

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.03.019

# 考虑土-结构相互作用效应的高层结构振动控制研究

潘己春<sup>1</sup>, 汪 权<sup>1,2</sup>, 任伟男<sup>1</sup>, 甘嘉辰<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程防灾减灾安徽省工程技术研究中心, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:**针对土-结构相互作用(soil-structure interaction, SSI)效应在高层结构振动控制中产生的影响,文章以 20 层钢结构 Benchmark 模型为基础结构,用 ANSYS 软件分别建立刚性地基体系和 SSI 体系的有限元模型,并采用黏弹性边界模拟 SSI 体系下土体的半无限性。在保证刚性地基体系和 SSI 体系下主结构接收的地震波强度一致后,研究 2 种体系在无控和 2 种多重调谐质量阻尼器(multiple tuned mass dampers, MTMD)控制下,上部结构的动力响应。结果表明:由于土体的影响,结构的楼层最大水平加速度、最大层间位移和底层中柱的最大剪力较刚性地基下都有一定幅度的减小;刚性地基体系下,结构在以刚性地基模型为基础设计的 MTMD1 控制下,位移和剪力都得到一定程度的减小,但部分楼层加速度较无控状态出现增大现象,控制效果不稳定;SSI 体系下,结构在以无质量地基模型为基础设计的 MTMD2 控制下,加速度、位移和剪力都得到一定程度的减小,未出现增大现象;MTMD2 对比 MTMD1 有着更稳定的控制效果。

**关键词:**土-结构相互作用;黏弹性边界;多重调谐质量阻尼器;振动控制

**中图分类号:**O328;TU973.212 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)03-0405-06

## Study on vibration control of high-rise structure considering soil-structure interaction effect

PAN Yichun<sup>1</sup>, WANG Quan<sup>1,2</sup>, REN Weinan<sup>1</sup>, GAN Jiachen<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Civil Engineering Research Center for Disaster Prevention and Mitigation, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Aiming at the influence of soil-structure interaction (SSI) on vibration control of high-rise structures, the finite element models of rigid foundation system and SSI system were established by ANSYS based on Benchmark model of 20-story steel structure, and the semi-infinity of soil under SSI system was simulated by viscoelastic boundary. After ensuring that the intensity of seismic waves received by the main structure under rigid foundation system and SSI system was consistent, the dynamic responses of the superstructure of the two systems under the uncontrolled state and the control of two kinds of multiple tuned mass dampers (MTMD) were studied. The results show that due to the influence of soil, the maximum horizontal acceleration of the floor, the maximum inter-story displacement and the maximum shear force of the bottom column of the structure are reduced to a certain extent compared with those under rigid foundation. Under the rigid foundation system, the displacement and shear force of the structure are reduced to a certain extent under the control of MTMD1 designed on the basis of rigid foundation model, but the acceleration of some floors increases compared with that under uncontrolled state, and the control effect is unstable. Under SSI system, the acceleration, displacement and shear force of the structure are reduced to a certain extent under the control of MTMD2 designed based on the massless foundation model, with no increase observed. Compared with MTMD1, MTMD2 has more stable control effect.

**Key words:** soil-structure interaction (SSI); viscoelastic boundary; multiple tuned mass dampers (MTMD); vi-

收稿日期:2023-09-20;修回日期:2023-11-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878234)

作者简介:潘己春(1996—),男,安徽六安人,合肥工业大学硕士生;

汪 权(1981—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:wqhut@163.com.

bration control

目前,学者们在进行高层结构的抗震研究时多数基于刚性地基假设进行的,然而在现实中,由于振动能量通过下垫土传递给基础,导致基础与支撑土相互作用,构成土-结构相互作用(soil-structure interaction,SSI)体系,而不是刚性基础体系。事实上,地震作用下地基与结构之间的相互作用已被证实不可忽视。

文献[1]提出了竖向荷载作用下土-结构相互作用的模型,并对其力学机理进行了研究。近年来,关于土-结构相互作用的研究也在不断发展,文献[2]通过建立土-结构相互作用的简化模型,对一框架结构进行 Pushover 及动力时程分析,结果表明土-结构相互作用会增大结构的顶点位移;文献[3]研究发现土-结构相互作用会降低框架结构的自振频率,且结构的频率会随着土层刚度下降而下降。

研究土-结构相互作用主要包括:① 采用弹簧-阻尼系统模拟土体;② 建立土-结构相互作用的直接有限元模型。在直接有限元模型中,模拟土体的无限性及进行地震动输入是研究的关键问题。截取一定范围的土体介质,设置人工边界,模拟土体的辐射阻尼、吸收外形波,在计算区域内不发生发射<sup>[4]</sup>,是建立直接模型的主要方法。黏弹性人工边界<sup>[5]</sup>作为一种应力性边界,在有限元软件中添加方便,且计算精度高,现已被广泛应用<sup>[6-7]</sup>。伴随黏弹性边界,波动输入法<sup>[5]</sup>作为地震动输入方式也随之被提出,通过将离散的地震动加速度数据转换成等效节点力荷载输入到边界节点上,可以实现直接有限元模型的地震动输入,且具有很高的精度。

调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)作为一种常用的被动控制方式,以往的研究都是基于刚性地基<sup>[8-9]</sup>,而考虑支承土柔韧性影响的 TMD 及其在地震作用下性能的研究很少。文献[10]研究发现,当考虑土-结构相互作用效应影响后再进行 TMD 自振周期的设计,会提高 TMD 的控制能力;文献[11]通过识别出 SSI 模型下结构的频率进行 TMD 参数设计,发现 TMD 具有良好的性能和鲁棒性;文献[12]通过数值模拟对比 TMD 在含 SSI 效应和不含 SSI 效应的结构下的振动控制研究,发现 SSI 的加入增加结构的诱导反应,会降低 TMD 在上层结构中控制能力;文献[13]研究发现,通过独立多重调谐质量阻

尼器(multiple tuned mass dampers, MTMD)子结构与主结构的频率比,并适当增大最优 MTMD 的频率间隔,可以减小失谐效应,且作用效果比单个 TMD 更好。

在建立土-结构相互作用的整体模型研究土对结构的影响时,核心问题是保证 SSI 体系下主结构接收的地震动强度与刚性地基下主结构接收的地震动强度一致。本文通过将地震波加速度折减 1/2 按 S 波从土体底部竖直输入<sup>[14]</sup>,保证 SSI 体系下主结构与刚性地基下主结构承受的地震动强度一致,研究地震作用下刚性地基体系和 SSI 体系主结构的动力响应,同时设置了刚性体系下以刚性地基模型为基础设计的 MTMD1 和 SSI 体系下以无质量地基模型为基础设计的 MTMD2 这 2 种振动控制策略,并研究其在相应地基体系下对高层结构的振动控制能力。

## 1 有限元模型建立

### 1.1 刚性地基体系下的有限元模型

本文选取 20 层钢结构 Benchmark 模型作为主结构,在 ANSYS 中用 Beam23 单元建立高层结构的有限元模型,结构的相关数据详见文献[15-16],为后续建立 SSI 模型时便于划分网格,将地下 2 层的柱高增加至 4.0 m。

### 1.2 SSI 体系下的有限元模型

在 ANSYS 中使用二维 4 节点 Plane182 实体单元模拟土体。模拟土体时,土体的侧面边界距离结构边缘不能小于 3 倍结构水平宽度<sup>[17]</sup>,且当土体横向边界尺寸取结构宽度的 10 倍时<sup>[18]</sup>,能更好模拟土体无限域的效果,故本文模型土体的横向尺寸取结构两侧各 150.0 m,加原结构的横向宽度 30.5 m,土体的总横向尺寸为 330.5 m(约 10 倍宽),土体的竖向尺寸取 150.0 m(横向尺寸的 1/2)。土体参数按 II 类场地土选取,参数见表 1 所列。

表 1 土体模型参数

密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	剪切波速/(m/s)
2 000	800	0.25	400

为满足有限元分析时计算精度和计算成本要求,土体有限元的网格尺寸选取式<sup>[19]</sup>为:

$$\frac{C_s}{12f_{\max}} \leq l_{\max} \leq \frac{C_s}{6f_{\max}} \quad (1)$$

其中:  $C_s$  为土体剪切波速;  $l_{\max}$  为最大网格尺寸;  $f_{\max}$  为输入地震动的最高频率,对于一般地震波,  $f_{\max}$  可取 10~20 Hz,故本文土体的竖向网格尺寸和结构两侧部分的横向网格尺寸均取 2.0 m,主结构下方土体的横向尺寸取主结构宽度的 1/15(约 2.0 m)。

为更好地模拟土体的有限域效果,本文在土体的两侧以及底部均施加黏弹性人工边界,并用 Combin14 单元模拟法向和切向的元件,黏弹性边界元件刚度和阻尼的参数计算式<sup>[5]</sup>为:

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R} \sum A_i, C_{BN} = \rho C_P \sum A_i \quad (2)$$

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R} \sum A_i, C_{BT} = \rho C_s \sum A_i \quad (3)$$

其中:  $K_{BN}$ 、 $K_{BT}$  分别为黏弹性元件的法向和切向刚度系数;  $C_{BN}$ 、 $C_{BT}$  分别为法向和切向阻尼系数;  $\alpha_N$ 、 $\alpha_T$  分别为法向和切向的修正系数,在二维分析中,取  $\alpha_N = 1$ ,  $\alpha_T = 0.5$ ;  $R$  为入射地震波源到人工边界点的距离;  $G$ 、 $\rho$  分别为模拟土体的剪切模量和密度;  $\sum A_i$  为元件施加节点的等效节点面积;  $C_s$ 、 $C_P$  分别为土体的剪切波速和纵波波速。土-结构相互作用直接有限元模型如图 1 所示。

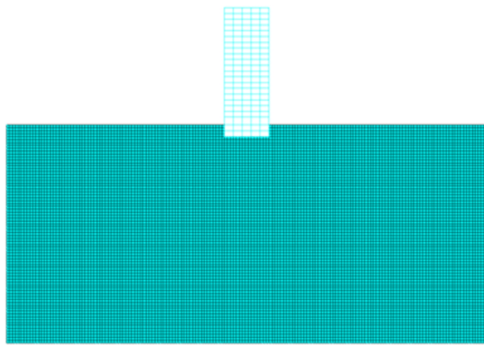


图 1 土-结构相互作用有限元模型

### 1.3 结构和土体的本构模型与阻尼

在 ANSYS 软件中,模拟岩土的非线性常使用 Drucker-Prager(DP)屈服准则,但 DP 模型无法反映材料硬化和解决屈服面单一等问题,且不适用 Plane182 等高级单元,故本文采用了扩展的 DP 材料模型,即 Extended Drucker-Prager(EDP)模型,并通过等效替换求得 EDP 模型所需参数,本文中,土体黏聚力取 15 kPa,内摩擦角取 21.6°。上部主结构采用 BKIN 双线性强化模型,梁柱的屈服强度分别取 248、345 MPa,屈服后弹性模量均取 2.06 GPa。

刚性地基体系采用 Rayleigh 阻尼定义结构阻尼,阻尼比取 0.02。SSI 体系下,因为土体的非

线性, Rayleigh 阻尼无法准确地定义土-结构相互作用的阻尼特性,所以选择材料阻尼,上部主结构的阻尼比取 0.02,土体的阻尼比取 0.2。

## 2 MTMD 控制设计

针对高层结构在刚性地基体系和土-结构相互作用体系下的振动控制问题,本文选择 MTMD 作为振动控制策略。用 Mass21 单元模拟 MTMD 的质量元件, Combin14 单元模拟弹簧和阻尼器元件。常用 TMD 的参数计算公式<sup>[20]</sup>为:

$$\mu_m = \frac{m_d}{m_s} \quad (4)$$

$$f_{opt} = \frac{1}{1 + \mu_m} \quad (5)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu_m}{8(1 + \mu_m)}} \quad (6)$$

$$\Omega = 2\pi f_s \quad (7)$$

$$K_d = f_{opt}^2 \Omega^2 m_d \quad (8)$$

$$C_d = 2\zeta_{opt} f_{opt} \Omega m_d \quad (9)$$

其中:  $m_d$  为 TMD 的质量;  $m_s$  为结构某阶模态参与质量;  $\mu_m$  为 TMD 与结构的质量比;  $f_{opt}$  为结构最优频率比;  $\zeta_{opt}$  为结构最优阻尼比;  $f_s$  为结构自振频率;  $\Omega$  为结构自振圆频率;  $K_d$  为 TMD 等效刚度;  $C_d$  为 TMD 等效阻尼。

本文设置 MTMD 的参数时,先设计单个 TMD 的参数,质量比取 0.05,再依据质量相等的设计方法,保证总质量不变,设置每个 MTMD 的质量为单个 TMD 的 1/5,其他参数不变<sup>[8]</sup>,完成 MTMD 的参数设置。

1) 刚性地基体系下 MTMD1 的参数设计:取主结构的一阶模态进行 MTMD1 的参数设计。

2) SSI 体系下 MTMD2 的参数设计:由于在 SSI 体系下直接进行模态分析,得到的则是 SSI 体系的动力特性,并不是结构本身,而无质量模型对结构自振频率的计算基本无影响。故本文以无质量地基模型下为基础设计 SSI 体系下 MTMD 的参数。取无质量地基模型下结构的一阶模态完成 MTMD2 的参数设计。

最后将设计好的 MTMD1 和 MTMD2 分别安装在刚性地基体系下和 SSI 体系下主结构顶层梁的跨中。

## 3 地震波选取和输入

### 3.1 地震波的选取

结合实际情况及 II 类场地土的条件,本文选

择 El Centro 波(南北向)、Taft 波和兰州波 3 个实际地震波作为所用的地震动作用,并按 7 度罕遇地震调幅峰值加速度至  $2.2 \text{ m/s}^2$ ,3 种地震波的步长均取  $0.005 \text{ s}$ ,3 种水平地震波相关参数见表 2 所列。

表 2 3 种水平地震动作用峰值调幅表

地震波	El Centro 波	Taft 波	兰州波
原峰值加速度/ $(\text{m/s}^2)$	3.417	1.527	1.962
计算时长/s	30	30	20
调整系数	0.644	1.441	0.892

### 3.2 地震波的输入

刚性地基体系,本文通过直接输入加速度的方式输入地震波。SSI 体系,由于半无限地基对弹性波有 2 倍的放大作用<sup>[21]</sup>,本文先将地震波加速度折减 1/2,再将折减后加速度时程导入 SPECTR 反应谱计算工具,生成位移时程和速度时程,并对时程曲线进行基线修正,得到所需位移和速度时程数据,求出对应的等效节点力荷载后按 S 波直接从有限元模型的底部垂直输入<sup>[22]</sup>,保证 SSI 体系高层结构接收地震波强度与刚性地基体系下的一致,更准确地对比 2 种体系之间结构的动力响应。3 种地震波加速度减半后的位移-时程曲线如图 2 所示。

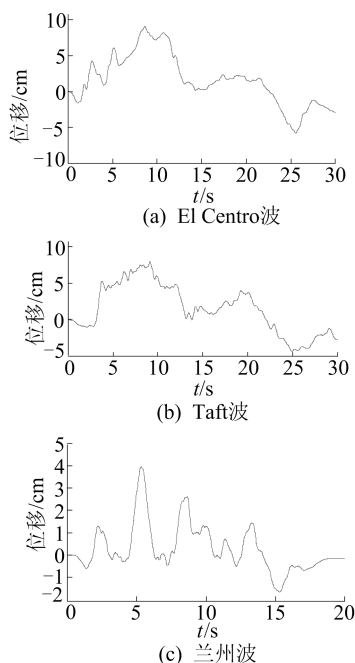


图 2 3 种水平地震波加速度减半后的位移-时程曲线

## 4 结构振动控制分析

为直观对比在有控和无控状态时高层结构在

刚性地基体系和 SSI 体系下的动力响应,选取楼层最大水平加速度、楼层最大层间位移和中柱基底剪力时程作为振动响应指标,动力响应结果分别如图 3~图 5 所示。

由图 3、图 4 可知,无控状态时 3 种水平地震波作用下,SSI 体系的楼层最大水平加速度和楼层最大层间位移均比刚性地基体系下小。El Centro 波、Taft 波、兰州波的楼层最大水平加速度分别降低了 73.38%~91.11%、73.01%~88.49%、73.07%~84.49%,下降幅度超过 70%;最大层间位移分别降低了 33.23%~43.54%、35.87%~55.03%、21.43%~29.60%,下降幅度超过 20%。

由图 5 可知,由于刚性地基下地震波数据是直接通过加速度输入到结构上,结构中柱剪力会立刻发生变化,且刚性地基下结构的刚度更大,变化更快、峰值更大,达到峰值所用时间更短。而 SSI 体系下的结构,由于输入地震波时考虑了行波效应,主结构接收到完整地震动的时间较长,剪力峰值出现的时间更长,地震输入 3 s 前剪力几乎没有变化,3 s 后才开始改变,并缓慢达到峰值,特别是在兰州波作用时程结束后,基底的剪力才达到峰值。El Centro 波、Taft 波、兰州波作用下,SSI 体系下剪力峰值分别只有刚性地基下的 64.62%、62.20%、63.86%,均有大幅下降。

由图 3a、图 3b 可知,MTMD 控制时,刚性地基体系中,水平 El Centro 波作用时,结构在 MTMD1 控制下,楼层最大水平加速度在 12~17 层出现放大现象,比无控时的楼层加速度增大了 5.00%~16.70%;水平 Taft 波作用时,在第 7 层、第 8 层、第 13~第 20 层也出现了加速度放大现象,说明 MTMD1 在这 2 种水平地震波作用时,对楼层最大水平加速度的控制效果并不理想。由图 3c 可知,在兰州波作用时,MTMD1 对楼层水平最大加速度有较为稳定的控制效果,楼层加速度比无控时降低了 5.03%~16.48%。

由图 4、图 5 可知,3 种地震波作用下,MTMD1 对楼层最大层间位移和底层剪力均有很好的控制效果,其中,层间位移分别降低 22.24%~39.85%、29.46%~45.35%、5.03%~16.48%;剪力峰值分别降低了 25.61%、37.80%、23.84%。

由图 3、图 4 可知,SSI 体系时,El Centro 波、Taft 波、兰州波地震波作用下,MTMD2 对楼层加速度和层间位移有稳定的控制效果,其中,楼层最大水平加速度分别降低了 3.26%~21.91%、

2.77%~26.79%、3.89%~14.27%，未出现放大现象；最大层间位移降低了 13.52%~31.71%、8.84%~23.29%、13.39%~26.49%。

由图 5 可知，地震波作用前期，SSI 体系在 MTMD2 控制下，结构的底层中柱剪力与无控

时对比无明显差别，在地震波作用 10 s 后，MTMD2 才开始发挥作用，中柱剪力开始减小，直到地震波作用结束时，剪力的峰值也在 MTMD2 控制下分别降低了 31.34%、25.20%、32.98%。

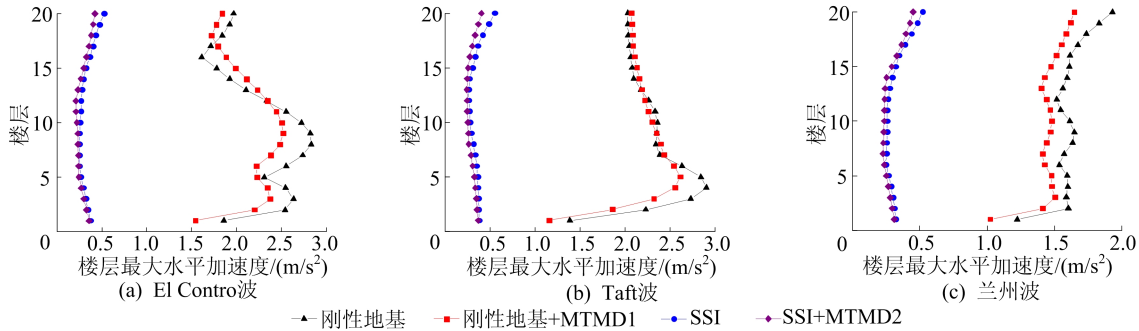


图 3 3 种水平地震波作用下楼层最大水平加速度

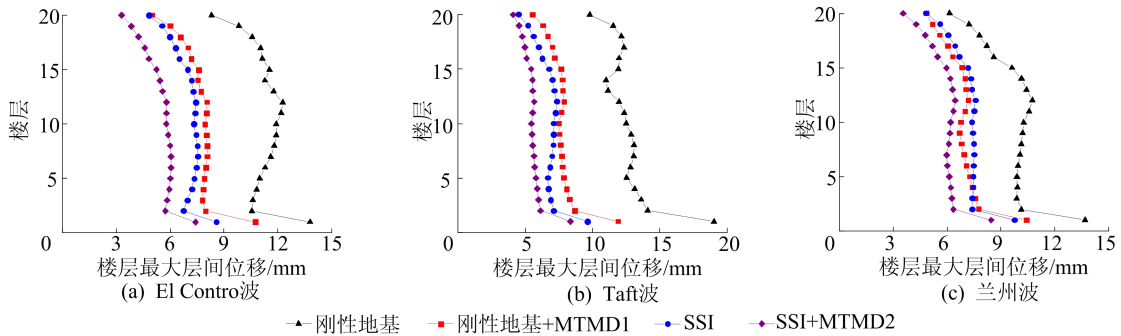


图 4 3 种水平地震波作用下楼层最大层间位移

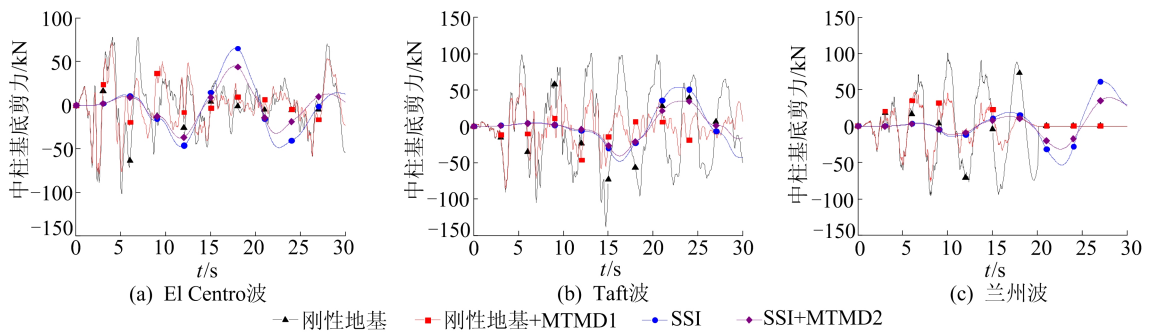


图 5 3 种水平地震波作用下结构底层中柱剪力时程

从下降幅度来看，MTMD2 对主结构的层间位移和中柱剪力的控制能力要略差于 MTMD1，对楼层最大水平加速度的控制能力与 MTMD1 的有效控制能力接近，且未出现放大现象。但无控状态下 SSI 体系产生的动力响应更小，因此总体分析，MTMD2 的控制效果更好也更稳定。

### 5 结 论

本文通过保证 SSI 体系下主结构接收的地震

波强度与刚性地基下主结构接收的地震波强度一致后，得到如下结论：

1) 结构在无控状态时，SSI 体系下主结构的楼层最大水平加速度、楼层最大层间位移和底层中柱剪力峰值均比刚性地基体系下的小，其中加速度下降幅度极大。说明土体对地震动作用有着明显的衰减作用，也证明了目前我国《建筑抗震设计规范》在进行抗震设计时按刚性地基进行设计时更安全合理。

2) 在采用 MTMD 对 3 种水平地震波作用下的高层结构进行振动控制时,在刚性地基体系下,MTMD1 对位移和剪力都具有一定的控制效果,但在控制加速度时,出现了部分楼层加速度增大现象,说明在刚性地基体系下,MTMD1 对楼层的加速度不具备稳定的控制能力;SSI 体系在 MTMD2 的控制下,主结构的加速度、位移和剪力均比无控时减小,未出现放大现象,对比 MTMD1 有着更稳定的控制效果。

### [参 考 文 献]

- [1] 何玉敖. 垂直振动时的土-结构相互作用[J]. 建筑结构学报, 1983, 4(6): 61-71.
- [2] 张昊, 康帅, 王自法, 等. 考虑土结构相互作用的框架结构抗震性能分析[J]. 世界地震工程, 2022, 38(2): 29-37.
- [3] 严飞. 不同场地及地震输入下的土框架结构相互作用体系地震反应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(3): 17-23.
- [4] 刘晶波, 王振宇, 张克峰, 等. 考虑土结构相互作用大型动力机器基础三维有限元分析[J]. 工程力学, 2002, 19(3): 34-38, 49.
- [5] 刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报, 1998, 31(3): 55-64.
- [6] 马笙杰, 迟明杰, 陈红娟, 等. 黏弹性人工边界在 ABAQUS 中的实现及地震动输入方法的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1445-1457.
- [7] 尹训强, 罗勇, 王桂莹. 二维黏弹性人工边界单元及地震波输入在 ANSYS 中的实现[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 61-65.
- [8] 汪权, 袁加伟, 王肖东, 等. 地震作用下高层结构分布式多重调谐质量阻尼器振动控制研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(6): 1214-1219, 1415.
- [9] 汪权, 周超杰, 孙旭, 等. 多维地震作用下高层结构振动混合控制研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(4): 742-747.
- [10] 张峰, 刘海卿, 王学庆. 考虑土-结构动力相互作用的 TMD 结构减震控制[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(6): 134-140.
- [11] GAO Z D, ZHAO M, WU Y Z, et al. Parameter design and performance evaluation of tuned mass damper (TMD) for seismic control of structure considering soil-structure interaction (SSI)[J]. Structures, 2023, 52: 1116-1129.
- [12] ABD-ELHAMED A, MAHMOUD S. Simulation analysis of TMD controlled building subjected to far and near-fault records considering soil-structure interaction[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 26: 1-12.
- [13] WANG J F, LIN C C. Seismic performance of multiple tuned mass dampers for soil-irregular building interaction systems[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42: 5536-5554.
- [14] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2009: 378-395.
- [15] 欧进萍. 结构振动控制: 主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 496-514.
- [16] OHTORI Y, CHRISTENSON R E, SPENCER B F, et al. Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(4): 366-385.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014: 37-38.
- [18] 李培振, 吕西林. 考虑土结构相互作用的高层建筑抗震分析[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(3): 130-138.
- [19] 章小龙, 李小军, 陈国兴, 等. 黏弹性人工边界等效荷载计算的改进方法[J]. 力学学报, 2016, 48(5): 1126-1135.
- [20] RANA R, SOONG T T. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers[J]. Engineering Structures, 1998, 20(3): 193-204.
- [21] 沈聚敏, 周锡元, 高小旺, 等. 抗震工程学[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 131-134.
- [22] 杜修力, 赵密. 基于黏弹性边界的拱坝地震反应分析方法[J]. 水利学报, 2006, 37(9): 1063-1069.

(责任编辑 吴 亮)