



普通高等教育“十二五”规划教材
中国科学院教材建设专家委员会“十二五”规划教材

混凝土结构设计

孙跃东 主编
周新刚 主审



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
中国科学院教材建设专家委员会“十二五”规划教材

混凝土结构设计

孙跃东 主编

周新刚 主审

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据国家颁发的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)等规范编写而成。

全书的内容包括:概论(包括结构设计的步骤和方法、建筑工程结构设计文件的编制要求、结构承受的荷载和结构极限状态的设计表达式);混凝土梁板结构(包括单向板、双向板、无梁楼盖、密肋楼盖和井字楼盖、装配式楼盖以及不规则板等);楼梯和悬挑构件(包括板式楼梯、梁式楼梯、悬挑楼梯螺旋楼梯和装配式楼梯,雨篷和阳台等悬挑构件);混凝土排架结构;混凝土多层框架结构;混凝土结构抗震设计(包括结构抗震设计的基本知识、单层厂房抗震设计、框架结构抗震设计和框架结构设计例题)。每章有适量的例题、本章提要、小结、思考题,2~5章有习题,以帮助读者理解和掌握基本概念和基本设计方法。

本书可作为高等院校土木工程专业的教材,同时也可作为土建类科研、设计、施工和管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计/孙跃东主编. —北京:科学出版社, 2015

(普通高等教育“十二五”规划教材·中国科学院教材建设专家委员会“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-03-045113-2

I. ①混… II. ①孙… III. ①混凝土结构—结构设计—高等学校—教材
IV. ①TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 132949 号

责任编辑:童安齐 王杰琼 / 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

百善印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 7 月第一次印刷 印张:30 3/4

字数:710 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(百善))

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62135235 (VP04)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

“混凝土结构设计”作为“混凝土结构设计原理”的后续课程，是土木工程专业重要的专业课程。本书根据国家颁发的《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)、《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)等编写而成。在编写中力求贯彻全国高等学校土木工程学科专业指导委员会审批的“土木工程专业指导规范”和“卓越工程师教育培养计划”精神。

本书遵循“概念明确、思路清晰、结合实际、方便应用”进行编写，重点放在结构方案和结构体系的选择、结构的荷载计算、结构计算简图、结构的荷载组合、结构构件的截面设计和构造要求等方面。书中每章有内容提要、小结、适量的例题、思考题和习题，以帮助读者理解和掌握基本概念和基本设计方法。

本书由孙跃东任主编，并进行修改定稿工作；谢群、赵永生任副主编；周新刚任主审。

本书共分为6章，其中，第1章，第2章第2.1、2.4、2.5、2.7节，第3章，第4章第4.5、4.6、4.7节由孙跃东编写；第5章第5.1、5.2、5.6、5.8节由孙跃东、高秋梅、刘锋编写；第4章第4.8节由李柏栋、黄一杰编写；第2章第2.2、2.3节，第4章第4.1、4.2、4.3、4.4节由谢群编写；第5章第5.3、5.4、5.5节由孟丹编写；第2章第2.6节，第5章第5.7节由赵永生编写；第6章由孙黄胜、孙跃东编写。赵相虎、王康等对本书进行了文字和插图的整理工作。

对本书编写过程中给予指导和帮助的各位教授、同事以及学生表示衷心的感谢。

由于编者的水平和经验有限，书中不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者
2015年4月

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 结构设计的一般程序	2
1.1.1 建筑工程的设计阶段	2
1.1.2 结构设计的基本内容	2
1.1.3 结构分析的基本原则	4
1.1.4 结构分析方法	4
1.1.5 间接作用分析	7
1.1.6 结构设计软件	8
1.2 建筑工程结构设计文件的编制要求	9
1.2.1 方案设计阶段	9
1.2.2 初步设计阶段	10
1.2.3 施工图设计阶段	10
1.3 结构承受的荷载	15
1.3.1 荷载的分类	15
1.3.2 永久荷载的计算	15
1.3.3 屋面和楼面活荷载	16
1.3.4 雪荷载	17
1.3.5 风荷载	18
1.3.6 温度作用	20
1.3.7 偶然荷载	21
1.4 结构极限状态的设计表达式	21
1.4.1 承载能力极限状态	21
1.4.2 正常使用极限状态	22
1.4.3 抗震组合	23
1.5 本课程的基本内容、特点和学习要求	24
1.5.1 本课程的基本内容	24
1.5.2 本课程的特点和学习要求	25
小结	26
思考题	26
第 2 章 混凝土梁板结构	28
2.1 概述	28
2.1.1 楼盖结构的类型	29
2.1.2 梁、板截面尺寸	30

2.1.3	肋梁楼盖的荷载传递	30
2.2	现浇单向板肋梁楼盖	33
2.2.1	结构平面布置	33
2.2.2	计算简图的确定	35
2.2.3	单向板肋梁楼盖按弹性理论的分析方法	38
2.2.4	单向板肋梁楼盖按塑性理论的分析方法	42
2.2.5	连续梁(板)考虑塑性内力重分布的内力计算方法——弯矩调幅法	47
2.2.6	单向板肋梁楼盖的截面设计与构造要求	52
2.2.7	现浇单向板肋梁楼盖设计例题	59
2.3	现浇双向板肋梁楼盖	69
2.3.1	双向板肋梁楼盖按弹性理论算法	69
2.3.2	双向板肋梁楼盖按塑性理论算法——塑性铰线法	71
2.3.3	双向板支承梁的设计	78
2.3.4	双向板楼盖的截面设计与构造	80
2.3.5	双向板肋梁楼盖设计例题	81
2.4	无梁楼盖	87
2.4.1	无梁楼盖的受力性能	88
2.4.2	无梁楼盖按弹性理论计算方法	89
2.4.3	柱帽设计	93
2.4.4	截面设计与配筋构造	95
2.4.5	无梁楼盖实例	96
2.5	密肋楼盖和井字梁楼盖	102
2.5.1	密肋楼盖	102
2.5.2	井字梁楼盖	105
2.5.3	井字梁楼盖设计实例	107
2.6	装配式混凝土楼盖	109
2.6.1	装配式楼盖的平面布置方案	109
2.6.2	预制混凝土铺板	110
2.6.3	楼盖梁形式	112
2.6.4	装配式构件的计算要点	112
2.6.5	装配式楼盖的连接构造	113
2.7	不规则板的计算	115
2.7.1	三角形板	115
2.7.2	梯形板	121
2.7.3	圆形板	122
2.7.4	扇形板	126
2.7.5	板上开洞的配筋构造	128
	小结	130
	思考题	132
	习题	133

第3章 楼梯和悬挑构件	135
3.1 楼梯	135
3.1.1 板式楼梯	135
3.1.2 梁式楼梯	144
3.1.3 悬挑楼梯	154
3.1.4 螺旋楼梯	158
3.1.5 装配式楼梯	159
3.2 悬挑构件	161
3.2.1 雨篷	161
3.2.2 阳台	168
3.2.3 其他悬挑构件	174
小结	177
思考题	177
习题	178
第4章 单层工业厂房	179
4.1 单层厂房的分类	179
4.1.1 单层工业厂房按承重结构的材料分类	179
4.1.2 按承重结构的形式分类	179
4.2 装配式钢筋混凝土排架厂房的组成和布置	181
4.2.1 结构组成	181
4.2.2 结构布置	183
4.2.3 厂房高度的确定	187
4.2.4 支撑的布置	188
4.2.5 围护结构布置	193
4.3 单层厂房结构主要构件选型	195
4.3.1 国家建筑标准设计图集介绍	195
4.3.2 屋面主要构件选型	196
4.3.3 屋架(屋面梁)的选型	198
4.3.4 吊车梁的选型	199
4.4 排架结构的内力分析	200
4.4.1 计算简图的确定	200
4.4.2 荷载的计算	202
4.4.3 排架内力分析	211
4.4.4 排架结构的内力组合	216
4.4.5 厂房的空间作用	218
4.4.6 排架的水平位移验算	221
4.5 柱的设计	223
4.5.1 柱的结构形式与截面尺寸	223
4.5.2 柱的配筋计算	224

4.5.3	牛腿设计	226
4.5.4	矩形截面和 I 形截面柱的构造要求	231
4.5.5	抗风柱的设计	232
4.5.6	柱的吊装验算	233
4.6	柱下独立基础设计	234
4.6.1	基础底面尺寸的确定	234
4.6.2	基础高度的确定	237
4.6.3	底板配筋计算	238
4.6.4	构造要求	240
4.7	连接构造及预埋件设计	243
4.7.1	屋架系统连接构造	243
4.7.2	吊车梁系统连接	247
4.7.3	柱间支撑与柱的连接	248
4.7.4	预埋件设计	248
4.7.5	吊环设计	252
4.8	单层钢筋混凝土工业厂房设计示例	253
4.8.1	工程概况	253
4.8.2	主要结构构件选型	256
4.8.3	排架的荷载计算	261
4.8.4	排架的内力分析	266
4.8.5	内力组合	270
4.8.6	排架柱设计	273
4.8.7	抗风柱设计	282
4.8.8	基础设计	284
	小结	291
	思考题	291
	习题	292
第 5 章	多层框架结构	295
5.1	框架结构的组成和结构布置	295
5.1.1	框架结构的组成	295
5.1.2	框架结构的分类	296
5.1.3	框架结构的布置	296
5.2	框架结构的计算简图	301
5.2.1	框架梁、柱截面尺寸	301
5.2.2	框架结构的计算简图	303
5.2.3	框架结构上的荷载	307
5.3	竖向荷载作用下框架结构内力的分层法计算	307
5.3.1	基本假定	307
5.3.2	计算步骤	308

5.4	水平荷载作用下框架结构内力和侧移的计算	311
5.4.1	水平荷载作用下框架结构的受力及变形特点	311
5.4.2	反弯点法	312
5.4.3	D 值法	317
5.4.4	框架结构侧移的近似计算	322
5.4.5	框架结构侧移考虑二阶效应的近似计算	323
5.5	荷载效应组合及构件设计	324
5.5.1	荷载效应组合	324
5.5.2	构件设计	328
5.6	非抗震设计框架结构的配筋构造要求	329
5.6.1	框架梁	329
5.6.2	非框架梁的纵筋配筋构造要求	332
5.6.3	框架柱	333
5.7	装配整体式框架连接节点与叠合构件	337
5.7.1	装配整体式框架结构	337
5.7.2	装配整体式框架结构的预制构件	338
5.7.3	预制构件之间的后浇混凝土连接	341
5.7.4	装配整体式框架承载力计算	347
5.8	框架结构基础	349
5.8.1	基础类型及其选择	349
5.8.2	双柱联合基础设计	351
5.8.3	柱下条形基础设计	353
5.8.4	柱下十字交叉条形基础设计	355
	小结	359
	思考题	361
	习题	362
第 6 章	混凝土结构抗震设计	363
6.1	建筑抗震概念设计	363
6.2	单层厂房抗震设计	369
6.2.1	单层工业厂房震害	369
6.2.2	单层工业厂房结构布置	371
6.2.3	单层工业厂房抗震计算	372
6.2.4	单层工业厂房抗震措施	382
6.3	框架结构抗震设计	386
6.3.1	框架结构的震害	386
6.3.2	框架结构抗震设计计算	388
6.3.3	框架梁的抗震设计	391
6.3.4	框架柱的抗震设计	396
6.3.5	框架节点核心区抗震设计	402

6.4 框架结构设计例题	405
6.4.1 工程概况和设计资料	405
6.4.2 框架梁柱截面尺寸的确定和结构布置	407
6.4.3 结构竖向荷载及内力计算	409
6.4.4 风荷载作用下的内力	417
6.4.5 地震作用计算	420
6.4.6 重力荷载代表值作用下的内力	425
6.4.7 内力组合	427
6.4.8 框架梁柱的截面设计及配筋	433
6.4.9 框架梁柱正常使用极限状态（裂缝和变形）、框架侧移验算	440
6.4.10 基础计算及配筋	442
小结	443
思考题	444
附录 1 常用材料和构件的自重	445
附录 2 荷载计算常用参数	449
附录 3 等截面等跨连续梁在常用荷载作用下的内力系数表	456
附录 4 双向板按弹性分析的计算系数表	465
附录 5 圆形板的弯矩系数和挠度系数	470
附录 6 5~50/5t 一般用途电动桥式起重机基本参数和尺寸系列 (ZQ1-62)	472
附录 7 单阶变截面柱的柱顶位移系数 C_0 和反力系数 $C_1 \sim C_{11}$	473
附录 8 规则框架承受均布及倒三角形分布水平荷载作用时反弯点的高度比	475
主要参考文献	480

第1章 概 论

本章提要

- 1) 结构设计的一般步骤和方法;
- 2) 结构承受的荷载、主要荷载的取值和计算;
- 3) 结构极限状态的设计表达式;
- 4) 结构设计文件的编制要求;
- 5) 本课程的基本内容、特点和学习要求。

建筑结构是房屋建筑的骨架,该骨架是由若干基本构件(梁、板、柱、墙、杆、壳等)通过一定连接方式构成的整体,能安全可靠地承受自重及其在使用中(或施工过程中)可能出现的各种作用,并能将这些作用传递给地基。建筑结构的作用:①形成人们活动所需要的、功能良好和舒适美观的空间;②能够抵御自然和人为的各种作用,使建筑物安全、适用、耐久,并在突发偶然事件时能保持整体稳定;③能充分发挥所使用材料的效能。

建筑结构按其用途可分为工业建筑结构和民用建筑结构;按其材料可分为混凝土结构、钢结构、砌体结构、木结构、混合结构等;按其体型和高度可划分为单层结构(如单层工业厂房等)、多层结构、高层结构和大跨结构等;按其主要承重结构体系可划分为排架结构、框架结构、框架-剪力墙结构、剪力墙结构和筒体结构等。

建筑结构由竖向承重结构体系、水平承重结构体系和下部结构三部分组成。竖向承重结构由墙和柱等构件组成,承受竖向荷载和水平荷载的作用,如墙体结构、框架结构、框架-剪力墙结构和筒体结构等。水平承重结构由楼盖、屋盖、楼梯等组成,它将竖向荷载传递至竖向承重结构上。下部结构包括地下室和基础,无地下室的建筑结构只包括基础。混凝土基础主要形式有柱下独立基础、条形基础、梁板基础(也称为倒梁板基础、片筏基础)等;地下室还可以做成兼有水平和竖向结构的箱形基础。

混凝土结构是目前采用最多的结构,包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构及纤维混凝土结构等。常见的结构形式有混凝土基础、挡土墙和支墩、混凝土排架结构、框架结构、剪力墙结构和框架-剪力墙结构等。在高层特别是超高层建筑结构中,其结构形式常采用组合结构或混合结构,但主要的承重结构体系仍然为混凝土结构,如建筑总高度为 828m 的迪拜哈利法塔(目前世界最高建筑),-30~601m 为钢筋混凝土剪力墙结构,601~828m 为钢结构。建筑总高度为 632m 的上海中心(结构高度为 580m,2013 年 8 月 3 日结构封顶,目前为我国最高建筑),结构形式为钢筋混凝土核心筒-外框架结构。在各类多高层建筑结构中,楼盖或屋盖水平承重结构体系基本上采用混凝土结构。

1.1 结构设计的一般程序

1.1.1 建筑工程的设计阶段

工程项目建设程序是指从策划、评估、决策、勘察、设计、施工到竣工验收、投入生产或交付使用的整个建设过程，其主导线为工程勘察、设计和施工三个环节。

大型建筑工程设计可分为三个阶段进行，即初步设计阶段、技术设计阶段和施工图设计阶段。对一般的建筑工程，可按初步设计和施工图设计两阶段进行。

1. 初步设计阶段

初步设计阶段主要是确定工程的基本规模、重要工艺、设备以及概算总投资等原则问题，提出工程项目的方案设计。该阶段需完成的设计文件有设计说明书、必要的设计图纸、主要设备和材料清单、投资估算及效果透视图等，应在调查研究和设计基础资料的基础上分专业编制。

结构设计工程师的主要任务是编制结构设计说明。结构设计说明的主要内容包括：①选定主要结构材料；②阐述建筑所在地域、地界、有关自然条件、抗震设防烈度、工程地质概况等；③设计采用的主要规范、标准以及构件标准图等；④上部结构选型、基础选型、人防结构及抗震设计初步方案等；⑤结构平面布置（如应标出柱网、剪力墙、结构缝等）；⑥需要说明的其他问题，如工艺的特殊要求、与相邻建筑物的关系、基坑特征及防护等。

2. 技术设计阶段

技术设计是针对技术上复杂或有特殊要求而又缺乏设计经验的建设项目而增设的一个设计阶段，是在初步设计基础上对初步设计方案的具体化、调整和深化，其目的是进一步解决初步设计阶段一时无法解决的一些重大问题。

3. 施工图设计阶段

施工图设计主要通过图纸把设计者的意图和全部设计结果表达出来，施工图作为施工的依据，是设计和施工的桥梁。施工图按专业内容可分为建筑、结构、水、暖、电等部分。

结构专业施工图设计的主要任务是根据建筑方案进行结构选型和结构布置，确定有关结构构件尺寸，进行结构内力分析、荷载效应组合和构件截面设计，并绘制结构施工图。在施工过程中，还要根据新出现的情况，对设计做必要的修改和变更。

1.1.2 结构设计的基本内容

结构设计的基本内容包括结构方案设计、结构分析、荷载效应组合、构件设计、连接及其构造设计和绘制结构施工图等。

1. 结构方案设计

结构方案设计主要是配合建筑设计的功能和造型要求,结合所选结构材料的特性,从结构受力、安全性和经济性等方面综合考虑,确定合理的结构形式。结构方案应符合**受力合理、技术可行和尽可能经济的原则**。

结构方案对建筑物的安全有重要影响,其设计主要包括结构选型、结构布置和主要构件的截面尺寸估算等内容。

1) 结构选型。就是根据建筑的用途及功能、建筑高度、荷载情况和所具备的物质与施工技术条件等因素选用合理的结构体系,主要包括承重结构、楼盖结构、基础形式的确定等内容。在初步设计阶段,一般应进行方案比较,选择最优的方案。

2) 结构布置。就是在结构选型的基础上,选用构件形式,确定各结构构件之间的相互关系和传力路径,主要包括定位轴线、构件布置和结构缝的设置等内容。

结构布置应遵循的主要原则:①结构的平、立面布置宜规则,各部分的质量和刚度宜均匀、连续;②结构的传力途径应简捷、明确,竖向构件宜连贯、对齐;③宜采用超静定结构,重要构件和关键传力部位应增加冗余约束或有多条传力途径;④合理设置结构缝(包括伸缩缝、沉降缝、防震缝、构造缝、防连续倒塌的分割缝等),应根据结构受力特点及建筑尺度、形状、使用功能等要求,合理确定结构缝的位置和构造形式,尽量做到“一缝多能”。

3) 构件截面尺寸的估算。截面尺寸一般根据刚度和稳定条件,参考类似工程经验确定。如根据跨高比确定梁的截面高度,高宽比确定梁的截面宽度;根据轴压比限制来估算柱的截面尺寸等。

2. 结构分析和荷载效应组合

结构分析前要确定结构上的作用(荷载)。我国现行《建筑结构荷载规范》(GB 50009)(以下简称《荷载规范》)将结构上的荷载分为永久荷载、可变荷载和偶然荷载三类。有抗震设防要求的还要考虑地震荷载作用。荷载的计算参见1.3节。

结构分析是指结构在各种荷载作用下的内力和变形等作用效应计算,其核心问题是确定结构计算模型,包括确定结构力学模型、计算简图和采用的计算方法。计算简图的选取既要反映结构的实际工作性能,又要便于计算,因此要抓住本质和主流,略去不重要的细节。

荷载效应组合是指按照结构可靠度理论把各种荷载效应按一定规律加以组合,以求得在各种可能同时出现的荷载作用下结构构件控制截面的最不利内力,参见1.4节。

3. 结构构件设计

根据结构荷载效应组合结果,选取对配筋起控制作用的截面最不利组合内力,按承载能力极限状态进行截面的配筋计算,按正常使用极限状态进行裂缝宽度和变形验算,计算结果尚应满足相应的构造要求。

4. 连接及构造设计

构件之间的连接构造设计就是保证连接节点处被连接构件之间的传力性能符合设

计要求, 保证不同材料结构构件之间良好结合, 因此选择可靠的连接方式以及保证可靠传力的措施是连接构造设计的关键。

5. 施工图绘制

施工图是全部设计工作的最后成果, 是进行施工的主要依据, 是设计意图最准确、最完整的体现, 是保证工程质量的重要环节。结构施工图编号前一般冠以“结施”字样, 其绘制应遵守一般的制图规定和要求, 参见 1.2 节。

1.1.3 结构分析的基本原则

结构分析是指根据已确定的结构计算简图, 进行作用(荷载)统计, 采用适当的分析方法, 求出结构内力和变形, 以便根据计算结果进行构件设计。

对混凝土结构进行结构分析时, 应遵守以下基本原则:

1) 混凝土结构应进行整体作用(荷载)效应分析, 必要时还应对结构中受力状况特殊部位进行更详细的分析, 如较大孔洞周围、节点、支座和集中荷载作用点附近等。

2) 当结构在施工和使用期的不同阶段有多种受力状况时, 应分别进行结构分析, 并确定其最不利的作用效应组合, 如结构的施工期、检修期和使用期, 预制构件的制作、运输和安装阶段等。当结构可能遭遇火灾、飓风、爆炸、撞击等偶然作用时, 尚应按国家现行有关标准的要求进行相应的结构分析。

3) 结构分析的模型应符合下列要求: ①分析采用的计算简图、几何尺寸、计算参数、边界条件、结构材料性能指标、构造措施等应符合实际工作状况; ②结构上可能的作用(荷载)及其组合、初始应力和变形状况等也应符合结构的实际工作状况; ③结构分析中所采用的各种近似假定和简化, 应有理论或试验依据, 或经工程实践验证; ④计算结果的精度应符合工程设计的要 求。

4) 结构分析应符合下列要求: ①满足力的平衡条件; ②在不同程度上符合变形协调条件, 包括节点和边界的约束条件等; ③采用合理的材料本构关系(应力-应变关系)或构件单元的力-变形关系。

1.1.4 结构分析方法

对混凝土结构进行分析时, 应根据结构类型、材料性能和受力特点等选择合理的分析方法。目前, 按力学原理和受力阶段不同, 混凝土结构常用的计算方法主要有线弹性分析方法、塑性内力重分布分析方法、弹塑性分析方法、塑性极限分析方法、试验分析方法等。

1. 线弹性分析方法

线弹性分析方法假定结构材料为理想的弹性体, 混凝土结构弹性分析宜采用结构力学或弹性力学等分析方法, 是最基本和最成熟的结构分析方法, 也是其他分析方法的基础和特例, 可用于混凝土结构的承载能力极限状态和正常使用极限状态作用效应的分析。

按照所分析结构构件的体型不同, 可分为杆系结构(一维)、板结构(二维)和实体结构(三维)。

杆系结构(指长度大于 3 倍截面高度的杆件组成的结构, 如连续梁、框架等), 通

常采用结构力学的方法计算内力和变形。对规则的空间杆系结构,可分解为不同方向的平面结构进行分析,但宜考虑平面结构的空间协同工作。如钢筋混凝土单层排架结构可简化为平面排架来计算,也要考虑单层厂房的空间整体作用(具体参见第4章);再如由梁、柱等杆件组成的空间框架结构,可简化为横向和纵向的平面框架来计算(具体参见第5章)。

杆系结构构件的刚度可按下列原则确定:

1) 混凝土的弹性模量可按《混凝土结构设计规范》(GB 50010)(以下简称《规范》)采用。

2) 截面惯性矩按均质的混凝土全截面计算,既不计钢筋的换算面积,也不扣除预应力孔道的面积。

3) 端部加腋的杆件,应考虑其截面变化对结构分析的影响。

4) 不同受力状态下构件的截面刚度,宜考虑混凝土开裂、徐变等因素的影响予以折减。

杆系结构的弹性分析方法可采用解析法、有限元法和差分法等精确计算方法,对体型规则的结构可采用简化计算方法,如力矩分配法、分层法、反弯点法、 D 值法和迭代法等。

非杆系的二维或三维结构,通常假定结构为完全均质材料,不考虑钢筋的存在和混凝土开裂(即塑性变形)的影响,利用材料各向同性的本构关系,只考虑材料的弹性模量和泊松比两个物理参数,采用弹性力学方法进行内力分析。经分析得到弹性正应力和剪应力的分布,经转换可求得主应力,根据主应力确定所需的配筋量及布置,并按复合受力状态验算混凝土的强度。

当结构的二阶效应可能使作用效应显著增加时,在结构分析中应考虑二阶效应的不利影响。结构的二阶效应指作用在结构上的重力或构件中的轴压力在变形后的结构或者构件中引起的附加内力和附加变形。建筑结构的二阶效应包括重力二阶效应($P-\Delta$ 效应)和受压构件的挠曲效应($P-\delta$ 效应)两部分。严格讲,考虑 $P-\Delta$ 效应和 $P-\delta$ 效应进行结构分析时,应考虑材料的非线性和裂缝、构件的曲率和层间侧移、荷载的持续作用、混凝土的收缩和徐变等因素。但要实现这样的分析,目前还有困难,分析中一般采用简化的分析方法。重力二阶效应的计算属于结构整体层面的问题,一般在结构整体分析中考虑,分析方法包括有限元法和增大系数法。受压构件的挠曲效应属于构件层面的问题,一般在构件设计时考虑(具体可参见偏心受压构件设计)。

线弹性分析法简易可行,按此方法计算的结构承载力偏于安全。通常在下列情况下应按弹性理论计算方法进行设计:

- 1) 直接承受动荷载或重复荷载作用的构件。
- 2) 裂缝控制等级为一级或二级的构件。
- 3) 采用无明显屈服台阶钢材配筋的构件。
- 4) 要求有较高安全储备的结构。

在一般梁板结构中的板、次梁多按塑性理论进行设计,而主梁多按弹性理论进行设计。地下室顶板、底板,屋面由于有防水要求,且荷载较大,建议采用弹性理论计算方法。

此外,结构内力计算按弹性分析方法,结构配筋按极限状态法,逻辑上两者似乎矛盾。但是,从理论分析和试验表明,虽然混凝土结构在使用阶段和塑性内力重分布阶段的内力都与线弹性分析法的计算结果有出入,而在实现塑性内力充分重分布、形成破坏机构时,其最终的内力分布取决于各截面的极限弯矩值,故仍与线弹性分析结果一致。因此,线弹性分析法的计算结果适用于结构承载能力极限状态的设计。该方法的可靠性和安全性已有无数工程实例来证实,当然,其条件是构件(截面)有足够的塑性转动能力,能够保证结构的内力重分布,同时还要满足正常使用极限状态要求。

2. 考虑塑性内力重分布的分析方法

超静定混凝土结构在出现塑性铰的情况下,会在结构中引起钢筋和混凝土之间的内力重分布。可利用这一特点进行构件截面之间的内力调整,充分发挥混凝土结构的潜力,以达到简化设计、节约配筋和方便施工的目的。塑性内力重分布分析方法主要有极限平衡法、塑性铰法、变刚度法、弯矩调幅法以及弹塑性分析方法等,应用最多的是弯矩调幅法。弯矩调幅法首先用线弹性方法分析各种作用状况下的结构内力,得到各控制截面的最不利内力后,对构件的支座截面弯矩进行调幅处理,并确定相应的跨中弯矩。房屋建筑中的钢筋混凝土连续单向板、连续梁和框架等宜采用弯矩调幅法计算。其他类似结构,如双向板、框架-剪力墙等也可用同样的原理进行内力调幅处理。这种方法其实只是在线弹性分析结果上的一种内力调整,结构承载力的可靠度低于按弹性理论设计的结构,结构的变形及塑性铰处的混凝土裂缝宽度随弯矩调整幅度增加而增大。对不允许出现裂缝的构件,直接承受动荷载或重复荷载作用的构件,或直接处于侵蚀环境的构件,为保证结构安全,不宜采用此类方法分析。

3. 弹塑性分析方法

弹塑性分析方法通过建立结构构件的平衡条件、变形协调条件和弹塑性本构关系,借助于计算分析软件来分析结构受力的全过程。该方法适用于任意形式和受力复杂的结构分析,特别是能较好地解决各种体型和受力复杂结构的分析问题,是一种较为先进的结构分析方法,已在国内外一些重要结构的设计中采用。但由于这种分析方法比较复杂,计算工作量大,各种材料的非线性本构关系尚不够完善和统一,至今其应用范围仍然有限,主要用于重要、复杂结构工程和罕遇地震作用下的结构分析。

弹塑性分析方法分为静力弹塑性分析方法和动力弹塑性分析方法。我国抗震规范规定对结构弹塑性变形分析,可根据结构特点采用静力或动力弹塑性分析方法。这里的静力弹塑性分析方法,主要指 push-over 分析方法,是对结构在罕遇地震作用下进行弹塑性变形分析的一种简化方法,从本质上说它是一种静力分析方法。具体地说,就是在结构分析模型上施加按某种规定的分布方式模拟地震水平作用惯性力的侧向力,单调加载并逐级加大,一旦构件开裂或屈服即修改其刚度,直到结构达到预定的状态(成为机构、位移超限或达到目标位移),从而判断结构分析模型是否满足相应的抗震能力要求。

动力弹塑性分析能准确而完整地得出结构在罕遇地震下的反应全过程,但数值计算过程中需要反复迭代,数据量大,分析工作烦琐,且数值结果受到所选用地震波的影响较大,一般只在设计重要结构或高层建筑结构时采用。

4. 塑性极限分析方法

结构的塑性极限分析方法是指结构在承载能力极限状态下,找出其满足塑性变形规律和结构机动条件的破坏机构,进而求出结构的塑性极限荷载。对于超静定结构,结构中的某一个截面(或某几个截面)达到屈服,整个结构可能并没有达到其最大承载能力,随着外荷载的继续增加,直至有足够数量的截面达到屈服,使结构体系即将形成几何可变机构,结构才达到最大承载能力。对可预测结构破坏机制的情况,可采用塑性极限分析方法进行分析。对承受均布荷载的周边支承的双向矩形板,可采用塑性铰线法(上限法,我国规范采用)或条带法(下限法)等塑性极限分析方法进行设计。我国按照塑性极限分析方法设计双向板已有几十年的工程经验,计算方便、构造简单,已证明为安全可靠的设计方法。用此方法设计的双向板,要满足结构在使用阶段的性能要求,即不要发生过大的裂缝和变形。对于布置规则,竖向活荷载不大的板柱结构体系,用塑性极限分析方法设计时,可采用经验系数法直接计算两个方向柱上板带和跨中板带控制截面的弯矩设计值(参见第2章2.4节无梁楼盖)。

5. 试验分析方法

对体型和受力都很复杂的结构,如不规则框架和大跨度桁架的主要节点、结构或构件开洞的周围、不规则的空间结构、构件的疲劳和冲击破坏、受力复杂的堤坝等,或采用新型材料和构造,又没有成熟的简化分析方法或对现有的结构分析方法的计算结果没有充分的把握时,可采用试验分析方法对结构进行分析或复核。

试验分析法要用按一定比例制作出结构整体模型或部分模型,进行荷载或其他作用的试验,测定结构不同部位的应力(应变)分布、变形和裂缝的发展,确定其破坏形态、开裂荷载、屈服荷载、极限荷载等。然后根据试验结果,判别结构或构件的安全性和使用阶段的性能,验证或修正计算方法、测定或修正计算所需的参数、修正或改进初步设计及构造措施等,完成结构分析需要解决的问题。混凝土结构模型设计、制作和试验是一个复杂的工程,需要进行专门和专业的设计。试验分析法对结构承载能力极限状态分析和正常使用极限状态的验算均可适用。

上述分析方法中,又各有多种具体的计算方法,如解析法、数值解法、精确解法和近似解法等。结构设计时,应根据结构的重要性和使用要求、结构体系的特点、作用状况、要求的精度等加以选择。另外,计算方法的选择还取决于设计者对计算方法的熟悉程度,已有的分析手段,如计算程序、手册、图表等。

1.1.5 间接作用分析

当混凝土的收缩、徐变以及温度变化等间接作用在结构中产生的作用效应可能危及结构的安全性或正常使用时,宜进行间接作用效应的分析,并采取相应的构造措施和施工措施。如对大体积混凝土结构、超长混凝土结构等。混凝土结构进行间接作用效应的分析,可采用简化的弹性分析方法,但计算时应考虑混凝土的徐变及混凝土的开裂引起的应力松弛和重分布。

此外,对体型复杂或者受力特殊的结构可采用试验分析方法对结构的承载能力极限