

应用型本科及高职交通土建类专业规划教材

HUNNINGTU JIEGOU SHEJI YUANLI

混凝土结构设计原理

杜建华 王海彦 ◎ 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

应用型本科及高职交通土建类专业规划教材

混凝土结构设计原理

	杜建华	王海彦	主 编
刘训臣	李君君	沈红云	王海珍
		李 冬	副主编
			主 审

中国铁道出版社

2014年·北京

内 容 简 介

本书主要根据交通部 2004 年以来发布的系列最新规范编写。全书共 10 章,主要内容包括:结构设计计算原则、结构材料及其力学性能、钢筋混凝土受弯构件的正截面和斜截面承载力计算、裂缝及变形计算、受压构件承载力计算、受拉构件承载力计算、受扭构件承载力计算、预应力混凝土结构和预应力损失。

本书可作为应用型本科土木工程专业及相近专业教材,也可作为高职高专院校道路桥梁工程技术专业、高等级公路养护与管理、铁道工程技术、地下工程与隧道工程技术、高速铁路技术、城市轨道交通工程技术及国际工程施工技术等其他相关专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理/杜建华,王海彦主编. —北京:
中国铁道出版社,2014. 6
应用型本科及高职交通土建类专业规划教材
ISBN 978-7-113-18350-9

I. ①混… II. ①杜… ②王… III. ①混凝土结构—
结构设计—高等职业教育—教材 IV. ①TU370. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 101543 号

书 名:混凝土结构设计原理
作 者:杜建华 王海彦 主编

责任编辑:刘红梅 编辑部电话:010-51873133 电子信箱:mm2005td@126.com
封面设计:崔 欣
责任校对:马 丽
责任印制:李 佳

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京尚品荣华印刷有限公司

版 次:2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:14 字数:350 千

书 号:ISBN 978-7-113-18350-9

定 价:35.00 元(含盘)

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

前言

本教材主要是根据现行交通行业最新规范,面向土木工程大类中的交通土建类专业编写的。在编写过程中充分考虑了应用型本科工程教育和高职高专教学需求,教材内容覆盖应用型本科工程教育土木工程类专业、高职高专道路桥梁工程技术专业、高等级公路养护与管理、铁道工程技术、地下工程与隧道工程技术、高速铁道技术、城市轨道交通工程技术等专业方向。目前,高职高专院校也逐步开展了应用型本科工程教育试点,本教材编写过程中认真调研了应用型本科工程教育土木工程专业人才培养对本门课程的知识、能力和素质要求,使本门课程能满足应用型本科工程教育和高职高专交通土建类专业人才培养的教学要求。

交通土建类专业主要涉及两类规范,即交通部颁布的《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2004)及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTGD62—2004),原铁道部颁布的《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002.1—2005)及《铁路桥涵钢筋混凝土及预应力混凝土结构设计规范》(TB 10002.3—2005)。现行的公路桥梁设计规范采用的是极限状态法,与铁路桥梁设计规范主要采用的容许应力法不一致,两者设计方法的计算公式不尽相同,所以本教材中涉及规范的地方采用了前者。尽管规范中相应的规定有所差异,但原理都是相同或相近的,因此本书重在讲原理,而尽量少讲规范条文。

本教材由石家庄铁路职业技术学院杜建华、王海彦、刘训臣、王海珍、李君君和河北交通职业技术学院沈红云共同编写;其中,杜建华、王海彦任主编,刘训臣、李君君、沈红云、王海珍任副主编。编写分工如下:第1、2章及附录由杜建华编写,第3、9章由沈红云编写,第4、5章由刘训臣编写,第6、10章由李君君编写,第7章由王海彦编写、第8章由王海珍编写。全书由杜建华、王海彦统稿。

本书由河北交通职业技术学院李冬博士担任主审。李博士对全书进行了十分认真的审阅,提出了很多宝贵意见,对保证本书质量起到了重要作用,谨此表示衷心感谢,并对李博士的严谨的治学态度表示钦佩。本书在编写过程中还得到了石家庄铁路职业技术学院满洪高教授、战启芳教授等的关心和指导,特此向他们表示衷心的感谢。

为方便教师授课和学生学习,我们还制作了与本书配套的助教光盘。

本书在编写过程中,编者参考引用了本书所列参考文献的一些内容,在此向文献的作者深表谢意。

由于编者水平有限,书中不当和错误之处,恳请专家和读者批评指正。

编者
2014.2

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 结构的类型及特点	1
1.2 钢筋混凝土结构的基本概念	2
1.3 结构设计的基本要求	4
1.4 课程的任务、目标和应注意的问题	4
第 2 章 结构按极限状态法设计计算的原则	7
2.1 结构设计方法发展概述	7
2.2 概率极限状态设计法的基本概念	9
2.3 我国公路桥涵设计规范(JTG D62—2004)的计算原则	12
2.4 作用和作用效应组合	14
复习思考题	18
第 3 章 结构材料及其物理力学性能	19
3.1 材料强度指标的取值原则	19
3.2 混凝土	20
3.3 钢筋	29
3.4 钢筋与混凝土之间的黏结	33
复习思考题	35
第 4 章 受弯构件正截面承载力计算	36
4.1 受弯构件的截面形式与构造	37
4.2 受弯构件正截面受力全过程和破坏形态	42
4.3 受弯构件正截面承载力计算的基本原则	46
4.4 单筋矩形截面受弯构件	50
4.5 双筋矩形截面受弯构件	57
4.6 T 形截面受弯构件	62
复习思考题	70
第 5 章 受弯构件斜截面承载力计算	73
5.1 受弯构件斜截面的受力特点和破坏形态	73
5.2 受弯构件的斜截面抗剪承载力	77
5.3 受弯构件的斜截面抗弯承载力	81
5.4 全梁承载能力校核与构造要求	85

复习思考题	98
第6章 受弯构件的应力、裂缝及变形计算	99
6.1 概述	99
6.2 换算截面	100
6.3 应力计算	103
6.4 受弯构件的裂缝及最大裂缝宽度验算	105
6.5 受弯构件的变形(挠度)验算	106
6.6 混凝土结构的耐久性	113
复习思考题	117
第7章 受压构件正截面承载力计算	118
7.1 普通箍筋轴心受压构件	119
7.2 螺旋箍筋轴心受压构件	123
7.3 偏心受压构件正截面受压破坏形态及偏心距增大系数	127
7.4 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算基本公式	130
7.5 不对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	134
7.6 对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	144
7.7 工字形和 T 形截面偏心受压构件正截面承载力计算	148
复习思考题	152
第8章 受拉构件正截面承载力计算	153
8.1 轴心受拉构件正截面承载力计算	154
8.2 偏心受拉构件正截面承载力计算	154
复习思考题	159
第9章 受扭构件承载力计算	160
9.1 矩形纯扭构件的破坏特征和承载力计算	160
9.2 在弯、剪、扭共同作用下矩形截面构件的承载力计算	163
9.3 T 形和工字形截面受扭构件	166
9.4 构造要求	167
复习思考题	170
第10章 预应力混凝土结构及预应力损失	171
10.1 预应力混凝土的基本概念	171
10.2 预加应力的方法与设备	175
10.3 预应力混凝土结构的材料	182
10.4 预应力混凝土受弯构件的受力阶段	185
10.5 预加力的计算与预应力损失的估算	188
复习思考题	210
附表	212
参考文献	218

第 1 章

绪 论



学习目标

1. 理解结构的概念、类型、特点和使用范围。
2. 掌握钢筋混凝土结构基本概念。
3. 理解本课程的任务、学习目标和学习方法。



本章重点

钢筋混凝土结构的基本概念。

1.1 结构的类型及特点

1.1.1 结构的概念和类型

土木工程结构存在人类生活的各个方面。无论是行驶在平坦舒适的高速公路上,还是乘坐在风驰电掣的高速列车上,都会见到桥梁、隧道、涵洞等各种构造物。这些构造物依靠它的承重骨架来承受各种外荷载的作用。一般把构造物的承重骨架组成部分统称为结构。例如,桥的桥跨、墩(台)及基础组成了桥的承重体系,高层建筑的板、梁、墙、柱和基础组成了高层建筑的承重体系,它们就被称为结构。

结构都是由若干基本构件连接而成的。这些构件的形式虽然多种多样,但按其主要受力特点可分为受弯构件(梁和板)、受压构件、受拉构件和受扭构件等典型的基本构件。

在实际工程中,结构及基本构件都是由建筑材料制作成的。根据所使用的建筑材料种类,作为总称,常用的结构一般可分为:

- (1)混凝土结构。以混凝土为主制作的结构,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。
- (2)钢结构。以钢材为主制作的结构。
- (3)圬工结构。以圬工砌体为主制作的结构,是砖结构、石结构和混凝土砌体结构的总称。
- (4)木结构。以木材为主制作的结构。

本书将介绍钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构的材料物理力学性能及基本构件受力性能、设计计算方法和构造。

1.1.2 结构的特点及使用范围

由于各种工程结构采用的建筑材料的性质不同,形成了不同的特点,从而决定了它们在实

实际工程中的使用范围。

1) 钢筋混凝土结构

钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种材料组成的。钢筋是一种抗拉性能很好的材料；混凝土材料具有较高的抗压强度，而抗拉强度很低。根据构件的受力情况，合理地配置钢筋可形成承载能力较强、刚度较大的结构构件。

钢筋混凝土结构具有便于就地取材、可模性好、整体性好、耐久性好等优点，广泛用于房屋建筑、地下结构、桥、隧道、水利、港口等工程中。但是，钢筋混凝土结构也有自重较大、抗裂性较差、修补困难的缺点。在交通土建工程中，钢筋混凝土结构主要用于中小跨径桥、涵洞、挡土墙以及形状复杂的中、小型构件等。

2) 预应力混凝土结构

预应力混凝土结构采用高强度钢筋和高强度混凝土材料，并采用相应钢筋张拉施工工艺，在构件承受作用之前预先对混凝土受拉区域施加适当的压应力，对截面应力或裂缝宽度加以控制，解决了钢筋混凝土结构在使用阶段容易开裂的问题。

预应力混凝土结构采用高强度材料和预应力工艺，节省了材料，减小了构件截面尺寸，减轻了构件自重，特别适合于建造由恒荷载控制设计的大跨径桥梁。通过设计控制截面不出现拉应力，可保护钢筋免受腐蚀性介质侵蚀，因此可用于海洋工程结构和有防渗透要求的结构。在大跨径桥梁施工中广泛采用的悬臂浇筑、悬臂拼装、顶推等无支架施工方法，也是利用了预应力混凝土技术将部件装配成整体结构。

预应力混凝土结构由于高强度材料的单价高，施工的工序多，要求有经验的、熟练的技术人员和工人施工，且要求较多的严格的现场技术监督和检查，因此，不是在任何场合都可以用预应力混凝土来代替普通钢筋混凝土的，而是两者各有合理应用的范围。

3) 圬工结构

圬工结构是用胶结材料将砖、天然石料等块材按一定规则砌筑而成整体的结构。其特点是材料易取。当块材采用天然石料时，则具有良好的耐久性。但是，圬工结构的自重一般较大，施工中机械化程度较低。

在交通土建工程中，圬工结构多用于中小跨径的拱桥、桥墩（台）、挡土墙、涵洞、道路护坡等工程中。

4) 钢结构

钢结构一般是由钢厂轧制的型钢或钢板通过焊接或螺栓等连接组成的结构。钢结构具有材料强度高、自重较轻、工作的可靠性高、机械化程度高、施工效率较高等优点，广泛应用于大跨径的钢桥、城市人行天桥、高层建筑、钢闸门、海洋钻井采油平台、钢屋架等。在交通土建施工中，钢结构还常用于钢栈桥、钢支架、钢模板、钢围堰、钢挂篮等临时结构中。

在工程中还出现了多种组合结构，例如，预应力混凝土组合梁、钢—混凝土组合梁和钢管混凝土结构等。组合结构是利用具有各自材料特点的部件，通过可靠的措施使之形成整体受力的构件，从而获得更好的工程效果，因而日益得到广泛应用。

1.2 钢筋混凝土结构的基本概念

钢筋混凝土结构是由配置受力的普通钢筋或钢筋骨架的混凝土制成的结构。由建筑材料知识可知，混凝土的抗压强度较高，抗拉强度较低，大约只有抗压强度的十分之一。如果只用

混凝土材料制作一根受弯的梁,由材料力学可知,当它承受竖向荷载作用时〔图 1.1(a)〕,梁的垂直截面(正截面)上受到弯矩作用,截面中和轴以上受压,以下受拉。由于混凝土的抗拉强度远低于抗压强度,所以在荷载达到某一数值 F_c 时,梁的下部就会开裂,从而使梁失去承载能力〔图 1.1(b)〕。由此可见,素混凝土梁的承载能力是由混凝土的抗拉强度控制的,而受压混凝土的抗压强度远未被充分利用。在制造混凝土梁时,倘若在梁的受拉区配置适量的纵向受力钢筋,就构成钢筋混凝土梁。试验表明,和素混凝土梁有相同截面尺寸的钢筋混凝土梁,承受竖向荷载略大于 F_c 时,梁的受拉区混凝土仍会出现裂缝。在出现裂缝的截面处,受拉区混凝土虽退出工作,但配置在受拉区的钢筋将可承担几乎全部的拉力。这时,钢筋混凝土梁不会像素混凝土梁那样立即断裂,而能继续承受荷载作用〔图 1.1(c)〕,直至受拉钢筋的应力达到屈服强度,继而截面受压区的混凝土也被压碎,梁才破坏。因此,混凝土的抗压强度和钢筋的抗拉强度都能得到充分的利用,钢筋混凝土梁的承载能力可较素混凝土梁提高很多。

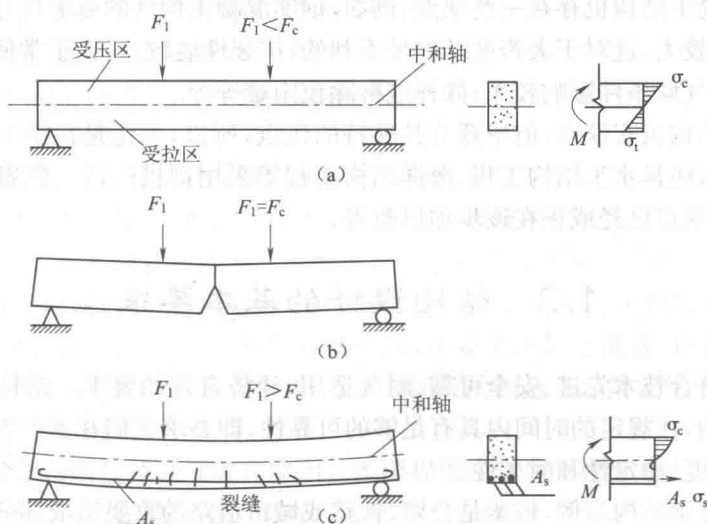


图 1.1 素混凝土梁和钢筋混凝土梁

(a)受竖向力作用的混凝土梁;(b)素混凝土梁的断裂;(c)钢筋混凝土梁的开裂

混凝土的抗压强度高,常用于受压构件。若在构件中配置受力钢筋构成钢筋混凝土受压构件,试验表明,与素混凝土受压构件截面尺寸及长细比相同的钢筋混凝土受压构件相比,不仅承载能力大为提高,而且受力性能得到改善。在这种情况下,钢筋的作用主要是协助混凝土共同承受压力。

综上所述可见,根据构件受力状况配置钢筋构成钢筋混凝土构件,可以充分利用钢筋和混凝土各自的材料特点,把它们有机地结合在一起共同工作,从而提高构件的承载能力、改善构件的受力性能。钢筋的作用是代替混凝土受拉(拉区混凝土出现裂缝后)或协助混凝土受压。

钢筋和混凝土这两种力学性能不同的材料之所以能有效的结合在一起而共同工作,主要是由于:

(1)混凝土和钢筋之间有着良好的黏结力,使两者能可靠地结合成一个整体,在荷载作用下能够很好地共同变形,完成其结构功能。

(2)钢筋和混凝土的温度线膨胀系数也较为接近,钢筋为 $(1.2 \times 10^{-5})/^{\circ}\text{C}$,混凝土为 $(1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5})/^{\circ}\text{C}$,因此,当温度变化时,不致产生较大的温度应力而破坏两者之间

的黏结。

(3) 包围在钢筋外面的混凝土,起着保护钢筋免遭锈蚀的作用,保证了钢筋与混凝土的共同作用。

钢筋混凝土除了能合理地利用钢筋和混凝土两种材料的特性外,还有下述一些优点:

(1) 在钢筋混凝土结构中,混凝土强度是随时间而不断增长的,同时,钢筋被混凝土所包裹而不致锈蚀,所以,钢筋混凝土结构的耐久性是比较好的。钢筋混凝土结构的刚度较大,在使用荷载作用下的变形较小,故可有效地用于对变形有要求的建筑物中。

(2) 钢筋混凝土结构既可以整体现浇也可以预制装配,并且可以根据需要浇制成各种构件形状和截面尺寸。

(3) 钢筋混凝土结构所用的原材料中,砂、石所占的比重较大,而砂、石易于就地取材,故可以降低建筑成本。

但是钢筋混凝土结构也存在一些缺点:例如,钢筋混凝土构件的截面尺寸一般较相应的钢结构大,因而自重较大,这对于大跨度结构是不利的;抗裂性能较差,在正常使用时往往是带裂缝工作的;施工受气候条件影响较大;修补或拆除较困难等等。

钢筋混凝土结构虽有缺点,但毕竟有其独特的优点,所以,无论是桥梁工程、隧道工程、房屋建筑、铁路工程,还是水工结构工程、海洋结构工程等采用都极广泛。随着钢筋混凝土结构的不断发展,上述缺点已经或正在逐步加以改善。

1.3 结构设计的基本要求

结构设计应符合技术先进、安全可靠、耐久适用、经济合理的要求。结构设计的目的是要使所设计的结构,在规定的时间内具有足够的可靠性,即要求它们在承受各种作用后具有足够的承载能力、刚度、稳定性和耐久性。

以交通土建桥梁结构为例,桥梁是公路、铁路或城市道路的重要组成部分,特别是大、中桥梁的建设对当地政治、经济、国防等都具有重要意义。因此,桥梁应根据所在公路的作用、性质和将来发展的需要,除应符合技术先进、安全可靠、适用耐久、经济合理的要求外,还应按照美观和有利环保的原则进行设计,并考虑因地制宜、就地取材、便于施工和养护等因素。

1.4 课程的任务、目标和应注意的问题

《混凝土结构设计原理》课程的任务是按照交通土建类专业教学要求,重点介绍钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构材料物理力学性能及基本构件受力性能、设计计算原理、方法和构造。通过本课程的学习,将具备工程结构的基本知识,掌握各种基本构件的受力性能及其变形的规律,并能根据有关设计规范和资料进行构件的设计。

为了学好本课程,应注意以下几个方面:

(1) 结构设计的多方案性。《混凝土结构设计原理》课程的重要内容是桥涵结构构件设计。它涉及方案比较、材料选择、构件选型及合理布置等多方面,是一个多因素的综合性问题。对于构件设计,不仅仅是构件承载能力和变形的计算,同一构件在给定的材料和同样的荷载作用下,即使截面形式相同,设计结果的截面尺寸和截面布置也不是唯一的。设计结果是否满足要求,主要看是否符合设计规范要求,并且满足经济性和施工可行性等。

(2)注意课程之间的联系与区别。《混凝土结构设计原理》课程是一门重要的专业技术基础课,其主要先修课程有《材料力学》、《结构力学》和《建筑材料》,并为进一步学习《桥梁工程》课程奠定基础。

《混凝土结构设计原理》在性质上与《材料力学》有不少相似之处,但也有很多不同的地方。《材料力学》主要研究单一、匀质、连续、弹性(或理想弹塑性)材料的构件,而本课程研究的是工程结构的构件。工程结构的某些材料(如混凝土)不一定是匀质、弹性和连续的材料。因此,直接使用材料力学公式的情况并不多。但是,《材料力学》通过几何条件、物理条件和平衡关系建立基本方程的方法,对《混凝土结构设计原理》是普遍适用的,而在每一种关系的具体内容上则需考虑工程结构的材料性能特点。

(3)公式复杂,适用条件多。由于各种工程结构的材料受力性能各异,例如混凝土材料,本身的物理力学性能很复杂,加之还有其他很多影响因素,目前还没有建立起比较完整的强度理论,因此,关于一些材料的强度和变形规律,在很大程度上是基于大量的试验资料分析给出的经验关系。这样,在《混凝土结构设计原理》中,构件的某些计算公式是根据试验研究及理论分析得到的半经验半理论公式。在学习和运用这些公式时,要正确理解公式的本质,特别注意公式的使用条件及适用范围。

(4)重视构造措施。尽管现在计算方法和手段已经非常先进,但在结构设计时,仍有很多因素难以用计算手段加以解决,难以用计算公式表达。规范根据长期工程实践经验,总结出了一些构造措施来考虑这些因素的影响。构造措施就是对结构计算中未能详细考虑和难以定量计算的因素,在施工简便、经济合理前提下所采取的技术措施,它与结构计算是结构设计中相辅相成的两个方面。课程学习时,不但要重视计算,还要重视构造措施,设计必须满足各项构造要求。各种设计规范对构造的规定很多,除了常识性的构造规定需记忆外,其他构造规定重在理解和应用,不能死记硬背。

(5)重视原理学习和规范的理解和应用。本课程面向交通土建大类专业,讲授原理和学习规范并重。目前我国结构设计规范主要有三大类。

工业与民用建筑混凝土结构设计依据的规范有:《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)。

目前我国交通部颁布使用的公路桥涵设计规范有:《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)和《公路桥涵钢结构和木结构设计规范》(JTJ 025—86)。

原铁道部颁布的铁路桥梁设计规范有:《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002.1—2005)和《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》(TB 10002.3—2005)。

本书将以上三类规范分别简称为《混规》、《公路桥规》和《铁路桥规》。本书中关于基本构件的设计原则、计算公式、计算方法及构造要求无特别说明外均参照《公路桥规》编写。而对引用的其他设计规范、标准和规程等,将给予全称,以免混淆。

必须指出,虽然基本原理都相近,但规范的具体规定却各不相同。在实际应用时,应根据所设计的结构类型,按相应的规范规定进行,不能盲目套用,更不能将本书当作规范使用。如设计铁路桥梁,应按照现行铁路桥涵设计规范进行设计,设计房屋时,应按照现行的混凝土结构设计规范进行设计。

在学习本课程中要学会应用设计规范,设计规范是国家颁布的关于设计计算和构造要求

的技术规定和标准,是具有一定约束性和技术法规性的文件。它是贯彻国家的技术经济政策,保证设计质量,达到设计方法上必要的统一和标准,也是校核工程结构设计的依据。

由于科学技术水平和工程实践经验是不断发展和积累的,设计规范也必然要不断进行修改和增订,才能适应指导设计工作的需要。因此,在学习本课程时,应掌握各种基本构件的受力性能、强度和变形的变化规律,从而能对目前设计规范的条文概念和实质有正确理解,对计算方法能正确应用,这样才能适应今后设计规范的发展,不断提高自身的设计水平。

第 2 章

结构按极限状态法 设计计算的原则



学习目标

1. 理解结构设计方法发展过程。
2. 掌握结构可靠性、可靠度、极限状态、功能函数含义。
3. 理解承载能力极限状态和正常使用极限状态表达式。
4. 掌握作用的分类、代表值、作用效应组合表达式。



本章重点

极限状态设计表达式和作用效应组合表达式。



本章难点

作用效应组合表达式。

2.1 结构设计方法发展概述

钢筋混凝土结构构件的“设计”是指在预定的作用及材料性能条件下,确定构件按功能要求所需要的截面尺寸、配筋和构造要求。

自 19 世纪末钢筋混凝土结构在土木建筑工程中出现以来,随着生产实践的经验积累和科学研究的不断深入,钢筋混凝土结构的设计理论在不断地发展和完善。结构设计方法经历了从容许应力法、破坏阶段设计法、极限状态设计法到概率极限状态设计法的发展过程。

2.1.1 容许应力法

最早的钢筋混凝土结构设计理论,是采用以弹性理论为基础的容许应力算法。这种方法要求在规定的标准荷载作用下,按弹性理论计算得到的构件截面任一点的应力应不大于规定的容许应力,而容许应力是由材料强度除以安全系数求得的。安全系数则依据工程经验和主观判断来确定,安全系数是一个大于 1.0 的某一个数值,越大就认为越安全。计算时只要截面应力不大于容许应力,就认为结构或截面是“绝对安全”的。事实上,“绝对”是不存在的,到底有多安全,其实也是未知的,因为安全系数是根据经验确定的。

另外,由于钢筋混凝土并不是一种弹性匀质材料,而是表现出明显的塑性性能,因此,这种以弹性理论为基础的计算方法是不可能如实地反映构件截面破坏时的应力状态和正确地计算出结构构件的承载能力的。

2.1.2 破坏阶段法

20 世纪 30 年代,前苏联首先提出了考虑钢筋混凝土塑性性能的破坏阶段计算方法。它以充分考虑材料塑性性能的结构构件承载能力为基础,从而使按材料标准极限强度计算的承载能力必须大于计算的最大荷载产生的内力。计算的最大荷载是由规定的标准荷载乘以单一的安全系数而得出的。安全系数仍是依据工程经验和主观判断来确定。

2.1.3 极限状态设计法

随着对荷载和材料强度的变异性的进一步研究,前苏联在 20 世纪 50 年代又率先提出了极限状态算法。极限状态算法是破坏阶段算法的发展,它规定了结构的极限状态,并把单一安全系数改为三个分项系数,即荷载系数、材料系数和工作条件系数。从而把不同的外荷载、不同的材料以及不同构件的受力性质等,都用不同的安全系数区别开来,使不同的构件具有比较一致的安全度,而部分荷载系数和材料系数基本上是根据统计资料用概率方法确定的。因此,这种计算方法被称为半经验、半概率的“三系数”极限状态设计法。我国原《公路桥规》(1985)采用的就是这种设计方法。

2.1.4 概率极限状态设计法

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。我国虽然直到 20 世纪 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,但很快取得成效。1984 年国家计委批准《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—1984),该标准提出了以可靠性为基础的概率极限状态设计统一原则。经过努力,适于全国并更具综合性的《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—1992)于 1992 年正式发布。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,其中《港口工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50158—1992)、《铁路工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50216—1994)、《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999)分别于 1992 年、1994 年和 1999 年正式发布。

《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999)全面引入了结构可靠性理论,把影响结构可靠性的各种因素均视为随机变量,以大量现场实测资料和试验数据为基础,运用统计数学的方法,寻求各变量的统计规律,确定结构的失效概率(或可靠度)来度量结构的可靠性,通常称为“可靠度设计法”,而将其应用于结构的极限状态设计则称为“概率极限状态设计法”。该标准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公路工程结构设计的总原则。

当前,国际上将结构概率设计法按精确程度不同分为三个水准,即水准Ⅰ、水准Ⅱ和水准Ⅲ。

1. 水准Ⅰ——半概率设计法

这一水准设计方法虽然在荷载和材料强度上分别考虑了概率原则,但它把荷载和抗力分开考虑,并没有从结构构件的整体性出发考虑结构的可靠度,因而无法触及结构可靠度的核

心——结构的失效概率,并且各分项安全系数主要依据工程经验确定,所以称其为半概率设计法。

2. 水准Ⅱ——近似概率设计方法

这是目前在国际上已经进入实用阶段的概率设计法。它运用概率论和数理统计,对工程结构、构件或截面设计的“可靠概率”,做出较为近似的相对估计。我国《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—1992)、《铁道工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50216—1994)以及《公路工程结构设计统一标准》(GB/T 50283—1999)等确定的以概率理论为基础的一次二阶矩极限状态设计方法就属于这一水准的设计方法。虽然这已经是一种概率方法,但是,由于在分析中忽略了或简化了基本变量随时间变化的关系;确定基本变量的分布时受现有信息量限制而具有相当的近似性;并且,为了简化设计计算,将一些复杂的非线性极限状态方程线性化,所以它仍然只是一种近似的概率法。不过,在现阶段它确实是一种处理结构可靠度的比较合理且可行的方法。

3. 水准Ⅲ——全概率设计法

全概率设计法是一种完全基于概率理论的较理想的方法。它不仅把影响结构可靠度的各种因素用随机变量概率模型去描述,更进一步考虑随时间变化的特性并用随机过程概率模型去描述,而且在对整个结构体系进行精确概率分析的基础上,以结构的失效概率作为结构可靠度的直接度量。这当然是一种完全的、真正的概率方法。目前,这还只是值得开拓的研究方向,真正达到实用还需经历较长的时间。

在以上的后两种水准中,水准Ⅱ是水准Ⅲ的近似。在水准Ⅲ的基础上再进一步发展就是运用优化理论的最优全概率法。

2.2 概率极限状态设计法的基本概念

2.2.1 结构可靠性

结构设计的目的,就是要使所设计的结构,在规定的时间内能够在具有足够可靠性的前提下,完成全部预定功能的要求。结构的功能是由其使用要求决定的,具体概括为如下三个方面。

1. 安全性

安全性指结构应能承受在正常施工和正常使用期间可能出现的各种荷载、外加变形、约束变形等的作用;在设计规定的偶然荷载(如地震、强风)作用下或偶然事件(如爆炸)发生时和发生后,结构仍能保持整体稳定性,不发生倒塌或连续破坏。

2. 适用性

适用性指结构在正常使用条件下具有良好的工作性能,例如,不发生影响正常使用的过大变形(梁有过大的挠度、结构有过大的侧移等)或局部损坏、过强烈的振动(振幅过大)以及让使用者感到不安的裂缝宽度等。

3. 耐久性

结构在正常使用和正常维护的条件下,在规定的时间内,具有足够的耐久性,例如,不发生由于混凝土保护层碳化或裂缝宽度过大而导致的钢筋锈蚀过快或过度,从而致使结构的使用寿命缩短。

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。

2.2.2 结构可靠度

1. 结构可靠度

可靠性的数量描述一般用可靠度。结构可靠度定义是指: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。这里所说的“规定时间”是指对结构进行可靠度分析时,结合结构使用期,考虑各种基本变量与时间的关系所取用的基准时间参数;“规定的条件”是指结构正常设计、正常施工和正常使用的条件,即不考虑人为过失的影响;“预定功能”是指上面提到的三项基本功能。

由此可见,结构可靠度是结构可完成“预定功能”的概率度量,它是建立在统计数学的基础上经计算分析确定,从而给结构的可靠性一个定量的描述。因此,可靠度比安全度的含义更广泛,更能反映结构的可靠程度。

2. 设计基准期与使用寿命

可靠度概念中的“规定时间”即设计基准期,是在进行结构可靠性分析时,考虑持久设计状况下各项基本变量与时间关系所采用的基准时间参数,可参考结构使用寿命的要求适当选定,但不能将设计基准期简单地理解为结构的使用寿命,两者是有联系的,然而又不完全等同。当结构的使用年限超过设计基准期时,表明它的失效概率可能会增大,不能保证其目标可靠指标,但不等于结构丧失所要求的功能甚至报废。例如,桥梁结构的设计基准期定义为 $T=100$ 年,但到了 100 年时不一定该桥梁就不能使用了。一般来说,使用寿命长,设计基准期也可以长一些,使用寿命短,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。影响结构可靠度的设计基本变量如车辆作用、人群作用、风作用、温度作用等都是随时间变化的,设计变量取值大小与时间长短有关,从而直接影响结构可靠度。因此,必须参照结构的预期寿命、维护能力和措施等规定结构的设计基准期。目前,国际上对设计基准期的取值尚不统一,但多取 50~120 年。我国公路桥梁结构的设计基准期统一取为 100 年,属于适中域。

2.2.3 结构极限状态

结构在使用期间的工作情况,称为结构的工作状态。

当整个结构或结构的一部分超过某一特定状态而不能满足设计规定的某一功能要求时,则此特定状态称为该功能的极限状态。结构能够满足各项功能要求而良好地工作,称为结构“可靠”,反之则称结构“失效”。结构工作状态是处于可靠还是失效的标志用“极限状态”来衡量。对于结构的各种极限状态,均应规定明确的标志和限值。一般将结构的极限状态分为如下两类:

1. 承载能力极限状态

承载能力极限状态是与结构安全性相关联的极限状态,由于其失效的后果严重,因此也是相对重要和设计者更关心的极限状态。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或变位的状态。当结构或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(如桥跨结构倾覆、挡土墙滑动等);

(2) 结构构件或连接处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(如钢结构螺栓抗剪连接中当螺栓杆过细时会产生明显的弯曲变形从而导致连接节点变形过大而失效);

(3)结构转变成机动体系(如静定结构中产生一个塑性铰或超静定结构中产生足够多的塑性铰时);

(4)结构或结构构件丧失稳定(如柱的压屈失稳等)。

2. 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限值的状态。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;

(3)影响正常使用的振动;

(4)影响正常使用的其他特定状态。

虽然正常使用极限状态后果一般不如超过承载能力极限状态那么严重,但也不可忽视,否则就会产生一定的经济损失。如过大的变形会造成房屋内粉刷层剥落、门窗变形、填充墙和隔断墙开裂以及屋面积水等后果;水池和油罐结构开裂会引起渗漏,这类结构在设计时往往是正常使用极限状态控制设计;过大的变形和裂缝也会引起人们心理上的不安全感;人体敏感的振动影响身心健康,降低劳动生产效率。

目前,结构可靠度设计一般是将赋予概率意义的极限状态方程转化为极限状态设计表达式,此类设计均可称为概率极限状态设计。工程结构设计中应用概率意义上的可靠度、可靠概率或可靠指标来衡量结构的安全程度,表明工程结构设计思想和设计方法产生了质的飞跃。实际上,结构的设计不可能是绝对可靠的,至多是说它的不可靠概率或失效概率相当小,关键是结构设计的失效概率小到何种程度人们才能比较放心地接受。以往采用的容许应力和定值极限状态等传统设计方法实际上也具有一定的设计风险,只是其失效概率未像现在这样被人们明确地揭示出来。

2.2.4 结构功能函数与结构状态

工程结构的可靠度通常受各种作用效应、材料性能、结构几何参数、计算模式准确程度等诸多因素的影响。在进行结构可靠度分析和设计时,应针对所要求的结构各种功能,把这些有关因素作为基本变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 来考虑,由基本变量组成的描述结构功能的函数 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 称为结构功能函数,结构功能函数是用来描述结构完成功能状况的、以基本变量为自变量的函数。实用上,也可以将若干基本变量组合成综合变量,例如将作用效应方面的基本变量组合成综合作用效应 S , 抗力方面的基本变量组合成综合抗力 R , 从而结构的功能函数为 $Z = R - S$ 。

如果对功能函数 $Z = R - S$ 作一次观测,可能出现如下 3 种情况(图 2.1)。

$Z = R - S > 0$ 结构处于可靠状态;

$Z = R - S < 0$ 结构已失效或破坏;

$Z = R - S = 0$ 结构处于极限状态。

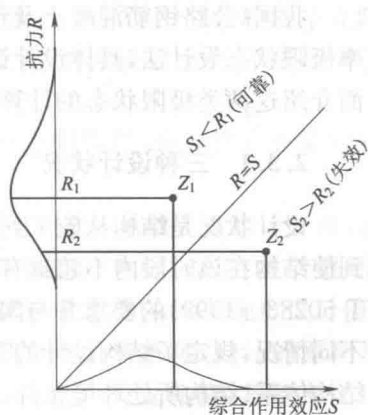


图 2.1 结构所处状态