

清华大学研究生课程——《灾害学》

风灾

陆新征
清华大学土木工程系
2006

1

清华大学研究生课程——《灾害学》

横风向风振

- 细长柔性结构，横风向可能产生很大的动力效应
- 常见横风向振动
 - 涡振
 - 驰振
 - 颤振
 - 抖振



2

清华大学研究生课程——《灾害学》

作用在结构物表面的风力

$$p_D(\alpha) = \mu_D(\alpha) \frac{1}{2} \rho v^2 B$$

阻力系数

$$p_L(\alpha) = \mu_L(\alpha) \frac{1}{2} \rho v^2 B$$

升力系数

$$M = \mu_M \frac{1}{2} \rho v^2 B^2$$

力矩系数

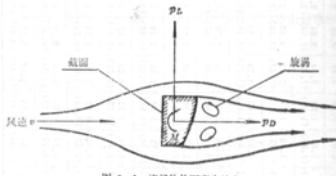


图 8-1 流经物体产生的力

清华大学研究生课程——《灾害学》

漩涡脱落和涡激共振

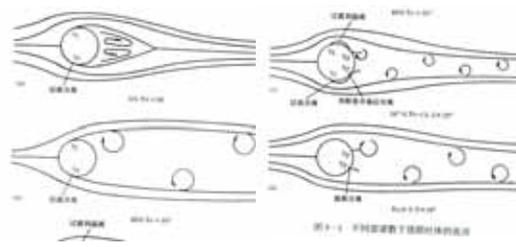
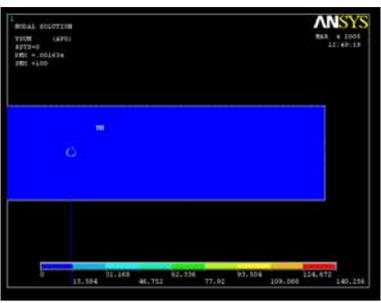


图 7-1 不同雷诺数下绕圆柱体的流态

4

清华大学研究生课程——《灾害学》

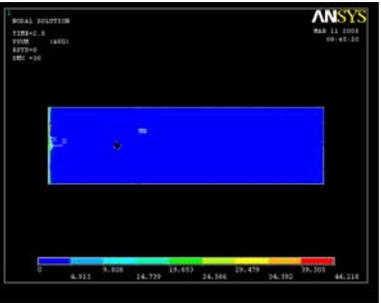
尾流脱落形成过程



5

清华大学研究生课程——《灾害学》

尾流振动



6

清华大学研究生课程——《灾害学》

共振时等效作用在结构上的风载

- 等效位移响应
$$y_j(z) = \frac{\int_{H_1}^H \frac{1}{2} \rho v_{cr}^2 D \mu_L \varphi_j(z) dz}{2 \zeta_j \varphi_j^2 \int_0^H m(z) \varphi_j^2(z) dz} \varphi_j(z)$$
- 等效力
$$P_{Ldj}(z) = m(z) \frac{\int_{H_1}^H \frac{1}{2} \rho v_{cr}^2 D \mu_L \varphi_j(z) dz}{2 \zeta_j \int_0^H m(z) \varphi_j^2(z) dz} \varphi_j(z)$$

《图中为第1振型》 13

清华大学研究生课程——《灾害学》

对于圆形规则结构

- 取升力系数为 $\mu_L=0.25$

$$P_{Ldj}(z) = m(z) \frac{\int_{H_1}^H \frac{1}{2} \rho v_{cr}^2 D \mu_L \varphi_j(z) dz}{2 \zeta_j \int_0^H m(z) \varphi_j^2(z) dz} \varphi_j(z)$$

↓

$$P_{Ldj}(z) = \frac{\int_{H_1}^H \varphi_j(z) dz}{\int_0^H \varphi_j^2(z) dz} \frac{v_{cr}^2 \varphi_j(z) B}{12800 \zeta_j}$$

14

清华大学研究生课程——《灾害学》

涡激共振计算方法

- 计算临界速度 v_{cr}
$$\bar{v}_{cr} = \frac{n_j D}{S}$$
- 判断结构临界高度 H_1
$$H_1 = H \times \left(\frac{v_{cr}}{v_H} \right)^{1/\alpha}$$
- 得到计算系数 λ_j
$$\lambda_j = \frac{\int_{H_1}^H \varphi_j(z) dz}{\int_0^H \varphi_j^2(z) dz}$$

15

清华大学研究生课程——《灾害学》

计算系数 λ_j

$$\lambda_j = \frac{\int_{H_1}^H \varphi_j(z) dz}{\int_0^H \varphi_j^2(z) dz}$$

表 7.6.2 λ_j 计算用表

结构类型	振型序号	H_1 / H										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
高耸结构	1	1.56	1.55	1.54	1.49	1.42	1.31	1.15	0.94	0.68	0.37	0
	2	0.83	0.82	0.76	0.60	0.37	0.09	-0.16	-0.33	-0.38	-0.27	0
	3	0.52	0.48	0.32	0.06	-0.19	-0.30	-0.21	0.00	0.20	0.23	0
	4	0.30	0.33	0.02	-0.20	-0.23	0.03	0.16	0.15	-0.05	-0.18	0
高层建筑	1	1.56	1.56	1.54	1.49	1.41	1.28	1.12	0.91	0.65	0.35	0
	2	0.73	0.72	0.63	0.45	0.19	-0.11	-0.36	-0.52	-0.53	-0.36	0

16

清华大学研究生课程——《灾害学》

等效风荷载

$$w_{cuj} = \frac{|\lambda_j| v_{cr}^2 \varphi_{uj}}{12800 \zeta_j}$$

- ζ 阻尼
- φ 振型

17

清华大学研究生课程——《灾害学》

横风向等效风荷载计算

- 正方形高层建筑，高180m，宽40m，第一周期4s，阻尼比0.02，C类场地，基本风压0.4kN/m²

18

清华大学研究生课程——《灾害学》

驰振

- 结构在横风向发生振动时，如果结构受到的风压不对称，在气流作用下，结构会不断吸收能量直至破坏。

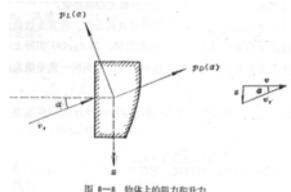


图 8-8 物体上的阻力和升力

20

清华大学研究生课程——《灾害学》

作用在结构上的横向风力

$$p_D(\alpha) = \mu_D(\alpha) \frac{1}{2} \rho v_r^2 B$$

$$p_L(\alpha) = \mu_L(\alpha) \frac{1}{2} \rho v_r^2 B$$

$$p_z(\alpha) = -p_D(\alpha) \sin \alpha - p_L(\alpha) \cos \alpha = \frac{1}{2} \rho v^2 B \mu_{DL}(\alpha)$$

$$v = v_r \cos \alpha$$

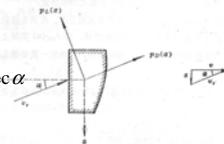
$$\mu_{DL}(\alpha) = -[\mu_L(\alpha) + \mu_D(\alpha) \tan \alpha] \sec \alpha$$


图 8-8 物体上的阻力和升力

21

清华大学研究生课程——《灾害学》

负阻尼判据

$$p_z(\alpha) = \frac{1}{2} \rho v^2 B \mu_{DL}(\alpha)$$

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = p_z(\alpha)$$

Taylor展开

$$c' = c + \frac{1}{2} \rho v B \mu'_{DL}(0)$$

如果阻尼小于零，则结构的振动将发散

21

清华大学研究生课程——《灾害学》

各种截面在稳定流动中铅直力系数的斜率 $\mu'_{DL}(\alpha)$ 表 8-2
(流向是从左向右) (α 以弧度为单位)

截面	μ_L	$\mu'_{DL}(\alpha)$
	6000	-2.7
	6000	0
	33000	-3.0
	2000~20000	10.0
	6000	0
	51000	0.5
	75000	-0.66

22

清华大学研究生课程——《灾害学》

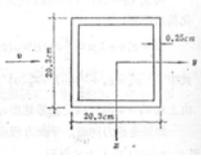
例题

- 某钢梁如图所示，求驰振临界风速

结构自振频率为4.49Hz
结构单位长度质量 1.678×10^6
空气密度为 0.125×10^{-10}
钢的阻尼比为0.01

$$c_{DL} = -2.7$$

$$c = 2 \times 0.01 \times 2 \times 3.14 \times 4.49 \times 1.678 \times 10^6 = 0.9468 \times 10^6$$

$$v_c = -2 \times 0.9468 \times 10^6 / (0.125 \times 10^{-10} \times 20.3 \times -2.7) = 27.64 \text{ m/s}$$


23

清华大学研究生课程——《灾害学》

说明

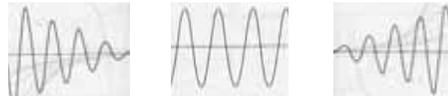
- 圆形结构不发生驰振
- 电线、索缆上经常因为雨水或冰凌而破坏圆形截面，因此需要考虑驰振
- 细长的六角形或矩形结构容易发生驰振，应在角部做倒角处理以提高驰振稳定性

24

清华大学研究生课程——《灾害学》

颤振和抖振

- 扭转和其他振动形式耦联的发散型振动
 - 经典颤振（弯扭耦合颤振）——竖弯模态和扭转模态相互耦合的弯扭耦合颤振，常发于扁平流线型桥梁断面。
 - 分离流扭转颤振（单自由度扭转颤振，失速颤振）——以扭转模态为主的颤振，常发生于钝体桥梁断面，如槽型、工字型断面。



- 脉动成分引起结构不规则有限幅度振动

25

清华大学研究生课程——《灾害学》

结构风力作用下位移限值

表 10-11 高层建筑结构水平位移限值

结构类型	层间		层间		层间
	层间最大位移	层间平均位移	层间最大位移	层间平均位移	
剪力墙	1/1000	1/700	1/500	1/300	1/700
框架梁	1/500	1/300	1/300	1/200	1/300

注：表中 δ 为层间位移和结构总高。

表 10-12 高层建筑的水平位移限值

结构类型	层间	层间
框架梁	1/500	1/300

表 10-13 人体舒适度控制限值

建筑类型	层间	层间
住宅	0.20m/s ²	0.20m/s ²

26