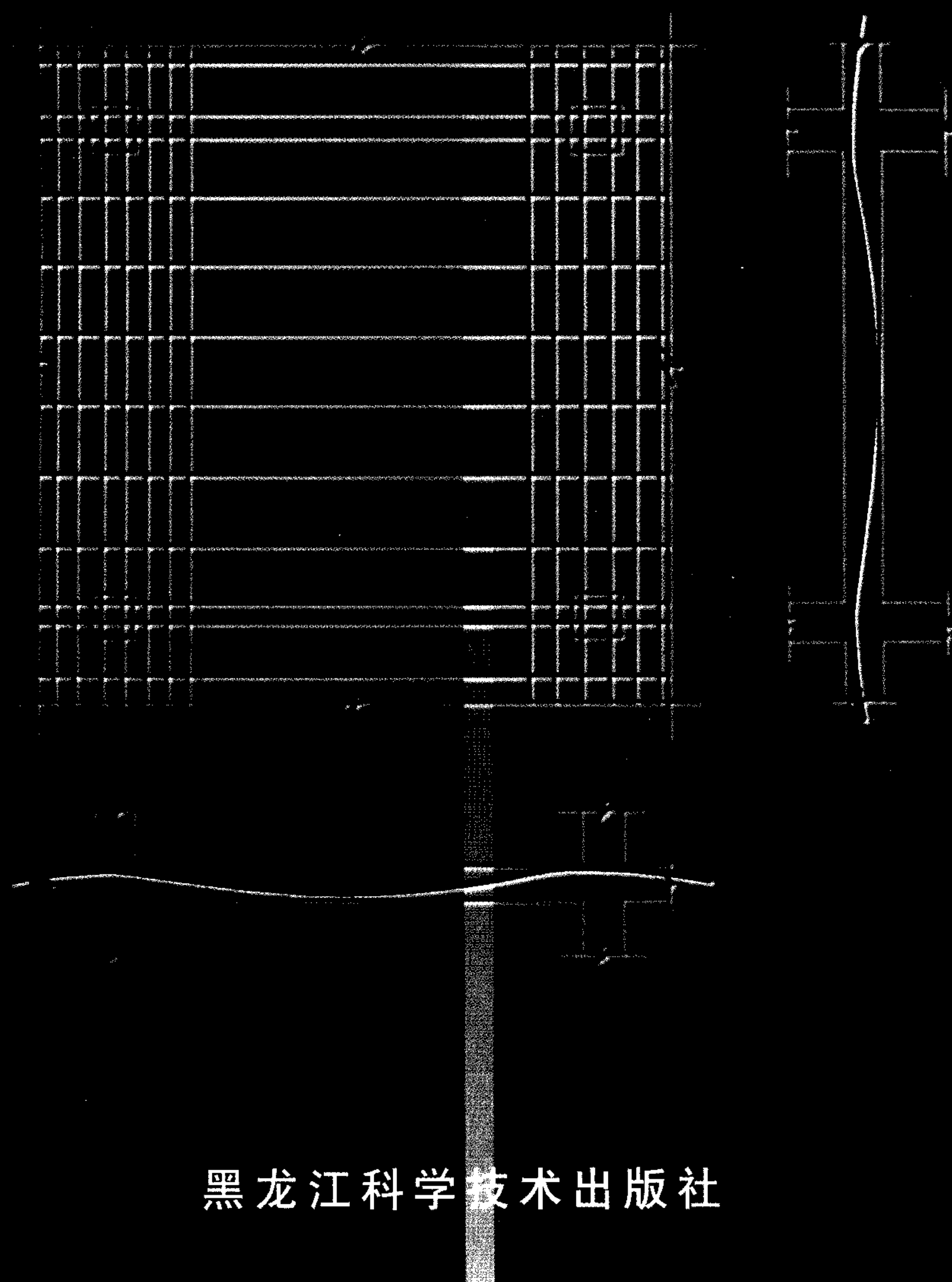


后张预应力混凝土 平板·柱结构设计与工程实例

郑文忠 王英 编著 吕志涛 主审



黑龙江科学技术出版社

后张预应力混凝土平板-柱结构 设计与工程实例

郑文忠 编著
王 英
吕志涛 审定



黑龙江科学技术出版社
中国·哈尔滨

责任编辑 徐晓飞

封面设计 龙 岩

后张预应力混凝土平板-柱结构设计与工程实例

HOUZHANG YUYINGLI HUNNINGTU PINGBANZHU JIEGOU SHEJI YU GONGCHENG SHILI

郑文忠 王 英 编著

出 版 黑龙江科学技术出版社

(150001 哈尔滨市南岗区建设街 41 号)

电话 (0451)3642106 电传 3642143(发行部)

印 刷 哈尔滨市龙江印刷厂

发 行 全国新华书店

开 本 787×1092 1/16

印 张 10.5

插 页 1

字 数 210 000

版 次 1999 年 5 月第 1 版·1999 年 5 月第 1 次印刷

印 数 1—2 000

书 号 ISBN 7-5388-3494-X/TU·274

定 价 19.00 元

前 言

20 世纪 80 年代以来,由于现代工业、交通、能源、商业和公共事业等发展的需要,我国预应力技术已从单个构件发展到预应力结构体系的新阶段。进入 90 年代以后,随着我国预应力钢材(特别是高强钢丝及钢绞线)的发展、张锚体系的完善、混凝土工艺的改进,又进一步加速了预应力结构体系的应用与普及。我国许多地方都建造了大批采用预应力结构和技术的大型工程或现代建筑,取得了非常显著的社会效益和经济效益。

然而,广大工程技术人员在推广预应力结构和技术的过程中也遇到了十分突出的问题,这就是目前可供学习和参考的预应力方面的著作不多,特别是专门论述预应力结构体系的著作很少,具有一定理论深度并具有较强的可操作性的预应力结构设计方面的专著则更少,这与预应力结构与技术迅速普及的发展态势形成了强烈的反差。

由于后张预应力混凝土平板-柱结构具有一系列突出的优点和特点,已成为土木工程界公认的一种具有广泛应用前景的结构体系,因而近几年来我们投入了较多的时间和精力,对这种结构体系开展了较为系统的研究工作。我们通过研究,澄清了人们对竖向荷载下内力计算机理的模糊认识,建立了在水平荷载下合理的计算模式和方法,探讨了该结构的抗震性能及构造措施,提出了实用设计方法和该结构设计的快速估算方法,编制了相关的设计标准,设计并建造了一大批有影响的试点工程,基本上形成了一整套有关后张预应力混凝土平板-柱结构的计算理论和设计方法,在此基础上经整理编辑形成了本书。本书部分内容曾在哈尔滨、长春、大庆、延吉、天津、山东、陕西等多个地区交流,我们的内部资料《后张预应力混凝土平板-柱结构计算理论与工程实践》也受到了工程界的普遍欢迎。本书的出版若能给读者以启发与帮助,则是作者的最大心愿。

在本书出版之际,作者首先感谢他的博士导师——中国工程院院士、东南大学土木工程学院吕志涛教授,是他精心指导作者完成了“后张预应力混凝土平板-柱结构计算理论及设计方法的研究”的学位论文;特别感谢黑河市大黑河岛国际商贸城等 20 多个工程建设单位,是他们给作者提供了从事后张预应力混凝土平板-柱结构工程设计的机会;真诚地感谢哈尔滨建筑大学建筑工程学院的领导和老师,几年来他们给予了作者很多的关心和帮助;由衷地感谢黑龙江科学技术出版社徐晓飞编辑给予作者的大力支持和广大工程技术人员给予作者的信任和鼓励,没有他们的支持、信任和鼓励,本书的及时出版是不可能的。

本书限于作者的水平和时间,可能有错误和不妥之处,恳切希望读者批评与指正。

郑文忠

于哈尔滨建筑大学建筑工程学院

1999 年元月

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 基本概念	(1)
1.2 研究发展现状	(1)
1.3 本书主要内容及目的	(3)
第二章 后张 PC 平板-柱结构在竖向荷载下的内力计算	(4)
2.1 分块平衡法	(4)
2.2 竖向荷载下内力计算的实用方法	(9)
2.3 预应力效应的考虑方法	(16)
2.4 对若干问题的考虑与说明	(17)
第三章 后张 PC 平板-柱结构的抗震性能	(19)
3.1 研究现状	(19)
3.2 试件设计	(20)
3.3 试验装置及加载方式	(23)
3.4 结构屈服位移的确定	(23)
3.5 破坏过程及破坏形态描述	(25)
3.6 对试验结果的分析	(26)
3.7 对抗震性能的评价	(30)
3.8 构造设计	(30)
第四章 后张 PC 平板-柱结构在水平荷载下的计算模式和方法	(32)
4.1 现有计算模式和方法	(32)
4.2 对现有计算模式和方法的分析	(33)
4.3 水平荷载下合理计算模式和方法的建立	(33)
4.4 对工程设计时若干问题的考虑	(44)
第五章 后张 PC 平板-柱结构节点设计	(46)
5.1 节点核心区抗剪设计	(46)
5.2 节点不平衡弯矩	(46)
5.3 无不平衡弯矩的节点抗冲切设计	(46)
5.4 有不平衡弯矩的节点抗冲切设计	(50)
5.5 破坏截面极惯性矩 J_c 及计算系数 α_0 的计算	(51)

第六章 后张 PC 平板-柱结构裂缝及挠度控制	(54)
6.1 裂缝控制	(54)
6.2 挠度控制	(54)
第七章 后张 PC 平板-柱结构中预应力筋有效预应力 σ_{pe} 合理预估	(58)
7.1 预应力筋布置原则	(58)
7.2 预应力筋布置方案	(58)
7.3 板中预应力筋锚固损失 σ_{l1} 的简化计算	(59)
7.4 板中预应力筋收缩徐变损失 σ_{l5} 的简化计算	(60)
7.5 板中预应力筋有效预应力 σ_{pe} 的计算	(60)
7.6 平板-柱结构中预应力筋有效预应力 σ_{pe} 的预估值	(60)
7.7 本章小结	(62)
第八章 后张 PC 平板-柱结构设计方法	(63)
8.1 承载力计算方法	(63)
8.2 楼(屋)盖预应力筋及非预应力筋选配	(65)
8.3 柱配筋计算	(71)
8.4 应特别注意的问题	(71)
第九章 后张 PC 平板-柱结构截面设计与构造	(72)
9.1 适用范围及板、柱截面尺寸的选择	(72)
9.2 材料选择	(72)
9.3 预应力筋在板内的分配	(72)
9.4 结构内力计算	(73)
9.5 配筋计算与构造	(74)
第十章 后张 PC 平板-柱结构计算实例	(77)
10.1 工程概况	(77)
10.2 预应力筋的线型及布置	(77)
10.3 荷载统计与内力计算	(78)
10.4 预应力筋的选配及预应力效应计算	(88)
10.5 非预应力筋的选配	(91)
10.6 冲切设计	(92)
10.7 其他问题	(92)
第十一章 后张 PC 板柱-剪力墙结构简化计算方法	(94)
11.1 结构平面布置对称的板柱-剪力墙结构	(94)

11.2 刚度沿高度分布比较均匀且 $k_w/k_f \geq 0.5$ 的板柱-剪力墙结构 (94)

第十二章 后张 PC 平板-柱结构工程实例 (96)

附录一 混凝土材料的选择及力学指标 (97)

附录二 钢筋、钢丝和钢绞线材料的选择及力学指标..... (98)

附录三 预应力筋与钢筋横截面面积及其理论质量..... (103)

附录四 张拉力取值与预应力损失计算..... (106)

附录五 等效荷载计算与预应力筋线型选择..... (116)

附录六 无粘结预应力筋的制作..... (119)

附录七 部分预应力混凝土受弯构件无粘结筋的极限应力..... (123)

附录八 局部受压设计与端部间接钢筋的若干配置问题..... (125)

附录九 预应力混凝土结构构件的构造规定..... (132)

附录十 锚具、夹具、连接器与机具..... (134)

参考文献..... (146)

第一章 绪 论

1.1 基本概念

所谓后张预应力混凝土 (Prestressed concrete, 简称 PC) 平板-柱结构系指这样一种结构体系: 其骨架由平板和柱通过节点连结而成, 板采用后张无粘结预应力筋和有粘结非预应力筋的混合配筋形式, 柱视具体情况可设计成普通钢筋混凝土柱或部分预应力混凝土柱, 当竖向荷载较大或结构承受水平力作用时, 各层沿平板-柱结构体系的周边宜设置一定截面尺寸的边梁以承担扭矩作用并增加结构整体性。后张预应力混凝土平板-柱结构的适用柱网尺寸为 $7\text{ m} \times 7\text{ m} \sim 12\text{ m} \times 12\text{ m}$, 其中经济柱网尺寸为 $7\text{ m} \times 7\text{ m} \sim 10\text{ m} \times 10\text{ m}$, 板厚通常取柱网短边尺寸的 $1/40 \sim 1/50$ 。纯后张预应力混凝土平板-柱结构房屋以不超过 10 层为宜, 超过 10 层宜布置一定数量的剪力墙。

大量的工程实践和统计分析表明, 后张预应力混凝土平板-柱结构有着如下突出的优点:

(1) 可降低层高, 减少建筑结构用料, 经济效益好。根据技术经济分析, 这种结构和普通钢筋混凝土梁板结构相比, 对于 8 m 跨度的楼盖, 可降低层高 $40 \sim 60\text{ cm}$, 每 $5 \sim 7$ 层即可节约出一个层高, 可在维持总建筑高度不变的情况下增加楼层数和有效面积。它和同柱网普通钢筋混凝土结构方案相比, 其单位面积楼(屋)盖混凝土用量可减少 $1/4 \sim 1/3$, 钢筋用量也有所降低, 经济效益显著。

(2) 与其他结构相比: 一方面, 可减少水、暖、电管道及设备容量和维修费用, 设备管道的安装也比较方便; 另一方面, 简化装修, 降低装修费用; 再者, 还可取得良好的采光通风效果。

(3) 柱网尺寸大, 可为建筑提供较大体量的空间, 以满足较高的使用功能要求和较高的生产工艺要求。

(4) 由于这种结构体系的房屋具有便于采用定型模板与“飞模”技术施工, 具有可大大简化预应力筋与非预应力筋布置的特点, 不但可节省模板, 降低模板费用, 而且可明显加快施工速度, 缩短工期。

1.2 研究发展现状

自 1906 年由美国 C. A. P. Turner 建成世界第一栋平板-柱结构房屋以来, 由于这一结构体系所具有的众所周知的优点, 包括我国学者在内的各国学者对其结构性能、计算理论及设计方法开展了大量研究工作, 取得了一系列的成果。主要表现在如下几个方面。

1.2.1 关于竖向荷载下的计算理论

关于平板-柱结构在竖向荷载下的内力计算问题, 一些学者曾提出了首先将平板-柱

结构简化成点支承的连续板，然后利用古典平板理论来计算竖向荷载下结构内力的计算方法。这种方法较为复杂，且由于忽略了柱子的抗挠刚度，因而只适用于柱承受垂直反力不承受弯矩的情况，与工程实际不够吻合。

用 Hiueborg 等人提出的板带法和 Wiesinger 提出的分块平衡法计算结构在竖向荷载下的内力，尽管概念清楚，但因其计算工作量和板带法的自由处置权过大，不易为工程技术人员所接受；而屈服理论又多适合于平板-柱结构承载力校核情况之用。

Nichols 在 1914 年正确推得了这种结构形式在竖向荷载下板的总静力弯矩计算公式，证明了总静力弯矩在板格的每个方向都必须得到满足，这是对这种结构在竖向荷载下受力机理的第一次理论论述。从经验法到等代框架法经历了一个漫长的过程。Corley 和 Jirsa 创立了这种结构在竖向荷载下内力计算的等代框架法。作者从理论分析和试验研究两个方面论证并完善了现有平板-柱结构在竖向荷载下的内力计算方法，澄清了工程界的一些模糊认识，为推广采用这种结构体系做出了贡献。用于计算竖向荷载下平板-柱结构体系内力的直接设计法和等代框架法已被编入有关“规范”和“规程”。平板-柱结构板格挠度的计算常采用板格挠度计算的等代框架法和板格挠度计算的正交板梁法。

1.2.2 关于水平荷载下的计算理论

目前计算平板-柱结构在水平荷载下的内力和侧移亦多采用等代框架法，这是因为考虑平板-柱结构抗侧力差的特点，计算时或是折减等代框架梁的宽度，或虽不折减等代框架梁的宽度，但等代框架梁的惯性矩要利用开裂截面来计算。理论分析表明，目前常用的等代框架法存在一些问题，主要有两点：①竖向荷载下与水平荷载下的计算不统一，在竖向荷载下考虑了受扭构件的扭转效应对柱刚度的削弱影响，而在水平荷载下没有考虑这一影响；②在水平荷载下通过对板刚度的折减来考虑板-柱结构抗侧力差的特点。这里存在两方面问题：一方面由于影响平板-柱结构侧移的因素很多，很难使等代框架梁宽度取值合理；另一方面，由于柱反弯点位置受梁柱线刚度比影响，本应通过抗扭构件的扭转效应对柱刚度的削弱来考虑平板-柱结构抗侧力差的特点，而目前采用的是通过对板刚度的折减来考虑这一特点的方法，使“梁”柱线刚度比较实际情况小了，结构内力计算结果会存在一定偏差。鉴于上述情况，作者对平板-柱结构在水平荷载下的合理计算模式和方法进行了分析和探索，给出了能够较合理计算柱反弯点位置及侧移刚度的计算公式，克服了以往方法中在水平荷载下内力计算与侧移计算不协调的缺点，并使这种结构在竖向荷载下与水平荷载下的计算得到统一。

这里需要指出：由于统计分析表明平板-柱结构的基本自振周期是相同跨度、相同跨数、相同层数和相同的纵向柱距的框架结构基本自振周期的 2.5 倍以上，当场地土条件较好时，平板-柱结构承受的水平地震作用是不大的，按现行水平荷载下计算理论进行平板-柱结构设计计算所带来的误差，实际工程一般是可以接受的。

1.2.3 对预应力效应的考虑

在张拉预应力筋引起的平板-柱结构的等效荷载作用下，结构的内力可按竖向荷载下结构内力计算的等代框架法进行分析。

在张拉预应力筋引起的平板-柱结构的等效荷载作用下，板格反拱计算方法可与竖

向荷载下挠度计算方法取同，即计算平板-柱结构板格挠度的等代框架法和正交板梁法同样适用于板格的反拱计算。求得反拱弹性计算值后，考虑混凝土徐变影响的板格总变形的计算方法与一般预应力混凝土结构构件相同。一般情况下，预应力混凝土平板-柱结构板格挠度不起控制作用。

1.2.4 预应力筋和非预应力筋的选配

预应力筋的选配可采用荷载平衡法和预应力度法，通过这两种方法选配的预应力筋用量尚应满足裂缝控制要求，即须进行必要的裂缝控制的计算和校核工作。计算确定了预应力筋用量之后，再根据承载力方程及构造要求计算确定非预应力筋用量。

作者近年来提出了通过裂缝控制方程直接计算确定预应力筋用量，通过承载力方程及构造要求计算确定非预应力筋用量的设计计算方法，这种方法因可使预应力筋用量“一次定音”，避免了试算过程，大大简化了设计计算工作量，受到了工程界的欢迎。

1.2.5 节点设计

板柱节点核心区，由于承受的剪力较小，且周边板对核心区混凝土有很强的约束作用，核心区受剪承载力没问题。具体设计时，对非抗震平板-柱结构，核心区配箍一般宜满足最小配箍率及最大配箍间距的有关要求；对抗震平板-柱结构，核心区箍筋配置一般与柱端箍筋加密区相同。

节点冲切设计可分为无不平衡弯矩的节点冲切和有不平衡弯矩的节点冲切两种情况。可通过在垂直于柱的暗梁内配置箍筋，节点周围配置弯起钢筋，加设抗剪锚栓或型钢剪力架及增设托板等手段来加强板柱节点的抗冲切能力，在后张预应力混凝土平板-柱结构中很少采用通过柱帽来增强节点抗冲切承载力的方法。

1.2.6 抗震性能

新西兰、日本和美国等很多国家对预应力混凝土结构的抗震性能进行了研究，我国同济大学和东南大学等单位也对预应力混凝土结构抗震性能开展了研究工作。研究表明，如果做到合理的构造设计，包括后张 PC 平板-柱结构在内的预应力混凝土结构抗震性能并不比普通钢筋混凝土结构差，而且预应力混凝土结构具有较强的变形恢复能力，便于震后加固。

1.3 本书主要内容及目的

通过附录内容，使读者复习并掌握无粘结预应力混凝土结构基本知识；通过介绍后张 PC 平板-柱结构体系的基本概念、特点及研究现状，使读者对这一结构体系有一概貌性了解；通过介绍后张预应力 PC 平板-柱结构在竖向荷载及水平荷载下的内力计算使读者掌握这一结构体系的内力分析方法；通过介绍后张 PC 平板-柱结构的裂缝及挠度控制和各种预应力筋与非预应力筋选配方法，使读者在了解和掌握现有设计计算方法的同时，建立对两类极限状态直接设计的概念；通过对后张 PC 平板-柱结构抗震性能及截面设计与配筋构造的介绍，使读者能自觉地做到“合理构造设计”，并掌握相应的截面设计和配筋构造方法；通过介绍后张 PC 平板-柱结构的节点设计，使读者了解节点设计的内容和方法；通过介绍后张预应力混凝土平板-柱结构计算实例和黑河市大黑河岛国际商贸城结构施工图，使读者掌握这一结构设计计算的全过程和图纸表达方法。

第二章 后张 PC 平板-柱结构在竖向荷载下的内力计算

本章通过分块平衡法和两个钢平板-柱结构模型试验证明了“总静力弯矩在柱支承双向板的板格的两个方向都必须得到满足”，即“在竖向荷载下沿平板-柱结构两个方向的内力均应按承受全部荷载分别单独计算”的正确性，澄清了人们在这方面的模糊认识；介绍了用于计算这种结构内力的两个实用方法：“等代框架法”和“直接设计法”，并给出了弯矩在截面上的分布；分析了对这种结构中预应力效应等问题的考虑方法，并指出沿平板-柱结构的两个方向应分别布置足够数量的预应力筋，以建立相应方向的平衡荷载。

2.1 分块平衡法

2.1.1 基本假定

使用分块平衡法时采用了如下基本假定：

- (1) 净跨度的垂直平分线和柱角与板格中心（上述垂直平分线的交点）的连线是零剪力线，并形成板的受荷区之间的边界；
- (2) 两端由柱表面支承而宽度与柱相同的那部分板，假定为跨在两柱之间的单向板带，扭矩暂不考虑；
- (3) 通过考虑板的各种受荷面积的平衡条件求出板格负弯矩和正弯矩的总和；
- (4) 圆形或规则多边形柱按等面积的正方形处理。

2.1.2 矩形柱网平板-柱结构内分析

矩形柱网平板-柱结构的一部分如图 2-1 所示。图中示出了假定的零剪力线。平板上单位面积均布荷载为 q 。

按照分块平衡法， x 方向的一部分总弯矩可通过考虑板的受荷面积 $adef$ 的平衡来求出。在板块范围内受荷面的边上，剪力为零，因而对 ef 取矩求得这一部分总弯矩为

$$M_{1x} = M_{1x}^{\text{负}} + M_{1x}^{\text{正}} = q \cdot l_{ny} \cdot \frac{l_{nx}^2}{12} + q \cdot C_y \cdot \frac{l_{nx}^2}{8} \quad (2-1)$$

式中 $M_{1x}^{\text{负}}$ 和 $M_{1x}^{\text{正}}$ 分别为 x 方向 ef 截面总负弯矩和 x 方向 ad 截面总正弯矩； l_{nx} 和 l_{ny} 分别为 x 和 y 方向的净跨； C_y 为 y 方向的柱宽。

同理， x 方向另一部分总弯矩可通过考虑板的受荷面积 $afgh$ 的平衡求出。在板块范围内受荷面积的边上，剪力为零，因此，对 fh 取矩可求出另一部分总弯矩为

$$M_{2x} = M_{2x}^{\text{负}} + M_{2x}^{\text{正}} = q \cdot l_{ny} \cdot \frac{l_{nx}^2}{24} \quad (2-2)$$

式中 $M_{2x}^{\text{负}}$ 和 $M_{2x}^{\text{正}}$ 分别为 x 方向另一部分总负弯矩和 x 方向另一部分总正弯矩。

根据式 (2-1) 或式 (2-2)， x 方向板格的总弯矩为

Figure 10-1 illustrates the calculation of moments and shear forces for a two-story, two-bay frame structure. The left part shows the frame with nodes labeled a through h, dimensions l_y , l_m , l_{nx} , l_x , and l_{ny} , and a coordinate system (x, y) . The right part shows the load distribution and bending moment diagrams for the X-direction. The top diagram shows a triangular load $q l_{ny}$ on the beam ade , with a corresponding bending moment diagram M_{1x} . The bottom diagram shows a triangular load $q l_{ny}$ on the beam afn , with a corresponding bending moment diagram M_{2x} . The diagrams are labeled with positive and negative moment regions and specific values like M_{1x}^+ , M_{1x}^- , M_{2x}^+ , and M_{2x}^- .

上面只对 x 方向的总弯矩进行了推导。显然, 对 y 方向的总弯矩也可导出类似的一组公式。 y 方向作用力的公式可通用地改变脚标, 直接根据前面的公式得到, 即用脚标 x 代替 y , 用脚标 y 代替 x 。因此, 对平板-柱结构静力弯矩在各板格的每个方向都必须得到满足。

• 5 •

2.1.3 试验验证

为了验证“总静力弯矩在柱支承双向板的板格的两个方向都必须得到满足”即“在竖向荷载下沿平板-柱结构两个方向的内力均应按承受全部荷载单独计算”的正确性，对两个钢平板-柱结构模型进行了竖向荷载试验。

2.1.3.1 试件设计及板面应变片布置

1. 试件设计

两个钢平板-柱结构模型均采用 A₃ 钢制做。钢平板-柱结构模型 I 和 II 分别如图 2-3 和图 2-4 所示。

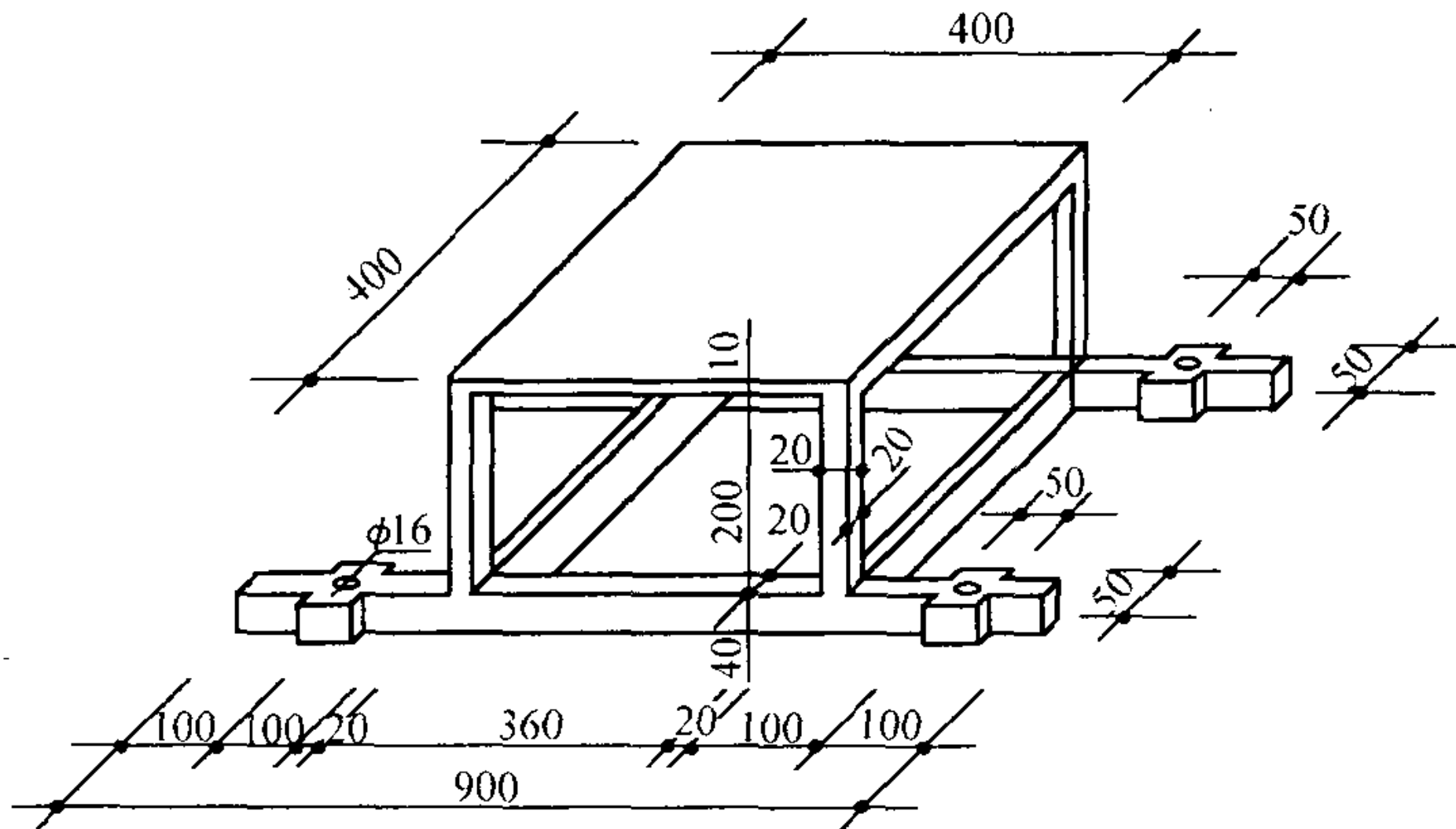


图 2-3 钢平板-柱结构模型 I

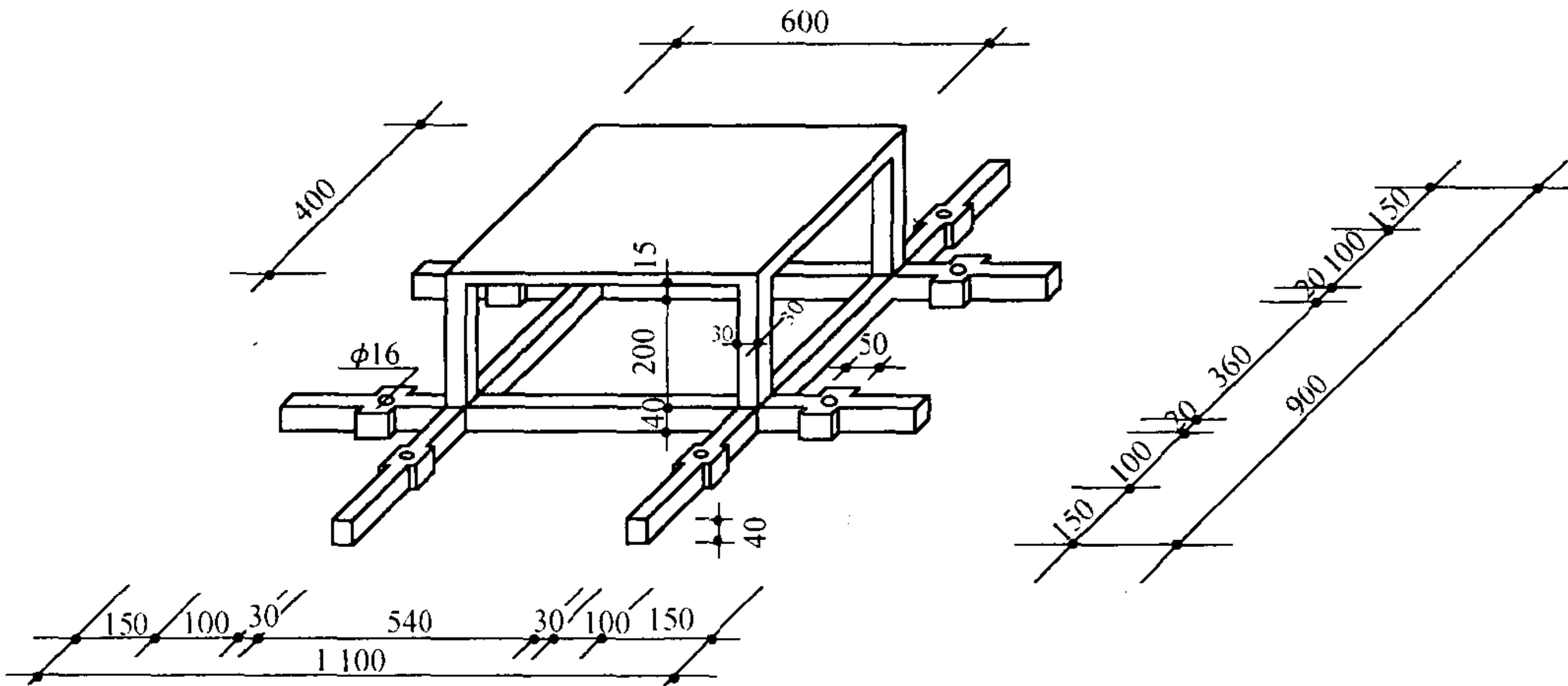


图 2-4 钢平板-柱结构模型 II

2. 板面应变片布置

模型 I 和模型 II 板面应变片布置分别如图 2-5 (a) 和 2-5 (b) 所示。

A₃ 钢的弹性模量 $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ，泊松比 $\mu = 0.3$ 。

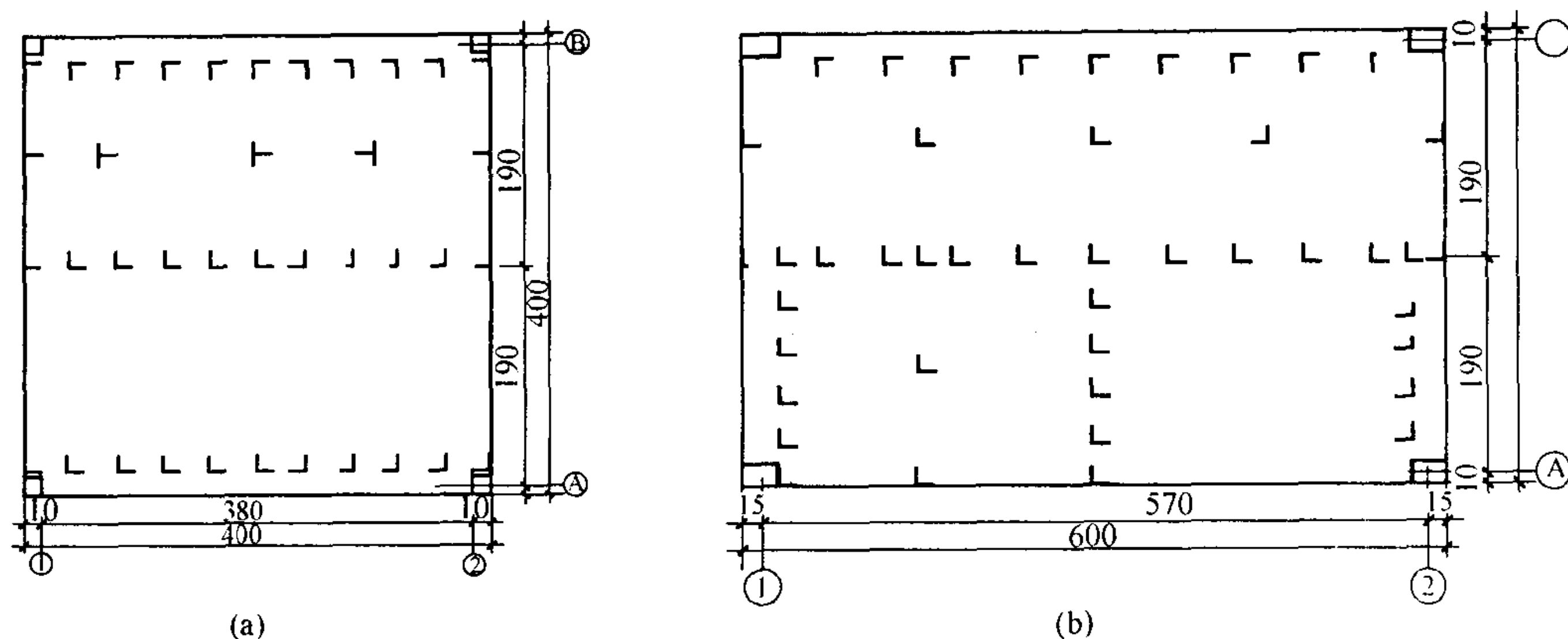


图 2-5 钢平板-柱结构模型板面应变片布置

2.1.3.2 竖向荷载加荷方案

各模型板面竖向荷载通过施加铁块来实现。为了使铁块重量均匀传至板面，两个钢平板-柱结构模型在堆置铁块之前先在板面铺设砂袋，平板-柱结构模型板面均布荷载均以每级 3.6 kN 施加。模型 I 分五级加完，加至 18 kN；结构模型 II 分四级加完，加至 14.4 kN。各应变片在各级荷载下的读数通过应变自动记录仪采集。

2.1.3.3 内力校核

平板-柱结构中平板的应力-应变关系为二维问题，所考察点计算方向的应力应按下式计算

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_x + \mu\epsilon_y) = E \cdot \epsilon_1 \quad (2-4)$$

式中 ϵ_x —所考察点计算方向应变实测值；

ϵ_y —所考察点垂直于计算方向应变实测值；

ϵ_1 —所考察点计算方向折算应变， $\epsilon_1 = \frac{\epsilon_x + \mu\epsilon_y}{1 - \mu^2}$ 。

1. 板端计算方向折算应变试验值

模型 I 在 18 kN 铁块均匀作用下板端计算方向折算应变分布、模型 II 在 14.4 kN 铁块均匀作用下短跨板端计算方向折算应变分布和模型 II 在 14.4 kN 铁块均匀作用下长跨板端计算方向折算应变分布分别如图 2-6 (a) ~ 2-6 (c) 所示。从图中不难看出，板端计算方向和折算方向的折算应变从跨中到板边变化梯度很大，其峰值远远大于平均值。

2. 跨中计算方向折算应变试验值

模型 I 在 18 kN 铁块均匀作用下跨中计算方向折算应变分布、模型 II 在 14.4 kN 铁块均匀作用下短跨跨中计算方向折算应变分布和模型 II 在 14.4 kN 铁块均匀作用下长跨跨中计算方向折算应变分布分别如图 2-7 (a) ~ 2-7 (c) 所示。

从图中不难看出，板跨中计算方向折算应变从垂直于计算方向的跨中到板边呈直线

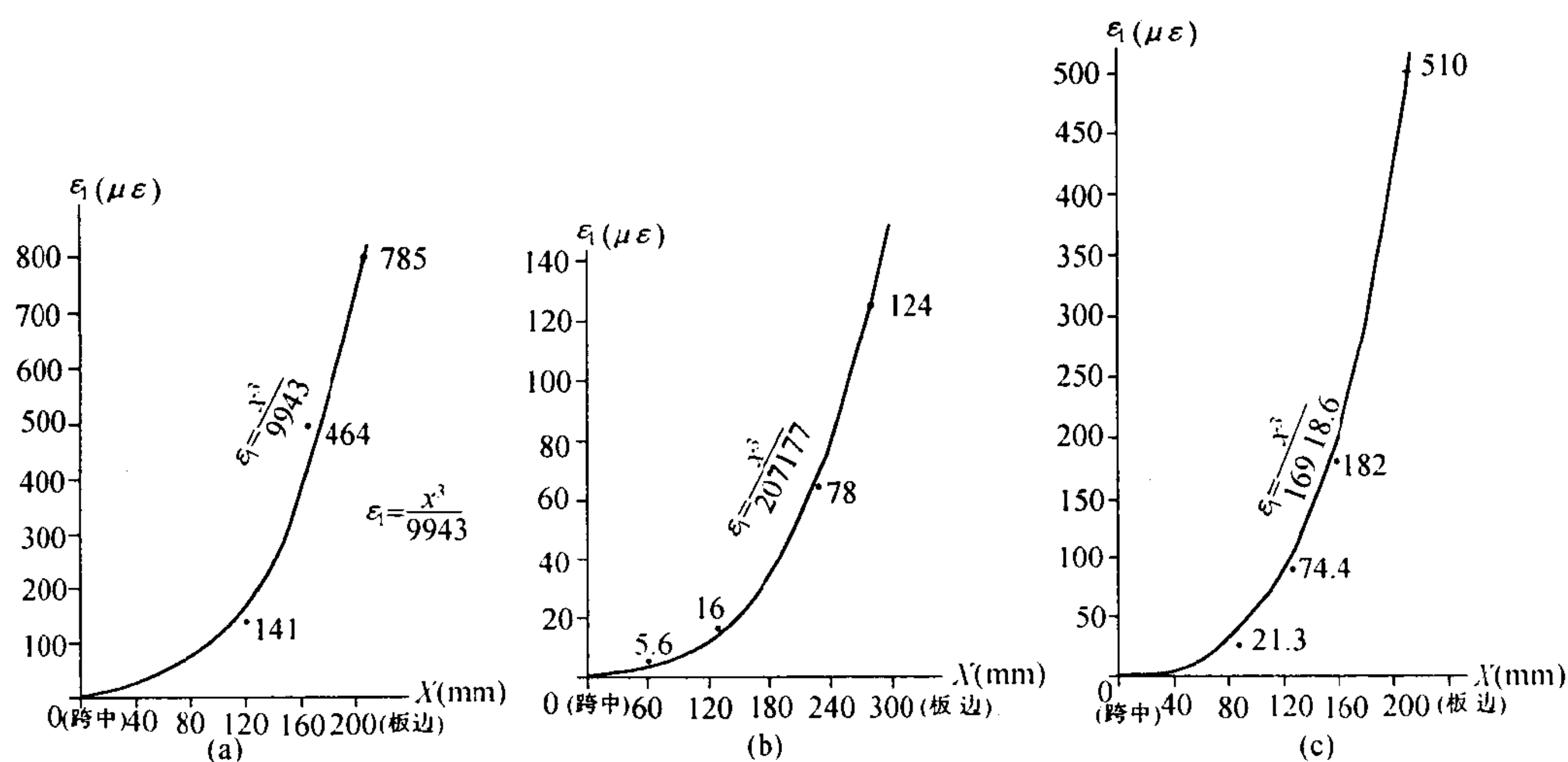


图 2-6 板端计算方向折算应变试验值分布

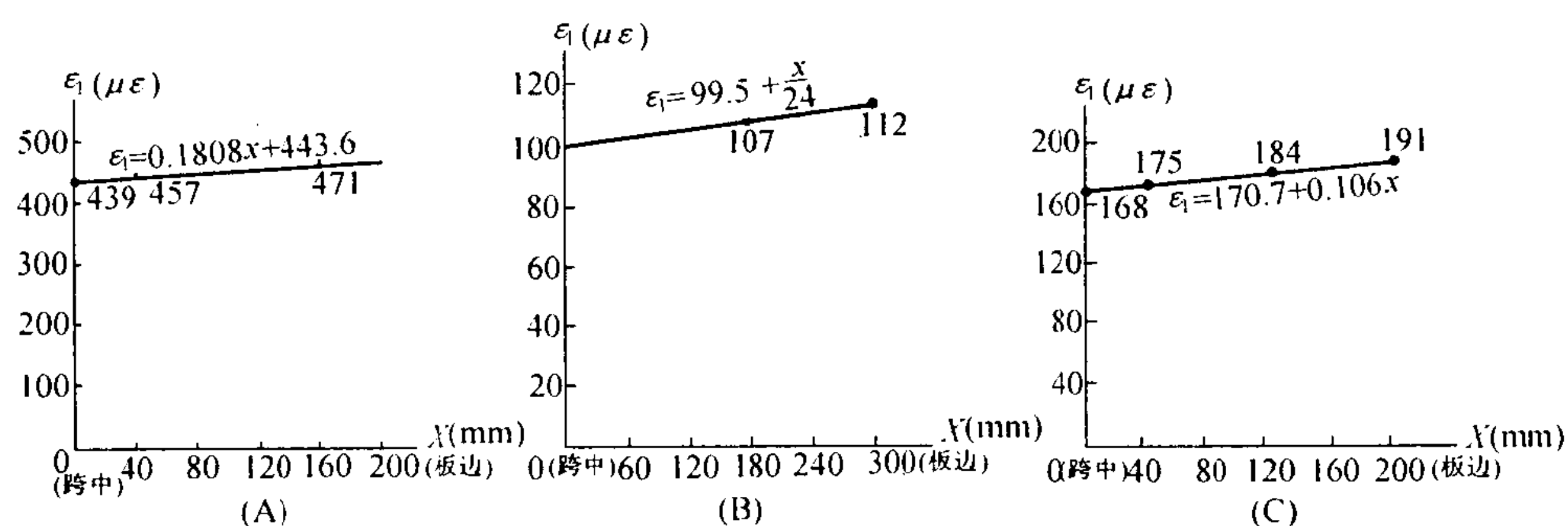


图 2-7 钢平板-柱结构模型跨中计算方向折算应变分布

变化，分布较为均匀。

3. 静力弯矩试验值与计算值比较

在明确了板格各方向板端及跨中计算方向折算应变的分布后，即可通过下式计算各微区段承担的板端负弯矩和跨中正弯矩

$$dM = \frac{1}{6} t^2 \sigma(x) dx = \frac{1}{6} t^2 \cdot E \cdot \epsilon_1(x) dx \quad (2-5)$$

式中 t 为板的厚度。

对式 (2-5) 积分，即可得板端负弯矩和跨中正弯矩试验值。

在确定了板端负弯矩试验值 M'_1 和跨中正弯矩试验值 M'_2 后，即可通过下式计算确定总静力弯矩试验值 M'_0

$$M'_0 = M'_1 + M'_2 \quad (2-6)$$

总静力弯矩试验值与计算值的比较如表 2-1 所示。

表 2-1 总静力弯矩试验值与计算值的比较

试 件	试验值 M_0 (N·mm)	计算值 M_0 (N·mm)	M_0/M_0
钢平板-柱结构模型 I	441 880	406 530	1.087
钢平板-柱结构模型 II 短跨方向	311 245	324 846	0.958
钢平板-柱结构模型 II 长跨方向	460 353	487 344	0.945

表中数据及对统计量的分析表明,总静力弯矩在柱支承双向板的板格的两个方向都必须得到满足,即在竖向荷载下沿平板-柱结构两个方向的内力均应按承受全部荷载分别单独计算。

2.2 竖向荷载下内力计算的实用方法

平板-柱结构竖向荷载下内力计算的实用方法有两种,即等代框架法和直接设计法。

2.2.1 等代框架法

2.2.1.1 对等代框架法的简要分析

等代框架是从三维结构中形成的二维框架。每榀等代框架由一系列内柱加上由柱轴向向两侧延伸到板格中心线的各层板梁组成,或由一系列结构边缘上的柱加上从该边缘延伸到板格中心线的各层板梁组成。显然,这样构成的框架与普通框架不同。在普通框架中,框架梁与框架柱的宽度差不多,弯矩的传递可直接在梁宽内进行。但在等代框架中,对中框架而言,其框架梁实为宽度很大的板,对边框架而言,其框架梁或为宽度较大的板,或为边梁加宽度较大的板,悬挑部分所传递的弯矩要靠受扭构件(与内柱相连的受扭构件为柱两侧宽度为柱在计算弯矩方向的边长的板;只与边柱相连的受扭构件:当无边梁时,受扭构件为柱两侧宽度为柱在计算弯矩方向的边长的板;当有边梁,且边梁宽度不小于柱在计算弯矩方向的边长时,受扭构件为边梁;当有边梁,且边梁宽度小于柱在计算弯矩方向的边长时,受扭构件为边梁加上柱计算弯矩方向边长范围内的板)的扭转传至柱子。因此,等代框架柱宜考虑受扭构件扭转效应对其刚度的削弱影响。

2.2.1.2 等代框架梁刚度的确定

设等代框架梁的截面惯性矩为 I_b , 则其刚度可表达为

$$K_b = \frac{4E_c I_b}{l_1 - C_1/2} \quad (2-7)$$

式中 E_c ——等代框架梁混凝土弹性模量;

l_1 ——沿计算弯矩方向支座中至中的跨长;

C_1 ——柱沿计算弯矩方向的边长。

这里需要指出,对设有边梁的边框架,须用 I_{lb} , I_{lb} 应按下图所示截面计算。

2.2.1.3 等代框架柱刚度的确定

1. 抗扭构件刚度的确定

三维分析结果表明,可假定板端负弯矩沿受扭构件成线性分布,其弯矩值在柱中心

最大，在板格中心线处为零；经推导可得抗扭构件的刚度表达式

$$k_t = \sum \frac{gE_{cb}C}{l_2(1 - c_2/l_2)^3} \quad (2-8)$$

式中 C_2 ——柱沿垂直于计算方向的边长；

l_2 ——等代框架轴线两侧板格的横向跨度，即受扭构件的跨度；

C ——受扭构件抗扭常数，并按下式计算

$$C = \sum (1 - 0.63x/y) \cdot x^3 y/3 \quad (2-9)$$

x ——如图 2-9 所示组成抗扭构件截面矩形配件的短边尺寸；

y ——如图 2-9 所示组成抗扭构件截面矩形配件的长边尺寸；

$\sum$ ——对式 (2-8) 表示对柱两侧受扭构件抗扭刚度取和，当为边等代框架时只柱一侧有受扭构件；对式 (2-9) 表示对受扭构件截面矩形配件抗扭常数取和。

细分受扭构件截面矩形配件的工作，应以各分块之间共同边界最小， C 值最大为原则。

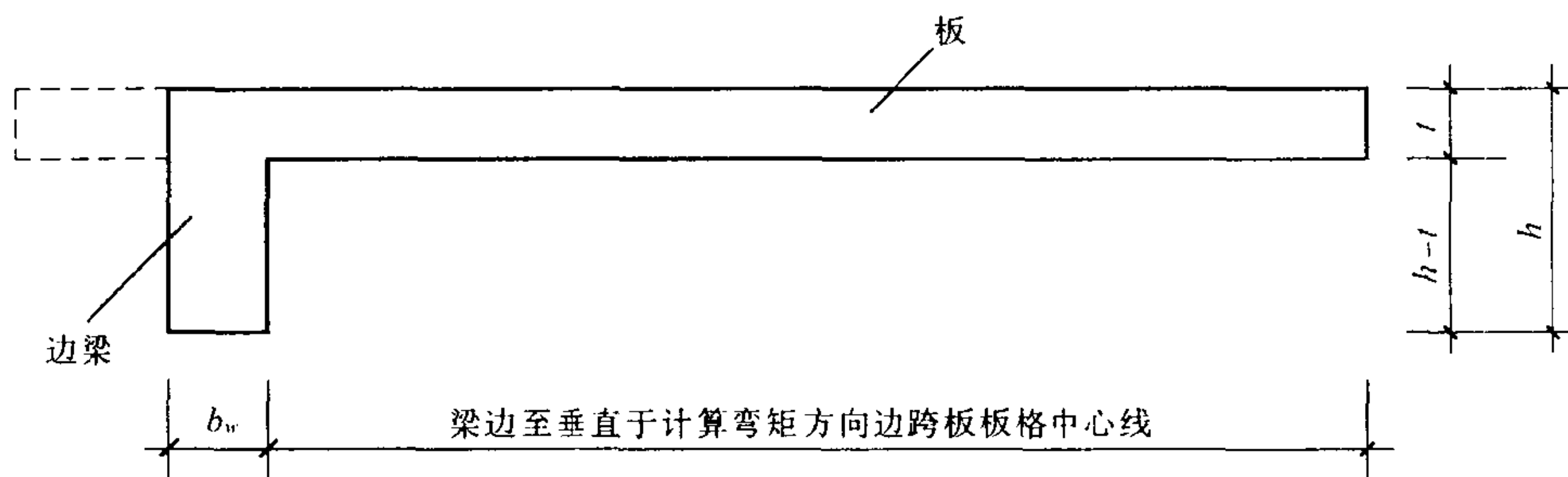


图 2-8 计算设有边梁的边等代框架梁 I_b 时取用截面（虚线表示板悬挑部分）

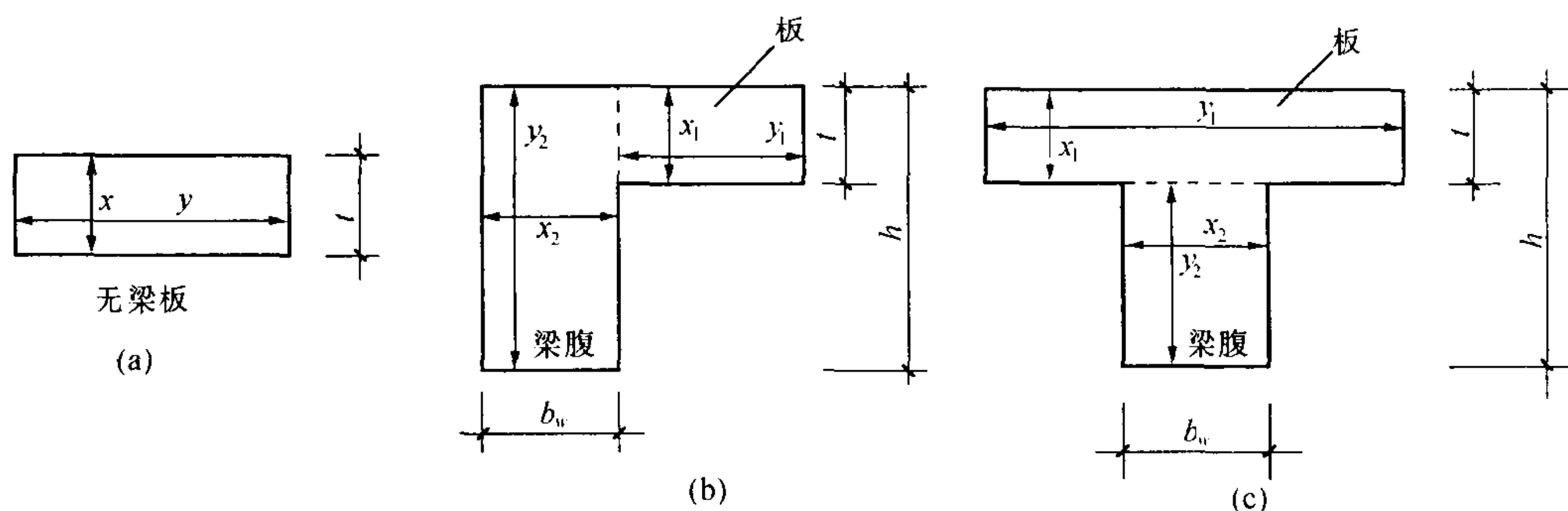


图 2-9 计算抗扭常数时考虑的梁截面

如果在 l_1 方向设有通过轴线的梁，则板端负弯矩沿受扭构件线性分布就不合理了，因为梁将承担较多的总截面弯矩。在这种情况下，须用 k_t' 代替 k_t ， k_t' 可表达为

$$k_t' = k_t \cdot \frac{I_{lb}}{I_b} \quad (2-10)$$

式中 I_{lb} ——按图 2-10 (a) 或图 2-11 (a) 截面计算的惯性矩；