

文章编号: 1000-7598-(2000)01-0040-05

土-结构动力相互作用影响的 TMD 控制研究

李海岭, 葛修润

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 对均质剪切梁—埋置刚性基础—粘弹性半空间模型应用子结构方法, 对垂直入射 SH 波, 导出了调频质量阻尼器(TMD)控制时结构反应的解析解。通过设置 TMD 将上行波完全吸收, 实现对结构的控制, 由此得到 TMD 参数的频率依赖性。进而选择确定的 TMD 参数, 控制相互作用体系的第一振型。通过算例, 对无控、全控和主控三种工况下的结构反应及控制效果进行了比较分析。

关键词: 土-结构动力相互作用(SSI), 调频质量阻尼器(TMD)控制

中图分类号: TU 435, TU 311 **文献标识码:** A

作者简介: 李海岭, 男, 27 岁, 博士生, 主要从事土-结构动力相互作用及结构振动控制等方面的研究。

Research on TMD control considering soil-structure interaction

Li Hailing, Ge Xiurun

(Institute of Rock and Soil Mechanics the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract In this paper, the structure is simulated as a uniform shear beam supported on a rigid foundation embedded in the soil represented by a uniform visco-elastic half space. The closed form structural responses are deduced using substructure method for seismic excitation represented by vertically incident SH waves. Control of structure is realized by setting TMD (Tuned Mass Damper) which makes the upward propagating waves absorbed at the top of the structure and no downward propagating waves reflected. Subsequently, the frequency-dependent character of the parameters of TMD is acquired. Furthermore, control of the first mode of the soil-structure system is realized by choosing the parameter of TMD. Structural responses and effectiveness of the control are compared and discussed for three working patterns named no control, completely control and first mode control.

Key Words soil-structure interaction, TMD control

1 前言

TMD(Tuned Mass Damper)作为被动控制的方式之一在土木工程中应用较为广泛。Grandal^[1]对 TMD 的减振机理进行了研究, Wirching^[2]用模态截断方法分析了白噪声基底输入的多自由度系统的 TMD 减振效果。欧进萍、王永富^[3]对于高层建筑采用 TMD 系统控制风振时的 TMD 系统参数取值进行了深入研究。林均岐、王云剑^[4]对于白噪声基底输入的单自由度系统采用 TMD 控制时的 TMD 参数进行了优化分析。

在对 TMD 控制的研究中, 研究者大都假定土-结构相互作用的影响可以忽略不计。然而, 实际结构的重量、刚度、跨度较大, 尤其当结构位于软土地基上时, 土与结构之间存在着较为强烈的相互作用。在地震荷载作用下, SSI 的影响主要表现为: (1) 基底入射地震波将由自由场输入变为散场输入; (2) 结构的动力特性发生改变; (3) 辐射阻尼将增加相互作用体系的阻尼特性。因此, SSI 将影响结构控制的效果。吴京宁、楼梦麟^[5]采用相互作用体系基频处的动力刚度系数, 对地震作用下 SSI 对多层剪切结构 TMD 控制的影响进行了分析。

将上部结构简化为具有埋置刚性基础的均质悬臂剪切梁, 地基取为均质、各向同性的粘弹性半空间, TMD 置于结构顶部。考虑垂直入射的 SH 波, 通过设置 TMD, 使得上行波由基础传至结构顶部时, 由 TMD 系统完全吸收, 无下行波向下反射, 实现对结构的控制。Wong 和 Luco^[6,7]等首次提出了这一方法, 并应用于主动控制研究中。我们进一步将这一方法应用于 TMD 被动控制中。通过推导, 得到上行波完全被 TMD 系统吸收——全控时 TMD 系统参数所满足的条件。由于考虑 SSI 影响, 地基动力阻抗是依频率而变的, 得到全控时 TMD 系统参数也是依频率而变的。而在实际控制中, TMD 参数难以实现随频率而变, 故进一步选择确定的 TMD 参数, 使相互作用体系在基频的共振反应得到控制——主控。最后给出算例, 对无控、全控和主控三种工况下的结构反应及控制效果进行了对比分析。

2 理论推导

具有埋置刚性基础的均质悬臂剪切梁上部设置 TMD 系统, 地基取为均质、各向同性的粘弹性半空间,

收稿日期: 1999-06-29.

如图 1 所示。 m_0, k_0, ν_0 分别为 TMD 系统的质量、弹簧刚度系数和复阻尼系数; m, k, ν 分别为上部结构单位长度的质量、剪切刚度和复阻尼系数。在圆频率为 ω 的稳态简谐地震波 $u_g(\omega)e^{i\omega t}$ 作用下, 各反应量均存在共同的时间因子 $e^{i\omega t}$ 。

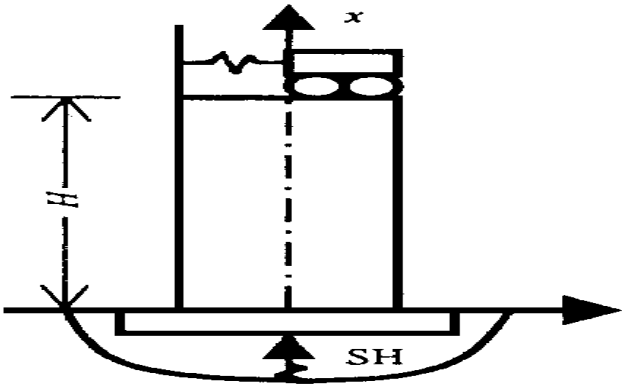


图 1 分析模型
Fig. 1 Description of analysis model

剪切梁式结构的运动方程为

$$u''(x) + (\omega/\bar{c})^2 u(x) = 0 \quad (0 < x < H) \quad (1)$$

式中 $\bar{c} = ce^{i\nu/2}$; $c = \sqrt{k/m}$ 为结构的剪切波速; H 为上部结构的高度; $u(x)$ 为上部结构的水平位移, 且

$$u(x) = u_b + x\theta_b + u_R(x) \quad (2)$$

式中 u_b 为基础顶面的水平位移; θ_b 为基础转动位移; $u_R(x)$ 为上部结构相对于基础顶面的水平位移。

TMD 系统的运动方程为

$$-\omega^2 m_0 u_0 + k_0[u_0 - u(H)] = 0 \quad (3)$$

式中 u_0 为 TMD 的绝对水平位移; $k_0 = ke^{i\nu_0}$ 。

方程(1)的解可表示为

$$u(x) = Ae^{-i\omega x/\bar{c}} + Be^{i\omega x/\bar{c}} \quad (4)$$

其中第一项表示上行波, 第二项表示下行波。其边界条件为

$$\left. \begin{aligned} u(0) &= u_b \\ k \frac{du_R(x)}{dx} \Big|_{x=H} &= q(H) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $q(H) = -\omega^2 m_0 u_0$ 为结构顶部剪力。

2.1 无 TMD 控制

$m_0 = 0$, 则 $q(H) = 0$ 。由边界条件可得

$$u(x) = \left[\cos(\bar{\alpha}x) + \tan \bar{\delta} \sin(\bar{\alpha}x) \right] u_b + \left[\frac{\bar{c}}{\omega L} \frac{\sin(\bar{\alpha}x)}{\cos \bar{\delta}} \right] (L\theta_b) \quad (6)$$

式中 $\bar{\delta} = \omega H/\bar{c}$; $\bar{\alpha} = x/H$ 。相应的基础顶面的剪力和弯矩分别为:

$$F_{b1} = \omega m \bar{c} (\tan \bar{\delta}) u_b + m \bar{c}^2 \frac{(1 - \cos \bar{\delta})}{\cos \bar{\delta}} \theta_b \quad (7)$$

$$M_{b1} = m \bar{c}^2 \frac{(1 - \cos \bar{\delta})}{\cos \bar{\delta}} u_b - m \bar{c}^2 \left[\frac{H}{L} \right] \left[1 - \frac{\tan \bar{\delta}}{\bar{\delta}} \right] (L\theta_b) \quad (8)$$

2.2 TMD 控制

由方程(3)可得 $u_0 = \frac{u(H)}{1 - (\omega/\omega_0)^2 e^{-i\nu_0}}$, 代入边界条件(5), 得到

$$\Delta_0 u(H) = u'(H) - \theta_b \quad (9)$$

由式(4), 式(5)中的 $u(0) = u_b$ 和式(9)可求得

$$u(x) = \left[\cos(\bar{\alpha}x) + \left(\frac{\Delta_0}{\Delta_1} \cos \bar{\delta} + \frac{\omega/\bar{c}}{\Delta_1} \sin \bar{\delta} \right) \sin(\bar{\alpha}x) \right] u_b + \frac{\sin(\bar{\alpha}x)}{\Delta_1} \theta_b \quad (10)$$

相应的基础顶面的剪力和弯矩分别为:

$$F_{b2} = \omega m \bar{c} (\tan \bar{\delta}) \alpha_{11} u_b + m \bar{c}^2 \frac{(1 - \cos \bar{\delta})}{\cos \bar{\delta}} \alpha_{12} \theta_b \quad (11)$$

$$M_{b2} = m \bar{c}^2 \frac{(1 - \cos \bar{\delta})}{\cos \bar{\delta}} \alpha_{21} u_b - m \bar{c}^2 \left[\frac{H}{L} \right] \left[1 - \frac{\tan \bar{\delta}}{\bar{\delta}} \right] \alpha_{22} (L\theta_b) \quad (12)$$

以上各式中 $\Delta_0 = \left[\frac{\pi^2}{4H} \left(\frac{m_0}{mH} \right) e^{i(\nu_0 - \nu)} \right]$

$$\alpha_{11} = \left[\frac{\frac{\omega_1}{\omega_0}}{1 + \frac{\bar{c}}{\omega} \Delta_0 \cot \bar{\delta}} \right]$$
$$\alpha_{12} = \alpha_{21} = \left[\frac{1 + \frac{\bar{c}}{\omega} \Delta_0 \frac{\sin \bar{\delta}}{1 - \cos \bar{\delta}}}{1 - \frac{\bar{c}}{\omega} \Delta_0 \tan \bar{\delta}} \right]$$
$$\alpha_{22} = \left[\frac{(1 + \Delta_0 H) - \frac{\Delta_0 H}{1 - \tan \bar{\delta}}}{1 - \frac{\bar{c}}{\omega} \Delta_0 \tan \bar{\delta}} \right]$$

$\omega_0^2 = \frac{k_0}{m_0}$; $\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1}$, $T_1 = \frac{4H}{c}$ 为上部结构基底固定的基本自振周期; $\Delta_1 = \frac{\omega}{c} \cos \bar{\delta} - \Delta_0 \sin \bar{\delta}$

当设置的 TMD 将上行波完全吸收而下行波向下反射时, 式(4)中的 $B = 0$, 由式(5)可得

$$u(x) = u_b e^{-i\omega x/\bar{c}} \quad (13)$$

把式(13)代入式(9), 可得到上行波被完全吸收时 TMD 系统的参数应满足的条件:

$$\Delta_0 = \left[-\frac{i\omega}{\bar{c}} - \frac{\theta_b}{u_b} e^{i\omega H/\bar{c}} \right] \quad (14)$$

相应的基础顶面的剪力和弯矩分别为:

$$F_{b3} = -i\omega m \bar{c} u_b - m \bar{c}^2 \theta_b \quad (15)$$

$$M_{b3} = -m \bar{c}^2 [1 - e^{-i\omega H/\bar{c}}] u_b - m \bar{c}^2 \left[\frac{H}{L} \right] (L\theta_b) \quad (16)$$

2.3 土-结构动力相互作用

刚性基础的运动方程(对于基础底面中心)为

$$-\omega^2 [M_b^0] \{U_b^0\} = \{F_b^0\} - \{F_s^0\} \quad (17)$$

式中 $\{U_b^0\} = (u_0, L\theta_0)^T$ 为基础底面中心 o 的广义位移向量, $\{F_b^0\} = (F_b^0, M_b^0/L)^T$ 和 $\{F_s^0\} = (F_s^0, M_s^0/L)^T$ 分别为结构和地基作用在基础上的广义力向量。广义质量矩阵由下式确定:

$$[M_b^0] = [A]^T \begin{bmatrix} m_F & 0 \\ 0 & I_F \end{bmatrix} [A] \quad (18)$$

式中 $[A] = \begin{bmatrix} I & h/(2L) \\ 0 & I \end{bmatrix}$; m_F, I_F 分别为基础的质量和对于质心的转动惯量; $h, 2L$ 分别为基础的埋深和宽度。

由方程(7), (8), (11), (12), (15), (16), 可得三种情况下结构作用在基础顶面的广义力向量 $\{F_b\} = (F_b, M_b/L)^T$ 和基础顶面广义位移向量 $\{U_b\} = (u_b, L\theta_b)^T$ 之间的关系:

$$\{F_b\} = -G_s L [K_b(\omega)] \{U_b\} \quad (19)$$

式中 $G_s = \rho_s c_s^2$, ρ_s, c_s 分别为土的密度和剪切波速。

将基础顶面和底面的广义力和广义位移之间的关系 $\{F_b^0\} = [A]^T \{F_b\}$, $\{U_b\} = [A] \{U_b^0\}$ 代入式(19), 得

$$\{F_b^0\} = -G_s L [K_b^0(\omega)] \{U_b^0\} \quad (20)$$

式中 $[K_b^0(\omega)] = [A]^T [K_b(\omega)] [A]$ 。

地基作用在基础底面中心处的广义力为

$$\{F_s^0\} = G_s L [K_s^0(\omega)] (\{U_b^0\} - \{U_0^*\}) \quad (21)$$

将方程式(20), (21)代入式(18)中, 整理得

$$\{U_b^0\} = ([I] + [K_s^0(\omega)]^{-1} ([K_b^0(\omega)] - a_0^2 [M_b^0] / (\rho_s L^3)))^{-1} \{U_0^*\} \quad (22)$$

其中 无量纲频率参数 $a_0 = \omega L / c_s$; $[K_s^0(\omega)]$ 为地基的动力刚度矩阵; $\{U_0^*\} = (u_0^*, L\theta_0^*)^T$ 为基础底面中心处地基土的散场运动, 它与自由场运动 $u_g(\omega)e^{i\omega t}$ 存在如下关系

$$\{U_0^*\} = [s(a_0), r(a_0)]^T u_g(\omega) \quad (23)$$

式中 $s(a_0), r(a_0)$ 为散射系数, 取值由无量纲频率参数 a_0 及基础特性决定。

由式(22)可得到基础底面广义位移 $\{U_b^0\}$, 进而可求得基础顶面广义位移 $\{U_b\}$ 及上部结构和 TMD 系统的位移和内力。

2.4 TMD 参数讨论

当 TMD 将上行波完全吸收时, 方程(14)给出了

TMD 系统的参数所应满足的条件。 Δ_0 中, $\mu = \frac{m_0}{mH}$ 为

TMD 的质量与上部结构的总质量之比; $\Omega = \frac{\omega_0}{\omega_1}$ 为

TMD 自振频率与上部结构基频之比。由式(14)可知, 当上部结构、基础和地基参数取定后, 选定质量比 μ 和阻尼系数 ω , 则频率比 Ω 随入射地震波的频率变化, 即刚度比随频率变化, 反之亦然。刚度比表达式为

$$\lambda = \frac{k_0}{k/H} = \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{m_0}{mH} \right) \left(\frac{\omega_0}{\omega_1} \right)^2 \quad (24)$$

对于实际控制中, TMD 参数随地震波频率改变是难以实现的。故应选择固定的 TMD 参数, 而得到较为满意的控制效果。在地震作用下, 结构反应的第一振型起主导作用, 因此, 应选择 TMD 参数, 控制结构反应的第一振型。

选定 μ, ω_0 , 可得到 $\lambda = f(\omega)$, 即可选择结构 - 基础体系的基频 ω_1^* 所对应的刚度比 λ^* 。关于 ω_1^* 的计算, 有近似公式见文献[8]。

$$\omega_1^* = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{\omega_1} \right)^2 + \frac{M(k_{MM} + h_f^2 k_{HH} - 2h_f k_{HM})}{k_{HH} k_{MM} - k_{HM}^2}}} \quad (25)$$

式中 $M = m_F + mH$; $h_f^2 = (I_F + mH^3/3)/ML^2$; k_{HH}, k_{MM}, k_{HM} 为埋置基础水平、旋转及两者耦合运动的动力刚度。

3 算 例

某 10 层框架结构总高为 37.5 m, 基础外部尺寸为 $2L \times 2L \times h$ 。上部结构和基础的有关参数列于表 1。地基土取为均质的粘弹性半空间, 泊松比 $\nu_s = 1/3$, P 波和 S 波的波速之比为 $\alpha_s/\beta_s = 2$, 对于 P 波和 S 波的阻尼比分别为 $\zeta_\alpha = 0.0005$, $\zeta_\beta = 0.001$ 。散射系数和地基的动力刚度可参阅文献[9]。取地基土与上部结构剪切波速比值 $c_s/c = 1, 2, 10$ 分别相应于软土地基到岩基的三种情况。

表 1 结构和基础参数

Table 1 Parameters of super-structure and foundation

参数名称	参数符号	参数值
结构基本周期	T_1 / s	1.0
结构复阻尼系数	ν	0.04
结构剪切波速	$c / m \cdot s^{-1}$	150.0
结构质量比	$mH / \rho_s L^2 H$	1.0
基础宽度	$2L / m$	20.0
基础质量比	$m_F / \rho_s L^3$	0.70
基础转动惯量比	$I_F / \rho_s L^5$	0.35
基础埋深比	h / L	0.50

图 2 给出了当 $\nu_0 = 0.1$, $c_s/c = 1$ 时, 刚度比 λ 对于选定的质量比 μ 随地震波频率变化的情况。图 2 表

明, 给定 μ 后, λ 随入射波频率增加而增大; 入射波频率确定时, λ 与 μ 成正比。由式(9) 知, 使结构全控时, TMD 系统施加给结构的剪力是一定的, 选择小的 μ 和相应的 λ 时, 意味大的 TMD 系统的位移、加速度反应。因此, 应根据 TMD 反应的限定值确定 μ 和相应的 λ 。

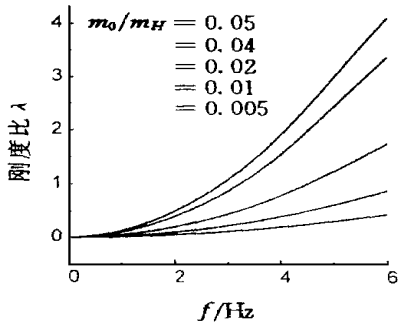


图 2 λ 与入射地震波频率关系曲线

Fig. 2 Relation curves between λ and frequency of seismic wave

由公式(25)计算得 $c_s/c = 1, 2, 10$ 相应的土 - 结构体系的基本圆频率为 $\omega_1^* = 5.28, 5.98, 6.25$ 。对应的频率 $f = 0.84, 0.95, 0.99$ Hz。

图 3 给出了 $v_0 = 0.1, \mu = 0.05$ 的无量纲化结构顶端位移 $u(H)$ 的幅值。全控时, $u(H)$ 在整个频段都大幅度降低, 共振完全消除。主控时, $u(H)$ 在相互作用体系第一共振峰值大幅降低, 而在其他频段无控制作用, 当地基土软弱($c_s/c = 1$) 时, 结构 - 基础体系的基频 ω_1^* 附近出现新的共振峰值。定义减振效率为控制后共振峰值与无控时相互作用体系第一共振峰值之比。随 c_s/c 增大, 主控、全控的减振效率增加, 故相互作用降低了 TMD 的减振效率。

图 4 给出了无量纲化的基础顶面处剪力和弯矩幅值, 与图 3 有类似的特性。

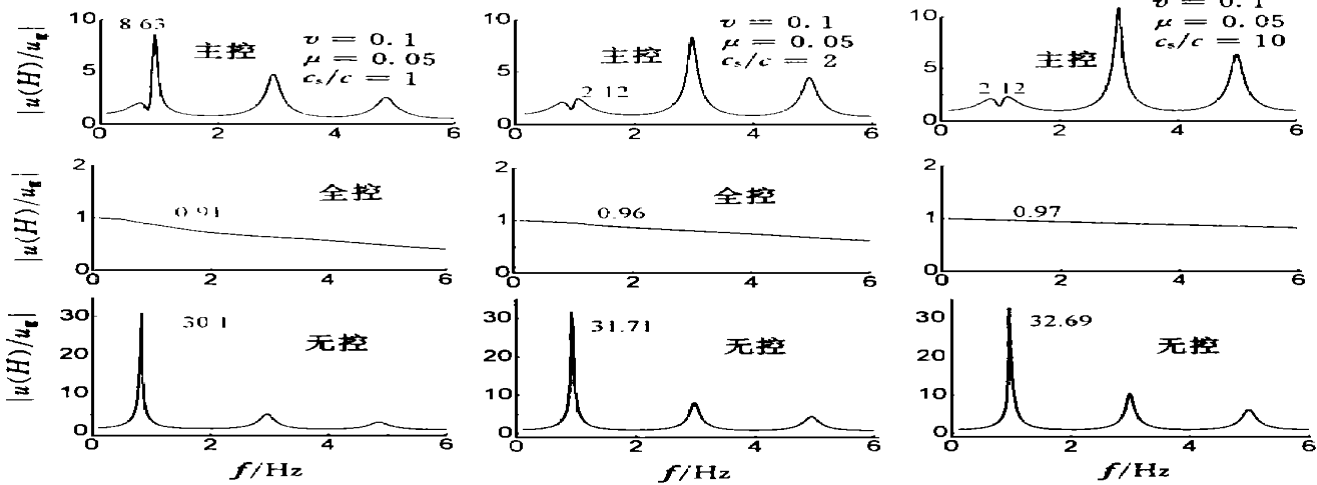


图 3 无量纲化结构顶端位移 $u(H)$ 的幅值

Fig. 3 Normalized amplitudes of top transition $|u(H)/u_g|$

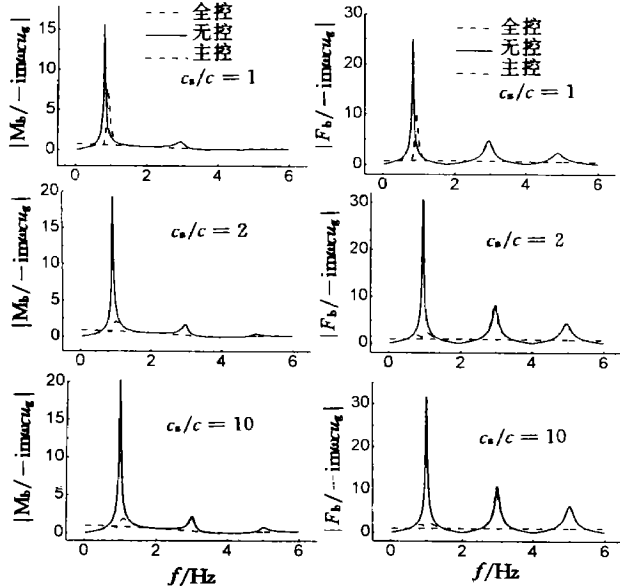


图 4 无量纲化的基础顶面处剪力和弯矩的幅值

Fig. 4 Normalized amplitudes of base shear force

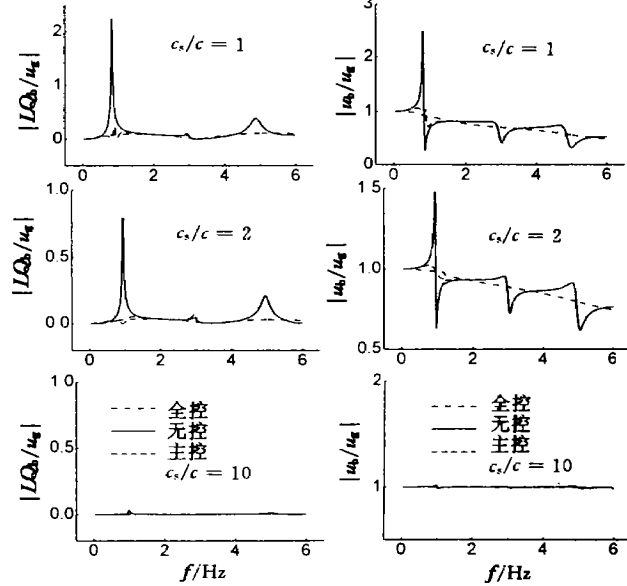


图 5 无量纲化的基础平移和转动的幅值

Fig. 5 Normalized amplitudes of base transition

$|F_b/-i\omega m u_g|$ and overturning moment $|M_b/-i\omega m u_g H|$ $|u_B/u_g|$ and base rotation $|L\theta_B/u_g|$

图 5 表示无量纲化的基础平动和转动的幅值, 主控和全控有效地控制基础的惯性相互作用运动 u_b 和 $L\theta_b$ 。图 6 为结构-基础体系在基频 ω_1^* 处, 无量纲化的上部结构剪力和位移幅值沿结构高度的分布, 图 6 表明主控和全控与无控相比降低明显。从以上分析可以得到如下结论。

(1) TMD 全控时, 能够在整个频段内有效地减小基础的惯性相互作用运动 u_b 和 $L\theta_b$, 从而控制结构的反应(位移、剪切等)。

(2) TMD 主控时, 能够在基础-结构体系基频附近频段较好地控制结构的反应。

(3) 当地基土软弱时, SSI 效应增强, TMD 主控将

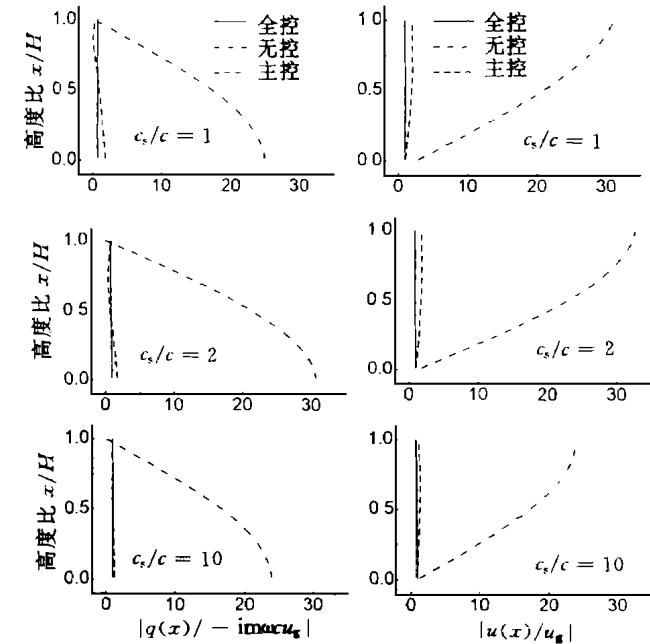


图 6 ω_1^* 处无量纲化的结构剪力和位移幅值沿高度的分布

Fig. 6 Normalized amplitudes of longitudinal distribution of shear force $|q(x)/-i\omega m c u_g|$ and displacement $|u(x)/u_g|$ of structure

产生新的共振峰值, 对于主控和全控, TMD 的控制效率都有所降低。

4 结 语

文中对于考虑 SSI 效应的 TMD 控制进行了分析, 得到了 SSI 影响下 TMD 控制的结构反应的解析解, 并给出了 TMD 参数的确定方法。

算例表明, 通过选取适当的 TMD 参数, 结构反应能够得到良好的控制。SSI 降低 TMD 控制的效率。

参 考 文 献

- 1 克兰德尔 S H. 随机振动[M]. 北京: 科学出版社, 1980. 114 ~ 116.
- 2 Wirching P H. Minimizing structural response under random excitation using the vibration absorbers [J]. *EESD*, 1974, 2(2): 303 ~ 312.
- 3 欧进萍, 王永富. 设置 TMD、TLD 控制系统的高层建筑风振分析与方法 [J]. *地震工程与工程振动*, 1994, 14(2): 61 ~ 74.
- 4 林均歧, 王云剑. 调谐质量阻尼器的优化设计 [J]. *地震工程与工程振动*, 1996, 16(1): 116 ~ 121.
- 5 吴京宁, 楼梦麟. 土-结构相互作用对高层建筑 TMD 控制的影响 [J]. *同济大学学报*, 1997, 25(5): 515 ~ 520.
- 6 Luco J E, Wong H L, Mita A. Active control of the seismic response of structures by combined use of base isolation and absorbing boundaries [J]. *EESD*, 1992 (21): 525 ~ 541.
- 7 Wong H L, Luco J E. Structural control including soil-structure interaction effects [J]. *J. of Engrg. Mech., ASCE*, 1991, 117 (10): 2 237 ~ 2 250.
- 8 陈 锋. 土壤-结构相互作用体系基频的近似计算 [J]. *上海力学*, 1982, 3(2): 89 ~ 94.
- 9 Mita A, Luco J E. Impedance functions and input motion for imbedded square foundations [J]. *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 1989, 115(4): 491 ~ 503.