变截面及等截面框架通用程序

黄振国
（土建系）

提　　要

本文导出了楔形变截面杆的刚度矩阵。并根据有限元位移法原理，采用扩展BASIC语言编制了可计算带有楔形变截面杆的钢筋混凝土框架计算程序。该程序可计算具有任何几何形式和支承方式的框架。在计算机上输出：①各结点线位移及转角，②各杆端内力（N、Q、M），③梁、柱截面配筋。

该程序已用于实际工程设计中。

一、简　　介

在工程实际中常遇到一些变截面杆件，如门式刚架的梁和柱均为变截面杆，其截面高度按直线变化，而带加腋梁的框架和连续梁均带有楔形变截面杆。在很多情况下，采用变截面杆则为了适应内力分布需要。如在弯矩和剪力较大的截面上增加截面高度，可减少钢筋用量，增加抗剪能力等。同时也使结点处钢筋的布置比较方便。为了解决这类工程结构的计算，编制了带楔形直杆的钢筋混凝土框架通用程序。本程序是在DJS—130机上用BASIC语言编制成的。

该程序已用于某大学物理楼及某些多层多跨工业厂房，带楔形变截面梁的框架设计中。实践证明：采用该程序计算速度快，精确可靠，使用简便。

$\therefore \sum_{n=1}^{\infty} [R_n(-1)]^{k_1}$ 收敛

故 $\lim_{n\to\infty} [R_n(-1)]^{k_1}=0$

从而可知 $\lim_{n\to\infty} R_n(-1)=0$

由（i）与（ii）我们得到下面的结论：

当等式（*）右端的级数在 $|x|=1$ 处收敛时，等式（*）也成立。

参　考　文　献

〔1〕Γ.Μ．菲赫金哥尔茨著：微积分学教程，一卷一分册，二卷二分册。

〔2〕侯双印，二项式（1+x）^{m}级数，郑州大学学报，（1963）NO.2，5.

二、程序适用范围及输出结果

1.结构形式：框架可具有任何几何形式（可有斜梁斜柱），结点为刚结点（也可简化为铰接），各杆可为：①等截面直杆；②阶梯形变截面杆；③楔形变截面杆。如计算机容量许可，能计算任意层数和跨数之框架。

2.支承方式：支座可为固定端、铰支座、沿垂直或水平方向的辊轴支承。

3.荷载类型：可作用结点荷载和非结点荷载

非结点荷载包括四种情况：

a）部分垂直均布荷载；

b）垂直杆轴的集中荷载；

c）平行于杆轴的集中荷载；

d）集中力偶矩。

4.输出形式及结果

计算结果在宽行打印机上打印出：

（1）各结点水平、垂直位移及转角（单位米或弧度）；

（2）各杆之杆端内力（轴力N，剪力Q，弯矩M）；

（3）各梁接九等分输出九个截面的配筋面积（cm^2），各柱给出上、下端截面配筋（cm^2）。

三、计算方法

1.基本原理：本程序采用有限元位移法，把框架的每根杆（梁或柱）看作一个单元（有截面改变时分为两个单元）考虑在结点处相连接组成整体框架。其解题步骤是：先将框架分割成单元，建立每个单元的杆端力与杆端位移的关系式，即单元刚度方程。由于汇交于某一结点的各杆端内力应与该结点的外力平衡，可建立结点力与结点位移的关系式，即位移法方程组。解方程求得各结点位移，知道各结点位移后，根据单元刚度方程可求得各杆端内力。

2.单元分析——组成单元刚度矩阵（杆坐标系）

（1） 等截面杆

首先建立单元体（每根杆）杆端内力与杆端位移的关系式。下图是框架中一个单元（e）杆长为L，截面积为A，截面惯性矩为I，弹性横量为E 。计算时采用杆坐标系（局部坐标系）以杆轴正向为$\bar{x}$，逆时针转90°为$\bar{y}$正向。

在杆坐标系中，单元每个端点有三个位移分量（图示为正向）。

用矩阵表示 $\left\{\bar{\delta}_1\right\} = \left\{\begin{matrix}\bar{u}_1\\ \bar{v}_1\\ \theta_1\end{matrix}\right\}$ $\left\{\delta_2\right\} = \left\{\begin{matrix}\bar{u}_2\\ \bar{v}_2\\ \theta_2\end{matrix}\right\}$

每个端点有三个力分量（图示为正向）

$\left\{\bar{F}_1\right\} = \left\{\begin{matrix}\bar{N}_1\\ \bar{Q}_1\\ \bar{M}_1\end{matrix}\right\}$ $\left\{\bar{F}_2\right\} = \left\{\begin{matrix}\bar{N}_2\\ \bar{Q}_2\\ \bar{M}_2\end{matrix}\right\}$

图 1

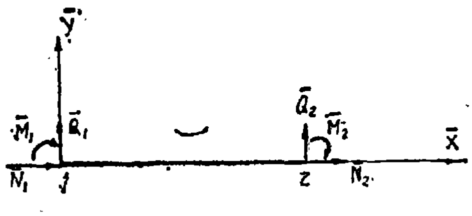

图 2

对于等截面杆，由结构力学可知：

$$\begin{Bmatrix} \overline{N}_1 \\ \overline{Q}_1 \\ \overline{M}_1 \\ \overline{N}_2 \\ \overline{Q}_2 \\ \overline{M}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{u}_1 \\ \overline{v}_1 \\ \overline{\theta}_1 \\ \overline{u}_2 \\ \overline{v}_2 \\ \overline{\theta}_2 \end{Bmatrix} \cdots\cdots(1)$$

(2)楔形变截面直杆

下图为楔形变截面杆

为计算需要先导出变截面积分公式

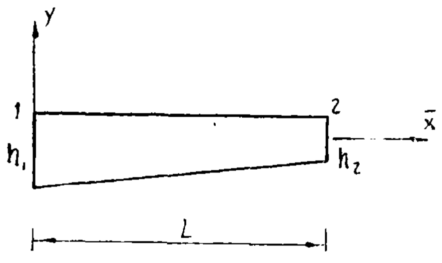

图3

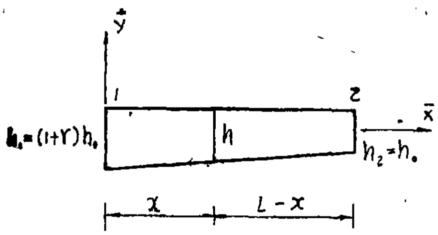

图4

令$h_2=h_o$

$h_1=h_2(1+r)=h_o(1+r)$ 其中$r=\frac{h_1-h_2}{h_2}$

则 $h=h_o+\left(\frac{L-x}{L}\right)rh_o=\left[1+r\left(1-\frac{x}{L}\right)\right]h_o=\mu h_o$

故$\frac{h}{h_o}=\mu$ $\left\{其中\ \mu=1+r\left(1-\frac{x}{L}\right),\ d\mu=-\frac{r}{L}dx\right\}$

令 $y=\frac{I_0}{I}=\frac{\frac{bh_0^3}{12}}{\frac{bh^3}{12}}=\left(\frac{h_0}{h}\right)^3=\frac{1}{\mu^3}$

取 $A_0=\int_0^L y\mathrm{d}x=\int_{1+r}^{1}\frac{1}{\mu^3}\left(-\frac{L}{r}\mathrm{d}\mu\right)=-\frac{L}{r}\int_{1+r}^{1}\frac{\mathrm{d}\mu}{\mu^3}=\frac{2+r}{2(1+r)^2}L$

$$A_1=\int_0^L yx\mathrm{d}x=\int_{1+r}^{1}\frac{1}{\mu^3}\left[L\left(1-\frac{\mu-1}{r}\right)\left(-\frac{L}{r}\mathrm{d}\mu\right)\right]=\frac{1}{2(1+r)}L^2$$

$$A_2=\int_0^L yx^2\mathrm{d}x=\left[\frac{1}{r^3}\ln(1+r)-\frac{2-r}{2r^2}\right]L^3$$

下面建立楔形变截面杆的杆端内力与杆端位移的关系式。首先导出1端有位移分量$\theta_1=1$时，在杆两端产生的力分量。

用结构力学方法有
$$\begin{cases}\delta_{11}\overline{M}_1+\delta_{12}\overline{M}_2=\theta_1\\ \delta_{21}\overline{M}_1+\delta_{22}\overline{M}_2=0\end{cases}\qquad\cdots(2)$$

其中δ_{11}为两端铰支楔形杆在1端作用$\theta\overline{M}_1=1$时，在$\overline{M}_1$方向上产生的位移分量(即1方向)δ_{22}，δ_{12}，δ_{21}类同，其中$\delta_{12}=\delta_{21}$

因变截面杆惯性矩I为变值，$\delta_{11}\delta_{22}$，δ_{12}必须用积分求得。由图5知

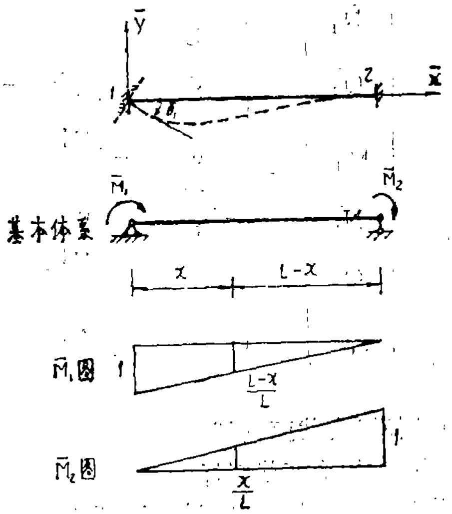

图 5

$$\overline{M}_1=-\left(\frac{L-x}{L}\right)\qquad \overline{M}_2=\frac{x}{L}$$

则 $\delta_{11}=\int_0^L\frac{1}{EI}\overline{M}_1^2\mathrm{d}x=\frac{1}{EI_0}\int_0^L\frac{I_0}{I}\left(\frac{L-x}{L}\right)^2\mathrm{d}x=\frac{1}{EI_0}\int_0^L y\left(1-\frac{2x}{L}+\frac{x^2}{L^2}\right)\mathrm{d}x$

$$=\frac{1}{EI_0}\left[A_0-\frac{2}{L}A_1+\frac{1}{L^2}A_2\right]$$

同理求得 $\delta_{22}=\int_0^L\frac{\overline{M}^2}{EI}\mathrm{d}x=\frac{1}{EI_0}\left[\frac{1}{L^2}A_2\right]$

$$\delta_{12}=\delta_{21}=\int_0^L\frac{\overline{M}_1\overline{M}}{EI}\mathrm{d}x=-\frac{1}{EI_0}\left[\frac{1}{L}A_1-\frac{1}{L^2}A_2\right]$$

解方程（2）得

$$\overline{M}_1=\frac{\delta_{22}}{\delta_{11}\delta_{22}-\delta_{12}^2}\overline{\theta}_1\qquad \overline{M}_2=-\frac{\delta_{12}}{\delta_{11}\delta_{22}-\delta_{12}^2}\overline{\theta}_1$$

令 $\delta_0=\delta_{11}\delta_{22}-\delta_{12}^2$

则有 $\overline{M}_1=\frac{\delta_{22}}{\delta_0}\overline{\theta}_1\quad \overline{M}_2=-\frac{\delta_{12}}{\delta_0}\overline{\theta}_1$

$$\bar{Q}_1=-\frac{\delta_{22}-\delta_{12}}{\delta_0 l}\bar{\theta}_1 \quad \bar{Q}_2=\frac{\delta_{22}-\delta_{12}}{\delta_0 L}\bar{\theta}_1$$

同理可求出，位移分量$\bar{u}_1\bar{u}_2\bar{v}_1\bar{v}_2\bar{\theta}_2$产生的力分量。则有：

$$\bar{N}_1=\frac{EF_0}{L}\ \frac{r}{\ln(1+r)}\bar{u}_1-\frac{EF_0}{L}\ \frac{r}{\ln(1+r)}\bar{u}_2$$

$$\bar{N}_2=-\frac{EF_0}{L}\ \frac{v}{\ln(1+r)}\bar{u}_1+\frac{EF_0}{L}\frac{r}{\ln(1+r)}\bar{u}_2$$

$$\bar{Q}_1=\frac{\delta_{11}+\delta_{22}-2\delta_{12}}{\delta_0 L^2}\bar{v}_1-\frac{\delta_{22}-\delta_{12}}{\delta_0 L}\bar{\theta}_1-\frac{\delta_{11}+\delta_{22}-2\delta_{12}}{\delta_0 L^2}\bar{V}_2-\frac{\delta_{11}-\delta_{12}}{\delta_0 L}\bar{\theta}_2$$

$$Q_2=-\frac{\delta_{11}+\delta_{22}-2\delta_{12}}{\delta_0 L}v_1+\frac{\delta_{22}-\delta_{12}}{\delta_0 L}\bar{\theta}_1+\frac{\delta_{11}+\delta_{22}-2\delta_{12}}{\delta_0 L^2}\bar{V}_2+\frac{\delta_{11}-\delta_{12}}{\delta_0 L}\bar{\theta}_2$$

$$\bar{M}_1=-\frac{\delta_{22}-\delta_{12}}{\delta_0 L}\bar{V}_1+\frac{\delta_{22}}{\delta_0}\bar{\theta}_1+\frac{\delta_{22}-\delta_{12}}{\delta_0 L}\bar{v}_2-\frac{\delta_{12}}{\delta_0}\bar{\theta}_2$$

$$\bar{M}_2=-\frac{\delta_{11}-\delta_{12}}{\delta_0 L}\bar{V}_1-\frac{\delta_{12}}{\delta_0}\bar{\theta}_1+\frac{\delta_{11}-\delta_{12}}{\delta_0 L}\bar{v}_2+\frac{\delta_{11}}{\delta_0}\bar{\theta}_2$$

式中　$F_0=bh_0$

如令 $\Delta_0=\delta_{11}+\delta_{22}-2\delta_{12}$

$\Delta_1=\delta_{11}-\delta_{12}$

$\Delta_2=\delta_{22}-\delta_{12}$

同前也写成矩阵形式

$$\begin{Bmatrix}\bar{N}_1\\ \bar{Q}_1\\ \bar{M}_1\\ \bar{N}_2\\ \bar{Q}_2\\ \bar{M}_2\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{EF_0}{L}\frac{r}{en(1+r)} & 0 & 0 & -\frac{EF_0}{L}\frac{r}{en(1+r)} & & \\ 0 & \frac{\Delta_0}{\delta_0 L^2} & -\frac{\Delta_2}{\delta_0 L} & 0 & -\frac{\Delta_0}{\delta_0 L^2} & -\frac{\Delta_1}{\delta_0 L}\\ 0 & -\frac{\Delta_2}{\delta_0 L} & \frac{\delta_{22}}{\delta_0} & 0 & \frac{\Delta_2}{\delta_0 L} & -\frac{\delta_{12}}{\delta_0}\\ -\frac{EF_0}{L}\frac{r}{en(1+r)} & 0 & 0 & \frac{EF_0}{L}\frac{r}{en(1+r)} & 0 & 0\\ 0 & -\frac{\Delta_0}{\delta_0 L^2} & \frac{\Delta_2}{\delta_0 L} & 0 & \frac{\Delta_0}{\delta_0 L^2} & \frac{\Delta_1}{\delta_0 L}\\ 0 & -\frac{\Delta_1}{\delta_0 L} & -\frac{\delta_{12}}{\delta_0} & 0 & \frac{\Delta_1}{\delta_0 L} & \frac{\delta_{11}}{\delta_0}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\bar{u}_1\\ \bar{V}_1\\ \bar{\theta}_1\\ \bar{u}_2\\ \bar{V}_2\\ \bar{\theta}_2\end{Bmatrix}\cdots(3)$$

（1）式和（3）式可简写为

$$\{\bar{F}\}^{(e)}=[C]^{(e)}\{\bar{\delta}\}^{(e)} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

$[C]^{(e)}$为6×6阶矩阵，称为局部坐标系中单元刚度矩阵。

3．坐座转换及公共坐标系单元刚度矩阵

上面所述杆端内力和杆端位移都是以杆件本身的坐标（局部坐标）为基准的。由于结构

中各杆体的方向不一致，因而列出方程式就不统一。为了便于建立整个结构的位移方程，应将杆端内力及杆端位移都换成统一的公共坐标系为基准来表示。

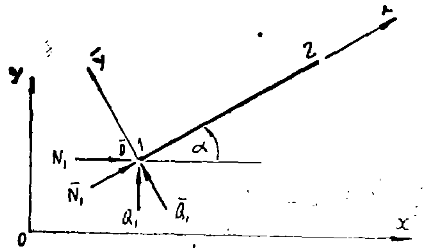

图 6

如图6所示，结构中任一杆，$\bar{x}\,\bar{o}\,\bar{y}$ 为杆坐标系。

xoy为公共坐标系.

α表示由x轴到$\bar{X}$轴的角度逆时针为正，则有

$$\left.\begin{aligned}\overline{N_1} &= N_1\cos\alpha + Q_1\sin\alpha\\ \overline{Q_1} &= -N_1\sin\alpha + Q_1\cos\alpha\\ \overline{M_1} &= M_1\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(5)$$

同理可列出另一端的关系式，两组方程合成一矩阵方程为：

$$\begin{Bmatrix}\overline{N_1}\\ \overline{Q_1}\\ \overline{M_1}\\ \overline{N_2}\\ \overline{Q_2}\\ \overline{M_2}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos\alpha & \sin\alpha & 0 & 0 & 0 & 0\\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0\\ 0 & 0 & 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \begin{Bmatrix}N_1\\ Q_1\\ M_1\\ N_2\\ Q_2\\ M_2\end{Bmatrix} \quad \cdots\cdots(6)$$

上式可简写为

$$\{\overline{F}\}^{(e)} = [T]\ \{F\}^{(e)} \quad \cdots\cdots(7)$$

其中〔T〕称为（e）单元坐标转换矩阵.

可证明〔T〕的逆矩阵等于它的转置矩阵，即

$$[T]^{-1} = [T]^{T}$$

则（7）式的逆转换式为

$$\{F\}^{(e)} = [T]^{-1}\ \{\overline{F}\}^{e} = [T]^{T}\{\overline{F}\}^{e} \quad \cdots\cdots(8)$$

对结点位移也作同样处理，则

$$\{\overline{\delta}\}^{(e)} = [T]\{\delta\}^{(e)} \quad \cdots\cdots(9)$$

$$\{\delta\}^{(e)} = [T]^{T}\{\overline{\delta}\}^{(e)} \quad \cdots\cdots(10)$$

将（4）代入（8）

$$\{F\}^{(e)} = [T]^{T}\ \{\overline{F}\}^{(e)} = [T]^{T}\ [C]^{(e)}\ \{\overline{\delta}\}^{(e)}$$

再将（9）式代入

$$\{F\}^{(e)}=[T]^T[C]^{(e)}\ [T]\{\delta\}^{(e)}$$

取 $[B]^{(e)}=[T]^T[C]^{(e)}[T]$ ……（11）

则 $\{F\}^{(e)}=[B]^{(e)}\ \{\delta\}^{(e)}$ ……（12）

上式即公共坐标系单元杆端力与杆端位移关系式

$[B]^{(e)}$ 为公共坐标系的单元刚度矩阵

4.整体刚度矩阵

由于汇交于某一结点的杆端内力，应与该结点的外力平衡，可建立结点力与结点位移关系式。又每杆的杆端内力由固端内力 F^0 和位移内力 $F^{(e)}$ 两部分组成。如结点外力为 $\overline{P}$，则

$$\overline{P}=\Sigma F^0+\Sigma F^{(e)} \quad \cdots\cdots(13)$$

位移内力已由（12）式求出，衹与结点位移有关，代入（13）式得

$$\overline{P}=\Sigma F^0+\Sigma[B]^{(e)}\{\delta\}^{(e)} \quad \cdots\cdots(14)$$

将固端内力移到等号左边，并与 $\overline{P}$ 合并为P

$$P=\overline{P}-\Sigma F^0 \quad \cdots\cdots(15)$$

则 $P=\Sigma[B]^{(e)}\ \{\delta\}^{(e)}$ ……（16）

（16）式即某结点，某位移方向上，结点力与结点位移关系式.

整体结构有几个结点位移分量，就能列出同样数目的与位移相应的方程式，组成一个方程组，写成矩阵形式为

$$\{P\}=[k]\{\delta\} \quad \cdots\cdots(17)$$

式中 $[k]$—称为整体刚度矩阵，由每个单元刚度矩阵，在相应结点位移方向上叠加形成，其步骤可参看结构力学，矩阵分析部分。

$\{\delta\}$——是整个结构的结点位移向量。

5.非结点荷载

由前节（15）式知，结点荷载由两部分组成：①直接作用在结点的外荷载；②非结点荷载产生的固端内力。因此非结点荷载可转化为等效结点荷载。其步骤是：先在各结点加约束，求出各杆的固端内力，然后反号进行集成，即得出等效结点荷载。

（1）等截面直杆的固端内力

从略，见结构力学。

（2）楔形变截面杆的固端内力.

a）垂直杆轴的集中荷载

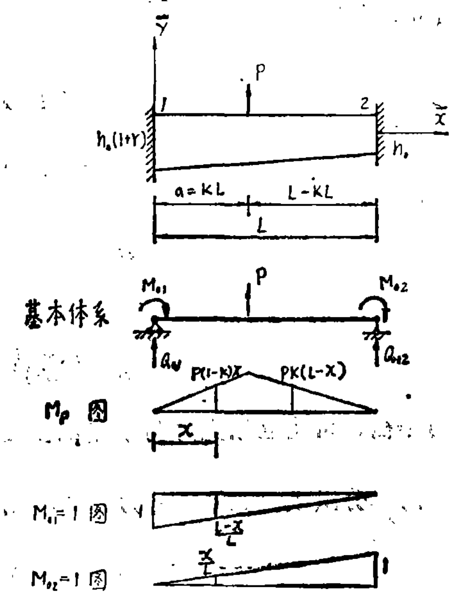

图 7

$$a=kL$$

$0\leqslant x\leqslant kL$时 $\quad M_p'=P(1-k)x$

$kL\leqslant x\leqslant L$时 $\quad M''_p=P(L-x)k$

$$\overline{M}_1=-\frac{L-x}{L}$$

$$\overline{M}_2=\frac{x}{L}$$

$$\delta_{11}=\int_0^L\frac{1}{EI}\overline{M_1}^2dx=\frac{1}{EI_0}\left[A_0-\frac{2}{L}A_1+\frac{1}{L^2}A_2\right]$$

$$\delta_{22}=\int_0^L\frac{1}{EI}\overline{M}^2_2dx=\frac{1}{EI_0}\left[\frac{1}{L^2}A_2\right]$$

$$\delta_{12}=\delta_{21}=\int_0^L\frac{1}{EI}\overline{M}_1\ \overline{M}_2\ dx=-\frac{1}{EI_0}\left[\frac{1}{L}A_1-\frac{1}{L^2}A_2\right]$$

$$\Delta_{1P}^{P}=\int_0^L\frac{M_p\overline{M}_1}{EI}=\frac{1}{EI_0}\int_0^L\frac{I_0}{I}M_p\overline{M}_1dx$$

$$=\frac{1}{EI_0}\left[\int_0^a yM'_p\overline{M}_1dx+\int_0^L yM''_pM_1dx\right]$$

$$=\frac{-P}{EI_0}\left[A_{1(0,a)}-KA_1-\frac{1}{L}A_{2(0,a)}+\frac{K}{L}A_2+KLA_{0(a,L)}\right.$$

$$\left.-KA_{1(a,L)}\right]$$

同理 $\Delta_{2P}^{P}=\int_0^L\frac{M_p\overline{M}_2}{EI}dx=\frac{P}{EI_0}\left[\frac{1}{L}A_{2(0,a)}+KA_{1(a,L)}-\frac{K}{L}A_2\right]$

其中A_0，A_1，A_2同前

$$A_{0(0,a)}=\int_0^a y\,dx \qquad A_{0(a,1)}=\int_a^L y\,dx$$

$$A_{1(0,a)}=\int_0^a yx\,dx \qquad A_{1(a,1)}=\int_a^L yx\,dx$$

$$A_{2(0,a)}=\int_0^a yx^2\,dx \qquad A_{2(a,1)}=\int_a^L yx^2\,dx$$

$$A_{3(0,a)}=\int_0^a yx^3\,dx \qquad A_{3(a,1)}=\int_a^L yx^3\,dx$$

由定义知：

$$A_0=\int_0^L y\,dx=\int_0^a y\,dx+\int_a^L y\,dx=A_{0(0,a)}+A_{0(a,1)}$$

$$A_1=A_{1(0,a)}+A_{1(a,L)}$$

$$A_2=A_{2(0,a)}+A_{2(a,L)}$$

$$A_3=A_{3(0,a)}+A_{3(a,L)}$$

则$A_{1(a,L)}=A_1-A_{1(0,a)}$

因此只需求出楔形梁的0～a段积分，同前方法

$$A_{0(0,a)}=\frac{[2+\gamma(2-k)]k}{2(1+\gamma)^2[1+\gamma(1-k)]^2}L$$

$$A_{1(0,a)}=\left\{\frac{k^2}{2(1+\gamma)[1+\gamma(1-k]^2}\right\}L^2$$

$$A_{2(0,a)}=\left\{\frac{1}{\gamma^3}\ln\left(\frac{1+\gamma}{1+\gamma(1-k)}\right)-\frac{[2(1+\gamma)-3\gamma k]k}{2\gamma^2[1+\gamma(1-k)]^2}\right\}L^3$$

$$A_{3(0,a)}=\left\{\frac{3(1+\gamma)}{\gamma^4}\ln\left\{\frac{1+\gamma}{1+\gamma(1-k)}\right\}\right.$$

$$\left.-\frac{[2\gamma^2k^2-9\gamma(1+\gamma)k+6(1+\gamma)^2]k}{2\gamma^3[1+\gamma(1-k)]^2}\right\}L^4$$

由图7楔形梁两段变形协调条件得

$$\begin{cases}\delta_{11}M_{01}+\delta_{12}M_{02}+\Delta^{p}_{1p}=0\\ \delta_{21}M_{01}+\delta_{22}M_{02}+\Delta^{p}_{2p}=0\end{cases}$$

解方程得

$$\begin{cases}M_{01}=-\dfrac{\Delta^{p}_{1p}\,\delta_{22}-\Delta^{p}_{2p}\delta^{12}}{\delta_0}\\ M_{02}=-\dfrac{\Delta^{p}_{2p}\,\delta_{11}-\Delta^{p}_{1p}\,\delta_{12}}{\delta_0}\\ Q_{01}=-P(1-k)-\dfrac{M_{01}+M_{02}}{L}\\ Q_{02}=-PK+\dfrac{M_{01}+M_{02}}{L}\\ N_{01}=N_{02}=0\end{cases}$$

式中$\delta_0=\delta_{11}\delta_{22}-\delta_{12}^2$

b）部分均布荷载

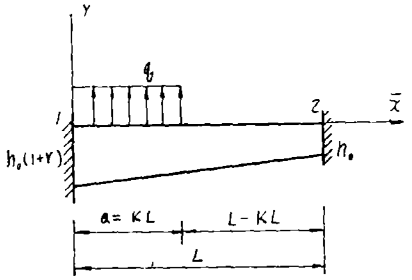

图8

$0\leqslant x\leqslant a$时

$$M'_p=q\left(kLx-\frac{k^2L}{2}x-\frac{x^2}{2}\right)$$

$a\leqslant x\leqslant L$时

$$M''_p=\frac{qLk^2}{2}(1-x)$$

同上节导出固端内力

$$\begin{cases}N_{01}=0\\ Q_{01}=-qkL\left(1-\dfrac{k}{2}\right)-\dfrac{(M_{01}+M_{02})}{L}\\ M_{01}=-\dfrac{\Delta^{q}_{1p}\,\delta_{22}-\Delta^{q}_{2p}\,\delta_{12}}{\delta}\\ N_{02}=0\\ Q_{02}=-qk^2L/2+\dfrac{(M_{01}+M_{02})}{L}\\ M_{02}=-\dfrac{\Delta^{q}_{2p}\,\delta_{11}-\Delta^{q}_{1p}\delta_{12}}{\delta_0}\end{cases}$$

其中 $\Delta^{q}_{1P}=\dfrac{-q}{EI_0}\Big[\dfrac{K^2L^2}{2}A_{0(a,L)}-\dfrac{K^2L}{2}A_1-\dfrac{K^2L}{2}A_{1(a,L)}$

$$+KLA_{1(0,a)}-\frac{1}{2}A_{2(0,a)}-KA_{2(0,a)}+\frac{K^2}{2}A_2+\frac{1}{2L}A_{3(0,a)}\Big\}$$

$$\Delta^{q}_{2P}=\frac{q}{EI_0}\Big\{\frac{K^2L}{2}A_{1(a,L)}-\frac{K^2}{2}A_2+KA_{2(0,a)}-\frac{1}{2L}A_{3(0,a)}\Big\}$$

c）集中力偶矩

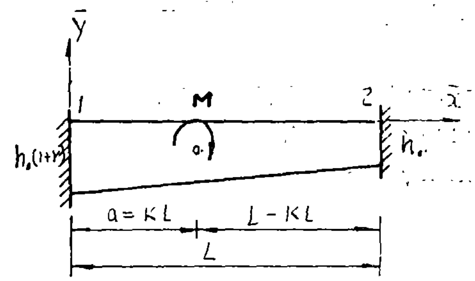

图 9

$0\leqslant x\leqslant a$时 $\quad M'_P=\dfrac{Mx}{L}$

$a\leqslant x\leqslant l$ 时

$M''_P=-\dfrac{M}{L}(L-x)$

同前面方法求出固端内力

$$\begin{cases}N_{01}=0\\ Q_{01}=-\dfrac{M}{L}-\dfrac{M_{01}+M_{02}}{L}\\ M_{01}=-\dfrac{\Delta^{m}_{1P}\,\delta_{22}-\Delta^{m}_{2P}\,\delta_{12}}{\delta_0}\\ N_{02}=0\\ Q_{02}=\dfrac{M}{L}+\dfrac{M_{01}+M_{02}}{L}\\ M_{02}=-\dfrac{\Delta^{m}_{2P}\,\delta_{11}-\Delta^{m}_{1P}\,\delta_{12}}{\delta_0}\end{cases}$$

其中 $\Delta^{m}_{1P}=\dfrac{M}{EI_0}\Big\{A_{0(a,L)}-\dfrac{1}{L}A_1-\dfrac{1}{L}A_{1(a,L)}+\dfrac{1}{L^2}A_2\Big\}$

$$\Delta^{m}_{2P}=\frac{M}{EI_0}\Big\{-\frac{1}{L}A_{1(a,L)}+\frac{1}{L^2}A_2\Big\}$$

d）平行杆轴的集中荷载

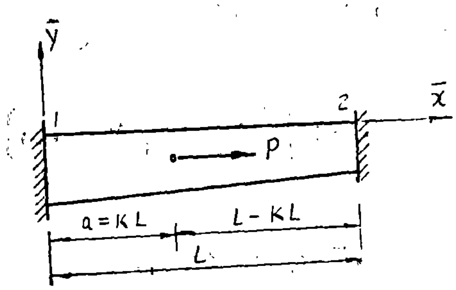

图 10

$$N_{01}=\left\{\frac{\ln[1+r(1-k)]}{\ln(1+r)}-1\right\}P$$

$$Q_{01}=0$$

$$M_{01}=0$$

$$N_{02}=-\frac{\ln[1+r(1-k)]}{\ln(1+r)}P$$

$$Q_{02}=0$$

$$M_{02}=0$$

6、引入支承条件

如第i个位移方向受到支承约束不能有位移时，即$\delta_i=0$。则要使$\delta_i=0$，必须（17)式修改

①矩阵〔K〕中第i行与i列中主对角线元素K_{ii}改为1，其他元素为0。

②荷载向量｛P｝中，第i行元素为0，修改后的（17）式为

$$[K]^*\{\delta\}=\{P\}^* \quad \cdots\cdots\cdots(18)$$

7、解方程求出结点位移

解方程〔K〕*｛δ｝=｛P｝*,即求出整个结构的结点位移｛δ｝。解方程的方法很多，为了节省存贮单元，本程采用带消去法。

8、求各杆的杆端内力

各杆的杆端内力由两部分组成：一部分是杆端位移内力（由（4）式求得）；另一部分是非结点荷载的固端内力。将两部分叠加，即得杆端内力。

$$\{\bar{s}\}^{(e)}=[c]^{(e)}\{\bar{\delta}\}^{(e)}+\{\bar{F}^0\}^{(e)} \quad \cdots\cdots\cdots(19)$$

其中$\{\bar{\delta}\}^{(e)}$可由（9）式求得。

9、计算配筋

按现行规范《钢筋混凝土结构设计规范》（TJ－10－74）

（1）梁配筋

$$F_a=\frac{R_w}{R_a}\left(1-\sqrt{1-\frac{|KM|}{0.5bh_0^2R_w}}\right)bh_0 \quad \cdots\cdots\cdots(20)$$

式中 $h_0=h-0.035$

k——为安全系数

（2）柱配筋

$$e_0=\left|\frac{M}{N}\right|$$

偏心距有关系数 $\alpha_e = \begin{cases} 0.22 & 当\frac{e_0}{h} \geqslant 1时 \\ \dfrac{0.1}{0.3+\frac{e_0}{h}}+0.143 & 当\frac{e_0}{h}<1时 \end{cases}$

偏心距增大系数

$$\eta = \begin{cases} 1 \quad ; & 当\frac{L_0}{h} \leqslant 8 时 \\ \dfrac{1}{1-\dfrac{KN}{10\alpha_e EI}L_0^2} \quad ; & 当\frac{L_0}{h} > 8 时 \end{cases}$$

$$e_1 = \eta e_0 + \frac{h}{2} - 0.035$$

$$e_2 = \eta e_0 - \frac{h}{2} + 0.035$$

钢筋面积

$$F_A = \begin{cases} \dfrac{KNe_2}{Rg(h_0-0.035)} & 当\dfrac{KN}{R_w b}<0.07时 \\ \left(\dfrac{KN}{Rg}\right)\dfrac{e_1-h_0\left(1-\dfrac{KN}{2R_w bh_0}\right)}{h_0-0.035} & 当0.07 \leqslant \dfrac{KN}{R_w d} \leqslant 0.55h。 \\ \dfrac{KNe_1-0.4R_w bh_0^2}{Rg(h_0-0.035)} & 当\dfrac{KN}{R_w b}>0.55h \end{cases}$$

还应满足最小配筋率条件

$F_A \geqslant 0.002bh$。

以上公式单位用吨、米。

四、程序设计

本程序用扩展BASIC语言编制。

1. 框架原程序中所用符号

Z_1——单元数（即杆数）

Z_2——结点数。

Z_3——支承数（支座约束数）

P_1——结点荷载数

P_2——非结点荷载数。

E_1——弹性模量

D_5——半带宽（等于杆两端编号最大差加1乘3）

W_1——位移分量个数（$W_1=3\times Z_2$）

Z（Z1，2）——杆端结点码数组

L（Z1）——杆长数组（米）

O（Z1）——杆倾角数组（度）

A（Z1，3）——杆截面宽度及高度数组，（第一个数为宽度，第二数为始端高，第三数为末端高）

D（Z3）——支承约束数组

P（P1，2）——结点荷载数组，（第一数为荷载值，第二数为荷载方向，即对应位移分量的编码）。

Q（P2，4）——非结点荷载数组，（4个数分别为荷载值，荷载长度或位置，荷载所在杆编号，荷载类型）

S（6）——固端内力数组，

T（6，6）——坐标转换矩阵，

C（6，6）——杆坐标系单元刚度矩阵

B（6，6）——公共坐标系单元刚度矩阵

F（W1）——结点荷载向量。

K（W1，D5）——整体刚度矩阵，

R1——混凝土抗弯强度，

R_2——钢筋计算强度。

K1，K2——梁、柱安全系数

G（Z1）——柱的计算长度数组，如为梁构件时，输入0。

2.框架源程序

框 架 原 程 序

```
0100 REM        KNANJIA NEILI JI
     PEIJIN（注）
0110 REM        SHURU  SHUJU
0120 READ Z1,Z2, Z3, P1, P2, E1, D5
0130 LET W1=3*Z2
0135 DIM G(Z1)
0140 DIM Z(Z1,2),L(Z1)O(Z1),A(Z1,3)
0142 DIM D(Z3),P(P1,2),Q(P2,4)
0144 DIM S(6),T(6,6),C(6,6),B(6,6),
     F(W1)
0146 DIM U(6),K(W1,D5),W(6),N(6)
0148 FOR I=1 TO Z1
0150 FOR J=1 TO 2
0152 READ Z(I,J)
0154 NEXT J
0156 NEXT I
0158 FOR I=1 TO Z1
0160 READ L(I)
0162 NEXT I
0164 FOR I=1 TO Z1
0166 READ O(I)
0168 NEXT 1
0170 FOR I=1 TO Z1
0172 FOR J=1 TO 3
0174 READ A(I,J)
0176 NEXT J
0178 NEXT I
0182 FOR I=1 TO Z3
```

```
0184 READ D(I)
0186 NEXT I
0187 IF P1=0 THEN 0194
0188 FOR I=1 TO P1
0190 FOR J=1 TO 2
0191 READ P(I,J)
0192 NEXT J
0193 NEXT I
0194 IF P2=0 THEN 0212
0195 FOR I=1 TO P2
0196 FOR J=1 TO 4
0197 READ O(I,J)
0198 NEXT J
0199 NEXT I
0210 REM   XINGCHENG JIEDIAN
     ZHONGHEZAI
0212 FOR I=1 TO W1
0214 LET F(I)=0
0216 NEXT I
0218 IF P1=0 THEN 0228
0220 FOR I=1 TO P1
0222 LET J=P(I,2)
0224 LET F(J)=P(I,1)
02   NEXT I
0228 IF P2=0 THEN 0310
0229 FOR H=1 TO P2
0230 LET E=Q(H,3)
0231 IF  A(E,3)<>0 THEN 0234
0232 GOSUB 0710
0233 GOTO 0235
0234 GOSUB 1710
0235 GOSUB 0810
0236 FOR J=1 TO 6
0237 LET  U(J)=0
0238 FOR  R=1  TO  6
0240 LET U(J)=U(J)-T(R,J)
        •S(R)
0242 NEXT R
0244 NEXT  J
0246 LET  A1=Z(E,1)
0248 LET  B1=Z(E,2)
0250 LET  F(3•A1-2)=F(3•A1-2)
              +U(1)
0252 LET  F(3•A1-1)=F(3•A1-1)
              +U(2)
0254 LET  F(3•A1)=F(3•A1)
              +U(3)
0256 LET F(3•B1-2)=F(3•B1-2)
              +U(4)
0258 LET  F(3•B1-1)=F(3•B1-1)
              +U(5)
0260 LET F(3•B1)=F(3•B1)+U(6)
0262 NEXT H
0300 REM XINGCHENG ZHE-
     ENGTI GANGDU
0310 FOR  I=1  TO W1
0320 FOR J=1 TO D5
0322 LET K(I,J)=0
0324 NEXT J
0326 NEXT I
0330 LET E=1
0332 GOSUB 0910
0334 FOR  I=1  TO 2
0336 FOR X=1 TO 3
0338 LET  H1=3•(I-1)+X
0340 LET  H2=3•(Z(E,I)-1)+X
0342 FOR  J=1 TO 2
0344 FOR Y=1  TO 3
0346 LET H3=3•(J-1)+Y
0348 LET H4=3•(Z(E,J)-1+Y
0349 IF  H2>H4 THEN 0352
0350 LET H4=H4-H2+1
0351 LET K(H2,H4)=K(H2,H4)
                  +B(H1,H3)
0352 NEXT Y
0354 NEXT J
0356 NEXT X
0358 NEXT  I
0360 LET E=E+1
0362 IF E<=Z1 THEN 0332
0400 REM    YINRU ZHICHENG
                  TIAOJIAN
0410 FOR I=1 TO Z3
0414 LET J=D(I)
0416 LET  K(J, 1)=1
0418 LET  F(J)=0
```

```
0420 IF J=1 THEN 0436
0422 IF J<D5 THEN 0428
0424 LET J1=D5-1
0426 GOTO 0430
0428 LET J1=J-1
0430 FOR R=1 TO J1
0432 LET K(J-R,R+1)=0
0434 NEXT R
0436 FOR R=2 TO D5
0438 LET K(J,R)=0
0440 NEXT R
0442 NEXT I
0500 REM   JIE FANGCHENG
           SHUCHU  WEIYI
0510 FOR R=1 TO W1-1
0512 IF W1>R+D5-1 THEN 0518
0514 LET I1=W1
0516 GOTO 0520
0518 LET I1=R+D5-1
0520 FOR I=R+1 TO I1
0522 LET G=I-R+1
0524 LET C1=K(R, G)/K(R, 1)
0526 FOR J=1 TO D5-G+1
0528     LET M=J+I-R
0530     LET K(I, J)=K(I, J)-C1*K
          (R, M)
0532 NEXT J
0534 LET F(I)=F(I)-C1*F(R)
0536 NEXT I
0538 NEXT R
0540 LET F(W1)=F(W1)/K(W1, 1)
0542 FOR I=W1-1 TO 1 STEP -1
0544 IF D5>W1-I+1 THER 0550
0546 LET J1=D5
0548 GOTO 0552
0550 LET J1=W1-I+1
0552 FOR J=2 TO J1
0554 LET H=J+I-1
0556 LET F (I) =F (I) -K (I, J) *
      F (H)
0558 NEXT J
0560 LET F (I) =F (I) /K (I, 1)
0561 NEXT I
0563 GOTO 0610
0564 PRINT "Z", "U", "V", "W"
0566 FORI =1 TO Z2
0568 PRINT I,F (3*I-2) ,F(3*I-1),
      F(3*I)
0570 NEXT I
0600 REM  OIU NEILI SHUCHU NEILI
0610 FOR E=1 TO Z1
0611 IF A (E, 3) =0 THEN 0614
0612 GOSUB 1610
0613 GOTO 0616
0614 GOSUB 1010
0616 GOSUB 0810
0618 FOR I=1 TO 2
0620 FOR V=1 TO 3
0622 LET H1=3*(I-1)+V
0624 LET H2=3*(Z(E, I)-1)+V
0626 LETW (H1) =F(H2)
0628 NEXT V
0630 NEXT I
0632 FOR I=1 TO 6
0634 LET N(I)=0
0636 FOR J=1 TO 6
0638 FOR R=1 TO 6
0640 LET N (I) =N (I)+C(I, J)*T
        (J, R)*W (R)
0642 NEXT R
0644 NEXT J
0645 LET K(E, I)=N(I)
0646 NEXT I
0648 IF P2=0 THEN 0666
0650 FOR H=1 TO P2
0651 IF Q (H, 3)=E THEN 0653
0652 GOTO 0664
0653 IF A(E, 3)=0 THEN 0656
0654 GOSUB 1710
0655 GOTO 0658
0656 GOSUB 0710
0658 FOR J=1 TO 6
0660 LET N(J)=N(J)+S(J)
0661 LET K(E, J)=N(J)
0662 NEXT J
0664 NEXT H
```

```
0665 NEXT E
0666 OPEN FILE(0, 1), "¥LPT"
0668 PRINT FILE (0), "KJ-1-3
     (81·4·10)"
0670 PRINT FILE (0), "Z", "U",
     "V", "W"
0672 FOR I=1 TO Z2
0673 PRINT FILE(0), I, F(3•I-2),
     F(3•I-1), F(3•I)
0674 NEXT I
0676 FOR E=1 TO Z1
0678 PRINT FILE(0), "E="; E
0680 PRINT FILE(0), "N1=";
     K(E, 1), "Q1="; K(E, 2),
     "M1="; K(E, 3)
0682 PRINT FILE(0), "N2=";
     K(E, 4), "Q2="; K(E, 5),
     "M2="; K(E, 6)
0684 NEXT E
0686 CLOSE FILE [0]
0688 GOTO 1105
0700 REM ZICE-HENGXUQIU GUDUAN
     NEILI
0710 LET G1=Q(H, 1)
0714 LET S1=Q(H, 2)
0716 LET E=Q(H, 3)
0718 LET V1=Q(H, 4)
0720 LET L1=L(E)
0722 LET S2=L1-S1
0724 IF V1=2 THEN 0744
0726 IF V1=3 THEN 0758
0728 IF V1=4 THEN 0772
0730 LET S(1)=0
0732 LET S(2)=-G1•S1•(2-2•S1•
     S1/L1↑2+S1↑3/L1↑3)/2
0734 LET S(3)=G1•S1•S1•(6-8•S1/
     L1+3•S1•S1/L1↑2)/12
0736 LET S(4)=0
0738 LET S(5)=-G1•S1-S(2)
0740 LET S(6)=-G1•S↑3•(4-3•S1/
     L1)/(12•L1)
0742 GOTO 0784
0744 LET S(1)=0
0746 LET S(2)=-G1•S2•S2•(L1+2•
     S1)/L1↑3
0748 LET S(3)=G1•S1•S1•S2/L1↑2
0750 LET S(4)=0
0752 LET S(5)=-G1•S1•S1•(L1+2•
     S2)/L1↑3
0754 LET S(6)=-G1•S1•S1•S2/L1↑2
0756 GOTO 0784
0758 LET S(1)=-G1•S2/L1
0760 LET S(2)=0
0762 LET S(3)=0
0764 LET S(4)=-G1•S1/L1
0766 LET S(5)=0
0768 LET S(6)=0
0770 GOTO 0784
0772 LET S(1)=0
0774 LET S(2)=-6•G1•S1•S2/L1↑3
0776 LET S(3)=G1•S2•(2•L1-3•S2)
     /L1↑2
0778 LET S(4)=0
0780 LET S(5)=6•G1•S1•S2/L1↑3
0782 LET S(6)=G1•S1•(2•L1-3•S1)
     /L1↑2
0784 RETURN
0800 REM ZICHEGXU ZUOBIAO ZHU
     ANHUAN JUZHEN
0810 LET X=O(E)•3.14159/180
0814 FOR I=1 TO 6
0816 FOR J=1 TO 6
0818 LET T(I, J)=0
0820 NEXT J
0822 NEXT I
0824 LET T(1, 1)=cos(X)
0826 LET (1, 2)=SIN(X)
0828 LET (2, 1)=-SIN(X)
0830 LET (2, 2)=cos(X)
0832 LET (3, 3)=1
0834 FOR I=1 TO 3
0836 FOR J=1 TO 3
0838 LET T(I+3, J+3)=T(I, J)
0840 NEXT J
0842 NEXT I
0844 RETURN
```

```
0900 REM ZICHNGXU DANYUAN GA-
        NGDU JUZHEN
0910 IF A(E, 3)<>0 THEN 0913
0911 GOSUB 1010
0912 GOTO 0914
0913 GOSUB 1610
0914 GOSUB 0810
0916 FOR I=1 TO 6
0918 FOR J=1 TO 6
0920 LET B(I, J)=0
0922 FOR R=1 TO 6
0924 FOR M=1 TO 6
0926 LET B(I, J)=B(I, J)+T(R,I)
         *C(R, M)*T(M, J)
0928 NEXT M
0930 NEXT R
0932 NEXT J
0934 NEXT I
0936 RETURN
1000 REM ZICHEGXU JUBU DANYU-
          AN GANGDU JUZHEN
1010 LET B1=A(E, 1)
1012 LET H1=A(E, 2)
1014 LET L1=L(E)
1015 LET A1=B1*H1
1016 LET J1=B1*H1*H1*H1/12
1018 FOR I=1 TO 6
1020 FOR J=1 TO 6
1021 LET C(I, J)=0
1022 NEXT J
1024 NEXT I
1026 LET C(1, 1)=E1*A1/L1
1028 LET C(2, 2)=12*E1*J1/L1↑3
1030 LET C(3, 2)=-6*E1*J1/L1↑2
1032 LET C(3, 3)=4*E1*J1/L1
1034 LET C(4, 1)=-C(1, 1)
1036 LET C(4, 4)=C(1, 1)
1038 LET C(5, 2)=-C(2, 2)
1040 LET C(5, 3)=-C(3, 2)
1042 LET C(5, 5)=C(2, 2)
1044 LET C(6, 2)=C(3, 2)
1046 LET C(6, 3)=2*E1*J1/L1
1048 LET C(6, 5)=-C(3, 2)
1050 LET C(6, 6)=C(3, 3)
1052 FQR I=1 TO 6
1054 FOR J=1 TO I
1056 LET C(J, I)=C(I, J)
1058 NEXT J
1060 NEXT I
1062 RETURN
1105 REM PEIJIN
1110 READ R1, R2, K1, K2
1120 FOR I=1 TO Z1
1125 READ G(I)
1130 NEXT I
1132 OPEN FILE(0, 1), "¥LPT"
1135 FOR E=1 TO  Z1
1140 PRINT FILE(0), "E="; E
1145 LET B1=A(E, 1)
1150 LET H1=A(E, 2)
1155 PRINT
1160 LET L1=L(E)
1165 IF G(E)=0 THEN 1410
1170 GOTO 1210
1185 NEXT E
1188 CLOSE FILE(0)
1190 END
1205 REM ZICHEGXU, ZU PEIJIN
1210 LET C1=G(E)
1215 LET L0=L1*C1
1220 IF A(E, 3)=0 THEN 1235
1222 LET H2=A(E, 3)
1225 LET H3=(H1+H2)/2
1228 LET J1=B1*H3*H3*H3/12
1230 GOTO 1240
1235 LET J1=B1*H1*H1*H1/12
1240 PRINT FILE(0), "Z", "M",
       "N", "FA"
1245 FOR J=1 TO 2
1250 LET M1=K(E, 3*J)
1255 LET N1=K(E, 3*J-2)
1258 LET N1=ABS(N1)
1260 LET E0=ABS(M1)/N1
1261 IF J=1 THEN 1264
1262 IF A(E, 3)=0 THEN 1264
1263 LET H1=H2
```

```
1264  LET H0=H1-.035
1265  IF E0/H1<1 THEN 1280
1270  LET C2=.22
1275  GOTO 1285
1280  LET C2=.1/(.3+E0/H1)+.143
1285  IF L0/H1>8 THEN 1300
1290  LET C3=1
1295  GOTO 1305
1300  LET C3=1/(1-K2*N1*L0*L0/(10
        *C2*E1*J1))
1305  LET C4=C3*E0
1310  LET C5=C4+H1/2-.035
1315  LET C6=C4-H1/2+.035
1320  IF K2*N1/(R1*B1)<.07 THEN
        1345
1325  IF K2*N1/(R1*B1)>.55*H0 THEN
        1355
1330  LET X1=1-K2*N1/(2*R1*B1
        *H0)
1335  LET F2=K2*N1*(C5-H0*X1)/
        (R2*(H0-.035))
1340  GOTO 1360
1345  LET F2=K2*N1*C6/(R2*(H0-
        .035))
1350  GOTO 1360
1355  LET F2=(K2*N1*C5-.4*R1*B1
        *H0*H0)/(R2*(H0-.035))
1360  LET F3=.002*B1*H0
1365  IF F2>F3 THEN 1380
1370  LET F1=F3
1375  GOTO 1385
1380  LET F1=F2
1385  PRINT FILE(0), J, M1, N1, F1
        *10000
1390  NEXT J
1395  GOTO 1185
1405  REM ZICHENGXU LIAN PEIJN
1410  LET M4=K(E, 3)
1415  LET M5=K(E, 6)
1420  PRINT FILE(0), "L", "M",
        "FA"
1425  FOR X=0 TO 1 STEP.125
1430  LET X1=X*L1
1431  IF A(E, 3)=0 THEN 1434
1432  LET H2=A(E, 3)
1433  LET H1=(H2-H1)*X/L1+H1
1434  LET H0=H1-.035
1435  LET M1=0
1440  FOR I=1 TO P2
1445  LET Y=Q(I, 3)
1450  IF Y=E THEN 1460
1455  GOTO 1565
1460  LET Q1=Q(I, 1)
1465  LET S1=Q(I, 2)
1470  LET S2=L1-S1
1475  IF Q(I, 4)=1 THEN 1495
1480  IF Q(I, 4)=2 THEN 1520
1485  IF Q(I, 4)=3 THEN 1545
1490  IF Q(I, 4)=4 THEN 1565
1495  IF X1<=S1 THEN 1510
1500  LET M1=M1-Q1*S1*S1*(L1
        -X1)/(2*L1)
1505  GOTO 1565
1510  LET M1=M1-Q1*S1*(2-S1/L1)
        *X1/2+Q1*X1*X1/2
1515  GOTO 1565
1520  IF X1<=S1 THEN 1535
1525  LET M1=M1-Q1*S1*(L1-X1)/
        L1
1530  GOTO 1565
1535  LET M1=M1-Q1*S2*X1/L1
1540  GOTO 1565
1545  IF X1<=S1 THEN 1560
1550  LET M1=M1+Q1*(L1-X1)/L1
1555  GOTO 1565
1560  LET M1=M1-Q1*X1/L1
1565  NEXT I
1570  LET M1=M1+M4*(1-X)-M5*X
1575  LET U1=1-K1*ABS(M1)/(.5*B1
        *H0*H0*R1)
1580  LET F1=R1*(1-SQR(U1))*B1*
        H0/R2
1585  PRINT FILE(0), X, "L", M1,
        F1*10000
1590  NEXT X
1595  GOTO 1185
```

```
1605 REM ZICHEGXU, JUBU
     DANYUAU GANGDU  JUZHEN
1610 LET B1=A(E, 1)
1612 LET H1=A(E, 2)
1614 LET H2=A(E, 3)
1616 LET L1=L(E)
1618 LET F1=B1•H2
1620 LET J0=B1•H2•H2•H2/12
1622 LET R0=(H1-H2)/H2
1624 LET A0=(2+R0)•L1/(2•(1+R0)
     •(1+R0))
1626 LET A1=L1•L1/(2•(1+R0))
1628 LET A2=(LOG(1+R0)/R0↑3-(2-
     R0)/(2•R0•R0))•L1↑3
1630 LET C1=(A0-2•A1/L1+A2/(L1
     •L1))/(E1•J0)
1632 LET C2=(A2/(L1•L1))/(E1•
     J0)
1634 LET C3=-(A1/L1-A2/(L1•
     L1))/(E1•J0)
1636 LET C0=C1•C2-C3•C3
1638 FOR I=1 TO 6
1640 FOR J=1 TO 6
1642 LET C(I, J)=0
1644 NEXT J
1646 NEXT I
1648 LET C(1, 1)=(E1•F1/L1)•R0/
     LOG(1+R0)
1650 LET C(2, 2)=(C1+C2-2•C3)/
     (C0•L1•L1)
1652 LET C(3, 2)=-(C2-C3)/(C0
     •L1)
1654 LET C(3, 3)=C2/C0
1656 LET C(4, 1)=-C(1, 1)
1658 LET C(4, 4)=C(1, 1)
1660 LET C(5, 2)=-C(2, 2)
1662 LET C(5, 3)=-C(3, 2)
1664 LET C(5, 5)=C(2, 2)
1666 LET C(6, 2)=-(C1-C3)/(C0
     •L1)
1668 LET C(6, 3)=-C3/C0
1670 LET C(6, 5)=-C(6, 2)
1672 LET C(6, 6)=C1/C0
1674 FOR I=1 TO 6
1676 FOR J=1 TO I
1678 LET C(J, I)=C(I, J)
1680 NEXT J
1682 NEXT I
1684 RETURN
1705 REM QIU, GUDUAN NEILI
1710 LET G1=Q(H, 1)
1712 LET S1=Q(H, 2)
1714 LET E=Q(H, 3)
1716 LET V1=Q(H, 4)
1718 LET L1=L(E)
1720 LET B1=A(E, 1)
1722 LET H1=A(E, 2)
1724 LET H2=A(E, 3)
1726 LET J0=B1•H2•H2•H2/12
1728 LET R0=(H1-H2)/H2
1730 LET A0=(2+R0)•L1/(2•(1+
     R0)•(1+R0))
1732 LET A1=L1•L1/(2•(1+R0))
1734 LET A2=(LOG(1+R0)/R0↑3-
     (2-R0)/(2•R0•R0))•L1↑3
1736 LET C1=(A0-2•A1/L1+A2/
     (L1•L1))/(E1•J0)
1738 LET C2=(A2/(L1•L1))/(E1
     •J0)
1740 LET C3=-(A1/L1-A2/(L1
     •L1))/(E1•J0)
1742 LET C0=C1•C2-C3•C3
1744 LET K=S1/L1
1746 LET R6=R0+1
1748 LET X0=(1+R0•(1-K))•(1
     +R0•(1-K))
1750 LET D0=L1•(2+R0•(2-K))
     •K/(2•R6•R6•X0)
1752 LET D1=K•K•L1•L1/(2•R6
     •X0)
1754 LET X1=R6/(1+R0•(1-K))
1756 LET D2=(LOG(X1)/R0↑3-(2
     •R6-3•R0•K)•K/(2•R0•R0
     •X0)•L1↑3
1758 LET X2=(2•R0•R0•K•K-9
     •R0•R6•K+6•R6•R6)•K
```

```
1760 LET D3=(3*R6*LOG(X1)/R0↑
     4-X2/(2*R0↑3*X0))*L1↑4
1762 LET S(1)=0
1764 LET S(4)=0
1766 IF V1=2 THEN 1786
1767 IF V1=3 THEN 1812
1768 IF V1=4 THEN 1800
1770 LET X3=K*K*L1/2*((A0-
     D0)*L1-2*A1+D1)+K*L1
     *D1
1772 LET Y1=G1/(E1*J0)*(X3-
     D2/2-K*D2+K*K*A2/2+D3/(2
     *L1))
1774 LET Y2=G1/(E1*J0)*(K*K/2
     *(L*(A1-D1)-A2)+K*D2-
     D3/(2*L1))
1776 LET S(3)=-(Y1*C2-Y2*C3)'
     C0
1778 LET S(6)=-(Y2*C1-Y1*C3)/
     C0
1780 LET S(2)=-G1*K*L1*(1-K/
     2)-(S(3)+S(6))/L1
1782 LET S(5)=-G1*K*K*L1/2+
     (S(3)+S(6))/L1
1784 GOTO 1812
1786 LET Y1=-G1/(E1*J0)*(D1-2
     *K*A1+K*D1-D2/L1+K*A2/
     L1+K*L1*(A0-D0))
1788 LET Y2=G1/(E1*J0)*(D2/L1
     +K*(A1-D1)-K*A2/L1)
1790 LET S(3)=(Y2*C3-Y1*C2)/
     C0
1792 LET S[6]=(Y1*C3-Y2*C1)/
     (C0)
1994 LET S(2)=-G*(1-K))-(S
     (3)+S(6))/L1
1796 LET S(5)=-G1*K+(S(3)+
     S(6))/L1
1798 GOTO 1812
1800 LET Y1=G1/(E1*J0)*(A0-
     D0)-2*A1/L1+D1/L1+A2/
     (L1*L1))
1802 LET Y2=G1/(E1*J0)*((D1-
     A1)/L1+A2/(L1*L1))
1804 LET S(3)=(Y2*C3-Y1*C2)/
     C0
1806 LET S(6)=(Y1*C3-Y2*C1)/
     C0
1808 LET S(2)=-G1/L1-(S(3)+
     S(6))/L1
1810 LET S(5)=G1/L1+(S(3)+
     S(6))/L1
1812 RETURN
```

（注）：因版面所限，长的语句现暂移至下行接排，类似情况程序中还有，请阅读时注意。

参　考　文　献

〔1〕蔡方荫，“变截面刚构分析”中国科学图书仪器公司，1954
〔2〕浙江大学等“结构计算与程序设计”中国建筑工业出版社，1977
〔3〕龙驭球“有限元法概论”人民教育出版社，1978
〔4〕〔日〕三本木茂夫　吉村信敏，“有限单元法结构分析及程序”中国建筑工业出版社，1975
〔5〕“钢筋混凝土结构设计规范”（TJ10—74）中国建筑工业出版社，1974
〔6〕华南工学院，“电子计算机与算法语言”人民教育出版社，1978
〔7〕开封计算技术研究所“多用户扩展BASIC算法语言”（DJS—130机）讲义，1980