



应用型本科院校“十三五”规划教材/土木工程类

主编 邵连河 崔艳

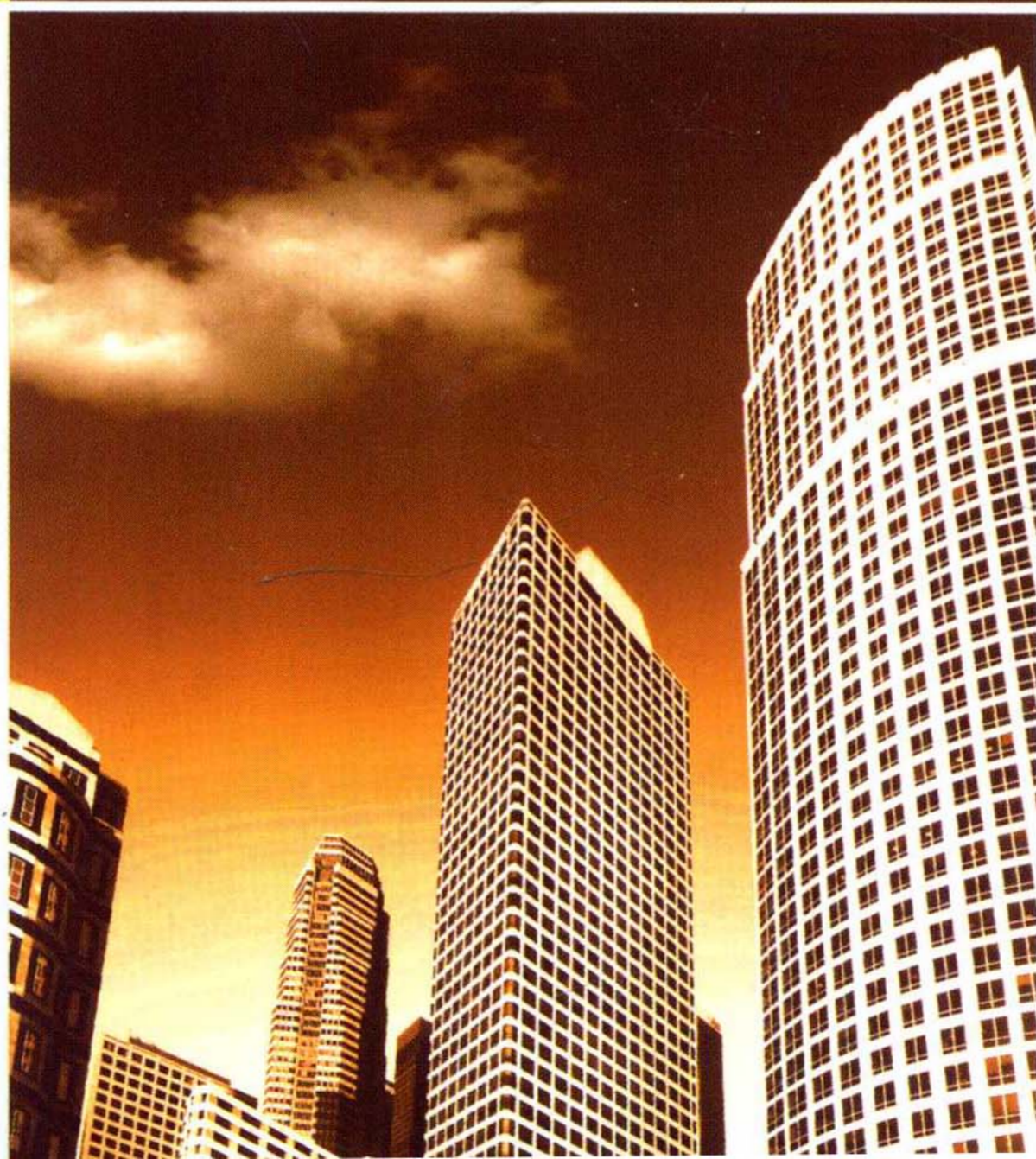
钢筋混凝土及砌体结构

下册

(第2版)

Reinforced Concrete and Masonry Structure

- 适用面广
- 应用性强
- 促进教学
- 面向就业



哈尔滨工业大学出版社



应用型本科院校“十三五”规划教材/土木工程类

主 编 邵连河 崔 艳
副主编 盖晓连 李军卫

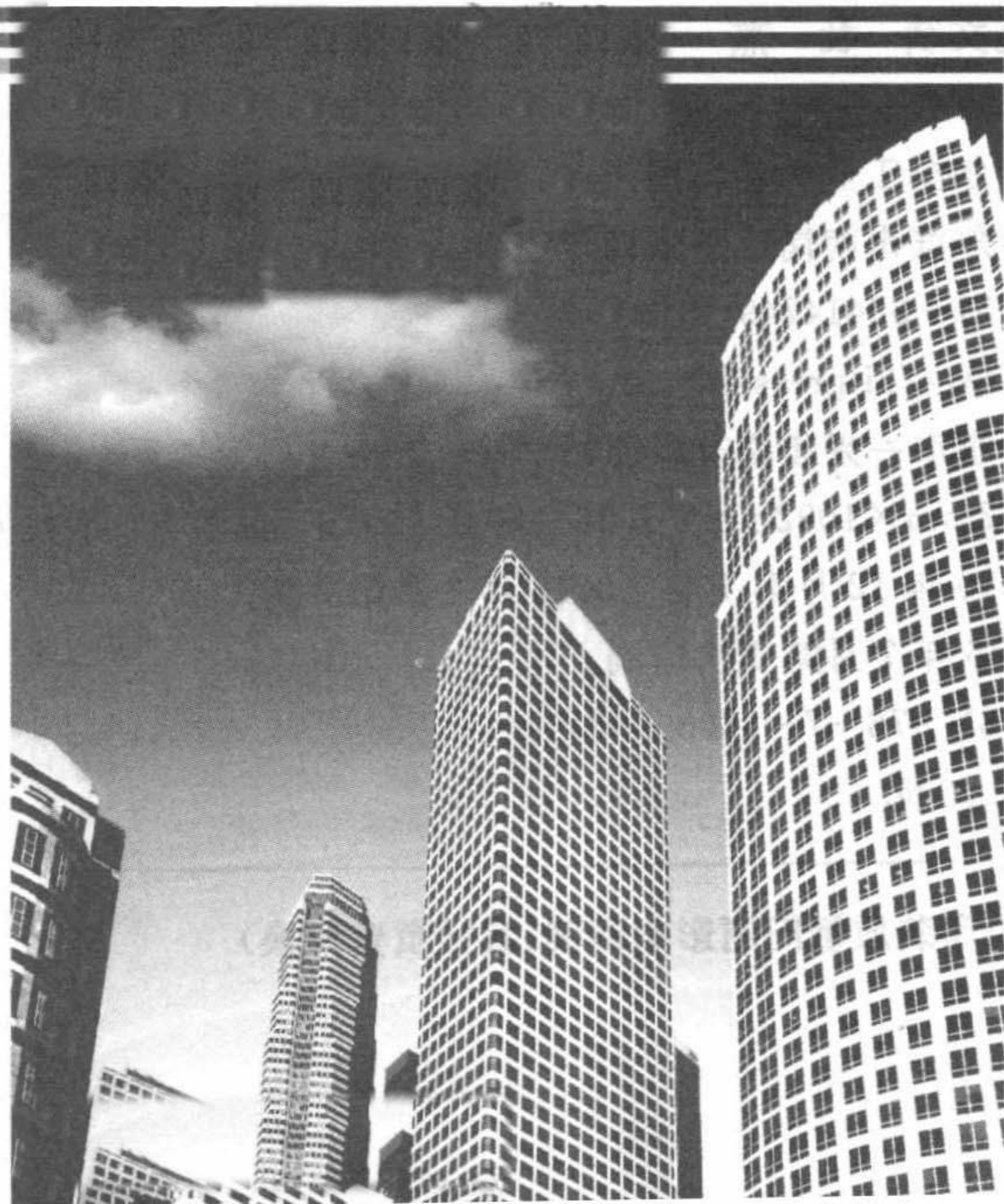
钢筋混凝土及砌体结构

下册

(第2版)

Reinforced Concrete and Masonry Structure

哈尔滨工业大学出版社



内 容 简 介

本书依据我国现行的规程规范,结合应用型本科院校学生实际能力和就业特点,根据高等院校土木工程专业的培养目标和教学大纲编写而成。基本理论讲授以应用为目的,教学内容以必需够用为度,力求体现应用型本科教育注重职业能力培养的特点。

本书共分上、下两册共 14 章,内容包括钢筋混凝土结构材料的物理力学性能,建筑结构设计的基本原则,受弯、受压、受拉、受扭构件截面承载力,钢筋混凝土构件变形、裂缝及耐久性,预应力混凝土构件,钢筋混凝土现浇楼盖、单层厂房结构、多层框架结构、砌体结构设计等。每章后都设有思考题和练习题,以帮助学生学习及巩固、提高。

本书可作为应用型本科院校土木工程专业的专业课教材使用,也可供从事混凝土结构与砌体结构设计、施工技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土及砌体结构.下册/郜连河,崔艳主编.
—2 版. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2016.7

应用型本科院校“十三五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5603 - 6045 - 4

I. ①钢… II. ①郜…②崔… III. ①钢筋混凝土结构-高等学校-教材②砌体结构-高等学校-教材
IV. ①TU375 ②TU36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 119758 号

策划编辑 赵文斌 杜 燕

责任编辑 张 瑞

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451 - 86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 肇东市一兴印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 19.25 插页 5 字数 456 千字

版 次 2010 年 12 月第 1 版 2016 年 7 月第 2 版

2016 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5603 - 6045 - 4

定 价 38.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

《应用型本科院校“十三五”规划教材》编委会

主 任 修朋月 竺培国

副主任 张金学 吕其诚 线恒录 李敬来 王玉文

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁福庆 于长福 马志民 王庄严 王建华

王德章 刘金祺 刘宝华 刘通学 刘福荣

关晓冬 李云波 杨玉顺 吴知丰 张幸刚

陈江波 林 艳 林文华 周方圆 姜思政

庾 莉 韩毓洁 蔡柏岩 臧玉英 霍 琳

序

哈尔滨工业大学出版社策划的《应用型本科院校“十三五”规划教材》即将付梓,诚可贺也。

该系列教材卷帙浩繁,凡百余种,涉及众多学科门类,定位准确,内容新颖,体系完整,实用性强,突出实践能力培养。不仅便于教师教学和学生学习,而且满足就业市场对应用型人才的迫切需求。

应用型本科院校的人才培养目标是面对现代社会生产、建设、管理、服务等一线岗位,培养能直接从事实际工作、解决具体问题、维持工作有效运行的高等应用型人才。应用型本科与研究型本科和高职高专院校在人才培养上有着明显的区别,其培养的人才特征是:①就业导向与社会需求高度吻合;②扎实的理论基础和过硬的实践能力紧密结合;③具备良好的人文素质和科学技术素质;④富于面对职业应用的创新精神。因此,应用型本科院校只有着力培养“进入角色快、业务水平高、动手能力强、综合素质好”的人才,才能在激烈的就业市场竞争中站稳脚跟。

目前国内应用型本科院校所采用的教材往往只是对理论性较强的本科院校教材的简单删减,针对性、应用性不够突出,因材施教的目的难以达到。因此亟须既有一定的理论深度又注重实践能力培养的系列教材,以满足应用型本科院校教学目标、培养方向和办学特色的需要。

哈尔滨工业大学出版社出版的《应用型本科院校“十三五”规划教材》,在选题设计思路认真贯彻教育部关于培养适应地方、区域和社会发展需要的“本科应用型高级专门人才”精神,根据黑龙江省委书记吉炳轩同志提出的关于加强应用型本科院校建设的意见,在应用型本科试点院校成功经验总结的基础上,特邀请黑龙江省9所知名的应用型本科院校的专家、学者联合编写。

本系列教材突出与办学定位、教学目标的一致性和适应性,既严格遵照学科

体系的知识构成和教材编写的一般规律,又针对应用型本科人才培养目标及与之相适应的教学特点,精心设计写作体例,科学安排知识内容,围绕应用讲授理论,做到“基础知识够用、实践技能实用、专业理论管用”。同时注意适当融入新理论、新技术、新工艺、新成果,并且制作了与本书配套的 PPT 多媒体教学课件,形成立体化教材,供教师参考使用。

《应用型本科院校“十三五”规划教材》的编辑出版,是适应“科教兴国”战略对复合型、应用型人才的需求,是推动相对滞后的应用型本科院校教材建设的一种有益尝试,在应用型创新人才培养方面是一件具有开创意义的工作,为应用型人才的培养提供了及时、可靠、坚实的保证。

希望本系列教材在使用过程中,通过编者、作者和读者的共同努力,厚积薄发、推陈出新、细上加细、精益求精,不断丰富、不断完善、不断创新,力争成为同类教材中的精品。

马长利

第2版前言

本书是根据土木工程专业的教学大纲和最新修订的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)和《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)编写而成的。

本书的编写力求内容充实简练,知识体系以基础理论够用、实用为度,突出工程实践能力的培养,强调学以致用和创新意识的激发,以适应于应用型本科院校的特点及国家高等教育事业发展的需要。全书分上、下两册共14章。本册(下册)共4章,第11章钢筋混凝土现浇楼盖,第12章单层厂房结构,第13章多层框架结构,第14章砌体结构。每章前有学习要点,后有小结,并有思考题和练习题,以帮助学生学习、巩固及提高。

参加本书下册编写的单位和人员有:黑龙江东方学院石玉环(第11章第1、2、3节);黑龙江东方学院李军卫(第11章第4、5节、本章小结、练习题);哈尔滨石油学院崔艳(第12章);黑龙江工程学院曹剑平(第13章);哈尔滨石油学院盖晓连(第14章)。本书由邵连河、崔艳任主编,盖晓连、李军卫任副主编,全书由崔艳、盖晓连统稿。

本书在编写过程中参阅、借鉴了一些优秀教材、专著和文献资料内容,在此一并向相关作者致谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,还望广大读者及同行专家不吝赐教,以便修改完善。

编者

2016年5月

目 录

第 11 章 钢筋混凝土现浇楼盖	1
11.1 概述	1
11.2 整体式单向板肋梁楼盖	4
11.3 整体式双向板肋梁楼盖	39
11.4 楼梯	47
11.5 雨篷	56
本章小结	58
练习题	58
第 12 章 单层厂房结构	60
12.1 概述	60
12.2 单层厂房结构的组成和布置	62
12.3 排架计算	70
12.4 单层厂房柱	87
12.5 柱下独立基础	100
12.6 单层厂房屋盖结构	107
12.7 吊车梁	114
12.8 单层厂房结构设计实例	116
本章小结	135
思考题	137
练习题	137
第 13 章 多层框架结构	140
13.1 概述	140
13.2 框架结构布置	141
13.3 框架梁、柱截面尺寸估算	145
13.4 框架结构的计算单元与计算简图	147
13.5 框架结构内力、侧移计算	149
13.6 框架结构的荷载效应组合及内力调幅	162
13.7 无抗震设防要求的截面、节点设计要点及构造要求	166

目 录

13.8 框架结构设计实例.....	171
本章小结.....	202
思考题.....	203
练习题.....	203
第 14 章 砌体结构	204
14.1 概述.....	204
14.2 砌体材料的力学性能.....	206
14.3 砌体结构构件的承载力.....	220
14.4 混合结构房屋墙体设计.....	243
14.5 过梁、墙梁、挑梁及墙体的构造措施.....	258
本章小结.....	275
思考题.....	276
练习题.....	276
附录	281
参考文献	297

钢筋混凝土现浇楼盖

【学习要点】

本章主要讨论钢筋混凝土连续梁、板和楼梯、雨篷等的设计计算方法。讲述现浇楼盖的结构布置特点、受力变形特征以及各种类型楼盖的适用范围；重点介绍了现浇整体式单向板肋梁楼盖的内力按弹性理论及考虑塑性内力重分布的计算方法，以及现浇双向板肋梁楼盖内力按弹性理论计算的近似方法。对简化梁板结构的计算简图、确定可变荷载的最不利布置和内力包络图、折算荷载等给出了具体的方法。介绍了现浇钢筋混凝土楼盖中连续梁、板的截面设计特点及配筋构造的基本要求。

11.1 概 述

钢筋混凝土楼盖是建筑结构中的重要组成部分，由梁、板、柱组成的梁板结构体系（或由板、柱组成的板柱结构体系），是工业与民用建筑中的屋盖、楼盖、阳台、雨篷、楼梯等构件广泛采用的一种结构形式。此外，建筑结构中其他属于梁板结构体系的结构物还很多，如板式基础（图11.1），水池的顶板和底板、挡土墙、桥梁的桥面结构等。由此可见，楼盖结构选型和布置的合理性以及结构计算和构造的正确性，对于建筑的安全使用和经济指标有着非常重要的意义。

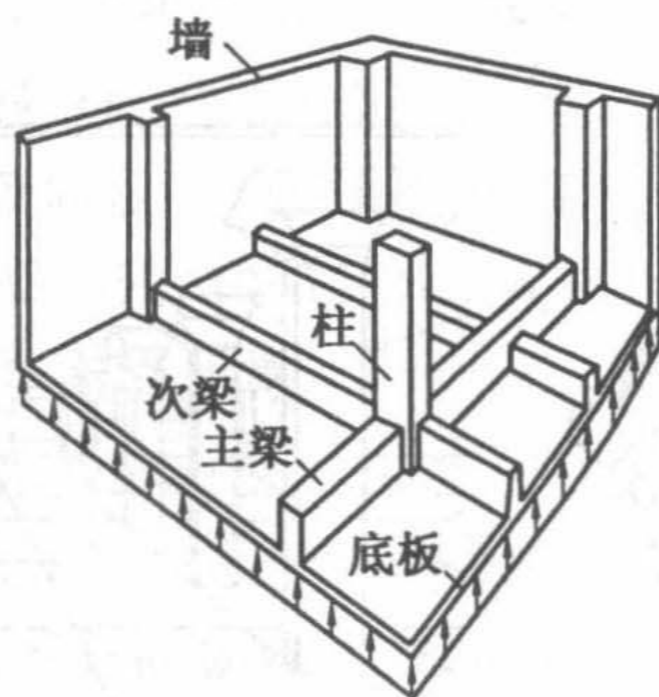


图 11.1 板式基础

11.1.1 钢筋混凝土楼盖的结构类型

1. 钢筋混凝土楼盖按结构形式分

(1) 肋梁楼盖

肋梁楼盖由相交的梁和板组成(图 11.2),它是楼盖中最常见的结构形式。其特点是构造简单,结构布置灵活,用钢量较低;缺点是支模比较复杂。

(2) 井式楼盖

井式楼盖中两个方向的柱网及梁的截面尺寸相同,而且正交。由于是两个方向共同受力,因而梁的截面高度较肋梁楼盖小,故宜用于跨度较大且柱网呈方形的结构,如图 11.3 所示。

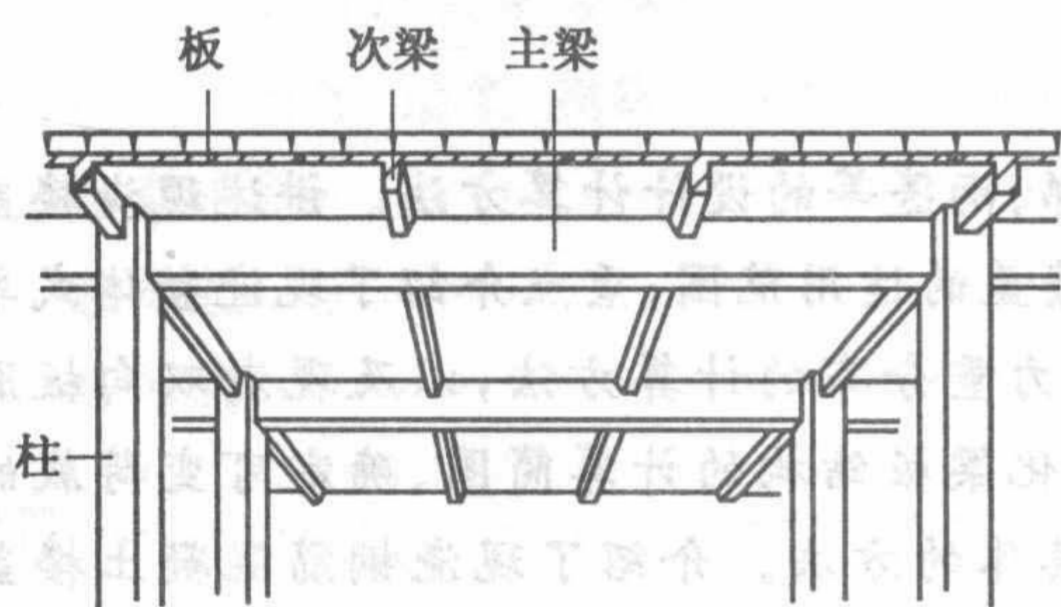


图 11.2 肋梁楼盖

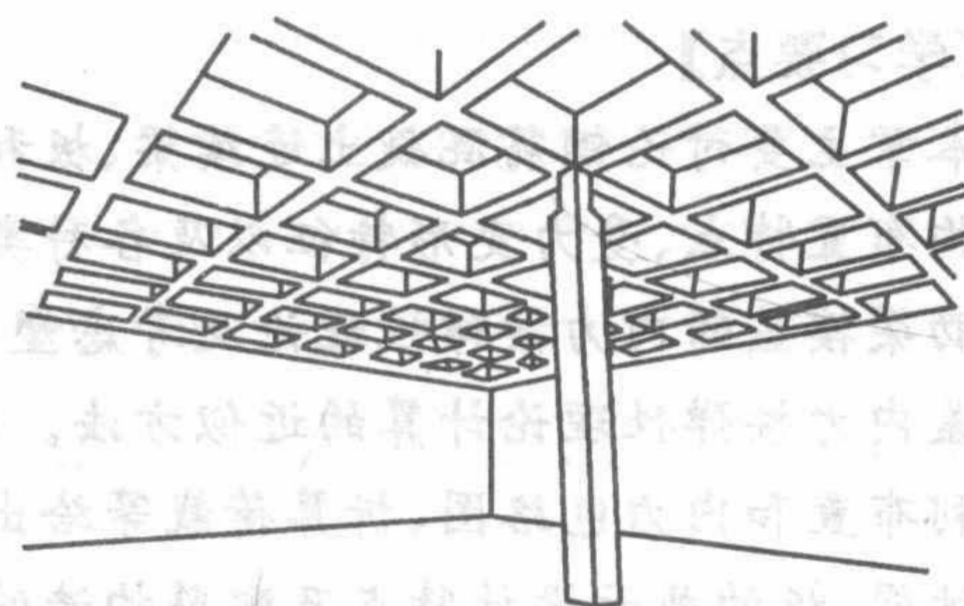


图 11.3 井式楼盖

(3) 密肋楼盖

密肋楼盖采用密铺小梁(肋),其间距约为 0.5 ~ 2.0 m,一般采用实心平板搁置在梁肋上,或放置在倒 T 形梁下翼缘上,或在梁肋间填以空心砖或轻质砌块。密肋楼盖由于肋的间距小,板厚很小,梁高也较肋梁楼盖小,结构自重较轻,如图 11.4 所示。

(4) 无梁楼盖

无梁楼盖不设梁,而将板直接支撑在带有柱帽(或无柱帽)的柱上,如图 11.5 所示。无梁楼盖顶棚平整,通常用于书库、仓库、商场等工程中,有时也用于水池的顶板、底板和筏板基础等处。

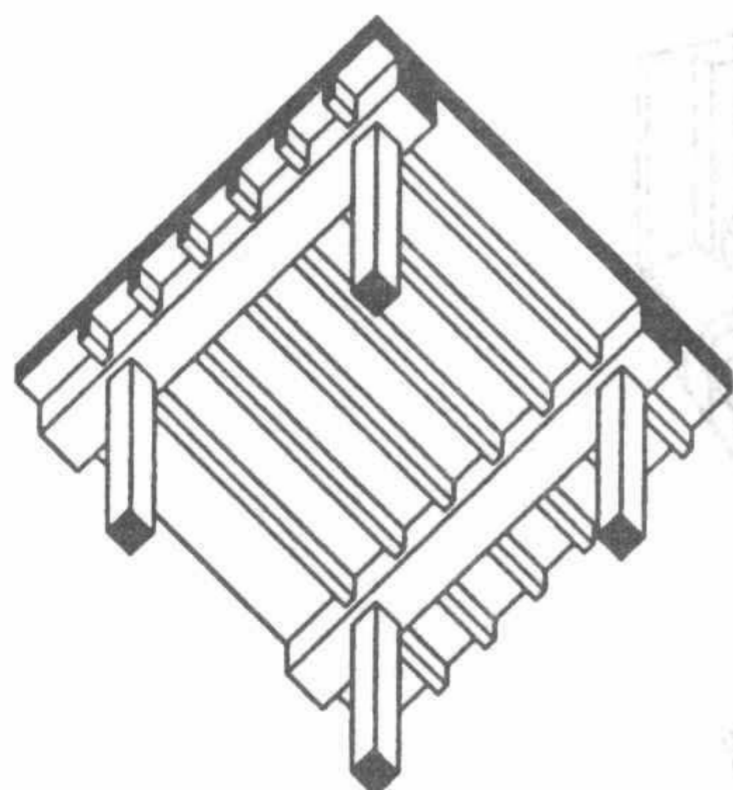


图 11.4 密肋楼盖

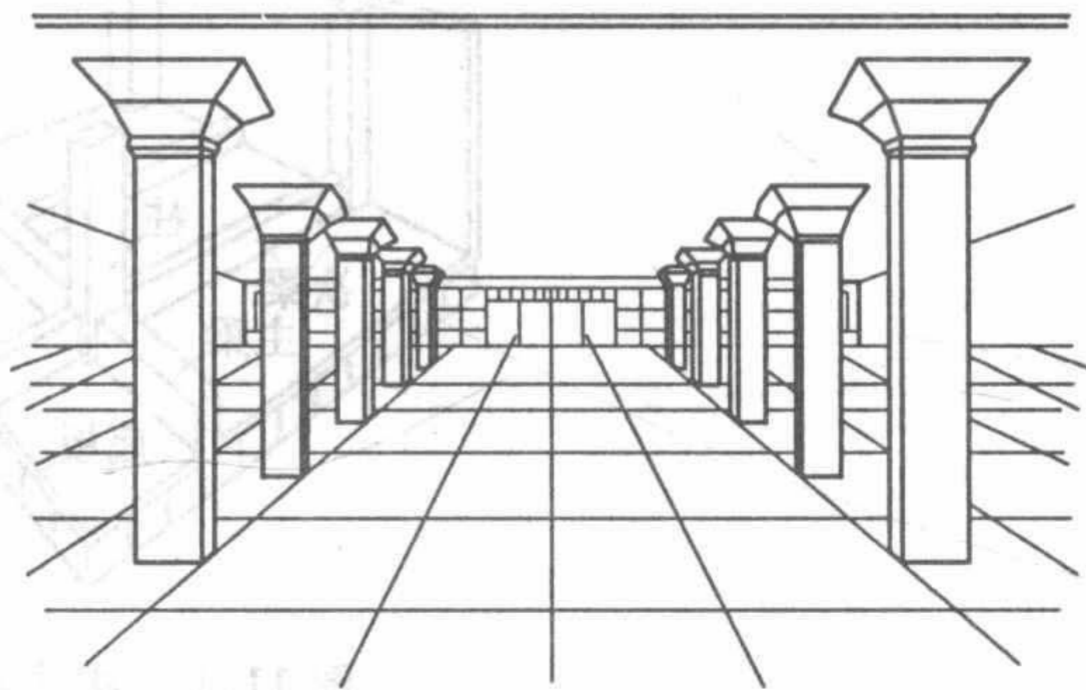


图 11.5 无梁楼盖

2. 钢筋混凝土楼盖按施工方法分

(1) 现浇整体式楼盖

混凝土为现场浇筑,其优点是刚度大,整体性好,抗震抗冲击性能好,防水性好,结构布置灵活。缺点是模板用量大,现场作业量大,工期较长,施工受季节性影响比较大。因此,在多层工业建筑的楼盖承受某些特殊设备荷载,或楼面有较复杂孔洞时可采用此形式。在中小型民用建筑中,一般只在门厅或建筑平面布置不规则的局部楼面以及卫生间等处采用。随着商品混凝土、泵送混凝土以及工具式模板的广泛使用,整体式楼盖在多高层建筑中的应用日益增多。

(2) 装配式楼盖

装配式楼盖是由预制梁板构件在现场装配而成。其优点是施工速度快,省工省材,符合建筑工业化的要求。缺点是结构的刚度和整体性不如现浇整体式楼盖,因而不宜用于高层建筑。目前,我国装配式楼盖主要用于多层砌体房屋,特别是多层住宅中。

(3) 装配整体式楼盖

装配整体式混凝土楼盖由预制板(梁)上现浇一叠合层而成为一个整体,它的特点介于前两种结构之间。其最常见的做法是在板面上做40 mm厚的配筋现浇层。装配整体式楼盖仅适用于荷载较大的多层工业厂房、高层民用建筑及有抗震设防要求的建筑。

11.1.2 单向板与双向板

整体式钢筋混凝土楼盖,按板的支承和受力条件不同,可分为单向板和双向板两类。现以图11.6所示的四边简支矩形板为例予以说明。

设板上承受的均布荷载为 q , l_1 、 l_2 分别为其短、长跨方向的计算跨度。设想把整块板在两个方向上分别划分成一系列相互垂直的板带,则板上的荷载将分别由两个方向的板带传递给各自的支座。取出跨度中点上两个相互垂直单位宽度的板带,设沿短跨方向传递的荷载为 q_1 ,沿长跨方向传递的荷载为 q_2 ,则 $q=q_1+q_2$ 。当忽略相邻板带对它们的影响时,这两条板带的受力如同简支梁,由跨度中点A处挠度相等的条件可求出,当 $l_2/l_1=2$ 时, $q_1=0.94q$ 和 $q_2=0.06q$ 。可以证明,当 $l_2/l_1>2$ 时,荷载主要沿短跨方向传递,故可忽略荷载沿长跨方向的传递,称为“单向板”。而当 $l_2/l_1\leq 2$ 时,在两个跨度方向弯曲相差不多,故荷载沿两个方向传递,称为“双向板”。

只要板的四边都有支承,单向板与双向板之间就没有一个明显的界限,为了设计上的方便,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定:

(1) 两对边支承的板应按单向板计算;

(2) 四边支承的板应按下列规定计算:

① 当 $l_2/l_1\geq 3$ 时,可按沿短边方向受力的单向板计算。

② 当 $2 < l_2/l_1 < 3$ 时,宜按双向板设计;若按沿短边方向受力的单向板计算时,应沿长边方向布置足够数量的构造钢筋。

③ 当 $l_2/l_1\leq 2$ 时,应按双向板计算。

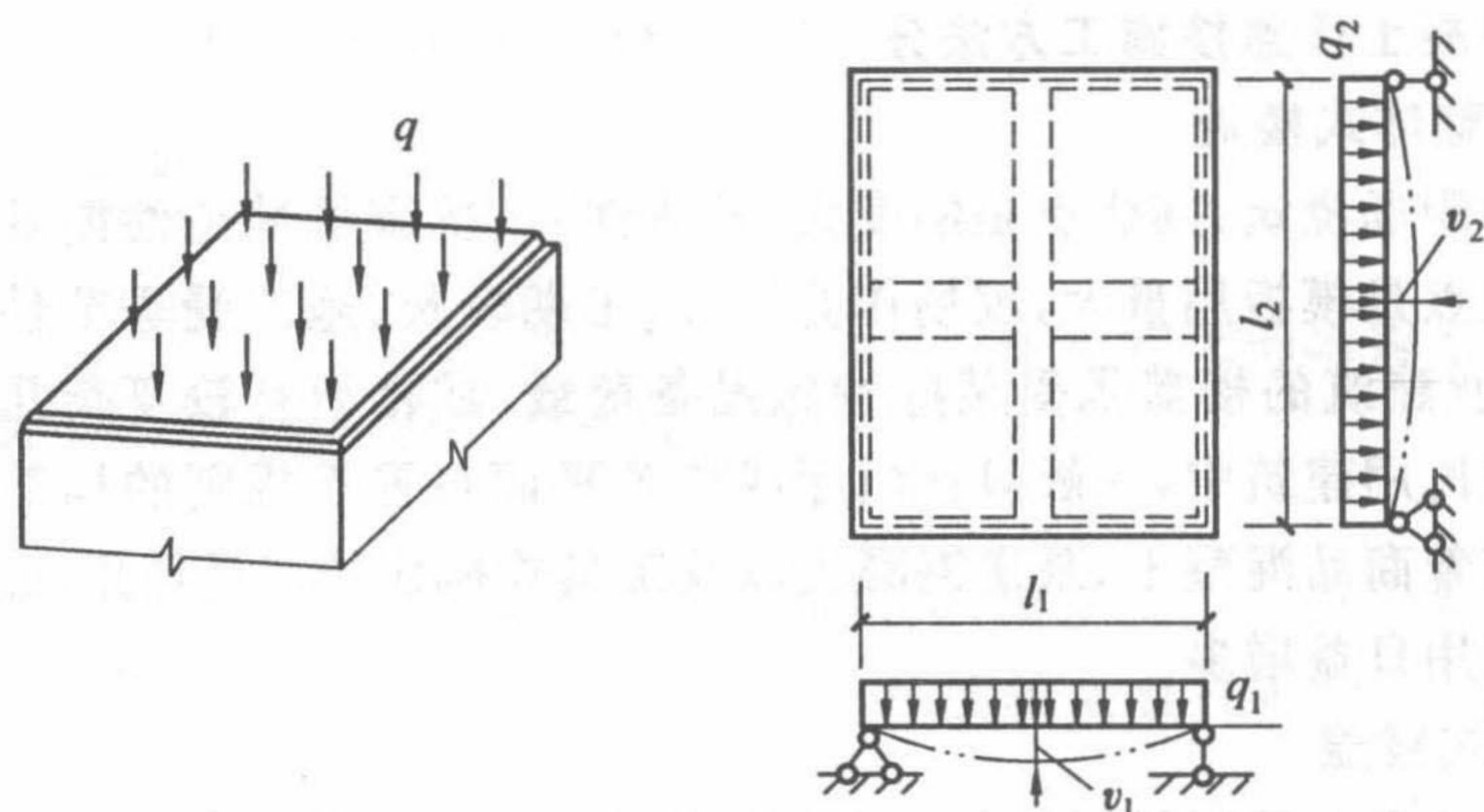


图 11.6 四边简支板受力状态

11.2 整体式单向板肋梁楼盖

整体式单向板肋梁楼盖,是一种普遍采用的结构形式,它一般由板、次梁和主梁组成。其荷载的传递路线是荷载 → 板 → 次梁 → 主梁 → 柱或墙,即板的支座为次梁,次梁的支座为主梁,主梁的支座为柱或墙。

整体式单向板肋梁楼盖的设计步骤一般为:

- ① 结构平面布置,并初步拟定板厚和主、次梁的截面尺寸;
- ② 确定梁、板的计算简图;
- ③ 梁、板的内力分析;
- ④ 截面配筋及构造要求;
- ⑤ 绘制楼盖施工图。

11.2.1 结构平面布置

平面楼盖结构布置的主要任务是要合理地确定柱网和梁格,它通常是在建筑设计初步方案提出的柱网和承重墙布置基础上进行的。

1. 柱网布置

柱网布置应与梁格布置统一考虑。柱网尺寸(即梁的跨度)过大,将使梁的截面过大而增加材料用量和工程造价;反之柱网尺寸过小,会使柱和基础的数量增多,有时也会使造价增加,并将影响房屋的使用。因此,柱网布置应综合考虑房屋的使用要求和梁的合理跨度。通常次梁的跨度取 4 ~ 6 m,主梁的跨度取 5 ~ 8 m 为宜。

2. 梁格布置

梁格布置除需确定梁的跨度外,还应考虑主、次梁的方向和次梁的间距,并与柱网布置相协调。

主梁可沿房屋横向布置,它与柱构成横向刚度较强的框架体系,但因次梁平行侧窗,而使顶棚上形成次梁的阴影;主梁也可沿房屋纵向布置,便于通风等管道通过,并且因次

梁垂直侧窗而使顶棚明亮,但横向刚度较差。在布置时应根据工程具体情况选用。

次梁间距(即板的跨度)增大,可使次梁数量减少,但会增大板厚而增加整个楼盖的混凝土用量。因此,在确定次梁间距时,应使板厚较小为宜,常用的次梁间距为 1.7 ~ 2.7 m。

此外,在主梁跨度内以布置 2 根及 2 根以上次梁为宜,因其弯矩变化较为平缓,有利于主梁的受力;当楼板上开有较大洞口,必要时沿洞口周围布置小梁;主梁和次梁应力求布置在承重的窗间墙上,避免搁置在门窗洞口上,否则过梁应另行设计。

3. 柱网与梁格布置

在满足房屋使用要求的基础上,柱网与梁格的布置应力求简单、规整,以使结构受力合理、节约材料、降低造价。同时板厚和梁的截面尺寸也应尽可能统一,以便于设计、施工及满足经济美观要求。

单向板肋梁楼盖结构平面布置方案主要有以下 3 种:

(1) 主梁横向布置,次梁纵向布置(图 11.7(a))

其优点是主梁和柱可形成横向框架,横向抗侧移刚度大,各榀横向框架由纵向次梁相连,房屋整体性好。

(2) 主梁纵向布置,次梁横向布置(图 11.7(b))

这种布置适用于横向柱距比纵向柱距大得多的情况。它的优点是减小了主梁的截面高度,可增加室内净高。

(3) 只布置次梁,不设置主梁(图 11.7(c))

它仅适用于有中间走道的砌体墙承重混合结构房屋。

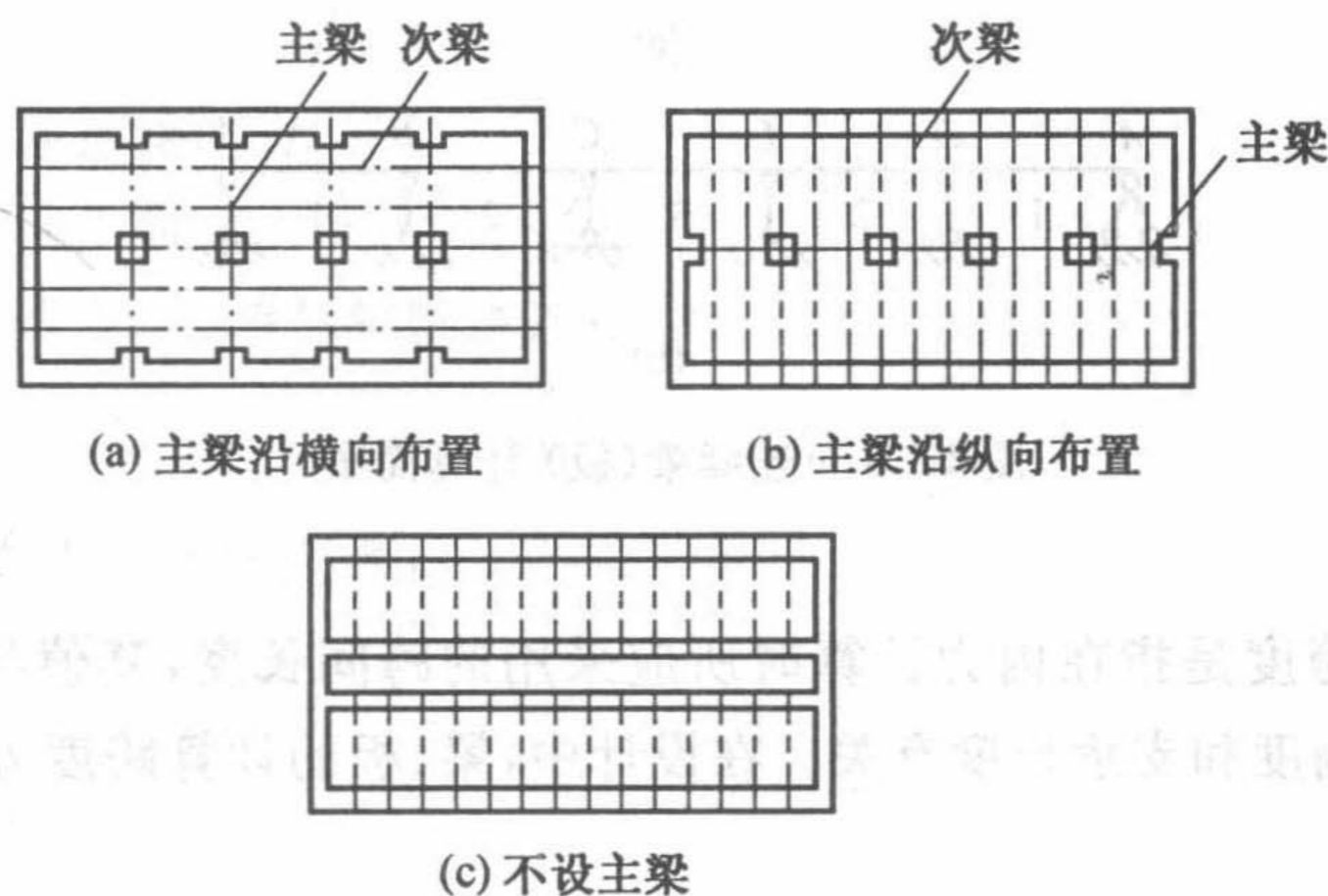


图 11.7 单向板肋梁楼盖结构布置

11.2.2 计算简图

单向板肋梁楼盖的板、次梁、主梁和柱均整体整浇在一起,形成一个复杂体系,但由于板的刚度很小,次梁的刚度又比主梁的刚度小很多,因此可以将板看做被简单支承在次梁上的结构部分,将次梁看做被简单支承在主梁上的结构部分,则整个楼盖体系即可以分解为板、次梁和主梁几类构件单独进行计算。作用在板面上的荷载传递路线则为:荷载 →

板 → 次梁 → 主梁 → 柱或墙, 它们均为多跨连续梁, 其计算简图应表示出梁(板)的跨数、计算跨度、支座的特点以及荷载形式、位置及大小等。

1. 支座特点

在肋梁楼盖中, 当板或梁支承在砖墙(或砖柱)上时, 由于其嵌固作用较小, 可假定为铰支座, 其嵌固的影响可在构造设计中加以考虑。

当板的支座是次梁, 次梁的支座是主梁, 则次梁对板、主梁对次梁将有一定的嵌固作用, 为简化计算通常亦假定为铰支座, 由此引起的误差将在内力计算时加以调整。

若主梁的支座是柱, 其计算简图应根据梁柱抗弯刚度比而定, 如果梁的抗弯刚度比柱的抗弯刚度大很多时(通常认为主梁与柱的线刚度比 $i_l/i_c > 5$), 可将主梁视为铰支于柱上的连续梁进行计算, 否则应按框架梁进行设计。

2. 计算跨数

连续梁任何一个截面的内力值与其跨数、各跨跨度、刚度以及荷载等因素有关, 但对某一跨来说, 相隔两跨以上的上述因素对该跨内力的影响很小。因此, 为了简化计算, 对于跨数多于五跨的等跨度(或跨度相差不超过 10%)、等刚度、等荷载的连续梁板, 可近似地按五跨计算。从图 11.8 中可知, 实际结构 1、2、3 跨的内力按五跨连续梁(板)计算简图采用, 其余中间各跨(第 4 跨)内力均按五跨连续梁(板)的第 3 跨采用。

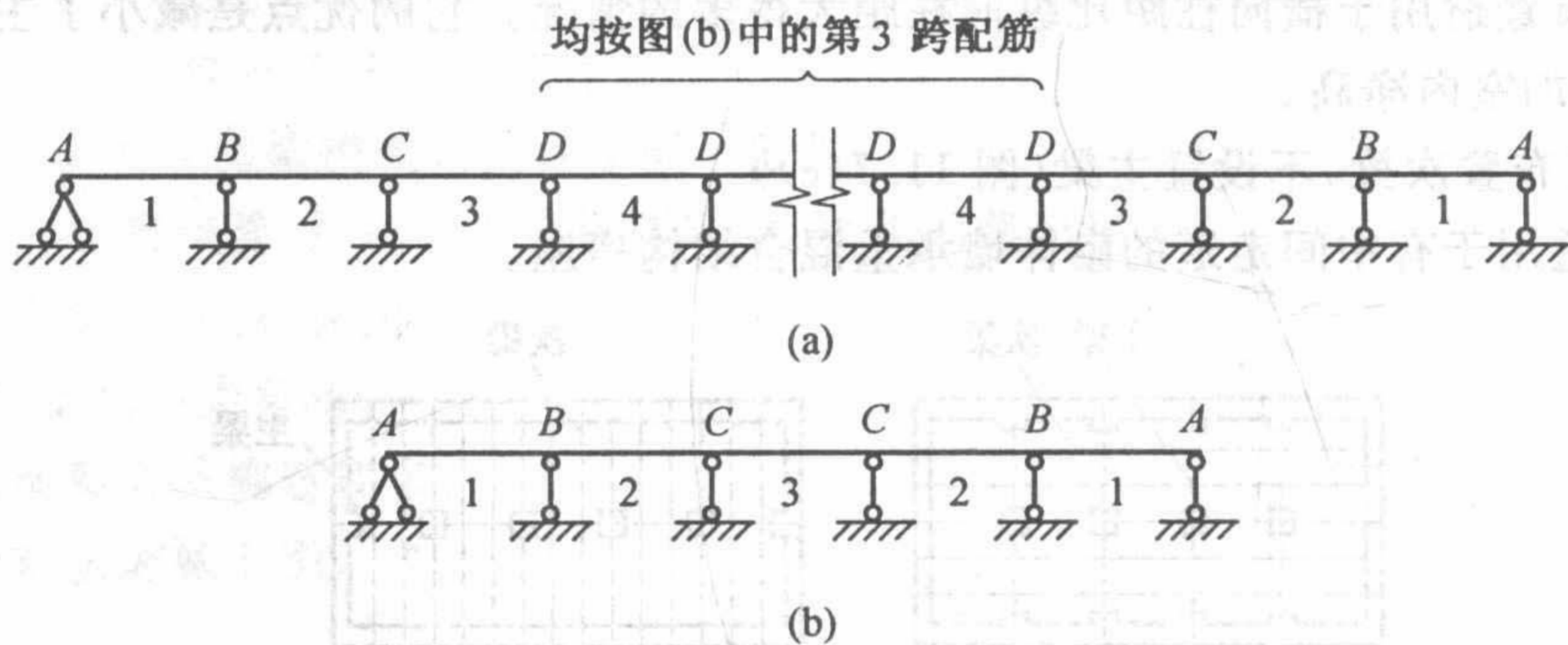


图 11.8 连续梁(板)计算简图

3. 计算跨度

梁、板的计算跨度是指在内力计算时所应采用的跨间长度, 其值与支座反力分布有关, 即与构件本身刚度和支承长度有关。在设计中, 梁、板的计算跨度 l_0 一般按下列规定取用。

(1) 当按弹性理论计算

① 对单跨板和梁

两端支承在墙体上的板

$$l_0 = l_n + a \leq l_n + h$$

两端与梁整体连接的板

$$l_0 = l_n + b$$

单跨梁

$$l_0 = l_n + a \leq 1.05l_n$$

② 对多跨连续板和梁
边跨

$$l_0 = l_n + \frac{a}{2} + \frac{b}{2}$$

且

$$l_0 \leq l_n + \frac{h}{2} + \frac{b}{2} \text{ (板)}$$

$$l_0 \leq l_n + 0.025l_n + \frac{b}{2} = 1.025l_n + \frac{b}{2} \text{ (梁)}$$

中间跨

$$l_0 = l_n + b = l_c$$

且(当板、梁支承在墙体上)

$$l_0 \leq 1.1l_n \text{ (对板当 } b > 0.1l_c \text{ 时)}$$

$$l_0 \leq 1.05l_n \text{ (对梁当 } b > 0.06l_c \text{ 时)}$$

(2) 当按塑性理论计算

① 对于连续梁:

当两端与梁或柱整体连接时, $l_0 = l_n$

当两端搁支在墙上时, $l_0 = \min(1.05l_n, l_c)$

当一端搁支在墙上, 一端与梁整体边接时

$$l_0 = \min(1.025l_n, l_n + \frac{a}{2})$$

② 对于连续板

当两端与梁整体连接时, $l_0 = l_n$

当两端搁支在墙上时, $l_0 = \min(l_n + h, l_c)$

当一端搁支在墙上, 一端与梁整体连接时

$$l_0 = \min\left(l_n + \frac{h}{2}, l_n + \frac{a}{2}\right)$$

式中 l_c —— 支座中心线间距离;

l_0 —— 板、梁的计算跨度;

l_n —— 板、梁的净跨;

h —— 板厚;

a —— 板、梁端支承长度;

b —— 中间支座宽度。

4. 荷载取值

楼盖上的荷载有恒荷载和活荷载两种。恒荷载一般为均布荷载, 它主要包括结构自重、各构造层自重、永久设备自重等。活荷载的分布通常是不规则的, 一般均折合成等效均布荷载计算, 主要包括楼面活荷载(如使用人群、家具及一般设备的重量)、屋面活荷载和雪荷载等。

楼盖恒荷载的标准值按结构实际构造情况通过计算来确定, 楼盖的活荷载标准值按

《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012) 来确定。在设计民用房屋楼盖时,应注意楼面活荷载的折减问题,因为当梁的负荷面积较大时,全部满载的可能性较小,故应对活荷载标准值进行折减,其折减系数依据房屋类别和楼面梁的负荷范围大小,取 0.6 ~ 1.0 不等。

当楼面板承受均布荷载时,通常取宽度为 1 m 的板带进行计算,如图 11.9(a) 所示。在确定板传递给次梁的荷载和次梁传递给主梁的荷载时,一般均忽略结构的连续性而按简单支承进行计算。所以,对次梁取相邻板跨中线所分割出来的面积作为它的受荷面积;次梁所承受荷载为次梁自重及其受荷面积上板传来的荷载;对于主梁,则承受主梁自重以及由次梁传来的集中荷载,但由于主梁自重与次梁传来的荷载相比较一般较小,故为了简化计算,一般可将主梁的均布自重荷载折算为若干集中荷载一并计算。板、次梁、主梁的计算简图如图 11.9(b)、(c)、(d) 所示。

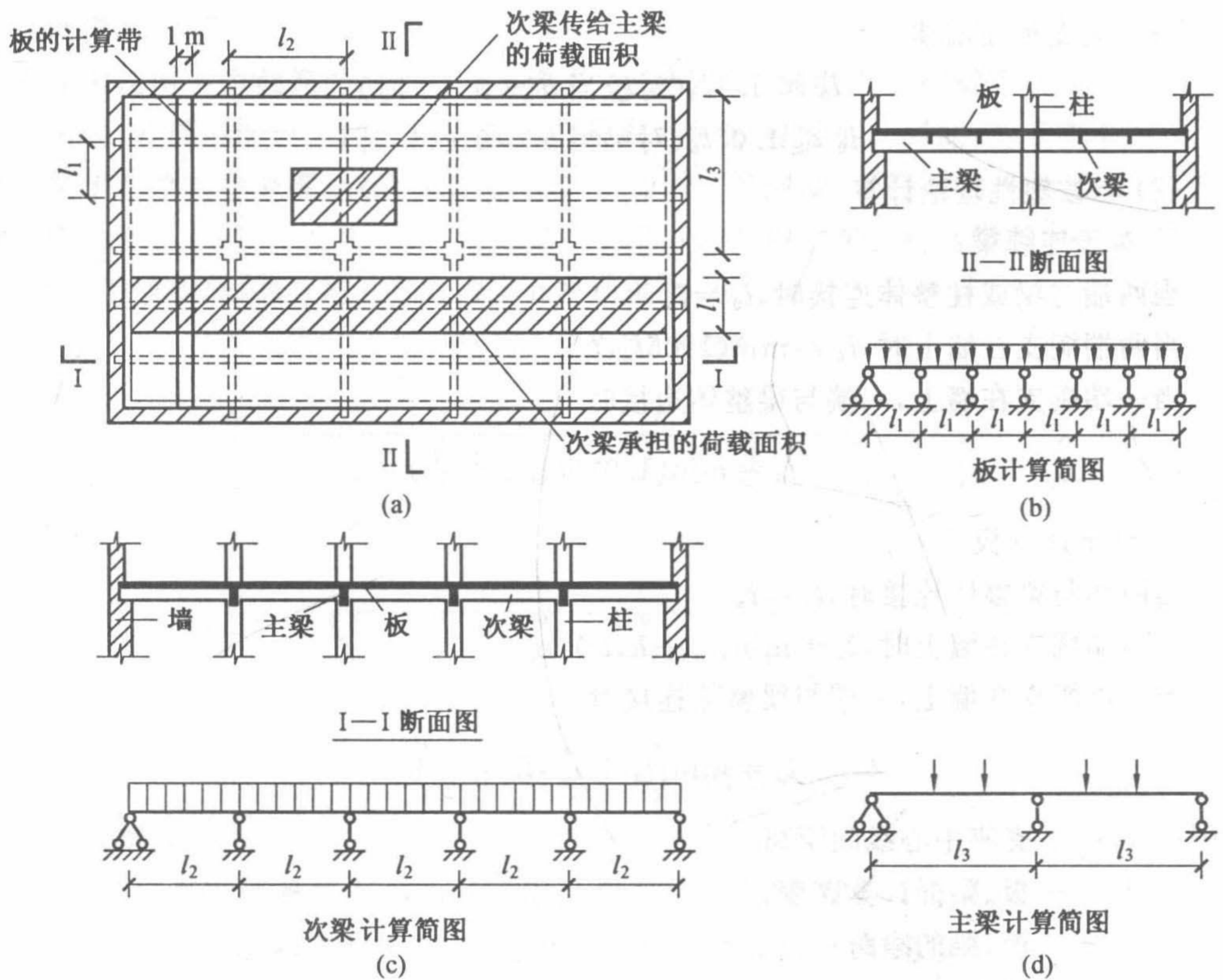


图 11.9 单向板肋梁楼盖计算简图

如前所述,在计算梁板内力时,假设梁板的支座为铰接,这对于等跨连续板(或梁),当活荷载沿各跨均为满布时是可行的,因为此时板(或梁)在中间支座发生的转角很小,按简支计算与实际情况相差甚微。但是,当活荷载隔跨布置时情况则不同。现以图 11.10 所示支承在次梁上的连续板为例子以说明,当按铰支座计算时,板绕支座的转角 θ 值较大。而实际上,由于板与次梁整体现浇在一起,当板受荷载弯曲在支座发生转动时,将带动次梁(支座)一同转动。同时,次梁因具有一定的抗扭刚度且两端又受主梁的约束,将阻止板的自由转动,最终只能产生两者变形协调的约束转角 θ' (图 11.10(b)),其值小于