

内 容 提 要

本书是交通版高等学校土木工程专业规划教材之一,是《混凝土结构设计原理》的姊妹书。本书内容按现行最新的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)及《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)编写。本书共三章,内容包括:梁板结构、单层厂房结构和多层框架结构等。每章均配有详细的设计实例,章末附有思考题和习题。

本书可作为土木工程专业本科教材,也可作为房屋建筑工程专业及相近专业专科教材,还可供从事土建工程技术的设计、施工及科研工作者参考。

交通版

高等学校土木工程专业规划教材

摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇

摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇编委会

主任委员：阎兴华

副主任委员：张向东 李帼昌 魏连雨 赵摇尘

宗摇兰 马芹永 段敬民 黄炳生

委 摇 员：彭大文 林继德 张俊平 刘春原

党星海 刘正保 刘华新 丁海平

秘 书 长：张征宇



摇摇我国高等学校土木工程学科教育正在按照教育部的部署,实现“厚基础、宽口径、多方向、高素质”的教育要求,实现两个根本性转变,特别是实现由应试教育向素质教育的转变,要求毕业生能从事土木工程的设计、施工及管理工作,业务范围涉及房屋建筑、桥梁隧道、公路及城市道路、矿山建筑等。为此我国高等学校土木工程专业教学指导委员会提出,拟在保证专业基础课的前提下,按专业方向分成若干课程组,如专业基础组、建筑工程组、桥梁隧道组等。

本书是《混凝土结构设计原理》的姊妹书,是专业课教材。在学生已修《混凝土结构设计原理》的基础上,从专业培养方向及培养目标出发,提供给学生以结构工程师的基础训练。通过本课程的学习,学生可以对混凝土结构工程中的结构设计有较系统的训练。

在本书编写时,贯彻了《中国教育改革和发展纲要》精神,本着“厚基础、重能力、求创新、以培养应用型人才为主”的总体思路,保证课程体系的完整性,同时注重加强基本理论、基本技能和基本知识的训练。做到内容精练、特色鲜明,文字力求通俗流畅,对涉及国家标准或规范的内容,均以现行最新国家标准或规范为准。编写内容包括:梁板结构,阐述楼盖和屋盖的结构设计理论与方法;单层厂房结构,尽管钢结构厂房近年来逐渐增多,但混凝土结构单层厂房由于标准化、工业化程度较高,今后一个时期仍将是主要结构形式之一;多层框架结构,这部分内容对于学生掌握多层框架结构设计原理与方法,无论结构分析或截面设计,都是作为工程师(特别是注册结构工程师)训练的重要内容。

本书编写分工如下:第一章由刘华新编写;第二章的第一节至第七节由程选生编写、第二章的第八节由何军编写;第三章由段敬民编写。

限于编者水平,且组稿仓促,在本书的编写过程中一定存在许多不足之处,敬请读者不吝指正。

编摇者
圆缘年 缘月

随着科学技术的迅猛发展、全球经济一体化趋势的进一步加强以及国力竞争的日趋激烈,作为实施“科教兴国”战略重要战线的高等学校,面临着新的机遇与挑战。高等教育战线按照“巩固、深化、提高、发展”的方针,着力提高高等教育的水平和质量,取得了举世瞩目的成就,实现了改革和发展的历史性跨越。

在这个前所未有的发展时期,高等学校的土木类教材建设也取得了很大成绩,出版了许多优秀教材,但在满足不同层次的院校和不同层次的学生需求方面,还存在较大的差距,部分教材尚未能反映最新颁布的规范内容。为了配合高等学校的教学改革和教材建设,体现高等学校在教材建设上的特色和优势,满足高校及社会对土木类专业教材的多层次要求,适应我国国民经济建设的最新形势,人民交通出版社组织了全国二十余所高等学校编写“交通版高等学校土木工程专业规划教材”,并于 1999 年 12 月在重庆召开了第一次编写工作会议,确定了教材编写的总体思路,于 2000 年 1 月在北京召开了第二次编写工作会议,全面审定了各门教材的编写大纲。在编者和出版社的共同努力下,目前这套规划教材已陆续出版。

这套教材包括“土木工程概论”、“建筑工程施工”等 16 门课程,涵盖了土木工程专业的基础课和专业课的主要系列课程。这套教材的编写原则是“厚基础、重能力、求创新,以培养应用型人才为主”,强调结合新规范、增大例题、图解等内容的比例,并适当反映本学科领域的新发展,力求通俗易懂、图文并茂,其中对专业基础课要求理论体系完整、严密、适度,兼顾各专业方向,应达到教育部和专业教学指导委员会的规定要求,对专业课要体现出“重应用”及“加强创新能力和工程素质培养”的特色,保证知识体系的完整性、准确性、正确性和适应性,专业课教材原则上按课群组划分不同专业方向分别考虑,不在一本教材中体现多专业内容。

反映土木工程领域的最新技术发展,符合我国国情、与现有教材相比具有明显特色,是这套教材所力求达到的。在各相关院校及所有编审人员的共同努力下,交通版高等学校土木工程专业规划教材必将对我国高等学校土木工程专业建设起到重要的促进作用。

交通版高等学校土木工程专业规划教材编审委员会

人民交通出版社

2000 年 1 月

目录 MULU



第一章 梁板结构	1
第一节 概述	1
第二节 单向板肋梁楼盖	10
第三节 双向板肋梁楼盖	10
第四节 无梁楼盖	14
第五节 装配式楼盖	14
第六节 叠合式楼盖	14
第七节 无粘结预应力混凝土楼盖	14
第八节 梁板结构体系的应用	14
第二章 单层厂房结构	15
第一节 概述	15
第二节 单层厂房排架结构组成及结构布置	15
第三节 单层厂房的主要构件及其选型	15
第四节 排架内力分析与计算	15
第五节 钢筋混凝土柱设计	15
第六节 柱下单独基础的设计	15
第七节 单层厂房结构构件之间的连接	15
第八节 单层厂房结构设计实例	15
第三章 多层框架结构	15
第一节 概述	15
第二节 多层及高层房屋的结构体系	15
第三节 框架结构的布置	15
第四节 房屋水平位移的限制	15
第五节 框架结构上的荷载	15
第六节 框架结构的计算简图	15
第七节 框架结构的内力分析与计算	15
第八节 框架在水平荷载作用下侧移的近似计算	15
第九节 框架结构的内力组合及构件截面配筋计算	15
第十节 框架的节点设计与构造	15
第十一节 框架结构的基础设计	15

第十二节 框架结构计算实例.....	四七
附录一 两跨等截面等跨连续梁在常用荷载作用下的内力系数表	四七
附录二 单阶柱柱顶反力与水平位移系数值.....	四七
参考文献.....	四七

第一章 梁板结构

闻明龙 廖静



第一节 楼盖概述

一、楼盖的作用

楼盖(屋盖)是建筑结构的水平承重体系,是建筑结构的重要组成部分。在建筑结构中,混凝土楼盖的造价约占土建总造价的 10%~15%;在钢筋混凝土高层建筑中,混凝土楼盖的自重约占总自重的 10%~15%,因此降低楼盖的造价和自重对整个建筑物来讲是至关重要的。减小混凝土楼盖的结构设计高度,可降低建筑层高,对建筑工程具有很大的经济意义。混凝土楼盖设计对于建筑隔声、隔热和美观等建筑效果有直接影响,对保证建筑物的强度、刚度、耐久性,以及提高抗风、抗震性能等也有重要的作用。

楼板的主要作用有:

- (1) 把楼面荷载传递给竖向承重结构体系;
- (2) 把水平力传递(或分配)给竖向承重结构体系;
- (3) 作为竖向承重结构体系的水平联系和支承,从而增加了竖向承重结构体系的稳定性。

二、楼盖的分类

(1) 按结构形式分楼盖可分为有梁楼盖和无梁楼盖。有梁楼盖根据梁、柱的结构布置特点又可分为单向板肋梁楼盖、双向板肋梁楼盖、井式楼盖、密肋楼盖和无梁楼盖等,如图 1-1 所示。其中,现浇钢筋混凝土单向板肋梁楼盖和双向板肋梁楼盖应用最为普遍。

(2) 按是否施加预应力分楼盖可分为普通钢筋混凝土楼盖和预应力混凝土楼盖。

(3) 按施工方法分楼盖可分为现浇式、装配式和装配整体式混凝土楼盖。

三、楼盖的设计方法

楼盖的设计方法主要有:

(1) 弹性设计法基于线弹性内力分析法,假定材料具有线弹性的性质,应力与应变成比例,可采用结构力学的方法计算其内力和变形。对于截面和荷载很规则的结构构件,有现成的

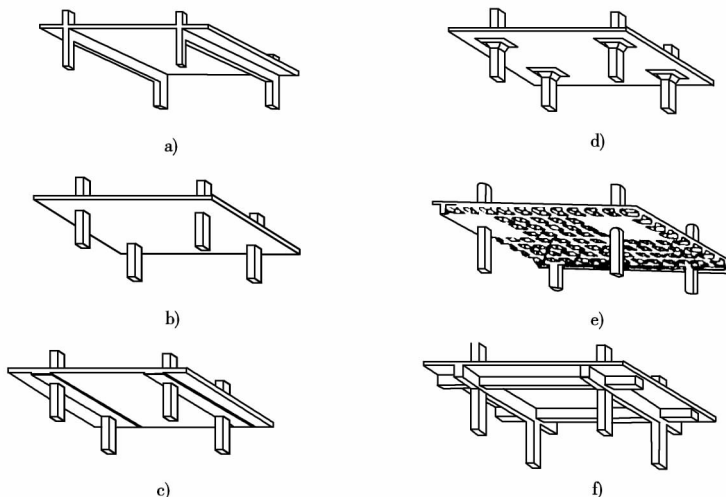


图 1 钢筋混凝土梁楼盖

内力计算表格可以直接查用(见附录一)。弹性设计法不适用于结构构件开裂以后的情况。

(圆)弹性设计法能较好地反映混凝土结构开裂后的实际受力情况。

(狗)塑性设计法是以结构形成几何可变体系和进一步加载时将导致结构破坏为前提。这种方法用于估算结构构件的极限承载力是十分有利的。但是采用这种方法进行设计时,应注意变形和裂缝是否满足使用要求的问题。

第二节 单向板肋梁楼盖

一、单向板肋梁楼盖的设计步骤

单向板肋梁楼盖一般由连续板、次梁和主梁组成,以墙体和柱为支承。

单向板的概念

主要在一个方向受力的板称为单向板。单向板的计算方法与梁相同,故又称梁式板,一般包括以下三种形式:

(员)悬臂板

如一边支承的板式雨篷和一边支承的板式阳台等。

(圆)对边支承板

如对边支承的装配式铺板和走廊中的现浇走道板等。

(狗)两相邻边支承板、三边支承板及四边支承板

按弹性理论,当四边支承板两个方向计算跨度之比 ≤ 2 时,则按跨度 l_x 的单向板设计(按塑性理论, ≤ 2 的是单向板)。

如图 1 所示,在承受均布荷载的四边支承板跨中截出两个互相垂直的宽度均为 b 的板带。假定不计相邻板带的影响,由跨中挠度 w 相等的条件,可求得荷载 q 在 x 方向的分配值 q_x 为:

弯矩 $\alpha_{短跨}$ 越 $\alpha_{长跨}$ 越 (式 10-1)

弯矩 $\alpha_{短跨}$ 越 $\alpha_{长跨}$ 越 (式 10-2)

式中, $\alpha_{短跨}$ 、 $\alpha_{长跨}$ 为挠度系数, 根据板带两端的支承情况而定。两端简支时, $\alpha_{短跨}$ 越 $\alpha_{长跨}$ 越

如果忽略钢筋在两个方向的位置差别及数量不等的影响, 取 $\alpha_{短跨} = \alpha_{长跨}$ 则有

弯矩 $\alpha_{短跨}$ 越 $\alpha_{长跨}$ 越 (式 10-3)

以上分析中, 忽略了相邻板带的影响, 因此是近似的。由式(10-1)可知, 四边支承板上的荷载主要是通过两个方向的弯曲把荷载传递到两个方向的支承上。当 $l_1 > 1.05 l_2$ 时, 在长跨方向分配到的荷载不到 $1/4$, 故在设计中可仅考虑短跨方向受弯, 即在计算中忽略荷载在长跨方向的传递, 只在构造设计方面对长跨方向上的受弯作适当处理即可。

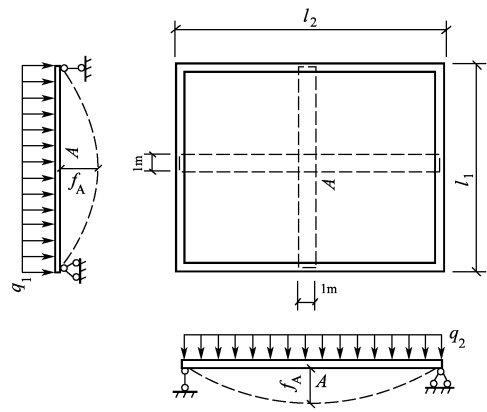


图 10-1

单向板肋梁楼盖的设计步骤

- (1) 依据建筑功能等要求进行结构平面布置, 确定板厚和主、次梁的截面尺寸;
- (2) 确定板和主、次梁的计算简图;
- (3) 荷载、内力分析与计算;
- (4) 截面承载力计算、配筋及构造设计;
- (5) 根据计算结果和构造措施绘制施工图。

结构布置

单向板肋梁楼盖一般由连续板、连续次梁和连续主梁构成。其中, 次梁的间距决定板的跨度, 主梁的间距决定次梁的跨度, 柱网尺寸决定主梁的跨度。在实际工程设计中, 单向板、次梁和主梁的常用跨度为:

- 单向板: $l_1 \sim 3.0m$, 荷载较大时取较小值, 一般不宜超过 $3.6m$;
- 次梁: $2.0 \sim 3.0m$;
- 主梁: $6.0 \sim 9.0m$ 。

(1) 常见单向板肋梁楼盖的结构平面布置方案有以下 3 种:

- ① 主梁沿横向布置, 次梁沿纵向布置;
- ② 主梁沿纵向布置, 次梁沿横向布置;
- ③ 主、次梁沿纵向、横向混合布置。

(2) 楼盖结构平面布置的原则

- ① 使用要求: 柱网尺寸与梁的布置首先应满足使用功能要求, 梁格布置应规整以便于施工;
- ② 在混合结构体系中, 梁的支承点应避开门窗洞口;
- ③ 主梁宜沿建筑物横向布置;
- ④ 主梁跨内最好不要放一根次梁, 以减小主梁跨内弯矩的不均匀;
- ⑤ 经济要求。

二、单向板肋梁楼盖按弹性理论计算

计算假定

(1) 梁、板均为弹性杆件，其抗弯刚度为 EI ，其中 E 为混凝土弹性模量， I 为构件截面惯性矩；

(2) 梁、板的支承情况按表 10.1.1 采用。

连续梁、板的支承

表 10.1.1

构件类型	边 跨 支 座		中 间 支 座	
	砌体	梁或柱	梁或砌体	柱
板	简支	固端	支承链杆	
次梁	简支	固端	支承链杆	
主梁	简支	简支		$EI_{主梁} \geq EI_{柱}$ 跃缘支承链杆 $EI_{主梁} < EI_{柱}$ 缘框架梁
		$EI_{主梁} < EI_{柱}$ 缘框架梁		

注： $EI_{主梁}$ 、 $EI_{柱}$ 分别为主梁和柱的抗弯线刚度；支承链杆是位于支座宽度中点的能自由转动的刚杆。

(3) 在确定梁、板的支座反力时，为了方便，可忽略梁、板的连续性，每一跨都按简支梁来计算其支座反力。

计算单元

(1) 计算单元的确定

沿板跨方向板可取 $b=1m$ 宽度的板带作为其计算单元，进行内力计算和配筋设计。主、次梁的截面形状都是两侧带翼缘(板)的 T 形截面，楼盖周边处的主、次梁则是一侧带翼缘的。荷载计算时，每侧翼板的计算宽度取与相邻梁的中心距的一半。由前述假定(3)可知，一根次梁的负荷范围以及次梁传给主梁的集中荷载范围如图 10.1.1 所示。

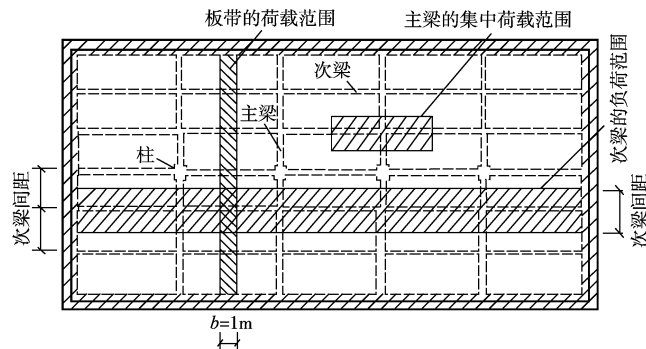


图 10.1.1

板、次梁主要承受均布线荷载，主梁主要承受由次梁传来的集中荷载。由于主梁的自重所占比例不大，为了计算方便，可将其换算成集中荷载加到次梁传来的集中荷载内。所以从承受荷载的角度看，主梁主要承受集中荷载，次梁主要承受均布线荷载，故主梁的弯矩图和剪力图的起伏比次梁的大，在切断或弯起主梁的纵向钢筋以及配置主梁的钢筋时要特别注意这一点。

(2) 计算简图

由前述假定(圆)可知,连续梁、板的计算简图如图 员圆缘所示。对于连续梁、板的某一跨来说,作用在其它跨上的荷载都会对该跨内力产生影响,但作用在它相隔两跨以上的其余跨内的荷载对它的影响较小,可以忽略不计。这样,对于等截面且等跨的连续梁、板,当实际跨数超过缘跨时,可按缘跨计算,如图 员圆缘所示。也就是说,所有中间跨的内力和配筋都按第三跨来处理,如图 员圆缘所示。计算时,常称边跨为第一跨,支座 粤和 悦分别称为边支座、第一内支座和第二支座。

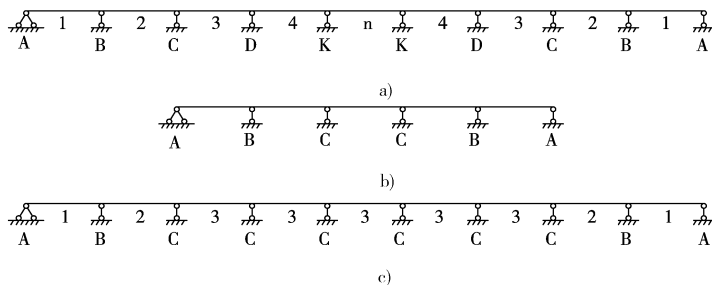


图 员圆缘 连续梁、板的计算简图

葬实际简图,遭计算简图,精考虑配筋构造时的简图

对于跨数超过缘跨的连续梁、板。当各跨荷载相同,且跨度相差不超过员圆缘时,可按缘跨的等跨连续梁、板进行计算。

梁、板的计算跨度 遭是指在内力计算时所采用的开间长度。从理论上讲,某一跨的计算跨度应取该跨两端支座反力合力作用点之间的距离。但在梁板结构设计中,当按弹性理论计算时,根据边支座的支承形式,板和次梁边跨的计算跨度取值与中间跨不同:

①当边跨端支座为固端支座时,由前述假定(圆)可知,边跨和中间跨的计算跨度 遭都取为支座中心到中心的距离,即中间跨:

$$\text{边跨: } \text{遭} = \text{遭} \quad (\text{员圆缘})$$

边跨:

$$\text{边跨: } \text{遭} = \text{遭} - \frac{\text{葬}}{\text{圆}} \quad (\text{员圆缘})$$

式中:葬——分别为边支座、中间支座或第一内支座的宽度;

遭——净跨长。

②当边跨端支座是简支支座时,对于板,当板厚 贼不小于葬,对于主、次梁,葬不小于园缘缘,边跨的计算跨度仍按式(员圆缘)计算,否则按下式计算:

$$\text{当板 } \text{贼} \geq \text{葬} \text{ 时: } \text{遭} = \text{遭} - \frac{\text{葬}}{\text{圆}} \quad (\text{员圆缘})$$

$$\text{当次梁、主梁 } \text{葬} \geq \text{园缘缘} \text{ 时: } \text{遭} = \text{遭} - \frac{\text{葬}}{\text{圆}} \quad (\text{员圆缘})$$

这样计算的目的是为了边跨 葬过宽时,合力作用点可能内移而作出的规定(请注意:板的边支座合力作用点位置主要与板厚有关,主、次梁则主要与其跨度有关)。

当按塑性理论计算时,板和梁的计算跨度,边跨一般取板 $\text{遭} = \text{遭} - \frac{\text{葬}}{\text{圆}}$,梁 $\text{遭} = \text{遭} - \frac{\text{葬}}{\text{圆}} \leq \text{园缘缘}$,中间跨度 $\text{遭} = \text{遭}$

梁、板的计算跨度也可以按表 员圆缘采用。

支承情况	按弹性理论计算		按塑性理论计算	
	梁	板	梁	板
摇两端与梁(柱)整体连接	l_0	l_0	l_0	l_0
摇两端搁置在墙上	$l_0 = l - a$	$l_0 = l - a$	$l_0 = l - a$	$l_0 = l - a$
摇一端与梁整体连接,另一端搁置在墙上	$l_0 = l - \frac{a}{2}$	$l_0 = l - \frac{a}{2}$	$l_0 = l - \frac{a}{2}$	$l_0 = l - \frac{a}{2}$

注:表中的 l_0 为支座中心线间的距离; l 为板的净跨; a 为板的厚度; b 为板、梁在墙上的支承宽度; c 为板、梁或柱上的支承宽度。

(一) 折算荷载的确定

在均布荷载作用下,板和次梁的内力按折算荷载设计值进行计算,目的是为了板的内力计算值更接近于实际,可以进行适当的调整。这种处理方法也适用于支承于主梁之上的次梁。考虑到板或次梁在支承处的转动主要是由活荷载的不利布置产生的,因此比较简便的修正方法是在荷载总值不变的条件下,增大恒荷载,减小活荷载,即在计算板和次梁的内力时,采用折算荷载,即

连续板: $q = \frac{1}{2}(g + q)$ (10.1.1)

连续次梁: $q = \frac{1}{2}(g + q)$ (10.1.2)

式中: g ——单位长度上恒荷载、活荷载设计值;

q ——单位长度上折算恒荷载、折算活荷载设计值。

当板或次梁搁置在砌体或钢结构上时不进行折减。

这样调整后,在 q 作用下的板或次梁的支座转角大致与实际情况接近。由于主梁的重要性高于板和次梁,且它的抗弯刚度通常比柱的大,故对主梁一般不作调整。

(二) 活荷载的最不利布置

活荷载的位置是可变的,活荷载的不利布置是指在这种情况下可得到支座截面或跨内截面的最大内力(绝对值)。

活荷载的最不利布置规律为:

- ① 求某一支座截面最大负弯矩(最小弯矩)时,应在它的左右两跨布置活荷载,然后向左、向右每隔一跨布置活荷载。
- ② 求某一跨的跨内截面最大正弯矩时,应在该跨布置活荷载,然后向左、向右每隔一跨布置活荷载。
- ③ 求某一跨的跨内最小正弯矩(或最大负弯矩)时,该跨不布置活荷载,而在其左右邻跨布置活荷载,然后向左、向右每隔一跨布置活荷载。
- ④ 求某一支座左、右边的最大剪力(绝对值)时,活荷载布置与①相同。

(三) 支座弯矩及剪力的修正

按弹性理论计算连续梁、板内力时,中间跨的计算跨度取支座中心线间的距离,这样求得的支座弯矩及剪力都是支座中心处的。当梁、板与支座整体连接时,支座边缘处的截面高度比支座中心处小得多,为了使梁、板结构的设计更加合理,可取支座边缘的内力作为设计依据,并按以下公式计算(图 10.1.1)。

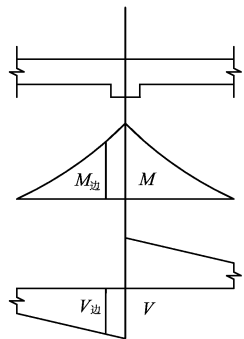


图 10.1.1

支座边缘截面的弯矩设计值 M_{ed} 为：

$$M_{ed} = \frac{1}{2} M_0 + V_0 l_0 \quad (5.10.1)$$

式中 M_0 ——支座中心处的弯矩设计值；

V_0 ——按简支梁计算的支座中心处的剪力设计值，取绝对值；

l_0 ——支座宽度。

支座边缘截面的剪力设计值 V_{ed} 为：

均布荷载作用下：
$$V_{ed} = V_0 - q l_0 \quad (5.10.2)$$

集中荷载作用下：
$$V_{ed} = V_0 \quad (5.10.3)$$

式中 V_0 ——支座中心处的剪力设计值。

(远)内力包络图

当求出了支座截面和跨内截面的最大弯矩、最大剪力后，就可进行截面设计，确定钢筋用量。如果要确定梁上部纵向钢筋的切断与下部纵向钢筋的弯起，还需要知道最大弯矩和最大剪力沿跨度的变化情况，这就要求画出弯矩包络图和剪力包络图。

现以承受均布荷载的连续梁的弯矩包络图来说明。根据活荷载的不同布置情况，每一跨都可以画出源种弯矩图，分别对应跨内最大正弯矩、跨内最小正弯矩（或负弯矩）和左、右支座截面的最大负弯矩。当边支座为简支时，边跨只能画出猿种弯矩图形。把这些弯矩图形全部叠加在一起，并取其外包线所构成的图形即为弯矩包络图。它给出了一个截面可能出现的弯矩设计值的上、下限，如图 5.10.4 所示。同样可画出剪力包络图，如图 5.10.5 所示。

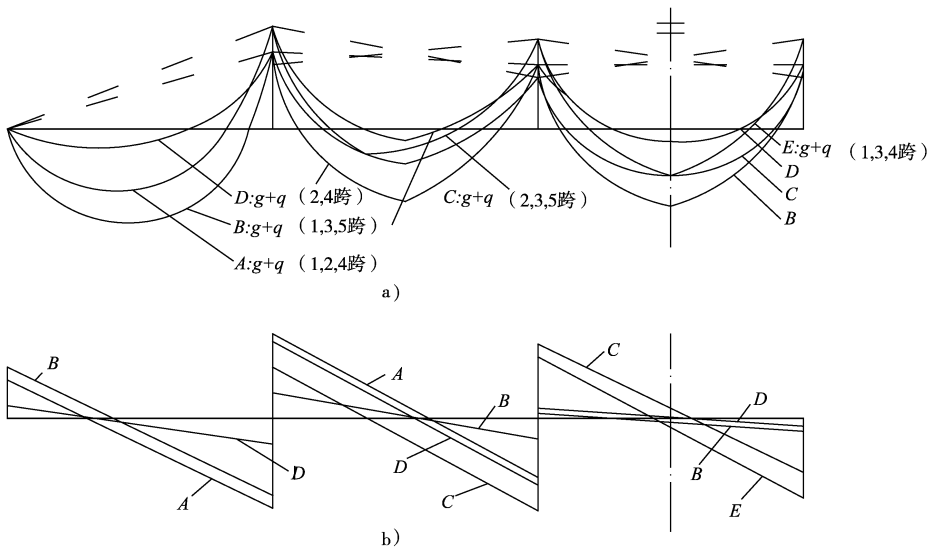


图 5.10.4 连续梁内力包络图
弯矩包络图，剪力包络图

(远)内力分析与计算

连续梁、板按弹性理论的内力计算包括：

- ① 等截面、等跨度、支座是简支的连续梁、板的弹性内力计算；
- ② 均布荷载作用下，等截面不等跨、简支的连续梁、板的弹性内力计算；
- ③ 不等截面不等跨连续梁、板的弹性内力计算。

以上可按结构力学的方法分析内力，现在介绍计算时常采用的实用弯矩分配法。

实用弯矩分配法的原理与一般的弯矩分配法相同,它可以由一张表格一次算出所有支座截面的最大负弯矩值。因为求支座最大剪力的活荷载布置规律与求支座最大负弯矩是相同的,所以也就能同时求出各支座的最大剪力值。欲求各跨内最大正弯矩值时,可再列一张表格算出,详见有关资料。

实用弯矩分配法的特点为:

①要同时算出两种荷载,即总荷载(恒+活)以及恒荷载作用下,支座截面的两个固端弯矩值。

②在计算支座不平衡弯矩时,要在两个固定弯矩值中,按照活荷载不利布置的要求选择其中的一个进行计算。

③只考虑相邻支座的弯矩传递,并且只传递一次。

符号规定:作用在杆端的弯矩或剪力使杆件绕另一端顺时针转动时为正,反之为负。这样,弯矩传递系数就是正的。

三、塑性内力重分布的基本原理

塑性内力重分布的概念

超静定结构的内力不仅与荷载有关,而且还与结构的计算简图以及各部分抗弯刚度的比值有关。如果计算简图或刚度的比值发生变化,内力也要随之变化。由于钢筋混凝土结构材料的非线性,其截面的受力全过程一般有个工作阶段:开裂前的弹性阶段,开裂后的带裂缝阶段和钢筋屈服后的破坏阶段。在弹性阶段,刚度不变,内力与荷载成正比。进入带裂缝阶段后,各截面间的刚度比值发生改变,故各截面间内力的比值也将随之改变。个别截面受拉钢筋屈服后进入破坏阶段而形成塑性铰,引起结构计算简图改变,使内力的变化规律发生变化。混凝土结构由于刚度比值改变或出现塑性铰引起结构计算简图变化,从而引起的结构内力不再服从弹性理论的内力规律的现象称为塑性内力重分布或内力重分布。

要注意内力重分布与应力重分布两者的区别。应力重分布是指截面上各纤维间的应力变化规律不同于弹性理论而言,并且不论对静定的还是超静定的混凝土结构都存在。内力重分布则是指结构上各个截面间内力变化规律不同于弹性理论而言的,并且只有超静定结构才有内力重分布现象,对静定结构是没有的,因为静定结构的内力与截面刚度无关,而且出现一个塑性铰就意味着结构的破坏。

塑性内力重分布的两个阶段

两端固定的单跨等截面梁,设破坏时的均布荷载为 q ,根据弹性理论,支座弯矩 $M_A = M_B = \frac{q l^2}{8}$,跨中弯矩 $M_C = \frac{q l^2}{8}$ 。现在来研究当支座和跨中截面都按平均值 $M = \frac{q l^2}{8}$ 选配钢筋的情况。

在荷载小于开裂荷载 q_k 时,结构可按弹性理论计算,支座弯矩和跨中弯矩为:

$$M_A = M_B = \frac{q l^2}{8} \quad M_C = \frac{q l^2}{8} \quad (1)$$

而 | $M_A = M_B = \frac{q l^2}{8}$, $M_C = \frac{q l^2}{8}$

当荷载达到 q_k 时,两端支座截面产生裂缝,导致支座截面附近区段内的刚度下降,而跨中截面尚未开裂,还保持原来的刚度。随着荷载的增加,支座截面的弯矩增长减缓而跨中弯

矩增长则加快。由于平衡条件成立,两者仍应保持 $M_1 = M_2$ 的关系。随后,跨中截面开裂出现刚度下降,如果支座和跨中截面都有足够的塑性变形能力,那么在支座区段的钢筋屈服时,就可以把支座截面看作是能够转动,且能承受弯矩 M_1 的塑性铰。这样,梁就成为两端铰支的静定梁,跨中弯矩按简支梁的规律增加,出现明显的内力重分布。最后,当跨中弯矩达到 $M_2 = M_1$,使梁成为几何可变体系时,梁便不能继续承担荷载。这时有:

$$M_1 = M_2 = \frac{1}{2} q l^2 \quad (1)$$

从上面的分析可知,超静定结构的内力重分布贯穿于裂缝产生到结构破坏的整个过程。这个过程又可分为开裂到出现第一个塑性铰以及第一个塑性铰到结构破坏两个阶段。第一阶段的内力重分布主要是各部分的刚度变化所引起的,第二阶段的内力重分布主要是塑性铰的转动所引起的。第二阶段的内力重分布比第一阶段更为明显。在连续板考虑内力重分布的内力计算中,对承载力计算是指第二阶段,对变形裂缝验算是指第一阶段。

塑性铰出现后,内力重分布的程度主要取决于塑性铰的转动能力。如果已出现的塑性铰都具有足够的转动能力,能保证最后一个使结构成为几何可变体系的塑性铰的形成,则称为完全的内力重分布。如果在塑性铰转动过程中出现混凝土被压碎,而这时结构尚未成为几何可变体系,则称为不完全的内力重分布。塑性铰的转动能力与配筋率的大小有关。如果配筋率过大,难以形成塑性铰或出现塑性铰的转动能力不足,难以保证结构实现完全的内力重分布。

内力重分布的应用

在混凝土超静定结构设计中,构件的截面设计按极限状态设计原则,而结构内力分析采用弹性理论,构件的刚度不因荷载大小和作用时间的长短而改变,内力与荷载之间呈线性关系。但是,混凝土超静定结构在承受荷载的过程中,由于混凝土的非弹性变形,裂缝的出现和开展,钢筋的滑移和屈服以及塑性铰的形成和转动等因素的影响,结构构件的刚度在各受力阶段不断变化,从而使结构的实际内力与变形明显的不同于按弹性理论的计算结果。所以在混凝土连续梁、板的设计中,考虑结构的内力重分布,建立弹塑性的内力计算方法,不仅可以使结构的内力分析与截面设计相协调,而且设计合理表现为:

(1)能够正确计算结构的承载力和验算使用阶段的变形与裂缝宽度。

(2)可以使结构在破坏时有较多的截面达到极限承载力,从而充分发挥结构的潜力,更有效的节约材料。

(3)利用结构的内力重分布现象,可以合理的调整钢筋布置,缓解支座钢筋拥挤现象,简化配筋构造,方便混凝土浇捣,从而提高施工效率和质量。

(4)根据结构的内力重分布特性,在一定条件下可以人为控制结构中的弯矩分布,从而使设计得以简化。

考虑内力重分布的计算方法是以形成塑性铰为前提的,因此下列情况不宜采用:

①在使用阶段不允许出现裂缝或对裂缝有较严格限制的结构,如水池、自防水屋面以及处于侵蚀性环境中的结构。

②直接承受动力和重复荷载的结构。

③要求有较高承载力储备的结构。

源钢筋混凝土受弯构件塑性铰的特性

(员)只能沿着弯矩作用方向绕不断上升的中轴做单向转动,而不像普通铰那样可沿任意方向转动。

(圆)只能在受拉区钢筋开始屈服到受压区混凝土压坏的荷载范围($\varphi_{原}$ 原 $\varphi_{原}$)内转动,而不像普通铰那样自始至终转动。

(猿)在转动的同时,能承担一定的弯矩,其值为 $\varphi_{原} \leq \varphi \leq \varphi_{原}$,而不能承担 φ 跃 $\varphi_{原}$ 的弯矩。

四、连续板、梁考虑内力重分布的计算

员弯矩调幅法的原则

所谓弯矩调幅法,就是对结构按弹性方法所求的弯矩值和剪力值进行适当的调整(降低),以考虑结构非弹性变形所引起的内力重分布。截面的弯矩调整幅度用弯矩调幅系数来表示,即:

$$\beta \text{ 越员原} \frac{\varphi_{原}}{\varphi_{原}} \quad (\text{员})$$

式中: $\varphi_{原}$ ——调整后的弯矩设计值;

$\varphi_{原}$ ——按弹性方法算得的弯矩设计值。

采用调幅法考虑结构内力重分布的设计方法已被多数国家的设计规范所采纳。我国颁布的《钢筋混凝土连续梁和框架考虑内力重分布设计规程》(悦悦悦悦悦)主要推荐弯矩调幅法来计算钢筋混凝土连续梁、板和框架的内力。

其主要原则如下:

①钢筋宜采用匀匀匀匀级和匀匀匀匀级热轧带肋钢筋,也可采用匀匀匀匀级和匀匀匀匀级热轧光面钢筋,混凝土强度等级宜在悦悦悦~悦悦悦范围内选用。

②截面的弯矩调幅系数 β 不宜超过园园园,不等跨连续梁、板不宜超过园园园。

③弯矩调幅后的截面相对受压区高度应满足 $\varphi_{原} \leq \xi \leq \varphi_{原}$ 的要求。

④不等跨连续梁、板各跨中截面的弯矩不宜调整。

⑤结构在正常使用阶段不应出现塑性铰,且变形和裂缝宽度应符合《混凝土结构设计规范》(员员员员员)的规定。

⑥在可能产生塑性铰的区段,考虑弯矩调幅后,连续梁下列区段内按《混凝土结构设计规范》算得的箍筋用量,一般应增大园园园,增大的范围为:对于集中荷载,取支座边至最近一个集中荷载之间的区段;对于均布荷载,取支座边至距边员员员区段(员为截面有效高度)。

⑦为了防止构件发生斜拉破坏,箍筋的配箍率应满足下式要求:

$$\rho_{原} \geq \frac{\varphi_{原}}{\varphi_{原}}$$

⑧连续梁、板弯矩经调整后,仍满足静力平衡条件。梁、板的任意一跨调整后的梁支座弯矩的平均值与跨中弯矩之和应大于该跨按简支梁计算的弯矩值,且不小于按弹性方法求得的考虑荷载最不利布置的跨中最大弯矩。

连续梁、板承载力按调幅法的计算

(1) 承受均布荷载的等跨连续梁

① 弯矩设计值

各跨中及支座截面的弯矩设计值可按下列公式计算

$$M = \alpha_m q l_0^2$$

式中 M ——弯矩设计值；

α_m ——连续梁、板考虑塑性内力重分布的弯矩系数，按表 6.5.2 采用；

q ——沿梁单位长度上的恒荷载设计值、活荷载设计值；

l_0 ——计算跨度，根据表 6.5.1 确定。

连续梁、板考虑塑性内力重分布的弯矩系数

表 6.5.2

端支座支承情况	截面位置				
	边支座	边跨跨中	第一内支座	中间跨	中间支座
搁置在墙上	0.125	0.167	0.167	0.167	0.167
与梁整体连接	0.125 0.167	0.167	0.167	0.167	0.167

注：表中弯矩系数适用于荷载比 $q_1/q_2 \leq 1.5$ 的等跨连续梁、板。

② 剪力设计值

在均布荷载作用下，等跨连续梁的剪力设计值可按以下公式计算：

$$V = \alpha_v q l_0$$

式中 V ——剪力设计值；

α_v ——考虑塑性内力重分布的剪力系数，按表 6.5.3 采用；

l_0 ——净跨度。

连续梁考虑塑性内力重分布的剪力系数

表 6.5.3

荷载情况	边支座情况	截面位置				
		边支座右侧	第一内支座左侧	第一右支座	中间支座	中间支座右侧
均布荷载	搁置在墙上	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	梁与梁或梁与柱整体连接	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
集中荷载	搁置在墙上	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	与梁整体连接	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

(2) 承受间距相同、大小相等集中荷载的等跨连续梁

① 弯矩设计值

等跨连续梁当承受间距相同、大小相等的集中荷载时，各跨跨中及支座截面的弯矩设计值可按下列公式计算：

$$M = \eta \alpha_m q l_0^2$$

式中 η ——集中荷载修正系数，依据一跨内力重分布的弯矩系数，按表 6.5.2 采用；

α_m ——一个集中恒荷载设计值；

l_0 ——一个集中恒荷载设计值；