

# 烟囱在地震作用下的纵波应力

中国科学院工程力学研究所 钱培凤 苏文藻 张悉德 杨亚弟

**提要** 目前,国内外对烟囱的地震反应大多只计算水平地震力。我们对十年来国内几次大地震造成的砖烟囱震害,进行了较详细的分析研究,发现传统的计算方法不能很好解释砖烟囱的破坏现象。本文提出必须考虑地面竖向运动引起的纵波应力的新观点。计算结果表明,地震时砖烟囱的纵波应力数值很大,不容忽视。根据纵波应力或它与水平地震力的联合作用,能使砖烟囱的各种震害现象得到较合理的解释。

## 一、前言

一般计算烟囱所受的地震力及各国地震区建筑规范对此的规定,都只考虑地面水平运动的作用,对竖向运动的影响通常不予考虑,我们曾于1957年提出:若只考虑水平振动,很多震害现象将无法解释;砖烟囱出现多道裂缝而不倒的现象,是地面竖向运动引起的纵波应力造成的。但当时仅在力学概念上加以阐述,未做深入的计算研究。近年来我国发生了多次强烈地震,我们调查了很多砖烟囱的震害资料,通过对九种震害现象的分析,我们认为,地面竖向运动引起的纵波应力对砖烟囱的各种震害起着主要的作用。至于砖烟囱出现多道裂缝而不倒的现象,经过分析比较,我们仍然认为不可能用水平振动来解释,本文将用纵波应力来阐述其破坏机理。

## 二、砖烟囱所受的水平地震力

我们曾算过各种高度的烟囱,结论均相同。现以辽南一个高29m的砖烟囱为例,按文献[2]算得的水平地震力如表1,2所示。表1为烟囱截面的有关参数, $x$ 为截面至顶点的距离(m), $F$ 及 $J$ 分别为截面积( $\text{cm}^2$ )及惯性矩( $\text{cm}^4$ ), $\sigma_w$ 为自重压应力( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ),内衬高15m,砖标号75号,砂浆标号25号,弯曲抗拉强度 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ ,抗剪强度 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ ,通缝轴心抗拉强度 $1.6\text{kg}/\text{cm}^2$ ,摩擦系数 $f = 0.7$ ,容重 $\rho g = 1.8\text{T}/\text{m}^3$ ,弹性模量 $E = 1.75 \times 10^4 \text{kg}/\text{cm}^2$ 。

将烟囱分为15个质点,分别标为 $i = 1, 2, 3, \dots, 15$ (图1)。算得的最低三个周期为

$$T_1 = 1.28\text{s}, \quad T_2 = 0.31\text{s}, \quad T_3 = 0.074\text{s}$$

烟囱的内衬不高,故上部温度较下部高;上部施工质量不易保证,故烟囱强度一般自下而上渐低(有的烟囱上部砂浆标号设计值就较低)。将烟囱分为上段10m,中段10m,下段9m三段,计算时下段强度(包括弯曲抗拉强度、抗剪强度及轴向抗拉强度)取为规定值,中段强度取为它的 $2/3$ ,上段强度取为它的 $1/3$ 。计算表明,不考虑强度的降低,其结论也不变。

表 2 中的  $M$  和  $Q$  为三个振型组合后的弯矩和剪力,  $\sigma$  及  $\tau$  分别为弯曲应力及最大剪应力(平均剪应力的二倍),  $[\sigma]$  为自重压应力  $\sigma_w$  与弯曲抗拉强度之和,  $[\tau]$  为抗剪强度与单位面积摩擦力之和. 显然,  $\sigma/[\sigma] > 1$  时, 截面将由弯矩引起破坏;  $\tau/[\tau] > 1$  时, 将由剪力引起破坏;  $\frac{\tau}{2} \times \frac{1}{0.7\sigma_w} > 1$  时, 若截面原已发生环形裂缝, 则将由剪力引起错位.

对于按反应谱算得的地震力, 我们认为有下述三个因素夸大了高振型的影响, 所以烟囱上部地震力的实际数值将比表 2 的值小很多:

1. 按规范计算时各振型都采用同一个谱曲线, 但高振型的阻尼值一般都大于第一振型的阻尼值, 所以反应谱曲线应比第一振型的低. 可见表 2 的值夸大了烟囱上部的地震力.

2. 实际的反应谱曲线只在卓越周期处为峰点, 规范中将小于卓越周期部分取为平台, 因而也夸大了高振型的地震力.

3. 在计算烟囱的动力性能时, 一般均不考虑剪切变形的影响. 实际上, 振型越高, 剪切变形的影响越大. 考虑这一影响后, 也将减小

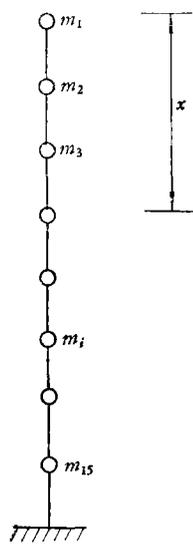


图 1

表 1 砖烟囱的截面参数

质点 $i$	$x$ (m)	外径 (m)	壁厚 (cm)	$I$ (cm <sup>4</sup> )	$m_i g$ (kg)	$\sigma_w$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$J$ (cm <sup>4</sup> )	备注
1	0	1.50	25	$0.984 \times 10^4$	$0.184 \times 10^4$	0	$1.99 \times 10^7$	
2	2	1.60	25	$1.06 \times 10^4$	$0.381 \times 10^4$	0.353	$2.50 \times 10^7$	
3	4	1.70	25	$1.14 \times 10^4$	$0.41 \times 10^4$	0.675	$3.08 \times 10^7$	
4	6	1.80	25	$1.22 \times 10^4$	$0.44 \times 10^4$	0.980	$3.57 \times 10^7$	
5	8	1.90	25	$1.30 \times 10^4$	$0.47 \times 10^4$	1.29	$4.51 \times 10^7$	
6	10	2.00	25 37	$1.38 \times 10^4$ $1.90 \times 10^4$	$0.59 \times 10^4$	1.60	$5.37 \times 10^7$	变截面
7	12	2.10	37	$2.02 \times 10^4$	$0.726 \times 10^4$	1.41	$7.87 \times 10^7$	
8	14	2.20	37	$2.13 \times 10^4$	$0.767 \times 10^4$	1.69	$9.27 \times 10^7$	
9	16	2.30	37	$2.25 \times 10^4$	$0.998 \times 10^4$	2.00	$10.83 \times 10^7$	
10	18	2.40	37	$2.37 \times 10^4$	$1.055 \times 10^4$	2.33	$12.56 \times 10^7$	
11	20	2.50	37 49	$2.48 \times 10^4$ $3.10 \times 10^4$	$1.21 \times 10^4$	2.68	$14.46 \times 10^7$	变截面
12	22	2.60	49	$3.25 \times 10^4$	$1.366 \times 10^4$	2.44	$19.05 \times 10^7$	
13	24	2.70	49	$3.41 \times 10^4$	$1.44 \times 10^4$	2.74	$21.8 \times 10^7$	
14	26	2.80	49	$3.56 \times 10^4$	$1.51 \times 10^4$	3.04	$24.8 \times 10^7$	
15	28	2.90	49	$3.72 \times 10^4$	$1.58 \times 10^4$	3.33	$28.08 \times 10^7$	
底端	29	2.95	49	$3.87 \times 10^4$		3.40		
基础底		5.50		$2.38 \times 10^5$				

表 2 砖烟囱的水平地震力

(八度区, 二类地基)

$x$ (m)	$M$ (kg·m)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$[\sigma]$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma/[\sigma]$	$Q$ (kg)	$\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$[\tau]$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\tau/[\tau]$	$0.7\sigma_w$	$0.5\tau/0.7\sigma_w$
0	0	0			0	0	0			
2	$0.168 \times 10^4$	0.57	1.07	0.55	$0.175 \times 10^4$	0.35	0.92	0.38	0.25	0.70
4	$0.555 \times 10^4$	1.63	1.34	1.22	$0.315 \times 10^4$	0.55	1.14	0.48	0.47	0.59
6	$1.05 \times 10^4$	2.80	1.65	1.70	$0.370 \times 10^4$	0.61	1.35	0.45	0.69	0.44
8	$1.55 \times 10^4$	3.40	1.96	1.73	$0.370 \times 10^4$	0.57	1.57	0.36	0.90	0.32
10	$1.97 \times 10^4$	3.67	2.27	1.59	$0.370 \times 10^4$	0.54	1.79	0.30	1.12	0.24
12	$2.24 \times 10^4$	3.11	2.74	1.13	$0.370 \times 10^4$	0.37	2.32	0.16	1.18	0.16
14	$2.45 \times 10^4$	3.04	3.02	1.01	$0.395 \times 10^4$	0.37	2.51	0.15	1.40	0.13
16	$2.70 \times 10^4$	3.00	3.33	0.90	$0.480 \times 10^4$	0.43	2.73	0.16	1.63	0.13
18	$3.00 \times 10^4$	2.93	3.66	0.80	$0.590 \times 10^4$	0.50	2.96	0.17	1.88	0.13
20	$3.15 \times 10^4$	2.84	4.01	0.71	$0.750 \times 10^4$	0.60	3.87	0.16	1.71	0.18
22	$3.55 \times 10^4$	2.52	4.44	0.57	$0.970 \times 10^4$	0.60	3.71	0.16	1.92	0.16
24	$4.40 \times 10^4$	2.83	4.74	0.60	$1.15 \times 10^4$	0.67	3.92	0.17	2.13	0.16
26	$6.80 \times 10^4$	3.78	5.04	0.79	$1.25 \times 10^4$	0.70	4.15	0.17	2.33	0.15
28	$7.24 \times 10^4$	3.93	5.33	0.74	$1.30 \times 10^4$	0.70	4.33	0.16	2.38	0.15

烟囱上部的地震力。

### 三、砖烟囱震害的分析

一般计算烟囱地震力时,认为地面水平运动起着决定性的作用,所以不考虑地面竖向运动的影响。我们分析各种震害现象后,发现这种观点是错误的。现分别讨论如下:

1. 海城地震时比较普遍的现象是烟囱中上部出现多道水平环形通缝(少数略有倾斜或未形成通缝)而不掉下,或上部虽已掉下而下面仍有多条裂缝。这些裂缝有的达 10 条之多,间距近者不到 1m。水平振动是不可能引起这种现象的。

烟囱作水平振动时,在某一截面发生断裂后,弯矩和拉力已不连续,所以断裂截面以上的部分不可能产生影响较大的高振型,也就不可能产生新的断裂。

断裂截面下较近的截面也不能产生新的断裂。因为从表 2 的数字看,一般在顶端以下 6—10m 最危险。现假定  $x = 10\text{m}$  处最先断裂来进行分析。该处未断裂前的抗弯能力为

$$M_t = 2.27 \times 5.37 \times \frac{10^7}{100 \times 100} = 1.22 \times 10^4 \text{kg} \cdot \text{m} \quad (1)$$

其中约 70% (1.6/2.27) 为自重压应力的影响,其余的 30% 为抗拉强度的影响。

截面边缘裂开后,截面惯性矩将迅速减小,截面以上部分的重心偏移较大,因而将增大偏心力矩。这些都将降低截面的抗弯能力。但由于中性轴由圆心向外移动,上部重量将产生稳定力矩,因而增大了截面的抗弯能力。下面我们来比较裂缝发展到一半截面及全部断裂后的情形。

当裂缝发展至一半截面时,中和轴至圆心的距离  $\bar{y}_h$  及惯性矩  $J_h$  各为

$$\bar{y}_h = 56\text{cm}; \quad J_h = 5.28 \times 10^6 \text{cm}^4$$

截面以上部分的重量为  $2.21 \times 10^4 \text{kg}$ , 其重心至  $x = 10\text{m}$  截面的距离  $\bar{x} = 460\text{cm}$ 。

以  $\phi$  表示截面中心与变形后上部重心的连线对铅垂线的夹角, 则得此时的抵抗弯矩为

$$M_h = \left( \frac{2}{3} + 2 \times 1.6 \right) \times \frac{5.28 \times 10^6}{56 \times 100} + \frac{2.21 \times 10^4 (56 - \bar{x} \sin \phi)}{100}$$

$$= 3.65 \times 10^4 + 2.21 \times 10^2 (56 - \bar{x} \sin \phi) (\text{kg} \cdot \text{m}) \quad (2)$$

式中第一项为截面的抗弯能力, 约为  $0.3M_t$ , 第二项为稳定力矩与偏心力矩之差. 此时若  $\phi > 2.1^\circ$ , 则  $M_h < M_t$ . 对这样高柔的烟囱, 此转角值是容易达到的.

下面讨论烟囱出现一条环形通缝后的抗弯能力. 当烟囱上部处于即将倒下的临界状态时, 不可能以截面边缘的一点作为支点. 假定此时中性轴至圆心的距离为 90cm, 因其截面惯性矩十分微小, 故略去平均压应力产生的抗弯强度, 可得临界状态的抗弯能力为

$$M_s = 2.21 \times 10^2 (90 - \bar{x} \sin \phi) (\text{kg} \cdot \text{m}) \quad (3)$$

式中  $\phi$  为临界状态转角. 若  $\phi > 4.3^\circ$ , 则  $M_s < M_t$ . 在上述情况下这个转角值是很容易达到的.

总之, 对于这个截面而言(其他截面也基本如此), 在水平地震作用下若产生能使该截面破坏的弯矩, 就会使裂缝发展至全部断裂并使上部倒塌. 但如前所述, 截面断裂后, 抗拉强度产生的抵抗弯矩  $M_e = 1.22 \times 10^4 \times \frac{0.67}{2.27} = 3600 \text{kg} \cdot \text{m}$  已不能向下传递. 所以在此截面下面较近的截面, 在其上部未倒下前, 已不可能产生使它破坏的弯矩, 因而不可能形成新的裂缝.

通过以上分析, 我们认为烟囱出现多条环形水平通缝的现象是水平振动不能解释的.

2. 地震时烟囱顶端及接近顶端发生破坏的现象是很常见的. 但在地面水平振动作用下, 这些截面的弯矩和剪力都等于或接近于零. 由表 2 可见, 这些截面未破坏前, 下面的截面早已由于弯矩作用而破坏. 海城地震时八度地区一根高 29m 的砖烟囱, 就在距顶端 20—30 cm 处出现环形裂缝. 经估算后, 弯矩或剪力作用要使此截面发生破坏, 顶端的加速度必须是重力加速度  $g$  的几十倍. 在八度区这显然是不可能的. 如果认为烟囱顶端的强度很低, 那也只能被震碎而不会发生环形平缝. 所以我们认为这种震害现象也不是水平振动所能解释的.

3. 烟囱发生斜裂缝的现象在六度以上地区十分普遍. 但表 2 的数字表明, 需要九度以上才有可能发生剪切破坏, 但七度稍强一点, 弯矩就足以引起破坏, 相差两度之多. 对于高柔烟囱, 这个性质是容易理解的. 在地面水平运动作用下, 在未出现剪切破坏之前, 弯矩作用早已使它断裂并倒下了. 所以这种现象也是水平振动所不能解释的.

4. 地震时烟囱错动的现象也很多. 即使烟囱原来已有环形水平裂缝, 也需要剪力大于摩擦力才能错动. 表 2 的数字表明, 只有在接近顶端的很小的长度范围内, 烈度接近九度时才有这种可能. 但烈度这样高, 下部截面早已发生弯矩破坏, 而且发生错动的截面也不限于上述较小的长度范围内. 所以只考虑地面水平振动的作用, 也难以解释这种震害现象.

5. 我们调查过 100 多个掉头或在中下部倒毁的烟囱, 只有一个是在中部断裂后向一边倒下的. 这可能是弯矩起主要作用; 也可能是轴向拉力较大, 加上相当大的弯矩使它向一边倒下的. 其余的, 砖块都散落在烟囱的四周, 相距也不很远. 海城地震时, 大石桥有

一个烟囱的顶部掉下,紧靠着烟囱的近旁砸出一个圆坑。我们认为,这些震害也说明烟囱的破坏并不是水平振动起主要作用。因为水平振动的弯矩远大于剪力的作用,破坏时应向一边倒下。

6. 地震时烟囱偶尔也出现由于扭矩引起的螺旋式斜缝。拉断后扭一个角度的现象就更普遍。圆形烟囱基本上是各向对称的,所以水平振动时,由于某些原因产生一点扭矩,数值不会很大,而它的抗扭能力却是相当大的。即使截面原已断裂,仅摩擦力也将产生很大的抗扭力矩,所以我们认为这类现象也难以用水平振动解释。

7. 烟囱在地震时出现的水平缝,很多只是一条细微的裂缝,毫无局部损坏及错动现象。海城地震后,我们第一次调查时未用望远镜,仅看到那些肉眼可以看到的缝。第二次用望远镜或爬到烟囱上查看时,发现了很多前次未看见的裂缝,而且差不多所看过的烟囱上都有几条平缝。我们认为在地面水平振动作用下,若由剪力引起破坏,则将伴随着错动或斜缝;若由弯矩引起破坏,向一个方向弯曲而形成通缝是不可能的,即使可能也必将产生局部压碎现象。两个方向弯曲而形成通缝应是极少见的。因为任一截面的弯矩都由若干振型叠加而成,由于各振型的频率不同及地震现象极不规则等原因,发生最大弯矩的截面是不断改变的,所以烟囱在两个方向弯曲时,事实上不可能在同一截面发生裂缝而且正好形成水平通缝。所以我们认为此种震害现象也说明水平振动并不起主要作用。

8. 地震时也常看到局部(有的甚至几乎全部)酥裂的现象。我们认为在水平运动作用下以弯矩作用为主的高柔烟囱出现此种情况而不倒毁,也是难以想像的。

9. 有的烟囱还出现竖缝。由于烟囱的温度较高,存在很大的环向拉力,因而容易被拉开。但在水平地震力作用下,弯矩是不能促成此种裂缝的,在中性轴处虽然存在最大的剪应力,但它不可能造成锯齿形竖缝,也不可能切断砖块而形成直的竖缝。

10. 七、八度地区的烟囱基本上都在中上部破坏。一般认为这是地面水平振动作用下高振型影响较大所致。表 2 中的数字似乎还能解释。但如前所述,按规范给出的反应谱曲线计算的地震力,有三个因素夸大了高振型的作用,致使中上部(特别是上部)的值偏大很多。我们认为,水平地震力能否在中上部造成破坏,有待进一步试验研究。

#### 四、砖烟囱的纵波应力及对各种震害的解释

1. 烟囱的纵波应力 地震时地面运动往往只有一两个特别强烈的波,地震波在传播过程中将有不少能量逸散,所以我们只着重研究强度最大的半个至一个周期的地面竖向运动引起的纵波应力,把它视为谐和运动,以  $T$  表示其周期。

将烟囱视为内外径呈一定比例的中空截头圆锥体,按表面坡度延长至顶点  $O$  作为坐标原点,以  $R$  表示  $x$  截面至  $O$  点的距离(图 2),则

$$F_x = KR^2, \quad \text{或} \quad R = \sqrt{F_x/K} \quad (4)$$

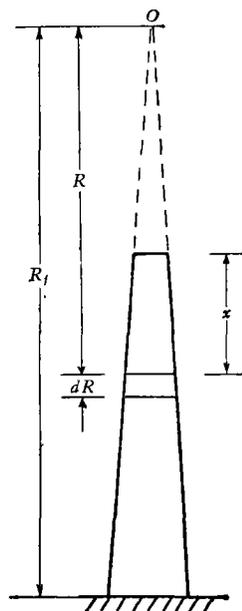


图 2

以  $z$  和  $\sigma$  表示此截面的纵向位移及纵波应力,  $\rho$  表示材料密度, 则平衡方程为

$$\left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial R} dR\right) K(R + dR)^2 - \sigma KR^2 = \rho KR^2 dR \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$

将  $\sigma = E \frac{\partial z}{\partial R}$  代入, 整理后得平衡方程及其解分别为

$$\frac{\partial^2(zR)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2(zR)}{\partial R^2} \quad (5)$$

$$zR = f(R + ct) + F(R - ct) \quad (6)$$

式中  $c = \sqrt{E/\rho}$  为纵波的传播速度, 对于砖砌体约为 1000m/s.

我们只讨论从烟囱底部向顶端传播的波, 故只取式(6)的第一项, 于是得

$$z = \frac{1}{R} f(R + ct), \quad \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{c}{R} f'(R + ct) \quad (7)$$

由式(7)及(4)可见, 波的强度随面积比的平方根而改变. 纵波应力为

$$\sigma = \frac{E}{R} f'(R + ct) - \frac{E}{R^2} f(R + ct) = \sqrt{\rho E} \frac{\partial z}{\partial t} - \frac{E}{R} z \quad (8)$$

可见纵波应力的第一项由质点运动速度产生, 记为  $\sigma_1$ ; 第二项由位移产生, 记为  $\sigma_2$ :

$$\sigma_1 = \frac{E}{R} f'(R + ct) = \sqrt{\rho E} \frac{\partial z}{\partial t}, \quad \sigma_2 = -\frac{E}{R^2} f(R + ct) = -\frac{E}{R} z \quad (9)$$

对于烟囱底部截面,  $R_f = 59\text{m}$ , 故

$$\frac{E}{R_f} = \frac{17500}{5900} = 2.97\text{kg/cm}^3$$

$$\sqrt{\rho E} = \sqrt{\frac{1.8 \times 10^3}{10^6 \times 10^3} \times 1.75 \times 10^4} = 0.177\text{kg}\cdot\text{s/cm}^3$$

以  $f_{\max}$  及  $f_{\max}$  表示  $f'(R + ct)$  及  $f(R + ct)$  的幅值,  $\sigma_{1f}$  及  $\sigma_{2f}$  表示在烟囱根部对应于上述幅值的  $\sigma_1$  及  $\sigma_2$ ,  $\sigma_{1x}$  及  $\sigma_{2x}$  表示在  $x$  截面对应于上述幅值的  $\sigma_1$  及  $\sigma_2$ , 于是得

$$\sigma_{1f} = \frac{E}{R_f} f_{\max}, \quad \sigma_{2f} = -\frac{E}{R_f^2} f_{\max}, \quad \sigma_{1x} = \frac{E}{R} f_{\max}, \quad \sigma_{2x} = -\frac{E}{R^2} f_{\max}$$

$$\sigma_{1x} = \frac{R_f}{R} \sigma_{1f} = \sqrt{\frac{F_1}{F_x}} \sigma_{1f}, \quad \sigma_{2x} = \frac{R_f^2}{R^2} \sigma_{2f} = \frac{F_1}{F_x} \sigma_{2f} \quad (10)$$

式(10)表示  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  向上传播时分别按  $\sqrt{F_1/F_x}$  及  $F_1/F_x$  放大.

当一个竖向波从混凝土基础(下标 1)正投影于砖烟囱(下标 2)时, 其折射系数为

$$\beta = 2\sqrt{\rho_1 E_1} / (\sqrt{\rho_1 E_1} + \sqrt{\rho_2 E_2}) = 1.6$$

纵波由基础底面传至烟囱底部时, 若近似取为按面积比平方根规律变化, 则

$$\beta' = \sqrt{\frac{238000}{38700}} = 2.48$$

我们研究过烟囱对地基(竖向)的反馈作用, 由于影响不很大, 这里暂不考虑.

若以  $\ddot{z}_g$  及  $\ddot{z}_f$  表示基础底面(地面)及烟囱底面的竖向最大加速度, 则得

$$\ddot{z}_f = 1.6 \times 2.48 \ddot{z}_g = 4.45 \ddot{z}_g$$

从海城地震的余震来看,地面竖向与水平加速度之比为 0.26—0.87,平均值为 0.565,取平均值算得八度地区的

$$\ddot{z}_g = 0.2 \times 0.565g = 0.113g$$

$$\ddot{z}_f = 4.45 \times 0.113g = 0.503g = 503\text{cm/s}^2$$

地面竖向运动的周期很短,所以我们只计算  $T = 0.1, 0.15, 0.2$  及  $0.3\text{s}$  的纵波应力.表 3 为按公式(9)算得八度地区的  $\sigma_{1f}$  及  $\sigma_{2f}$  之值. 烟囱底面的竖向加速度、速度及位移为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{z}_f(t) &= -\ddot{z}_f \cos \frac{2\pi}{T} t \\ \dot{z}_f(t) &= -\ddot{z}_f \frac{T}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{T} t \\ z_f(t) &= \ddot{z}_f \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \cos \frac{2\pi}{T} t \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中负号表示向上,正号表示向下.

表 3  $\dot{z}_f, z_f, \sigma_{1f}$  及  $\sigma_{2f}$  的值

$\ddot{z}_f = 503\text{cm/s}^2$

$T$ (s)	0.1	0.15	0.2	0.3
$\dot{z}_f(\text{cm/s})$	8.0	12	16	24
$z_f(\text{cm})$	0.127	0.286	0.503	1.15
$\sigma_{1f}(\text{kg/cm}^2)$	1.41	2.12	2.82	4.24
$\sigma_{2f}(\text{kg/cm}^2)$	0.38	0.84	1.51	3.40

砖烟囱的一般高度为 20—50m. 当  $T = 0.1, 0.15, 0.2$  及  $0.3\text{s}$  时,半个周期的传播距离为 50, 75, 100 及 150m. 所以,当压力波  $\sigma_1$  的前端及压力波  $\sigma_2$  的波腹传播到烟囱顶端时,烟囱中上部处于受压状态;再经过  $T/4$ ,  $\sigma_1$  的波腹到达顶端. 若不计能量耗损,则  $\sigma_1$  反射下来的拉应力与向上传播的压应力刚好抵消. 此时  $\sigma_2$  的末端刚好到达顶端,反射下来的和向上传播的都是拉应力,故截面受拉. 若不考虑由顶端向下反射到基础后又反射上去,然后再上下逐次反射的波应力,一般说来,烟囱中上部的拉应力将越来越大. 对

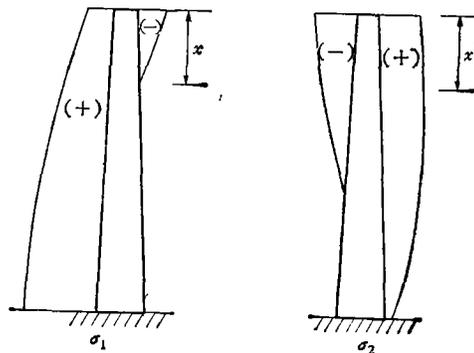


图 3

于周期不太短的情形,当 $\sigma_1$ 的末端到达某一截面时,该截面的拉应力才达到或接近最大值 $\sigma'_x$ .此时向上传播的 $\sigma_2$ 已变为拉力波,且波腹刚好到达这一截面(图3).由式(10),(11)容易推得 $\sigma'_x$ 的表达式为

$$\sigma'_x = \sqrt{\frac{F_1}{F_x}} \sigma_{1f} \sin \frac{4\pi}{cT} x + \frac{F_1}{F_x} \sigma_{2f} \left(1 - \cos \frac{4\pi}{cT} x\right) \quad (12)$$

关于阻尼的影响,在水平地震力的计算中也没有很好解决.这里我们假定,纵波经顶端或底面反射一次使能量衰减后的应力仅为原来的70%,于是式(12)在考虑阻尼后变为

$$\sigma'_x = 0.7 \sqrt{\frac{F_1}{F_x}} \sigma_{1f} \sin \frac{4\pi}{cT} x + \frac{F_1}{F_x} \sigma_{2f} \left(1 - 0.7 \cos \frac{4\pi}{cT} x\right) \quad (13)$$

波从烟囱顶端传至底面反射后的反射系数为

$$\beta'' = \frac{\sqrt{\rho_1 E_1} - \sqrt{\rho_2 E_2}}{\sqrt{\rho_1 E_1} + \sqrt{\rho_2 E_2}} = 0.59$$

令烟囱高度为 $h$ ,则 $\sigma_1$ 及 $\sigma_2$ 经烟囱底面反射后又传至顶端反射下来的波应力 $\sigma_{e1}$ 及 $\sigma_{e2}$ 为:

$$\sigma_{e1} = 0.59(0.7)^2 \sqrt{\frac{F_1}{F_x}} \sigma_{1f} \sin \left(1 - \frac{4h}{cT}\right) \pi - 0.59(0.7)^3 \sqrt{\frac{F_1}{F_x}} \sigma_{1f} \sin \left(1 - \frac{4h + 4x}{cT}\right) \pi \quad (14)$$

式中当 $\left(1 - \frac{4h}{cT}\right) \leq 0$ 时, $\sigma_{e1} = 0$ ; 当 $\left(1 - \frac{4h + 4x}{cT}\right) \leq 0$ 时,第二项为零.

$$\sigma_{e2} = 0.59(0.7)^2 \frac{F_1}{F_x} \sigma_{2f} \cos \left(1 - \frac{4h}{cT}\right) \pi - 0.59(0.7)^3 \frac{F_1}{F_x} \sigma_{2f} \cos \left(1 - \frac{4h + 4x}{cT}\right) \pi \quad (15)$$

式中当 $\left(\frac{1}{2} - \frac{4h}{cT}\right) \leq 0$ 时, $\sigma_{e2} = 0$ ; 当 $\left(\frac{1}{2} - \frac{4h + 4x}{cT}\right) \leq 0$ 时,第二项为零.

对较长的周期如 $T = 0.3s$ ,还需考虑再经烟囱底面反射并传至顶端反射下来的波应力

$$\begin{aligned} \sigma_{e'1} &= (0.59)^2(0.7)^4 \sqrt{\frac{F_1}{F_x}} \sigma_{1f} \sin \left(1 - \frac{8h}{cT}\right) \pi \\ &\quad - (0.59)^2(0.7)^5 \sqrt{\frac{F_1}{F_x}} \sigma_{1f} \sin \left(1 - \frac{8h + 4x}{cT}\right) \pi \end{aligned} \quad (16)$$

式中当 $\left(1 - \frac{8h}{cT}\right) \leq 0$ 时, $\sigma_{e'1} = 0$ ; 当 $\left(1 - \frac{8h + 4x}{cT}\right) \leq 0$ 时,第二项为零.

$$\begin{aligned} \sigma_{e'2} &= (0.59)^2(0.7)^4 \frac{F_1}{F_x} \sigma_{2f} \cos \left(1 - \frac{8h}{cT}\right) \pi \\ &\quad - (0.59)^2(0.7)^5 \frac{F_1}{F_x} \sigma_{2f} \cos \left(1 - \frac{8h + 4x}{cT}\right) \pi \end{aligned} \quad (17)$$

式中当 $\left(\frac{3}{2} - \frac{8h}{cT}\right) \leq 0$ 时, $\sigma_{e'2} = 0$ ; 当 $\left(\frac{3}{2} - \frac{8h + 4x}{cT}\right) \leq 0$ 时,第二项为零.

由于波在烟囱中传播一周后将消耗约70%(即 $1 - 0.7 \times 0.7 \times 0.59 = 0.7$ )的能量,而我们计算的地震波为强度最大者,因此前面那些波的影响是很小的,可略弃不计.

于是得半个至一个周期的波引起的纵波应力计算公式为

$$\sigma_x = \sigma'_x + \sigma_{e1} - \sigma_{e2} - \sigma_{e'1} + \sigma_{e'2} \quad (13)$$

表 4 为按公式 (18) 算出的纵波应力。

表 4 纵波应力  $\sigma_x(\text{kg/cm}^2)$  及  $\sigma_x/[\sigma_x]$

$x$ (m)	$T(s)$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )		0.1		0.15		0.2		0.3		$\frac{F_t}{F_x}$	$[\sigma_x]$
	$\sigma_x$	$\sigma_x/[\sigma_x]$	$\sigma_x$	$\sigma_x/[\sigma_x]$	$\sigma_x$	$\sigma_x/[\sigma_x]$	$\sigma_x$	$\sigma_x/[\sigma_x]$	$\sigma_x$	$\sigma_x/[\sigma_x]$		
2	1.09	1.23	1.91	2.14	2.64	2.96	4.27	4.75	3.65	0.89		
4	1.55	1.28	2.40	1.98	2.96	2.44	4.32	3.57	3.40	1.21		
6	2.03	1.35	2.90	1.92	3.19	2.09	4.66	3.09	3.17	1.51		
8	2.62	1.44	3.43	1.88	3.71	2.04	4.93	2.71	2.98	1.82		
10	2.76	1.30	4.30	2.02	4.15	1.95	5.23	2.46	2.80	2.13		
12	2.31	0.93	3.55	1.43	3.69	1.49	4.27	1.72	1.92	2.48		
14	2.34	0.85	3.86	1.40	4.01	1.45	4.52	1.64	1.82	2.76		
16	2.28	0.74	3.91	1.27	4.28	1.39	4.79	1.56	1.72	3.07		
18	2.15	0.63	4.02	1.18	4.57	1.34	4.95	1.46	1.63	3.40		
20	1.92	0.51	4.04	1.08	4.86	1.30	5.24	1.40	1.56	3.75		

以上的讨论是  $\sigma_x(x)$  按式 (11) 求得的。若将式 (11) 改变符号或改为正弦函数, 所有推导可类似上述方式进行, 唯最大应力的截面有时可能由上而下。

**2. 烟囱出现多道裂缝的破坏机理**  $\sigma_1$  的波腹也自烟囱顶端向下反射后, 中上部各截面的拉应力将不断增大。一般来说, 要到  $\sigma_1$  的末端到达某截面时, 该截面的拉应力才达到或接近最大值。现将破坏机理分三种情况讨论如下:

1) 第一条裂缝刚好在该截面拉应力达最大值的时刻产生 此时的  $\sigma_x$  应稍大于总抗拉强度。截面拉断后, 大于自重压应力的拉应力将使该截面以上部分上跳, 并变为压力波自该截面向上传播。在此压力波传到的范围内, 拉应力将被抵消一部分。一些计算表明, 这一范围内已不可能产生新的断裂。但此压力波未传到的截面, 受力状态则与未发生断裂前相同。对于拉断截面以上的截面, 由于拉应力还在不断增加, 在拉断截面反射的压力波未到达之前, 若拉应力增至该截面的  $[\sigma_x]$  以上时, 即发生新的断裂。这一截面拉断之后, 大于自重压应力的拉应力又将使上部跳起并变为压力波向上传播。与上述情形相同, 在此压力波未到达之前, 若上部某一截面的拉应力增至该截面的  $[\sigma_x]$  以上时, 又将产生新的断裂…… 这样, 在极短的时间内就可以自下而上形成多道裂缝。对于拉断截面以下的截面, 由于它们的拉应力将逐渐减小, 所以即使从拉断截面传来的压力波还未到达, 也不会发生新的断裂。

2) 第一条裂缝发生在拉应力还未达最大值的截面 对于拉断截面以上的截面将与前述情形相同。对于以下的截面, 因拉应力还在不断增加, 当增加到大于该截面的  $[\sigma_x]$  时若从拉断截面传来的压力波还未到达, 也将发生新的断裂。但此种情形的可能性较小。

3) 烟囱原来已有一条裂缝 压力波向上传播经过裂缝时将有一部分反射, 因此它的强度将有所降低, 从顶端反射下来的拉应力也相应减小。同时, 只要拉应力大于自重压应力, 上部就将跳起。对于上部截面, 由原断裂截面开始反射压力波的时刻提早很多, 所以

产生新断裂的可能性很小。对于下部截面,在上部跳起的瞬间,断裂处变为自由端,所以由下面传来的压波到达断裂面后,将反射为拉力波向下传播,这就等于烟囱短了一段。由式(11)可见,其 $\sigma_x$ 将降低。所以,在拉断截面下方出现新断裂的可能性也就减小。

跳起的部分落下时,所产生的压力波传到顶端反射为拉力波后,也可能拉断顶端。

若拉应力达最大值的截面为由上而下,则多道裂缝主要将由上而下逐一形成。

最后,再谈谈水平振动的影响。当弯曲拉应力与纵波应力之和大于 $[\sigma_x]$ 时,截面边缘即开始出现裂缝并逐渐发展,但需要纵波拉应力大于自重压应力才能形成通缝。由此可见,截面被拉断的纵波应力不一定要大于该截面的 $[\sigma_x]$ 。

**3. 对其他震害现象的解释** 当烟囱被拉断,上部跳起时,很小的剪力就可能使它错位。错位超过该截面的直径时,上部就会掉落在烟囱附近。若跳起高度较大,落下时将引起较大的冲击而形成酥松现象,或将烟囱冲成碎块散落于四周,加上水平振动的作用,就可能将碎块抛出。冲击的压力波或由基础发出的瞬时冲击传至烟囱顶端后,就可能在顶端发生破裂。若某一截面的抗拉强度极低或在纵波与弯矩联合作用下截面刚好能被拉断(纵波应力仅稍大于自重压应力)时,就可能出现肉眼看不见的轻微裂缝。当纵波拉应力较大,截面还未断裂而处于受拉状态时,不大的剪力及扭矩就可能引起剪切及扭转破坏现象。当烟囱处于受压状态时,横向受拉,加上温度应力,就可能形成竖缝。

从表3的数字看,用纵波应力解释烟囱常在中上部破坏的现象,似乎更合理些。

## 五、结 语

只考虑烟囱的水平地震力,多数震害现象都难以解释。用纵波应力或再加一定的水平地震力,几乎所有震害现象都能很好解释。故烟囱的纵波应力是主要的地震力。国内外计算烟囱的地震力以及采取的抗震措施,都只考虑地面水平运动的作用,是错误的或不全面的。我们认为烟囱的纵波应力至少与水平地震力有同等重要的作用。

砖烟囱易坏难修,国际上认为地震区不宜采用。我国是多地震国家,但砖烟囱在近期内还需采用。我们认为,从纵波应力起主要作用的观点出发,有可能找到经济实用的抗震措施。

## 参 考 文 献

- [1] 钱培风,结构动力学,中国工业出版社(1966)。
- [2] 工业与民用建筑抗震设计规范,中国建筑工业出版社(1974)。
- [3] Richard, F. E., Woods, R. D., *Vibration of Soils and Foundations* (1970)。
- [4] Byckroft, G. N., *Phil. Trans. Royal Society, London, Ser. A*, **248** (1956)。
- [5] И. 考尔斯基(王仁等译),固体中的应力波,科学出版社(1958)。