

考虑土与结构相互作用效应的 TMD 减震特性研究*

陈国兴 宰金珉 杨 栋

丁大钧

(南京建筑工程学院岩土工程研究所, 210009)

(东南大学土木系, 南京, 210096)

文 摘 将土体- 框架结构简化为二维问题, 地基土视为粘弹性材料, 框架结构简化为平面杆系非弹性结构。以一幢实际的六层二跨框架结构为研究对象, 探讨了 TMD(调谐质量阻尼器) 的减震特性及土- 结构相互作用(SSI)效应对 TMD 减震效果的影响。在一般地基条件下, SSI 效应显著降低多层框架结构在地震时的层间位移反应, 降低幅度达 10% ~ 50%。当 TMD 的振动周期与被控制(土体与)结构体系的基本周期一致时, TMD 才能发挥最佳的减震效果; 否则, TMD 的减震效果将有不同程度的降低, 幅度可达 5% ~ 10%。在软土地基条件下 TMD 的减震效果很差。若抗震设计时顾及客观存在的 SSI 效应的影响, 则按刚性地基假定下设置的 TMD 设施有时可能是不必要的。

关键词 结构抗震控制, 土- 结构相互作用, 多层框架结构, 非线性反应, 时域分析。

1 前 言

现有研究主要是建立在刚性地基假定之上的, 即上部结构的底部是和刚性地基固定连接的。这种假设虽然使得实际问题大大简化, 并得到了一些有用的结论; 但忽略了地基土的柔性以及客观存在的土与结构之间的相互作用(SSI)对上部结构地震反应的影响, 以致于建筑结构的实际地震反应的大小与特征和刚性地基假定下得到的结果有时会有较大差别^[1~3]。因此, 用刚性地基假定得到的结论指导结构抗震控制设计具有一定的局限性, 有时会达不到预期的目的。

本文在考虑非弹性结构和实际结构动态特性的真实模拟的前提下, 以一幢实际的六层二跨框架结构为例, 探讨考虑 SSI 效应时 TMD 的减震特性。

2 TMD 减震机理分析

假设被控制结构简化为一单自由度 M, K 体系, TMD 系统为另一单自由度 m, k 体系, 则 TMD 的减震机理可用图 1 所示简图来分析。设 TMD 和结构的固有(圆)频率分别为 ω_k, ω_K , 则 $\omega_k^2 = k/m, \omega_K^2 = K/M$, 那么带 TMD 的耦合系统的固有频率为

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \omega_K^2 [1 + \alpha + \alpha/\beta \mp \sqrt{(1 + \alpha - \alpha/\beta)^2 + 4\alpha^2/\beta}] \quad (1)$$

其中 $\alpha = k/K$, 称为刚度比; $\beta = m/M$, 称为质量比。如果 $\omega_k \geq \omega_K$, 则有

$$\omega_2 > \omega_k \geq \omega_K > \omega_1 \quad (2)$$

振型 1: $Y_m = 1, \quad 0 < Y_M = \frac{\alpha}{1 + \alpha - \delta_1^2} < 1 \quad (3)$

* 江苏省教委“青蓝工程”跨世纪学术带头人培养基金资助项目。

振型 2:
$$Y_m = 1, \quad Y_M = \frac{\alpha}{1 + \alpha - \delta_2^2} < -1 \quad (4)$$

其中 $\delta_{1,2} = \omega_{1,2} / \omega_k$ 称为频率比。显然, $\delta_1 < 1, \delta_2 > 1$ 。

从上述可知, 由于在结构顶上设置 TMD 系统, 带 TMD 耦合系统的动力特性与原结构的动力特性有所不同, 耦合系统的动力特性与刚度比 α , 质量比 β 及原结构的动力特性 ω_k 有关。因此, 对于特定的地震输入, 必然存在一定范围内的 α, β, ω_k , 使得耦合系统的地震反应小于原结构的地震反应, 起到减震的效果。对于不同的地震输入, 能起到减震效果的 α, β, ω_k 的变化范围显然亦是不一样的。由此可见, TMD 是通过在结构顶上设置一个相对较小的质量-弹簧-阻尼器体系, 使原结构体系的动力特性发生改变, 从而达到减震目的。显然, 如将地基土-被控制结构作为一个新的单自由度 M', K' 体系, 无疑, 上述 α, β 和 ω_k 均不同于不考虑地基土的情况, 结构的地震反应亦自然与不考虑地基土情况下有所不同。

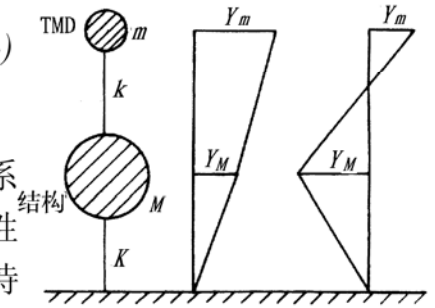


图 1 TMD 减震机理分析简图

下面来考察 SSI 效应对 TMD 减震效果影响的机理。对于刚性地基假设, 带 TMD 的结构在地震作用下的运动方程可表为

$$[M_{ss}^c]\{\ddot{x}_{ss}\} + [C_{ss}^c]\{\dot{x}_{ss}\} + [K_{ss}^c]\{x_{ss}\} = -\{E_{ss}^c\}a(t) \quad (5)$$

式中 $a(t)$ 为水平向输入地震动加速度时程。考虑 SSI 效应的带 TMD 设施的地基土-结构体系在地震作用下的运动方程可表为

$$\begin{bmatrix} M_{ss}^c \\ M_{ff} \\ M_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{ss} \\ \ddot{x}_{ff} \\ \ddot{x}_{gg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss}^c & C_{sf}^c \\ C_{fs}^c & C_{ff}^c \\ C_{gf}^c & C_{gg}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{ss} \\ \dot{x}_{ff} \\ \dot{x}_{gg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss}^c & K_{sf}^c \\ K_{fs}^c & K_{ff}^c \\ K_{gf}^c & K_{gg}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ss} \\ x_{ff} \\ x_{gg} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} E_{ss}^c \\ E_{ff}^c \\ E_{gg}^c \end{bmatrix} a(t) \quad (6)$$

式中 下标 s, f, g 分别表示上部结构、基础和地基土, sf 或 fs, fg 或 gf 分别表示结构与基础、基础与地基的界面。由式(6)可得

$$[M_{ss}^c]\{\ddot{x}_{ss}\} + [C_{ss}^c]\{\dot{x}_{ss}\} + [K_{ss}^c]\{x_{ss}\} = -\{E_{ss}^c\}a(t) - [C_{sf}^c]\{\dot{x}_{ff}\} - [K_{sf}^c]\{x_{ff}\} = -\{E_{ss}^c\}a(t) + \{P_{sf}(t)\} \quad (7)$$

比较式(5)与式(7)可知, 考虑 SSI 效应相当于在结构与基础界面上施加附加的动作用力 $\{P_{sf}(t)\}$, 从而使得结构的动力反应大小与性质和刚性地基假定下得到的结果有所不同。显然, $\{P_{sf}(t)\}$ 的大小与特性除了与输入地震动有关外, 还与地基土的动力性能、土层厚度与分布、上部结构和基础的动力特性有关。因此, SSI 效应对 TMD 减震效果的影响有两层含义, 一是常规意义上的动力 SSI 效应, 即 SSI 效应使结构的地震反应与刚性地基假定下的结构地震反应有所不同(此时不带 TMD); 二是由于 SSI 效应使土体-结构体系的动力特性不同于刚性地基假定下的结构动力特性, 从而导致能使刚性地基上建筑结构减震效果最佳的 TMD 系统, 在一般土质条件下并不能发挥很好的减震作用。

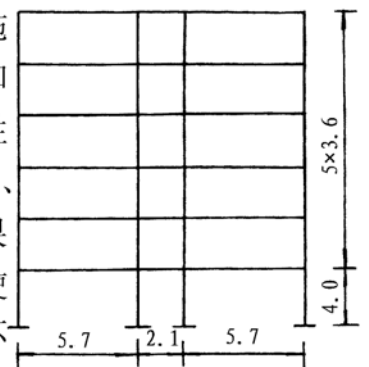


图 2 框架结构简图 (单位: m)

3 考虑 SSI 效应的 TMD 减震分析模型与计算方法

地基土-建筑结构体系简化为二维问题。假设 TMD 设置于建筑结构顶部。地基土视为平面应变问题, 并视为粘弹性材料, 土体的侧向人工边界取为简单边界, 土体的假想基岩面取

为固定边界; 建筑结构简化为平面杆系结构, 每根杆件视为若干段具有不同刚度的小段组成的变刚度梁单元^[4], 钢筋砼构件的截面恢复力模型为三折线模型^[2]。考虑 SSI 效应的带 TMD 设施的地基土- 建筑结构体系的动力方程式如式(6)所示, 可采用 Newmark- β 法求解^[5]。

4 数值分析与讨论

以一幢实际的六层二跨框架结构为研究对象, 结构简图如图 2 所示, 梁和柱的截面尺寸、配筋和砼强度等级详见文献[2]附表。地基土的软硬以剪切波速 V_s 表示。对中硬土取 $V_s =$

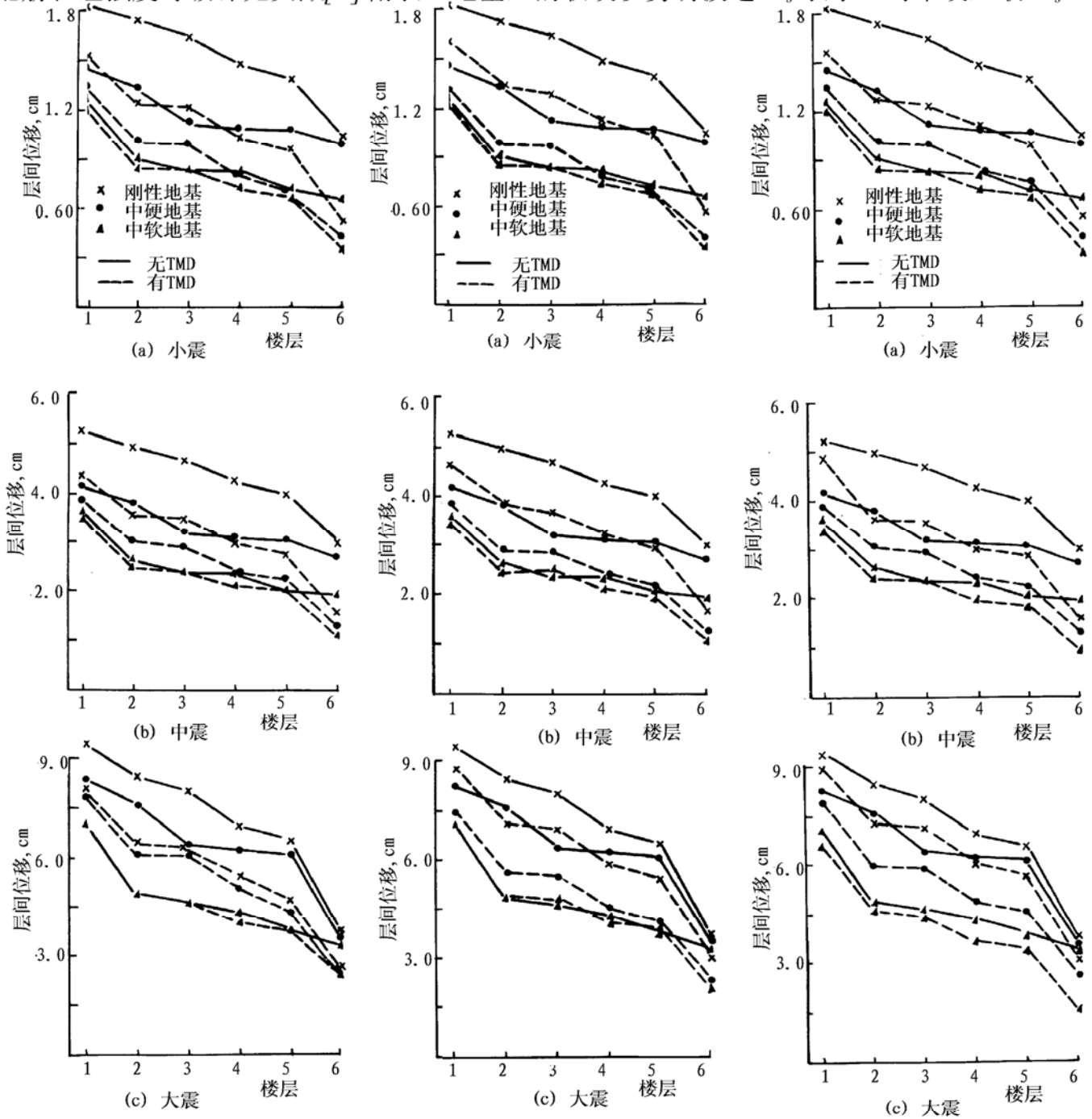


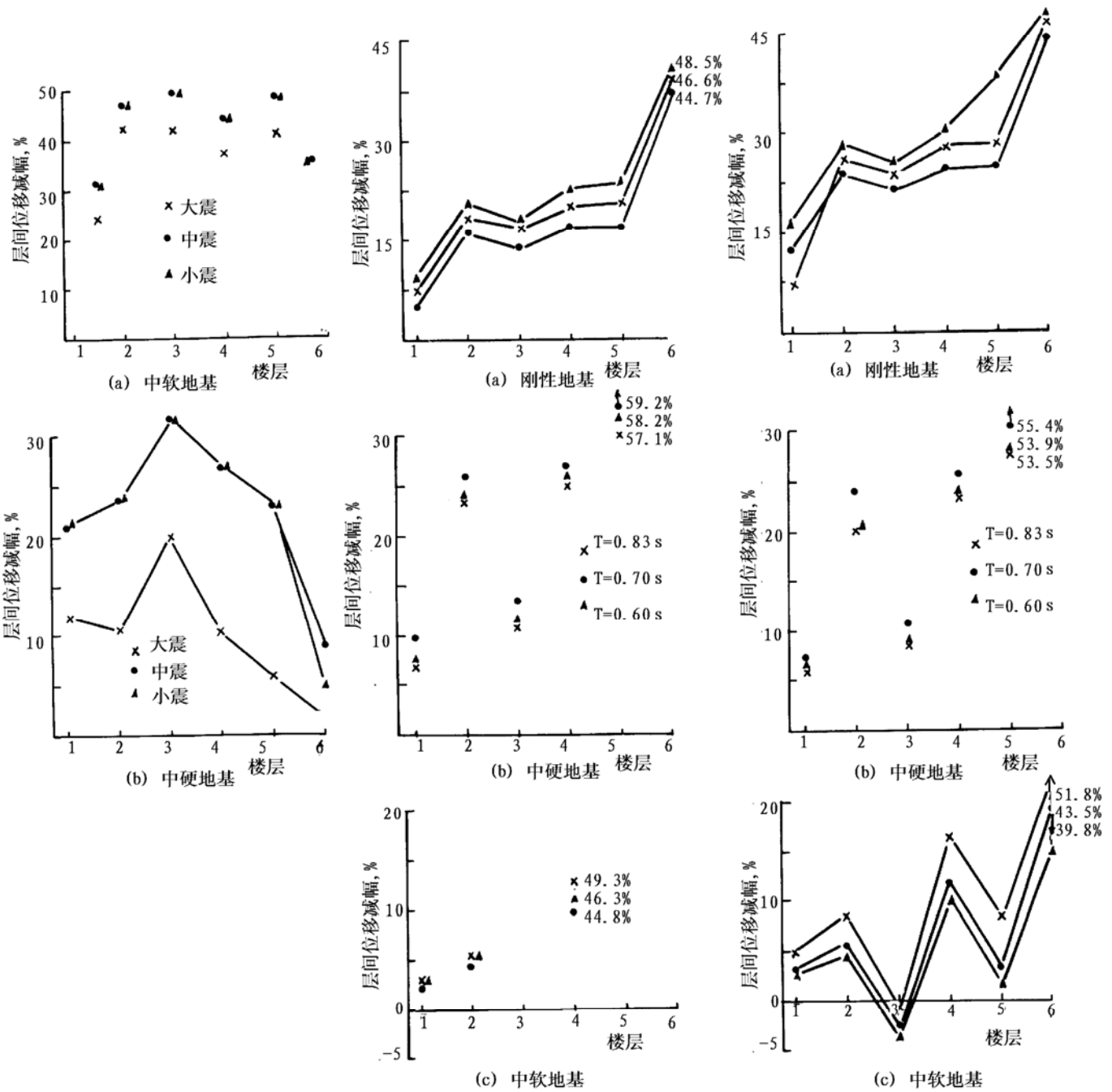
图3 TMD的振动周期与建筑结构基本周期一致时的层间位移($T = 0.60s$)

图4 TMD的振动周期与中硬土-结构体系基本周期一致时的层间位移($T = 0.70s$)

图5 TMD的振动周期与中软土-结构体系基本周期一致时的层间位移($T = 0.83s$)

$160H^{0.30}$ m/s, 对中软土取 $V_s = 120H^{0.30}$ m/s, H 为土层深度(m)。土层的假想基岩面离地表 40m, 土层的侧向人工边界离结构边缘 4 倍于结构宽度处, 土的阻尼比取为 5%。土的动力非线性效应本质上是使土体变得更软。因此, 通过改变地基土的软硬条件也可间接地起到考虑土的非线性性能的作用。

输入地震动采用 El-Centro 地震加速度记录, 考虑小震、中震和大震三种情况, 相应的最大峰值取为 70cm/s^2 , 200cm/s^2 和 400cm/s^2 。对刚性地基条件, 只须按比例调整实际地震波的幅值即可作为输入地震; 对考虑 SSI 效应的情况, 由于小震、中震和大震是以基础质心的加速度峰值大小来定义的, 而该点的地震运动加速度值在对该 SSI 体系作数值分析前是未知的。为此, 需多次调整基岩输入地震波的幅值, 通过试算才能确定。这样定义的目的是为便于与刚性地基假设的情况相比较。



6 无 TMD 时 SSI 效应对建筑结构地震反应的影响

图 7 小震时 TMD 的振动周期 T 对建筑结构减震效果的影响

图 8 中震时 TMD 的振动周期 T 对建筑结构减震效果的影响

层间位移大小是反映建筑结构在地震时的安全可靠性的主要指标,因而,SSI效应的大小可用层间位移大小的变化幅度来度量。当无TMD设施时,层间位移减幅可定义为

$$[(D_{nssi} - D_{ssi}) / D_{nssi}] \times 100\%$$

其中 D_{nssi} 是刚性地基条件下建筑结构的层间位移峰值; D_{ssi} 是一般地基条件、考虑 SSI 效应时建筑结构的层间位移峰值。按小震、中震和大震,刚性地基、中硬地基和中软地基,共 9 种组合情况进行了地震反应计算,各楼层的层间位移峰值如图 3~ 图 5 所示(实线),图 6 为层间位移减幅。从中可见,SSI 效应显著降低多层框架结构的层间位移反应,在中硬地基上可降低 10%~30%,中软地基上可降低 25%~50%,亦即地基越软,层间位移减幅越大,即 SSI 效应越显著。当有 TMD 设施时,层间位移减幅可定义为

$$[(D_{ncon} - D_{con}) / D_{ncon}] \times 100\%$$

其中 D_{ncon} , D_{con} 分别为无 TMD 和有 TMD 设施时建筑结构的层间位移峰值,且 D_{ncon} 与 D_{con} 或同为刚性地基下,或同为一般地基下的建筑结构层间位移峰值。考虑小震、中震和大震,刚性地基、中硬地基和中软地基,以及 TMD 的振动周期 $T = 0.60s$, $0.70s$ 和 $0.83s$,共 27 种组合情况,进行地震反应计算。 $T = 0.60s$ 相当于 TMD 的固有周期与刚性地基假定下建筑结构的基周期一致; $T = 0.70s$ 相当于与中硬地基—建筑结构体系的基本周期一致; $T = 0.83s$ 相当于与中软地基—建筑结构体系的基本周期一致。TMD 的质量不变,取为建筑结构质量的 1.5%,亦即需调整 TMD 的周期时,不改变 TMD 质量,仅改变 TMD 的刚度来实现。27 种情况的层间位移如图 3~ 图 5 所示(虚线)。以无 TMD 时的 9 种情况作为对比,得到的层间位移减幅如图 7~ 图 9 所示。由此可见

(1) 由于 TMD 设置于顶层,顶层层间位移减幅最明显,即减震效果最好。

(2) 在刚性地基条件下(坚硬土地基可近似作为刚性地基),当 TMD 的振动周期与建筑结构的基本周期一致时($T = 0.60s$)时,TMD 的减震效果最佳。与 TMD 的周期 $T = 0.60s$ 时的减震效果相比较,TMD 的周期 $T = 0.70s$ 时,小震时层间位移减幅降低 3.9%~6.1%,平均为 4.9%;中震时减震幅度降低 4.0%~6.5%,平均为 5.0%;大震时减震幅度降低 6.5%~12.3%,平均为 9.0%;TMD 的周期 $T = 0.83s$ 时,小震时的减震幅度降低 1.2%~2.9%,平均为 2.1%;中震时除底层减震幅度减小达 9.7%外,其余各层减震幅度减少 1.7%~3.0%;大震时减震幅度降低达 8.8%~15.7%,平均为 11.7%。

(3) 对于一般地基条件,如按刚性地基条件设计 TMD 的振动周期,使之与建筑结构的基本周期一致,则由于 SSI 效应的客观存在,会使 TMD 达不到预期的减震效果。反之,使 TMD 的振动周期与土体—建筑结构体系的基本周期一致,则可使 TMD 发挥较好的效果。对于软弱地基条件,按刚性地基假设设计 TMD 系统,则在强震作用时 TMD 有可能根本不能起减震作用。

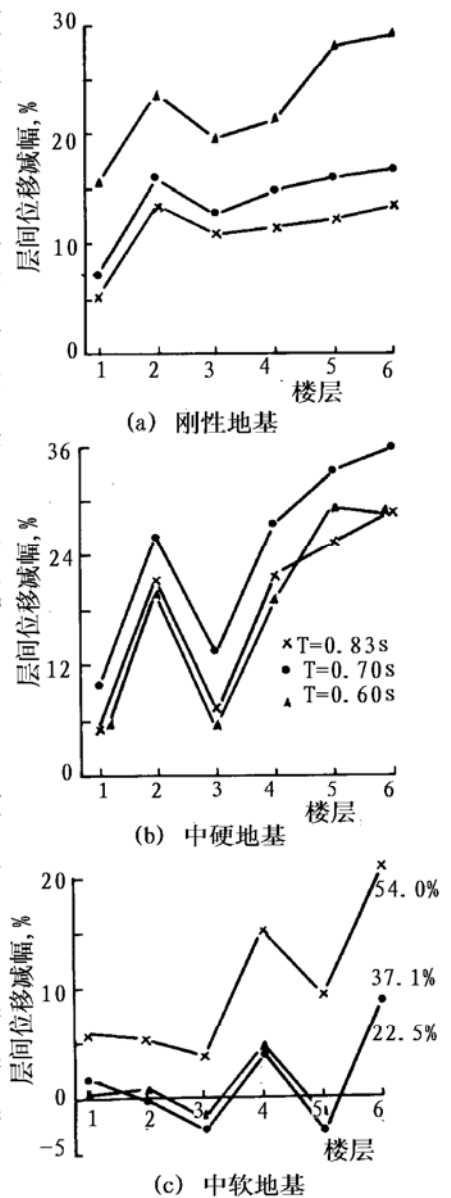


图 9 大震时 TMD 的振动周期 T 对建筑结构减震效果的影响

5 结 语

(1) 由于结构控制的目的是将结构地震反应控制在安全、舒适的范围内, 而 SSI 效应显著降低多层框架结构的地震层间位移反应, 因此, 若在结构抗震设计中计及 SSI 效应的影响, 则按刚性地基假定对结构采取的减震措施, 在软弱地基条件下这种减震措施可能并非需要。

(2) 由于 SSI 效应改变了土体—结构体系动力特性, 按刚性地基假定设计的 TMD 系统在一般地基条件下达不到预期的减震效果, 因此, 应根据实际地基条件设计 TMD 的动力特性。

(3) 当 TMD 的振动周期与(土体和)结构体系的基本周期一致时减震效果最佳。

本文仅对特定结构、特定的输入地震波进行了分析比较, 且地基条件亦考虑得较简单, 尚有不少因素未予考虑, 上述结论仅是初步的、定性的, 是否具有—般性, 尚需进一步研究。

参 考 文 献

- 1 杨 栋, 陈国兴, 宰金珉. 主次结构减震特性研究. 地震工程与工程振动, 1996(1), 100~ 109.
- 2 杨 栋, 陈国兴, 宰金珉. SSI 效应对人工塑性铰抗震性能影响的研究. 南京建筑工程学院学报, 1997(2), 15~ 22.
- 3 宰金珉, 陈国兴, 杨 栋等. 考虑土与结构相互作用效应的非弹性结构主动抗震控制研究. 地震工程与工程振动, 1997(4).
- 4 杨 栋, 丁大钧, 曹双寅. 新型人工塑性铰性能对框架结构抗震影响的研究. 建筑结构, 1994(4), 11~ 15.
- 5 陈国兴, 谢君斐, 张克绪. 考虑地基土液化影响的桩基高层建筑体系地震反应分析. 地震工程与工程振动, 1995(4), 93~ 103.

TMD Shock Absorbing Characteristics Considering Soil- Structure Interaction Effects

Chen Guoxing Zai Jinmin Yang Dong

(Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, Nanjing 210009)

Ding Dajun

(Southeast University, Nanjing, 210018)

Abstract Taking a real six-storey two-span frame building for example, the soil-frame structure system is simplified as two-dimensional question. Soils are regarded as viscoelastic material, and frame structure is regarded as a nonelastic plane structure of bar system being composed of variable stiffness beam elements. The shock absorbing characteristics of tuned mass damper (TMD) and the effect of the soil-structure interaction (SSI) on the shock absorbing efficiency (SAE) are discussed in detail. In the condition of midsoft to midhard ground the effect of SSI can obviously reduce the storey displacement in range of 10% to 50% for multistorey framed building during earthquake. The SAE of TMD is best only when the vibration period of TMD is equation to the basic periods of (soils and) structure system being control, if not, the SAE of TMD will be reduced in range of 5% to 10%. On the soft ground condition the SAE of TMD almost lost due to SSI effects. It can be not necessary in some condition that TMD is adopted in structure designed by the assumption of rigid ground if the SSI effects are considered in the seismic design.

Keywords aseismic structural control, soil-structure interaction, multistorey frame structure, nonlinear response, Time domain analysis.