有更大的可靠度。

(5) 荷载设计使用年限的调整系数

1) 楼面和屋面活荷载考虑设计使用年限的调整系数 γ_L 应按表 1-1 采用。

表 1-1 楼面和屋面活荷载考虑设计使用年限的调整系数 γ_L

结构设计使用年限(年)	5	50	100
γ_L	0.9	1.0	1.1

注：1. 当设计使用年限不为表中数值时，调整系数 γ_L 可按线性内插确定。

2. 对于荷载标准值可控制的活荷载，设计使用年限调整系数 γ_L 取 1.0。

2) 对雪荷载和风荷载，应取重现期为设计使用年限。

2. 结构抗力

(1) 结构抗力的概念及结构的工作状态 结构抗力是指结构或构件承受内力和变形的

能力（如构件的承载力、刚度等），以 R 表示。在实际工程中，由于受材料强度的离散性、构件几何特性（如尺寸偏差、局部缺陷等）和计算模式不定性的综合影响，结构抗力是一个随机变量。

结构构件的工作状态可以用荷载效应 S 和结构抗力 R 的关系式来描述。一般可改写成如下的极限平衡方程式：

$$S = R \quad (1-3)$$

对荷载效应和结构抗力的理解，可用下例说明。

如一轴心受压钢筋混凝土短柱的强度极限平衡方程式可写成

$$N = N_u \quad (1-4a)$$

$$N_u = f_c A_c + f_y A_s \quad (1-4b)$$

式中 N ——由荷载产生的轴向压力，即相当于荷载效应 S ；

N_u ——轴心受压短柱的抗压极限承载力，即为结构抗力；

A_c 、 A_s ——混凝土及钢筋的截面面积；

f_c 、 f_y ——混凝土及钢筋的抗压强度设计值。

类似还可以写出构件的刚度和裂缝宽度的极限状态方程式。

从以上公式中，若以 $Z = R - S = G(R, S)$ 来表示，则按 Z 值的大小不同，可以用来描述结构所处的三种不同工作状态：当 $Z > 0$ 时，结构处于可靠状态；当 $Z < 0$ 时，结构处于失效状态；当 $Z = 0$ 时，结构处于极限状态。上式中 Z 值代表在扣除了荷载效应以后结构内部所产生的多余抗力，可称“结构余力”，也称为“功能函数”，它是结构失效的标准。如上所述， R 和 S 都是非确定性的随机变量，故 $Z = G(R, S)$ 也是一个非确定性的随机变量函数。

由此可知，材料强度是决定结构抗力的主要因素，下面具体分析材料强度问题。

(2) 材料强度的标准值 材料强度标准值 f_k 的取值原则是：在材料强度实测值的总体中，强度标准值应具有不小于 95% 的保证率。其值由下式决定

$$f_k = f_m (1 - 1.645\delta_f) \quad (1-5)$$

式中 f_m ——材料强度的平均值；

δ_f ——材料强度的变异系数， $\delta_f = \sigma_f / f_m$ ， σ_f 为材料强度的标准差。

对于钢材强度标准值，我国冶金企业为了避免质量过低的钢筋出厂，规定了抽样检查的统一标准。在每 60t 钢材或每批钢材中抽取经表面检查及尺寸合格的两个试件，每个试件的屈服强度不小于某废品限值为其检查标准，若这些被抽查的试件量测强度低于废品限值时即认为是废品，不能作为合格品出厂。根据全国主要钢厂的统计，热轧钢筋的 $(f_m - 2\sigma_f)$ 值一般均大体接近于相应的部颁屈服强度废品限值，即它的保证率为 97.73%。为了使钢筋的强度标准值与钢筋的检查标准统一起见，热轧钢筋的抗拉强度标准值取等于部颁屈服强度废品限值；而对于没有明显屈服点的钢筋则给出极限抗拉强度的检验指标，作为其强度的标准值。

混凝土的各种强度指标标准值，是假定与立方体强度具有相同的变异系数，由立方体抗压强度标准值推算出来的，其计算方法为：

1) 混凝土立方体抗压强度标准值（或称混凝土强度等级） $f_{cu,k}$ ，是按标准方法制作、养护和试验所得的抗压强度值。

2) 混凝土的轴心抗压强度标准值 f_{ck} 及抗拉强度标准值 f_{tk} , 是根据混凝土立方体抗压强度标准值和各种强度指标的关系, 按式(1-5)计算得出的。混凝土各种强度标准值见附录2。

3) 材料强度的设计值。材料强度的标准值 f_k 除以材料的分项系数 γ_m 就得到材料强度的设计值 f , 即

$$f = f_k / \gamma_m \quad (1-6)$$

钢筋的材料分项系数是通过受拉构件的试验数据进行可靠度分析得出的。各种钢筋的分项系数见表1-2。

表 1-2 钢筋的分项系数 γ_m 值

钢筋级别	γ_m 值
HPB300、HRB335	1.12
HRB400、RRB400	1.11

混凝土的材料分项系数是通过轴心受压构件试验数据作可靠度分析求得的, 其值取为1.40。

1.3.4 结构接近似概率的极限状态设计法

1. 承载力极限状态设计

(1) 建筑结构的等级 在承载力极限状态设计时, 根据建筑结构破坏后果(危及人的生命、造成经济损失和产生的社会影响等)的严重程度, 将建筑结构划分为三个安全等级。设计时应根据具体情况, 按照表1-3的规定选用适当的安全等级。建筑物中各类结构构件使用阶段的安全等级, 宜与整个结构的安全等级相同, 对其中部分结构构件的安全等级, 可根据其重要程度作适当调整, 但一切构件的安全等级在各个阶段均不得低于三级。

表 1-3 建筑结构的等级

安全等级	破坏后果	建筑物类型
一级	很严重	重要的建筑物
二级	严重	一般的建筑物
三级	不严重	次要的建筑物

(2) 计算表达式 在极限状态设计方法中, 结构构件的承载力计算, 应采用下列极限状态设计表达式

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (1-7)$$

式中 γ_0 ——重要性系数, 对安全等级为一级或设计使用年限为100年及以上的结构构件, 不应小于1.1, 对安全等级为二级或设计使用年限为50年的结构构件, 不应小于1.0, 对安全等级为三级或设计使用年限为5年及以下的结构构件, 不应小于0.9;

S_d ——承载能力极限状态的荷载效应组合的设计值, 可按《荷载规范》规定的荷载效应标准值 S_k 与荷载分项系数 γ_s 的乘积求得, 分别表示轴力、弯矩、剪力、扭矩设计值等;

R_d ——结构构件的承载力设计值，可由材料强度标准值 R_k 除以材料分项系数 γ_R 求得。

钢筋混凝土构件是由混凝土和钢筋两种材料组成的，所以承载力设计值要分解成下列承载力的函数

$$R = \frac{R_k}{\gamma_R} = R\left(\frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \frac{f_{sk}}{\gamma_s}, \alpha_k\right) \quad (1-8)$$

式中 R ——结构构件的承载力函数；

f_{ck} 、 f_{sk} ——混凝土和钢筋强度标准值；

γ_c 、 γ_s ——混凝土和钢筋的材料分项系数；

α_k ——几何参数（尺寸）标准值，当几何参数的变异性能有明显的不良影响时，可另作增减适当调整。

在承载力极限状态计算方法中，荷载效应的不定性和结构抗力的离散性要在确定荷载及抗力标准值中首先加以考虑，然后再引入分项系数来保证构件承载力具有足够的可靠度。更具体地说，在多数荷载中的标准值取大于其平均值，材料强度的标准值小于其平均值的同时，为充分反映荷载效应和结构抗力的离散性，再将各类荷载标准值分别乘以大于1的各自的荷载分项系数，得到荷载设计值；而将各类材料的强度标准值分别除以大于1的各自的材料分项系数，得到材料强度设计值。通过这样的处理，使结构构件具有足够的可靠概率。

此外，对一些由混凝土在复杂应力状态下破坏来确定承载能力的情况，即使采用了材料的强度设计值，仍不能保证构件具有足够的可靠度，这时在确定承载力函数时，在计算公式的取值上，要根据可靠度分析给予一定的安全储备。因此，钢筋混凝土构件的可靠性是通过标准值、分项系数和抗力函数的取值三部分保证的。

(3) 荷载效应组合 当结构上同时作用有多种可变荷载时，要考虑荷载效应的组合问题。荷载效应组合是指在所有可能同时出现的诸荷载组合下，确定结构或构件内产生的总效应。其最不利组合是指所有可能产生的荷载组合中，对结构构件产生总效应为最不利的一组。

1) 对承载力极限状态一般考虑荷载效应的基本组合，应从下列组合值中取其最不利值确定：

① 由可变荷载控制的效应设计值，应按下式进行计算

$$S_d = \sum_{j=1}^m \gamma_{Gj} S_{Gjk} + \gamma_{Q1} \gamma_{L1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \gamma_{Li} \psi_{ci} S_{Qik} \quad (1-9)$$

式中 γ_{Gj} ——第 j 个永久荷载的分项系数；

γ_{Qi} ——第 i 个可变荷载的分项系数，其中 γ_{Q1} 为主导可变荷载 Q_1 的分项系数；

γ_{Li} ——第 i 个可变荷载考虑设计使用年限的调整系数，其中 γ_{L1} 为主导可变荷载 Q_1 考虑设计使用年限的调整系数；

S_{Gjk} ——按第 j 个永久荷载标准值 G_{jk} 计算的荷载效应值；

S_{Qik} ——按第 i 个可变荷载标准值 Q_{ik} 计算的荷载效应值，其中 S_{Q1k} 为诸可变荷载效应中起控制作用者；

ψ_{ci} ——第 i 个可变荷载 Q_i 的组合值系数；

m ——参与组合的永久荷载数；

n ——参与组合的可变荷载数。

② 由永久荷载控制的效应设计值，应按下式进行计算

$$S_d = \sum_{j=1}^m \gamma_{Gj} S_{Gjk} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \gamma_{Li} \psi_{ci} S_{Qik} \quad (1-10)$$

注意：基本组合中的效应设计值仅适用于荷载与荷载效应为线性的情况；当对 S_{Qik} 无法明显判断时，应依次以各可变荷载效应作为 S_{Qik} ，并选取其中最不利的荷载组合的效应设计值。

对于以自重为主的结构构件，应采用由永久荷载效应控制的基本组合设计值进行设计，考虑了这个条件，能够避免产生可靠度偏低的后果。此外，在按公式 (1-10) 计算时，为了减轻计算工程量，允许只考虑与结构自重方向一致的竖向可变荷载（如雪荷载、起重机竖向荷载）参与荷载效应的组合。

2) 对一般的排架和框架结构，可采用简化规则，并应从下列组合值中取其最不利值确定：

① 由可变荷载控制的组合

$$S_d = \sum_{j=1}^m \gamma_{Gj} S_{Gjk} + \gamma_{Q1} \gamma_{L1} S_{Q1k} \quad (1-11)$$

$$S_d = \sum_{j=1}^m \gamma_{Gj} S_{Gjk} + 0.9 \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \gamma_{Li} S_{Qik} \quad (1-12)$$

② 由永久荷载控制的组合，仍按式 (1-10) 采用。

【例 1-1】 某屋面板，板的自重、抹灰层等永久荷载引起的弯矩标准值 M_{Gk} 为 $1.60 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ，楼面活荷载引起的弯矩标准值 M_{Lk} 为 $1.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ，雪荷载引起的弯矩标准值 M_{sk} 为 $0.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。结构安全等级为二级，设计使用年限为 50 年，楼面活荷载和雪荷载的组合值系数为 0.7。求荷载效应设计值 M 。

【解】 (1) 按可变荷载效应控制的组合计算

$$\begin{aligned} M &= \gamma_0 \left(\sum_{j=1}^m \gamma_{Gj} S_{Gjk} + \gamma_{Q1} \gamma_{L1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \gamma_{Li} \psi_{ci} S_{Qik} \right) \\ &= 1.0 \times (1.2 \times 1.60 + 1.4 \times 1.0 \times 1.2 + 1.4 \times 1.0 \times 0.7 \times 0.2) \text{ kN} \cdot \text{m} \\ &= 3.80 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

(2) 按永久荷载效应控制的组合计算

$$\begin{aligned} M &= \gamma_0 \left(\sum_{j=1}^m \gamma_{Gj} S_{Gjk} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \gamma_{Li} \psi_{ci} S_{Qik} \right) \\ &= 1.0 \times [1.35 \times 1.6 + (1.4 \times 1.0 \times 0.7 \times 1.2 + 1.4 \times 1.0 \times 0.7 \times 0.2)] \text{ kN} \cdot \text{m} \\ &= 3.53 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

2. 正常使用极限状态设计

对于正常使用极限状态，应根据不同的设计要求，采用荷载的标准组合、频遇组合或准永久组合，并按下列设计表达式进行设计

$$S_d \leq C \quad (1-13)$$

式中 S_d ——荷载效应组合值；