

用子结构凝聚法在微机分析高层钢结构

许佳修

刘龙兴

(沙洲工学院建工系)

(张家港市建行)

摘 要 采用子结构凝聚法,以楼层段划分子结构,引入广义单元,利用交界处的位移协调及力的平衡组集整个结构的刚度方程.在程序实施时用“滞后迭代”的措施降低方程维数.使考虑节点域剪切变形影响的高层钢框架结构的二阶分析得以在微机上实现.

关键词 凝聚;子结构;滞后迭代

分类号 TV332.4

0 引 言

高层建筑钢结构设计中的一个主要问题是如何控制建筑物的侧向总位移值与层间相对位移值.因此,在设计时正确评定结构的侧向刚度是一个重要环节.本文按照有限元思想,在对结构进行二阶弹性分析的同时,又考虑了节点域剪切变形的影响,将节点域剪切变形作用转化为外荷载形式进行处理,实施程序时用“滞后迭代”法降低方程的维数.另外考虑到高层建筑的空间分析中,其结构刚度矩阵阶数较大,微机上难以计算,本文采用子结构凝聚方法,以楼层段划分子结构,引入广义单元,利用交界处的位移协调及力的平衡,组集整个结构刚度方程,使整个分析工作能在微机上实现.

1 总体坐标下的单元刚度阵

由矩阵运算规则,可求得杆杆力向量与经过变换后的杆端位移向量之间的关系.

1.1 局部坐标下杆端力表达式

$$\begin{aligned}\text{柱} \quad \{\bar{F}_c\}^e &= [\bar{K}_c]^e \cdot \{\bar{\Delta}_c\} = [\bar{K}_c]^e ([H]\{\bar{\Delta}_c\}_e + [C_1]\{r\}^e) \\ &= [\bar{K}_c]^e [H][T][Q]\{\Delta_c\}_e + [\bar{K}_c]^e [C_1]\{r\}^e;\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\text{梁} \quad \{\bar{F}_b\}^e &= [\bar{K}_b]^e \{\bar{\Delta}_b\} = [\bar{K}_b]^e ([R]\{\bar{\Delta}_b\}_e + [CC_1]\{r\}^e) \\ &= [\bar{K}_b]^e [R][T][Q]\{\Delta_b\}_e + [\bar{K}_b]^e [CC_1]\{r\}^e.\end{aligned}\quad (2)$$

上两式中

$[H]$ 和 $[R]$ 分别为柱和梁的节点域与杆端间的位移转换矩阵;

$\{r\}$ 为节点域剪切变形矩阵;

$[C]$ 和 $[CC_i]$ 分别为柱与梁的节点域剪切变形转换矩阵;

$[Q]$ 为楼层协调矩阵;

$[T]$ 为坐标转换矩阵. 详见文献[1].

1.2 总体坐标下杆端力表达式

$$\{F_e\}_q = [Q]^T [T]^T [H]^T [\bar{K}_e] [H] [T] [Q] \{\Delta e\}_q + [T]^T [H]^T [\bar{K}_e] [C_i] \{r\}_e. \quad (3)$$

$$\text{令 } [\bar{K}_e] = [Q]^T [T]^T [H]^T [\bar{K}_e] [H] [T] [Q]$$

—— 杆单元总体坐标刚度阵;

$$\{f_1\}_e = [T]^T [H]^T [\bar{K}_e] [C_i] \{r\}_e$$

—— 节点域剪切变形引起的杆端力向量.

$$\{F_e\}_q = [Q]^T [T]^T [R]^T [\bar{K}_e] [R] [T] [Q] \{\Delta_e\}_q + [T]^T [R]^T [\bar{K}_e] [CC_i] \{r\}_e. \quad (4)$$

$$\text{令 } [K_e] = [Q]^T [T]^T [R]^T [\bar{K}_e] [R] [T] [Q]$$

—— 梁单元总体坐标刚度阵;

$$\{f_1\}_e = [T]^T [R]^T [\bar{K}_e] [CC_i] \{r\}_e$$

—— 节点域剪切变形引起的梁端力向量.

组集结构刚度阵时, 将节点域剪切变形引起的杆端力向量加入到外荷载向量中去, 杆件单元的刚度方程为:

$$\text{柱 } \{F_e\}_q - \{f_1\}_e = [K_e] \{\Delta_e\}_q, \quad (3a)$$

$$\text{梁 } \{F_e\}_q - \{f_1\}_e = [K_e] \{\Delta_e\}_q. \quad (4a)$$

2 子结构分析

本文分析时将整个结构沿高度方向分成几个部分, 每一部分称为一个子结构. 假定楼板在自身平面内无限刚性, 在平面外无限柔性, 这样, 每一楼层有公共自由度 4 个, 即 u, v, φ, ψ . 因此, 每一节点仅有三个独立自由度.

2.1 凝聚公式推导

约定: 节点域剪切变形引起的杆端力向量列入节点荷载中计算.

第 i 个子结构的内力与位移之关系可写成

$$\begin{Bmatrix} F_c \\ F_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{cc}^i & K_{cb}^i \\ K_{bc}^i & K_{bb}^i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_c^i \\ \delta_b^i \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

脚标“ b ”表示结构边界, “ c ”表示结构内部, $\{\delta_c^i\}$ 为第 i 个子结构的内部自由度, $\{\delta_b^i\}$ 为第 i 个子结构的边界自由度, 将上式展开得

$$\{F_c^i\} = [K_{cc}^i] \{\delta_c^i\} + [K_{cb}^i] \{\delta_b^i\}, \quad (6)$$

$$\{F_b^i\} = [K_{bc}^i] \{\delta_c^i\} + [K_{bb}^i] \{\delta_b^i\}. \quad (6a)$$

在式(6)中, 以子结构的内部结点荷载 $\{P_c^i\}$ 以及剪切变形引起的杆端力向量反映等价在

内部结点上的荷载 $\{f_{ic}\}$ 来代替 $\{F_i\}$,得到用子结构的边界位移 $\{\delta_b\}$ 表示内部位移 $\{\delta_i\}$ 的表达式如下

$$\{\delta_i\} = [K_{ic}]^{-1}(\{P_i\} - \{f_{ic}\}) - [K_{ic}]^{-1}[K_{ib}]\{\delta_b\}. \quad (7)$$

将式(7)代入式(6a),可求得子结构的边界力如下

$$\{F_b\} = ([K_{bb}] - [b_{bc}][K_{ic}]^{-1}[K_{ib}])\{\delta_b\} + [K_{bc}][K_{ic}]^{-1}(\{P_i\} + \{f_{ic}\}). \quad (8)$$

$$\text{记 } \{R_b\} = [K_{bc}][K_{ic}]^{-1}(\{P_i\} - \{f_{ic}\}),$$

$$[\bar{K}_{bb}] = [K_{bb}] - [K_{bc}][K_{ic}]^{-1}[K_{ib}]. \quad (9)$$

由此得第 i 个子结构的边界力表达式如下

$$\{F_b\} = [\bar{K}_{bb}]\{\delta_b\} + \{R_b\}. \quad (10)$$

2.2 子结构方程的耦合

利用子结构交界处的位移协调及力的平衡条件耦合子结构方程,全部子结构的边界力的集合,必须等于原结构边界及各子结构公共边界上的结点荷载 $\{P_b\}$,以及剪切变形引起的杆端力向量反映等价在边界结点上的荷载 $\{f_{ib}\}$.设共有 p 个子结构,则

$$\sum_{i=1}^p \{F_b\} = \{P_b\} - \{f_{ib}\}. \quad (11)$$

将(10)式代入上式即得

$$[K_b]\{\delta_b\} = \{P_b\} - \{f_{ib}\} - \{R_b\}. \quad (12)$$

式中 $\{\delta_b\}$ 是原结构边界及各子结构内部荷载引起的边界反力; $[K_b]$ 是缩减了的整体刚度矩阵.

3 计算机程序

采用 FORTRAN 语言编制电算程序,程序设计全部模块化.结构分析部分共有 23 个程序模块组成,在 IBM-PC/AT 机上调试完成.

结构刚度阵是由子结构刚度阵向边界缩聚的凝聚刚度组集而成,在采用半带宽存储时,引用了广义单元,这样,缩减刚度阵物理概念清晰,地址计算容易.程序中设置了开关变量,使的本程序可完成以下工作:不考虑节点刚域的线性分析;考虑节点域剪切变形的线性分析;不考虑节点刚域的几何非线性分析;考虑节点域剪切变形

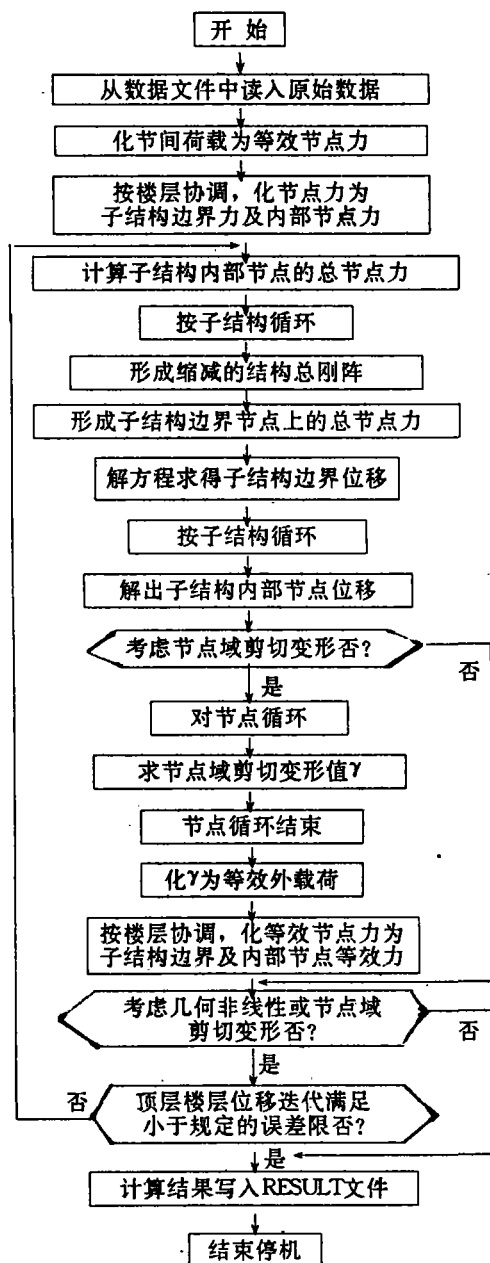


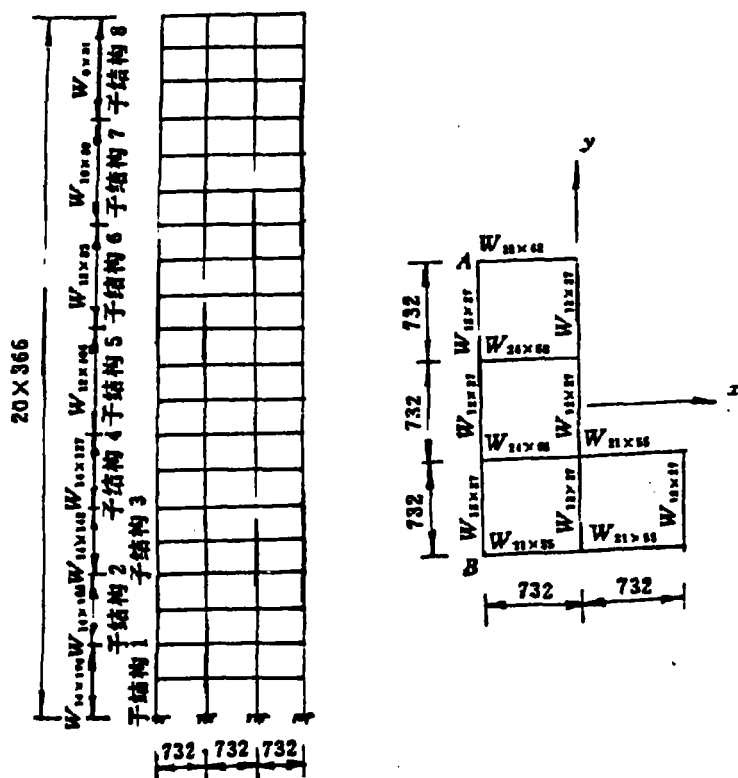
图1 程序流程图

几何非线性分析. 图1给出了程序流程框图.

程序在对结构进行二阶分析时,先要做一阶分析,这时令各柱的几何刚度为零,求解边界位移值,进而求出各梁、柱的位移,算出柱的一阶杆端力向量.再以所求得杆端力向量形成柱的几何刚度,同时用梁、柱杆端力求解节点域剪切变形 r ,进而求得等效节点荷载 $\{f_1\}$,以此进行二阶分析.循环此过程,直到结构顶层三个刚性楼层位移前后二次结果偏差满足规定的误差限值,即认为此时结构位移状态为所求得的位移状态.此过程中,由于剪切变形 r 的迭代是依赖于结点位移的,它的每次求解均在获得结点位移后进行,故笔者称“滞后迭代”.

4 算例及结果分析

图2为平面布置为L型的20层钢结构,引自文献[2],柱网尺寸 $7.32 \times 7.32\text{m}$,层高均为 3.66m ,作用在楼面上的均布荷载为 4.79kN/m^2 ,AB侧面作用风压 0.958kN/m^2 ,风压不考虑沿高度方向发生变化,结构总自由度为1400.笔者运用本文程序对其进行了四种不同情况的分析.附表给出了A轴线 x 方向四种分析所得的水平位移及楼层扭转角.分析中,沿着结构高度方向按标准层段划分为8个子结构(见图2).



由附表数据与文献[3]结果相比,考虑节点域剪切变形后的这两种分析均增大了原分析所得的侧向位移值.与不考虑节点域剪切变形分析相比,顶层绝对侧向位移在线性分析情况下增大了 4.2%,在非线性分析情况下增大 4%.若以层间位移而论,顶层线性分析情况下增大 4.7%,非线性分析情况下增大 4%.

附表 A 轴线柱 X 方向水平位移 U 、 X 绕竖轴转角 Φ

楼 层	不考虑节点域剪 切变形线性分析		考虑节点域剪切 变形的线性分析		不考虑节点域剪 切的二阶分析		考虑节点域剪切 变形的二阶分析	
	U (cm)	Φ (10^{-4} rad)	U (cm)	Φ (10^{-4} rad)	U (cm)	Φ (10^{-4} rad)	U (cm)	Φ (10^{-4} rad)
1	1.32	-2.44	1.38	-2.43	1.4	-2.58	1.45	-2.56
2	3.73	7.18	3.81	6.90	3.98	7.68	4.04	7.56
3	6.43	-12.7	6.55	-12.15	6.91	-13.17	7.10	-13.14
4	9.14	18.41	9.37	17.67	9.83	19.87	10.04	19.03
5	11.85	-24.20	12.21	-23.31	12.76	-26.24	13.09	-25.18
6	14.47	30	14.96	28.97	15.61	32.53	16.08	31.33
7	17.06	-35.8	17.69	-34.64	18.4	-38.82	19.02	-37.49
8	19.54	41.23	20.35	40.26	21.07	44.98	21.88	43.59
9	22.14	-47.31	23.06	-46.03	23.88	-51.41	24.80	-49.85
10	24.61	53	25.66	51.68	26.53	57.72	27.6	55.97
11	26.94	-58.5	28.13	-57.18	29.03	-63.47	30.26	-61.89
12	29.25	64	30.57	62.63	31.51	69.39	32.87	67.77
13	31.41	-69.23	32.88	-67.89	33.81	-75.01	35.33	-73.41
14	33.39	74.21	35.02	72.92	35.93	80.33	37.61	78.81
15	35.60	-79.47	37.28	-78.11	38.3	-85.97	40.03	-84.36
16	37.56	84.31	39.35	82.97	40.38	91.13	42.23	89.54
17	39.26	-88.73	41.16	-87.45	42.19	-95.81	44.16	-94.29
18	41.23	93.82	43.22	92.29	44.52	101.30	46.35	99.46
19	43.04	-98	44.83	-96.43	46.23	-105.7	48.07	-103.8
20	44.11	101.30	45.94	99.84	47.36	109.2	49.24	107.40

5 结 论

由以上分析可知,考虑节点域剪切变形能较真实地反映结构的实际位移情况,更能正确的评判结构的侧向刚度.而笔者在本文中运用的子结构凝聚法,不受结构平面形状的限制,适用性强,使考虑节点域剪切变形的分析能在微机上方便、准确的运用.

参 考 文 献

- 1 刘龙兴. 高层建筑钢结构考虑节点域剪切变形的空间二阶分析, [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 1989
- 2 Beedlels, et al. Monograph on Planning and Design of Tall Buildings. Sructural Design of Tall Steel Buildings, Vol. SB, New York, 1979, 288~299
- 3 梁启智, 曾令付. 高层建筑结构三维分析的广义坐标方法. 土木工程学报, 1990, 23 (1): 23~33

Sub—structure Condensation Method Analyng Tall Steel Building on P. C

Xu Jiaxiu Liu Longxing

Abstract The sub—structure condensation method is used in the paper. Some continuous and identical floors are defined as one sub—structure, generalized element as well as displacement consistency and force equilibrium conditions are used to obtain the total sliffness matrix. In the program design, the post iteration schemes are employed so as to reduce the order of equation. Then, the two stage analysis for shear deformation of steel frame in nodal domain can realized on PC.

Key words Condensation; Sub—structure; Post iteration