

考虑屋盖整体空间工作时的单层偏心 厂房的平扭耦联地震反应分析

曲 华 王焕定

(青岛土木工程研究所) (哈尔滨土木工程研究所)

(潘立宙推荐, 1987年2月13日收到)

摘 要

本文研究了单层偏心厂房的平动-扭转耦联地震反应,建立了考虑屋盖整体空间工作时的地震反应运动方程,并进行了分析,讨论,指出在包含有地震转动分量作用时,地震各运动分量独立作用的迭加原理和动力反应分析的振型分解法已不再适用。

本文在不计地震转动分量的前提下,对单层偏心厂房的平扭耦联地震反应进行了大量的计算及对比分析,结论是:考虑屋盖变形后的计算结果能更好地解释地震破坏现象,并指出了不考虑屋盖变形的适用范围。

一、前 言

单层厂房是由横向排架单元和纵向联系体系组成的空间整体结构,这种结构的地震反应非常复杂.文献[1]根据大量震害现象和实测资料提出建立的等效剪切梁屋盖的理论很完美地解释了单层厂房地震时的破坏现象,并且文献[1]也给出了质心和刚心互相重合情况下的具体计算方法和有关图表,当质心和刚心不相重合时,结构的地震反应将出现平动与扭转相耦联的振动(简称平扭耦联振动)致使结构地震反应的分析变得更加复杂.对于这类偏心结构的平扭耦联反应的研究,国内外学者做了大量的工作,但基本上都是忽略屋盖变形,取弹性支承上的刚性盘体的计算模型,并且不考虑地震转动分量的影响,如此的简化模型适用于什么样的条件,屋盖变形的影响怎样,如果考虑屋盖的整体空间工作和地震转动分量的影响,其地震反应应如何分析等问题显然都是值得进一步研究和探讨的。

本文采用弹性支承剪切梁屋盖的计算模型(当屋盖剪切刚度趋于无穷大时,本文模型就退化成屋盖为刚体的计算模型,所以后者是本文计算模型的一个特例),从地震时地面上所有的建筑物都处于非惯性系统中运动的观点出发,来分析研究单层偏心厂房的地震反应,建立了单层偏心厂房在地震水平分量和转动分量作用下的一般性地震反应的运动方程,并进行了分析和讨论,指出在包含有地震转动分量作用时,地震各运动分量独立作用的迭加原理和常规的动力反应分析中的振动分解法已不再适用。

本文在不计地震转动分量的前提下,对单层偏心厂房的平扭耦联地震反应根据反应谱

解析法进行了分析研究。通过对数值结果的对比分析，既回答了上面提出的各种问题，也告诉我们本文采用的计算模型能更好地反映单层偏心厂房地震反应的实际情况。同时，本文还指出了不考虑屋盖变形的适用范围。

二、计算模型和运动方程

本文根据单层偏心厂房的结构特点和地震反应的实际情况特做以下几点假设：

1. 各排架柱质量的二分之一（若是墙体，则取其质量的三分之一）加上按块划分的屋盖的质量集中在相应的柱头上；
2. 各排架柱本身的扭转变形忽略不计；
3. 屋盖横向为剪切变形，纵向刚度无穷大，扭转振动时，各方向排架的扭转角相同。

根据上述假设可得如图 1 所示结构简化模型

$$m_i = \sum_{j=1}^h m_{ij} \qquad m_j = \sum_{i=1}^n m_{ij}$$

$$K_{xij} = \sum_{j=1}^h K_{xij} \qquad K_{yij} = \sum_{i=1}^n K_{yij}$$

其中：

- m_{ij} ：第 i 排第 j 列处质点的质量
- K_{xij} ：第 ij 质点处 x 方向的侧向刚度
- K_{yij} ：第 ij 质点处 y 方向的侧向刚度

我们知道：地震时，地面上的所有建筑物都是处于非惯性系统中运动。为了描述这种运动中的各质点的运动状态，本文建立如下坐标系： $Oxyz$ 为定坐标系。通过基础中心的坐标系 $O'x'y'z'$ 为动坐标系，详见图 2，这里并假设结构的质心与基础中心在同一铅垂线上。

设 $[u^T, v, \theta]^T$ 为质点的相对位移向量，其中 u, v, θ ($u = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$) 分别为 x, y, φ 方向相对位移分量，这里的位移 u_i 不包括屋盖扭转在 x 方向上引起的附加位移。则任一质点 m_{ij} 在时刻 t 位于动坐标系 $O'x'y'z'$ 里的坐标为：

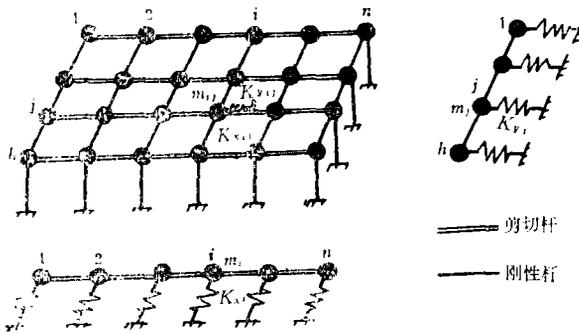


图 1

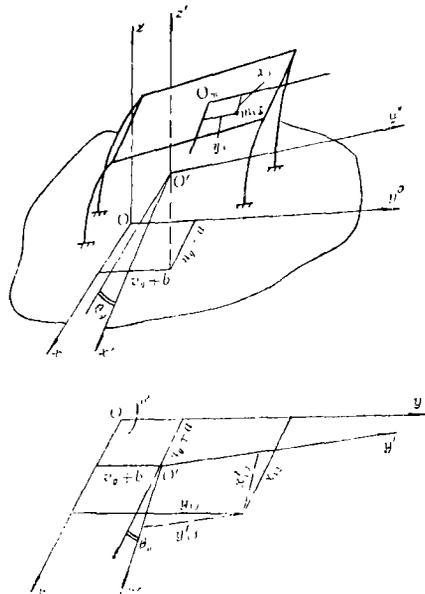


图 2

$$\left. \begin{aligned} x'_{ij}(t) &= \bar{x}_j + u_i(t) - \bar{y}_i \theta(t) \\ y'_{ij}(t) &= \bar{y}_i + v(t) + \bar{x}_j \theta(t) \\ z'_{ij}(t) &= h = \text{常数} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

式(2.1)及本文后面的各公式都略去二阶以上小量的影响。于是质点 m_{ij} 在定坐标系 $Oxyz$ 中的坐标为:

$$\left. \begin{aligned} x_{ij}(t) &= u_g(t) + x'_{ij}(t) \cos \theta_g(t) - y'_{ij}(t) \sin \theta_g(t) + a \\ y_{ij}(t) &= v_g(t) + x'_{ij}(t) \sin \theta_g(t) + y'_{ij}(t) \cos \theta_g(t) + b \\ z_{ij}(t) &= H = R + h \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

式中:

\bar{x}_j, \bar{y}_i, h : 为质点 m_{ij} 初静止时在动坐标系的坐标

a, b, R : 为动坐标系原点 O' 初静止时在定坐标系的坐标

u_g, v_g, θ_g : 分别为地震水平位移分量和转动角位移分量

将(2.1)式代入(2.2)式得:

$$\left. \begin{aligned} x_{ij}(t) &= u_g(t) + [\bar{x}_j + u_i(t) - \bar{y}_i \theta(t)] \cos \theta_g(t) \\ &\quad - [\bar{y}_i + v(t) + \bar{x}_j \theta(t)] \sin \theta_g(t) + a \\ y_{ij}(t) &= v_g(t) + [\bar{x}_j + u_i(t) - \bar{y}_i \theta(t)] \sin \theta_g(t) \\ &\quad + [\bar{y}_i + v(t) + \bar{x}_j \theta(t)] \cos \theta_g(t) + b \\ z_{ij}(t) &= R + h \end{aligned} \right\} \quad (2.2)'$$

质点 m_{ij} 相对于 ij 柱基的位移

$$\left. \begin{aligned} s_{x'_{ij}}(t) &= u_i(t) - \bar{y}_i \theta(t) \\ s_{y'_{ij}}(t) &= v(t) + \bar{x}_j \theta(t) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

式(2.3)中

$s_{x'_{ij}}$: 时刻 t 时质点 m_{ij} 在 x' 方向上相对于 ij 柱基的位移

$s_{y'_{ij}}$: 时刻 t 时质点 m_{ij} 在 y' 方向上相对于 ij 柱基的位移

于是, 我们可建立如下的单层偏心结构在非惯性系统中的平动-扭转耦联地震反应的运动方程:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \mathbf{M} & 0 & -\mathbf{M}\bar{\mathbf{Y}} \\ 0^T & m & 0 \\ -\bar{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} & 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & 0 & -\mathbf{C}\bar{\mathbf{Y}} \\ 0^T & C & C_{\phi} \\ -\bar{\mathbf{Y}}^T \mathbf{C} & C_{\phi_y} & C_{\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_s & 0 & -\mathbf{K}_s \bar{\mathbf{Y}} \\ 0^T & K_y & K_{y\phi} \\ -\bar{\mathbf{Y}}^T \mathbf{K}_s & K_{\phi_y} & K_{\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ \theta \end{Bmatrix} + 2 \begin{bmatrix} 0 & -\bar{\mathbf{M}} & -\mathbf{M}\bar{\mathbf{X}}_c \\ \bar{\mathbf{M}}^T & 0 & 0 \\ \mathbf{X}_c^T \mathbf{M} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} \dot{\theta}_g \\ & - \begin{bmatrix} \mathbf{M} & 0 & -\mathbf{M}\bar{\mathbf{Y}} \\ 0^T & m & 0 \\ -\bar{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} & 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ \theta \end{Bmatrix} \dot{\theta}_g^2 + \begin{bmatrix} 0 & -\bar{\mathbf{M}} & -\mathbf{M}\bar{\mathbf{X}}_c \\ \bar{\mathbf{M}}^T & 0 & 0 \\ \mathbf{X}_c^T \mathbf{M} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ \theta \end{Bmatrix} \ddot{\theta}_g \\ & = - \begin{bmatrix} \mathbf{M} \cos \theta_g & \bar{\mathbf{M}} \sin \theta_g & -\mathbf{M}\bar{\mathbf{Y}} \\ -\bar{\mathbf{M}}^T \sin \theta_g & m \cos \theta_g & 0 \\ -\bar{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} & 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_g \\ \ddot{v}_g \\ \ddot{\theta}_g \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\bar{\mathbf{M}} & -\mathbf{M}\bar{\mathbf{X}}_c \\ \bar{\mathbf{M}}^T & 0 & 0 \\ \mathbf{X}_c^T \mathbf{M} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} \dot{\theta}_g^2 \quad (2.4) \end{aligned}$$

或缩写成如下形式:

$$\begin{aligned} & [M_1]\{\dot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} + 2[M_2]\{U\}\dot{\theta}_g \\ & \quad - [M_1]\{U\}\dot{\theta}_g^2 + [M_2]\{U\}\ddot{\theta}_g \\ & = -[M_3]\{\dot{U}_g\} - [M_2]\{I\}\dot{\theta}_g^2 \end{aligned} \quad (2.4)'$$

式中:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & m_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & m_n \end{bmatrix} \quad \bar{M} = [m_1, m_2, \dots, m_n]^T$$

$$m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^h m_{ij} \quad I_0 = \sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 m_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^h \bar{y}_j^2 m_{ij}$$

$$\bar{Y} = [\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_n]^T$$

$$\bar{X}_c = [\bar{x}_{c1}, \bar{x}_{c2}, \dots, \bar{x}_{cn}]^T$$

$$\bar{x} = \sum_{j=1}^h m_{ij} \bar{x}_j / m_i$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & & & \\ & \dots & & \\ & & c_i & \\ & & & \dots \\ & & & & c_n \end{bmatrix}, \quad c_i = \sum_{j=1}^h c_{ij}$$

$$c_{y\phi} = c_{\phi y} = \sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^n c_{ij} \bar{x}_j, \quad c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^h c_{ij}$$

c_{ij} : 第 ij 处的阻尼系数

$$c_{\phi} = \sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 c_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^h \bar{y}_j^2 c_{ij}$$

$$K_o = \begin{bmatrix} K_{x_1} & & & \\ & K_{x_2} & & \\ & & \dots & \\ & & & K_{x_n} \end{bmatrix}, \quad K_{x_i} = \sum_{j=1}^h K_{x_{ij}}$$

$$K_y = \begin{bmatrix} K & -K & & & \\ -K & 2K & -K & & \\ & -K & 2K & -K & \\ & & & \dots & \\ & & & & -K & 2K & -K \\ & & & & & -K & K \end{bmatrix}$$

K : 屋盖剪切刚度

$$K_y = \sum_{j=1}^h K_{yj}, \quad K_{y\phi} = K_{\phi y} = \sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^n \bar{x}_j K_{yij}$$

$$K_{\phi} = \sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^n K_{y_i, j} \bar{x}_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^h K_{x_i, j} \bar{y}_i^2, \quad \mathbf{0} = [0, \dots, 0]_n^T, \quad \mathbf{1} = [1, \dots, 1]^T$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_{\phi} = [\mathbf{u}_{\phi}, \mathbf{u}_{\phi}, \dots, \mathbf{u}_{\phi}]^T$$

方程(2.4)就是考虑屋盖整体空间工作时的单层偏心厂房在非惯性系统中的一般性地震反应运动方程。方程(2.4)中的 $2[M_2]\{\dot{U}\}\dot{\theta}_{\phi}$ 项称之为科氏惯性耦合项。由此可知：处于非惯性系统中的偏心结构将同时受到多种惯性力的作用，而这些惯性力又是彼此影响，互相耦联的，因此，地震动各分量独立作用的叠加原理和动力反应分析中的常规的振型分解法已不再适用。

现在我们来分析讨论几种特殊情况：

1. 当地震转动分量 $\theta_{\phi}(t)$ 很小时，则可认为 $\cos\theta_{\phi}(t) \approx 1$, $\sin\theta_{\phi} \approx \theta_{\phi}(t) \approx 0$ ，这时地震的运动方程变为：

$$\begin{aligned} [M_1]\{\dot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} + 2[M_2]\{\dot{U}\}\dot{\theta}_{\phi} \\ - [M_1]\{U\}\dot{\theta}_{\phi}^2 + [M_2]\{U\}\ddot{\theta}_{\phi} = -[M_3]\{\dot{U}_{\phi}\} - [M_2]\{I\}\ddot{\theta}_{\phi} \end{aligned} \quad (2.5)$$

其中：

$$[M_3] = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{M}\theta_{\phi} & -\mathbf{M}\bar{\mathbf{Y}} \\ -\bar{\mathbf{M}}^T\theta_{\phi} & m & 0 \\ -\bar{\mathbf{Y}}^T\mathbf{M} & 0 & I_0 \end{bmatrix}$$

在这种情况下，地震动各运动分量独立作用的叠加原理和动力分析中的振型分解法仍然不适用。

2. 当地震转动分量 $\theta_{\phi}(t)$ 和 $\dot{\theta}_{\phi}$ 很小时，则 $\dot{\theta}_{\phi}^2(t) \approx 0$ ，若忽略由于牵连运动产生的科氏惯性耦合项和其它非线性项（与其项比较，这些项是高一阶小量），则上述运动方程可写成：

$$[M_1]\{\dot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M_1]\{\dot{U}_{\phi}\} \quad (2.6)$$

3. 当地面无转动分量时，亦即 $\theta_{\phi}(t) = \dot{\theta}_{\phi}(t) = \ddot{\theta}_{\phi}(t) = 0$ ，此时运动方程呈如下形式：

$$[M_1]\{\dot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M_1]\{\ddot{U}_{\phi}\} \quad (2.7)$$

式中：

$$\{\ddot{U}_{\phi}\} = [\mathbf{u}_{\phi}, \ddot{\mathbf{v}}_{\phi}, \mathbf{0}]^T$$

如果我们假设方程(2.6)，(2.7)的阻尼阵 $[C]$ 为正交阻尼阵，那么不难证明：在这种情况下振型分解法是完全适用的。

三、计算结果和分析

当地震转动分量 $\dot{\theta}_{\phi}$ 很小时，并且不考虑科氏惯性耦合项和其它非线性耦合项的影响，上面给出了方程(2.6)即：

$$[M_1]\{\dot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M_1]\{\dot{U}_{\phi}\} \quad (2.6)$$

这时若假设：

1. 结构的阻尼为正交粘滞阻尼；
2. 地面运动的二个水平分量等量，在计算时双向同时输入地震反应谱，则我们可以推导出如下各基本公式：

第 j 振型 x, y, φ 方向分量的参与系数：

$$\left. \begin{aligned} \eta_{jx} &= \sum_{i=1}^n m_i X_j(i) / S_j \\ \eta_{jy} &= m Y_j / S_j \\ \eta_{j\phi} &= [I_0 \Phi_j - \sum_{i=1}^n m_i y_i X_j(i)] / S_j \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

其中:

$$S_j = \sum_{i=1}^n m_i X_j^2(i) + m Y_j^2 + I_0 \Phi_j^2 - 2 \sum_{i=1}^n m_i y_i X_j(i) \Phi_j$$

X_j, Y_j, Φ_j : 第 j 振型 U_j 的 x, y, ϕ 方向的分量

$$\{U\}_j = [\{X_j\}, Y_j, \Phi_j]^T$$

第 j 振型的最大地震位移

$$U_{j\max} = U_j \sqrt{(\eta_{jx} + \eta_{jy})^2 \Delta_j^2 + \eta_{j\phi}^2 \Delta_{\phi j}^2} \quad (3.2a)$$

式中

Δ_j : 第 j 振型地震水平分量位移反应谱。

$\Delta_{\phi j}$: 第 j 振型地震转动分量角位移反应谱值。

若采用地震影响系数, 则:

$$\{U\}_{j\max} = \{U\}_j \frac{g}{w_j} \sqrt{(\eta_{jx} + \eta_{jy})^2 \alpha_j^2 + \eta_{j\phi}^2 \alpha_{\phi j}^2} \quad (3.2b)$$

式中:

$$\alpha_j = \Delta_j w_j^2 / g \quad \alpha_{\phi j} = \Delta_{\phi j} w_j^2 / g$$

由第 j 振型的最大地震位移不难求得该振型的各柱头位移, 然将其乘以各排架的刚度 (即: K_{xi}, K_{yi}) 就可以求得各排架第 j 振型柱头剪力 F_j , 最终各排架的柱头剪力可由下式求得

$$Q = \sqrt{\sum_{j=1}^{n+2} F_j^2} \quad (3.3)$$

为了研究屋盖变形对柱头剪力的影响, 并给出具有各种不同刚度分布时的单层偏心厂房考虑屋盖整体空间工作时的分析和计算方法, 本文对不同的屋盖剪切刚度进行了计算和对比分析, 每一种剪切刚度均考虑了下列三种条件 (本文下面只讨论单向偏心情况)

1. 无山墙和纵墙, 横向刚度不对称;
2. 仅一端有山墙;
3. 两端有刚度不相等的山墙。

计算时采用我国抗震设计规范 $TJ11-78$ 给出的地震影响系数, 如图 3 所示, 由于目前尚无合理可用的转动地震影响系数, 因此计算时没有考虑地面转动分量的作用。

设计烈度	7	8	9
α_{\max}	0.23	0.45	0.90

由所编制的程序计算了二十多个厂房长度由三十米至七十八米 (排架间距为米) 的一百

六十余种组合情况。表1、表2给出了部分厂房的基本数据，其单位为：质量：吨·秒/米²，长度：米，刚度：10千牛/米。

表 1

质点质量	厂房编号	质点序号													Σ
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
13-a	13-a	1.80	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	1.80	43.20
	13-b	3.90	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.90	47.40
	13-c	4.35	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.35	58.20
11-a	11-a	1.505	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	1.505	30.10	
	11-b	3.705	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	3.705	34.5	
9-a	9-a	1.40	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	1.40				22.40	

表 2

横向刚度	厂房编号	质点序号													纵向刚度 (每列)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
13-a	13-a	275	275	275	275	275	275	275	275	275	275	275	375	685	735.5
	13-b	(12275)	(275)	275	275	275	275	275	275	275	275	275	375	(675)	(735.5)
	13-c	12675	375	275	275	275	275	275	275	275	275	275	375	9675	14735.5
11-a	11-a	205	205	205	205	205	205	205	205	205	305	470			451.5
	11-b	10205	205	205	205	205	205	205	205	205	305	840			550.75
9-a	9-a	205	205	205	205	205	205	205	305	535					437.5

下面具体地分析屋盖剪切刚度变化对柱头剪力的影响（文中的柱头剪力均指横向剪力，单位：10千牛）

1. 无山墙和纵墙

在这种条件下不同屋盖剪切刚度对应的柱头剪力的计算结果如图4所示，图中横坐标n为横向排架的序号，纵坐标Q_n为相应排架的柱头剪力。

从图4可以看出：在这种条件下考虑屋盖的整体空间工作与否对柱头剪力的计算结果影响并不明显，此时柱头剪力的分布规律均为两端大中间小，Q_n-n曲线呈凹形。这种柱头剪力的变化规律是符合地震时无外墙体的单层偏

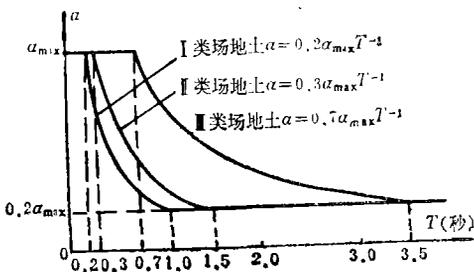


图 3

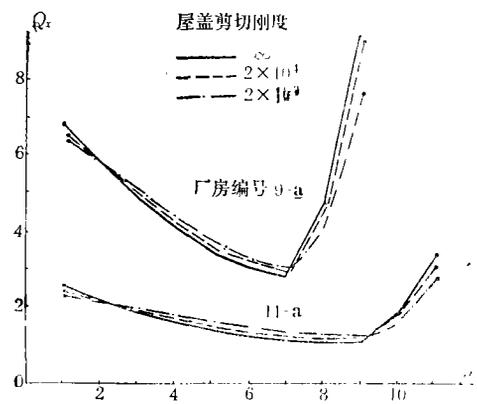


图 4

心厂房四角处柱子破坏较重的震害现象的。

上述计算结果表明：由于排架柱的刚度远小于屋盖的剪切刚度，以致地震时屋盖发生的变形极小，所以，在进行无外墙体或外墙体已破坏的单层偏心厂房地震反应分析时，将屋盖近似地视做刚性盘体是可行的，而且分析和计算也是简便的。

2. 仅一端有山墙

图 5，图 6 给出了一端有山墙时的计算结果。其中图 5 是无纵墙情况，图 6 是有纵墙情况。图中的结果清楚地表明：虽然屋盖剪切刚度各不相同，但柱头剪力都是无山墙端的排架为最大（山墙除外）。这种柱头剪力的变化规律与此类偏心结构在地震时山墙和它端排架破坏较重的震害现象相一致。

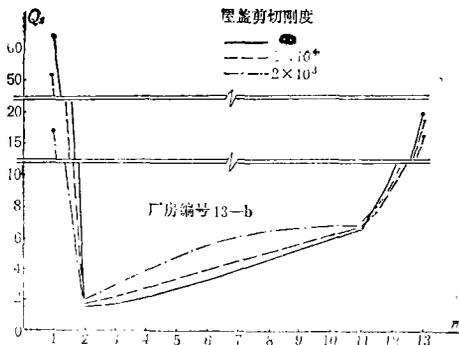


图 5

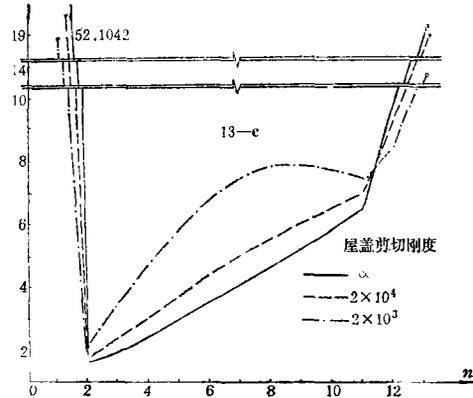


图 6

此外，对比所得的计算结果还可以看出：由于考虑了屋盖的整体空间工作，山墙分配到的地震剪力大大降低，而无山墙端排架的剪力却相差不太大。因此，若主要是验算最不利排架的强度，则对于厂房较短，整体性较好（如大型屋面板等屋盖体系）的单层偏心厂房取刚性盘体屋盖模型进行分析和计算是即安全简便又能近似地符合实际情况。但也必须指出：对于那些整体性较差，厂房较长的情况来说（如挂瓦板等屋盖体系），虽然取刚性盘体模型进行分析计算既安全又简便，可是与实际出入较大。因此，这时应该考虑屋盖整体空间工作的影响。

3. 两端有刚度不相同的山墙

这种类型厂房考虑屋盖整体空间时柱头剪力的计算结果如图 7，图 8 所示。图 7 是无纵墙情况，图 8 是有纵墙情况。

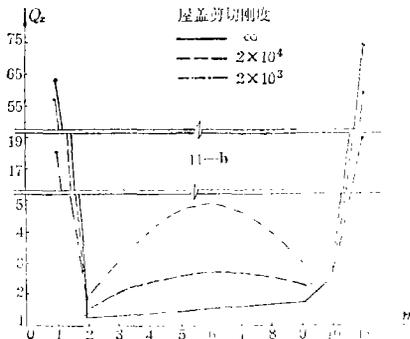


图 7

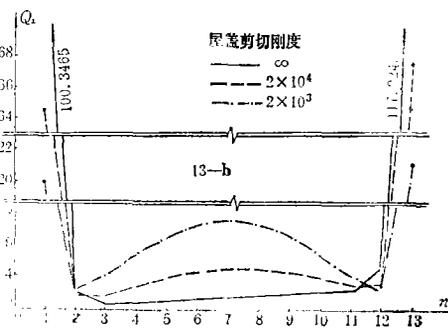


图 8

图中的曲线清楚地告诉我们:当屋盖剪切刚度不同时计算出的柱头剪力彼此差别很大。对于屋盖为刚性盘体的情况来说,各排架所分配的地震剪力很小,约90%以上的剪力由山墙承担了。当考虑屋盖的整体空间工作时,各排架的柱头剪力显著增大,尤其是远离山墙的中间排架柱头剪力比刚性屋盖的柱头剪力大数倍,而且柱头剪力随屋盖剪切刚度的减弱而明显增大。所以,对于这种偏心厂房的地震反应分析必须考虑屋盖的整体空间工作。

这种单层偏心厂房考虑屋盖整体空间工作时的柱头剪力变化规律是与震害现象相吻合的。它们在地震时都是两端山墙和中部排架破坏严重,而靠近山墙处的排架比较完好或破坏程度较轻。

四、结 语

本文对考虑屋盖整体空间工作时的单层偏心厂房在非惯性系统中的地震反应进行了研究和探讨,推导出一般情况下的运动方程。在不考虑地震转动分量的前提下对比分析了屋盖整体空间工作对平扭耦联地震反应的影响,根据本文所做的工作,可得出如下结论:

1. 考虑屋盖整体空间工作时的单层偏心厂房在非惯性系统中的地震反应十分复杂。地震反应运动方程中既包含有与振型非正交的项,又包含有地震动各运动分量相耦联的项,因此,常规的动力分析的振型分解法和地震动各运动分量的独立作用的叠加原理已不再适用。

2. 单层偏心厂房在地震水平分量作用下的平扭耦联反应,采用考虑屋盖整体空间工作的计算模型和分析方法所得结果与实际震害现象是一致的。所以在分析研究此类结构的平扭耦联地震反应时应考虑屋盖整体空间工作的影响。对工程设计来说,以下几种情况可以采用简化的方法来分析计算。

(a) 若厂房四周无外墙或者研究两端山墙破坏后的地震反应,这时可将屋盖视做刚性盘体,采用“刚性屋盖”的模型来分析研究。

(b) 对于一端有山墙的情况,如果厂房较短,整体性较好(如大型屋面板等一类屋盖)的结构,在地震反应分析时,若主要是验算最不利排架的强度,则可取屋盖为刚性盘体的模型进行分析计算,这样既简便安全又能较好地符合实际情况,否则在进行地震反应分析时应考虑屋盖整体空间工作的影响。

(c) 当厂房两端有山墙时,必须考虑屋盖整体空间工作的影响。

对王光远教授和刘季教授给予的指教深表感谢。

参 考 文 献

- [1] 王光远,《建筑结构的振动》,科学出版社(1978年)。
- [2] 尹之潜等,唐山地震单层工业厂房的震害现象及地震反应分析,地震工程与工程振动(1980)。
- [3] 工业与民用建筑抗震设计规范TJ11-78。
- [4] 武膝清,构造物动的解析。耐震设计シソーマ4。
- [5] 刘季等,建筑结构地震扭转效应的反应谱解析方法,哈尔滨建筑工程学院学报,1(1980)。
- [6] 朱伯龙等,单层厂房考虑扭转的弹性地震反应分析,建筑结构学报,2(1980)。
- [7] 中国科学院工程力学研究所等,《唐山7.8级地震震害调查初步总结》(1976)。

The Analysis of the Translation-Torsion Coupling Earthquake Responses of Single-Story Eccentric Factory Buildings with Consideration of Roof Whole-Space-Work

Qu Hua

(Qingdao Civil Engineering Institute, Qingdao)

Wang Huan-ding

(Haerbin Civil Engineering Institute, Haerbin)

Abstract

Scholars at home and abroad have done a great deal of work on analysing translation-torsion coupling earthquake responses of single-story eccentric factory buildings, but all of them ignored the deformation of the roof of the building. This paper simplifies the roof system of the building as an elastic shear beam. According to this scheme, general equations of motion of single-story eccentric factory buildings under the action of horizontal and torsional earthquake components have been established and discussed.

In this paper, the translation-torsion coupling earthquake responses of some buildings are calculated and analysed by modal analysis procedure with the use of response spectrum without consideration of the earthquake torsional component. The conclusion of the roof is considered, and the results of calculation are more conformable to the actual earthquake damage. Moreover, this paper presents a simplified method for calculation and points out the conditions in which the deformation of the roof can be neglected.