

钢筋混凝土板

R·派克 W·L·根勃尔著

黄国桢 成源华 译

同济大学出版社

钢筋混凝土板

R·派克 W·L·根勃尔著

黄国桢 成源华 译

同济大学出版社

(沪)204号

内 容 提 要

本书详细介绍了现浇钢筋混凝土板的计算理论和美国 ACI 规范的不少背景材料,并阐述了许多西方国家的试验结果及其与理论成果的对比。内容翔实,注意实用,特别是随着近年来建筑平面轮廓的日趋多样化,在结构设计工作中常遇到异型板的配筋和截面设计问题,本书在这方面将给实际工作者们以有效的指导。

责任编辑 黄自良

封面设计 王肖生

钢筋混凝土板

R·派克 W·L·根勃尔著

黄国桢 成源华 译

同济大学出版社出版

(上海四平路1239号)

新华书店上海发行所发行

浙江上虞科技外文印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 26.75 字数 850 千字

1992年2月第一版 1992年2月第一次印刷

印数 1—5000 册 定价 13.50 元

ISBN 7-5608-0853-0/TU·107

原 序

本书以钢筋混凝土板在弹性阶段和在极限荷载时的基本性状为重点。为此,它着力于给读者以板性状的基本而详尽的知识。这对完整而深入地了解建筑规范中对板的各种要求和设计方法是必要的。

本书中有关钢筋混凝土板这一课题的内容及论述将努力使学生、教师和结构工程行业的实际工作人员感到有吸引力。

本书一开始是对板的分析和设计作总的讨论,接着在一定深度上探讨了用弹性理论确定弯矩和剪力分配的问题。然后阐述了美国混凝土学会《建筑规范》中的“直接设计法”和“等效框架法”。再后,详细论述了分析极限荷载用的极限方法以及用来设计板的一般下限理论、板带法和屈服线理论。还讨论了使用荷载作用时板的性状,重点是挠度和裂缝的控制。跟着是板的抗剪强度的核算。在书的后面部分概略介绍了预应力混凝土板,而以前各章则专门讨论钢筋混凝土板。最后,介绍了薄膜作用对板强度的影响。

美国混凝土学会的现行规范(ACI 318-77)是被广泛认可的一种钢筋混凝土规范,它被许多国家所引用,并对不少其它国家的规范有很大影响。为此,本书主要涉及的就是该规范的规定,虽然对别的建筑规范也有所讨论。但本书又不完全受规范的限制,重点是使人们理解为什么必须作出某些规定,而不是如何去实施这些规定。我们相信结构工程师完全有能力去合理评价各种不同的设计方法。

本书的基础是多年来有关板的理论和设计的教学实践、有关板的研究和设计的大量资料以及规范编写委员会的合作。

有关屈服线理论的各章以《钢筋混凝土结构的极限强度设计(第二册)》(坎特伯雷大学印刷的研究生班教材)为基础。本书还致力于补充以前出版的 R. Park 和 T. Paulay 所编的《钢筋混凝土结构》教科书(Wiley 出版社 1975),因为后者没有论及板。新西兰的作者和美国的作者之间的合作是不同寻常的,它植根于这些作者所服务的两个大学多年来对板所作大量研究互相取长补短的愿望。

本书有别于前此各有关板的教科书的方面是:它对现代可用以分析和设计钢筋混凝土板的大多数方法的背景作了充分的论述。以前的教科书,重点放在弹性理论、板带法或屈服线理论上,但没有结合抗剪强度、适用性和薄膜作用综合地论述所有各种方法。作者在本书中有意识地差不多全面地讨论了钢筋混凝土板,但对预应力混凝土板却只作了简单介绍,因为后者是个大题目,需有专著去论述。此外,本书主要探讨双向楼板体系。

我们希望本书能成为对改进大学或研究生班教学的教师有用的教科书,也希望它能成为从事实际工作的工程人员和从事研究工作的工程人员的有用参考书。

我们将欢迎读者的每个建设性建议和批评,并欢迎指出书中难免的错误。

我们从许多方面得到了很大帮助、建设性评论和鼓励。在此,我们应向新西兰的坎特伯雷大学和美国的伊利诺斯大学的同事们和两国的同行们致谢。在新西兰,特别要感谢 H.J. Hopkins 和 T. Paulay 两教授(他们提供了支持)、A.J. Carr 和 P.J. Moss 两博士(他们提出了评论),以及从事试验的毕业生和技术人员们,还有 Alice Watt 夫人(她为本书部分底稿打字)。在美国,特别要感谢伊利诺斯大学的 N.M. Newmark、C.P. Seiss 和 M.A. Sozen

诸教授,和卫理公会大学的 B. Mohraz 教授(原在伊利诺斯大学)(他们提供了鼓励和许多技术资料),还有 M.A. Speck 夫人(她为本书其余部分底稿打字)。还要对伊利诺斯大学的 E.P.B. Peck 教授(他对作者开始着手编写本书底稿的决定进行了鼓励)以及美国混凝土学会-美国土木工程师协会的 421 (钢筋混凝土板)委员会的许多成员(他们对本书后阶段的编写提供了支持)表示感谢。

我们还要感谢下列组织(他们同意复制版权属于他们的资料):美国混凝土学会,美国土木工程师协会, McGraw-Hill 图书公司, 伊利诺斯大学;联合王国的水泥和混凝土协会,建筑物研究院, Thames 出版社和 Hudson 出版社;澳大利亚的工程师协会;荷兰的 Heron 出版社;德国的 Springer-Verlag 出版社。

最后,本书的完成是与我们各自的妻子 Kathie 和 Judy 的耐心和理解分不开的。

派克(R. Park)

根勃尔(W. L. Gambe)

新西兰基督堂市
美国伊利诺斯州欧班纳城
1979 年 12 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 范围及概述	1
1.2 钢筋混凝土板的结构类型	1
1.3 楼板类型选择	5
1.4 板体系的分析和设计方法	6
1.4.1 引言	6
1.4.2 板体系的全性状	6
1.4.3 弹性理论分析	6
1.4.4 极限分析	7
1.4.5 ACI《建筑规范》法	8
1.4.6 设计步骤	9
第二章 弹性理论分析的基本原理	10
2.1 简介	10
2.2 古典平板理论	10
2.2.1 拉格朗日(Lagrange)方程	10
2.2.2 平衡条件	10
2.2.3 弯矩-变位关系	12
2.2.4 剪切-变位关系	16
2.2.5 边界条件	16
2.2.6 反力	17
2.2.7 泊松比	18
2.2.8 作用在与坐标轴有一交角处的弯矩	19
2.2.9 求解方法	20
2.3 弹性模型	22
2.4 有限差分法	22
2.5 有限元法	24
2.6 近似方法	26
2.7 弹性理论分析的例题	27
第三章 弹性理论分析的成果	32
3.1 引言	32
3.2 在板的内板格中的弯矩	37
3.2.1 梁相对刚度的影响	37
3.2.2 柱或柱帽尺寸大小的影响	44
3.2.3 荷载布置形式	45
3.3 板的边板格内的弯矩	56
3.3.1 概述	56
3.3.2 平行于结构边缘的跨内的弯矩	58
3.3.3 垂直于结构边缘的跨内的弯矩	61
3.4 角部板格内的弯矩	67

3.5 特殊的荷载条件和几何条件	70
3.5.1 概述	70
3.5.2 集中荷载和线荷载对弯矩的影响	70
3.5.3 在一个跨度上线性变化的荷载的影响	75
3.5.4 板中洞口的影响	77
第四章 1971 年和 1977 年 ACI《规范》关于钢筋混凝土板设计规定的背景材料	81
4.1 简介	81
4.2 直接设计法:静力弯矩、负和正的板弯矩以及柱的弯矩和刚度的确定	83
4.2.1 静力弯矩	83
4.2.2 正、负弯矩的分布	88
4.2.3 关于柱弯矩和刚度的要求	91
4.3 等效框架法:板的正负弯矩及柱弯矩的确定	93
4.4 弯矩在截面上的分布	103
第五章 一般下限极限分析和设计	112
5.1 简介	112
5.2 一般下限极限分析的控制方程	113
5.2.1 平衡方程	113
5.2.2 对不同坐标系的弯矩变换	115
5.2.3 边界条件	115
5.2.4 屈服准则	115
5.3 用一般下限法分析板	119
5.4 按预定的弯矩场设计板的配筋	123
5.4.1 一般方法	123
5.4.2 布置的钢筋互成直角	124
5.5 关于一般下限极限设计的评论	127
第六章 板带法设计及其它平衡法设计	128
6.1 简介	128
6.2 简易板带法	129
6.2.1 板带的作用力	129
6.2.2 从板角开始的间断线	132
6.2.3 从板边开始的间断线	138
6.2.4 加强带	143
6.2.5 斜板和三角形板	144
6.2.6 与屈服线理论的极限荷载间的比较	145
6.2.7 设计应用	145
6.3 改进板带法	158
6.3.1 简介	158
6.3.2 板单元的类型	158
6.3.3 设计应用	162
6.4 分块平衡法	165
6.4.1 简介	165
6.4.2 矩形柱网上的无梁平板	165
6.4.3 柱的布置不规则的无梁平板	168

6.5 与试验结果的比较	170
第七章 屈服线理论的基本原理	174
7.1 简介	174
7.2 板的钢筋、截面性能以及极限荷载时的条件	174
7.2.1 板的钢筋	174
7.2.2 板截面的延性	174
7.2.3 极限荷载时的条件	174
7.2.4 作为转动轴的屈服线	175
7.2.5 屈服线上的极限抵抗矩	176
7.2.6 极限荷载的确定	177
7.3 虚功原理分析法	178
7.3.1 虚功方程	178
7.3.2 内力做功的各分量	178
7.3.3 最小荷载原则	179
7.4 平衡方程分析法	180
7.4.1 平衡方程	184
7.4.2 沿屈服线的静力等效剪力	184
7.4.3 结点力的大小	184
7.4.4 平衡方程求解方法	184
7.5 集中荷载	189
7.5.1 屈服线模式的类型	193
7.5.2 圆扇形	193
7.6 关于组合荷载条件下弯矩强度的叠加	194
7.7 角部效应	198
7.8 近似法则	200
7.9 均匀受荷矩形板的一般情况	203
7.9.1 板的极限抵抗弯矩	207
7.9.2 所有边都支承的、均匀受荷正交各向异性矩形板	207
7.9.3 三边支承、一边自由的均匀受荷正交各向异性矩形板	208
7.9.4 两相邻边有支承而其它边自由的、均匀受荷正交各向异性矩形板	209
7.10 组合梁-板的破坏机构	211
7.11 无梁楼盖	212
7.11.1 折叠的屈服线模式	215
7.11.2 柱附近的局部屈服线模式	216
7.11.3 不平衡弯矩在板-柱结点的传递	217
7.11.4 有外梁的无梁楼盖	220
7.11.5 板-柱结点的抗剪强度	222
7.12 有洞口的均匀受荷矩形板	223
7.13 均匀受荷的圆形板和环形板	230
7.13.1 支承在几个柱上并承受匀布荷载的圆形板	230
7.13.2 环形板	232
7.14 斜板	233
7.15 均匀受荷矩形板的近似屈服线模式	235

7.15.1	近似屈服线模式的用途	235
7.15.2	所有边都有支承的均匀受荷矩形板	235
7.13.3	三条边支承、一条边自由的均匀受荷矩形板	237
7.15.4	两相邻边支承、其余两边自由的均匀受荷矩形板	239
7.16	近似屈服线模式的试算法	240
7.17	与试验结果的比较	246
7.17.1	德国钢筋混凝土研究会的试验	247
7.17.2	IRABA 的试验	248
7.17.3	柏林技术大学的试验	249
7.17.4	TNO 建筑材料和结构学会的试验	250
7.17.5	曼彻斯特大学的试验	250
7.17.6	坎特伯雷大学的试验	254
7.17.7	伊利诺斯大学的试验	257
7.17.8	波特兰水泥学会的试验	258
第八章	应用屈服线理论的设计	260
8.1	简介	260
8.2	强度及适用性规定	260
8.2.1	设计荷载和抵抗弯矩	260
8.2.2	配筋率	261
8.2.3	钢筋布置	262
8.2.4	适用性验算	262
8.2.5	设计的其它方面	263
8.3	荷载的叠加	263
8.4	均匀受荷双向板的设计	265
8.4.1	在均匀受荷矩形板内板顶钢筋的延伸长度	265
8.4.2	钢筋用量为最少的设计	271
8.4.3	设计例题	275
8.5	无梁板的设计	288
8.6	均匀受荷双向板的支承梁设计	291
8.6.1	根据组合梁-板破坏机构导得的方法	291
8.6.2	根据传递到梁上的荷载导得的方法	293
8.6.3	梁和柱的其它布置	296
8.6.4	关于梁设计方法的小结	299
第九章	板的适用性	300
9.1	简介	300
9.2	挠度	300
9.2.1	挠度的一般说明	300
9.2.2	挠度计算	303
9.2.3	1977 年 ACI《规范》关于挠度控制的规定	305
9.3	裂缝	307
9.3.1	裂缝控制的必要性	307
9.3.2	开裂的原因	309
9.3.3	单向板中弯曲裂缝宽度的计算	309

9.3.4 双向板的弯曲裂缝宽度计算	314
9.3.5 《规范》有关裂缝控制的规定	316
第十章 板的抗剪强度	319
10.1 简介	319
10.2 板传递均匀剪切时的抗剪强度	321
10.2.1 无抗剪钢筋的板的剪切破坏机理	321
10.2.2 没有抗剪钢筋时抗剪强度的 ACI《规范》方法	32
10.2.3 有抗剪钢筋时抗剪强度的 ACI《规范》方法	32
10.2.4 板中开洞、自由边及设备井的影响	32
10.2.5 承台的特殊问题	32
10.3 传递剪力和不平衡弯矩时,板柱结点的抗剪强度	331
10.3.1 传递剪力和不平衡弯矩的板-柱结点的性状	331
10.3.2 分析和设计的方法	332
10.3.3 ACI《规范》的方法	332
10.3.4 ASCE-ACI 第 426 委员会提出的方法	338
10.3.5 内结点的另一种拟梁法	343
10.3.6 板-柱结点的延性	349
10.4 板-墙结点	351
第十一章 预应力混凝土板	352
11.1 简介	352
11.2 设计基本原理	352
11.2.1 一般方法	352
11.2.2 使用荷载的应力	352
11.2.3 抗弯强度	356
11.2.4 抗剪强度	358
11.2.5 结论意见	359
第十二章 板内的薄膜作用力	360
12.1 简介	360
12.2 均匀受荷的、受侧向约束的钢筋混凝土板	360
12.2.1 一般性状及以往研究工作回顾	360
12.2.2 在受压薄膜阶段的性状	362
12.2.3 在受拉薄膜阶段的性状	387
12.3 侧向受约束的钢筋混凝土板上的集中荷载	391
12.4 板边可自由侧移的板	391
参考文献	393

第一章 绪 论

1.1 范围及概述

钢筋混凝土板是最普通的结构构件,但尽管设计并建造了大量此种板,人们对它的弹性和塑性性能却常不能正确理解,或未予恰当考虑。其原因至少部分地是由于弹性平板的数学方程太复杂,特别是当使板的支承条件逼近多板格建筑物中楼板的实际支承条件时更是如此。

由于人们对板和平板的理论分析的了解和实践比其它构件(如梁)少得多,所以一般的建筑规范对板的设计都是既提出了设计准则,还提出了分析方法,而对大多数其它构件却仅提出了设计准则。例如《美国混凝土学会(以下简为 ACI)1977 年建筑规范》^{1.1} 的第 13 章,主要就是说明板结构内弯矩的推求。而求得了弯矩、剪力和扭矩后,即可用该规范其它章节中规定的设计准则确定相应的截面。

虽然 ACI《规范》在板设计方面引用的方法基本上是弹性弯矩分配法,但人们也可用塑性分析(极限分析)的方法设计板。本书意图在于使人们了解这两种方法的设计和分析,以及它们的基本知识。

为此,本书可视为由几个独立部分组成(虽然它们又互有联系)。本书第二及第三章叙述板和平板弹性分析的基本资料,以及用这些分析求得的弯矩分布。第四章叙述这些资料间的相互关系以及 ACI 1977 年《规范》的一些条款。

第五至第八章主要研究塑性设计方法。第五及第六章讨论了下限法。第五章内还包含了一个抵抗一跨弯矩场的配筋方案。第七及第八章叙述了供设计和分析用的屈服线法——一种上限法。

不论用何种方法,所设计出的板在工作荷载条件下必须是适用的,其挠度和裂缝也应保持在可接受的范围之内。这些将在第九章内叙述。板的设计方法主要涉及到弯曲,但剪力也可能是一种限制因素。无梁楼板内剪切的特殊问题——尤其是当剪切与由板传递到柱的不平衡弯矩共同作用时——在第十章讨论。

预应力混凝土在某些地区和在某些使用条件下是十分重要的,但它的范围太广泛了,既可用很少的话语来说明它,也可用专门著作来说明它。本书采用了前一种办法。在第十一章中对之作了简要的叙述,并提出了指导性的建议和一些文献供进一步研究之用。

一些试验证明,板的薄膜作用可大大提高板的极限荷载,这些将在第十二章讨论。

引用哈迪·克劳斯(Hardy Cross)1929 年的下列论述^{1.2},可使人民对板的整个分析和设计问题有一清晰概念,“也许这里叙述的基本原理根本不会对所提及的板有帮助,因为它只稍有助于连续板的研究。但只要应用得慎重,它们还是有用的。

“一般的工程师考虑板时所用的手段是静力学要求的总弯矩的限制、对称和不对称原则、以及用以判断某一截面上弯矩变化的关于变形(了的)板的构思。最后一种手段虽不精确,却很有效。事实上,对受到其它板的连续性或不连续性影响的变形板,将固端弯矩进行分配的概念在修改上述构思时是有用的。令人宽慰的是,大量证据说明,这些构思不需很精确,而且只要满足全部静力学的限制条件,就并不需要使假定的弯矩分布与数学理论结果精确相符”。

上述引言,特别是最后一句话所表达的观念,设计人员和规范编写人员应牢记不忘。

1.2 钢筋混凝土板的结构类型

钢筋混凝土板自问世以来,曾出现了许多形式。其中有些显系直接模仿早期的全木楼面或支承于钢梁、铁梁上的木楼面,有些则是由不知其名的先人们发明的,它们适应了钢筋和混凝土的材料特性。

经济性、施工方法的发展、对特定板提出的特定适用性要求,以及板的分析方法的进步,都对流行的板形

起过并正在起着影响。

板可分为两个总类,即无梁板和支承在设于每块板各边处梁上的板。还有一些派生的异形板,和一些在边缘处或洞口周围处(如电梯和楼梯处)设有梁的无梁板。

无梁板可用平板和无梁楼板说明,平板在概念上及工程上都很简单的结构,它直接支承于柱,厚度均匀,如图 1.1。它是由早期的无梁楼板发展而来的。无梁楼板的特点是支承板的柱的顶部有柱帽、柱顶托板或在柱四周将板加厚,其基本形式如图 1.2。最常见的辅助形式是有柱顶托板的平板和没有柱顶托板的无梁楼板。

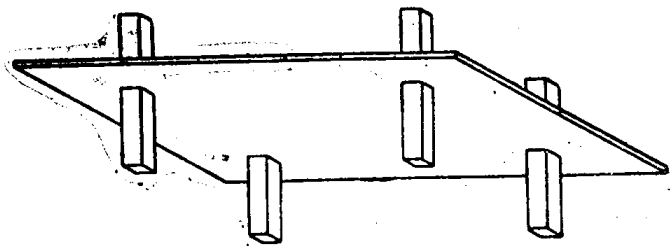


图 1.1 平板

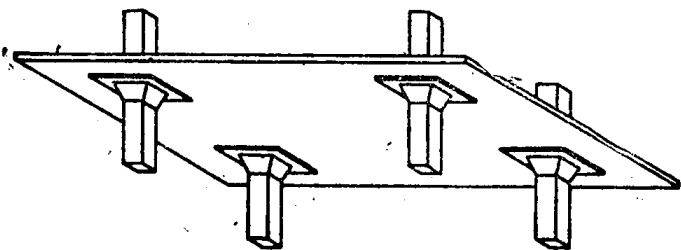


图 1.2 无梁楼板

选用平板或无梁楼板的主要考虑因素是设计荷载和跨度。平板的强度常受柱四周截面上抗冲切强度的限制,故常被用于住宅和办公建筑(其荷载和跨度较小)。无梁楼板的柱帽和柱顶托板提供了大荷载和大跨度所需的抗剪强度,故常被用于荷载大的工业建筑和需大跨度的场合。

每块板格的每个边都支承在梁上的板常称为双向板。典型的双向板示于图 1.3。双向板体系由主、次梁(图1.4)发展而来(将主、次梁体系中非柱线上的梁除去,便成双向板)。如将主、次梁体系中梁的间距减

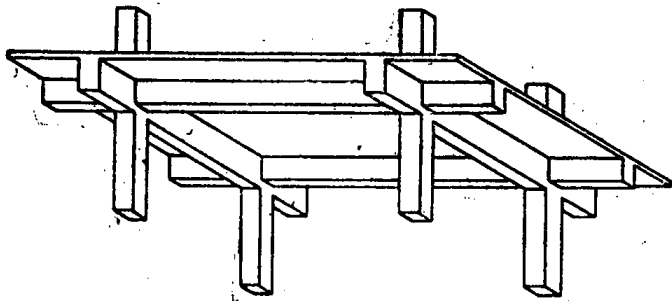


图 1.3 双向板

少到 2 至 3 ft (0.6 至 0.9 米),便成了单向小梁楼面体系。早期的梁板结构有一问题,即人们假定它是单向板,且在平行次梁的方向中不产生弯曲。但是被主、次梁分割而成的板,其端部是有支承的,故在端部附近将产生平行次梁方向的弯矩,故与主梁连接处常有负弯矩裂缝。由于当时人们对此没有预料到,故此处未配

钢筋,因而在1930年或更早以前建造的一些房屋中,可发现在主梁处的板顶具有未受限制的很大裂缝(图1.4)。

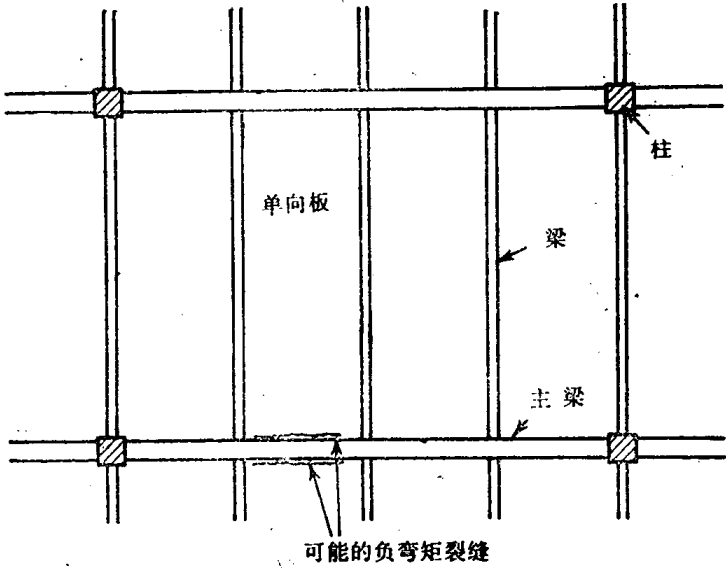


图 1.4 主次梁楼面体系平面图

井式板(“华夫板”)是实心板的一种变体。可将它想象为一组横向小梁,其间距远小于跨度,它们支承着薄的顶板。板内(小梁之间)的槽(一般用可拆卸或不予回收的模板浇制)减小了板重,并可使板具有较大的有效高度而恒载却不会相应地增大。同时,当槽深较大时,板还可具有较大刚度。井式板常用于跨度大于10米时。

井式板既可按无梁楼板设计,也可按双向板设计,这取决于在它的什么部位不设槽以获得较大的实心面积。图 1.5 示两种可能的布置。在无梁楼板布置中,柱附近不设槽而得到的实心面积相当于柱顶托板或柱

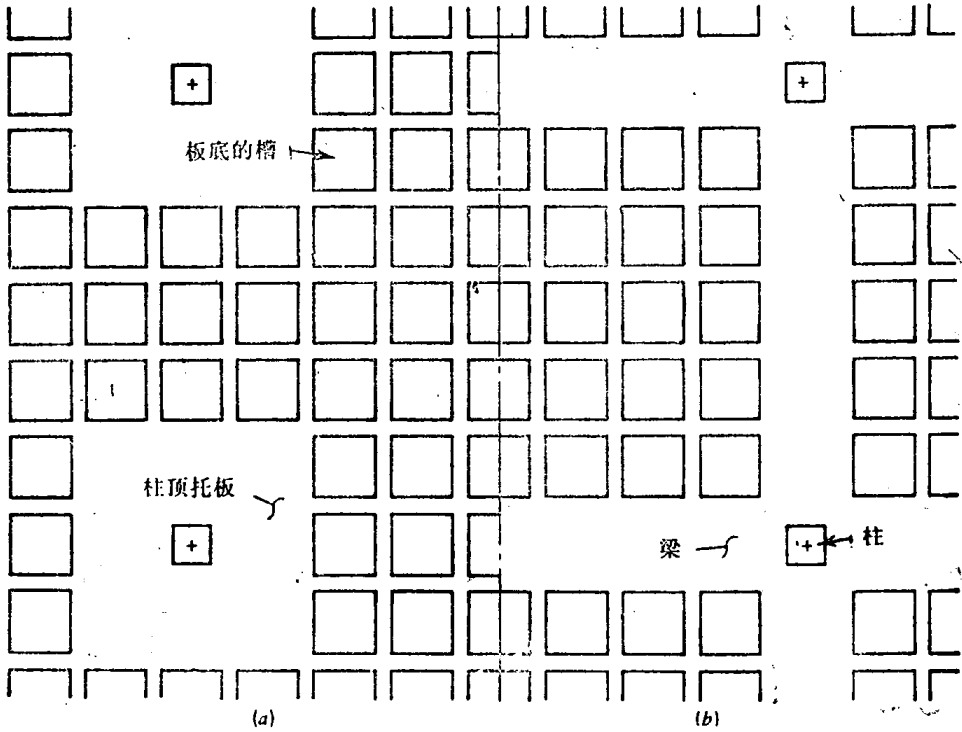


图 1.5 井式板的布置

(a) 井式板作无梁板; (b) 井式板作双向板;

面积相当于柱顶托板或柱帽,因为该实心面积提供了传递剪力的途径,以及柱四周应力很大的负弯矩区域中的额外受压面积。而在双向板布置中,沿柱线不设槽而得到的实心面积相当于梁,因为即使该实心面积不突出于板底之下,它也可提供很大的抗弯刚度。

槽四周的小梁按梁设计,它受到分布在等于小梁间距的板宽上的力的作用。如需要,也不难配置抗剪钢筋。每一跨内设置的小梁越密,井式板的性状就越接近于实心板。因此,如要使它按板而不是按一组交梁设计,则看来小梁至少要有6至8根。

井式板的进一步演变就是空心板。这种板的孔由预埋的陶质瓦筒、预制混凝土盒、或在模板上填充其它材料而形成。在这些填充物之间放置钢筋,再用现浇混凝土将填充物覆盖。板的下表面可以做成平的或有凹槽的,视所用填充物而定,在有些情况下,填充物可填满板的全厚。在双向结构形式中,沿两条柱线不设填充物,同时,梁截面也可扩大使梁下缘突出于板底。

苏申(Sozen)和赛斯(Siess)^{1.3}曾对这两种板型的历史发展过程以及美国建筑规范的规定作了综合回顾,现将其结论性意见,简略转述如下。

1906年,在明尼苏达州的明尼埃波利斯(Minneapolis)建成了由特纳(C. A. P. Turner)设计的第一个无梁楼板。由于它是一种全新的结构形式,又没有好的分析方法,故他是冒着风险建成的,而且在荷载试验合格后业主才肯验收这个工程。同时,此后两年内建成的其它许多同类结构,也都被要求做验收试验。

1906年后的七年内,美国共建造了一千多个无梁楼板建筑物。但当时尚无分析无梁楼板结构的公认方法,对板的配筋也无一致意见。1910年的一项研究^{1.4,1.5}对具有相同恒、活载和跨度的许多板格设计的用钢量作了比较,结果发现最小用钢量与最大用钢量之比竟为1:4。

如泰勒(Taylor)等所述^{1.6},早期无梁楼板的配筋方案有多种,包括像现今所用的双向配筋(平行于柱线)、三向配筋、四向配筋(在上述双向配筋基础上增加两个对角线方向的配筋);还有斯莫尔斯基(Smulski)体系在柱附近环向和径向配筋,再沿柱线和板的对角线配以少量附加筋。由现在的观点看,在所有这些体系中,正弯矩钢筋都在距板格边界较远处被截断了。

1914年,尼考尔斯(Nichols)发表了应当据以设计无梁楼板的总弯矩的正确解法^{1.7}。它使一直持续至今的争论(现已又趋缓和)激烈起来。他的分析仅提供了总弯矩,而按今天的术语,它应被认为是一种极限分析方法。但直到1921年韦斯特迦特(Westergaard)和斯赖特(Slater)的经典论文^{1.8}发表之前,上述总弯矩在正及负弯矩截面上及截面间的分布仍未解决。

尼氏论文并未被广泛接受,因按它的方法算出的承载能力比许多荷载试验结果似都要小。而实际上,这些荷载试验的结果并未正确地反映板的实有承载能力,这是由于下列原因(当时人们没有认识到):(一)量测到钢筋应变常很小,而混凝土拉应力在减少钢筋方面的影响尚未为人们所认识,于是当时人们以为板只承担着很小的弯矩而具有很大的潜力,其实混凝土的拉应力在使用荷载下对减小钢筋应力起很重要的作用(低配筋率时更甚,而多数板结构的配筋率较低);(二)大多数荷载试验是在有许多板格的房屋中的一个板格上进行的,此时,相邻板格对该板格承载能力的提高有很大帮助,因而单一板格布载时,其单位面积的破坏荷载要比所有板格都布载时的大^{1.9}。

无梁平板直接由无梁楼板简化演变而来。虽然泰勒早在1925年或更早就已提出过没有柱帽的无梁楼板^{1.10},但这种结构形式却大约在第二次大战后随着高层公寓的建设才在美国发展起来。

主次梁结构向双向板的演变过程没有文献记载,但1911年建于圣路易斯城并经荷载试验的单板格试验结构当是早期的双向板^{1.11}。此后十年间,还对其它一些双向板结构^{1.11,1.12}和实验室试件^{1.13}进行了试验。1926年,韦斯特迦特和斯赖特提出了根据平板理论解出的弯矩分布的报告^{1.8},同年,韦氏还提出了双向板设计方法^{1.14}。基于这些建议以及1936年迪斯代西奥(Di Stasio)和冯布伦(Van Buran)所作的研究^{1.15},产生了ACI规范的一些要求。

与无梁楼板不同,双向板只在产生了合适的分析方法之后才成为有生命力的结构体系。但它还是受到分析方法中所有假设的制约。双向板假定梁无挠度,然后再按作用在刚性支座上的板的反力来设计梁。由此求得的反力值及其分布,再加上由于采用工作应力设计方法而引起的一些限制条件,常使设计出的梁不是

梁高和刚度过大,就是受压区同受拉区一样配置过多的钢筋。在推行 1971 年 ACI 规范^{1.1}之前,对支承在浅梁上的板,尚无合理的设计方法。

在承重墙房屋中,板直接支承在墙上。此时,墙被视为无挠曲的刚性梁,它可承受或不承受板传来的弯矩,这取决于墙和墙板联结的构造。现代许多预制建筑体系都是承重墙结构,其中楼板的多数边缘支承在墙上。

预应力无梁平板是一种现浇结构,其中多数钢筋为后张钢筋束。这些钢筋束放在双向都与柱线平行的钢制格栅中。这种结构的主要优点是裂缝和挠度受到控制。预应力产生的压应力直接抵消(或大部分抵消)了恒载和活载产生的拉应力,结果,板在使用荷载作用下几乎不开裂。由于延缓了开裂,全截面都是有效截面,于是在使用荷载作用下的挠度将显著地小于厚度和跨度与之相等的钢筋混凝土平板。不开裂还有利于抗渗。此外,采用悬链形后张钢筋束(即钢筋束在板跨中部处位于板的下缘,而在柱线及其附近处位于板的上缘)会在跨度的大部分范围内产生向上的分布荷载,可大大减少挠度。选择得合适的预应力筋的截面积及其预应力可使楼板的长期挠度增长极小。板内的预压应力还可增大板的抗剪强度。在预应力楼板中,除上述钢筋束外,也常采用一些非预应力钢筋。至少在柱上要设置一些穿过柱的非预应力筋。别的地方也常设置。预应力钢筋束可以是粘结的或无粘结的。

单向楼板(包括并排布置且在主次梁间架设的预制预应力混凝土构件)在楼面中也是常用的。预制构件为 T 形、双 T 形截面或空心板,其上常加浇现浇层以使楼面平整,并增大刚度和强度。这种单向楼面可用普通的梁的理论予以分析设计。

1.3 楼板类型选择

楼板类型选择要考虑许多因素。降低造价显系重要因素,但它决定于许多具体条件,且随地区而变。设计荷载、跨度、适用性和承载能力要求等也都是重要的因素。

对无梁板而言,选用无梁楼板还是无梁平板,常取决于荷载和跨度。无梁平板的强度常受柱附近的抗剪强度控制,当使用活载约大于 100 psf(4.8 kN/m²)、跨度大于 20 至 24 ft(7 至 8 m)时,以选用无梁楼板为好。如建筑上或其它原因需取消柱帽或柱顶托板,可用钢剪力销或其它形式的抗剪钢筋加强其抗剪强度,但造价将提高。

钢筋混凝土无梁板中,常难以控制其挠度使之小于使用要求。大的活载和小的允许挠度将迫使人们采用大型柱帽。对无梁平板,柱四周的负弯矩裂缝有时是个麻烦问题,而柱帽也可控制这种裂缝。

控制挠度和剪应力也可不用设置柱帽而加设梁,此时楼板便成了支承于主次梁上的双向板。当挠度允许值被限制得很小时,采用双向板尤为适宜。因为即使采用中等刚度的梁,这种板的挠度也将比采用最大的柱帽时小。此外,梁还易于配置抗剪钢筋。

通常,双向板和无梁板的选择是个复杂问题。就材料节约(特别是节约钢材)而言,双向板较好,因为梁的有效高度比板大。但就劳动力节约而言,却是无梁板较省,因为它的模板较简单,钢筋布置也不复杂。而在无梁板中,无梁楼板要比无梁平板略多用些劳动力,但如柱帽的模板采用工厂预制件,则无梁楼板的造价也不致增加太多。真实的造价参数是劳动力费用与材料费用之比。在劳力贵的地方,除了某种结构上的原因外,很少建造双向板;而在钢材贵的地方却建造得很多。只是在钢材和水泥都比劳力贵的地方,才建造空心砖楼板。

选择板型时也不应忽视设计、施工人员和使用者的习惯。人们往往愿意采用过去已经成功过的决策,而不愿采用不熟悉的且影响造价的决策。但是,不应使旧的习惯势力支配合理的工程决策。

如果就某一特定结构的其它方面而言无梁平板或无梁楼板是适用的话,那么它还有一个好处,就是可将层高减至最小。当建筑物总高及楼层净高不变时,双向板结构如建十层,则无梁板结构可建造十一层左右。这样,如楼层数不变,可导致其它方面的节约,电梯井和管道等减短了;外墙面积减少,因而风载也小了;建筑物轻了;基础和其它构件的造价也相应小了。如果天棚面层能直接做在板的下表面,还可节约其它一些费

用。

在必须用框架而不是剪力墙或其它侧向支撑去抵抗大的水平荷载的结构中,采用无梁板是不利的。柱与板间弯矩的传递产生很大的局部弯矩、剪力和扭矩,这使无梁板的配筋十分困难。在这种情况下,由于在梁中对这些力配筋较为容易,因此双向板较适用。此外,由于梁的存在以及梁柱结点的效果较好,故双向板可提供较大的侧向刚度。

也可选择预制单向板体系(已在前面介绍过)。

1.4 板体系的分析和设计方法

1.4.1 引言

钢筋混凝土板体系的分析和设计方法可有多种,适用的是弹性理论、极限分析理论以及像 ACI《规范》^{1.1}中修正的弹性理论和极限分析理论。这些方法可用以分析给定的板体系以确定板和支承体系内的应力或其承载能力。此外,还可用以确定弯矩和剪力的分布以供配筋和设计混凝土截面之用。

在后面几节中,将简述板体系从零到极限荷载的全性状,来说明各加载阶段的性状,然后简要地讨论弹性理论、极限分析理论和 ACI《规范》方法,以便向读者介绍各种可能的分析和设计方法。

1.4.2 板体系的全性状

具有一定尺寸、含钢量和材料特性的板体系,在由零到极限荷载的任何加载阶段,只要体系内各构件弯矩-变形关系以及该构件所达到的强度条件下弯矩、扭矩和剪力的屈服标准已经确定,则其弯矩、扭矩、剪力和变形即可由静力平衡条件和几何相容条件解析地求出。在这样的板体系的全性状分析中,困难在于高应力时各构件的弯矩与变形不成线性关系。为此,常需采用同逐级加载相适应的渐进分析过程。下面便是这种分析过程的一法。

加荷较小时,板构件尚未开裂,其力和变形可按弹性理论用构件未裂时的抗弯刚度求得。在每一加荷等级时都要对板构件作出检查,以查明混凝土是否开裂。当发现已达到开裂弯矩时,应按开裂后的截面值重算抗弯刚度,板的力和变形也应予重算。在同一加荷等级时,这种过程需重复进行直到所有抗弯刚度都正确为止。在增加到较高的荷载的情况下,当一个或几个构件应力开始进入非弹性范围时,将它们的抗弯刚度减小到与该构件弯矩-变形曲线上某一特定点相应。这也要求在该荷载等级时重复计算,直到各构件的抗弯刚度正确为止。最后,随着荷载的进一步增加,一个或多个构件达到其承载能力,而如构件具有足够延性,则当进一步加荷时,整个板体系便显示出塑性状态。当不增加荷载而变形继续发生以致不能进一步加荷时,便达到了极限荷载。

显然,确定板体系在所有加荷等级时全性状而作的全面分析,是冗长的,且只有借助储存量大的计算机才能成功。在这种通用的计算机程序中,输入数据应包括板体系的几何形状、截面尺寸、含钢量、材料特性及荷载类型。而输出数据则是到极限荷载为止的所有各加荷等级时的弯矩、扭矩、剪力的分布以及挠度。对鉴定或检验板体系所有全部加荷范围的结构性能(包括使用荷载和极限荷载下的性状)而言,这种程序是个有力的分析工具。

对板体系进行全分析的计算机程序在世界上许多国家都尚在发展中,且现有的多数程序,例如拜尔(Bell)和爱尔姆斯(Elms)^{1.17}、乔弗莱特(Jofriet)和麦克奈斯(McNeice)^{1.18}以及享特(Hand)^{1.19}等人提出的程序,都只针对具有理想边界条件的特殊的板体系。目前仍无适用于板体系在全部加荷范围上的通用程序。

目前还只有用于分析和设计板在弹性阶段内(按弹性理论)和在极限荷载下(按极限分析)的全部计算过程。规范中的设计方法通常是基于按某种弯矩重分布加以修改过的弹性理论弯矩而提出的。试验已证明,按此设计的板,在使用荷载时,构件可能无过大的裂缝和变形。也有一些规范推荐采用基本未加修正的弹性理论弯矩以及由极限分析法求得的弯矩的其它设计方法。

1.4.3 弹性理论分析