

• 工程结构减震与隔震 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202400018



本刊网刊

近断层脉冲型和远场长周期地震动作用下隔震结构的 动力响应与调谐减震控制

康迎杰^{1,2,3}, 张泽文⁴, 刘庆宽^{1,2,3}, 潘鹏^{5*}

(1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043; 2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心, 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043; 4. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 5. 清华大学 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 隔震结构具有长周期特征, 需着重关注其在长周期地震动作用下的动力响应及相应的减震控制技术。本文筛选出50条近断层脉冲地震动和50条远场长周期地震动作为输入, 考虑隔震层的非线性特征, 分析了在多级地震动作用下隔震结构的位移和加速度响应。基于隔震结构的动力响应分析结果, 提出了对应的调谐减震设计方法, 并检验了调谐减震的控制效果。结果表明: 在长周期地震动作用下, 建议将隔震层的屈重比取值在0.06~0.07, 以控制隔震层的最大位移, 并避免上部结构加速度响应过大; 在远场长周期地震动作用下, 调谐减震对隔震层位移和上部结构绝对加速度响应的控制效果较好, 且减震效果随输入地震动强度等级的增大而提升; 在近断层脉冲地震动作用下, 调谐减震对隔震层位移的减震效果较差, 甚至会出现负面效应; 调谐减震发挥作用的滞后性及隔震层非线性特性造成的调谐减震失谐, 是造成其减震效果具有显著差异性的主要原因。在远场长周期地震动潜在发生的区域, 可采用提供的方法对隔震结构进行调谐减震设计。

关键词: 长周期地震动; 隔震结构; 调谐减震控制; 近断层脉冲; 远场长周期

中图分类号: TU352.12

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2025)06-0081-12

长周期地震动的低频成分比较丰富, 卓越周期可达到几秒至十几秒。根据断层距及产生机制的差异, 长周期地震动主要分为两大类: 近断层脉冲型地震动和远场长周期地震动^[1]。近断层脉冲型地震动一般是指在断层距不超过20 km的区域, 由于断层破裂的方向性效应和滑冲效应造成地震动具有明显的低频速度脉冲^[2]。远场长周期地震动一般产生在距离震源较远的厚冲积平原或盆地中, 主要是由长周期面波叠加放大所形成的长持时地面运动^[3]。由于产生机制的不同, 造成两类长周期地震动在时域和频域上具有显著差异性。在1999年土耳其Kocaeli地震、1999年中国台湾集集地震、2008年中国汶川地震、2011年日本“3·11”地震灾害中, 丰富的长周期地震动记录均被采集到, 这些地震动对长周期结构造成了严重影响甚至破坏,

并且, 不同类型长周期地震动作用下结构的动力响应也表现出明显差异^[4-5]。综上, 一方面, 在研究长周期地震动作用下对结构的动力响应时, 需要考虑地震动类型的影响; 另一方面, 如何提升长周期结构在长周期地震动作用下的抗震性能已成为亟待解决的关键问题。

隔震技术通过在隔震层设置柔性支座, 使结构获得较长的自振周期, 进而显著减弱结构承受的地震作用, 进而有效保护上部结构及结构内部人员和设备的安全^[6]。在2011年东日本大地震、2013年四川雅安地震和2022年四川泸定地震等实际灾后调查中均验证了隔震技术是减轻建筑震害的有效手段^[7]。然而, 隔震结构的长周期特点反而使其容易进入长周期地震动作用的敏感领域, 其中面临的突出问题包括: 地震动

收稿日期: 2024-01-06 修回日期: 2024-04-13 网络出版日期: 2024-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208493); 河北省自然科学基金项目(E2022210038; E2022210078); 河北省高等学校科学技术研究项目(BJK2023038); 中央引导地方科技发展资金项目(236Z5410G)

作者简介: 康迎杰(1989—), 男, 讲师, 博士。研究方向: 结构振动与振动控制。E-mail: kyj_kpp@163.com

* 通信作者: 潘鹏, 教授, E-mail: panpeng@tsinghua.edu.cn

中的脉冲成分会对隔震层的位移产生显著的放大效应^[8],对隔震结构的水平向减震系数有放大作用^[9],不同地震动作用造成隔震效果的离散性增大^[10],上部结构可能产生塑性损伤变形^[11]。总体而言,在长周期地震动作用下隔震结构的动力响应与性能提升仍有待进一步研究^[12-13]。

在隔震层附加耗能减震装置,例如,黏滞阻尼器、摩擦阻尼器等,可以有效控制隔震层的位移响应,但可能会造成隔震效率降低、上部结构的动力响应加剧的问题^[14]。另一种解决方案是将隔震技术与调谐减震技术融合应用,并根据隔震结构体系的动力特性进行参数优化^[15-17]。通过对比发现各类调谐型阻尼器对隔震结构的减震规律具有相似性,均表现出明显的离散性和发挥作用的滞后性^[18]。因此,为保证调谐减震的有效性,一般需提供较大的质量比,将局部结构改造为质量体或采用具有质量放大效应的惯容器成为目前较流行的一种技术方案^[19-20]。采用主动控制技术对被动阻尼器进行优化也是目前的研究热点^[21]。然而,隔震层的非线性特征是调谐减震设计中的技术难题,目前研究主要基于隔震层在设防或罕遇等单级地震动作用下的动力特性,对调谐型阻尼器进行参数优化时缺乏考虑其在多级地震动作用下的减震协同性分析;另外,关于调谐型阻尼器对隔震结构在长周期地震动下动力响应控制效果的研究还有所欠缺。隔震技术目前被推广应用于高烈度设防地区和地震重点监视防御区的新建学校、幼儿园、医院、应急避难场所等公共建筑,以保障并提升隔震结构的安全性,其研究至关重要。

为了保证最终分析结果的可靠性,且能够涵盖大多不同特征的长周期地震动,本文充分考虑《建筑抗震设计规范》及国内外有关文献研究中地震动数量的界定标准,筛选近断层脉冲型地震动和远场长周期地震动各 50 条,作为输入地震荷载;基于简化单自由度模型,考虑隔震支座的非线性属性,分析隔震结构在多级长周期地震动作用下的动力响应特征;确定调谐质量阻尼器的设计参数,并分析其减震效果;以多自由度隔震结构体系进一步检验调谐减震的有效性。

1 长周期地震动

长周期地震动的卓越周期较长,其加速度反应谱在周期为 1 s 之后明显大于常规地震动,需要确定筛选近断层速度脉冲型地震动和远场长周期地震动的选取原则。

1.1 近断层速度脉冲型地震动

Shahi 等^[2]提出了基于连续小波变换的速度脉冲型地震动识别方法,在美国太平洋地震工程研究中心

(PEER)的强震数据库(NGA-West2)中,根据该方法共识别出 142 组具有速度脉冲特征的地震动记录,先根据如下原则对这 142 组地震动进行初步筛选:

- 1) 选取地震动的断层距不大于 20.0 km;
- 2) 地震动矩震级不小于 6.0 级,以保证强度特征;
- 3) 场地土层等效剪切波速 V_{s30} 在 180~760 m/s 之间,基本对应中国抗震规范中的 II 类和 III 类场地^[22];
- 4) 每组地震动包含 2 个水平分量,从中选取在 1.0~6.0 s 之间加速度反应谱较大的分量。

根据上述原则从 140 组地震动中初步筛选出 110 组地震动。PGV/PGA(峰值地面速度与峰值地面加速度之比)和脉冲周期 T_p 是用来表征近断层脉冲型地震动频谱特性的常用指标,因此分别以 PGV/PGA 和脉冲周期 T_p 将地震进行分组,如表 1 所示。图 1 为 T_p 与 PGV/PGA 之间的相关性。由图 1 整体来看,PGV/PGA 和脉冲周期 T_p 之间的相关性较差,可见以哪种指标作为下一步的筛选标准还需进一步分析。

表 1 近断层脉冲型地震动分组

Tab. 1 Grouping information for near-fault pulse-like ground motions

| 分组编号 | 按照 PGV/PGA 分组 | | 按照 T_p 分组 | |
|------|---------------|------|-------------|------|
| | PGV/PGA 取值范围 | 各组数量 | T_p 取值范围 | 各组数量 |
| 1 | < 0.1 | 16 | < 1.5 | 26 |
| 2 | [0.1,0.2) | 23 | [1.5,3.0) | 24 |
| 3 | [0.2,0.3) | 27 | [3.0,4.5) | 12 |
| 4 | [0.3,0.4) | 17 | [4.5,6.0) | 14 |
| 5 | ≥ 0.4 | 7 | ≥ 6.0 | 34 |
| | 总和 | 110 | 总和 | 110 |

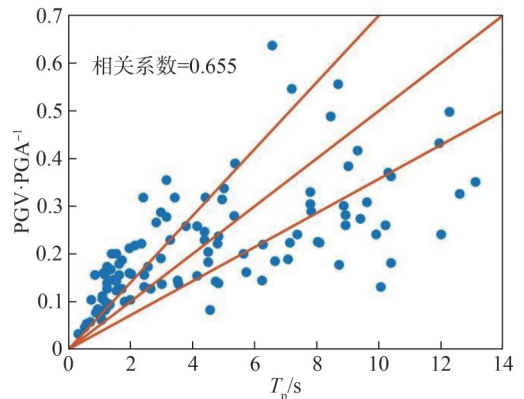


图 1 脉冲周期 T_p 与 PGV/PGA 的相关性

Fig. 1 Correlation of pulse period T_p with PGV/PGA

依据 8 度罕遇地震对应的加速度时程最大值 400 cm/s^2 对地震动进行调幅,分组绘制出地震动的加速度反应谱,并与 8 度罕遇地震的规范谱进行对比,如图 2 所示。

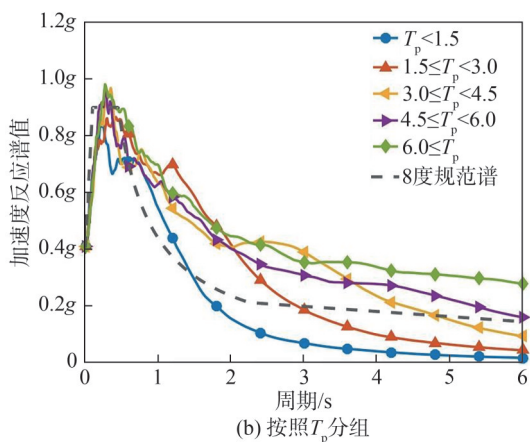
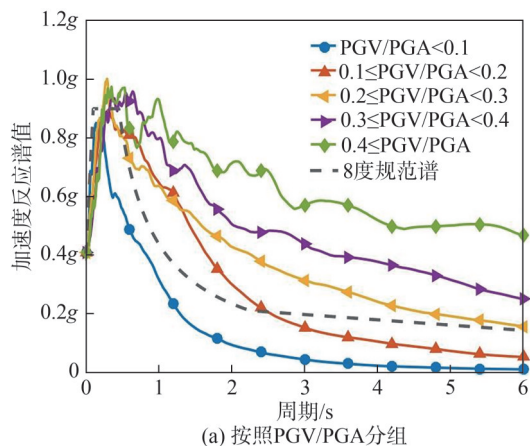


图2 近断层脉冲型地震动的加速度反应谱

Fig. 2 Acceleration response spectrums of near fault pulse like ground motions

由图2可以看出:近断层脉冲型地震动的反应谱与PGV/PGA的相关性更清晰,反应谱谱值随PGV/PGA呈线性递增关系;而与脉冲周期 T_p 的相关性稍差,反应谱曲线交叉明显。最终以PGV/PGA大于0.2为筛选条件,以保证地震动具有明显的长周期特性,筛选出的50条近断层脉冲地震动详细信息见附录A表A1。

1.2 远场长周期地震动

远场长周期地震动可能导致长周期结构发生共振效应,甚至造成结构破坏,给人民生命财产安全带来重大损失。目前,现行的《建筑抗震设计标准》中未充分考虑远场长周期地震动的影响,并且关于长周期地震动的划分也没有统一的区分方法,不同学者对长周期地震动的界定与区分所采取的指标也不同^[11-12]。从工程设计角度而言,地震动放大系数 β 谱能够充分反映长周期地震动低频占主导的特征,因此其在理解和操作方面更具优势。本文充分参考已有学者对长周期地震动的筛选方法,最终采用李雪红等^[1]建议的方法,筛选出50条远场长周期地震动记录,具体选取原则如下:

- 1)地震动的断层距不小于50.0 km;
- 2)地震动矩震级不小于6.0级;
- 3)场地土层等效剪切波速 V_{s30} 在180~760 m/s之间;
- 4)每组地震动包含2个水平分量,从中选取在1.0~6.0 s之间加速度反应谱较大的分量。

筛选出的50条远场长周期地震动详细信息见附录A的表A2,其中,所选地震动的PGV/PGA均大于0.2。另外,所选部分地震动在后期振动阶段具有明显的多循环长周期脉冲,类似于谐波振动,取其中1条地震动(TCU006-E),其加速度时程曲线如图3所示。

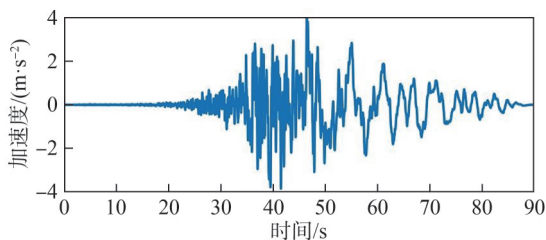


图3 远场长周期地震动(TCU006-E)加速度时程
Fig. 3 Acceleration time histories of far-field long-period ground motions (TCU006-E)

图4为TCU006-E地震动的加速度反应谱和普通远场长周期地震动BUE340的加速度反应谱的对比。由图4可以看出两者具有显著差异,这是由于地震动中的类谐波成分会使加速度反应谱在3~6 s周期段出现明显的第2个峰值,该区间往往和隔震结构的自振周期接近,容易造成隔震结构发生剧烈的共振响应。

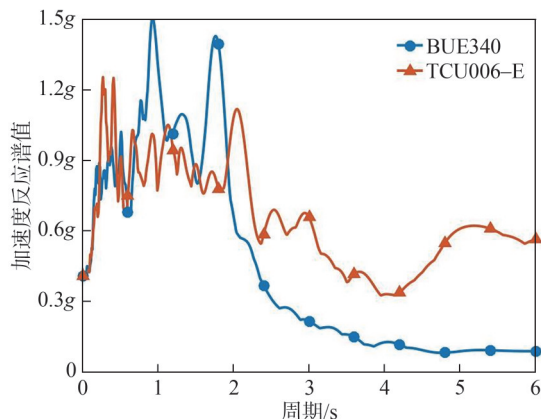


图4 两种远场长周期地震动加速度反应谱
Fig. 4 Acceleration response spectrums of two types far field long-period ground motions

图5为50条远场长周期地震动的反应谱。由图5可以看出,在从0.45 s(特征周期)至2.50 s的区间远场长周期地震动反应谱显著大于规范反应谱,其卓越周期明显拉长,并且在3~6 s的区间内远场长周期地震动反应谱的下降幅度并不明显。

定义地震动反应谱中第2个峰值(3~6 s区间最

大值)和第1个峰值(0~2.99 s区间最大值)的比值为峰值比,统计所选50条远场长周期地震动的峰值比如图6所示。由图6可知,地震动峰值比大于0.2的共有49条,大于0.4的共有28条,这些特征在一定程度上体现出远场长周期地震动对长周期结构有显著的作用效应。

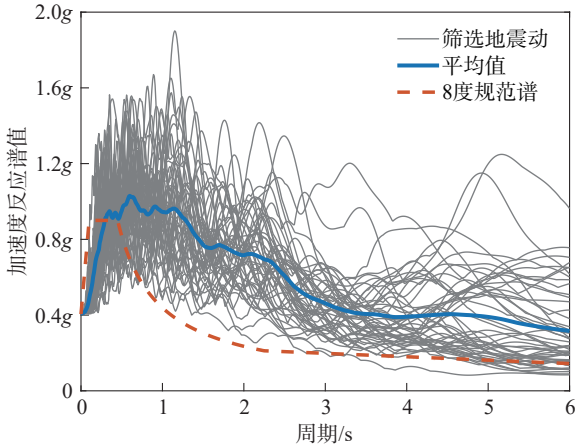


图5 远场长周期地震动的加速度反应谱

Fig. 5 Acceleration response spectrums of far field long period ground motions

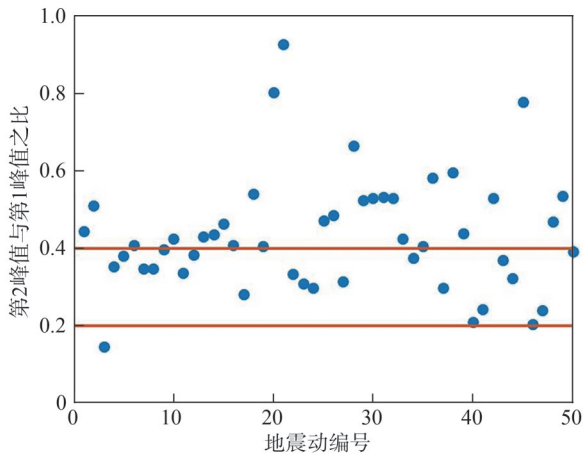


图6 50条远场长周期地震动峰值比

Fig. 6 50 far-field long-period ground motion peak ratios

2 隔震结构的动力响应分析

2.1 分析模型与计算方法

隔震结构的层间位移主要发生在隔震层,因此可将中低层隔震结构简化为单自由度结构体系。隔震层的恢复力模型采用双线性模型,如图7所示。图7中: m_s 为隔震层上部结构的质量; F_y 为隔震层的屈服力; k_0 为隔震层的屈服前刚度; α 为隔震层的屈服后与屈服前刚度比; u_y 为隔震层的屈服位移, $u_y = F_y/k_0$; u_s 为隔震结构相对基底的位移。定义隔震层的屈服比 $\eta = F_y/m_s g$, g 为重力加速度。

隔震结构的屈服前初始周期 T_0 为:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m_s}{k_0}} = 2\pi \sqrt{\frac{u_y}{\eta g}} \quad (1)$$

隔震结构的屈服后周期 T_1 为:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m_s}{\alpha k_0}} \quad (2)$$

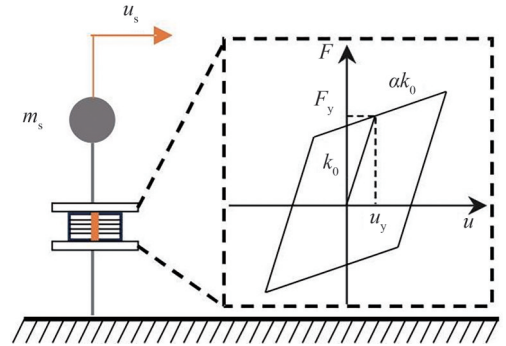


图7 隔震结构的简化模型

Fig. 7 Simplified model of isolated structures

屈服比为影响隔震结构的减震性能和地震响应特征的关键参数^[23-24],其分析范围取为0.01~0.10,并以0.005为间隔;屈服位移对隔震结构地震响应的影响较小,因此屈服位移统一取为7.5 mm^[25];刚度比 α 则根据工程实际一般取为1:13;共计19个隔震结构分析模型。根据式(1)和(2)获得隔震结构模型的初始周期 T_0 和屈服后周期 T_1 分布,如图8所示。由图8可知,隔震结构初始周期分布在0.55~1.74 s,屈服后周期分布在1.98~6.26 s。

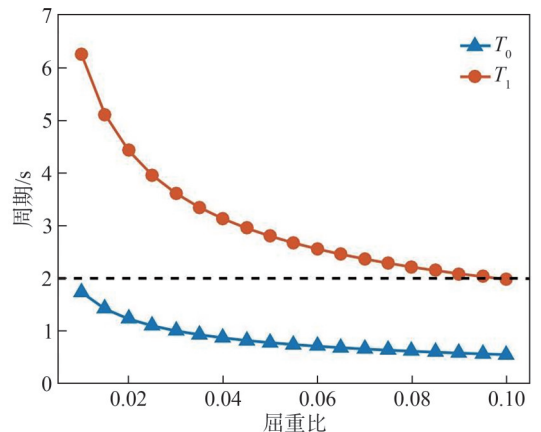


图8 隔震结构的初始周期和屈服后周期

Fig. 8 Initial and post-yield period of isolated structures

考虑在不同强度等级地震动作用下隔震结构动力响应的差异性,在时程分析时,将地震动加速度的幅值分别调至200、300、400、510、600 cm/s²等5个强度等级,分别对应8度(0.2g)设防地震、8度(0.3g)设防地震、8度(0.2g)罕遇地震、8度(0.3g)罕遇地震、8度(0.2g)极罕遇地震。

采用MATLAB软件编辑Newmark- β 计算程序用于隔震结构在地震动作用下的弹塑性时程分析,自编

程序与商业软件SAP2000的计算结果如图9所示。由图9可以看出两者的结果基本一致,保证了计算的准确性。

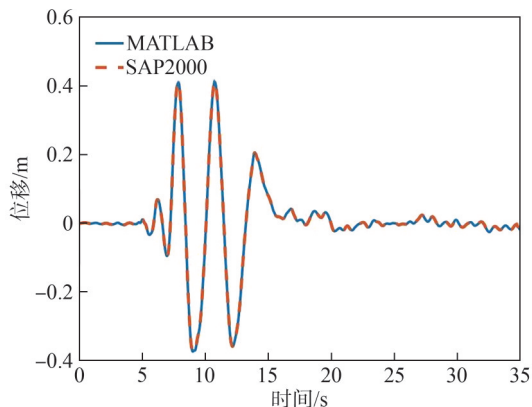


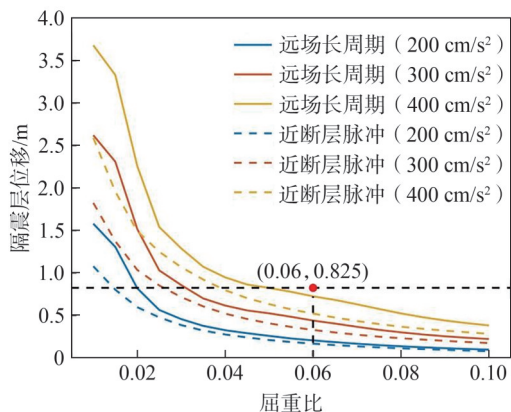
图9 自编程序与SAP2000计算结果对比

Fig. 9 Comparison of self-programmed programs and SAP2000 calculation results

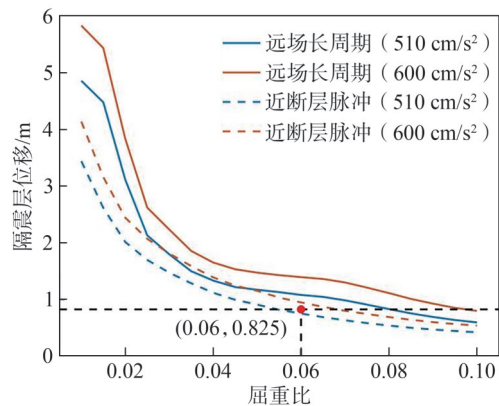
2.2 隔震层位移响应

隔震层最大位移为评估隔震结构是否安全的关键指标,《建筑隔震设计标准》(GB/T 51408—2021)规定在罕遇地震作用下的隔震层水平位移极限取值不应大于支座直径的0.55倍^[26]。考虑到以当前实际工程应用中橡胶隔震支座最大直径1.5 m,计算罕遇地震作用下隔震层的位移控制阈值为0.825 m。分别统计两类长周期地震动作用在不同输入地震动峰值加速度幅值下隔震层位移最大值的平均值与屈重的关系,如图10所示。由图10可以看出:在相同峰值加速度幅值下,远场长周期地震动造成的隔震层位移比近断层脉冲地震动更高,并且两者的差距随输入加速度幅值的增大而增大,但考虑到远场长周期地震动一般具有峰值加速度较低的特点,而近断层脉冲型地震动的峰值加速度更易达到罕遇地震水准的峰值加速度,因此,通过近断层脉冲地震动作用下隔震层的位移响应判断隔震层位移是否超限更具有实际工程意义。当近断层脉冲地震动的峰值加速度为 510 cm/s^2 时,屈重比为0.06的隔震结构隔震层最大位移响应达到了0.752 m,接近隔震支座的水平位移限值。

此外,图11给出了两类长周期地震动作用下隔震层位移最大值和屈重比的相关系数。由图11可见,隔震层位移最大值与屈重比的相关系数均为0.80以上,具有较强的相关性;两者基本呈反比例关系。综上分析,当考虑长周期地震动作用影响,尤其为控制隔震层的最大位移,建议屈重比取值为0.06以上,该取值明显大于普通地震动作用下隔震结构的最优屈重比 $0.03\sim 0.06$ ^[24]。



(a) 峰值加速度200~400 cm/s^2



(b) 峰值加速度510~600 cm/s^2

图10 不同输入峰值加速度下隔震层最大位移与屈重比的关系

Fig. 10 Relationship between the maximum isolation layer displacements and the yield ratio under different input acceleration amplitude

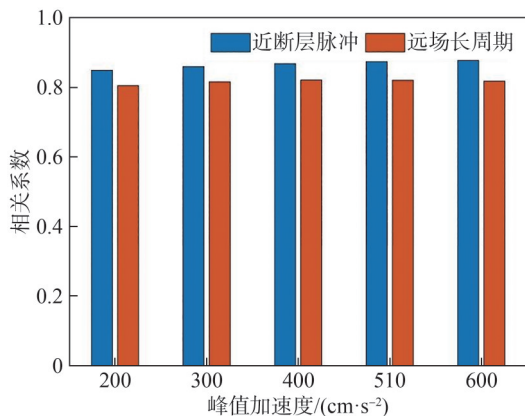


图11 隔震层位移最大值与屈重比的相关系数

Fig. 11 Correlation coefficients of the maximum isolation layer displacements and the yield ratio

2.3 上部结构加速度响应

上部结构加速度响应是评价结构舒适度和设备损伤的关键指标,当楼面加速度超过 3.0 m/s^2 时,将会对重要设备造成一定程度的损伤^[27]。与上述处理隔震层位移结果类似,分别计算在远场长周期地震动和近断层脉冲地震动作用下上部结构绝对加速度响应最

大值的平均值。图 12 为两类长周期地震作用在不同输入峰值加速度下上部结构加速度与屈重比的关系。

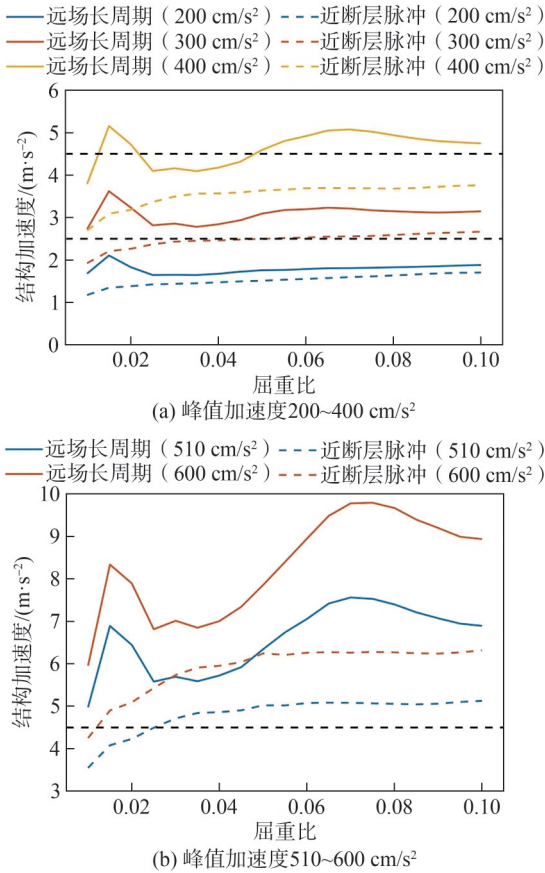


图 12 不同输入峰值加速度下上部结构加速度与屈重比的关系

Fig. 12 Relationship between the absolute acceleration of superstructure and the yield ratio under different input acceleration amplitud

由图 12 可以看出:加速度响应与屈重比的关系受地震动类型的影响;在近断层脉冲地震动作用下加速度与屈重比基本呈对数关系;在远场长周期地震动作用下屈重比为 0.015 和 0.070 时出现峰值,这是由于此时隔震结构屈服后周期分别为 5.12 s 和 2.20 s,刚好落在所选远场长周期地震动的分量丰富的区域内,造成隔震结构的响应在此出现局部峰值。在地震动幅值相等时,远场长周期地震动造成的上部结构绝对加速度响应要高于近断层脉冲地震动,且随地震动峰值加速度的增大而增大。《基于保持建筑正常使用功能的抗震技术导则》(RISN-TG046—2023)第 4.4.1 条规定 I 类和 II 类建筑在设防地震时最大楼面水平加速度限值分别为 0.25g 和 0.45g^[28],在图 12 中用黑色虚线表示。以近断层脉冲地震动作用下上部结构绝对加速度响应作为判断标准,当近断层脉冲地震动的峰值加速度为 300 cm/s² 时,屈重比为 0.07 的隔震层上部结构加速度响应达到了 0.255g,超过针对 I 类建筑设定的 0.25g 限

值,因此,对于严格限制上部结构加速度响应的 I 类建筑,建议屈重比取值不宜超过 0.07,对于 II 类建筑屈重比可取至 0.10。

2.4 等效线性化

将隔震层的非线性属性简化为等效的线性模型便于调谐减震设计。目前,应用较广泛的等效线性化方法为割线刚度法,即采用最大位移对应的割线刚度作为等效刚度,以耗能相等为原则确定等效阻尼比^[27],等效刚度 k_{eq} 和等效阻尼比 ξ_{eq} 的具体计算公式如下:

$$\begin{cases} k_{eq} = k_0 \times \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu}, \\ \xi_{eq} = \frac{2(1 - \alpha)(\mu - 1)}{\pi\mu(1 + \alpha(\mu - 1))} \end{cases} \quad (3)$$

式中, μ 为延性系数。

在第 2.1 节 5 种强度等级地震动作用下,根据隔震层位移最大值的平均值计算延性系数,按照式 (3) 分别统计两类长周期地震动作用下隔震结构的等效周期和阻尼比,如图 13 所示。

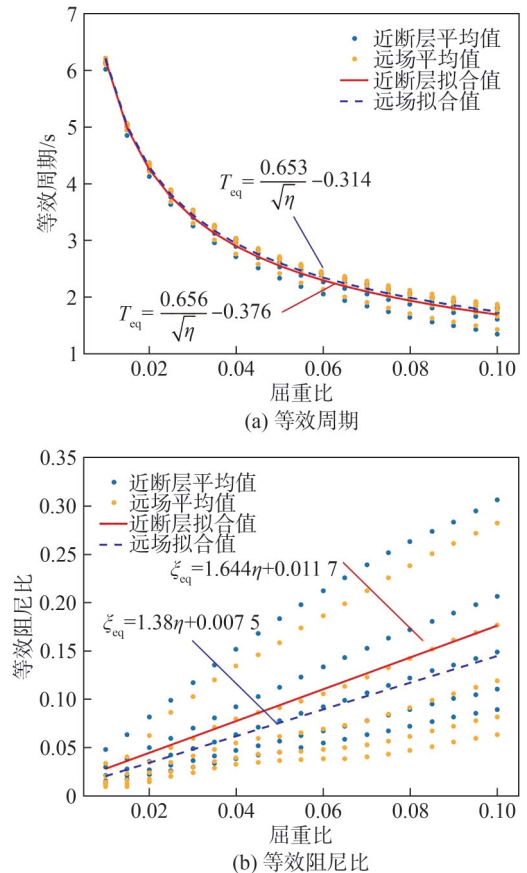


图 13 隔震结构的等效周期和等效阻尼比

Fig. 13 Equivalent period and equivalent damping ratio of seismic isolated structures

考虑到隔震结构在服役期间可能会遭受到不同强度等级的地震作用,因此,建议以 5 种强度等级下等

效参数的平均值作为下一步进行减震设计的基准,对平均值进行公式拟合,获得在两类长周期地震动作用下下屈重比与等效周期和等效阻尼比的关系。

3 减震控制分析

3.1 减震方案

采用调谐质量阻尼器(TMD)对隔震结构进行减震控制。图14为附加TMD的两自由度模型示意图。图14中, k_{eq} 和 c_{eq} 为隔震层的等效刚度和等效阻尼系数, m_d 、 k_d 、 c_d 分别为TMD的质量、刚度和阻尼系数, u_d 为TMD相对基底的位移。

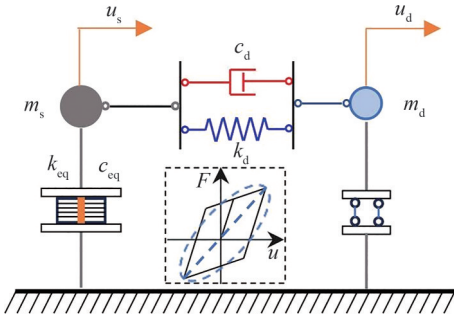


图14 附加TMD的两自由度模型

Fig. 14 Two-degree-of-freedom model of the isolated structure with an additional tuned mass damper

在基底荷载 \ddot{u}_g 作用下,动力平衡方程如下:

$$\begin{cases} m_s \ddot{u}_s + c_{eq} \dot{u}_s + k_{eq} u_s + c_d (\dot{u}_s - \dot{u}_d) + k_d (u_s - u_d) = -m_s \ddot{u}_g, \\ m_d \ddot{u}_d + c_d (\dot{u}_d - \dot{u}_s) + k_d (u_d - u_s) = -m_d \ddot{u}_g \end{cases} \quad (4)$$

式中, \dot{u}_s 、 \ddot{u}_s 分别为隔震结果相对基底的速度和加速度, u_d 、 \dot{u}_d 、 \ddot{u}_d 分别为TMD相对基底的位移、速度和加速度。

定义参数: ω_s 为隔震结构的自振圆频率, $\omega_s = \sqrt{k_{eq}/m_s}$; ζ_{eq} 为隔震结构的等效阻尼比, $\zeta_{eq} = c_{eq}/2m_s\omega_{eq}$; ω_d 为TMD的自振圆频率, $\omega_d = \sqrt{k_d/m_d}$; ζ_d 为TMD的阻尼比, $\zeta_d = c_d/2m_d\omega_d$; μ_d 为TMD与隔震结构的质量比 $\mu_d = m_d/m_s$ 。

假定基底荷载 \ddot{u}_g 的频率为 ω ,则隔震结构的位移 u_s 相对基底荷载 \ddot{u}_g 的传递函数如下:

$$H(\lambda) = [(-1/\omega_s^2)(-\lambda^2 + 2\lambda f \zeta_d i + f^2) + 2\mu_d \lambda f \zeta_d i + \mu f^2] / [(-\lambda^2 + 2\zeta_{eq} \lambda i + 1)(-\lambda^2 + 2\lambda f \zeta_d i + f^2) - \mu_d \lambda^2 (2\lambda f \zeta_d i + f^2)] \quad (5)$$

式中: λ 为基底荷载与隔震结构的频率比, $\lambda = \omega/\omega_s$; f 为TMD与结构的频率比, $f = \omega_d/\omega_s$ 。

文献[20]表明,TMD采用 H^2 优化准则时的减震效果要优于 H^∞ 优化准则,但其未考虑结构的阻尼比,由于隔震结构的阻尼比一般远大于常规结构的阻尼比,因此需对TMD的参数进一步优化。

3.2 参数优化设计

H^2 优化准则是以控制结构位移响应的均方值为目标,当基底输入为白噪声随机荷载时,结构的位移响应均方值 σ^2 为:

$$\sigma^2 = \omega_s S_0 \int_{-\infty}^{+\infty} |H(\lambda)|^2 d\lambda \quad (6)$$

式中, S_0 为白噪声随机荷载的功率谱密度。

根据式(5)可知 $H(\lambda)$ 为质量比 μ_d 、频率比 f 、阻尼比 ζ_d 的函数,结合式(6)可将优化问题以函数形式表达:

$$\begin{cases} \min_{\mu_d, f, \zeta_d} \sigma^2(\mu_d, f, \zeta_d), \\ \text{s.t. } \mu_d \geq 0, f \geq 0, \zeta_d \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

为便于工程设计,一般先给定质量比 μ_d ,上述最优优化问题则简化二元函数最优优化问题:

$$\begin{cases} \min_{f, \zeta_d} \sigma^2(f, \zeta_d), \\ \text{s.t. } f \geq 0, \zeta_d \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

在考虑隔震结构自身阻尼比条件下,难以求解出该优化问题的理论解,因此,采用数值寻优算法进行求解。MATLAB提供了优化函数工具箱,其中“fminsearch”函数即可用于求解多元函数的约束最优化问题。求得TMD最优参数的数值最优解后,发现隔震结构自身阻尼比对TMD的最优阻尼比并没有影响,采用数值拟合方法获得TMD最优频率比和最优阻尼比的拟合公式如下:

$$\begin{cases} f^{\text{opt}} = \frac{\sqrt{1-\mu_d/2}}{1+\mu_d} - 0.09\zeta_{eq} - 1.73\zeta_{eq}^2 - 1.95\sqrt{\mu_d}\zeta_{eq}, \\ \zeta_d^{\text{opt}} = \sqrt{\frac{\mu_d(1-\mu_d/4)}{4(1+\mu_d)(1-\mu_d/2)}} \end{cases} \quad (9)$$

TMD最优频率比的数值解与拟合公式解的对比结果如图15所示。

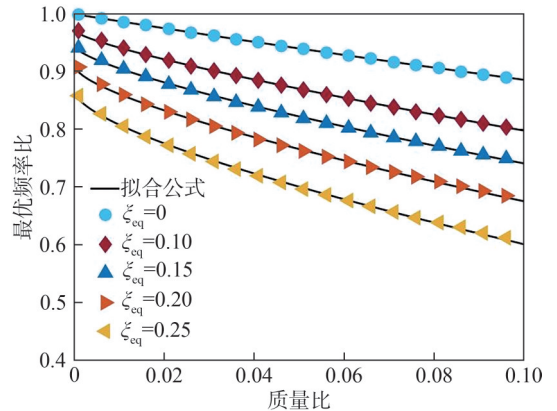


图15 不同等效阻尼比、质量比下TMD最优频率比的数值解与拟合公式解

Fig. 15 Numerical solutions and fitted formula solutions of the optimal frequency ratio of TMD under different equivalent damping ratios and mass ratios

由图 15 可见,两者误差小于 1%,保证了拟合解与数值解的一致性,因此工程应用时可直接采用拟合公式解。

3.3 减震效果分析

设定 TMD 的质量比为 0.1,先计算隔震结构在附加 TMD 之后的动力响应,再统计减震后隔震层位移峰值的平均值,最终按式(10)计算 TMD 对隔震结构隔震层位移的减震率:

$$J_u = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{50} \max(u_{sj}^c)}{\sum_{j=1}^{50} \max(u_{sj})} \right) \times 100 \quad (10)$$

式中, u_{sj} 、 u_{sj}^c 分别为在 j 条地震动作用下隔震结构、TMD 减震后隔震层的位移响应。图 16 给出了 5 种强度等级的近断层脉冲地震动和远场长周期地震动作用下 TMD 对隔震结构隔震层位移最大值的减震率。

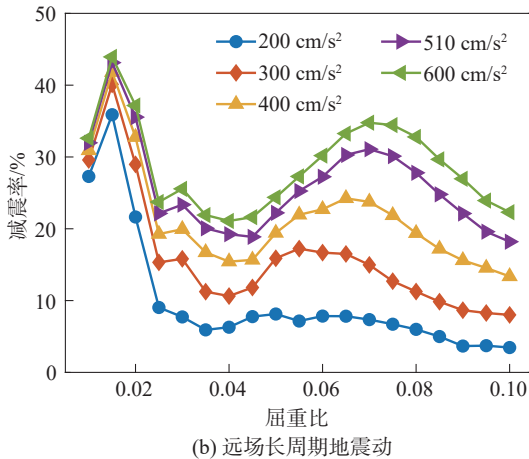
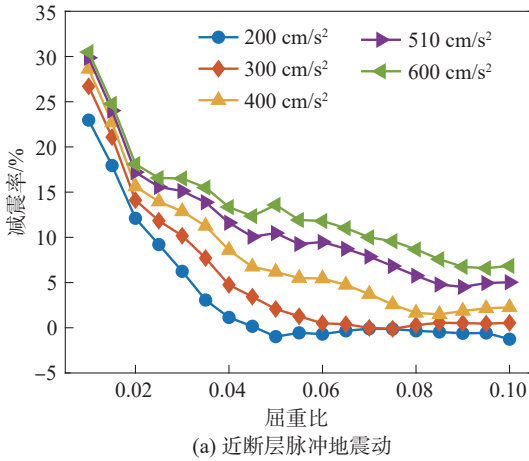
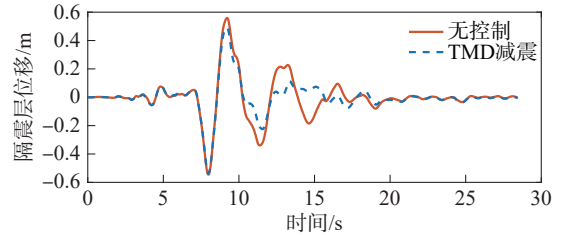


图 16 TMD 对隔震层位移最大值的减震率

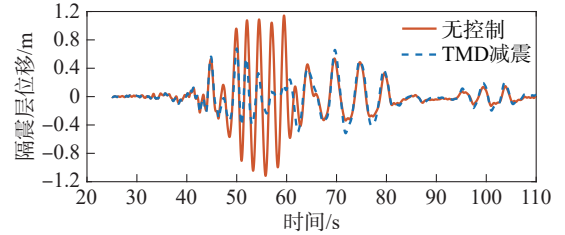
Fig. 16 Reduction rate of TMD on the maximum isolation layer displacements

由图 16 可以看出:在近断层脉冲地震动作用下,减震率随屈重比的增大呈显著下降趋势;在输入峰值加速度为 200 cm/s^2 、屈重比大于 0.04 时, TMD 反而呈负面效应,这是由于隔震层的非线性程度较低,结构的初始频率与 TMD 的调谐频率相差较大,造成

显著的调谐失谐效应,当然也受到 TMD 发挥作用具有滞后性的影响,如图 17(a)所示;随着输入峰值加速度的增大, TMD 的减震效果稍好,但整体上的减震可靠性仍较差。在远场长周期地震动作用下, TMD 则发挥了相对较好的减震效应,尤其是当屈重比处于 0.06~0.08 时, TMD 发挥作用的滞后性特点对减震效果的影响程度有所降低,如图 17(b)所示。综上,采用 TMD 减震更适用于控制隔震结构在远场长周期地震动作用下的动力响应。



(a) 典型近断层脉冲地震动



(b) 典型远场长周期地震动

图 17 长周期地震动作用下两种建筑结构的隔震层位移历程

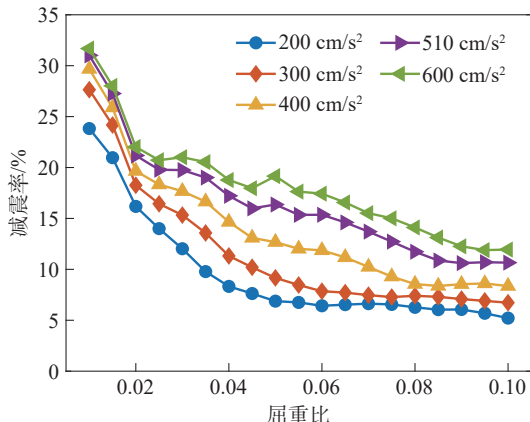
Fig. 17 Displacement time history of isolation layers for two building structures under long-period seismic ground motion

以下考察 TMD 对隔震结构的绝对加速度响应的控制效果,统计计算方式与上述处理位移的方法相似,具体的 TMD 对隔震结构绝对加速度的减震率按式(11)计算:

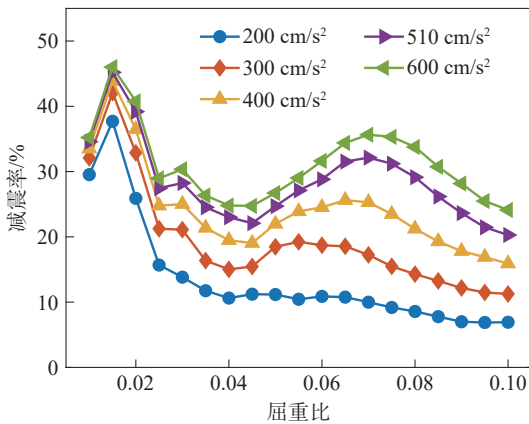
$$J_a = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{50} \max(a_{sj}^c)}{\sum_{j=1}^{50} \max(a_{sj})} \right) \times 100 \quad (11)$$

式中, a_{sj} 、 a_{sj}^c 分别为在 j 条地震动作用下隔震结构、TMD 减震后隔震层的绝对加速度响应。

图 18 为给出 5 种强度等级的近断层脉冲地震动和远场长周期地震动作用下采用不同屈重比时, TMD 对隔震结构绝对加速度的减震率。由图 18 可知:整体上,在近断层脉冲地震动和远场长周期地震动作用下, TMD 均发挥了明显的减震效果,且在远场长周期地震动作用下效果更佳,并随着输入峰值加速度的增大而提升。TMD 对加速度的减震率随屈重比的变化趋势与上述 TMD 对隔震层位移的变化趋势基本一致; TMD 对加速度的最低减震率能保持在 5%,且未出现负面效应。



(a) 近断层脉冲地震动



(b) 远场长周期地震动

图 18 TMD 对隔震结构的绝对加速度最大值的减震率
Fig.18 Reduction rate of TMD on the maximum absolute acceleration of isolated structures

4 多自由度隔震结构案例分析

4.1 结构模型及减震方案

本文将隔震结构的隔震层及其上部结构分别简化为集中质量点,建立了多自由度剪切型模型。如图 19 所示,5 层隔震框架结构的力学模型,图 19 中, m_b 为隔震层的质量。由于在大震作用下上部结构的构件有可能进入非线性状态,因此,需同时考虑隔震支座和上部结构的非线性特征,上部楼层的层间恢复力和隔震层的恢复力模型均采用双线性模型。

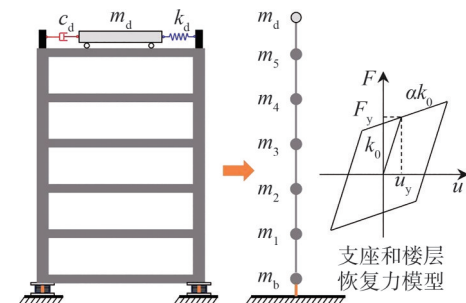


图 19 多自由度隔震结构的等效简化力学模型

Fig. 19 Equivalent simplified mechanical model of the multi-degree of freedom isolated structure

多自由度隔震结构模型各层的质量、刚度、阻尼等主要参数如表 2 所示,其中隔震结构的屈重比均为 0.06。TMD 安装示意也如图 19 所示,将 TMD 的质量设定为 508 500 kg,与隔震结构总质量的比为 0.1,由式 (3)、(9) 计算获得 TMD 的刚度和阻尼比分别为 2 378 kN/m 和 335 870 kg/s。

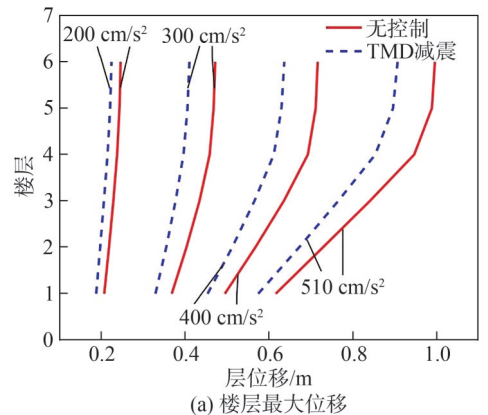
表 2 多自由度隔震结构的主要参数

Tab. 2 Main parameters of the multi-degree of freedom isolated structure

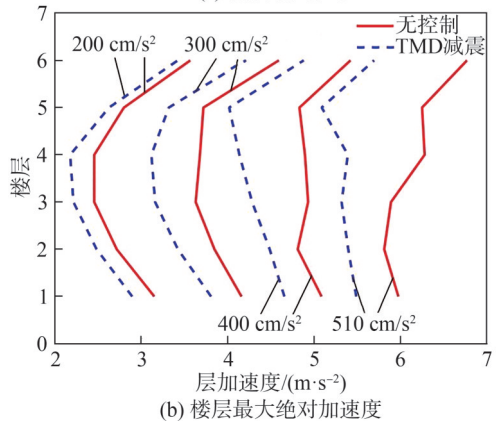
| 楼层 | 质量/kg | 初始刚度/(kN·m ⁻¹) | 阻尼系数/(kg·s ⁻¹) | 屈服位移/m | 刚度比 |
|-----|---------|----------------------------|----------------------------|---------|------|
| 隔震层 | 880 000 | 400 000 | 0 | 0.007 5 | 1:13 |
| 1 | 880 000 | 860 000 | 2 200 000 | 0.012 0 | 1:10 |
| 2 | 880 000 | 730 000 | 1 850 000 | 0.012 0 | 1:10 |
| 3 | 880 000 | 600 000 | 1 700 000 | 0.012 0 | 1:10 |
| 4 | 880 000 | 600 000 | 1 700 000 | 0.012 0 | 1:10 |
| 5 | 685 000 | 600 000 | 1 000 000 | 0.012 0 | 1:10 |

4.2 减震效果

依据第 3.2 节的分析结果仅选取 50 条远场长周期地震动作为输入荷载。图 20 给出了不同隔震结构在减震前后各楼层的最大层位移和绝对加速度。



(a) 楼层最大位移



(b) 楼层最大绝对加速度

图 20 减震前后不同隔震结构的楼层最大层位移和绝对加速度

Fig. 20 Maximum floor displacement and absolute acceleration of isolated structures with and without TMD before and after damping

由图 20 可以看出:TMD 对隔震结构的楼层位移和绝对加速度均发挥了明显的减震效果,其对各楼层位移的减震率均在 10% 左右;当输入地震动加速度幅值为 510 cm/s^2 时,TMD 对楼层绝对加速度的减震率可达到 18.6%。

5 结 论

本文研究了在近断层脉冲型地震动和远场长周期地震动作用下隔震结构的动力响应,并对隔震结构进行了调谐减震设计与分析,得到如下主要结论:

1) 在长周期地震动作用下,隔震层的位移响应较大,为控制隔震层的最大位移,建议将隔震层的屈重比取值为 0.06 以上;当着重考虑上部结构非结构构件的安全性时,屈重比取值不宜超过 0.07,以避免上部结构的加速度响应过大。

2) 在远场长周期地震动作用下,调谐减震对隔震结构的隔震层位移和上部结构加速度响应的控制效果随输入地震动强度等级的增大而提升,因此控制隔震结构在罕遇和极罕遇地震动作用下的动力响应具有有效性。

3) 在近断层脉冲地震动作用下,调谐减震发挥作用的滞后性造成其对隔震层位移的减震效果较差;且屈重比越大,减震效果越差,甚至出现负面效应;但调谐减震对上部结构的加速度响应具有相对明显的减震效果。

4) 在不同强度等级地震动作用下,隔震层非线性程度的差异会造成调谐减震失谐,进而会造成其减震效果有显著差异,因此,需要综合考虑地震动输入等级进行调谐减震的设计。

附录见本刊网络版,扫描标题旁的二维码可阅读网络全文。

参考文献:

[1] Li Xuchong, Wang Wenke, Wu Di, et al. The bounded method and characteristics analysis for long-period ground motions [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2014, 27(5): 685–692. [李雪红, 王文科, 吴迪, 等. 长周期地震动的特性分析及界定方法研究[J]. *振动工程学报*, 2014, 27(5): 685–692.]

[2] Shahi S K, Baker J W. An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 104(5): 2456–2466.

[3] Li Yingmin, Liu Shuoyu, Dai Minghui. Long-period ground motion and its application in seismic checking of super high-rise buildings [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(11): 53–60. [李英民, 刘烁宇, 戴明辉. 长周期地震动及其在超高层建筑抗震校验中的应用[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(11): 53–60.]

[4] Guo Yan, Liu Wenguang, He Wenfu, et al. Dynamic response analysis of super high-rise frame-core tube structure

under long-period ground motions [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(12): 68–77. [郭彦, 刘文光, 何文福, 等. 长周期地震波作用下超高层框架-核心筒减震结构动力响应分析[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(12): 68–77.]

[5] Li Zhongxian, Wen Dongbin, Shi Yundong, et al. A frequency-dependent variable damping control method for base-isolated structures under ground motions with different frequency characteristics [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 165: 107717.

[6] Pan Peng, Zeng Yi, Cao Yingri, et al. State-of-the-art of research on the building structure isolation technologies [J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(5): 39–54. [潘鹏, 曾一, 曹迎日, 等. 建筑结构隔震技术研究进展[J]. *工程力学*, 2024, 41(5): 39–54.]

[7] Pan Yi, Gao Haiwang, Xiong Yaoqing, et al. Seismic damage investigation and analysis of energy-dissipated and seismically isolated buildings in Ms 6.8 Luding earthquake [J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(12): 122–136. [潘毅, 高海旺, 熊耀清, 等. 泸定 6.8 级地震震害调查与分析[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(12): 122–136.]

[8] Pan Yi, Shi Shengjie, Chang Zhiwang, et al. Quantitative study on amplification effect of base-isolated structures subjected to near-fault pulse-like ground motions [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(11): 8–16. [潘毅, 时胜杰, 常志旺, 等. 近断层脉冲地震动对基础隔震结构放大效应的量化分析[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(11): 8–16.]

[9] Pan Yi, Liu Yongxin, Song Jiayu, et al. Study on horizontal seismic reduction factor of base-isolated structure subjected to near-fault pulse-like ground motions [J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(1): 33–42. [潘毅, 刘永鑫, 宋佳雨, 等. 近断层脉冲型地震动对基础隔震结构水平向减震系数的影响分析[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(1): 33–42.]

[10] Güneş N. Effects of near-fault pulse-like ground motions on seismically isolated buildings [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 52: 104508.

[11] Li Yingmin, Zhao Chenxiao, Tan Qian. Classification method for long period ground motions based on component decomposition with HHT [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(7): 164–171. [李英民, 赵晨晓, 谭潜. 基于 HHT 地震动分量分离的长周期地震动界定方法[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(7): 164–171.]

[12] Dai Minghui. Quantitative identification and simulation of far-field long-period ground Motion [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. [戴明辉. 远场长周期地震动量化识别与模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.]

[13] Wang Bin, Zhang Zhanhong, Chen Peng, et al. Self-centering capability of seismically isolated structures after earthquakes [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, 55(5): 5–13. [王斌, 张展宏, 陈鹏, 等. 隔震结构震后复位能力研究[J]. *工程科学与技术*, 2023, 55(5): 5–13.]

[14] Chen Ruisheng, Wu Jinbiao, Liu Yanhui, et al. Optimization re-

- search for base-isolated structures with fluid viscous dampers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(11): 93–100. [陈瑞生, 吴进标, 刘彦辉, 等. 黏滞阻尼器-基础隔震混合体系优化研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(11): 93–100.]
- [15] de Domenico D, Ricciardi G. Earthquake-resilient design of base isolated buildings with TMD at basement: Application to a case study [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 113: 503–521.
- [16] Anajafi H, Medina R A. Comparison of the seismic performance of a partial mass isolation technique with conventional TMD and base-isolation systems under broad-band and narrow-band excitations [J]. *Engineering Structures*, 2018, 158: 110–123.
- [17] Dai Kaoshan, Luo Xiang, Lyu Yang, et al. Collision risk analysis of base-isolation retrofitted adjacent buildings connected by a corridor bridge [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(5): 9–16. [戴靠山, 罗翔, 吕洋, 等. 带连廊的相邻建筑基础隔震改造碰撞危险性分析[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(5): 9–16.]
- [18] Kang Yingjie, Peng Lingyun, Liu Qingkuan, et al. Seismic control of tuned dampers for seismic isolated structures under near-fault pulse-like ground motions [J]. *Engineering Mechanics*, 2025, 42(6): 105–116. [康迎杰, 彭凌云, 刘庆宽, 等. 近断层脉冲地震作用下调谐型阻尼器对隔震结构的减震控制[J]. *工程力学*, 2025, 42(6): 105–116.]
- [19] Reggio A, de Angelis M. Optimal energy-based seismic design of non-conventional tuned mass damper (TMD) implemented via inter-story isolation [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2015, 44(10): 1623–1642.
- [20] Qian Feng, Luo Yifan, Sun Hongxin, et al. Optimal tuned inerter dampers for performance enhancement of vibration isolation [J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109464.
- [21] Zhang Guanping, Liu Yanhui, Tan Ping, et al. Study on optimization of passive viscous damper and passive hybrid control seismic response [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(3): 70–77. [张冠平, 刘彦辉, 谭平等. 基于主动控制优化被动黏滞阻尼器及混合隔震研究[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(3): 70–77.]
- [22] Zhou Jian, Li Xiaojun, Li Yaqi, et al. Comparative analysis and transformation relations between China and the US site classification systems in building seismic code provisions [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2021, 43(4): 521–532. [周健, 李小军, 李亚琦, 等. 中美建筑抗震设计规范中工程场地类别的对比和换算关系[J]. *地震学报*, 2021, 43(4): 521–532.]
- [23] Wang Bin, Zhang Zhanhong, Chen Peng, et al. Self-centering capability of seismically isolated structures after earthquakes [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, 55(5): 5–13. [王斌, 张展宏, 陈鹏, 等. 隔震结构震后复位能力研究[J]. *工程科学与技术*, 2023, 55(5): 5–13.]
- [24] Huang Rui, Yao Peixin. Influence of yield coefficient of isolation layer on performance of base isolation structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(11): 116–124. [黄锐, 姚佩歆. 隔震层屈服系数对基础隔震结构性能的影响[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(11): 116–124.]
- [25] Zhu Hongping, Tan Ping, Ye Kun. Investigation of seismic performance of LRB base-isolated structures subjected to extremely rare earthquakes [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(10): 122–131. [朱宏平, 谭平, 叶昆. 极罕遇地震作用下铅芯橡胶隔震支座基础隔震结构抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(10): 122–131.]
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑隔震设计标准: GB/T 51408—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [27] Pan Peng, Zamfirescu D, Nakashima M, et al. Base-isolation design practice in Japan: Introduction to the post-Kobe approach [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2005, 9(1): 147–171.
- [28] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 基于保持建筑正常使用功能的抗震技术导则: RISN-TG046—2023 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.
- [29] Yu Wenzheng, Tao Zhong, Pan Wen, et al. Comparative study on equivalent linearization calculation method in design of seismic isolated structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(1): 78–87. [余文正, 陶忠, 潘文, 等. 隔震结构等效线性化计算方法对比研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(1): 78–87.]

Dynamic Response and Seismic Control of Isolated Structures Using a Tuned Mass Damper Under Near-fault Pulse-type and Far-fault Long-period Ground Motions

KANG Yingjie^{1,2,3}, ZHANG Zewen⁴, LIU Qingkuan^{1,2,3}, PAN Peng^{5*}

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China;

3. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

4. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

5. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract:

Objective Long-period ground motions have a serious impact on long-period structures and may even cause damage. Currently, seismic isolation technology has demonstrated excellent technical advantages. However, it remains essential to evaluate whether isolated structures with long-

period characteristics will be significantly affected by long-period ground motions. Furthermore, it is necessary to verify whether incorporating a tuned mass damper (TMD) can improve the seismic performance of isolated structures subjected to such unique ground motion characteristics.

Methods To ensure the reliability of the analysis results, 50 near-fault pulse-type ground motions and 50 far-fault long-period ground motions were selected as input seismic loads based on relevant screening criteria. For the near-fault pulse-type ground motions, NGA-West2 is used as the initial screening database. The correlations between pulse period and response spectrum, as well as between PGV/PGA and response spectrum, are analyzed. Finally, a threshold of $PGV/PGA > 0.2$ is used as an additional screening criterion. For the far-fault long-period ground motions, the weighted square average of the periodicity of the ground motion amplification coefficient spectrum between 2 s and 6 s is considered as the boundary parameter of ground motions, with a threshold value greater than 0.4 defining long-period ground motions. The acceleration response spectra of the selected records are significantly higher than the standard design response spectrum, exhibiting obvious long-period characteristics. Based on the dynamic characteristics of isolated structures, 19 simplified single-degree-of-freedom isolated structure models are established, each with a yield displacement of 0.75 mm, post-yield stiffness ratio of 1 : 13, and yield-weight ratios ranging from 0.01 to 0.10. The isolation bearing adopts a bilinear model. To efficiently process large amounts of data, a MATLAB program based on the Newmark- β method was self-developed, and its accuracy was verified through comparison with results obtained from commercial software. The amplitudes of the selected ground motion acceleration are adjusted to five intensity levels of 200, 300, 400, 510, and 600 cm/s^2 . Under the above calculation conditions, the maximum displacement response of the isolation layer and the maximum acceleration response of the superstructure were obtained through elastic-plastic time-history analyses. Subsequently, the correlations among the dynamic responses of the isolated structure, post-yield stiffness ratio, ground motion type, and ground motion intensity were analyzed. The tangent stiffness corresponding to the maximum displacement was used to define the equivalent stiffness, and the equivalent damping ratio was determined according to the principle of energy consumption. The parameters of the TMD were optimized by controlling the mean square value of the structural displacement response. Finally, the damping rate of the TMD on the peak displacement of the isolation layer and the acceleration of the superstructure was analyzed. The study considered both single-degree-of-freedom and multi-degree-of-freedom isolated structures.

Results and Discussions The results indicate that under long-period ground motions, the isolation layer exhibits large displacement responses. To effectively control the maximum displacement of the isolation layer, the yield-weight ratio of the isolation layer should be more than 0.06. However, considering the safety of non-structural components in the superstructure, the yield-weight ratio should not exceed 0.07 to avoid excessive acceleration responses in the superstructure. Under far-fault long-period ground motions, the control effect of the TMD on the displacement of the isolation layer and the acceleration response of the superstructure increases with an increase in the input ground motion intensity. The TMD is effective in controlling the dynamic response of the isolated structure subjected to rare and extremely rare ground motions. In contrast, under near-fault pulse-type ground motions, the hysteretic delay in the tuning response of the TMD causes a poor damping effect on the displacement of the isolation layer. As the yield-weight ratio increases, the damping effect worsens and may even become negative. Nevertheless, the acceleration response of the superstructure has a relatively obvious damping effect.

Conclusion Under different intensity levels of ground motion, the difference in the degree of nonlinearity of the isolation layer can cause detuning of the TMD, which might lead to significant differences in the damping effect. Therefore, the input level of the ground motion must be carefully considered in the design of TMDs.

Key words: long-period ground motions; seismic isolated structures; tuned mass damper; near-fault pulse-like; far-fault long-period

(编辑 赵 婧)

引用格式: Kang Yingjie, Zhang Zewen, Liu Qingkuan, et al. Dynamic response and seismic control of isolated structures using a tuned mass damper under near-fault pulse-type and far-fault long-period ground motions[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(6): 81–92. [康迎杰, 张泽文, 刘庆宽, 等. 近断层脉冲型和远场长周期地震动作用下隔震结构的动力响应与调谐减震控制[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(6): 81–92.]