

# 钢筋混凝土 结构设计

梁兴文 史庆轩 童岳生 编著

 科学技术文献出版社

# 钢筋混凝土结构设计

梁兴文 史庆轩 童岳生 编著

科学技术文献出版社

Scientific and Technical Documents Publishing House

北京

**图书在版编目(CIP)数据**

钢筋混凝土结构设计/梁兴文等编著. -北京:科学技术文献出版社,1999.3  
ISBN 7-5023-3116-6

I. 钢… II. 梁… III. 钢筋混凝土结构-结构设计 IV. TU375.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 23031 号

**出 版 者:**科学技术文献出版社

**图 书 发 行 部:**北京市复兴路 15 号(公主坟)中国科学技术信息研究所大楼 B 段/100038

**图 书 编 务 部:**北京市西苑南一院 8 号楼(颐和园西苑公汽站)/100091

**邮 购 部 电 话:**(010)68515544-2953

**图 书 编 务 部 电 话:**(010)62877791, (010)62877789

**图 书 发 行 部 电 话:**(010)62878310, (010)68515544-2945, (010)68514035

**门 市 部 电 话:**(010)68515544-2172

**图 书 发 行 部 传 真:**(010)68514035

**图 书 编 务 部 传 真:**(010)62878317

**E-mail:**stdph@istic.ac.cn

**策 划 编 辑:**刘新荣

**责 任 编 辑:**刘新荣

**责 任 校 对:**李正德

**责 任 出 版:**周永京

**封 面 设 计:**张宇澜

**发 行 者:**新华书店北京发行所

**印 刷 者:**三河市富华印刷厂

**版 ( 印 ) 次:**1999 年 3 月第 1 版 1999 年 3 月第 1 次印刷

**开 本:**787 × 1092 16 开

**字 数:**614 千

**印 张:**24.25

**印 数:**1—3500 册

**定 价:**33.00 元

© 版权所有 违法必究

购买本社图书,凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换。

(京)新登字 130 号

## 内 容 简 介

本书是按照《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68-84)和有关建筑结构设计规范而编写的,其内容包括钢筋混凝土楼盖和楼梯、单层厂房、多层和高层建设结构设计以及基础设计等。

书中对钢筋混凝土结构的性能及分析有充分的论述,概念清楚;同时有明确的计算方法及设计计算步骤,应用方便;特别是对各主要钢筋混凝土结构均附有完整的工程设计实例,有利于初学者对基本概念的理解以及具体设计计算。每章有学习要点、小结、思考题及习题等内容。

本书可作为大、专院校房屋建筑与工程结构方面的教材,也可供有关的设计、施工和科研人员使用。

# 科学技术文献出版社 向广大读者致意

---

科学技术文献出版社成立于 1973 年,国家科学技术部主管,主要出版科技政策、科技管理、信息科学、农业、医学、电子技术、实用技术、培训教材、教辅读物等图书。

我们的所有努力,都是为了使您增长知识和才干。

# 前 言

钢筋混凝土结构是结构工程中广泛使用的一种结构形式,这种结构在建造和使用过程中的可靠性、经济性和技术合理性有着重要的社会和经济意义。结构设计就是充分利用先进技术,科学地解决结构的可靠性与经济性这对矛盾的。

书中介绍了钢筋混凝土楼盖和楼梯、单层工业厂房、多层和高层建筑结构设计以及基础设计等,内容侧重于钢筋混凝土结构的整体设计,与《钢筋混凝土构件设计》(科学技术文献出版社,1995年)一书配套使用,是高等学校建筑工程专业本科生钢筋混凝土结构课程的教材,亦可作为本专业大專生的教学用书,并可供从事实际工作的建筑结构设计人员参考使用。

结构整体设计主要包含下列内容:选择结构方案和结构体系,进行结构布置;确定结构计算简图,选用合适的结构分析方法;计算荷载和荷载效应组合;构件截面配筋计算及构件间的连接构造等。本书着重于理论与实践相结合,力求对基本概念论述清楚,使读者通过对有关内容的学习,熟练地掌握结构分析方法;书中有明确的计算方法和实用设计步骤,力求做到能具体应用;特别是对各主要结构附有完整的工程设计实例,有利于初学者对基本概念的理解和设计方法的掌握。为了便于学习,每章有学习要点、小结、思考题和习题等内容,这对教学要求、自学理解、巩固深入、熟练掌握都是有益的,能提高教学效果。

本书由西安建筑科技大学建筑工程系童岳生(第一章第一节至第四节)、史庆轩(第二、五、七章)、梁兴文(第一章第五、六节,第三、四、六章)编写。童岳生审查了本书的部分初稿,全书最后由梁兴文、史庆轩修改定稿。在本书编写过程中,受到了王崇昌、黄良璧、钱国芳、王秀逸四位教授的热情支持和帮助,在此表示感谢。

希望本书能为读者的学习和工作提供帮助。鉴于作者水平有限,书中难免有错误及不妥之处,敬请读者多加指正。

作 者

1998 年

# 目 录

<b>第一章 楼盖及楼梯</b> .....	( 1 )
<b>第一节 楼盖一般说明</b> .....	( 1 )
一、楼盖类型 .....	( 1 )
二、单向板与双向板 .....	( 1 )
三、现浇整体式楼盖结构内力分析方法 .....	( 3 )
<b>第二节 受弯构件塑性铰和结构内力重分布</b> .....	( 3 )
一、钢筋混凝土塑性铰 .....	( 4 )
二、结构塑性内力重分布 .....	( 5 )
<b>第三节 单向板肋梁楼盖设计</b> .....	( 7 )
一、单向板肋梁楼盖结构布置及构件截面尺寸确定 .....	( 7 )
二、单向板肋梁楼盖按弹性理论方法计算结构内力 .....	( 8 )
三、单向板肋梁楼盖按塑性理论方法计算结构内力 .....	( 11 )
四、单向板肋梁楼盖配筋计算及构造要求 .....	( 15 )
<b>第四节 双向板肋梁楼盖设计</b> .....	( 29 )
一、双向板肋梁楼盖结构布置及构件截面尺寸确定 .....	( 29 )
二、双向板肋梁楼盖按弹性理论计算结构内力 .....	( 30 )
三、钢筋混凝土双向板极限承载力分析 .....	( 32 )
四、双向板肋梁楼盖按塑性理论计算 .....	( 39 )
五、双向板肋梁楼盖配筋计算及构造要求 .....	( 42 )
<b>第五节 无梁楼盖</b> .....	( 47 )
一、一般说明 .....	( 47 )
二、无梁楼盖的受力性能 .....	( 47 )
三、无梁楼盖的计算 .....	( 47 )
四、柱帽设计 .....	( 50 )
五、构造要求 .....	( 51 )
<b>第六节 楼梯</b> .....	( 53 )
一、楼梯的结构选型 .....	( 53 )
二、梁式楼梯的计算 .....	( 54 )
三、板式楼梯的计算 .....	( 55 )
四、整体式楼梯的构造要求 .....	( 55 )
<b>小结</b> .....	( 59 )
<b>思考题</b> .....	( 60 )
<b>习题</b> .....	( 60 )
<b>第二章 单层厂房结构</b> .....	( 73 )

第一节 概述	( 73 )
第二节 结构组成及荷载传递	( 75 )
一、结构组成	( 75 )
二、荷载传递	( 76 )
第三节 结构布置	( 77 )
一、结构平、剖面布置	( 78 )
二、支撑布置	( 81 )
三、围护结构布置	( 84 )
第四节 主要构件的选型	( 87 )
一、屋盖结构构件	( 88 )
二、吊车梁	( 89 )
三、柱	( 90 )
四、基础	( 95 )
第五节 排架内力分析	( 96 )
一、计算简图	( 96 )
二、荷载计算	( 97 )
三、等高排架内力分析	( 104 )
四、不等高排架内力分析	( 108 )
五、考虑厂房整体空间工作的排架内力分析	( 108 )
六、内力组合	( 111 )
第六节 柱的设计	( 113 )
一、矩形、I形截面柱的设计	( 113 )
二、牛腿的设计	( 115 )
三、双肢柱的设计	( 118 )
四、抗风柱的设计	( 123 )
第七节 柱下单独基础的设计	( 123 )
一、轴心受压基础	( 124 )
二、偏心受压基础	( 126 )
三、构造要求	( 128 )
第八节 屋架设计要点	( 130 )
一、屋架的高度和杆件截面尺寸	( 130 )
二、荷载及荷载组合	( 130 )
三、计算简图和内力分析	( 130 )
四、杆件截面设计和构造要求	( 132 )
五、屋架的扶直和吊装验算	( 132 )
第九节 吊车梁设计要点	( 133 )
一、截面尺寸的确定及材料选用	( 133 )
二、吊车荷载的特点	( 133 )
三、内力计算	( 133 )
四、吊车梁的验算内容	( 135 )

第十节 连接构造及其设计	(137)
一、常用的节点构造及预埋件受力分析	(137)
二、预埋件的组成及构造要求	(138)
三、预埋件的计算	(139)
四、吊环设计	(140)
第十一节 某工厂金工车间厂房设计	(141)
小结	(169)
思考题	(171)
<b>第三章 多层及高层建筑设计概论</b>	(172)
第一节 概述	(172)
第二节 结构体系	(172)
一、框架结构体系	(172)
二、剪力墙结构体系	(173)
三、框架-剪力墙结构体系	(174)
四、筒体结构体系	(175)
五、框架-筒体结构体系	(177)
六、刚臂-芯筒体系	(177)
第三节 结构布置	(179)
一、结构总体布置	(179)
二、结构布置的一般要求	(182)
三、高层建筑的楼盖	(186)
四、高层建筑的基础	(186)
第四节 荷载	(187)
一、楼面活荷载	(187)
二、风荷载	(187)
第五节 结构计算及设计要求	(190)
一、结构设计特点	(190)
二、结构计算的一般原则	(191)
三、结构设计要求	(192)
小结	(193)
思考题	(194)
<b>第四章 框架结构</b>	(195)
第一节 梁、柱截面尺寸及框架结构计算简图	(195)
一、梁、柱截面形状	(195)
二、梁、柱截面尺寸及截面惯性矩	(195)
三、框架结构的计算简图	(197)
第二节 竖向荷载作用下框架结构内力的近似计算	(199)
一、分层法	(199)
二、弯矩二次分配法	(201)
第三节 水平荷载作用下框架结构内力和侧移的近似计算	(205)



一、水平荷载作用下框架结构的受力及变形特点	(205)
二、D 值法	(206)
三、反弯点法	(218)
四、框架结构侧移的近似计算	(219)
第四节 荷载效应组合和构件设计	(225)
一、荷载效应组合	(225)
二、构件设计	(228)
第五节 叠合梁	(234)
一、叠合梁的受力特点	(235)
二、叠合梁的承载力计算	(236)
三、叠合梁的正常使用极限状态验算	(238)
四、叠合梁的构造规定	(241)
第六节 框架结构的构造要求	(245)
一、框架结构的混凝土强度等级	(245)
二、框架梁	(245)
三、框架柱	(247)
四、框架节点	(249)
小结	(250)
思考题	(250)
习题	(251)
<b>第五章 剪力墙结构</b>	(252)
第一节 剪力墙的分类及其平面协同工作分析	(252)
一、剪力墙的分类	(252)
二、剪力墙结构平面协同工作分析	(253)
第二节 整截面墙的内力和位移计算	(256)
一、内力	(256)
二、位移和等效刚度	(256)
第三节 整体小开口墙的内力和位移计算	(257)
一、内力	(258)
二、位移和等效刚度	(259)
第四节 双肢墙的内力和位移计算	(260)
一、基本假定	(260)
二、微分方程的建立	(261)
三、微分方程的求解	(264)
四、内力计算	(265)
五、位移和等效刚度	(272)
六、双肢墙内力和位移分布特点	(274)
第五节 多肢墙的内力和位移计算	(278)
一、微分方程的建立	(278)
二、微分方程的求解	(281)

三、约束弯矩分配系数 .....	(281)
四、内力计算 .....	(283)
五、位移和等效刚度 .....	(284)
第六节 壁式框架的内力和位移计算 .....	(287)
一、计算简图 .....	(287)
二、带刚域杆件的等效刚度 .....	(287)
三、内力和位移计算 .....	(289)
第七节 剪力墙分类的判别 .....	(292)
一、剪力墙的受力特点 .....	(292)
二、剪力墙分类的判别 .....	(293)
第八节 剪力墙截面设计和构造要求 .....	(296)
一、墙肢截面承载力计算 .....	(296)
二、连梁截面承载力计算 .....	(300)
三、构造要求 .....	(300)
小结 .....	(304)
思考题 .....	(305)
<b>第六章 框架-剪力墙结构</b> .....	(306)
第一节 基本假定与计算简图 .....	(306)
一、框架与剪力墙的协同工作 .....	(306)
二、基本假定与计算简图 .....	(306)
第二节 基本计算参数 .....	(308)
一、总框架的剪切刚度 .....	(308)
二、连梁的等效剪切刚度 .....	(309)
三、剪力墙的弯曲刚度 .....	(310)
第三节 框架-剪力墙铰结体系结构分析 .....	(312)
一、基本方程及其一般解 .....	(312)
二、均布水平荷载作用时内力及侧移计算 .....	(313)
三、倒三角形分布水平荷载作用时内力及侧移计算 .....	(314)
四、顶点集中水平荷载作用时内力及侧移计算 .....	(316)
第四节 框架-剪力墙刚结体系结构分析 .....	(316)
一、基本微分关系 .....	(316)
二、基本方程及其解 .....	(318)
三、总框架剪力 $V_i$ 和总连梁线约束弯矩 $m$ 的另一种算法 .....	(319)
四、框架-剪力墙结构的受力和侧移特征 .....	(320)
第五节 内力计算步骤及计算实例 .....	(322)
一、内力计算步骤 .....	(322)
二、计算实例及分析 .....	(324)
第六节 框架、剪力墙及框架-剪力墙结构考虑扭转效应的近似计算 .....	(337)
一、抗侧移刚度与结构刚度中心 .....	(337)
二、水平荷载的分配 .....	(338)

第七节 截面设计和构造	(340)
小结	(340)
思考题	(341)
<b>第七章 多层及高层房屋基础</b>	<b>(345)</b>
第一节 概述	(345)
第二节 基础的选型和埋置深度	(346)
一、基础类型的选择	(346)
二、基础的埋置深度	(347)
三、高层建筑基础与裙房基础的连接	(349)
第三节 弹性地基上梁的计算	(349)
一、文克尔地基模型	(350)
二、基床系数法	(350)
第四节 柱下条形基础	(360)
一、基础尺寸的初步确定	(360)
二、基底反力及基础内力的计算	(361)
三、配筋计算与构造	(363)
第五节 柱下交叉条形基础	(364)
一、节点荷载的分配	(364)
二、节点分配荷载的调整	(367)
第六节 片筏基础	(368)
一、片筏基础尺寸的初步确定	(368)
二、片筏基础的基底反力及内力计算	(369)
三、配筋计算及构造	(371)
小结	(371)
思考题	(372)
<b>参考文献</b>	<b>(373)</b>

# 第一章 楼盖及楼梯

**学习要点** 1. 深刻理解连续梁的内力包络图、折算荷载、塑性铰、内力重分布、弯矩调幅等概念;熟练掌握单向板肋梁楼盖内力按弹性理论及按考虑塑性内力重分布的计算方法。

2. 应着重理解双向板极限承载力分析的基本原理;掌握双向板肋梁楼盖内力按弹性理论及塑性理论的近似计算方法。

3. 熟悉单向板肋梁楼盖和双向板肋梁楼盖的截面设计特点及配筋构造要求。了解各种楼梯的受力特点、应用范围、内力计算方法和配筋构造要求。

4. 无梁楼盖的设计方法是一种近似实用方法,供自学和设计应用时参考。

## 第一节 楼盖一般说明

### 一、楼盖类型

#### (一) 装配式楼盖

在房屋建筑中,通常采用的钢筋混凝土楼盖有装配式及现浇整体式两类。装配式楼盖主要由铺板组成,铺板的截面形式有多孔板及槽形板等(图 1-1),这些均为一般的受弯构件,按 I 形截面或 T 形截面受弯构件计算。装配式楼盖大量应用于民用房屋砖混结构中,在钢筋混凝土多、高层房屋中也常采用这类楼盖。因为这类楼盖的铺板为单纯的受弯构件,通常均是简支单跨板,其设计详见钢筋混凝土基本构件教材,不再叙述。本书楼盖的主要内容为现浇整体式的钢筋混凝土楼盖。

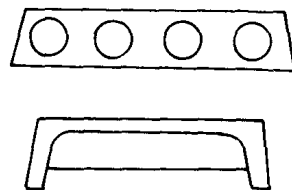


图 1-1 铺板的截面形式

#### (二) 现浇整体式楼盖

现浇整体式钢筋混凝土楼盖,通常由梁和板组成,梁和板均为受弯构件,因现浇在一起而形成超静定结构。楼盖平面中一般纵横两个方向布置有梁,将整个楼板分隔成很多区格。当板区格的平面比较狭长时,板主要沿板的短跨方向受力,这样受力的板称为单向板,楼盖则称为单向板肋梁楼盖。当板区格平面两方向的尺寸比较接近时,则板沿短跨和长跨两个方向均受力,这样受力的板称为双向板,楼盖则称为双向板肋梁楼盖。图 1-2 为单向板肋梁楼盖示例,图 1-3 为双向板肋梁楼盖示例。

现浇整体式钢筋混凝土楼盖主要用于多、高层钢筋混凝土结构房屋中,例如框架结构房屋以及剪力墙结构房屋等。在砖混结构房屋中,大厅以及盥洗室、卫生间等处也常采用这种楼盖。现浇楼盖的设计主要包括楼盖平面梁板结构布置,梁、板内力分析,配筋计算及其构造要求等。

### 二、单向板与双向板

现在分析板区格平面对板受力的影响。在各种现浇整体式楼盖中,板区格的四周有梁支承。因为梁的刚度比板大很多,所以可以略去梁的竖向变形,而梁将作为板的不动支承。有时

板也可能支承在墙上,则墙就是板的不动铰支承。

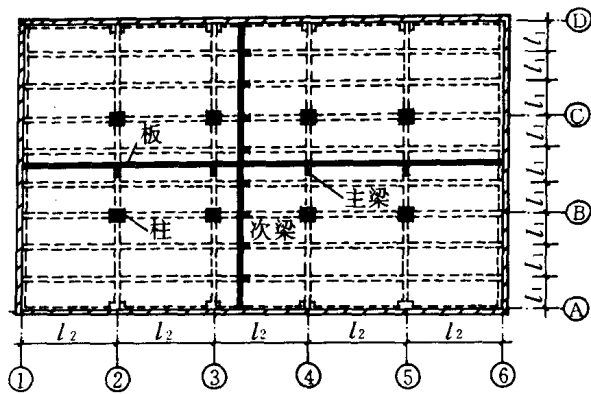


图 1-2 单向板肋梁楼盖

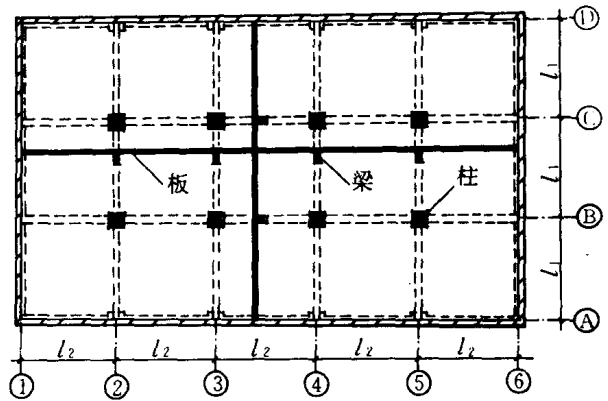


图 1-3 双向板肋梁楼盖

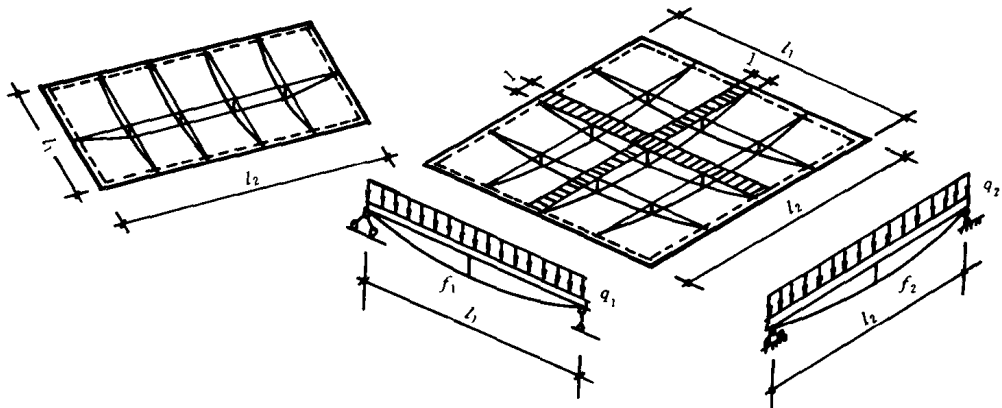


图 1-4 四边简支板的变形

四边支承板在板面竖向荷载作用下的受力情况比较复杂,板截面内产生弯矩、剪力和扭矩。钢筋混凝土板的内力情况与多种因素有关,其中主要有板两个方向跨度的比值、支承条件以及配筋情况等。为简化计算,略去扭矩不计,并设想板由两个方向的板条所组成,且认为各相邻板条之间没有相互影响。在两方向板条的交点处,板的挠度相等,如图 1-4 所示。对于板中间部分两个相互垂直的单位宽度板条,根据平衡条件以及中点处两方向板条挠度相等的条件,可得

$$q = q_1 + q_2 \quad (1-1)$$

$$f_1 = f_2 \quad (1-2)$$

$$f_1 = \alpha_1 \frac{q_1 l_1^4}{EI_1} \quad f_2 = \alpha_2 \frac{q_2 l_2^4}{EI_2}$$

式中  $q$ ——板单位面积上的竖向均布荷载;

$q_1, q_2$ ——均布荷载  $q$  在两个方向的分配值;

$f_1, f_2$ ——两个方向板条在跨度中点处的挠度;

$l_1, l_2$ ——两个方向板条的跨度,亦即板面两个方向的计算长度;

$I_1, I_2$ ——两个方向板条的截面惯性矩,近似地可取  $I_1 = I_2$ ;

$\alpha_1, \alpha_2$ ——挠度系数,与两个方向板条各自的端部支承情况有关,例如当两端均为简支时,则  
 $\alpha_1 = \alpha_2 = 5/384$ 。

联立求解式(1-1)和式(1-2)可得

$$q_1 = \frac{\alpha_2 l_2^4}{\alpha_1 l_1^4 + \alpha_2 l_2^4} q = k_1 q \quad q_2 = \frac{\alpha_1 l_1^4}{\alpha_1 l_1^4 + \alpha_2 l_2^4} q = k_2 q \quad (1-3)$$

式(1-3)中的  $\alpha_1$  及  $\alpha_2$  可根据板条两端的不同支承情况,由一般的力学方法或有关表格求得。下面以两方向板条端部支承情况相同为例子以分析,这时  $\alpha_1 = \alpha_2$ ,则式(1-3)中的  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  可以消去,于是得

$$k_1 = \frac{l_2^4}{l_1^4 + l_2^4} = \frac{(l_2/l_1)^4}{1 + \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^4} \quad k_2 = \frac{l_1^4}{l_1^4 + l_2^4} = \frac{1}{1 + (l_2/l_1)^4} \quad (1-4)$$

以  $l_2/l_1 = 2$  代入式(1-4),可得  $k_1 = 0.9412$ ,  $k_2 = 0.0588$ 。可以看出,当板的长短跨之比值大于 2 时,则沿长跨方向所分配的荷载小于 6%,对于板的计算影响不大,可以略去不计;这样的四边支承板,荷载绝大部分是沿板的短跨方向( $l_1$  方向)传递,其受力情况基本上为单向板。以  $l_2/l_1 = 0.5$  代入式(1-4),则得  $k_1 = 0.0588$ ,  $k_2 = 0.9412$ ,情况刚好相反,荷载绝大部分沿板的  $l_2$  方向传递,而这时  $l_2$  为短跨。当介于上述两种情况之间时,则板面上的荷载将沿两个方向传递,其中任一方向的受力均不应忽略,如此则为双向受力而为双向板。在实用上为便于应用且基本符合实际受力情况,对于四边支承板,通常取

$$0.5 < l_2/l_1 < 2 \quad (1-5)$$

作为双向板的条件,其中  $l_1$  和  $l_2$  为板平面两个方向的计算长度。

应当注意,上面是按四边支承板分析的。如果板仅仅是两个对边支承,而另两个对边为自由边,则这样的板无论板平面两个方向的长度如何,均属于单向板,板的荷载全部单向作用而传递到两对边的支座上。

单向板单向受力,单向弯曲,受力纵筋单向配置。双向板双向受力,双向弯曲,受力纵筋双向配置。

### 三、现浇整体式楼盖结构内力分析方法

现浇整体式楼盖通常为由梁板所组成的超静定结构,其内力分析有弹性理论方法及塑性理论方法。弹性理论方法无需多做说明,关于具体应用见后面有关内容。

塑性理论的设计方法,结果比较经济,但一般结构的裂缝较宽,变形较大。

在现浇钢筋混凝土肋梁楼盖中,通常板和次梁按塑性理论分析内力,而主梁则按弹性理论分析内力。这因为主梁为楼盖中的主要构件,为保证使用中有较好的性能,主梁需要有较大的安全储备,正常使用阶段对挠度及裂缝控制较严。另外,按照规范规定,下列情况下的超静定结构不应采用塑性理论进行结构内力分析:(1)直接承受动力荷载作用的结构;(2)轻质混凝土结构及其他特种混凝土结构;(3)受侵蚀性气体或液体严重作用的结构;(4)预应力混凝土结构和二次受力的叠合结构。

## 第二节 受弯构件塑性铰和结构内力重分布

本节主要结合钢筋混凝土结构的特点,对塑性理论方法的几个基本问题加以介绍,具体方

法放在后面楼盖结构计算中。

## 一、钢筋混凝土塑性铰

### (一) 塑性铰的形成

以钢筋混凝土受弯构件为例说明塑性铰的形成。受拉纵筋一般为软钢钢筋,且配筋率合适而为适筋梁。当某截面的弯矩达到一定数值时,该截面的受拉纵筋开始屈服,此后如构件荷载增加,则受拉钢筋屈服伸长,构件变形较大,由于截面受压区高度减小,截面力臂增加,从而该截面的弯矩略有增加,此时截面曲率发展颇大,如图 1-5 所示。图中横坐标为该截面的曲率  $\varphi$ ,纵坐标为随荷载增加该截面的弯矩值  $M$  与该截面所能抵抗的极限弯矩值  $M_u$  的比值。与此同时,在该截面邻近的一小段构件长度内,有的截面受拉纵筋也开始屈服或已有一定屈服变形。这样的区段一般比较短,称为塑性铰区长度  $l_p$ 。实用上为了分析方便,可认为集中在一个截面( $l_p$  长度内的中间截面)。设塑性铰截面屈服时曲率为  $\varphi_y$ ,屈服后曲率为  $\varphi_u$  (图 1-5),按塑性铰转角等效原则取等效长度  $\bar{l}_p$ ,则塑性铰转角为

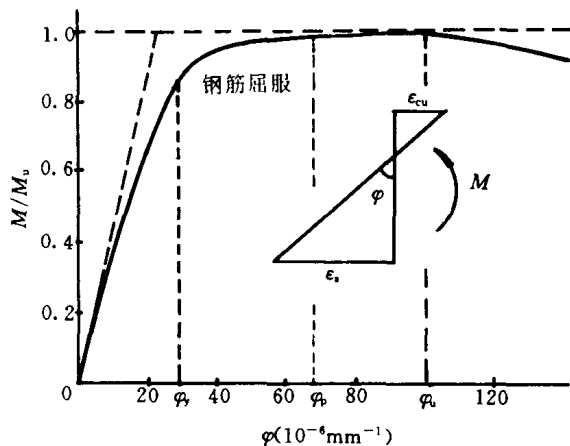


图 1-5 截面弯矩与曲率的关系曲线

$$\theta_p = (\varphi_u - \varphi_y) \bar{l}_p \quad (1-6)$$

由上可知,塑性铰就是由于受拉纵筋屈服,发生塑性变形,从而产生一定的塑性转角。在塑性铰截面的两侧,构件产生相对塑性转角  $\theta_p$  (图 1-6)。

### (二) 塑性铰的转动能力

塑性铰转动后,截面受压区混凝土应变不断增大,最后使混凝土受压而破坏。到达这种程度,认为塑性铰已破坏。从受拉纵筋屈服开始,直至受压区混凝土压坏为止,这一过程的塑性转动为塑性铰的转动能力,亦即极限转角。将破坏时塑性铰截面的曲率用  $\varphi_u$  表示(图 1-5),这时塑性铰区的等效长度仍以  $\bar{l}_p$  表示,则塑性铰的极限转角为

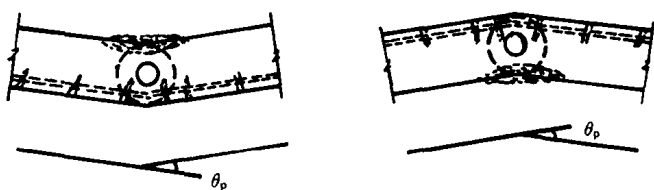


图 1-6 塑性铰及塑性转角

$$\theta_{p \max} = (\varphi_u - \varphi_y) \bar{l}_p \quad (1-7)$$

影响塑性铰转动能力的因素,主要为钢筋种类、受拉纵筋配筋率以及混凝土的极限压缩变形。当受拉纵筋为软钢(I、II级钢筋)时,塑性铰转动能力较大,受拉纵筋配筋率较低时,则塑性铰的转动能力较大。混凝土的极限压缩变形除与混凝土的强度有关外,箍筋用量多或受压区纵筋较多时,都能增加混凝土的极限压缩变形。一般情况受拉纵筋采用 I、II 级钢筋,在常用混凝土强度等级以及通常配箍率等条件下,受拉纵筋配筋率对塑性铰转动能力具有决定性作用。

受拉纵筋配筋率  $\rho$  的大小,直接影响受压区高度  $x$ ,对于单筋矩形截面受弯构件, $\xi = x/h_0$

$= \frac{A_s f_y}{f_{cm} b h_0} = \rho \frac{f_y}{f_{cm}}$ 。因此,  $\xi$  值直接与转动能力有关。  $\xi > \xi_b$  为超筋梁, 受压区混凝土先压坏, 不会形成塑性铰。  $\xi < \xi_b$  为适筋梁, 可以形成塑性铰,  $\xi$  值越小, 塑性铰的转动能力越大。一般要求  $\xi \leq 0.35$ 。

### (三) 塑性铰的特点

与理想铰相比, 塑性铰的主要特点如下。塑性铰实际上不是集中于一个截面, 而是具有一定的长度, 为了分析简化, 可认为塑性铰是一个截面; 塑性铰能承受弯矩, 为简化考虑, 认为塑性铰所承受的弯矩为定值, 且取其等于截面屈服弯矩, 即作为理想弹塑性考虑; 对于单筋受弯构件, 塑性铰的转动方向是单向的, 即随着受拉纵筋屈服伸长而截面转动, 相反方向则不可能转动; 塑性铰的转动能力受到配筋率等的限制, 与理想铰相比, 可转动的转角值较小。

## 二、结构塑性内力重分布

### (一) 塑性内力重分布过程

在钢筋混凝土结构中, 当某截面出现塑性铰后, 则结构中引起内力重分布, 使结构中的内力分布规律(弯矩图等)不同于按弹性理论亦即一般力学方法计算所得的结果。此外, 在钢筋混凝土超静定结构中, 当构件受拉区出现裂缝、混凝土徐变以及结构支座的沉降等均会引起结构的内力重分布, 但一般这些因素所引起的内力重分布颇小, 对结构设计影响不大。明显的内力重分布主要为塑性铰的影响, 特称之为塑性内力重分布。

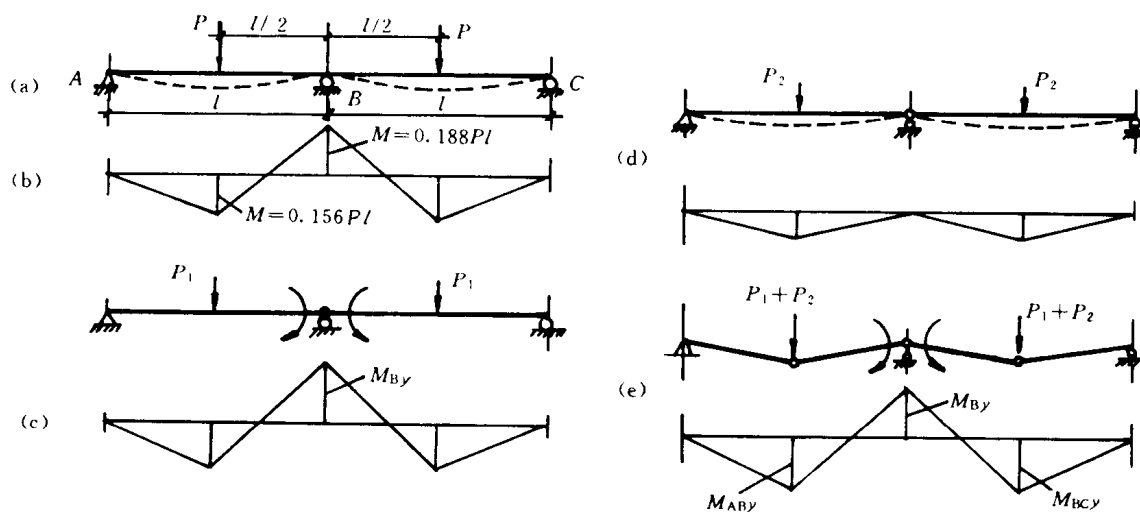


图 1-7 两跨连续梁内力变化过程

现以一矩形等截面两跨连续梁为例, 说明内力重分布的过程。图 1-7(a) 所示两跨连续梁, 中间支座处梁截面与梁跨中截面根据所配受拉纵筋, 截面所能承受的弯矩值分别以  $M_{By}$ ,  $M_{ABy}$ ,  $M_{BCy}$  表示; 受拉纵筋配筋率不大, 截面出现塑性铰后具有较大的转动能力。另外, 梁中配有足够的抗剪钢筋, 保证不发生剪切破坏。

加载初期, 混凝土出现裂缝之前, 结构基本上为弹性体系, 梁的内力分布符合按弹性理论计算结果, 弯矩图见图 1-7(b)。加大荷载, 至中间支座处梁截面受拉区混凝土开裂而跨中截面尚无裂缝, 由于中间支座处梁截面刚度有所降低, 使该处梁截面弯矩值小于弹性分析结果, 而跨中截面弯矩值则大于弹性分析结果。这时梁中已发生了内力重分布。随着荷载继续加大, 梁跨中也出现裂缝, 结构又一次发生内力重分布。继续加载至中间支座处梁截面受拉纵筋屈服,



该截面首先出现塑性铰,这时相应的外荷载值为 $P_1$ ,弯矩图见图1-7(c)。两跨连续梁原为一次超静定,由于中间支座处梁截面出现了塑性铰,则梁由超静定结构变为静定结构,如图1-7(d)所示。此后再继续加载,直到梁跨中截面刚刚开始出现塑性铰,设其荷载增值为 $P_2$ ,这过程中中间支座处梁截面弯矩保持不变而为 $M_{By}$ ,由各跨荷载增值 $P_2$ 所引起的弯矩,则由AB和BC两个简支梁各自分别负担,中间支座处塑性铰发生转动,跨中弯矩值分别为 $M_{ABy}$ 及 $M_{BCy}$ 。在这最后阶段,结构已成为机动体系,如图1-7(e)所示。梁的最终承载能力是 $P_1+P_2$ ,这时梁的最后弯矩图见图1-7(e)。

上述内力重分布现象可概括为两个过程:第一过程发生于裂缝出现至塑性铰形成以前的阶段,主要是由于裂缝形成和开展,使构件刚度变化而引起的内力重分布;第二个过程发生于塑性铰形成以后,由于塑性铰的转动而引起。一般第二过程的内力重分布较第一过程显著。

### (二) 塑性内力重分布的幅度

塑性内力重分布的幅度是指截面弹性弯矩与该截面塑性铰所能负担弯矩的差值,通常简称为调整。如仍以图1-7所示的两跨连续梁为例,则该结构的塑性内力重分布幅度为

$$\Delta M_y = 0.188(P_1 + P_2)l - M_{By}$$

通常以相对值表达,即 $\Delta M_y / 0.188(P_1 + P_2)l$ 。一般可表示为

$$\frac{\Delta M_y}{M_e} = \frac{M_e - M_y}{M_e} = 1 - \frac{M_y}{M_e} \quad (1-8)$$

式中 $M_y$ 表示塑性铰所能负担的弯矩, $M_e$ 为该截面弹性弯矩。

调整值 $\Delta M_y$ 越大,则塑性铰的转角值 $\theta_p$ 越大。如果 $\theta_p$ 值超过了塑性铰的转动能力 $\theta_{p, \max}$ ,则在跨中截面尚未出现塑性铰以前,中间支座处梁截面混凝土已压坏,如此结构发生局部破坏而不能发生充分的内力重分布。如果塑性铰转动能力足够大,不致因塑性铰过分转动而破坏,则结构中可引起充分的内力重分布,最终使结构成为机动体系而整体破坏。

### (三) 塑性内力重分布的设计考虑

在超静定次数较高的结构中,塑性铰的陆续出现而转动,直至结构形成机动体系而破坏,是一个比较长的过程。如果设计得当,塑性内力重分布可以充分发生。因此对超静定结构而言,一个截面的屈服并不意味着结构破坏,考虑塑性内力重分布的计算方法,可以充分利用结构的强度储备,提高结构的极限荷载,取得经济效果。

超静定结构考虑塑性内力重分布的计算,对于塑性铰截面不必考虑须满足变形连续条件,因塑性铰截面的两侧构件在该处已发生相对转角。但计算时仍须满足平衡条件。如仍以图1-7所示的两跨连续梁为例,则整个结构承载能力极限状态时的平衡条件为

$$\frac{1}{2}M_{By} + M_{ABy} = \frac{1}{4}(P_1 + P_2)l \quad \frac{1}{2}M_{By} + M_{BCy} = \frac{1}{4}(P_1 + P_2)l = M_0$$

式中 $M_0$ 表示相应的简支梁跨中弯矩。对于跨中央作用一个集中荷载的每跨梁,写出普遍形式则为

$$\frac{1}{2}(M_A + M_B) + M_{AB} = \frac{1}{4}Pl \quad (1-9)$$

式中 $M_A, M_B, M_{AB}$ 分别为A支座、B支座及跨中截面弯矩设计值,此处均取绝对值; $P$ 为外荷载设计值。

在结构实际设计中,必须考虑正常使用阶段结构的裂缝宽度和挠度大小。以上分析的是到达机动体系的整个结构承载能力极限状态。如果这时的内力重分布幅度过大,则结构在使用阶段的裂缝及挠度会较大而不符合使用要求。因此内力重分布的幅度应有所限制,一般调整幅度