

拱型结构振动控制的探讨

杜成斌 赵光恒

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 将控制技术运用到拱型结构的振动控制中.运用单点和多点控制方法,将主动控制力表示为位移、速度和加速度的线性函数,在频域内探讨了拱型结构某些关键部位的加速度频率响应随地面运动频率变化情况,研究了主动控制力参数对加速度响应的影响,并对带有主动控制装置的拱型结构在随机激励作用下的响应进行了分析.结果表明选用速度的线性函数主控力形式可明显降低结构加速度响应,控制力的最佳位置与要控制的振型有关.

关键词 拱型结构,振动控制,加速度频率响应,随机激励

中图号 TU352

1 运动方程的建立及有关公式推导

1.1 带有控制力的运动方程

结构带有控制系统的运动方程为^[1]

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky + f = -MrW \tag{1}$$

其中: M 、 C 、 K ——结构的质量矩阵、阻尼矩阵和劲度矩阵; y 、 $\dot{y}$ 、 $\ddot{y}$ ——结构的位移响应、速度响应和加速度响应; W ——地面运动加速度; r ——有关位置指示矩阵; f ——施加的控制力.

假定控制力 f 的形式为

$$f = \alpha\ddot{y} + \beta\dot{y} + \lambda y \tag{2}$$

其中 α 、 β 和 λ 为控制设备的有关参数.

1.2 加速度频响函数

经过推导,结构加速度频率响应传递函数为

$$H(\bar{j}\omega) = \frac{\ddot{y}_a(\bar{j}\omega)}{W(\bar{j}\omega)} = D(\bar{j}\omega I - A)^{-1}B_W + E_W \tag{3}$$
$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\bar{M}^{-1}\bar{K} & -\bar{M}^{-1}\bar{C} \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad B_W = \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{M}^{-1}Mr \end{bmatrix}_{2n \times 1}$$
$$D = [-\bar{M}^{-1}\bar{K} \quad -\bar{M}^{-1}\bar{C}]_{n \times 2n} \quad E_W = [-\bar{M}^{-1}(M - \bar{M})r]_{n \times 1}$$
$$\bar{M} = M + \alpha I \quad \bar{C} = C + \beta I \quad \bar{K} = K + \lambda I$$

2 算例及其分析

图 1(a)中拱型结构^[2]的拱厚为 0.08 m,弹模 $E = 1.90 \times 10^2$ MPa,泊松比 $\nu = 0.17$,重度 $\gamma = 2400$ kg/m³,圆心夹角为 128.1°,内半径 $r_{内} = 1.02$ m,外半径 $r_{外} = 1.10$ m.单元网格剖分及控制装置位置见图 1(b).地面激励为 y 向.结构阻尼按 Rayleigh 假定取用.

2.1 单点控制

在顶点 1 处施加控制力,计算了(a)只考虑 $\alpha\ddot{y}_1$ (b)只考虑 λy_1 (c)只考虑 $\beta\dot{y}_1$ 三种情况下拱顶 1 点 y 向的加速度频响函数幅值 $|H_{ya}(\bar{j}\omega)|$ 随地面运动频率的变化情况.图 2 为(a)的计算结果.

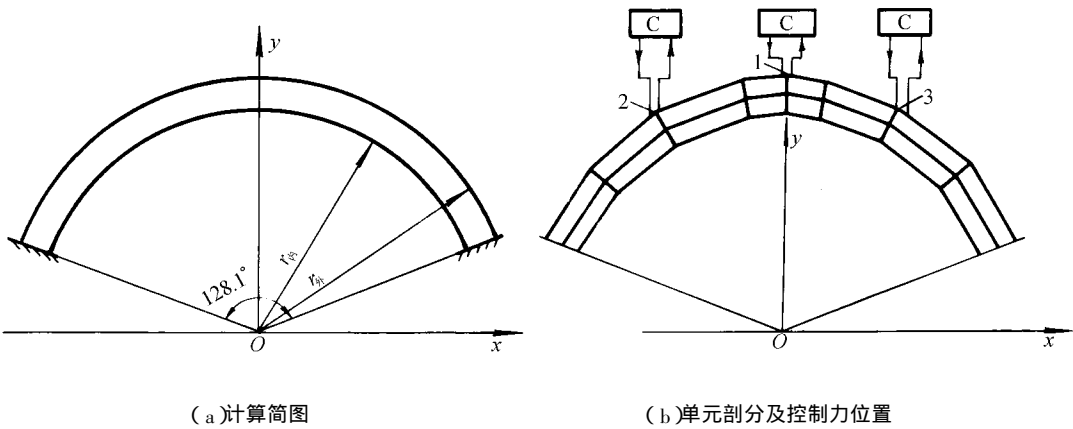


图1 拱型结构

Fig.1 Plane arch structure

图中实线为无控制力时,拱顶1点 y 向的 $|H_{ya1}(j\bar{\omega})|$. 计算表明仅考虑 $\ddot{\alpha y_1}$ 或 λy_1 并不能显著降低 $|H_{ya1}(j\bar{\omega})|$, 只不过使响应幅值稍微偏离原共振频率, 而且增加 λy_1 项反而使响应最大值变大. 实际上这两种情况分别类似于“动态振动吸振”和“刚化”. 增加 $\ddot{\alpha y_1}$ 项相当于在结构上附加质量, 利用振动过程中附加质量的惯性力, 平衡一部分地震荷载, 使结构1点加速度响应稍有降低; 而增加 λy_1 相当于使结构变刚, 故共振频率增大, 且 $|H_{ya1}(j\bar{\omega})|$ 值也变大. 第三种情况表明, 增加 $\beta \dot{y}_1$ 可以显著地降低结构在第1阶共振频率处的 $|H_{ya1}(j\bar{\omega})|$.

2.2 两点控制

在拱的对称两点2,3施加 $\beta \dot{y}_2$ (或 $\beta \dot{y}_3$), 图3为顶点 y 向加速度频响函数幅值变化情况.

结果表明, 设置控制力位置应根据所要控制的振型而定. 如本算例, 若要控制第一振型, 最佳位置应放在顶点. 若要控制第二振型或更高振型, 控制设备出力应设在侧边2点和3点, 这一点对于具体实施控制时有重要的指导意义.

2.3 三点控制

1点、2点和3点均施加控制力, 其结果见图4.

从结果发现, 三点控制时, 无论顶点还是2点(3点), 几乎所有共振频率处的加速度频响函数幅值均明显下降, 它可以非常有效地控制结构的振动.

2.4 随机激励作用下带有主控结构的响应

设地面加速度过程为零均值的高斯白噪声, 功率谱密度为 S_0 . 研究图1结构在三点控制时 ($\beta = 60 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$), 1点和2点的 y 向均方响应 Ey_1^2 和 Ey_2^2 .

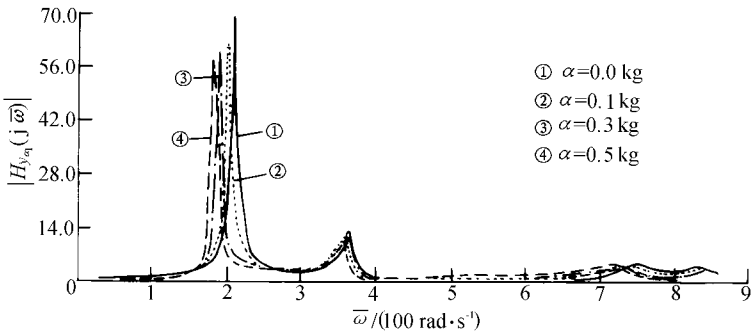


图2 主控制只考虑 $\ddot{\alpha y_1}$ 时 $|H_{ya1}(j\bar{\omega})| \sim \bar{\omega}$ 的关系曲线
Fig.2 Amplitudes of acceleration frequency responses for different $\ddot{\alpha y}$ under single-point control

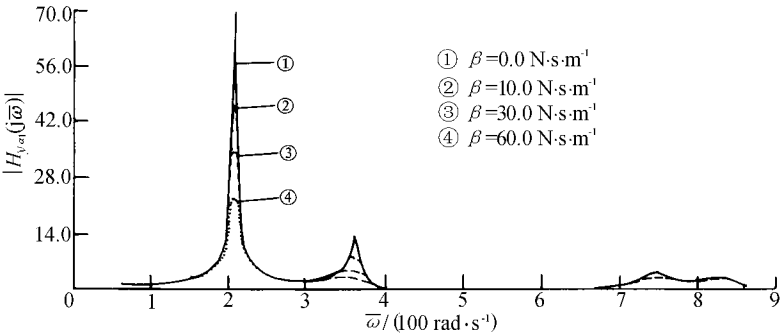


图3 两点控制时 $|H_{ya1}(j\bar{\omega})| \sim \bar{\omega}$ 的关系曲线
Fig.3 Amplitudes of acceleration frequency responses for different $\beta \dot{y}$ under two-point control

由随机振动理论知 Ey^2 为

$$Ey^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H(\omega)|^2 S_o(\omega) d\omega \quad (4)$$

$S_o(\omega)$ 为输入功率谱密度函数,上式也可以用数值方法求出:

$$Ey^2 = \sum_{j=1}^N |H(\omega_j)|^2 S_o(\omega_j) \cdot \Delta\omega_j \quad (5)$$

计算结果表明,施加三点主动控制后,顶点和侧点的均方响应均明显降低,以响应均方根为例,顶点从无主控制时 $185.07\sqrt{S_0}$ 下降到 $60.96\sqrt{S_0}$,降低了 61.3%. 侧点从 $107.49\sqrt{S_0}$ 下降到 $49.86\sqrt{S_0}$,降低了 53.3%,说明主动控制是能明显降低结构随机激励的响应.

3 结 论

- a. 主控力选用不同的函数形式,对加速度频响应函数幅值影响程度不同,选用 $\alpha\ddot{y}$ 和 $\lambda\dot{y}$ 项作为主控力,只能使加速度频响应函数幅值的峰值发生轻微偏移,说明它只能控制窄带地面激励,而选用 $\beta\dot{y}$ 项作为主控力,则可明显降低加速度响应,是一种较为理想的主控力形式.
- b. 控制力最佳位置与要控制的振型有关.算例表明,若要控制第一振型,最佳位置在顶点,若要控制第二振型,控制力最佳位置在侧边中点附近.

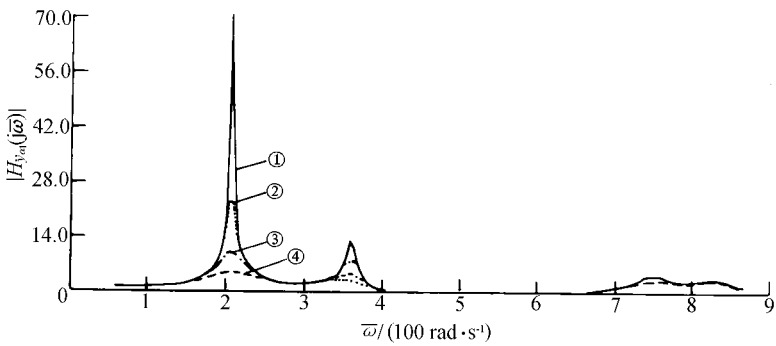


图 4 三点控制时 $|H_{yat}(j\omega)| \sim \omega$ 的关系曲线
Fig.4 Amplitudes of acceleration frequency responses for different $\beta\dot{y}$ under three-point control

参 考 文 献

1 Inaudi J A ,Kelly J M. Optimum damping in linear isolating systems. EESD ,1993 22 583 ~ 598
2 Kuo J S H. Joint opening nonlinear mechanism interface smeared crack model. Earthquake Engineering Research Center ,University of California ,Berkeley ,CAL ,1982.44 ~ 49

Vibration Control of Arch Structures

Du Chengbin Zhao Guangheng

(College of Civil Engineering ,Hohai Univ. ,Nanjing 210098)

Abstract The controlling technology is applied to vibration control of arch structures (AS) in this paper. Active control forces are expressed as linear functions of displacement ,velocity and acceleration by means of single position control and multi-position control. Acceleration frequency responses at the key location of the AS with variation of ground excitation frequencies in frequency domain are given. Influences of parameters of active control forces on acceleration responses are considered. Analyses of mean responses of the AS with active control devices excited by random excitations are presented. Results show that the amplitudes of acceleration responses can be reduced markedly by the active control forces expressed as linear function of velocity. Locations of control devices depend on the vibration mode shapes.

Key words arch structures ;vibration control ;acceleration frequency responses ;random excitations