

竖向地震作用对高柔结构的影响

程 岩

(甘肃省建材科研设计院, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 对烟囱的震害规律进行了分析, 认为地震时烟囱的破坏, 竖向地震力起了很重要的作用. 提出了用冲量法来计算烟囱的竖向地震作用, 并以 190 m 高的钢筋砼烟囱为例进行了计算. 对计算结果进行了分析, 并指出了烟囱设计中应注意的问题. 进一步阐明了计算高柔结构和特定条件下某些结构的竖向地震作用的必要性.

主题词: 竖向地震作用; 烟囱; 高柔结构; 冲量法

中图分类号: 352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(1999)04-0423-05

0 引言

地震时建筑结构破坏的主要原因是地面运动的水平分量和转动分量形成的平移振动和扭转振动. 因此, 在工程设计中主要考虑了水平地震作用和地震扭转效应. 然而, 震害研究表明, 地面运动的垂直分量是造成建筑物破坏的原因之一, 因此, 在工程设计中也必需考虑竖向地震作用, 特别是对高柔结构. 本文以烟囱为例分析了竖向地震作用对高柔结构的破坏作用, 并用冲量法对烟囱的竖向地震作用进行了计算.

1 烟囱的震害分析

1975 年海城地震及 1976 年唐山地震的 VIII~IX 度区内, 砖砌烟囱的破坏主要表现为水平裂缝和水平断裂, 其次是斜裂缝、斜断裂、X 形裂缝和竖向裂缝以及扭转和酥裂以至塌落等多种形式, 如图 1 所示. 斜裂缝和 X 形裂缝的产生主要是由于剪切应力所形成的主拉应力超过砌体所允许的拉应力的结果. 水平裂缝的产生主要是由于弯曲应力超过砌体所允许的拉应力的结果. 当水平裂缝和斜裂缝扩展贯通整个截面时, 便产生水平断裂、错位、扭转以致掉头等情况. 震害调查资料^[2,19]还表明, 烟囱的破坏截面均发生在上部, 个别烟囱的破坏截面发生在距其顶部 1~2 m 处. 破坏截面的位置与地震烈度有关, 地震烈度越高, 烟囱主要破坏部位的高度就越低. 在 VII 度区内烟囱的主要破坏部位位于距顶端 1~4 m 的范围内. 在 VIII 度区内烟囱的破坏发生在其 $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{1}{2}$ 高度范围内. 在 IX 度及 IX 度以上区, 破坏发生在烟囱的中部及其以下的部位. 在 VIII~IX 度区许多烟囱顶部塌落. 塌落物大多数位于烟囱体周围 8~10 m 范围内. 烟囱体向一侧倾倒的现象极为少见.

在地震过程中还发现砖砌烟囱上部有跳起的现象. 有的钢筋砼烟囱上部塌落, 有的中上部出现明显水平裂缝. 无论是砖砌烟囱还是钢筋砼烟囱, 破坏截面均在中上部. 上述破坏现象

表明,竖向地震力在烟囱破坏过程中起了很重要的作用.

2 竖向地震作用的计算

竖向地震波对建筑结构的破坏取决于地面竖向振幅和振动速度. 在地震过程中,地面竖向振幅和振动速度是随机变化的,但起决定作用的是少数的地震波峰值. 竖向地震波的卓越周期 T_{V_g} 稍小于水平地震波,一般为 $0.2 \sim 0.8 s^{[4]}$. 而烟囱的竖向振动基本周期 T_{V_L} 一般小于 $0.2 s$. 烟囱在竖向地震作用下是以第一振型为主的. 因此用计算振动过程中下部结构质量对上部结构产生的冲量的方法,即冲量法计算烟囱的竖向地震作用是合适的. 因为竖向波从烟囱根部向上传播完全是一个脉冲过程. 烟囱等高柔构筑物在受到上下反复振动时,最不利的振动步相是向上振动,而不是向下振动^[2], 因此用冲量法计算烟囱竖向地震力时仅考虑其向上振动这一最不利的情况.

假定烟囱的基础与地基为一个整体,即可以不考虑基础的质量,仅考虑基础传给筒身的振幅及振动速度. 取烟囱任意水平截面 i , 该截面以上的烟囱质量为 G_i , 截面以下的质量为 M_i , 当截面以下的质量 M_i 向上运动时,对截面以上的质量 G_i 产生冲量 S_i . 根据冲量方程^[1], S_i 可用下式表达:

$$S_i = (1 + K) \frac{G_i M_i}{G_i + M_i}$$

(1)

由(1)式可得出计算竖向地震力 F_{V_i} 的公式(推导过程可参见文献[1] ~[3] 和[5])

$$F_{V_i} = \eta (G_i - \frac{G_i}{M})$$

(2)

进而可以得到:

$$\frac{F_{V_i}}{G_i} = \eta (1 - \frac{G_i}{M})$$

(3)

烟囱上部任意截面 i 产生的拉力 F_{V_L} 可用下式计算:

$$F_{V_L} = F_{V_i} - G_i = \eta_1 (G_i - \frac{G_i}{M})$$

(4)

最大压力 $F_{V_{amax}}$ 和拉力 $F_{V_{lmax}}$ 出现的位置分别为:

$$G_i = \frac{\eta + 1}{2\eta_1} G$$

$$G_i = \frac{\eta - 1}{2\eta_1} G$$

(5)

最大压力 $F_{V_{amax}}$ 和拉力 $F_{V_{lmax}}$ 分别为:

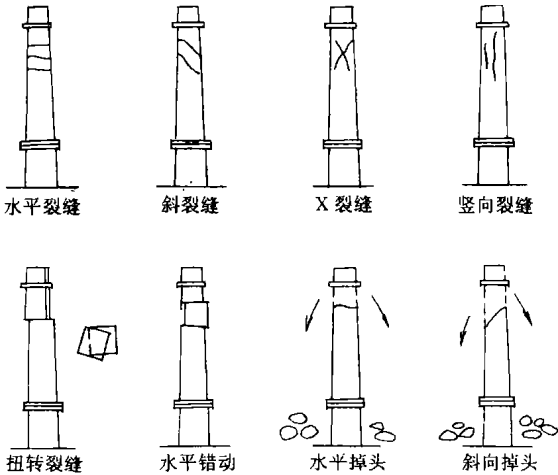


图 1 砖砌烟囱震害破坏示意图
Fig. 1 Sketch map of earthquake damage of the brick chimney.

$$F_{V\max} = \frac{(\eta + 1)^2}{4\eta_1} G$$
$$F_{V\max} = \frac{(\eta - 1)^2}{4\eta_1} G$$

(6)

在以上(1)~(6)式中: K 为弹性恢复系数, 砖砌体的 $K = 0.6$, 钢筋砼的 $K = 0.7$; 砖砌烟囱的 $\eta_1 = 4(1 + 0.6)a_V$, 钢筋砼烟囱的 $\eta_1 = 4(1 + 0.7)a_V$; G 为烟囱总重量; M 为烟囱身总质量, $M = G_i + M_i$; $\eta = \eta_1 g$; a_V 为竖向平均加速度, $a_V = 0.65 a_H$ (水平平均加速度). 根据中国地震烈度表, VII 度区 $a_H = 125 \text{ cm/s}^2$, VIII 度区 $a_H = 250 \text{ cm/s}^2$, IX 度区 $a_H = 500 \text{ cm/s}^2$.

现以某企业 190 m 高的钢筋砼烟囱为例, 用冲量法计算竖向地震力. 该钢筋砼烟囱总重量 $G = 58\,000 \text{ kN}$, 计算时取 10 个截面, 取每段重量 $G_i = 1/10 G$. 分别用(2)、(3)和(4)式计算出各截面的地震力, 结果见表 1 和图 2.

计算时取 $\eta_1 = 4(1 + 0.7) a_V$, 那么
VII 度区: $a_V = 0.65 \times 125/981 = 0.08$, $\eta_1 = 4 \times (1 + 0.7) \times 0.08 = 0.544$;
VIII 度区: $a_V = 0.65 \times 250/981 = 0.16$, $\eta_1 = 4 \times (1 + 0.7) \times 0.16 = 1.088$;
IX 度区: $a_V = 0.65 \times 500/981 = 0.32$, $\eta_1 = 4 \times (1 + 0.7) \times 0.32 = 2.176$.

用(5)和(6)式可以计算出 VIII 度及 IX 度区最大竖向拉力如下:
VIII 度区最大拉力点的自重为

$$G_i = \frac{\eta_1 - 1}{2\eta_1} G = \frac{1.088 - 1}{2 \times 1.088} \times 58\,000 = 2\,346 \text{ kN}$$

VIII 度区最大拉力为

$$F_{V\max} = \frac{(\eta_1 - 1)^2}{4\eta_1} G = \frac{(1.088 - 1)^2}{4 \times 1.088} \times 58\,000 = 103.2 \text{ kN}$$

表 1 190 m 高的钢筋砼烟囱竖向地震力计算结果

截面	G_i/kN	VII 度($a_V = 0.08$)				VIII 度($a_V = 0.16$)				IX 度($a_V = 0.32$)			
		F_V/kN	$F_{V_i} \setminus G_i$	$F_{V_i} - G_i/\text{kN}$		F_V/kN	$F_{V_i} \setminus G_i$	$F_{V_i} - G_i/\text{kN}$		F_V/kN	$F_{V_i} \setminus G_i$	$F_{V_i} - G_i/\text{kN}$	
1	5800	2840.0	0.49	-2960.3		5679.4	0.98	-120.6		11358.7	1.96	5558.7	
2	11600	5048.3	0.44	-6551.7		10096.6	0.87	-1503.4		20193.3	1.74	8593.3	
3	17400	6625.9	0.38	-10774.1		13251.8	0.76	-4148.2		26503.7	1.52	9103.7	
4	23200	7572.5	0.33	-15627.5		15144.9	0.65	-8055.0		30289.9	1.31	7089.9	
5	29000	7888.0	0.27	-21112.0		15776.0	0.54	-13224.0		31552.0	1.09	2552.0	
6	34800	7572.4	0.22	-27227.5		15144.9	0.44	-19655.0		30289.9	0.87	-4510.1	
7	40600	6625.9	0.16	-33974.1		13251.8	0.33	-27348.2		26503.7	0.65	-14096.3	
8	46400	5048.3	0.11	-41351.7		10096.6	0.22	-36303.4		20193.3	0.44	-26206.7	
9	52000	2840.0	0.05	-52005.1		5679.0	0.11	-40210.2		11359.0	0.22	-28220.5	
10	58000	0.0	0.00	-58000.0		0.0	0.00	-58000.0		0.0	0.00	-58000.0	

IX 度区最大拉力点自重为

$$G_i = \frac{\eta_1 - 1}{2\eta_1} G = \frac{2.176 - 1}{2 \times 2.176} \times 58\,000 = 15\,672.8 \text{ kN}$$

IX 度区最大拉力为

$$F_{V\max} = \frac{(\eta_1 - 1)^2}{4\eta_1} G = \frac{(2.176 - 1)^2}{4 \times 2.176} \times 58\,000 = 9\,215.6 \text{ kN}$$

Ⅸ度区最大竖向压力作用点自重为

$$G_i = \frac{\eta_1 + 1}{2 \eta_1} G = \frac{2.176 + 1}{2 \times 2.176} \times 58\,000 = 42\,327.2 \text{ kN}$$

Ⅸ度区最大压力为

$$F_{V_{\max}} = \frac{(\eta_1 + 1)^2}{4 \eta_1} G = \frac{(2.176 + 1)^2}{4 \times 2.176} \times 58\,000 = 67\,215.6 \text{ kN}.$$

3 计算结果分析

由表 1 和图 2 可以看出, 竖向地震力最大值不是在烟囱顶部, 而是在中下部. 竖向地震力与自重抵消的截面, 永远不会出现在烟囱的根部. 竖向地震力与重量之比呈上大下小的直线变化. 当冲击力 F_{V_i} 大于截面以上的重力 G_i 时, 一般在地震烈度为Ⅷ度时, 截面出现拉力. 最大拉力与烟囱总重量 G 成正比, 烟囱越高, 拉力越大. 最大压力点的压力大于烟囱的总重量. 总之, 当烟囱上部出现拉力后, 由于拉力和水平地震力的共同作用, 使烟囱上部成为偏心受拉构件, 极易造成破坏; 烟囱下部将出现较大的压力, 属于偏心受压构件. 计算结果与震害调查相符合.

在地震过程中, 烟囱受到竖向地震力和水平地震力的共同作用. 竖向地震力使烟囱产生轴力(拉或压), 水平地震力将使烟囱产生弯矩和剪力. 这些力均是随机变化的, 由于随机变化的周期很短, 频率较高, 必然会出现耦联的情况. 这在近震区更为严重. 因此, 在对烟囱的工程设计中应考虑各种作用的不利组合, 计算出各个截面的竖向地震力(拉或压)以后, 将竖向地震力与水平地震力作用产生的弯矩相组合, 然后按偏心受拉或偏心受压进行截面设计. 对超高烟囱还应考虑高振型的影响.

4 结语

对烟囱等重心较高的高柔构筑物的震害总结和用冲量法进行的计算分析结果表明, 该类结构对竖向地震作用十分敏感, 其震害主要是由竖向地震作用造成的. 本文的研究表明, 竖向地震作用会在结构中引起竖向振动, 烈度越高, 竖向地震力的影响越明显. 对高柔结构, 如Ⅷ度区和Ⅸ度区的烟囱及类似的构筑物, Ⅸ度区的高层建筑、Ⅷ度和Ⅸ度区的长悬臂结构和大跨度结构均应考虑竖向地震作用.

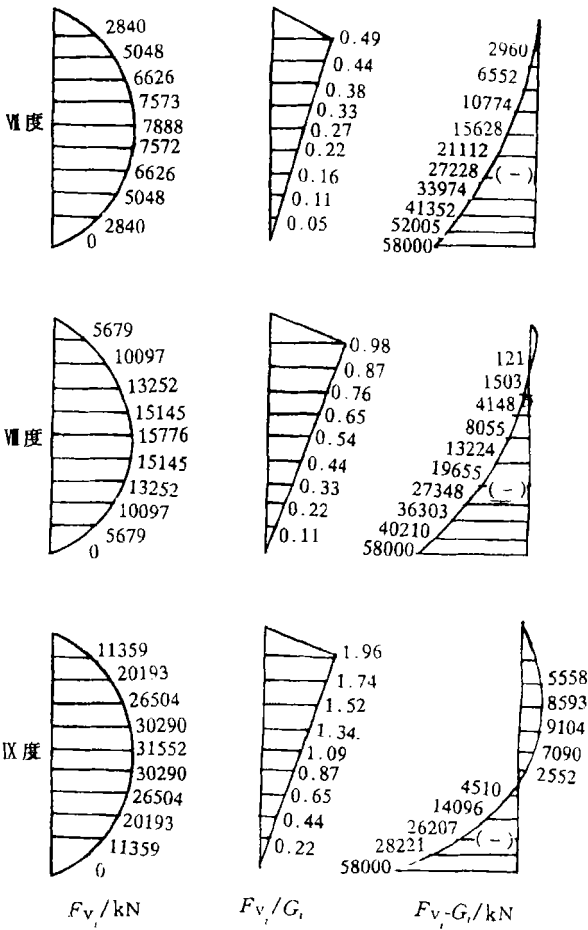


图 2 190 m 高的钢筋砼烟囱竖向地震力分布
Fig. 2 Distribution of vertical earthquake force of a reinforced concrete chimney 190 meters high.

[参考文献]

[1] 王光远. 结构动力学. 北京: 科学出版社, 1981. 26~88.
[2] 钱培风. 结构抗震分析. 北京: 地震出版社, 1988. 8~26.
[3] 刘季. 高耸结构与高层建筑的竖向地震作用. 建筑结构学报, 1988, (2): 26~31.
[4] 刘大海. 单层与多层建筑抗震设计. 西安: 陕西科学技术出版社, 1987. 72~81.
[5] 龚思礼(主编). 建筑抗震设计手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. 844~856.
[6] 丰定国. 抗震结构设计. 北京: 地震出版社, 1990. 70~90.

INFLUENCE OF THE VERTICAL EARTHQUAKE ACTION ON THE
HIGH-RISE CONSTRUCTION

CHENG Yan

(Gansu Designing Institute of Building Material, Lanzhou 730000, China)

Abstract

Analysing the law of earthquake disaster of chimneys, it is taken into account that vertical earthquake force acts mainly in destruction of chimneys during an earthquake. A method of calculating vertical earthquake action by impulse way is proposed. By using the method, vertical earthquake action of a reinforced concrete chimney 190 meters high is calculated, and the result is analysed. Some problems worthy to be noted in design of chimney are discussed. The calculation of the vertical earthquake action in high-rise construction design is necessary.

Key words: Vertical earthquake action; Chimney; High-rise construction; Impulse way