

# 多层建筑扭转弹塑性地震反应分析

魏 珺 朱锦心 蒋自立

(中国建筑科学研究院)

**【摘要】**近年来,采用直接输入地震波,以逐步积分法计算多层建筑的弹塑性地震反应,获得了很大的进展。解决了一些重大工程的抗震设计验算及震害分析问题,进一步发展了建筑物抗震设计的理论。有些国家在抗震设计规范中,对这一方法的使用还做了明确的规定。

以往发表的多层建筑弹塑性地震反应计算方法<sup>[1]、[2]、[3]、[4]</sup>,多只着眼于单榀平面结构,对于刚度或质量分配不对称的多层结构考虑空间扭转振动的问题,须研究新的计算方法。

本文从多层剪扭型结构出发,以二维水平地震波为输入,采用较常见而符合实际的退化二折线及退化三折线恢复力特性曲线,提出了多层结构扭转的弹塑性地震反应计算方法,并编制了相应的计算程序GANU。

本文成果可用以计算刚度及质量不对称多层结构的弹塑性地震反应,当有必要考虑地震波运动的扭转效应时,本法也可适用。

## 前 言

在海城及唐山地震的震害调查中,发现有不少建筑物由于扭转振动而破坏,有的进入了弹塑性变形阶段,甚至局部倒塌。我国最新颁布的工业与民用建筑抗震设计规范,关于建筑的扭转振动尚无明确的规定。

近年来,有关抗震计算方法的研究,大多集中在平面框架的弹塑性地震反应上<sup>[1]、[2]、[3]、[4]</sup>,对于地震时可能产生扭转的结构,也只限于弹性阶段的分析<sup>[7]</sup>,因而对多层建筑扭转的弹塑性地震反应计算方法的研究是十分必要的。

本文采用多层剪扭型结构,考虑二维水平地震波作为输入,取退化二折线及三折线恢复力特性曲线,提出了一个多层建筑扭转弹塑性地震反应的计算方法,编制了相应的计算程序GANU\*。文内并附一个三层建筑的算例,表明考虑多层建筑扭转的不利影响是必要的。

## 一、基本假定与说明

图1示一多层剪扭型建筑,由楼层的刚性横膈及层间结构组成。

结构质量集中于各楼层,各层的质心和刚度中心不一定都在同一竖轴上,可选取适当的竖轴作为转动轴,即转动中心。

在输入地震波作用下,任意楼层 $j$ 转动中心处将产生沿 $x$ 、 $y$ 方向的水平位移反应及绕转动中心的扭转角反应。

\* GANU——多层建筑剪扭计算程序中文简称代号。

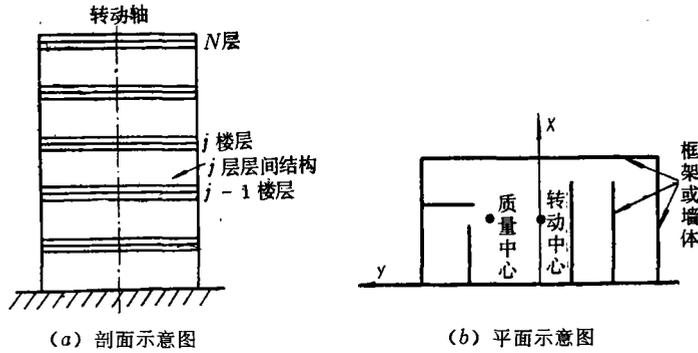


图1 多层剪扭型建筑示意图

组成层间结构的抗剪构件可为框架、填充框架或墙体等，亦可为不同抗剪构件的组合。

## 二、层间结构刚度矩阵

令  $U_i, V_i, \phi_i$  及  $U_{i-1}, V_{i-1}, \phi_{i-1}$  分别表示  $j$  楼层和  $j-1$  楼层沿  $x, y$  向的水平位移反应和扭转角反应（以顺时针向为正），参照附录 I 层间结构刚度公式，可得层间结构内力矩阵表达式

$$\{Q_i\} = [\tilde{K}_i] \{U_i\} \quad (1)$$

式中

$$\{Q_i\} = \begin{Bmatrix} Q_{xi-1,j} \\ Q_{yi-1,j} \\ M_{j-1,j} \\ Q_{xi,j-1} \\ Q_{yi,j-1} \\ M_{i,j-1} \end{Bmatrix} \quad (2) \quad \{U_i\} = \begin{Bmatrix} U_{i-1} \\ V_{i-1} \\ \phi_{i-1} \\ U_i \\ V_i \\ \phi_i \end{Bmatrix} \quad (3)$$

( $j=1, 2, \dots, N$ )

$$[\tilde{K}_i] = \begin{bmatrix} K_{xi} & 0 & K_{\phi i}^z & -K_{xi} & 0 & -K_{\phi i}^z \\ 0 & K_{yi} & K_{\phi i}^y & 0 & -K_{yi} & -K_{\phi i}^y \\ K_{\phi i}^z & K_{\phi i}^y & K_{\phi i} & -K_{\phi i}^z & -K_{\phi i}^y & -K_{\phi i} \\ -K_{xi} & 0 & -K_{\phi i}^z & K_{xi} & 0 & K_{\phi i}^z \\ 0 & -K_{yi} & -K_{\phi i}^y & 0 & K_{yi} & K_{\phi i}^y \\ -K_{\phi i}^z & -K_{\phi i}^y & -K_{\phi i} & K_{\phi i}^z & K_{\phi i}^y & K_{\phi i} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$[\tilde{K}_i]$ —— $j$  层间结构的刚度矩阵。

在以上公式中， $Q_{xi-1,j}, Q_{yi-1,j}, M_{j-1,j}$  与  $Q_{xi,j-1}, Q_{yi,j-1}, M_{i,j-1}$  分别为  $j$  层间结构在  $j$  端及  $j-1$  端沿  $x, y$  向的剪力及扭矩，其他代号定义均见附录 I。

## 三、结构运动微分方程

如图 2 所示，以  $u_i, v_i, \phi_i$  表示相对于地面沿  $x, y$  方向的位移及扭转角，列出下列运

动微分方程。

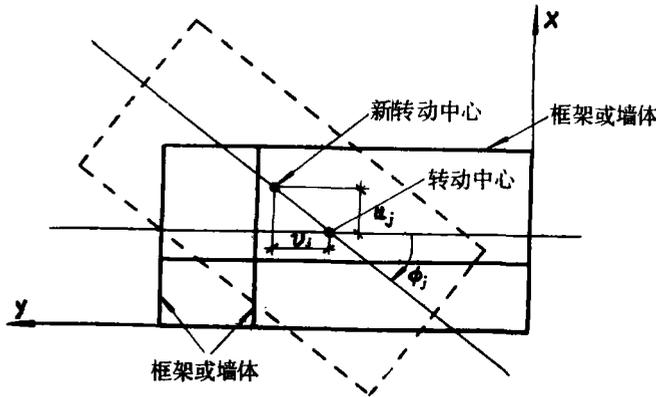


图2 j楼层位移示意图

以  $j$  层为例, 得

$$M_j(\ddot{U}_j + \ddot{\phi}_j a_{mi}) + F_{Dxi} + F_{xi} - F_{xi+1} = -M_j \ddot{U}_0(t) \quad (5)$$

$$M_j(\ddot{V}_j + \ddot{\phi}_j b_{mi}) + F_{Dyi} + F_{yi} - F_{yi+1} = -M_j \ddot{V}_0(t) \quad (6)$$

$$M_j(\ddot{U}_j a_{mi} + \ddot{V}_j b_{mi}) + M_j^{\phi} \ddot{\phi}_j + F_{D\phi i} + F_{\phi i} - F_{\phi i+1} = -M_j(a_{mi} \ddot{U}_0(t) + b_{mi} \ddot{V}_0(t)) \quad (7)$$

式中

$M_j$  ——  $j$  楼层的总质量;

$a_{mi}$  ——  $j$  楼层质量中心在  $y$  方向至转动中心的距离;

$b_{mi}$  ——  $j$  楼层质量中心在  $x$  方向至转动中心的距离;

$M_j^{\phi}$  ——  $j$  楼层质量绕转动中心的转动惯量;

$\ddot{U}_0(t), \ddot{V}_0(t)$  —— 沿  $x, y$  方向地面运动加速度;

$F_{Dxi}, F_{Dyi}, F_{D\phi i}$  —— 沿  $x, y$  方向的阻尼力和阻尼力引起的阻尼扭矩;

$F_{xi}$  ——  $j$  层间结构沿  $x$  方向的恢复力, 包括  $x$  方向层间位移和层间扭转角引起的力;

$F_{yi}$  ——  $j$  层间结构沿  $y$  方向的恢复力, 包括  $y$  方向层间位移和层间扭转角引起的力;

$F_{\phi i}$  ——  $j$  层间结构的恢复力扭矩, 包括  $x, y$  方向层间位移和层间扭转角引起的扭矩。

根据恢复力定义, 可得

$$F_{xi} = K_{xi}(U_i - U_{i-1}) + K_{\phi i}^x(\phi_i - \phi_{i-1}) \quad (8)$$

$$F_{yi} = K_{yi}(V_i - V_{i-1}) + K_{\phi i}^y(\phi_i - \phi_{i-1}) \quad (9)$$

$$F_{\phi i} = K_{\phi i}(\phi_i - \phi_{i-1}) + K_{\phi i}^x(U_i - U_{i-1}) + K_{\phi i}^y(V_i - V_{i-1}) \quad (10)$$

$$F_{xi+1} = K_{xi+1}(U_{i+1} - U_i) + K_{\phi i+1}^x(\phi_{i+1} - \phi_i) \quad (11)$$

$$F_{yi+1} = K_{yi+1}(V_{i+1} - V_i) + K_{\phi i+1}^y(\phi_{i+1} - \phi_i) \quad (12)$$

$$F_{\phi i+1} = K_{\phi i+1}(\phi_{i+1} - \phi_i) + K_{\phi i+1}^x(U_{i+1} - U_i) + K_{\phi i+1}^y(V_{i+1} - V_i) \quad (13)$$



(18)

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} -K_{x_1} + K_{x_2} & 0 & K_{\phi_1}^z + K_{\phi_2}^z & -K_{x_2} & 0 & -K_{\phi_2}^z \\
 0 & K_{y_1} + K_{y_2} & K_{\phi_1}^y + K_{\phi_2}^y & 0 & -K_{y_2} & -K_{\phi_2}^y \\
 K_{\phi_1}^z + K_{\phi_2}^z & K_{\phi_1}^y + K_{\phi_2}^y & K_{\phi_1}^z + K_{\phi_2}^z & -K_{\phi_1}^z & -K_{\phi_2}^y & -K_{\phi_2}^z \\
 -K_{x_2} & 0 & -K_{\phi_2}^z & K_{x_2} + K_{x_3} & 0 & K_{\phi_2}^z + K_{\phi_3}^z & -K_{x_3} & 0 & -K_{\phi_3}^z \\
 0 & -K_{y_2} & -K_{\phi_2}^y & 0 & K_{y_2} + K_{y_3} & K_{\phi_2}^y + K_{\phi_3}^y & 0 & -K_{y_3} & -K_{\phi_3}^y \\
 -K_{\phi_2}^z & -K_{\phi_2}^y & -K_{\phi_2}^z & K_{\phi_2}^z + K_{\phi_3}^z & K_{\phi_2}^y + K_{\phi_3}^y & K_{\phi_2}^z + K_{\phi_3}^z & -K_{\phi_3}^z & -K_{\phi_3}^y & -K_{\phi_3}^z \end{bmatrix} \mathbf{0} \\
 & \mathbf{0} \\
 & \begin{bmatrix} -K_{x_{N-1}} & 0 & -K_{\phi_{N-1}}^z & K_{x_{N-1}} + K_{x_N} & 0 & K_{\phi_{N-1}}^z + K_{\phi_N}^z & -K_{x_N} & 0 & -K_{\phi_N}^z \\
 0 & -K_{y_{N-1}} & -K_{\phi_{N-1}}^y & 0 & K_{y_{N-1}} + K_{y_N} & K_{\phi_{N-1}}^y + K_{\phi_N}^y & 0 & -K_{y_N} & -K_{\phi_N}^y \\
 -K_{\phi_{N-1}}^z & -K_{\phi_{N-1}}^y & -K_{\phi_{N-1}}^z & K_{\phi_{N-1}}^z + K_{\phi_N}^z & K_{\phi_{N-1}}^y + K_{\phi_N}^y & K_{\phi_{N-1}}^z + K_{\phi_N}^z & -K_{\phi_N}^z & -K_{\phi_N}^y & -K_{\phi_N}^z \\
 & & & -K_{x_N} & 0 & -K_{\phi_N}^z & K_{x_N} & 0 & K_{\phi_N}^z \\
 & & & 0 & -K_{y_N} & -K_{\phi_N}^y & 0 & K_{y_N} & K_{\phi_N}^y \\
 & & & -K_{\phi_N}^z & -K_{\phi_N}^y & -K_{\phi_N}^z & K_{\phi_N}^z & K_{\phi_N}^y & K_{\phi_N}^z \end{bmatrix} \mathbf{0}
 \end{aligned}$$

$[K] =$

$$\{\ddot{U}_0\} = \begin{Bmatrix} \ddot{U}_0 \\ \ddot{V}_0 \\ \ddot{U}_0 + \eta_1 \ddot{V}_0 \\ \ddot{U}_0 \\ \ddot{V}_0 \\ \ddot{U}_0 + \eta_2 \ddot{V}_0 \\ \vdots \\ \ddot{U}_0 \\ \ddot{V}_0 \\ \ddot{U}_0 + \eta_N \ddot{V}_0 \end{Bmatrix} \quad (19)$$

其中

$$\eta_j = \frac{b_{mj}}{a_{mj}} \quad (j=1, 2, 3, \dots, N)$$

阻尼力矩阵  $\{F_D\}$  采用下述近似公式表示

$$\{F_D\} = [C] \{\dot{U}\} \quad (20)$$

式中  $[C]$  为阻尼矩阵, 其形式<sup>[2]</sup>取与总刚度矩阵  $[K]$  相同, 各元素一一对应, 公式如下:

$$C_{xji} = 2\zeta \sum_i \sqrt{m_{xii} K_{xii}} \quad (21)$$

$$C_{yji} = 2\zeta \sum_K \sqrt{m_{yKi} K_{yKi}} \quad (22)$$

$$C_{\phi ji}^x = 2\zeta \sum_i \sqrt{m_{xii} K_{xii}} \times a_{ii} \quad (23)$$

$$C_{\phi ji}^y = 2\zeta \sum_K \sqrt{m_{yKi} K_{yKi}} \times b_{Ki} \quad (24)$$

$$C_{\phi ji} = 2\zeta \left( \sum_i \sqrt{m_{xii} K_{xii}} \times a_{ii}^2 + \sum_K \sqrt{m_{yKi} K_{yKi}} \times b_{Ki}^2 \right) \quad (25)$$

式中,  $m_{xii}$  为第  $j$  楼层质量分配给该层  $x$  方向第  $i$  个抗剪构件的质量;  $m_{yKi}$  为第  $j$  楼层质量分配给  $y$  方向第  $K$  个抗剪构件的质量;  $\zeta$  为阻尼比。

#### 四、微分方程的求解

将构件恢复力特性曲线表示为多段直线, 则每段直线的  $K$  为常数, 问题在于正确判断质点任意时刻所在的直线段。

采用图 3 退化二折线恢复力特性曲线时, 判别框图<sup>[2]</sup>如图 5 (a)、(b)。

采用图 4 退化三折线恢复力特性曲线时, 判别框图<sup>[2]</sup>如图 6 (a)、(b)。

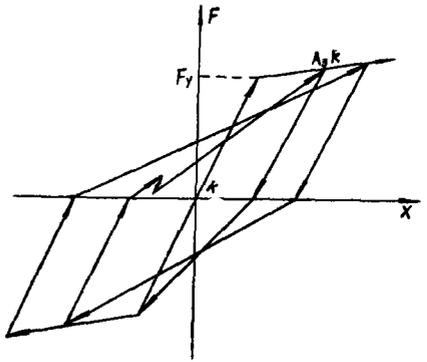


图3 退化二折线恢复力特性曲线

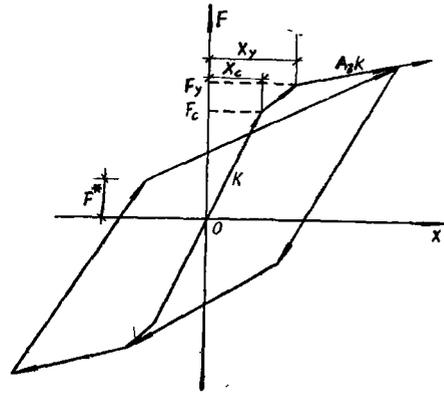


图4 退化三折线恢复力特性曲线

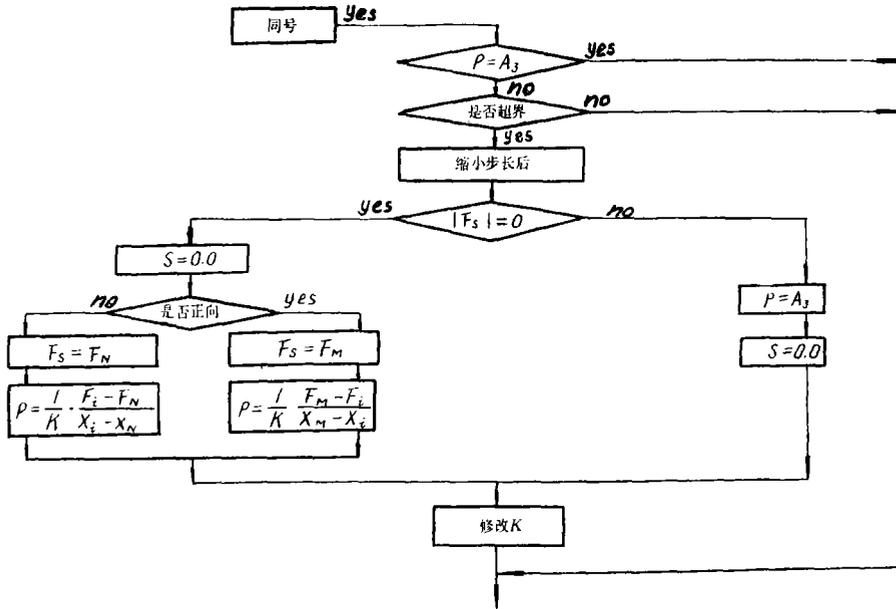


图5 (a) 退化二折线恢复力特性曲线判别同号框图

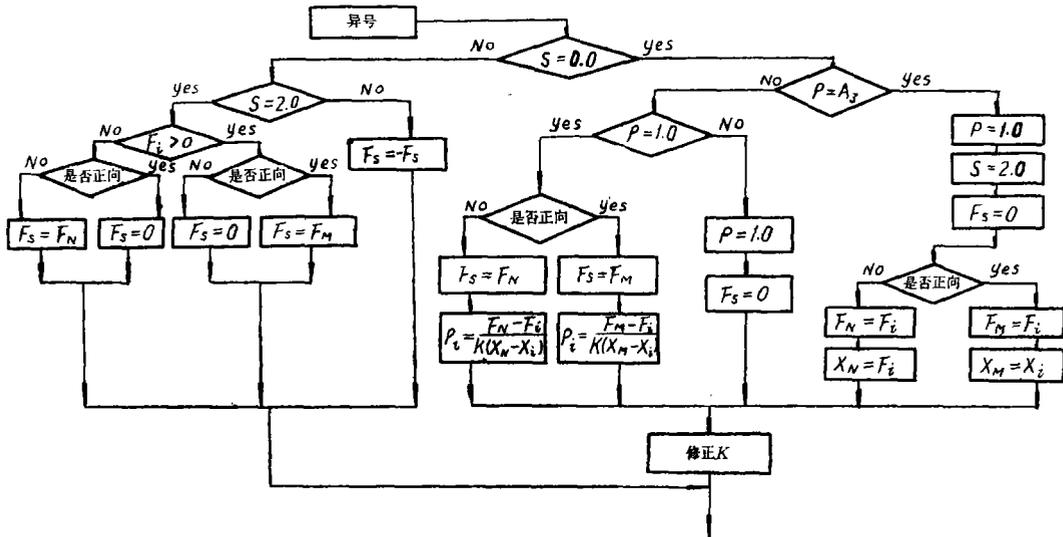


图5 (b) 退化二折线恢复力特性曲线判别异号框图

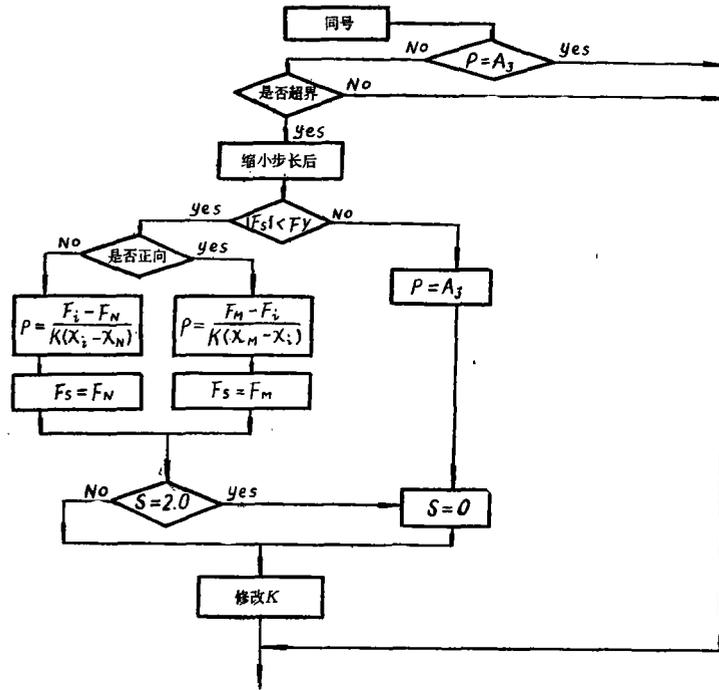


图 6 (a) 退化三折线恢复力特性曲线判别同号框图

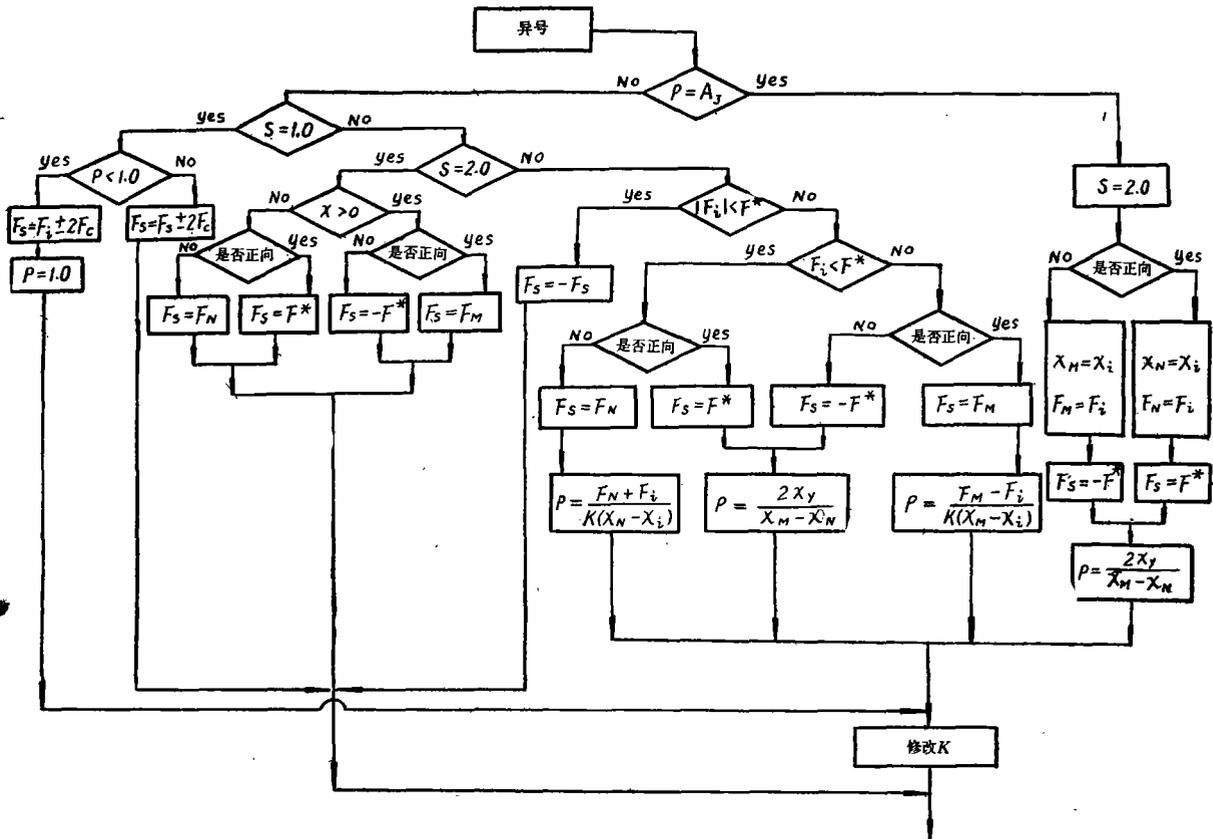


图 6 (b) 退化三折线恢复力特性曲线判别异号框图

采用半增量形式微分方程组进行求解，方程形式为

$$[M]\{\ddot{x}\}_{i+1} + [C]^{i+1}\{\dot{\Delta x}\}_{i+1} + [K]^{i+1}\{\Delta x\}_{i+1} + \{Q\}_i = -[M]\{\ddot{U}_0\}_{i+1} \quad (26)$$

式中  $\{Q\}_i = \{Q\}_{i-1} + [K]^{i-1}\{\Delta x\}_{i-1} + [C]^{i-1}\{\dot{\Delta x}\}_{i-1} \quad (27a)$

$$\{Q\}_0 = 0 \quad (27b)$$

上式可化为拟静力方程

$$[K^*]^{i+1}\{\Delta x\}_{i+1} = \{\Delta P^*\}_{i+1} \quad (28)$$

采用中点加速度法，相应公式为

$$[K^*]^{i+1} = [K]^{i+1} + [\tilde{M}] \frac{4}{\Delta t^2} + \frac{2}{\Delta t} [C]^{i+1} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \{\Delta P^*\}_{i+1} = & -\{Q\}_i - [M]\{\ddot{U}_0\}_{i+1} + [\tilde{M}] \left( \frac{4}{\Delta t} \{\dot{x}\}_i + \{\ddot{x}\}_i \right) \\ & + 2[C]^{i+1}\{\dot{x}\}_i \end{aligned} \quad (30)$$

由式 (29) 解出  $\{\Delta x\}_{i+1}$  后，由下式计算  $t_{i+1}$  时刻的加速度、速度与位移反应

$$\{\ddot{x}\}_{i+1} = \frac{4}{\Delta t^2} \{\Delta x\}_{i+1} - \frac{4}{\Delta t} \{\dot{x}\}_i + \{\ddot{x}\}_i$$

$$\{\dot{x}\}_{i+1} = \frac{2}{\Delta t} \{\Delta x\}_{i+1} + \{\dot{x}\}_i \quad (31)$$

$$\{x\}_{i+1} = \{x\}_i + \{\Delta x\}_{i+1}$$

式中  $\Delta t$ ——时间步长， $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ 。

### 五、算 例

图 7 示某三层三跨厂房框架，因设备布置在  $x$  方向造成明显的质量偏心，需考虑扭转振动的影响，现采用本文方法及计算机程序 GANU 计算结构的弹塑性地震反应，并与忽略此项质量偏心影响时计算结果进行比较。层间构件恢复力特性曲线采用退化三折线，已知计算数据列于表 1。

框架基本计算数据 表 1

层 次	框架编号 $j$	$K$	$F_c$	$F_y$	$X_y$	$A_s$	$M_{ii}$
顶 层 ( $i=3$ )	1	8.148	6.59	9.4	1.42	0	0.12096
	2	8.148	6.59	9.4	1.42	0	0.12096
	3	8.148	6.59	9.4	1.42	0	0.05184
	4	8.148	6.59	9.4	1.42	0	0.05184
二 层 ( $i=2$ )	1	8.782	10.45	16.9	2.28	0	0.13384
	2	8.782	10.45	16.9	2.28	0	0.13384
	3	8.782	10.45	16.9	2.28	0	0.05735
	4	8.782	10.45	16.9	2.28	0	0.05735
底 层 ( $i=1$ )	1	9.664	14.4	25.7	3.73	0	0.13104
	2	9.664	14.4	25.7	3.73	0	0.13104
	3	9.664	14.4	25.7	3.73	0	0.05616
	4	9.664	14.4	25.7	3.73	0	0.05616

鉴于结构在  $y$  方向的刚度与质量均对称，只需输入一维水平地震波，采用  $EL-C_{en}t_{ro}$  (N-S) 南北向水平地震记录，计算持续时间 8 秒，峰值 200 伽。

求得各楼层转动中心处位移及扭转角反应时程曲线如图 8a~f 所示，图中实线为相应弹性反应。

为了观察扭转可能对框架造成的不利影响，本文还计算了不计质量偏心影响，即假设质量为均匀对称时，此三层框架的弹塑性地震反应。图 9 表示考虑与不考虑质量偏心影响时弹塑性层间位移反应时程曲线的比较。图中，实线示不计质量偏心影响的结果，虚线为考虑扭转的最不利框架层间位移反应。由图可知，多层结构由于扭转引起的不利影响是不容忽视的。

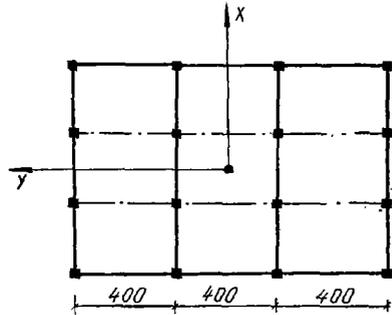
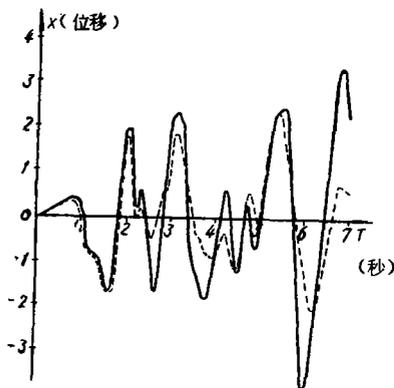
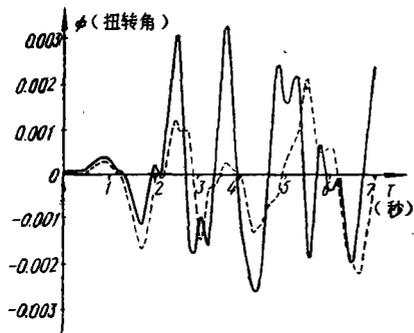


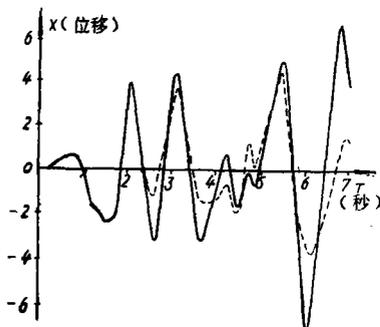
图 7 框架平面图



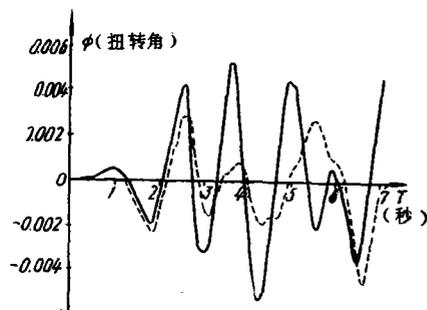
(a) 一层转心位移反应



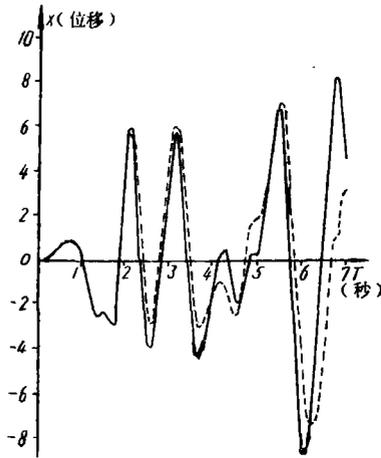
(b) 一层转心扭角反应



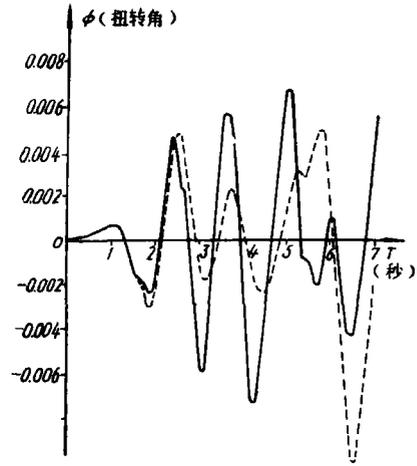
(c) 二层转心位移反应



(d) 二层转心扭角反应

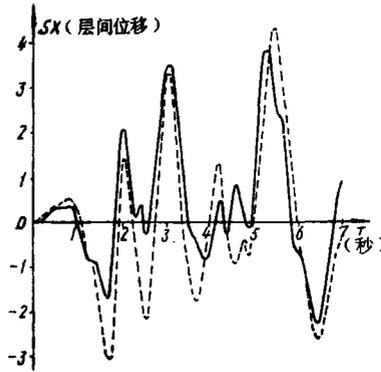


(e) 三层转心位移反应

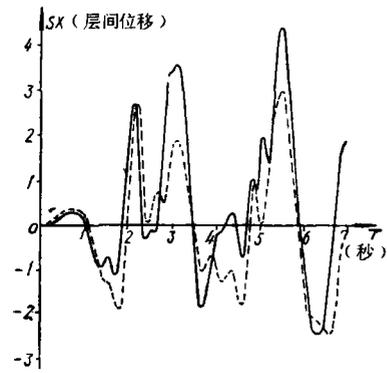


(f) 三层转心扭角反应

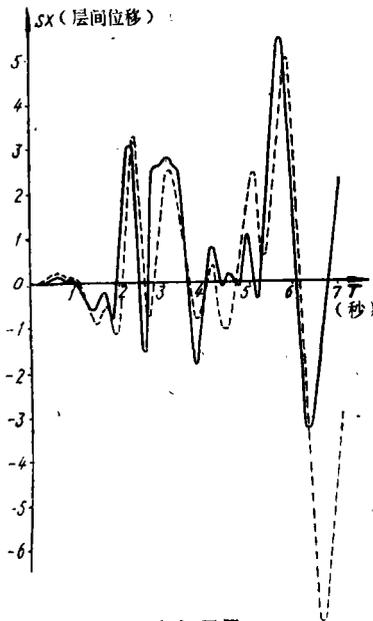
图8 楼层位移及扭角反应时程曲线  
——弹性反应 - - - - 弹塑性反应



(a) 一层



(b) 二层



(c) 三层

图9 框架层间位移反应时程曲线的比较  
——忽略质量偏心时的反应 - - - - 考虑楼面扭转时的反应

## 结 论

1. 本文提供的多层结构扭转弹塑性地震反应计算方法, 考虑了退化三折线恢复力特性曲线(图4), 适用性较强, 无论层间结构为框架、填充框架或墙体, 均可适用。

2. 本文考虑了二维水平地震波输入, 当需考虑地层运动的扭转分量时, 可近似认为对基底造成整体扭转, 只须在方程(14)中加入相应的右端项, 将有关公式略作变动后仍可应用本法。

3. 算例计算结果比较表明, 当结构或质量不对称时, 考虑扭转引起的不利作用是必要的, 当结构刚度或质量在  $x$ 、 $y$  两个方向均不对称时, 须输入二维水平地震波以考虑多层结构扭转的不利影响。

### 附录 I 层间结构刚度公式

图 I-1 示第  $j$  层层间结构, 即第  $j-1$  与第  $j$  层之间所有抗剪构件之总和。当第  $j$  楼层相对于第  $j-1$  楼层在转动中心处产生沿  $x$  方向之单位水平位移  $\Delta_{xi} = 1$ , 而无扭转及沿  $y$  方向之位移时, 分别作用于转动中心处,  $j$  及  $j-1$  端之剪力及扭矩为

$$Q_{xi,j-1} = -Q_{xi-1,j} = \sum_i K_{xij} = K_{xi} \quad (I-1)$$

$$Q_{yi,j-1} = -Q_{yi-1,j} = 0 \quad (I-2)$$

$$M_{i,j-1} = -M_{i-1,j} = \sum_i K_{xij} a_{ij} = K_{\phi i}^x \quad (I-3)$$

式中  $K_{xij}$ ——沿  $x$  方向第  $j$  层间第  $i$  个抗剪构件之抗剪刚度;

$a_{ij}$ ——第  $i$  构件距转动中心之距离;

$K_{xi}$  称为  $x$  向层间抗剪刚度,  $K_{\phi i}^x$  称为  $x$  向剪扭相干刚度。

图 I-2 示第  $j$  楼层相对于第  $j-1$  楼层在转动中心处产生沿  $y$  方向之单位水平位移  $\Delta_{yi} = 1$ , 而无扭转及沿  $x$  向之位移时,  $j$  及  $j-1$  端之剪力及扭矩为

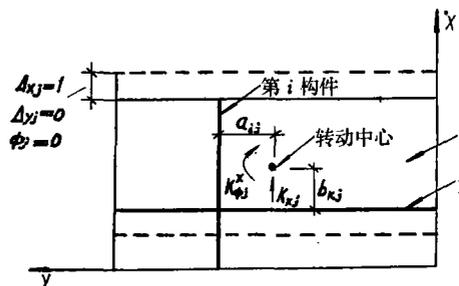


图 I-1

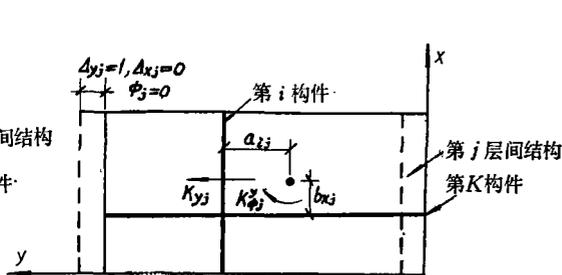


图 I-2

$$Q_{xi,j-1} = -Q_{xi-1,j} = 0 \quad (I-4)$$

$$Q_{yj,j-1} = -Q_{yj-1,j} = \sum_K K_{yKj} = K_{yj} \quad (I-5)$$

$$M_{i,j-1} = -M_{i-1,j} = \sum_K K_{yKj} \cdot b_{Kj} = K_{\phi j}^y \quad (I-6)$$

式中  $K_{yKj}$ ——沿  $y$  向第  $j$  层第  $K$  个抗剪构件之抗剪刚度

$b_{Kj}$ ——第  $K$  构件距转动中心之距离。

$K_{yij}$  称为  $y$  向之层间抗剪刚度;  $K_{\phi j}$  称为  $y$  向之剪扭相干刚度。

图 I-3 示第  $j$  楼层相对于第  $j-1$  楼层绕转动中心轴旋转单位转角, 而无  $x$  及  $y$  方向之水平位移时,  $j$  及  $j-1$  端之剪力及扭矩为

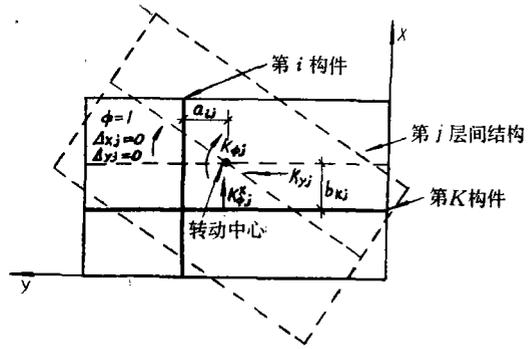


图 I-3

$$Q_{xi,j-1} = -Q_{xi-1,j} = \sum_i K_{xij} \times a_{ij} = K_{\phi j}^x \quad (I-7)$$

$$Q_{yj,j-1} = -Q_{yj-1,j} = \sum_K K_{yKj} \times b_{Kj} = K_{\phi j}^y \quad (I-8)$$

$$M_{i,j-1} = -M_{i-1,j} = \sum_i K_{xij} \times a_{ij}^2 + \sum_K K_{yKj} \times b_{Kj}^2 = K_{\phi j} \quad (I-9)$$

式中,  $K_{\phi j}$  称为第  $j$  层间结构之抗扭刚度,  $K_{\phi j}^x$ ,  $K_{\phi j}^y$  定义如前述。

### 参 考 文 献

- (1) 梅村魁等: Analysis of the Behaviour of Reinforced Concrete Structures during Strong Earthquake Based on the Empirical Estimation of Inelastic Restoring Force Characteristics of Members, 5WCEE, 1973.
- (2) 戴国莹、钟益村: 框架弹塑性地震反应若干问题研讨, 中国建筑科学研究院研究报告, 1979年。
- (3) Hiroyuki Aoyama, Simple Nonlinear Models for the Seismic Response of Reinforced Concrete Buildings, Proceedings of the Review Meeting U S-Japan Cooperative Research Program in Earthquake Engineering with Emphasis on the Safety of School Buildings, 1975.
- (4) R.W.Clough, FHA Study of Seismic Design Criteria for High-Rise Building, 1966.
- (5) M.F.Giberson, Two Nonlinear Beams with Definitions of Ductility, ASCE, Vol 95, No.ST2, 1969.
- (6) 魏 珪、戴国莹、王龙: 杆系多层多间框架非线性地震反应的简化计算, 建筑结构学报, 1980年创刊号。
- (7) Christopher L.Kan and Anil K. Chopra, Elastic Analysis of Earthquake Response of a Class of Torsionally Coupled Buildings, Proceedings of ASCE, Vol 103, No.ST4, Apr. 1977.
- (8) R.W.Clough and J. Penzine, Dynamics of Structures, 1975.
- (9) E.L.Wilson, Nonlinear Dynamic Analysis of Complex Structures, E.E.S.D, Vol 1, 1973.

## ELASTO-PLASTIC EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS FOR MULTI-STOREYED BUILDINGS TAKING ACCOUNT OF TORSION

Wei Lian    Zhu Jingxin    Jiang Zhili

### Abstract

Recently, significant development has been made in the solution of problems regarding elasto-plastic earthquake response of multi-storeyed structures by using directly seismic records as input and step-by-step intergration method. In the course of event, important theories and methods of design have been created in the field of earthquake-resistant structures.

Some published papers [1], [2], [3], [4] dealing with non-linear earthquake response were devoted to plane structures. For structures having unsymmetrical mass distribution or stiffness allocation, the above-mentioned problems still remain unsolved.

Starting from a multi-storeyed shear-torsional type model, taking two-dimensional horizontal earthquake wave as input and adopting degrading tri-linear mode of restoring force characteristics curve, an approach is developed in this paper for analysis of earthquake response of multi-storeyed structures with torsion and a corresponding computer program GANU has been worked out. It is shown that the method is applicable to multi-storeyed structures involving frames, infilled frames or wall systems or certain mixed types of these three.

A numerical example of a three-storeyed factory building is given. Results are compared with those obtained without taking torsional effect into account, indicating the detrimental influences of torsion caused by obviously unsymmetrical mass or stiffness of structure which are not to be ignored in design.