

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.12.020

水平及竖向地震共同作用下 高层结构振动控制策略研究

储如意¹, 汪 权^{1,2}, 周超杰³, 崔 腾¹

(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; 3. 中铁四局设计研究院, 安徽 合肥 230022)

摘 要:针对高层结构在水平及竖向(双向)地震共同作用下的振动控制问题,基于隔震和调谐质量阻尼器振动控制原理,文章研究单一组合调谐质量阻尼器(single combined tuned mass damper, SC-TMD)体系、多重组合调谐质量阻尼器(multiple combined tuned mass damper, MC-TMD)体系、隔震体系、SC-TMD 与隔震混合体系、MC-TMD 与隔震混合体系 5 种控制策略在双向地震作用下结构的振动控制效果,选取 20 层钢结构 Benchmark 模型,采用 ANSYS 软件建立各体系的有限元模型,分析对比结构在双向地震作用下水平和竖向的振动响应。结果表明:MC-TMD 体系、SC-TMD 体系及 SC-TMD 与隔震混合体系对水平振动的控制效果更优;隔震体系抑制水平响应明显但会放大竖向加速度;MC-TMD 与隔震混合体系对 2 个方向的结构振动响应均有良好的抑制效果。

关键词:振动控制;双向地震;组合调谐质量阻尼器;多重阻尼器

中图分类号:TU973.212;O328 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)12-1709-06

Research on vibration control strategy of high-rise structures under joint action of horizontal and vertical earthquakes

CHU Ruyi¹, WANG Quan^{1,2}, ZHOU Chaojie³, CUI Teng¹

(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; 3. China Railway Fourth Bureau Design and Research Institute, Hefei 230022, China)

Abstract: Aiming at the vibration control problem of high-rise structures under the joint action of horizontal and vertical (bidirectional) earthquakes, based on the vibration control principle of seismic isolation and tuned mass damper (TMD), the structural vibration control effect of five control strategies of the single combined tuned mass damper (SC-TMD) system, multiple combined tuned mass damper (MC-TMD) system, seismic isolation system, hybrid system of SC-TMD and seismic isolation, and hybrid system of MC-TMD and seismic isolation under the action of bidirectional earthquake was studied. Based on the Benchmark 20-story steel structure model, the finite element model of each system was established by ANSYS software, and the vibration response of the structure in both horizontal and vertical directions under the action of bidirectional earthquake was analyzed. The results show that the MC-TMD system, SC-TMD system, and hybrid system of SC-TMD and seismic isolation have better control effect on horizontal vibration. The horizontal response of the isolation system is obvious, but it will lead to the increase of vertical acceleration. The hybrid system of MC-TMD and seismic isolation has good suppression effect on the vibration response of the structure in both

收稿日期:2023-03-13; **修回日期:**2023-03-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878234);合肥工业大学 2022 年省级大学生创新创业训练计划资助项目(S202210359114)

作者简介:储如意(1998—),男,安徽安庆人,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.

directions.

Key words: vibration control; bidirectional earthquakes; combined tuned mass dampers; multiple dampers

0 引 言

地震作为最主要的自然灾害给人类带来了巨大的损失,故建筑结构的抗震是人类不得不面临的问题。地震本身是复杂多向的震动,二维平面上具有竖向加速度分量和水平加速度分量,宏观上可造成结构在竖向方向和水平方向的振动,一般建筑结构的竖向刚度较大,抗侧移刚度较小,因此,大多建筑结构在地震作用下的破坏都是由水平加速度分量造成的,而在地震影响范围中的高烈度地区,竖向震动对结构的影响十分明显,造成的破坏不亚于水平震动。文献[1-2]研究水平及竖向地震共同作用下的结构响应;文献[3]通过对近场地震水平和竖向反应谱分析,结果表明近场地震的竖向作用更为明显。因此,在对结构振动控制的研究中,文献[4]同时考虑地震造成结构的竖向振动和水平振动,其思路更符合实际情况。

调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)在结构振动控制中已被广泛应用。多重调谐质量阻尼器(multiple tuned mass damper, MTMD)由多个子 TMD 构成,相较于单个 TMD,MTMD 有更好的振动控制稳定性。单个 TMD 在实际工程中的安装较为耗时耗力,采用多重分布式的方式对实际工程的应用具有一定的参考价值。文献[5-6]研究 MTMD 在振动控制中的应用;文献[7]将分布式多重调谐质量阻尼器(distributed multiple tuned mass damper, DMTMD)分别与单个 TMD 和多重 TMD 的控制效果比对,其结论对工程应用有着积极的指导意义。

建筑结构隔震层的研究和应用已经有 100 多年的历史,文献[8-9]研究结构隔震技术,发现其对结构的水平振动有良好的减弱效果。而当结构受竖向或双向地震作用时,对隔震层所起作用效果的相关研究并不多,因此具有一定的研究价值。文献[10]将 TMD 与基础隔震结合起来抵抗地震和风振作用,得到两者混合时有良好的控制效果和鲁棒性;文献[11]利用有限元软件研究隔震层与 TMD 混合控制体系,结果表明,该混合振动控制方法可以有效地抑制结构响应;文献[4]在混合控制的基础上研究其在水平与竖向地震共同作用下结构的减振效果。

本研究提出一种新型组合调谐质量阻尼器

(combined tuned mass damper, C-TMD),即将水平方向调谐质量阻尼器与竖向方向调谐质量阻尼器进行组合,分别抑制双向地震作用下结构水平和竖向方向的振动响应。分别建立单一组合调谐质量阻尼器(single combined tuned mass damper, SC-TMD)、多重组合调谐质量阻尼器(multiple combined tuned mass damper, MC-TMD)、隔震、SC-TMD 与隔震混合、MC-TMD 与隔震混合这 5 种控制体系的有限元模型,研究结构在双向地震作用下采用不同策略时的振动控制效果。

1 5 种控制体系的有限元模型

1.1 Benchmark 模型标准结构的有限元模型

本文建立了由美国土木工程师协会提出的第 3 阶段 20 层钢结构 Benchmark 模型的 ANSYS 有限元模型^[12],选取该模型南北方向的一榀框架,故在软件中采用平面杆系结构模型,框架的梁柱单元采用 2D 塑性梁元,即 Beam23,构件的单元模型为双线性随动强化模型,整个模型有 190 个节点,284 个单元,在软件建模时采用直接连接节点成单元的方式。假定各层楼板水平方向刚度无穷大,则采用自由度集命令使整个楼板上单元水平方向位移一致;结构梁柱均采用工字钢,其材料密度、泊松比、阻尼等属性的取值参考文献[12]。为检验该模型的准确度,将其固有周期与文献[12]进行对比,见表 1 所列,该模型前 5 阶模态与文献[12]吻合度高。

表 1 ANSYS 模型的固有周期对比 单位: s

阶次	1	2	3	4	5
文献[12]	3.85	1.33	0.77	0.55	0.42
ANSYS	3.85	1.33	0.77	0.55	0.41

1.2 单一组合调谐质量阻尼器的参数

在结构顶层中跨跨中附设 SC-TMD,有关单一组合阻尼器质量、刚度、阻尼的选取,文献[7]研究表明当阻尼器质量比为 0.05 时控制效果最优;根据文献[13],SC-TMD 的刚度和阻尼由其质量比、最优频率比、最优阻尼比确定,可以求得 SC-TMD 水平和竖向的等效刚度 K 为 70 426 N/m、阻尼 c 为 13 378 N·m/s、质量为 290 050 kg,此时结构频率为 0.263 Hz、阻尼器频率为 0.248 Hz,最

优频率比为 0.942。

SC-TMD 示意图如图 1 所示。图 1 中: K_h 、 c_h 分别为其水平方向的刚度、阻尼; K_v 、 c_v 分别为其竖直方向的刚度、阻尼; m_d 为其质量。

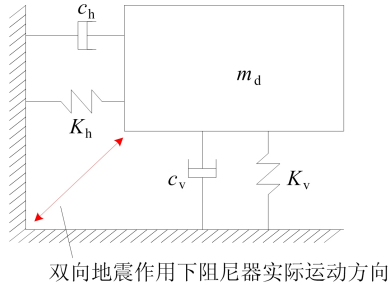


图 1 SC-TMD 示意图

1.3 MC-TMD 的参数

为了与单一调谐质量阻尼器进行对比,将 MC-TMD 分别设置在结构顶层各跨跨中,由文献 [7]可知,每个子结构的有限元单元构成同 SC-TMD,质量取 SC-TMD 的 1/5,即 58 010 kg,同理求得其等效刚度和阻尼系数分别为 15 483 N/m、12 888 N·m/s。

1.4 隔震层的模拟

简化隔震支座参数有屈服前刚度 K_q 、屈服后刚度 K_h 、屈服力 Q_d 、阻尼比 ξ 。水平方向采用组合单元 combin40 来模拟阻尼及非线性弹簧,考虑其弹簧在水平方向上产生变形,单元参数取值为刚度 $K_1 = K_q - K_h = 3 \times 10^6$ N/m、 $K_2 = K_h = 1 \times 10^6$ N/m,阻尼系数 $C_h = 0.272$,质量 $m_1 = 0$,间隙大小 $d_{gap} = 0$,界限滑移力 $F_{slide} = 0$ 。

竖直方向采用 combin14 单元模拟,考虑其弹簧在竖直方向上产生变形,该单元为一维弹阻元,适合用于模拟线性弹簧,其参数有刚度 K_{bl} 、阻尼系数 C_{bl} 、初始长度 L_s 、初始力 F_s 。其中:竖向的刚度 $K_v = 3.45 \times 10^9$ N/m,阻尼系数 $C_v = 0.272$,其他参数见文献[10]。

1.5 5 种控制策略的设计

本文设计 3 种单一控制策略和 2 种混合控制策略:体系 a 在结构顶层中跨跨中设置 SC-TMD;体系 b 在结构顶层各跨跨中设置 MC-TMD;体系 c 在一层柱顶设置隔震层;体系 d 在 SC-TMD 与隔震层混合控制;体系 e 在 MC-TMD 与隔震层混合控制。

限于篇幅,本文仅给出 2 种混合体系有限元模型,如图 2 所示。图中一层柱顶标注为隔震层,顶层标注为调谐质量阻尼器的布置。

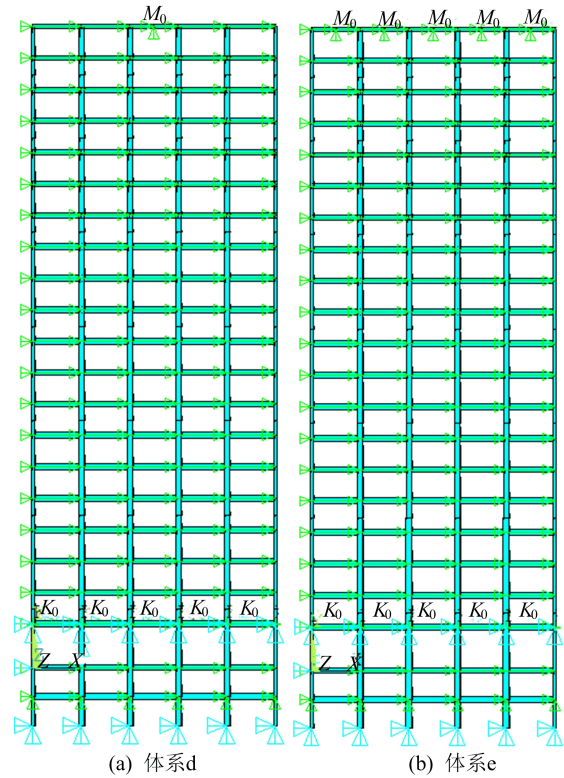


图 2 混合体系有限元模型

2 地震波的选取

本文分别选用 Elcentro 波、Taft 波、天津波的竖直和水平两方向的地震加速度记录作为地震动输入,地震波采样步长、持时及地震动峰值加速度(peak ground acceleration,PGA)见表 2 所列,本文主要研究结构在两方向地震作用下的各种控制效果对比,未将地震波调幅。

表 2 地震波参数

地震波	方向	时长/s	步长/s	PGA/(cm/s ²)
Elcentro 波	水平	30.00	0.02	341.70
Elcentro 波	竖向	30.00	0.02	193.70
天津波	水平	38.24	0.01	145.80
天津波	竖向	38.24	0.01	73.10
Taft 波	水平	30.00	0.02	152.70
Taft 波	竖向	30.00	0.02	106.40

3 结构振动控制分析

3.1 水平方向控制评价指标

为了集中评价不同控制策略,引入水平方向控制效果评价指标 H_1 、 H_2 和 H_3 ,定义如下:

$$H_1 = \max \left\{ \frac{\max |X_i(t)|}{X_i^{\max}} \right\}, i = 1, 2, \dots, 20 \quad (1)$$

$$H_2 = \max \left\{ \frac{\max | \ddot{X}_i(t) |}{\ddot{X}_i^{\max}} \right\}, i = 1, 2, \dots, 20 \quad (2)$$

$$H_3 = \max \left\{ \frac{\max | F_d(t) |}{F^{\max}} \right\} \quad (3)$$

其中: $| X_i(t) |$ 、 $| \ddot{X}_i(t) |$ 、 $\max | F_d(t) |$ 分别为各控制体系下第 i 层的位移绝对值、加速度绝对值、底层柱剪力峰值; X_i^{\max} 、 \ddot{X}_i^{\max} 、 F^{\max} 分别为无控结构第 i 层的最大位移、最大加速度、底层柱剪力峰值。

3.2 结构水平响应分析

结构在 3 种双向地震波作用下采用各控制策略时的水平响应评价指标见表 3 所列。

表 3 水平方向 5 种控制策略评价指标比较 %

控制策略	指标	Elcentro 波	Taft 波	天津波
体系 a	H_1	87.09	49.67	89.61
	H_2	84.78	90.86	104.63
	H_3	61.51	52.73	62.84
体系 b	H_1	85.06	57.77	88.83
	H_2	81.67	88.35	107.68
	H_3	19.50	12.11	20.00
体系 c	H_1	67.49	49.32	60.94
	H_2	51.61	45.70	88.62
	H_3	1.17	0.76	0.69
体系 d	H_1	64.92	42.06	59.02
	H_2	50.94	41.15	84.23
	H_3	1.70	0.47	0.68
体系 e	H_1	69.98	46.86	59.24
	H_2	50.83	36.66	79.03
	H_3	4.37	2.16	3.37

1) 位移峰值。由表 3 可知: 设有隔震的体系其指标 H_1 为 42.06%~69.98%, 明显优于不设隔震体系的 49.69%~89.61%; 其中体系 a 与体系 b 对位移的控制效果相差不大; 带有隔震层体系中指标 H_1 最小的是体系 d, 体系 c 和体系 e 相差不大。各种控制策略在 Taft 波下控制表现更为突出, 其指标 H_1 均不超过 57.77%。

2) 加速度峰值。由表 3 可知: 设有隔震的体系其指标 H_2 为 36.66%~88.62%, 不设隔震体系的 H_2 为 81.67%~107.68%; 各种控制策略在 Elcentro 波和 Taft 波下的控制表现比在天津波下更好, 其中在天津波作用下, 较于无控结构, 体系 a 和体系 b 对结构水平加速度峰值有稍放大的现象。

3) 基底剪力峰值。由表 3 可知: 设有隔震的体系控制效果最好, 其指标 H_3 均不超过 4.37%;

未设隔震的体系中, 相较于体系 a, 体系 b 对基底剪力的控制有显著优势, 其 H_3 均不超过 20%。

3.3 竖直方向控制评价指标

为了集中评价不同控制策略, 引入竖直方向控制效果评价指标 V_1 、 V_2 和 V_3 , 定义如下:

$$V_1 = \max \left\{ \frac{\max | X_i(t) |}{X_i^{\max}} \right\}, i = 1, 2, \dots, 20 \quad (4)$$

$$V_2 = \max \left\{ \frac{\max | \ddot{X}_i(t) |}{\ddot{X}_i^{\max}} \right\}, i = 1, 2, \dots, 20 \quad (5)$$

$$V_3 = \left\{ \frac{\max | N_d(t) |}{N^{\max}} \right\} \quad (6)$$

其中: $| X_i(t) |$ 、 $| \ddot{X}_i(t) |$ 、 $\max | N_d(t) |$ 分别为各控制体系下第 i 层的位移绝对值、加速度绝对值、底层边柱轴力峰值; X_i^{\max} 、 \ddot{X}_i^{\max} 、 N^{\max} 分别为无控结构第 i 层最大位移、最大加速度、底层边柱轴力峰值。

3.4 结构竖向响应分析

结构在 3 种双向地震波作用下采用各控制策略时的竖向响应评价指标见表 4 所列。

表 4 竖直方向 5 种控制策略评价指标比较 %

控制策略	指标	Elcentro 波	Taft 波	天津波
体系 a	V_1	86.10	68.42	91.06
	V_2	87.66	79.29	88.72
	V_3	91.73	67.80	96.91
体系 b	V_1	95.90	81.05	89.61
	V_2	89.48	81.69	75.95
	V_3	95.60	65.63	98.99
体系 c	V_1	50.35	53.54	54.09
	V_2	132.12	133.97	137.63
	V_3	1.68	0.40	0.28
体系 d	V_1	45.59	44.07	46.76
	V_2	112.65	90.60	125.60
	V_3	1.70	0.42	0.28
体系 e	V_1	42.12	37.91	49.62
	V_2	66.91	49.72	86.89
	V_3	1.72	0.41	0.27

1) 位移峰值。由表 4 可知: 设有隔震的体系其 V_1 范围为 37.91%~54.09%, 其对最大位移的控制明显优于体系 a 和体系 b, 而体系 a 比体系 b 控制效果略好, 但体系 e 比体系 d 控制表现更优。

2) 加速度峰值。由表 4 可知: 体系 a 和体系 b 控制效果相差不大; 体系 c 和体系 d 均会放大竖向加速度, 指标 V_2 最大值达到 137.63%; 体系

e 对竖向加速度的控制有良好的效果,其 V_2 为 49.72%~86.89%。

3) 底层边柱轴力峰值。由表 4 可知:体系 a 和体系 b 控制效果相当,两者在 Taft 波下控制效果更明显,其指标分别为 67.8%、65.63%;设有隔震的体系指标较小,均不超过 1.72%,即双向地震作用下,设有隔震层的结构更易发生重心偏移,边柱轴力显著减小。

限于篇幅,本文仅给出 3 种地震作用下 5 种控制策略各楼层水平和竖向加速度峰值,如图 3、图 4 所示。

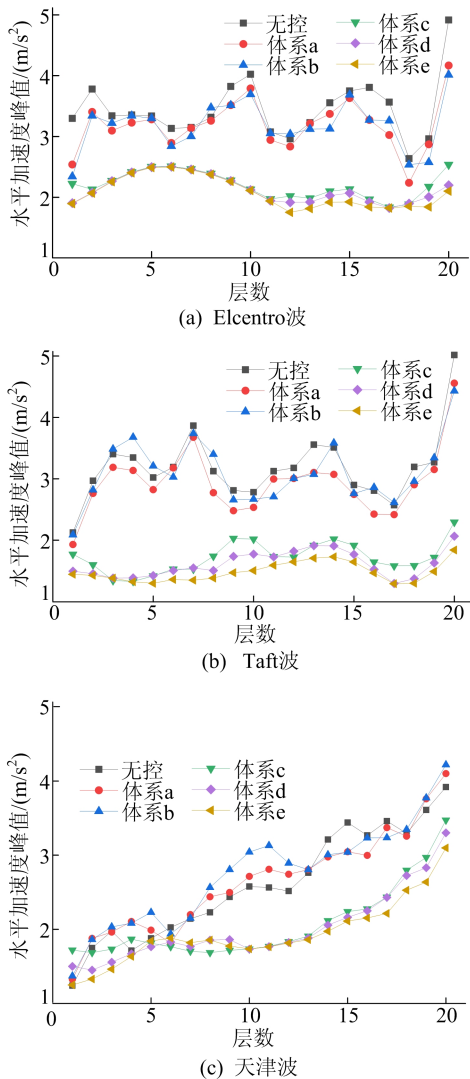


图 3 3 种地震波作用下水平加速度峰值

由图 3 可知,整体上 5 种控制策略对楼层水平加速度都有一定的控制效果,带有隔震层的体系明显优于仅设 TMD 的体系。其中,体系 a 和体系 b 控制效果接近。带隔震层的体系中,控制效果从优到劣依次为体系 e、体系 d、体系 c。此

外,在天津波和 Taft 波下,体系 a 和体系 b 对部分楼层的加速度有放大现象。

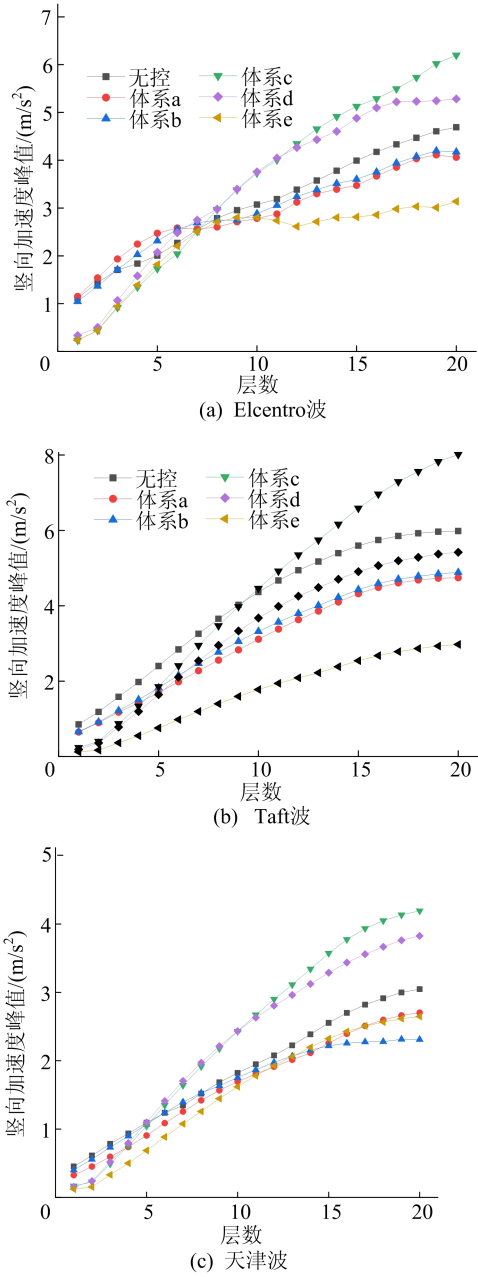


图 4 3 种地震波作用下竖向加速度峰值

由图 4 可知,对竖向加速度整体控制效果最好的是体系 e,其次是体系 a 和体系 b,而体系 c 和体系 d 的控制效果随着楼层数的增大逐渐变差。其中:在 Elcentro 波作用下,体系 c、d 均会放大 7 层以上楼层的加速度;在 Taft 波作用下,体系 c 会放大 10 层以上楼层的加速度;在天津波下,体系 c、d 均会放大 5 层以上楼层的加速度。

综上可知,同一控制策略在不同地震作用下的效果也会不同,说明 TMD 和隔震结构的设计需考虑具体地震波。体系 e 对水平和竖向动力响应都有良好的控制效果,其他各控制策略各有优

劣之处。

4 结 论

本研究基于 20 层钢结构 Benchmark 模型展开,采用 5 种不同的振动控制策略,分析结构在 3 种地震波双向作用下的振动响应,结论如下。

1) 对于水平响应,除了在天津波下体系 a 和体系 b 指标 H_2 分别为 104.63% 和 107.68%,其他各体系的指标均不超过 100%,说明将 TMD 分散布置的控制效果与地震波种类有关;体系 b 指标 H_3 均不超过 20%,说明相对于单个阻尼器,分布式阻尼器对剪力控制有更好的效果;设有隔震的体系其指标 H_3 不超过 4.37%,其他指标均较小,说明隔震层对水平方向的各动力响应控制效果均较好,其中对剪力控制显著。

2) 对于竖向响应,体系 a 与体系 b 整体上控制效果接近,即仅将 TMD 分散布置对竖向动力响应的控制无明显效果;设有隔震层的体系指标 V_1 和 V_3 均较小,说明隔震层能有效减小地震作用下结构的竖向位移,且在双向地震作用下明显改变柱受力;体系 c 和体系 d 的指标 V_2 范围为 90.60%~137.63%,体系 e 的指标 V_2 不超过 86.89%,说明隔震层会放大竖向加速度,但若将 TMD 分散布置与隔震层混合使用,隔震层在竖向地震作用下放大动力响应的缺陷就会被克服,为结构减隔振提供一种新的思路。

[参 考 文 献]

- [1] 王海东,常广东,盛旺成. 近场水平、竖向地震共同作用下地基-基础-RC 框架结构抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动,2017,37(1):192-198.
- [2] 龚春玉. 竖向与水平地震作用下带 PSRC 空腹桁架转换层框架结构抗震性能分析[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [3] 尹攀,胡其高,李鹏. 近场地震水平及竖向反应谱及设计谱[J]. 工业建筑,2013,43(3):57-60,66.
- [4] 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.
- [5] PELLIZZARI F, MARANO G C, PALMERI A, et al. Robust optimization of MTMD systems for the control of vibrations[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2022, 70: 1-18.
- [6] FRANS R, ARFIADI Y. Designing optimum locations and properties of MTMD systems[J]. Procedia Engineering, 2015, 125:892-898.
- [7] 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.
- [8] 袁胜利. 长周期地震动作用下高层隔震结构地震响应分析[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
- [9] ZHANG S R, HU Y C, LI S H, et al. Study on seismic response characteristics of the interlayer isolation structure[J]. Journal of Vibroengineering, 2021, 23(8):1765-1784.
- [10] 王肖东. 水平作用下建筑结构隔震与调谐质量阻尼器混合振动控制研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.
- [11] 汤涛. 地震作用下附设 TMD 的混合层间隔震体系振动控制研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
- [12] 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,2003:496-509.
- [13] 秦丽. 结构风振与地震响应的 TMD 控制[D]. 北京:北京工业大学,2008.
- [1] 王海东,常广东,盛旺成. 近场水平、竖向地震共同作用下地基-基础-RC 框架结构抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动,2017,37(1):192-198.
- [2] 滕锦光,陈建飞,SMITH S T,等. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [3] PESSIKI S, HARRIES K A, KESTNER J T, et al. Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(4):237-245.
- [4] American Concrete Institute. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures; ACI 440. 2R-17[S]. Farmington Hills; American Concrete Institute, 2017:1-65.
- [5] 王代玉. FRP 加固非延性钢筋混凝土框架结构抗震性能试验与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 1708 页)

- [8] OUYANG L J, GAO W Y, ZHEN B, et al. Seismic retrofit of square reinforced concrete columns using basalt and carbon fiber-reinforced polymer sheets; a comparative study[J]. Composite Structures, 2017, 162:294-307.
- [9] 李勇,解梦飞,张翰誉,等. 玄武岩纤维布约束典型钢筋混凝土桥墩抗震性能提升研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(6):74-81.
- [10] LI Y, XIE M F, LIU J B. Experimental study on the seismic behaviour of reinforced concrete bridge piers strengthened by BFRP sheets[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019:1-11.
- [11] 冯鹏,强翰霖,叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3):36-46.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015:

(责任编辑 张 镗)