

微型机结构计算软件系统

之八

弹性地基上梁板计算

李如白 编

北京科技协作中心

计算机软件部

一九九二年五月

目 录

前 言	2
一、程 序 功 能	3
二、力 学 模 型	3
1. 两种基本单元	3
2. 三种地基模型	4
三、线 性 方 程 组 及 求 解	6
四、配 筋 计 算	7
五、打 印 结 果	9
六、程 序 组 框 图	12
七、数 据 填 写 说 明	13
八、原 始 数 据 错 误 信 息	51
九、操 作 命 令	53
十、算 例	54

前 言

《弹性地基上梁——板结构计算程序》(BASES)是中国电子工程设计院研制的工程设计软件之一。1980年底, BASES 程序的文克尔地基模型部分已在DJS—6机上研制成功并交付使用。1985年初,在首钢设计院电算室的大力协助下着手向微机移植,并添加有限压缩层地基模型与复合地基模型。1986年12月,北京土建学会组织有关教授、专家进行了技术鉴定。1989年, BASES程序获全国工程设计计算机优秀软件银质奖。

1990年下半年, BASES程序完成了89新规范版本的调试工作。最近又补充了非规则梁计算与地基反力计算。十年来, BASES程序已在京内外许多设计、科研单位所经历的实际工程中得到应用与检验。鉴于BASES 程序新规范版推出不久,如有欠妥之处,敬请指教。

中国电子工程设计院 李如白

一九九二年二月

一、程序功能

本程序主要用于弹性地基上梁式及板式基础的计算,也可以计算楼层梁板结构。其主要服务对象有:

1. 条形及交叉梁系基础;
2. 有肋与无肋的片筏基础;
3. 水池底板、侧板及挡土墙板;
4. 各种支承的弯曲薄板;
5. 交叉梁系、井式楼盖及无梁楼盖。

上述结构,如属于钢筋混凝土结构,可给出内力与配筋面积。金属结构可给出内力。此外,对于地基梁板结构,还可计算出结点处的地基反力与反力强度。对于楼层梁板结构,可算出竖向有刚性约束处的反力。

鉴于矩形板单元的局限性,程序的当前版本,对于板结构及梁板组合结构,只可以计算正交网格者。交叉梁系不限。

二、力学模型

1. 两种基本单元

BASES 软件的当前版本,对于基础结构本身,设置了两种基本单元:板架梁单元与矩形弯曲板单元,两种单元剖分结点上的独立变位有3个(w 、 θ_x 、 θ_y),为地下及地上梁板结构计算,提供了比较符合实际的计算模型。详见图1、图2。

两种单元的单元刚度矩阵从略

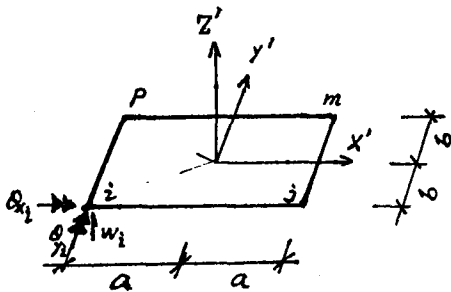


图 1、弯曲板单元

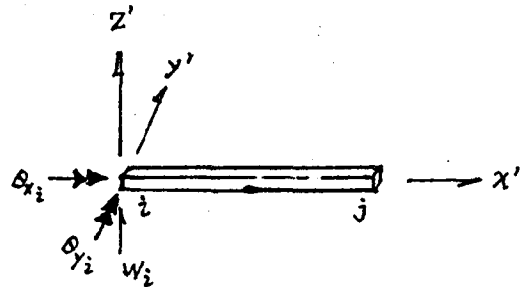


图 2、板架梁单元

2、三种地基模型

(1) 文克尔地基。用于软土地基、压缩层较薄地基、砂土地基等。地基刚度可作如下处理：

对于弹性地基板结构，可在板单元刚度矩阵 $[K]$ 中，另加一项地基刚度矩阵 $[K]'$ ，它可用能量原理求出：

$$[K]' = K_0 \int_{-a}^a \int_{-b}^b [N]^T [N] dx dy$$

式中： K_0 ——文克尔地基系数 (KN/m^3)；

$[N]$ ——从板单元位移模式中导出的形态矩阵；

a 、 b ——在局部坐标系中，板单元在 X' 及 Y' 方向的尺寸之半

对于弹性地基梁结构，则在已形成的梁板结构总刚度矩阵的对角线元素中，加上其值为 $K_0 \cdot [A]$ 的结点地基刚度，其中 $[A]$ 为各结点的接触面积矩阵（对角阵）， K_0 为文克尔地基系数。

(2) 有限压缩层地基，即分层总和法地基模型。用于地基较为复杂，地基刚度变化较大，或需要计算沉降值的基础结构。其地基刚度按下列步骤求出：

a、用分层总和法形成地基柔度矩阵 $[R]$ ，即

$$[R] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \end{bmatrix}$$

式中： r_{ij} —— j 点作用一个单位力 $P=1$ 在 i 点产生的沉降 ($i \neq j$)

r_{ii} ——结点 i 作用一个单位力 $P=1$ 在本点产生的沉降。

柔度阵各元素计算原则分述如下：

$$r_{ij} = S'$$

式中： S' ——按分层总和法计算的地基变形值。

$$S' = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_{zi} + \sigma_{zi-1}) h_i \cdot \frac{1}{E S_i}$$

式中: σ_{zi} 、 σ_{zi-1} —— 分别为第 i 层底面与顶面的附加压力。

h_i —— 第 i 层土的厚度

E_{si} —— 计算沉降的点在第 i 层的压缩模量。

附加压力 σ_z 的计算, 考虑两种情况:

①、对于求 r_{ii} 时, σ_z 用角点法公式

$$\sigma_{zi} = \frac{q}{2\pi} \left[\left(\frac{4 \times A_1 \times B_1 \times Z \times (4 \times A_1^2 + 4 \times B_1^2 + Z^2)}{(4A_1^2 + Z^2)(4B_1^2 + Z^2)\sqrt{4A_1^2 + 4B_1^2 + Z^2}} \right) + \arctan \left(\frac{4A_1 \times B_1}{Z\sqrt{4A_1^2 + 4B_1^2 + Z^2}} \right) \right]$$

②、对于求 r_{ij} 时, σ_z 用简化公式:

$$\sigma_{zi} = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{Z^3}{L^3}$$

式中: i —— 欲求变形之点号

P —— 影响该点沉降的作用力。此处求系数 (r_{ij}) 时, $P=1(\text{KN})$

Z —— 变形点离地基表面的距离 (i 点的 Z 方向坐标值)。

L —— 变形点与施力点 J 的距离

$$L = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + Z^2}$$

X_i 、 Y_i 、 Z —— 所求变形点 i 的三个坐标值

X_j 、 Y_j —— 施力点 j 的两个坐标值 ($Z_j=0$)。

需要指出, 在求 r_{ij} 时, 由于 i 、 j 两点往往有不同的压缩模量 E_{si} 及 E_{sj} , 为了简化计算, 能按照直线变形体理论得出对称的柔度矩阵, 本程序用 $\frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_{si}} + \frac{1}{E_{sj}} \right)$ 代替式 (2.5) 中的 $\frac{1}{E_{si}}$ 。

b、求柔度矩阵 (R) 的逆矩阵 $[K]^{-1}$;

c、将 $[R]^{-1}$ 对号装入总刚度矩阵, 形成总刚度矩阵初始值, 即地基刚度。

(3) 有桩基约束的地基。此即复合地基模型的一个特例。用于基础结构下有桩情况。在这里，除了求得 $(R)^{-1}$ 作为总刚初始值外，还需要考虑桩的刚性系数 CZ 对总刚度矩阵的影响。 CZ 的求法为：

$$CZ = (P / \Delta S) \times \xi$$

式中， P 及 ΔS 可借试桩荷载—沉降曲线求出，并分别为桩的设计荷载及相应的沉降量； ξ 为小于 1 的折减系数 (0.5~0.9)。

此外，桩的刚性系数还可以用其他经验公式求出。

三、线性方程组及求解

1、线性方程组的建立

对于各种类型结构物，程序将建立如下线性方程组（用矩阵表示）：

$$\begin{bmatrix} \{K_{ii}\} & \{K_{ib}\} \\ \{K_{bi}\} & \{K_{bb}\} + C_1 * \{I_{K0}\} + C_2 * \{R\}^{-1} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{\omega\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{M\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} + C_2 * \{R\}^{-1} \{A\}$$

式中： $\{K_{ii}\}$ ——仅与转角位移 θ_x 、 θ_y 有关的总刚子块；

$\{K_{bb}\}$ ——仅与线位移 ω 有关的总刚子块；

$\{K_{bi}\}$ 、 $\{K_{ib}\}$ ——由 θ_x 、 θ_y 与线位移 ω 偶合关系形成的总刚子块；

$\{I_{K0}\}$ ——文克尔地基刚度阵及有桩基约束时附加地基刚度阵，它是对角矩

阵；

$\{R\}^{-1}$ ——有限压缩地基柔度阵的逆矩阵，即有限压缩层地基刚度阵；

C_1 ——系数，当为文克尔地基及有桩基约束的结构物时取 1，否则取 0；

C_2 ——系数，当为有限压缩地基上结构物时取 1，否则取 0；

$\{0\}$ 、 $\{\omega\}$ ——分别为基础结构节点转角位移向量与线位移向量；

$\{M\}$ 、 $\{P\}$ ——由外荷载形成的作用于基础结构结点上的等效结点弯矩向

量与等效结点力向量；

(Δ) —— 作用于被分析结构以外的相邻外荷块对基础结构节点引起的附加沉降量。

2、方程组求解简介

为了节省内存，扩大解题能力，上述总刚度矩阵用变带宽一维数组压缩存储，分块记入外存，方程组用平方根方法分块求解。其结果为结点的线位移分量 (ω) 及转角位移分量 (θ) (按不同的荷载组号分别解出结果)，写入外存，为求梁、板单元的内力做准备。

四、配筋计算的控制条件

对于钢筋混凝土结构的梁单元或板单元，均给出六种组合内力当中的最大配筋面积 (主筋)。配筋计算时，以《混凝土结构设计规范》(GBJ 10-89) 为依据。具体说明如下：

(1)、混凝土保护层 (a_g)

当梁高 $H \leq 1$ 时， $a_g = 0.035 + a' - a''$

当梁高 $H > 1$ 时， $a_g = 0.04 + a' - a''$

式中： a' —— 当计算弹性地基梁板时取 0.01m，否则取 0。

a'' —— 梁与板的混凝土净保护层之差，梁为 0，板取 0.013m。

(2)、最大配筋控制条件

a、截面尺寸要求

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_T} \leq 0.25 f_c$$

式中： T —— 扭矩设计值

V —— 剪力设计值

b —— 矩形截面宽度或 T (I) 形截面腹板宽度。

h_0 —— 截面的有效高度。

f_c ——混凝土的轴心抗压强度

W_t ——截面的受扭塑性抗矩，按《混凝土结构设计规范》(GBJ 10 -- 89)第

4.3.2条计算。此处从略。

b、混凝土受压区高度

$$X \leq \xi_b h_0$$

$$X \geq 2a'$$

式中： a' ——纵向钢筋合力点至受压区边缘的距离。

X ——混凝土受压区高度

h_0 ——截面有效高度

ξ_b ——相对界限受压区高度，按下式计算：

$$\xi_b = \frac{0.8}{1 + \frac{f_s}{0.0033E_s}} \quad (\text{用于有屈服点钢筋})$$

其中： f_s ——纵向钢筋抗拉强度设计值

E_s ——钢筋弹性模量

(3)、最小配筋率（输出的配筋面积中已经满足）

当混凝土强度等级 $\leq$ C35时，取 $\mu_{\min}=0.15\%$

当混凝土强度等级 $\geq$ C40时，取 $\mu_{\min}=0.2\%$

（注：某些文献中建议，弹性地基梁最小含钢率为 $\mu_{\min}=0.2\%$ ）

(4)、板配筋

板单元计算配筋公式与梁矩形截面配筋公式同（从略）。截面宽度 $B=1.0\text{m}$ ，高度 $H=$ 板厚（m）。

五、打印结果简介

1、结点变形，按荷载组号分别输出各点的变形分量(W_i , θ_{xi} , θ_{yi})，其正方向如图所示。对于基础结构， W_i 为该点的沉降量(M)。

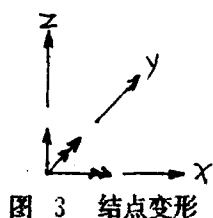


图 3 结点变形

2、内力

a、梁：打印出二端的四种组合形式内力

V_{max} 及相应的 M_x

V_{min} 及相应的 M_x

M_{ymax} 及相应的 M_x

M_{ymin} 及相应的 M_x

其中： V 为梁端剪力、 M_y 为梁端弯矩， M_x 为扭矩。

梁单元内力符号规定见图 4

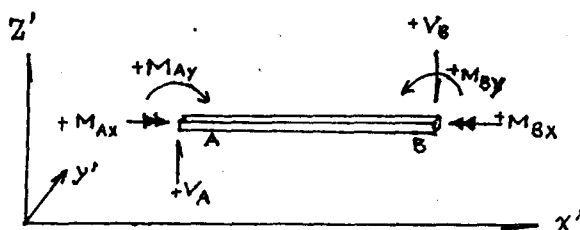


图 4 梁单元正向内力

M_x ——绕单元主轴 X' 的扭矩(KN/m)，矢量方向指向杆端截面者为正。

M_y ——弯矩(KN/m)。使梁下纤维受拉者为正。

V ——剪力(KN)。使杆端顺时针方向旋转者为正。

b、板：打印出各结点的四种组合形式内力：

$M_{x\max}$ 及相应的 M_y

$M_{y\min}$ 及相应的 M_y

$M_{y\max}$ 及相应的 M_x

$M_{y\min}$ 及相应的 M_x

其中： M_x 、 M_y 为结点处的弯矩（因篇幅关系，扭矩 M_{xy} 未予印出），其定义同弹性理论中规定，即：

M_x ——其矢量方向与 y 轴平行的力矩（KNM）。使板中面以下纤维受拉者为正。见图5。

M_y ——其矢量方向与 x 轴平行的力矩（KNM）。使板中面以下纤维受拉者为正。见图5。

内力 M_x 与 M_y 容易混淆，下面所述特点可帮助区别开来：

在钢筋混凝土板内，弯矩 M_x 所需配筋与 x 轴平行放置；弯矩 M_y 所需配筋与 y 轴平行放置。

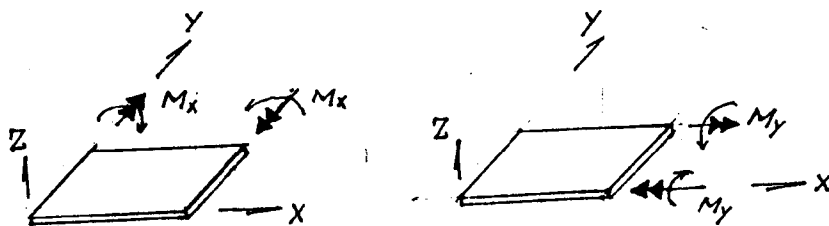


图 5 板单元正向内力

3、配筋

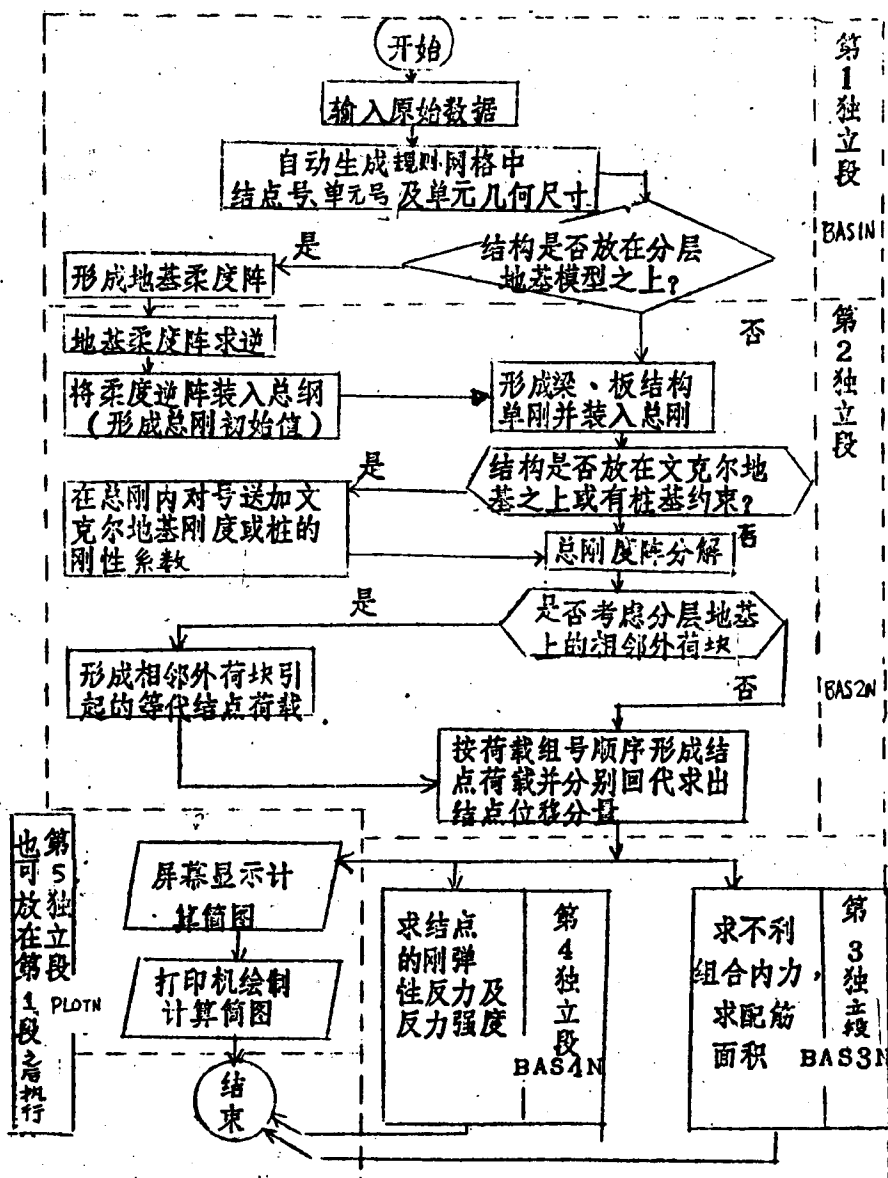
如属于钢筋混凝土结构，则印出各种组合内力中最大配筋（主筋）。如果截面尺寸太小，不满足四-(2)的控制条件，将印出超筋信息：CHAOJIN1（抗弯超筋），CHAOJIN2（抗扭剪超筋），CHAOJIN3（抗剪超筋）。

1. 地基反力与刚性约束反力

(1) 按不同的荷载组号分别印出各结点的地基反力，如某结点有竖向刚性约束，则可印出该结点的竖向刚性支座反力 (KN)。

(2) 如果属于弹性地基结构，还可按不同的荷载组号顺序，分别印出各结点的地基反力强度及总地基反力强度 (KN/m²)。

六、程序粗框图



七、 数据填写说明

(一)、数据及计算简图的一般规定

(1)、数据单位：除说明中注明者外，力为千牛（KN），长度为米（M）。

(2)、总坐标系：为右手坐标系。 x 、 y 轴位于所分析结构的平面内，且应与结构的相邻边界一一重合。规则结构上的一切点应在 $x \circ y$ 坐标系的第一象限。为减少总刚度矩阵中元素的个数，建议取结构的短边界为 x 轴。 z 轴垂直地面，向上为正。

(3)、计算简图：根据结构的实际情况，计算简图可分为规则正交部分、规则斜交部分和非规则部分。

详见下图。

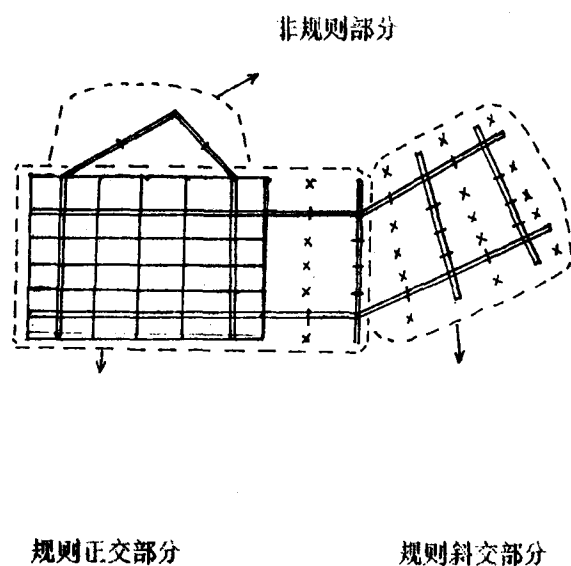


图 6 简图中的规则单元与非规则单元示图

如上图所示：

a) 规则正交部分：其特点是，梁单元轴线、板单元剖分线应和总坐标系 x （ y ）轴平行或垂直。亦即，其简图上的结点应该是平行 x 轴与平行 y 轴的二族正交线的交汇点。无论有洞口与无洞口结构，包括虚结点在内，其结成群应组成一个有行、列规律的矩形阵列。详见图6（图中， x 为虚结点）。

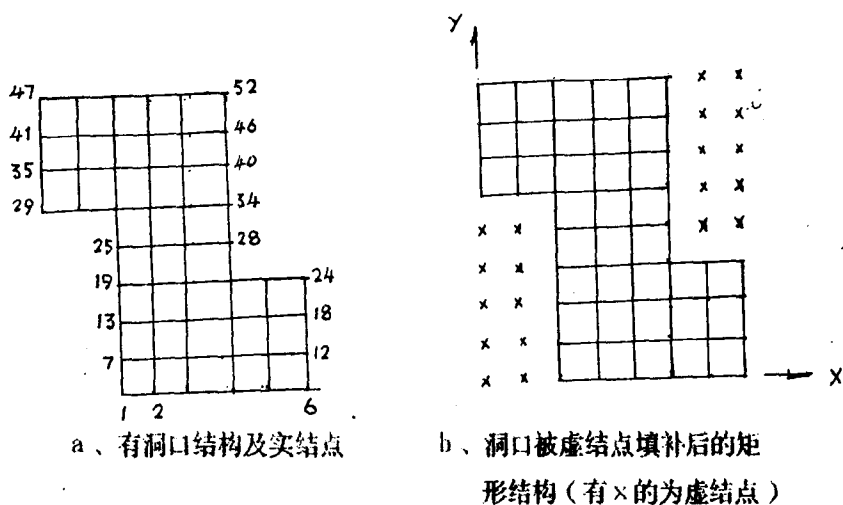


图 7 有洞口结构与虚结点设置

b) 规则斜交部分：其特点是，计算简图上的结点应该是二族斜交平行线或二族折线的交汇点。对于当前版本而言，此部分仅限梁单元。点群有斜交的行、列规律。

c) 非规则部分：梁单元轴线及结点分布不具备上述规律。

(4) 梁板组合结构的单元剖分不可过粗，无论在 x 方向或 y 方向，两条相邻的平行梁线之间，至少安排一条板的剖分线，否则，计算结果误差太大。

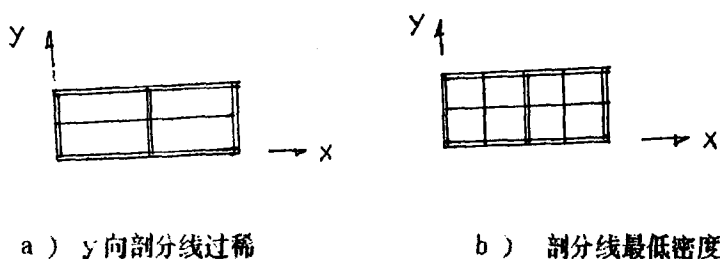
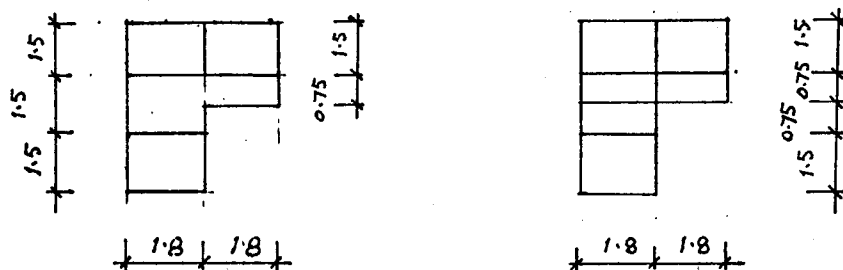


图 8 梁——板结构最低剖分密度

(5) 计算简图中，板单元只允许有四结点，不允许角点以外设结点（详见图 9）；梁单元只允许有两个结点。



a) 错误的简图

b) 正确的简图

图 9 简图举例

(6) 为了尽可能减少填写数据, 对于开洞结构, 程序定义了规则洞口与不规则洞口:

a、规则洞口

i、仅一个洞口的结构。如下图。图中, 双线条表示梁, 单线条分格表示板, 下同。

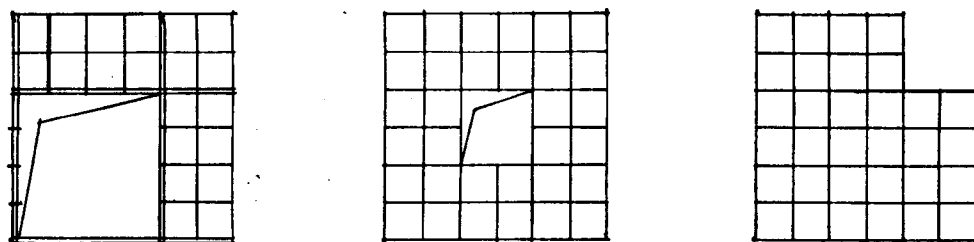
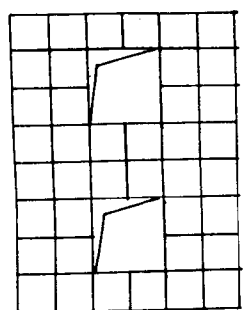


图 10 规则洞口示例(之一)

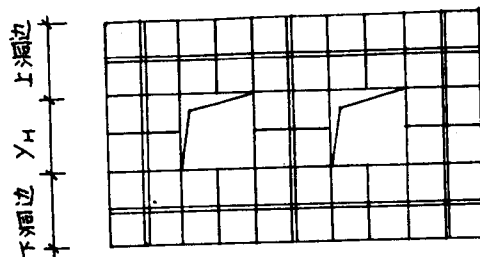
ii、板结构或梁板结构内, 有单行(列)多列(行)洞口时, 其洞口长度均为 xH (洞口宽度均为 yH), 且上、下洞边(左、右洞边)坐标位置对应相等者。

如下图所示:



左洞边 XH 右洞边

单列多行规则洞口



单行多列规则洞口

图 1 1 规则洞口示例 (之二)

iii、结构内有多行多列洞口时，对于每一行、每一列洞口都满足第ii条条件者。如下图：

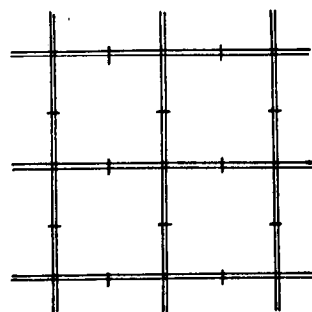
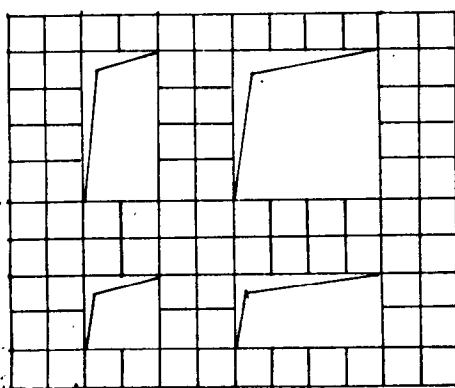


图 1 2 规则洞口示例 (之三)

上述i~iii种情况中，如有梁单元存在，则不能为洞口截断。即x方向各行的梁单元个数相等，y方向各列的梁单元个数相等。

b、不规则洞口

不满足上述规则洞口条件者。如下图：