

文章编号:1673-2049(2015)02-0065-06

新建减震结构优化设计方法

陈 敏¹, 刘 畅², 邹银生³

(1. 中南林业科技大学 土木工程与力学学院, 湖南 长沙 410004; 2. 悉地国际设计顾问(深圳)有限公司, 广东 深圳 518048; 3. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:基于隔震理论提出减震结构优化设计方法,对某 8 度区 11 层框架结构进行了减震设计,通过附加粘滞阻尼器达到设防目标,根据振型分析调整隔震层层高,使安装阻尼器楼层位置降低至底部 2 层;将选取的 7 组加速度时程曲线分为 4 种工况,采用 ETABS 对减震结构进行了多遇地震作用下的时程分析,比较了各工况下阻尼器耗能总量和最大层间位移角。研究表明:将主体结构 with 减震装置看作有机整体对减震结构进行设计可取得较好的减震效果;将隔震层主体结构抗侧刚度作为减震装置设计参数,使隔震层基本周期与场地特征周期相等可取得最佳减震效果。

关键词:减震结构;优化设计;隔震;振型分析;时程分析

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A

Optimal Design Method for New Damping Structure

CHEN Min¹, LIU Chang², ZOU Yin-sheng³

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. CCDI Group, Shenzhen 518048, Guangdong, China; 3. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: According to the theory of vibration isolation, optimal design method for damping structure was proposed. The authors conducted a seismic design for an 11-storey frame structure in the 8 degree seismic area by the viscous dampers. Based on adjusting the storey height of isolation layer by vibration modal analysis, the viscous dampers were installed in the two bottom storeys. The selected 7 groups of acceleration time-history curves were divided into four work conditions, the time-history of the energy dissipation structure under the frequent earthquake was analyzed with ETABS, and the total energy consumption of damper and the maximum inter-story drift under each work condition were compared. The study results show that treating the main structure and damping device as an integrated whole to design can produce more desirable energy dissipation effects. The lateral stiffness of the main structure of isolation layer can be used as the design parameter of damping devices, so that the fundamental period of isolation layer can equal to the site characteristic cycle to obtain the best energy dissipation effects.

Key words: damping structure; optimal design; vibration isolation; vibration modal analysis; time-history analysis

收稿日期:2014-10-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51178473);湖南省教育厅科学研究青年项目(13B149)

作者简介:陈 敏(1975-),男,湖南益阳人,讲师,工学博士,E-mail:chenmin2028@163.com。

0 引言

耗能减震装置自应用于工程结构,即得到广泛关注,并成为研究热点。一些学者希望实现减震装置在结构中的最优布置,既减少减震装置的需求量,又减小对建筑功能的影响。Zhang 等^[1]提出了一个连续优化方法,即在每个时间步长最大化性能指标以确定阻尼器的优化位置。随后,多种常规优化方法被应用于阻尼器的优化布置,如一维搜索算法^[2]、最速下降法^[3]、基于梯度优化方法^[4]。近来遗传算法亦被用于阻尼器的优化布置,且取得了较好的效果^[5]。现有阻尼器优化布置主要是针对已建结构的抗震加固。目前新建消能减震结构的设计主要分为 2 个步骤:首先将设防烈度适度降低,一般不超过 1 度,对主体结构进行设计;然后依地震需求确定消能部件的数量与位置。此方法与已建结构抗震加固无实质区别,故难以取得满意的减震效果。

本文将主体结构与减震装置当作一个有机整体,将结构底部安装减震装置的楼层主体结构抗侧刚度作为减震装置的设计参数之一,基于隔震理论提出减震结构的优化设计方法。

1 运动方程

将阻尼器安装在减震结构底部 1~j 层,如图 1 所示,其中,1~j 层为减震结构隔震层, m_{b1}, \dots, m_{bj} 为隔震层各层质量, c_{b1}, \dots, c_{bj} 为隔震层各层阻尼系数, k_{b1}, \dots, k_{bj} 为隔震层各层抗侧移刚度, m_i, k_i 与 m_n, k_n 分别为减震结构第 i 层与第 n 层质量和刚度。此时,减震结构运动方程可表示为

$$\begin{aligned} m_b \begin{bmatrix} \ddot{x}_g + \ddot{x}_{b1} \\ \vdots \\ \ddot{x}_g + \ddot{x}_{bj} \end{bmatrix} + \sum_{i=j+1}^n m_i (\ddot{x}_g + \ddot{x}_{bi} + \ddot{x}_{si}) + \\ c_b \begin{bmatrix} \dot{x}_{b1} \\ \vdots \\ \dot{x}_{bj} \end{bmatrix} + k_b \begin{bmatrix} x_{b1} \\ \vdots \\ x_{bj} \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

$m\ddot{x}_s + c\dot{x}_s + kx_s = -(\ddot{x}_g + \ddot{x}_{bj})m$ (2)

式中: m_b 为隔震层质量矩阵; c_b 为隔震层阻尼矩阵; k_b 为隔震层刚度矩阵; m, c, k 分别为第 $j+1$ 层至第 n 层的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; x_g, x_b, x_{si} 分别为地面位移、隔震层第 j 层与基础之间的水平相对位移和上部结构第 i 层对隔震层顶部的水平相对位移反应; $x_s, \dot{x}_s, \ddot{x}_s$ 分别为隔震层上部各层的位移向量、速度向量和加速度向量。

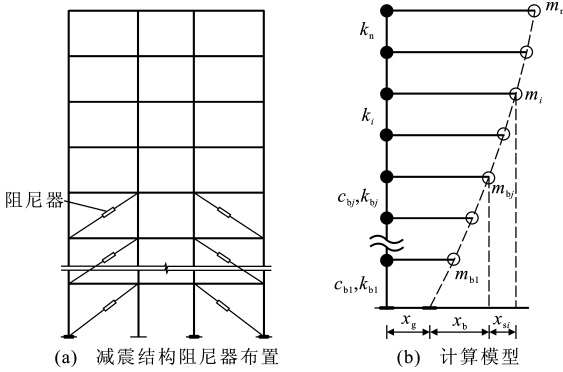


图 1 减震结构计算模型
Fig. 1 Computation Model of Damping
Dissipation Structure

2 隔震体系动力特性

隔震体系加速度反应衰减比 $R_a = \ddot{x}_s / \ddot{x}_g$, 与场地特征频率 ω 和隔震装置的固有频率 ω_n 之比 ω / ω_n 之间的关系曲线如图 2 所示^[6]。在 $\omega / \omega_n = 1$, 即场地特征周期与隔震装置基本周期相等处,随着阻尼比 ζ 的增加, R_a 迅速衰减,但当阻尼比 ζ 增大到一定程度时趋于稳定。对于基础隔震体系, $\omega / \omega_n = 1$ 时处在共振区,只有当 $\omega / \omega_n > 1.414 2$ 时, $R_a < 1$, 才能获得较好的隔震效果,而图 1 所示的减震体系则不然, R_a 衰减意味着隔震楼层加速度 \ddot{x}_s 减小,将最终导致底部薄弱层剪力与层间位移减小。可以预测,对于图 1 所示减震体系,当隔震层基本周期与场地特征周期相等时,减震效果最为理想。

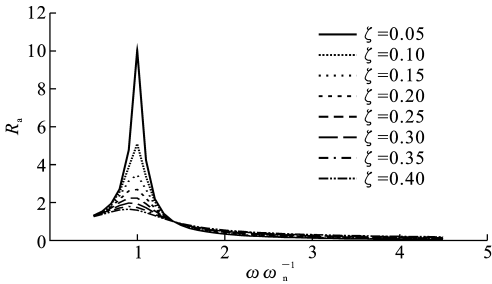


图 2 隔震结构 $R_a - \omega\omega_n^{-1}$ 的关系曲线
Fig. 2 $R_a - \omega\omega_n^{-1}$ Curve of Isolated Structure

3 隔震层振型分析

现有减震结构设计方法是先设计主体结构再布置阻尼器,常常会使隔震层基本周期偏离场地特征周期较多,影响减震效果,或者需选择底部较多楼层作为隔震层而限制建筑空间的利用。图 3 为减震体系隔震层计算模型,隔震层固有频率 ω_n 可通过简单的振型分析由式(3)求得

$$|k_b - \omega_n^2 m_b| = 0 \tag{3}$$

粘滞阻尼器被认为是纯粘性,不提供刚度,如选择粘滞阻尼器作为减震装置,可在初选确定结构抗侧力构件截面面积与混凝土强度以及隔震层层数后直接通过式(3)反算出隔震层层高而获得最佳减震效果。如采用提供刚度的其他阻尼器则需经过反复试算才能确定隔震层层高与层数,而且隔震层层数将比选择粘滞阻尼器时多。

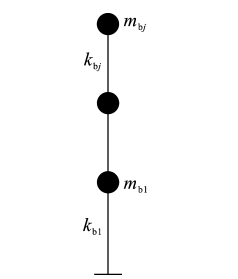


图 3 隔震层计算模型
Fig. 3 Computation Model of Isolation Layer

4 实例分析

4.1 工程概况

本文实际工程位于8度区,设计基本地震加速

表 1 柱截面尺寸和配筋

Tab. 1 Sections Size and Reinforcement of Columns

位置	构件	第 1~5 层(混凝土强度为 C40)			第 6~11 层(混凝土强度为 C35)		
		宽度/mm	高度/mm	单侧配筋截面面积/mm ²	宽度/mm	高度/mm	单侧配筋截面面积/mm ²
①,⑧轴	角柱	650	650	1 400	600	600	1 200
	中柱	650	650	1 200	600	600	1 100
②~⑦轴	柱	600	600	1 100	550	550	900

注:角柱箍筋为 $\phi 10@100$,其他配筋为 $\phi 10@100/200$ 。

4.2 隔震层设计

如隔震层为底层,只有使层高增至不合理的高度才有可能使隔震层基本周期与场地特征周期相等。因此,隔震层层数初选为底部 2 层,如不合理再改为底部 3 层。Ⅱ类场地特征周期为 0.35 s,则场地特征频率 $\omega = 17.943 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。假定楼板为刚性,初选底部 2 层为隔震层,利用式(3)编制简单程序,算得 $H_1 = H_2 = 5\,300 \text{ mm}$ 时, $\omega_1 \approx \omega$ (其中: H_1, H_2 为隔震层的第 1, 2 层层高; ω_1 为隔震层的基本频率,即隔震装置的固有频率 ω_n)。中国建筑底部几层层高常常在 5 m 左右,因此隔震层层高取 5 300 mm 在合理范围内,隔震层取 2 层可行。取 $H_1 = H_2 = 5\,400 \text{ mm}$,使竖向尺寸符合模数。将粘滞阻尼器安装在第①,③,⑥,⑧轴线。减震结构立面示意如图 5 所示。选择中国抗震规范^[7]允许的层间位移作为目标性能,通过时程分析确定所需安装阻尼器。

4.3 分析比较

4.3.1 工况对比

表 2 为不同工况的阻尼器位置与参数,其中工况 1 为本文方法。粘滞阻尼器均安装在第①,③,

度为 0.30g,Ⅱ类场地,设计地震分组为第 1 组。拟建 11 层框架结构,标准层层高为 3 600 mm,拟通过附加粘滞阻尼器达到设防目标,结构平面如图 4 所示。柱截面尺寸和配筋见表 1。x 向框架梁截面尺寸为 300 mm×750 mm,y 向框架梁截面尺寸为 300 mm×700 mm,次梁截面尺寸为 250 mm×650 mm;屋面楼板厚 130 mm,其余楼板厚 110 mm。梁板混凝土强度等级为 C30。

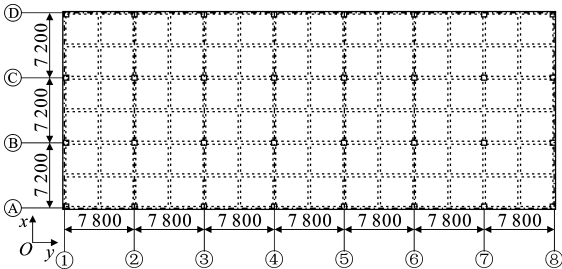


图 4 框架结构平面示意(单位:mm)

Fig. 4 Plan of Frame Structure (Unit:mm)

⑥,⑧轴线,不同工况隔震层位置、层高及单个阻尼器阻尼系数不同,但总阻尼系数相等,以便比较不同工况的消能减震效果。

4.3.2 地震波选取

依据中国抗震规范^[7]的地震动时程曲线选取原则,选取 7 组地震动时程曲线,其中 5 组实际强震记录列于表 3,图 6 为 5 组实际强震记录与 2 组人工模拟的加速度时程曲线,人工波 a,b 加速度时程曲线峰值加速度分别为 37.14,26.43 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

4.3.3 结果分析

将 7 组加速度时程曲线最大加速度设定为 110 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$,采用 ETABS 进行弹性时程分析,将阻尼器总耗能与最大层间位移角及所在楼层按不同工况列于表 4。由表 4 可知,对于选取的 7 组加速度时程曲线,阻尼器在工况 1 时消耗的能量较多,但工况 1 时的最大层间位移角和其他 3 种工况相比并不是最小的,如 Northridge_ORR090 波、Taft_N21E 波、Taft_S69E 波以及人工波在工况 4 时的最大层间位移角出现在第 6 层,且比其他 3 种工况的小。

图 7 为结构在多遇地震作用下不同工况的最大

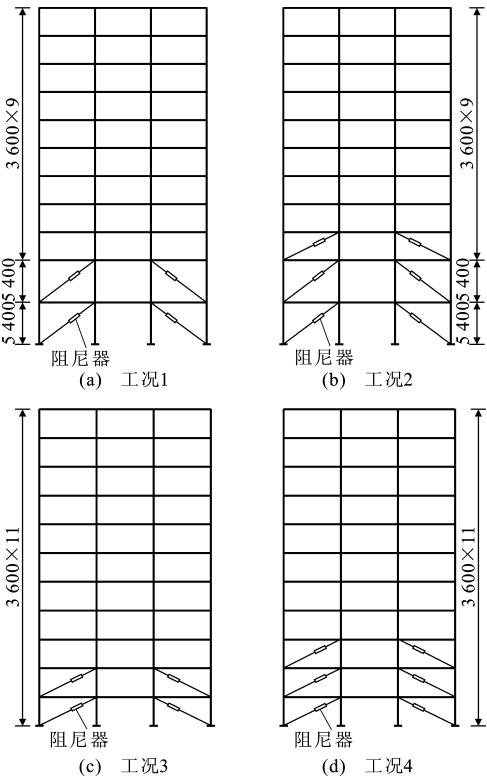


图 5 减震结构立面示意(单位:mm)

Fig. 5 Elevation of Damping Structure (Unit:mm)

层间位移角曲线。由图 7 可知,工况 1 和工况 2 的最大层间位移角位置出现在底部第 1,2 层,而工况 3 和工况 4 的最大层间位移角位置出现在第 6 层。可见,将底部 2 层层高设定为 5 400 mm,并安装粘滞阻尼器对于上部楼层而言能起到很好的隔震作用。尽管此时工况 4 在 Northridge_ORR090 波、Taft_N21E 波、Taft_S69E 波以及人工波作用下最大层间位移角小于工况 1,但由于工况 1 最大层间位移角出现在结构底部 2 层,可以预见,如果加大阻尼器的阻尼系数,将使工况 1 中的阻尼器消耗更多的地震能量,并使其最大层间位移角小于其他几种工况。

将工况 1 与工况 3 中单个阻尼器的阻尼系数调整为 $3.0\times10^6\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$,工况 2 与工况 4 中单个阻尼器的阻尼系数调整为 $2.0\times10^6\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$,各工况总阻尼系数仍相等。各工况阻尼器总耗能与最大层间位移角及所在楼层见表 5。此时工况 1 最大层间位移角均小于其他工况,Taft_S69E 波、人工波时工况 2 的阻尼器总耗能比工况 1 稍大,这说明工况 2 时安装阻尼器楼层的层间位移较大,使阻尼器消耗了更多的地震能量。

表 2 不同工况的阻尼器位置与参数

Tab. 2 Location and Parameters of Dampers in Different Cases

工况	隔震层位置	H_1/mm	H_2/mm	H_3/mm	阻尼系数/ $(10^6\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	阻尼指数	总阻尼系数/ $(10^6\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$
1	底部 2 层	5 400	5 400	3 600	1.5	0.45	24
2	底部 3 层	5 400	5 400	3 600	1.0	0.45	24
3	底部 2 层	3 600	3 600	3 600	1.5	0.45	24
4	底部 3 层	3 600	3 600	3 600	1.0	0.45	24

注: H_3 为隔震层第 3 层层高。

表 3 强震记录

Tab. 3 Strong Earthquake Records

地震名称	年份	站台名称	震级	地震分量	峰值加速度/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})$	速度/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	记录来源
Imperial Valley	1940	El Centro	7.0	S00E	341.70	33.45	NISEE
Northridge	1994	Castaic-Old Ridge Route	6.7	ORR090	557.04	52.10	PEER
				ORR360	504.08	52.20	
Kern County	1952	Taft Lincoln	7.4	N21E	152.70	15.72	NISEE
				S69E	175.95	17.71	

本文方法为获得较好的减震效果而增加底部隔震层层高,使其抗侧刚度大幅减小而成为薄弱层,但耗能装置的安装将确保其在地震作用下的变形满足规范要求,且对调整抗剪承载力的要求更易满足。本文方法由 $\omega/\omega_n=1$ 确定底部隔震楼层层高及抗侧力构件相关参数,要求结构变形处于弹性范围内;一旦进入塑性阶段,结构抗侧刚度将不断变化,此时减震结构将不再呈现处于弹性阶段的规律。

5 结 语

- (1)将隔震层主体结构抗侧刚度作为减震装置设计参数,利用隔震理论对减震体系进行优化设计可取得较常规方法更好的减震效果。
- (2)当场地特征频率与隔震层固有频率的比值 $\omega/\omega_n=1$ 时,隔震体系处于共振区而无法起到隔震效果,而对于减震结构,当场地特征频率与隔震层固

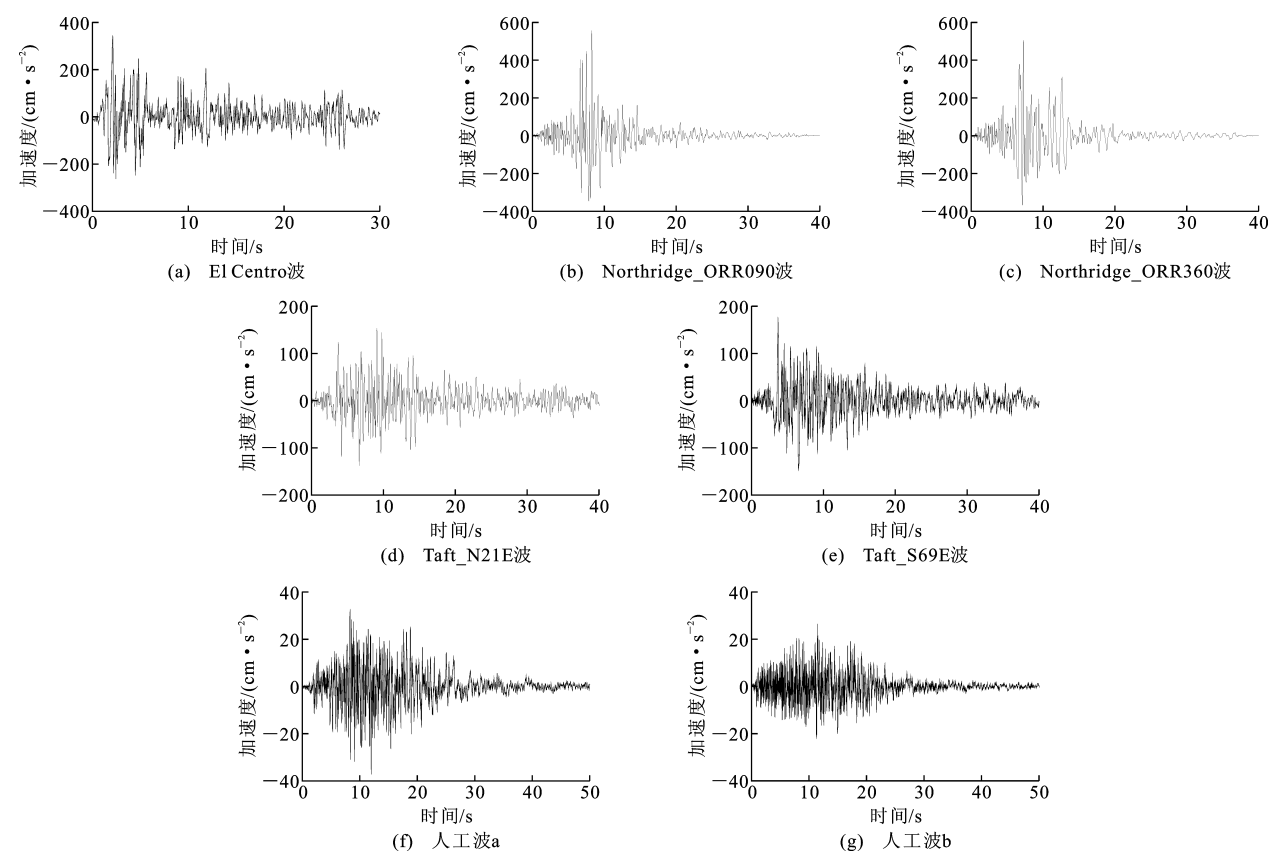


图 6 加速度时程曲线

Fig. 6 Time-history Curves of Acceleration

表 4 多遇地震下不同工况阻尼器总耗能与结构最大层间位移角

地震波		El Centro 波	Northridge_ORR090 波	Northridge_ORR360 波	Taft_N21E 波	Taft_S69E 波	人工波 a	人工波 b
工 况 1	阻尼器总耗能/(kN·m)	442.72	214.56	592.24	595.36	414.96	397.76	270.72
	最大层间位移角	1/747	1/732	1/517	1/670	1/890	1/1 249	1/1 138
	最大层间位移角位置	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层
工 况 2	阻尼器总耗能/(kN·m)	410.24	182.40	525.68	536.56	383.04	374.24	263.12
	最大层间位移角	1/691	1/672	1/482	1/607	1/822	1/1 063	1/966
	最大层间位移角位置	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层
工 况 3	阻尼器总耗能/(kN·m)	327.92	173.12	479.76	495.44	298.56	282.72	178.08
	最大层间位移角	1/681	1/788	1/478	1/686	1/879	1/1 185	1/1 148
	最大层间位移角位置	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层
工 况 4	阻尼器总耗能/(kN·m)	339.52	180.64	488.08	514.72	313.36	302.80	196.80
	最大层间位移角	1/682	1/792	1/478	1/695	1/893	1/1 206	1/1 150
	最大层间位移角位置	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层

有频率比值 $\omega/\omega_n=1$ 时,减震效果最佳。

(3)实例分析表明,采用粘滞阻尼器可将隔震楼层限制在底部 2 层或数层,虽可能使该楼层层高增加,但建筑底部楼层常常用于商业与其他公共服务而需要较高层高,因此不会额外增加建筑成本。本文方法有利于框架结构在高烈度区的应用。

参考文献:

References:

[1] ZHANG R H,SOONG T T. Seismic Design of Viscoelastic Dampers for Structural Applications[J]. Journal of Structural Engineering,1992,118(5):1375-1392.

[2] SHUKLA A K,DATTA T K. Optimal Use of Viscoelastic Dampers in Building Frames for Seismic Force

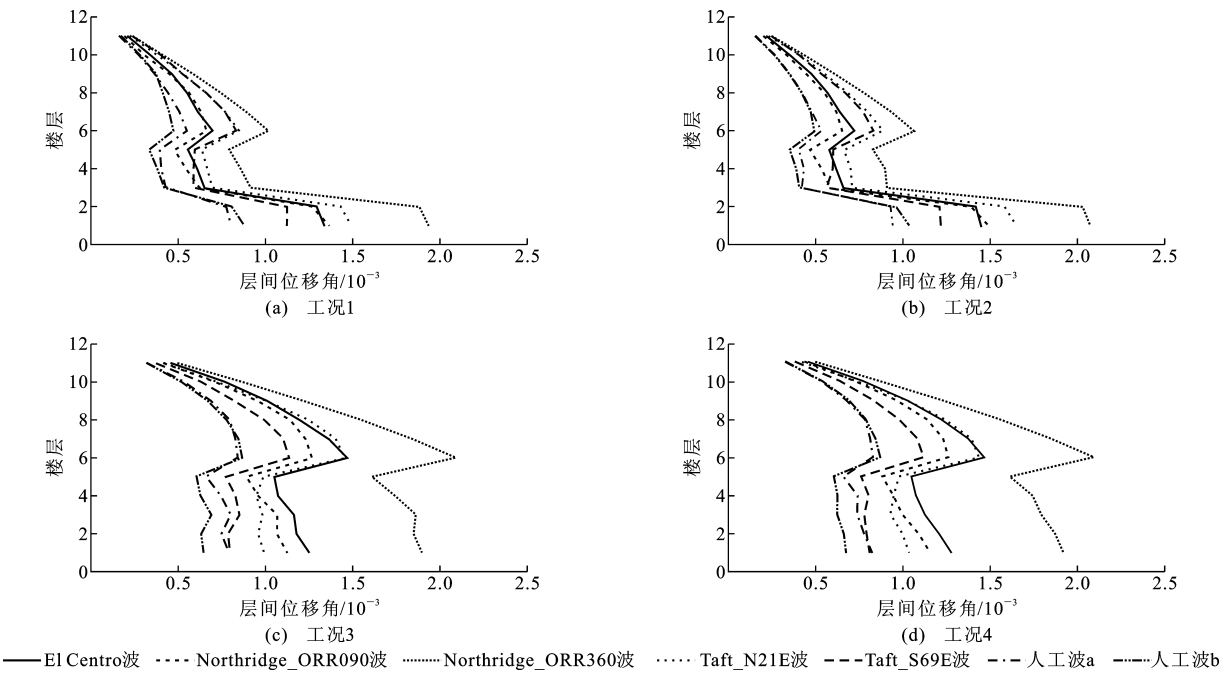


图 7 多遇地震下不同工况最大层间位移角曲线

Fig. 7 Maximum Storey Drift Angle Curves Under Frequently Earthquakes in Different Cases

表 5 阻尼系数增加后各工况阻尼器总耗能与结构最大层间位移角

Tab. 5 Total Energy Dissipation of Dampers and Maximum Storey Drift Angle After Increasing Damping Coefficient

地震波		El Centro 波	Northridge_ORR090 波	Northridge_ORR360 波	Taft_N21E 波	Taft_S69E 波	人工波 a	人工波 b
工 况 1	阻尼器总耗能/(kN·m)	509.36	284.56	720.32	715.84	473.44	421.52	283.44
	最大层间位移角	1/922	1/889	1/632	1/943	1/1 064	1/1 531	1/1 637
	最大层间位移角位置	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层
工 况 2	阻尼器总耗能/(kN·m)	495.36	262.80	670.64	690.88	473.76	440.08	308.88
	最大层间位移角	1/849	1/805	1/584	1/782	1/963	1/1 408	1/1 418
	最大层间位移角位置	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层	第 1 层
工 况 3	阻尼器总耗能/(kN·m)	439.12	238.56	617.28	630.56	377.76	323.36	196.64
	最大层间位移角	1/765	1/812	1/550	1/708	1/831	1/1 341	1/1 234
	最大层间位移角位置	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层
工 况 4	阻尼器总耗能/(kN·m)	470.00	254.88	638.56	683.60	412.56	367.68	238.16
	最大层间位移角	1/781	1/837	1/554	1/744	1/878	1/1 379	1/1 296
	最大层间位移角位置	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层	第 6 层

[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(4): 401-409.

[3] TAKEWAKI I, YOSHITOMI S, UETANI K, et al. Non-monotonic Optimal Damper Placement via Steepest Direction Search[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28(6): 655-670.

[4] LAVAN O, LEVY R. Optimal Design of Supplemental Viscous Dampers for Irregular Shear-frames in the Presence of Yielding[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005, 34(8): 889-907.

[5] 李宏男, 曲激婷. 基于遗传算法的位移型与速度型阻尼器位置优化比较研究[J]. 计算力学学报, 2010, 27(2): 252-257.

[6] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.

[7] ZHOU Fu-lin. Engineering Structural Vibration Control[M]. Beijing: Seismological Press, 1997.

[8] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].

[9] GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings [S].