

# 地震动扭转分量对薄壁柱壳 结构的影响<sup>\*</sup>

王君杰

(中国哈尔滨 150080 国家地震局工程力学研究所)

## 摘 要

从定性和定量两方面研究了地震动扭转分量对薄壁圆柱回转壳结构反应的影响。研究结果表明, 扭转分量对结构反应贡献的大小主要与结构的高度、回转半径与结构高度之比及壳的刚度有关。对于核电厂安全壳和工业储油、储气罐结构, 扭转地震动分量所产生的壳体反应是不应忽视的。

主题词 地面运动; 扭转分量; 结构反应

## 前 言

近年来, 地震动旋转分量日益引起人们浓厚的兴趣。首先是地震工程领域里的研究人员(Newmark, 1969)注意到了地震动旋转分量的存在, 并对其估计方法和工程意义开展了一些研究工作(Trifunac, 1982; 金星、廖振鹏, 1991; Ghafory-Ashtiani and Singh, 1986; Gupta and Trifunac, 1990)。其后, 地震学家们(Bouchon and Aki, 1982; 顾浩鼎、陈运泰, 1988)也注意到了弹性介质中的旋转运动, 强调了其在地震学中的意义(顾浩鼎、陈运泰, 1988)。如同地震工程界的学者们一样, 地震学家们也将地震中某些形式的结构破坏与地震动旋转分量相联系(顾浩鼎、陈运泰, 1988)。从工程抗震的角度考虑, 人们最为关心的是地震动旋转分量的工程意义, 即对结构抗震安全的影响。在有关文献中, 由于不同的研究者所选择的结构和地震动参数不同, 所得到的结论有较大的差异。因此, 若要真正搞清地震动旋转分量的工程意义, 还需要对地震动旋转分量及其对各种不同类型结构地震反应的影响作大量的深入的研究工作。

本文基于现有的关于地震动旋转分量的理论研究结果, 讨论了扭转地震动分量对薄壁柱状回转壳结构反应的影响。

## 1 扭转功率谱

扭转地震动分量  $\theta_g(t)$ (即绕竖轴的旋转分量)的功率谱密度  $S_\theta(\omega)$  可表示为(王君杰、

\* 地震科学联合基金会资助项目。

1994 年 1 月 18 日收到初稿, 1994 年 9 月 19 日收到修改稿, 1994 年 9 月 23 日决定采用。

江近仁, 1993)

$$S_\theta(\omega) = \frac{\omega^2}{4C_a^2(\omega)} S_H(\omega) \quad (1)$$

式中,  $C_a(\omega)$  为地震动的水平视波速, 按照估计旋转分量的理论方法,  $S_H(\omega)$  为出平面运动的功率谱密度。在本文的研究中取  $S_H(\omega)$  为垂直于震中与场址连线方向的地震动水平分量的功率谱密度。 $S_H(\omega)$  的函数形式为

$$S_H(\omega) = \frac{\omega^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \cdot \frac{\omega^6}{\omega^6 + \omega_c^6} S_0 \quad (2)$$

本文选用的模型参数列于表 1 中。其中, A 组来自台湾 SMART-1 台网第 45 次地震的统计结果; B, C 两组参数是在 A 组参数基础上经过适当调整后得到的。按照 A, B, C 的顺序, 功率谱的带宽逐渐增大。就本文所研究的问题而言,  $S_0$  的取值无关紧要, 因此将其取为 1.0。计算中视波速  $C_a(\omega)$  取为 1 000 m/s。

表 1 地震动功率谱参数

组号	参 数			
	$\xi_g$	$\omega_g$	$\omega_c$	$S_0$
A	0.55	10.3	1.0	1.0
B	0.60	15.7	1.9	1.0
C	0.60	25.1	1.9	1.0

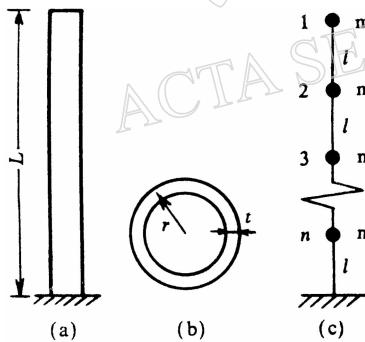


图 1 理想化结构模型

考虑图 1a, b 所示的等截面薄壁结构, 其横截面为圆环, 壁厚为  $t$ , 平均半径为  $r$ ,  $t << r$ 。如图 1c 所示, 将结构离散为  $n$  个结点的多自由度体系, 各结点质量和各单元长度分别相同。记  $\rho$  为结构的质量密度;  $E$  为弹性模量;  $\gamma$  为 poisson 比;  $l=L/n$ ,  $L$  为结构的高度;  $\mathbf{u}(t)$  为结构的水平振动位移向量;  $\Theta(t)$  为结构的扭转振动角位移向量;  $\ddot{u}_g(t)$  为水平地震加速度;  $\ddot{\theta}_g(t)$  为扭转地震加速度。此离散体系的水平与扭转振动力方程分别为

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) + C_u \dot{\mathbf{u}}(t) + \frac{6E\eta^4}{(1+\varphi)\rho L^2} \left(\frac{r}{L}\right)^2 K_u^0 \mathbf{u}(t) = -I \ddot{\mathbf{u}}_g(t) \quad (3)$$

$$\ddot{\Theta}(t) + C_\theta \dot{\Theta}(t) + \frac{E\eta^2}{2(1+\gamma)\rho L^2} K_\theta^0 \Theta(t) = -I \ddot{\theta}_g(t) \quad (4)$$

式中,  $I$  为单位列向量;  $\varphi$  为结构水平振动时, 考虑剪切变形的参数。对此简单结构,  $\varphi=12(1+\gamma)\left(\frac{r}{L}\right)^2 n^2$ ;  $K_u^0$  和  $K_\theta^0$  由以下诸式计算:

$$K_{uu}^0 = K_{11}^0 + 3K_{12}^0 A \quad A = -(K^0)_{22}^{-1} K_{21}^0 \quad K_{21}^0 = (K_{12}^0)^T$$

$$\begin{aligned}
 K_{11}^0 &= \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & \\ -1 & 2 & & & \\ & \cdots & & & \\ & & 2 & -1 & \\ & & & -1 & 2 \end{bmatrix} & K_{12}^0 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & & & \\ -1 & 0 & & & \\ & \cdots & & & \\ & & 0 & 1 & \\ & & & -1 & 0 \end{bmatrix} \\
 K_{22}^0 &= \begin{bmatrix} 4+\varphi & 2-\varphi & & & \\ 2-\varphi & 2(4+\varphi) & & & \\ & \cdots & & & \\ & & 2(4+\varphi) & 2-\varphi & \\ & & & 2-\varphi & 2(4+\varphi) \end{bmatrix} \\
 K_\theta^0 &= \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & \\ -1 & 2 & & & \\ & \cdots & & & \\ & & 2 & -1 & \\ & & & -1 & 2 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

在方程(3)中摆动自由度的影响通过静力凝聚的方法加以考虑。

根据有限元和随机振动理论，在水平地震动  $\ddot{u}_g(t)$  作用下，基底(第  $n$  单元)的平均水平剪应力  $\tau_Q$  的均方根差  $\sigma_Q$  与在扭转地震动  $\ddot{\theta}_g(t)$  作用下基底平均扭转剪应力  $\tau_T$  的均方根差  $\sigma_T$  可写为

$$\sigma_Q = \frac{6Er^2}{1+\varphi} \cdot \left(\frac{n}{L}\right)^3 \sigma_Q^0 \quad \sigma_T = \frac{Er}{2(1+\gamma)} \cdot \frac{n}{L} \sigma_T^0 \quad (5)$$

式中

$$\sigma_Q^0 = \sqrt{E[u_n^2] + 6 \sum_{k=1}^n A_{nk} E[u_n u_k] + 9 \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n A_{nk} A_{nl} E[u_k u_l]} \quad \sigma_T^0 = \sqrt{E[\theta_n^2]} \quad (6)$$

式(6)中， $E[\cdot]$  表示期望运算， $A_{nk}$ ， $k=1, 2, \dots, n$  为矩阵  $A$  中第  $n$  行第  $k$  列的元素。正如大家所熟知的，式(6)中的水平位移和扭转角位移的方差或协方差由以下两式计算：

$$E[u_k u_l] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Phi_{ki} \Phi_{lj} \gamma_i^u \gamma_j^u \int_{-\infty}^{\infty} H_i^u(i\omega) [H_j^u(i\omega)]^* S_H(\omega) d\omega \quad (7)$$

$$E[\theta_n^2] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Phi_{ni}^\theta \Phi_{nj}^\theta \gamma_i^\theta \gamma_j^\theta \int_{-\infty}^{\infty} H_i^\theta(i\omega) [H_j^\theta(i\omega)]^* S_\theta(\omega) d\omega \quad (8)$$

式(7)和式(8)中， $\Phi^u$  和  $\Phi^\theta$  分别是方程(3)和方程(4)所对应的标准化模态矩阵； $\gamma_i^u$  和  $\gamma_i^\theta$  是模态参与系数； $H_i^u(i\omega)$  和  $H_i^\theta(i\omega)$  分别为水平和扭转振动的模态频响函数。 $S_\theta(\omega)$  由式(1)和式(2)求得。定义比值

$$\eta = \frac{\sigma_T}{\sigma_Q} \quad (9)$$

则由式(5)可得到

$$\eta = \frac{(1+\varphi)L^2}{12(1+\gamma)n^2} \cdot \frac{\sigma_T^0}{r\sigma_Q^0} \quad (10)$$

由式(3)、式(4)和式(10)可知,  $\eta$  与结构的高度  $L$  和比值  $r/L$ 、弹性模量  $E$  及 Poisson 比  $\gamma$  有关。对于一般建筑结构使用的材料,  $\gamma$  的变化范围不大, 在本文的定性研究中取  $\gamma=0.17$ 。地震动功率谱模型参数取 A 组。由此而得到的  $\eta$  随  $L$ ,  $r/L$  及  $E$  的变化关系示于图 2 和图 3。

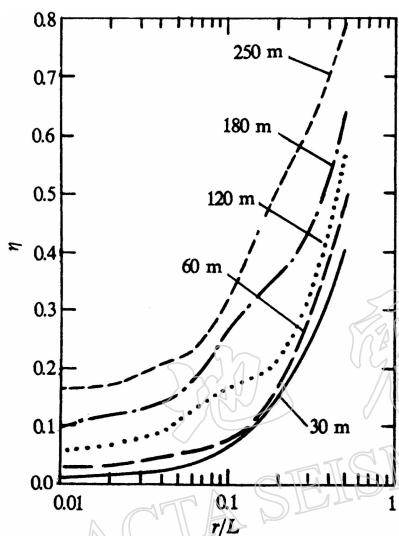


图 2  $\eta$  与几何参数  $L$  及  $r/L$  的关系

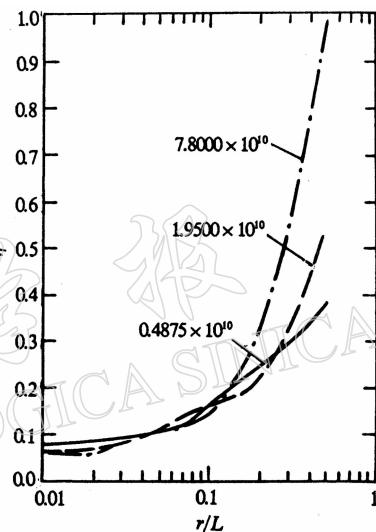


图 3  $\eta$  与物理参数  $E$  的关系

由图 2 可以看到, 扭转地震动分量所产生的结构基底的平均剪应力与水平地震动分量产生的结构基底的平均剪应力之比  $\eta$  随着结构高度  $L$  和比值  $r/L$  的增大而增大, 且  $L$  越大, 则  $\eta$  随  $r/L$  增加的越快。为了使这里的定性讨论更具有实际意义, 考虑烟囱和储油罐这两类构筑物。平均说来, 烟囱二分之一高度处的  $r/L$  值约在 0.025—0.045 之间, 且  $L$  越大,  $r/L$  越小。当  $L=60$  m 时, 取  $r/L=0.04$ ,  $\eta$  约为 5%; 当  $L=120$  m 时, 取  $r/L=0.035$ ,  $\eta$  约为 8%; 当  $L=180$  m 时, 取  $r/L=0.03$ ,  $\eta$  约为 13%; 当  $L=250$  m 时, 取  $r/L=0.03$ ,  $\eta$  约为 18%。也就是说, 若以基底平均剪应力作用为衡量标准, 则扭转分量对烟囱的作用并不十分重要。然而, 油田等的储油罐, 其  $r/L$  值可达 0.4 以上, 若  $L=30$  m, 则  $\eta$  约为 30%; 若  $L=60$  m, 则  $\eta$  约为 40%。因此, 以基底平均剪应力为标准, 对于储油或储气罐等构筑物, 扭转地震动分量的贡献是不容忽视的。

图 3 显示的是  $E$  值的变化对  $\eta$  值的影响。在结构几何形式不变的条件下,  $E$  值改变, 则结构的刚度随之而改变。由图可见, 当  $r/L$  较小时 ( $r/L < 0.1$ ),  $E$  值的变化对  $\eta$  值的影响很小。当  $r/L$  较大时,  $E$  值的变化对  $\eta$  值的影响很大。当  $r/L=0.4$  时, 对于  $E=0.4875 \times 10^{10}$ ,  $1.9500 \times 10^{10}$  和  $7.8000 \times 10^{10}$ ,  $\eta$  值分别约为 33%, 43% 和 78%。也就是说, 结构的刚度 (以  $E$  值表达) 越大, 则扭转分量对其反应的贡献也越大。

### 3 数值分析

为了考察扭转分量对结构反应的影响,本文选择了已建成的二座烟囱(分别为60 m和210 m高)和一个核电厂安全壳作为研究对象。这两类结构的特点是近似于薄壁回转壳,与前面定性分析时所研究的理想化结构模型较为接近。60 m烟囱的顶部外径2.47 m,内径2.23 m,底部外径5.47 m,内径5.19 m;210 m烟囱的顶部外径6.22 m,内径5.86 m,底部外径22.16 m,内径21.08 m。安全壳由圆柱壳和球冠两部分组成。柱壳的平均半径18 m,壁厚1 m;球冠半径27 m,壳厚1 m。对烟囱和安全壳(朱镜清、董刚,1992)均采用集中质量串联多自由度模型计算上述结构的动力响应。比值 $\eta$ 的计算结果见表2。

由表2可以得到以下几点:①尽管随着烟囱的高度和地震动参数的变化, $\eta$ 值有相对较大的变化,但总体说来,扭转地震动对烟囱基底平均剪应力的贡献不大。如,当烟囱高度为210 m时, $\eta$ 的最大值为13.4%;②对于核电厂安全壳, $\eta$ 值在22.20%—32.10%之间,考虑扭转地震动分量的作用对保证核电厂安全壳的抗震安全有实际意义;③当 $L=60$  m时,按烟囱的平均 $r/L$ 值,由图2可查得 $\eta$ 值约为5%,本节中60 m烟囱 $\eta$ 值的计算结果为3.7%,核电厂安全壳的 $L=64$  m, $r/L=0.28$ ,由图2可查得 $\eta$ 值约为24%,本节 $\eta$ 值数值计算结果为22.2%。这表明由图2查得的 $\eta$ 值可以用来近似估计地震动扭转分量对薄壁回转壳结构的影响。同时,上节关于储油(气)罐的结论在本节又得到旁证。

### 4 结语

本文应用简单的结构模型,研究了地震动扭转分量对柱形回转薄壳结构反应的影响。定性和定量的分析结论表明,扭转分量的重要性主要与回转壳的高度、回转半径与高度之比,以及壳的刚度(以弹性模量 $E$ 表达)有关。对于烟囱类的高柔扭转分量,对其基底剪应力的贡献较小,可以忽略。扭转分量对安全壳和储油罐等结构基底平均剪应力的贡献,可达到水平分量的30%甚至40%以上,其影响是不应忽视的。

最后需要指出的是,本文采用的结构模型和地震动模型较为简单,亦没有考虑结构非线性因素的影响,因此所得到的结论只是初步的。为了得到论据更为充分的结论,进一步的工作是必要的。

感谢胡聿贤教授对笔者在旋转地震动分量研究方面的鼓励和支持;感谢朱镜清研究员与笔者所作的有益讨论。

表2 比值 $\eta$ (%)

地震参数	烟囱		安全壳
	60 m	210 m	
A	3.7	5.0	22.2
B	5.5	8.5	24.5
C	7.7	13.4	32.1

## 参 考 文 献

- 顾浩鼎、陈运泰, 1988. 旋转在地震学中的意义. 东北地震研究, **1**, 2, 1—9.
- 金星、廖振鹏, 1991. 地面旋转分量的工程预测. 地震工程与工程振动, **4**, 3, 10—18.
- 王君杰、江近仁, 1993. 地震旋转分量的反应谱估计. 地震工程与工程振动, **13**, 3, 41—48.
- 朱镜清、董刚, 1992. 计算系统识别与结构模型化. 计算结构力学及其应用, **9**, 124—129.
- Bouchon, M. and Aki, K., 1982. Strain, tilt and rotation associated with strong motion in the vicinity of earthquake fault. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **72**, 1717—1738.
- Ghafory-Ashtiani, M. and Singh, M. P., 1986. Structural response for six correlated earthquake components. *EE-SD*, **14**, 1, 103—119.
- Gupta, V. K. and Trifunac, M. D., 1990. A note on contributions of ground torsion to seismic response of symmetric multistoried buildings. 地震工程与工程振动, **10**, 3, 27—40.
- Newmark, N. M., 1969. Torsion in symmetrical buildings. *Proc. of 4WCEE*, **3**, 19—32.
- Trifunac, M. D., 1982. A note on rotational components of earthquake motions on ground surface for incident body waves. *SDEE*, **1**, 1, 25—37.