钢筋混凝土框架——剪力墙结构[:] 空间非线性分析的分层分区刚性楼板法

荀 勇 江 建 (盐城工学院建筑工程系,盐城,224003) (湖南大学结构研究所,长沙,410082)

摘 要 采用空间力学模型,建立可模拟双向弯矩、轴力相互作用的多弹簧梁柱构件杆单元和 可考虑中性轴移动的修正多垂直杆单元的剪力墙模型,用计算机对复杂形式的钢筋混凝土框 架----剪力墙结构进行了非线性时程分析。空间的力学模型可考虑局部楼板的变形影响,并可 沿任意角度输入相互垂直的两个水平地震分量。介绍了该法相应程序的算例。

关键词 结构 非线性分析 刚性楼板

分类号 TU37

引言

近十年来,结构的非线性地震反应时程分析方法在结构与构件的力学模型、恢复力模型及 数值分析方法研究等方面取得了很大的进展。但由于钢筋混凝土构件在动力载荷作用下的非 线性特性相当复杂,使平面非线性分析不能反映结构的空间扭转振动,并且无法体现空间结构 各构件的协同工作,无法考虑地震动多分量同时输入的影响。现有的空间分析多采用平面子结 构空间协同分析力学模型,各平面子结构中同一节点的竖向变形不协调^[1]。从解决问题的角度 出发,本文在下述基本假设的基础上建立了结构分析模型:(1)每层楼板按实际刚度大小受力 特点,分区假设为刚性楼板。(2)结构的质量和转动惯量按就近原则堆聚在楼板处。(3)结构底 部与基础完全固接,不考虑上部结构和基础的共同作用。(4)几何非线性仅考虑整体结构 P--Δ效应的影响。(5)地震动输入考虑两个相互垂直的水平分量沿任意方向输入。

1 结构分析模型和方法

1.1 结构分析模型

根据楼板刚度和形式的变化,分层分区采用刚性楼板假定,并用多垂直杆单元和四弹簧杆 单元来模拟楼板的弹性或非弹性变形,将刚性楼板连接起来,如图1所示。

图 1 中,两块刚性楼板分别考虑各自的水平位移,竖向位移和转动位移,其差异就是计算 单元所模拟的局部楼板的变形;在刚性楼板假定的基础上,采用"串并联刚片系"振动模型简化 各种体型的多高层建筑结构。

(1)较规则的结构,采用串联刚片系,刚片总数即为建筑总层数。

(2) 立面复杂结构,则简化为串并联刚片系。

• 收稿日期:1996-09-05

荀勇等.钢筋混凝土框架——剪力墙结构空间非线性分析的分层分区刚性楼板法 • 37 •



图 1 局部楼板变形

(3)平面布置较复杂,需考虑局部楼板变形的结构,则用多垂直杆单元及四弹簧单元将串 并联刚片系再次并联。

1.2 结构空间振动的运动微分方程

结构空间振动的运动微分方程可表达为:

 $[M]\{\dot{D}\} + [C]\{\dot{D}\} + [K]\{D\} = -[M]\{\dot{D}_{g}\}$ (1)

式中:[M]为整体结构质量矩阵;[K]为整体结构的动力刚度矩阵;[C]为结构的阻尼矩阵; $\{D\}$ 、 $\{D\}$ $\{D\}$ 分别为结构各刚性楼板质心相对于地面的位移、速度、加速度向量。

现对运动微分方程中主要参数矩阵的建立说明如下:

(1)考虑相互垂直的两个水平地震分量 U_s、V_s沿任意角度输入,设 U_s与 x 轴夹角为 β,见图 2。{D_s}表达如下:

$$\{D_{g}\} = \{D_{gx}, D_{gy}, 0, D_{gx}, D_{gy}, 0, \cdots, D_{gx}, D_{gy}, 0\}^{T}$$
(2)

其中: $D_{gx} = U_{g}\cos\beta - V_{g}\sin\beta$

 $\dot{D}_{gy} = \dot{U}_{g} \sin\beta - \dot{V}_{g} \cos\beta$

(2)文中采用堆聚质量矩阵使运动方程中加 速度反应项不产生耦联,因而数值求解较为方便。

(3)阻尼矩阵用初始动力刚度矩阵与质量矩 阵合成,因此,阻尼矩阵在整个分析过程中保持不 变。

(4)采用前述力学模型,从单元分析中可得到 各单元的刚度矩阵,按一定的规则组装成结构总 刚度矩阵[K[•]]。在Guyan 静力凝聚法的基础上, 本文采用下述方法将总刚度矩阵聚缩成动力总刚



图 2 坐标及震动输入方向

 $[K]^{[2]}:a.$ 将结构按获得最小带宽的原则进行结点编号,按有限元法中通常采用的"对号入座" 方法组装结构弹塑性刚度矩阵 $[K^{\bullet}],$ 并将其作三角分解。总刚 $[K^{\bullet}]$ 中的元素排列不区分主副 自由度,以获得最小带宽。b. 在第 *i* 片刚性楼板质心 C_i 处分别施加单位水平力 $P_{xi}=1, P_{yi}=1$ 及单位力偶 $M_{yi}=1,$ 利用分解后的总刚度矩阵 $[K^{\bullet}],$ 从静力方程 $[K^{\bullet}]{\delta}={P}$ 中回代求出 在单位荷载作用下的结点位移矢量 ${\delta}_{I},$ 从 ${\delta}_{I}$ 中取出与主自由度相对应的位移,构成柔度矩

第1期

阵[F]中的 3*i*-2,3*i*-1,3*i* 列元素。依次在刚心楼板质心施加单位力,单位力偶,从而获得动 力方程中刚度矩阵[K]对应的柔度矩阵[F]。在此过程中,只需对总刚度矩阵[K*]分解一次, 以后每次施加单位力时只需回代。c.对柔度矩阵[F]求逆,可求得动力刚度矩阵[K]=[F]⁻¹。 由于[F]的阶数远远小于副自由度的阶数,所以用这种方法获得[K]比一般静力凝聚方法计算 工作量小得多。

(5)考虑几何非线性 *P*-Δ效应,应从动力总刚度矩阵[K]中减去几何刚度矩阵[K_G],得 到反映非线性特征的动力刚度矩阵[K']^[3]:

$$[K'] = [K] - [K_G] \tag{3}$$

采用与轴力产生倾覆力矩等效的层间剪力来考虑重力与水平位移相互作用引起的 *P*-Δ 效应,几何刚度矩阵[*K*_c]可表达为

$$[K_G] = \begin{bmatrix} \frac{\sum N_1}{h_1} + \frac{\sum N_2}{h_2} & 0 & 0 & -\frac{\sum N_2}{h_2} & 0 \\ & \frac{\sum N_1}{h_1} + \frac{\sum N_2}{h_2} & 0 & 0 & -\frac{\sum N_2}{h_2} & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{\sum N_i}{h_i} & 0 & 0 \\ & & & \frac{\sum N_s}{h_s} & 0 \\ & & & & 0 \end{bmatrix}$$
(4)

式(4)的形式由刚片的串并联关系,具体写出,其中: $\sum N_i$ ($i=1,\dots,n$)为第i片刚性楼板 下各竖向构件轴力之和; h_i ($i=1,\dots,n$)为第i片刚性楼板下的层高。

(6)结构动力微分方程采用 Wilson-θ 法求解;并利用主自由度位移增量求副自由度位移 增量^[4]。

计算中采用折线型力——变形滞回曲线,其拐点处理原则是:当构件刚度在 t,~ti+1的 Δt 时间内发生变化,使其偏离力——变形滞回曲线,这时不必求出其改变刚度的准确时间,而将 该偏离点按具体情况用作垂线的方法拉回滞回曲线上。

1.3 空间非线性时程分析程序总框图(见图 3)

2 算例

现以1幢试验用(已设计待试)三层非对称双塔建筑结构分析为例,说明程序对复杂结构 分析的适用性,结构各层平面如图4;构件截面设计见图5。

各层层高均为 3.0m。钢筋为 I 级,混凝土为 C₂₅。其结构分析模型见图 6。各刚性楼板的 质量和绕质心的转动惯量见表 1。

	第1刚性楼板	第2刚性楼板	第3、4刚性楼板
质量(kg)	37.36×10^2	19.15×10^{2}	8. 38×10^3
转动惯量(kg • m ²)	6.23×10 ⁵	3.18×10 ⁵	2.36×104

表1 算例的楼板质量和转动惯量表

沿 X 方向和 Y 方向同时输入 EL • centro 地震波,二方向的最大峰值均为 340gal,持时 10s。由于该结构在两个方向均不对称,在地震动过程中发生了明显的扭转振动。



经计算机计算,其分析结果绘于图 7~11 中。

为验证程序的正确性,使用该程序对"美日联合试验七层足尺结构"进行了计算分析,分析 结果和试验情况吻合较好^[5]。

3 结语

在地震水平荷载作用下,非对称结构将产生显著的扭转反应,加速了远离刚心的角部构件 的破坏,因而可能进一步加剧结构的偏心程度。因此采用较精确的空间分析模型对非对称结构 进行非线性地震反应计算分析是十分必要的。



图 8 第1刚性楼板质心、角点G位移(Y向)反应时程曲线比较

在楼板分层刚性化假设的基础上,根据楼板的刚度和形式将楼板分区,然后,利用弹簧单 元和杆单元将刚性板块串并联,可以实现复杂结构的空间非线性分析。

参考文献

- 1 Corderoy, H. J. B, and Thambiratnam, D. P., Micro-computer Analysis of Torsionally Coupled Multistorey Buildings for Earthquakes, comput struct. 1993
- 2 向放龙,邹银生. 钢筋混凝土结构非线性时程分析中的实用方法. 工程力学. 1994(增)
- 3 李桂青,翟伟廉.P-Δ效应在非线性地震动态反应中的影响.武汉建材学院学报.1981(2)
- 4 孙焕纯.关于非线性结构振动方程的求解——二级近似加速度逐步积分法.大连工学院学

• 41 •



报.1980(3)

T. Kabeyasawa, H • Shiohera, S. otani and H. Aoyama, Analysis of the Full-Scall Seven
--Story Reinforced Concrete Test Structure, Test SPD-3, Proc. 3rd Joint Technical
Coordinating committee, U • S - Japan Cooperative Earthquake Research Program,
Building Research Institute Tukuba, 1982

第1期