

二维水平地震作用下斜交构件 多层结构的地震反应*

魏 琏 戴国莹 朱锦心 蒋自立

(北京中国建筑科学研究院, 1981年2月20日收到)

摘 要

本文针对由斜交构件组成的多层结构, 考虑任意角度输入二维水平地运动, 采用多种不同的恢复力特性曲线模型, 提供了弹性与弹塑性地震反应的计算方法, 并据此编制了相应的计算机程序.

文内通过一座十层建筑结构的算例, 分析了一维与二维地震波输入以及不同的地震波输入角度对各构件地震反应的影响, 并讨论了弹性与弹塑性地震反应的差异, 提出了一些有参考价值的结论.

前 言

由于建筑物功能需要, 有时需采用由斜交构件组成的多层建筑. 驰名全球的有日本东京的新大谷饭店、罗马尼亚布加勒斯特的洲际旅馆等, 法国巴黎也建造有类似的建筑. 我国正在设计的北京国际饭店也采用此类结构.

在地震作用下, 对于这类结构仅考虑一维水平地运动的作用是不够的. 在强震作用下, 它不仅产生两向的水平运动, 还将产生空间扭转, 其地震反应的计算须探索新的方法.

本文考虑二维水平地运动同时输入, 并考虑地震波输入角的任意变化, 导出了结构的运动方程, 并采用不同的恢复力特性曲线来表示构件的力—位移关系, 在此基础上提供了此类结构的弹性与弹塑性地震反应的计算方法, 为实现其运算, 编制了计算机程序 IER7 和 IER8.

一、基本假定和说明

图 1 示一斜交构件多层结构. 各层间结构包括该层内所有抗剪构件, 各楼层假设为刚性横膈, 结构质量集中于各楼层, 每层的质量中心可不在同一竖轴上, 每层的刚度中心也可以不在同一竖轴上, 公式推导与计算时, 可选取适当位置的竖轴为转动轴, 穿过楼层处即为该层的转动中心.

* 叶开沅推荐.

在输入水平地震作用下, j 楼层转动中心处将产生 x 方向的水平位移 $U_j(t)$, y 方向的水平位移 $V_j(t)$ 及扭转角反应 $\phi_j(t)$.

各斜构件可为框架、带墙框架或其他墙体.

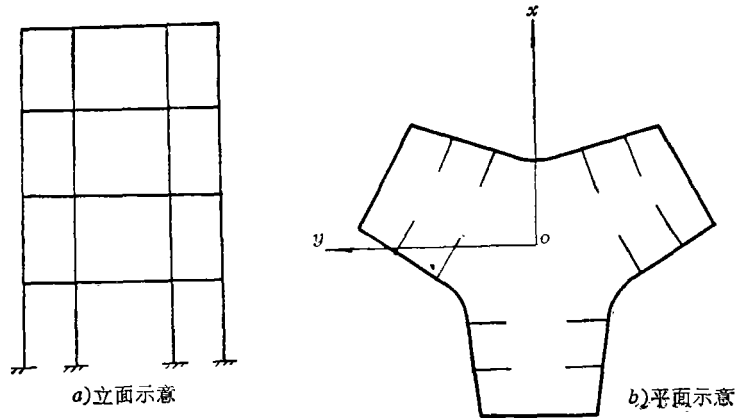


图1 斜交构件多层结构.

二、层间结构的刚度矩阵

如图2所示, 令 U_j , V_j , ϕ_j 及 U_{j-1} , V_{j-1} , ϕ_{j-1} 分别表示第 j 、 $j-1$ 层沿 x 轴及 y 轴方向的水平位移以及扭转角位移反应 (以顺时针方向为正), 可得层间结构上下两端内力的矩阵表达式为

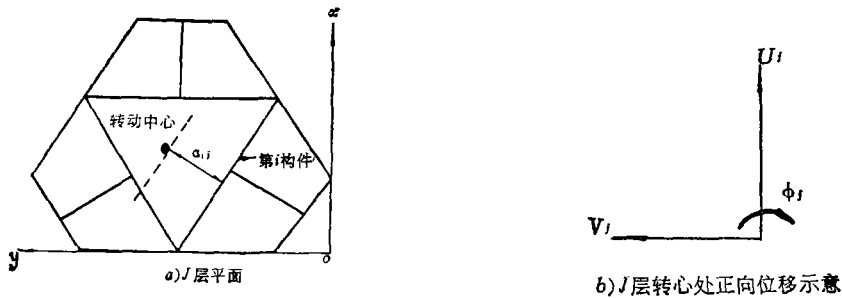


图 2

$$\{Q_j\} = [\tilde{K}_j] \cdot \{U_j\} \quad (2.1)$$

式中,

$$\{Q_j\} = \{Q_{x,j-1}, Q_{y,j-1}, M_{j-1}, Q_{x,j,j-1}, Q_{y,j,j-1}, M_{j,j-1}\}^T \quad (2.2)$$

$$\{U_j\} = \{U_{j-1}, V_{j-1}, \phi_{j-1}, U_j, V_j, \phi_j\}^T \quad (2.3)$$

$$[\tilde{K}_j] = \begin{bmatrix} K_{xj}^x & K_{xj}^y & K_{xj}^\phi & -K_{xj}^x & -K_{xj}^y & -K_{xj}^\phi \\ K_{yj}^x & K_{yj}^y & K_{yj}^\phi & -K_{yj}^x & -K_{yj}^y & -K_{yj}^\phi \\ K_{\phi j}^x & K_{\phi j}^y & K_{\phi j}^\phi & -K_{\phi j}^x & -K_{\phi j}^y & -K_{\phi j}^\phi \\ -K_{xj}^x & -K_{xj}^y & -K_{xj}^\phi & K_{xj}^x & K_{xj}^y & K_{xj}^\phi \\ -K_{yj}^x & -K_{yj}^y & -K_{yj}^\phi & K_{yj}^x & K_{yj}^y & K_{yj}^\phi \\ -K_{\phi j}^x & -K_{\phi j}^y & -K_{\phi j}^\phi & K_{\phi j}^x & K_{\phi j}^y & K_{\phi j}^\phi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

其中

$$\left. \begin{aligned}
 K_{xj}^* &= \sum_i K_{ij} \cdot \cos^2 \alpha_i \\
 K_{yj}^* &= \sum_i K_{ij} \cdot \sin^2 \alpha_i \\
 K_{\phi i}^* &= K_{xj}^{\phi} = \sum_i K_{ij} \cdot \cos \alpha_i \cdot a_{ij} \\
 K_{\phi i}^* &= K_{yj}^{\phi} = \sum_i K_{ij} \cdot \sin \alpha_i \cdot a_{ij} \\
 K_{\phi i}^{\phi} &= \sum_i K_{ij} \cdot a_{ij}^2
 \end{aligned} \right\} (2.5)$$

K_{ij} —— j 楼层 i 构件抗剪刚度
 a_{ij} —— j 楼层 i 构件距转动中心距离
 α_i —— j 楼层 i 构件与 x 方向夹角

三、结构运动微分方程及弹性地震反应计算

考虑输入二维水平地运动 $\dot{U}_0(t)$ 及 $\dot{V}_0(t)$ ，输入波方向与结构坐标轴成 θ 夹角，见图3。

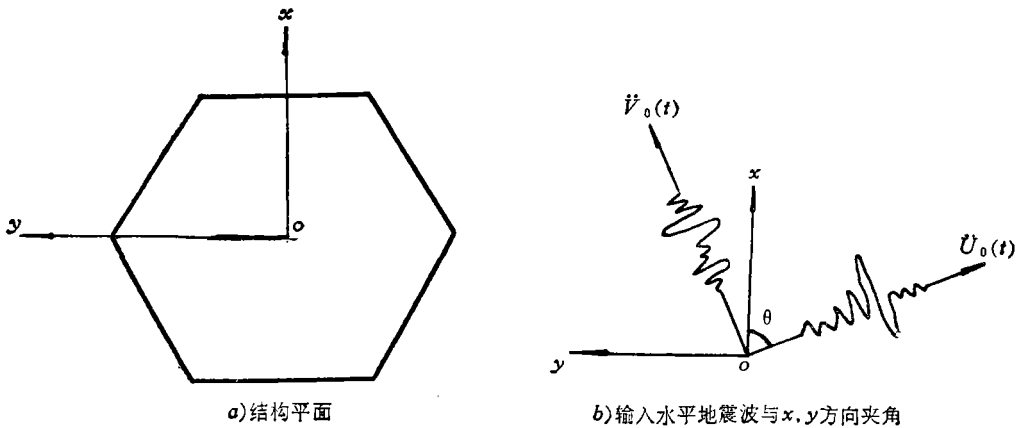


图 3

可列出结构的运动微分方程为:

$$[\tilde{M}] \cdot \{\dot{U}\} + [C] \cdot \{\dot{U}\} + [K] \cdot \{U\} = -[M] \cdot \{\dot{U}_0\} \quad (3.1)$$

式中:

$$[\tilde{M}] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & M_1 a_{m1} & & & & & & & \\ 0 & M_1 & M_1 b_{m1} & & & & & & & \\ M_1 a_{m1} & M_1 b_{m1} & M_1^{\phi} & & & & & & & \\ & & & M_2 & 0 & M_2 a_{m2} & & & & \\ & & & 0 & M_2 & M_2 b_{m2} & & & & \\ & & & M_2 a_{m2} & M_2 a_{m2} & M_2^{\phi} & & & & \\ & & & & \dots & & & & & \\ & & & & \dots & & & & & \\ & & 0 & & & & M_n & 0 & M_n a_{mn} & \\ & & & & & & 0 & M_n & M_n b_m & \\ & & & & & & M_n a_{mn} & M_n b_{mn} & M_n^{\phi} & \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & & & & & & & & & \\ & M_1 & & & & & & & & \\ & & M_1 a_{m1} & & & & & & & \\ & & & M_2 & & & & & & \\ 0 & & & & M_2 & & & & & \\ & & & & & M_2 a_{m2} & & & & \\ & & & & & & \dots & & & \\ & & & & & & & M_n & & \\ & & & & & & & & M_n & \\ & & & & & & & & & M_n a_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\left. \begin{aligned} \{\dot{U}\} &= \{\dot{U}_1, \dot{V}_1, \dot{\phi}_1, \dot{U}_2, \dot{V}_2, \dot{\phi}_2, \dots, \dot{U}_n, \dot{V}_n, \dot{\phi}_n\}^T \\ \{\dot{U}\} &= \{\dot{U}_1, \dot{V}_1, \dot{\phi}_1, \dot{U}_2, \dot{V}_2, \dot{\phi}_2, \dots, \dot{U}_n, \dot{V}_n, \dot{\phi}_n\}^T \\ \{U\} &= \{U_1, V_1, \phi_1, U_2, V_2, \phi_2, \dots, U_n, V_n, \phi_n\}^T \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned}
 C_{x_i}^x &= \sum_i 2\xi \cdot K_{i,j} \cdot \cos^2\alpha_i \cdot \sqrt{M_i / \sum_i K_{i,j} \cdot \cos^2\alpha_i} \\
 C_{x_i}^y &= \sum_i 2\xi \cdot K_{i,j} \cdot \cos\alpha_i \cdot \sin\alpha_i \cdot \sqrt{M_i / \sum_i K_{i,j}} \\
 C_{x_i}^\phi &= \sum_i 2\xi \cdot K_{i,j} \cdot \cos\alpha_i \cdot a_{i,j} \cdot \sqrt{M_i / \sum_i K_{i,j}} \\
 C_{y_i}^y &= \sum_i 2\xi \cdot K_{i,j} \cdot \sin^2\alpha_i \cdot \sqrt{M_i / \sum_i K_{i,j} \cdot \sin^2\alpha_i} \\
 C_{y_i}^\phi &= \sum_i 2\xi \cdot K_{i,j} \cdot \sin\alpha_i \cdot a_{i,j} \cdot \sqrt{M_i / \sum_i K_{i,j}} \\
 C_{\phi_i}^\phi &= \sum_i 2\xi \cdot K_{i,j} \cdot a_{i,j}^2 \cdot \sqrt{M_i / \sum_i K_{i,j}}
 \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

$$\{ \dot{U}_0 \} = \left\{ \begin{aligned}
 &\dot{U}_0 \cos\theta + \dot{V}_0 \sin\theta \\
 &\dot{V}_0 \cos\theta - \dot{U}_0 \sin\theta \\
 &\dot{U}_0 \cos\theta + \dot{V}_0 \sin\theta + \eta_1 (\dot{V}_0 \cos\theta - \dot{U}_0 \sin\theta) \\
 &\dot{U}_0 \cos\theta + \dot{V}_0 \sin\theta \\
 &\dot{V}_0 \cos\theta - \dot{U}_0 \sin\theta \\
 &\dot{U}_0 \cos\theta + \dot{V}_0 \sin\theta + \eta_2 (\dot{V}_0 \cos\theta - \dot{U}_0 \sin\theta) \\
 &\dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 &\dot{U}_0 \cos\theta + \dot{V}_0 \sin\theta \\
 &\dot{V}_0 \cos\theta - \dot{V}_0 \sin\theta \\
 &\dot{U}_0 \cos\theta + \dot{V}_0 \sin\theta + \eta_n (\dot{V}_0 \cos\theta - \dot{U}_0 \sin\theta)
 \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

其中: $\eta_j = b_{m_j} / a_{m_j}$, ($j=1, 2, \dots, n$)

当确定输入地震波 $\dot{U}_0(t)$ 及 $\dot{V}_0(t)$, 求出结构的质量、刚度及阻尼矩阵后, 采用数值积分法求解方程 (3.1), 即可求出结构的弹性地震反应并作出其时程曲线. 为了实现以上计算, 编制了计算程序 IER7.

四、结构的弹塑性地震反应

任一构件的恢复力特性曲线采用多段折线形式, 可取为图 4 中三种之一: a) 不退化双线性型 b) 退化双线性型 c) 退化三线型.

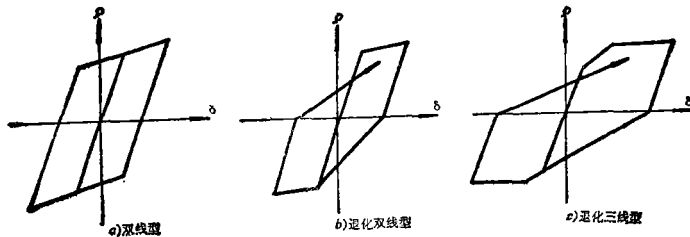


图 4 几种恢复力特性曲线.

采用半增量形式的运动微分方程

$$[M] \cdot \{\ddot{x}\}_{i+1} + [C]_i^{i+1} \cdot \{\Delta \dot{x}\}_i^{i+1} + [K]_i^{i+1} \cdot \{\Delta x\}_i^{i+1} + \{Q\}_i = -[M] \{\dot{U}_0\}_{i+1} \quad (4.1)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} \{\ddot{x}\}_{i+1} & \quad t_{i+1} \text{ 时刻的加速度向量} \\ \{\Delta \dot{x}\}_i^{i+1}、\{\Delta x\}_i^{i+1} & \quad t_i \text{ 至 } t_{i+1} \text{ 时段的速度、位移增量向量} \\ [C]_i^{i+1}、[K]_i^{i+1} & \quad t_i \text{ 至 } t_{i+1} \text{ 时段的阻尼及刚度矩阵在本时段内取为常量} \\ \{Q\}_i & = \{Q\}_{i-1} + [K]_{i-1} \{\Delta x\}_{i-1} + [C]_{i-1} \{\Delta \dot{x}\}_{i-1} \\ \{Q\}_0 & = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

化为拟静力方程后用中点差分法求解得:

$$[K^*]_i^{i+1} \cdot \{\Delta x\}_i^{i+1} = \{\Delta p^*\}_i^{i+1} \quad (4.3)$$

式中:

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

由 (4.3) 解得 $\{\Delta x\}_i^{i+1}$ 后, 即可由下式计算出 t_{i+1} 时刻的加速度、速度及位移:

$$\left. \begin{aligned} \{\ddot{x}\}_{i+1} & = \frac{4}{\Delta t^2} \{\Delta x\}_i^{i+1} - \frac{4}{\Delta t} \{\dot{x}\}_i + \{\ddot{x}\}_i \\ \{\dot{x}\}_{i+1} & = \frac{2}{\Delta t} \{\Delta x\}_i^{i+1} - \{\dot{x}\}_i \\ \{x\}_{i+1} & = \{x\}_i + \{\Delta x\}_i^{i+1} \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

式中, $\Delta t = t_{i+1} - t_i$

输入地震波由 $t=0$ 起, 取 Δt 步长逐步依序计算, 并随时判断, 当发现任一构件进入塑性时即修改该构件刚度, 从而形成新的刚度矩阵及阻尼矩阵, 逐步计算至地面运动完毕, 为了实现上述运算, 编制了计算程序 IER8.

五、算 例

图 5 示某十层的斜交墙结构平面, 结构基本计算参数列于表 1, 输入 EI-Centro 二维

表 1 结 构 计 算 数 据 表

层 次	M	K	M ^φ	F _c (构件)	F _s (构件)
1	0.6	8	480	60	100
2	0.6	8	480	{ 1#—8# 构件 15 9#—12# 构件 25	{ 25 40
3~5	0.6	8	480	60	100
6~10	0.5	8	400	60	100

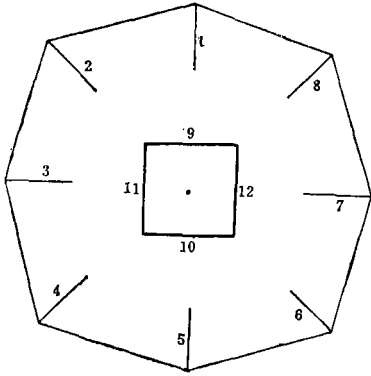


图5 十层算例平面及构件序号示意。

水平地震波 ($N-S$ 分量加速度峰值为 $200gal$)。

采用本文介绍的计算方法和计算程序 IER7、IER8 计算以下各项：*a*) 一维及二维地震波分别作用下结构弹性反应，*b*) 地震波输入角度变化对地震反应的影响，*c*) 弹性地震反应与弹塑性地震反应的比较。计算结构弹塑性地震反应时采用图 4c 所示恢复力特性曲线。

转动中心取在结构平面几何中心，每层由质量偏心引起的转动惯量列于表 1，计算结果示于图 6 ~ 图 10。

图 6 为分别输入一维及二维地震波时各楼层的各构件最大剪力反应的比较。

图 7 为不同角度输入地震波 (二维) 时各层构件最大剪力反应比较。这里仅给出 $\theta=0^\circ$ 及 $\theta=45^\circ$ 时的结果。

图 8 为顶层及第二层转心处的二向位移以及扭转角位移的反应时程曲线。

图 9、图 10 分别为各层构件剪力与层间位移弹性与弹塑性地震反应比较。

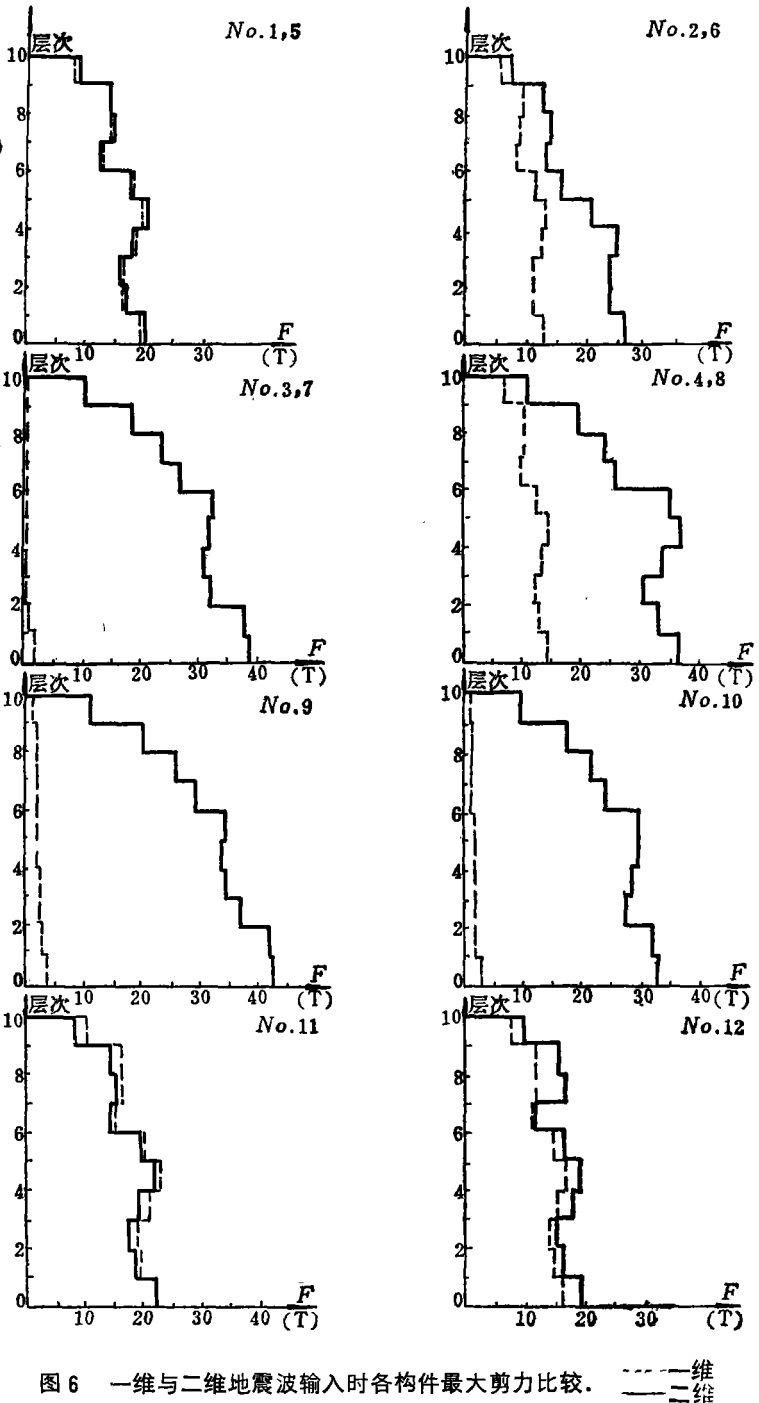


图6 一维与二维地震波输入时各构件最大剪力比较。 --- 一维
—— 二维

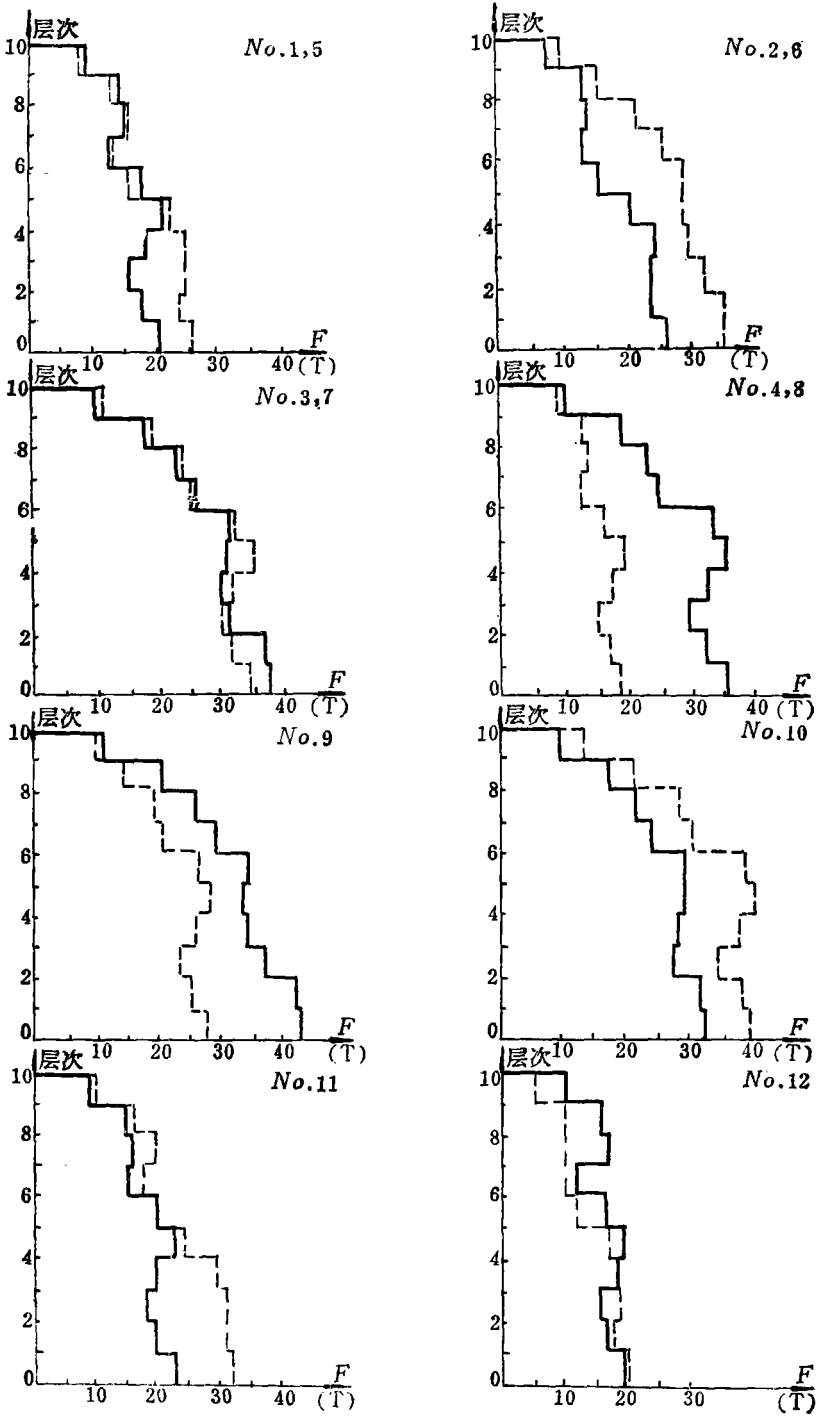


图 7 不同角度输入地震波时各构件最大剪力比较。 — 0°
 - - - 45°

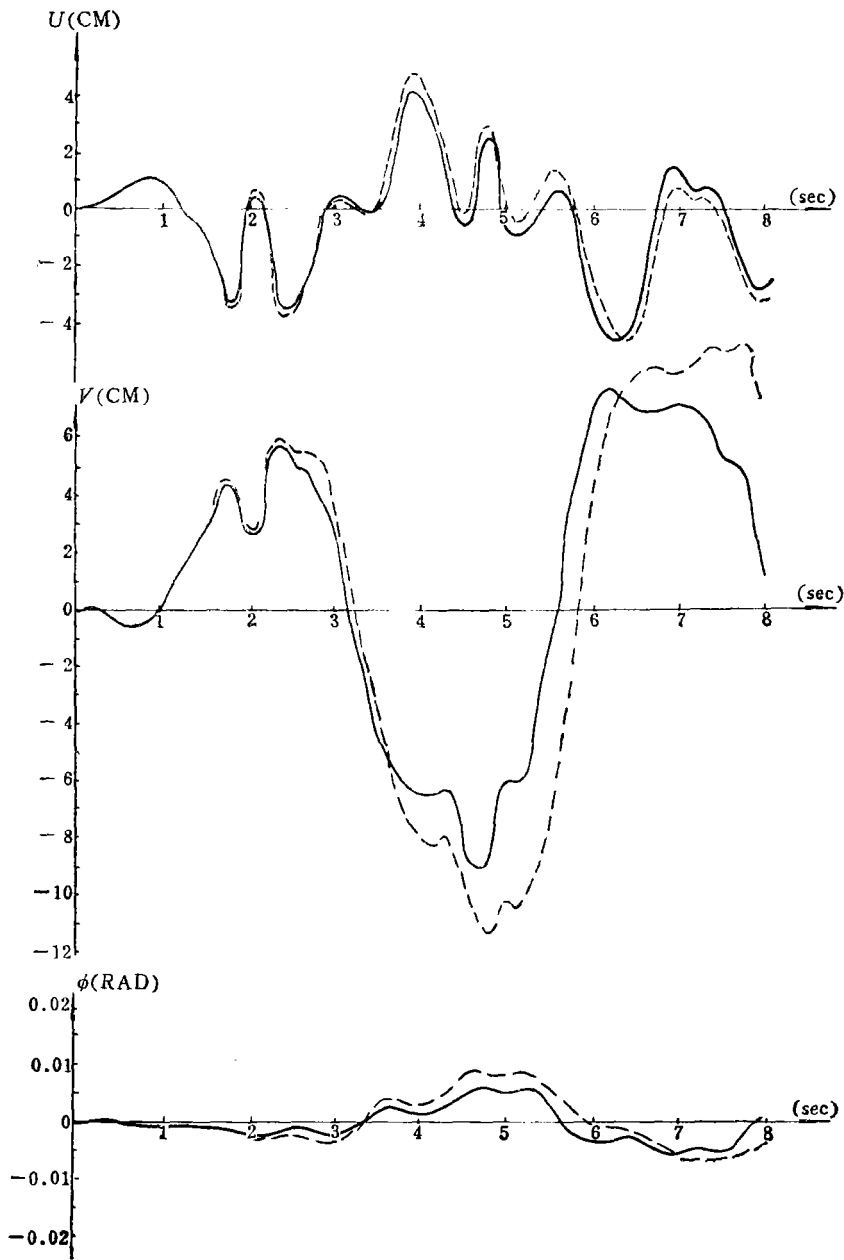


图 8-1 十层算例的第二层位移比较。

--- 弹塑性反应
 —— 弹性反应

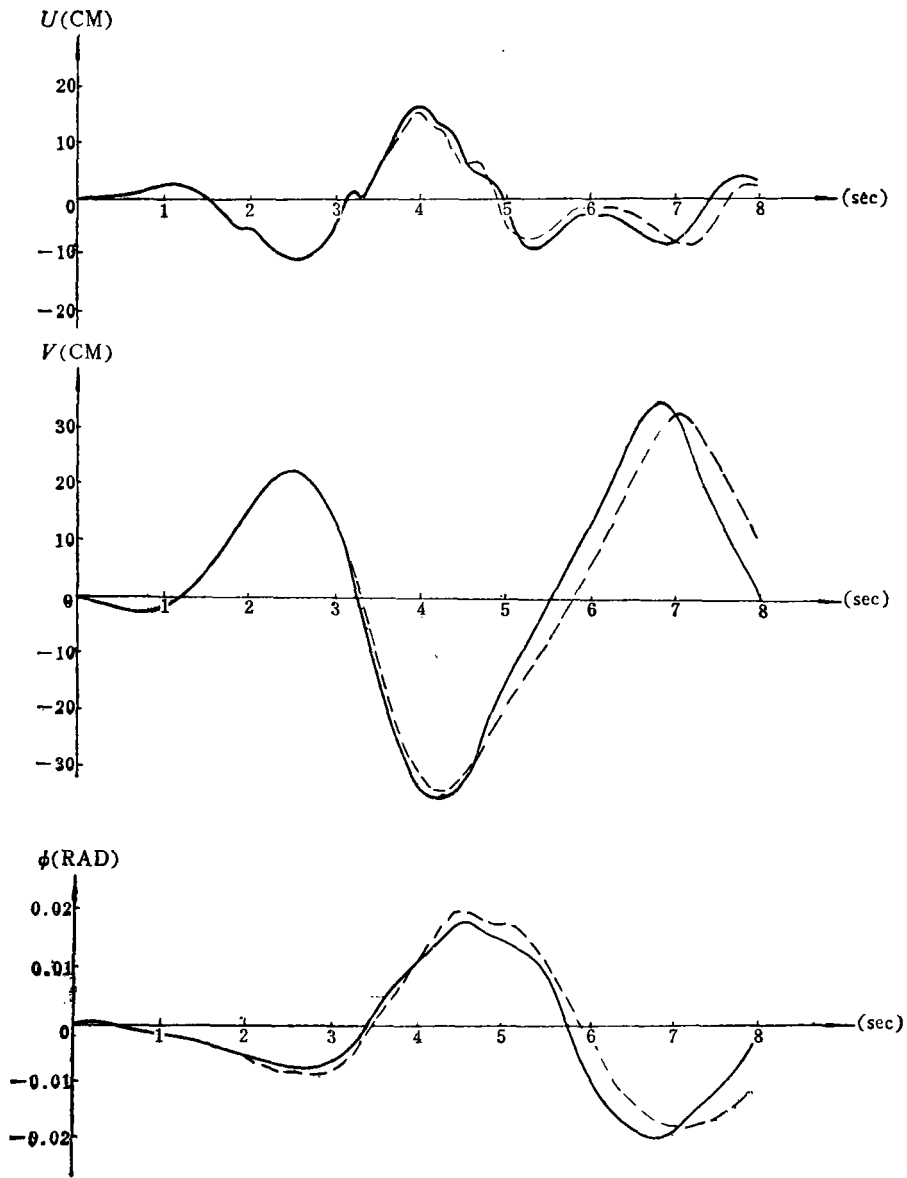


图 8-2 十层算例顶点位移反应比较.
 --- 弹塑性反应
 — 弹性反应

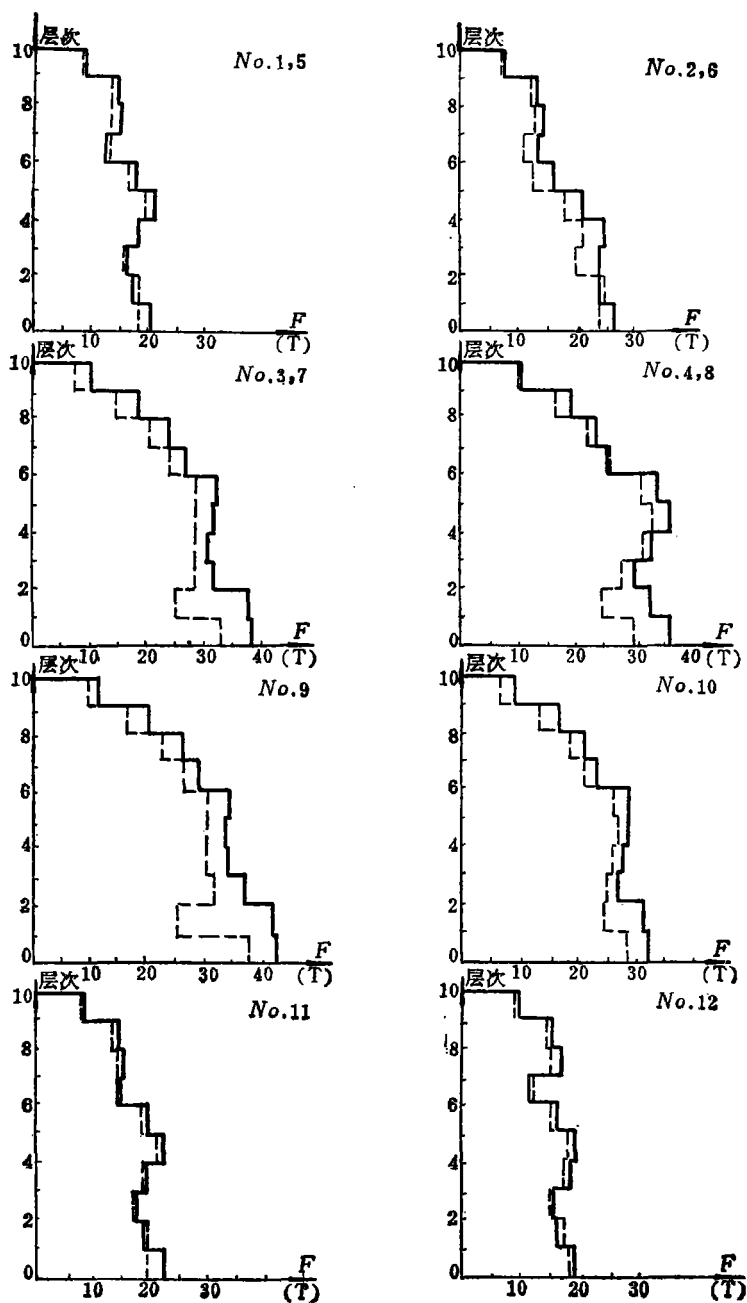


图9 各构件剪力比较.
 - - - 弹性反应
 ——— 弹塑性反应

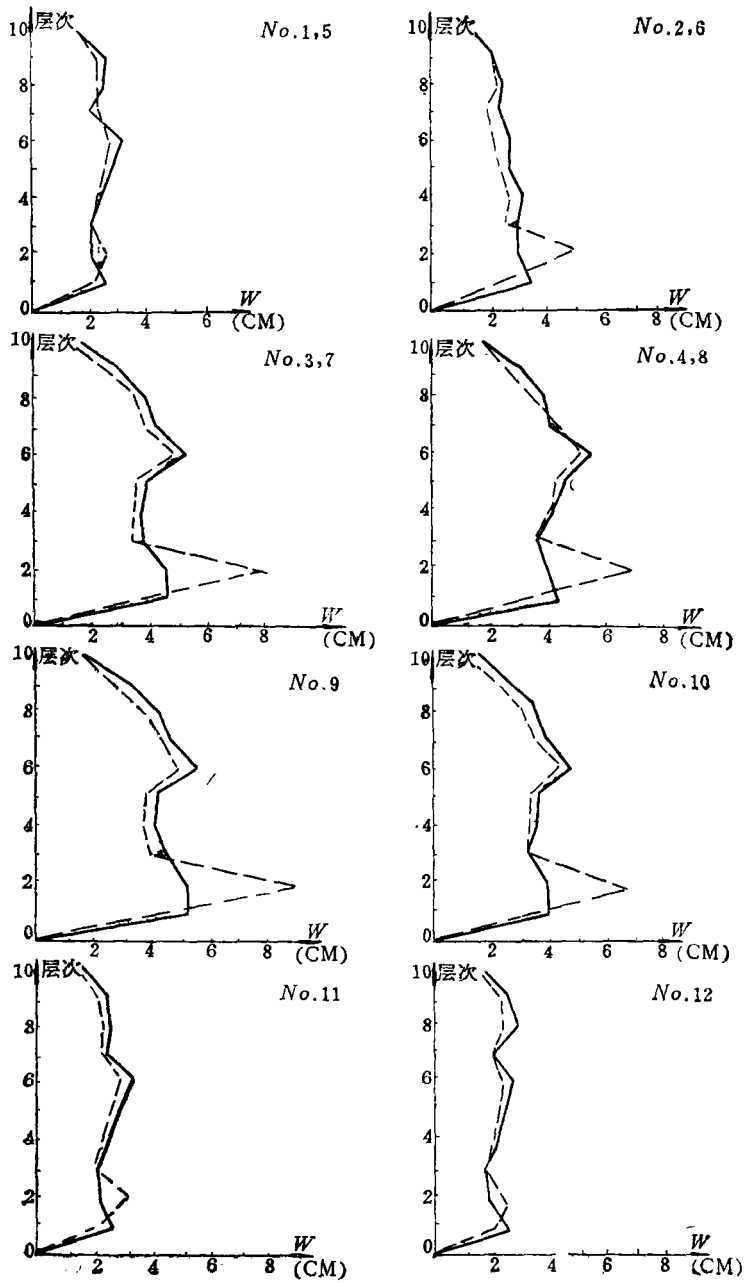


图 10 各层有关构件层间剪切位移比较。 - - - 弹性反应
— 弹塑性反应

六、结 论

根据上述计算方法与算例结果,可简要作出以下结论:

1. 对于斜交构件多层结构,考虑二维水平地震波输入是必要的.只输入一维水平地震波,将使某些斜向构件得出偏小而不安全的地震反应.
2. 当水平地震波输入角 θ 变化时,各构件地震反应有明显的变化,计算时须考虑不同的可能输入角度,以求出不同构件的最不利地震反应.计算机程序应将这一因素考虑在内.
3. 在强震作用下进行结构的弹塑性地震反应分析是必要的,否则可能忽略结构的薄弱部位.弹塑性分析结果表明,某些屈服楼层的构件可能出现较大的层间变形,这是结构设计人员在设计时必须充分注意的一个问题.

参 考 文 献

1. Clough, R. W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, (1975).
2. Umemura, H., Analysis of the behavior of R. C. structures during earthquake based on the empirical estimation of inelastic restoring force characteristics of members, *5WCEE*, (1973).
3. Muto, K., *High-rise Buildings-Structure*, (in Japanese), (1973).
4. Aoyama, H., Simple Nonlinear Models for the Seismic Response of R. C. Buildings, Proceedings of the Review Meeting U.S-Japan Co-operative Research Program in Earthquake with Emphasis on the Safety of School Buildings, (1975).
5. Wei Lian, Zhu Jing-xin and Jiang Zhi-li, Nonlinear earthquake response of multi-storied structures taking account of torsion, *7WCEE* (1980).

**Seismic Response Analysis for Multi-storeyed Buildings
Composed of Nonorthogonal Members under
Bi-Directional Horizontal Earthquake
Ground Motions**

Wei Lian Dai Gou-ying
Zhu Jing-xin Jiang Zhi-li

(Chinese Academy of Building Research, Beijing)

Abstract

This paper presents a method for analyzing both linear and nonlinear seismic responses of multi-storeyed buildings composed of nonorthogonal structural members under the action of bi-directional horizontal earthquake waves. Different kinds of restoring force model are used. An efficient computer programme for the computation of nonlinear seismic response of the structure was worked out. In order to illustrate the application of the method, an example of a ten-storeyed building of such sort is given.