

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.01.013



罕遇地震下石化钢结构减震的关键影响因素

高剑^{1a,2}, 王忠凯^{1a}, 潘毅^{1a,1b}, 葛庆子³

(1. 西南交通大学 a. 土木工程学院; b. 抗震工程技术四川省重点实验室, 成都 610031; 2. 中国石油工程建设公司 华东设计分公司, 山东 青岛 266701; 3. 四川省建筑科学研究院, 成都 610081)

摘要:在强烈地震作用下, 炼油厂的石化钢结构可能发生破坏, 导致较大的经济损失, 并易引发严重的次生灾害。为降低石化钢结构的震害风险, 结合石化钢结构的特点, 以某大型炼油厂重整装置反应器为例, 建立有限元分析模型, 设置黏滞阻尼器进行罕遇地震下的减震设计, 并分析了阻尼器的设置位置、数量和阻尼参数等影响因素。研究表明, 黏滞阻尼器所在楼层的层间剪力和层间位移角显著减小, 布置在结构底部的减震效果优于布置在中、上部; 随着阻尼器数量的增加, 层间剪力和层间位移角都会随之减小, 但减少幅度逐渐降低; 阻尼系数对石化钢结构减震效果的影响大于阻尼指数, 减震设计中宜优先调整阻尼系数以获得较好的抗震性能。

关键词:石化钢结构; 罕遇地震; 消能减震; 影响因素; 黏滞阻尼器

中图分类号: TU392.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)01-0092-08

Influence factors of vibration reduction in petrochemical steel structure under rare earthquake

Gao Jian^{1a, 2}, Wang Zhongkai^{1a}, Pan Yi^{1a, 1b}, Ge Qingzi³

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. East China Design Branch of CPECC, Qingdao 266701, Shandong, P. R. China; 3. Sichuan Institute of Building Research, Chengdu 610081, P. R. China)

Abstract: Strong earthquake has adverse impact on the petrochemical steel structures of refinery and lead to large economic losses and serious secondary disasters. We studied a reformer reactor of a large refinery, built the finite element model and set viscous dampers to reduce the seismic risk of petrochemical structures based on their characteristics. Then we analyzed the influence factors, including location, quantity and the damping parameters of the viscous dampers. The results show that the inter-story force and inter-story displacement angle of the floor where the viscous damper was setted decrease significantly, and the damping effect with setting viscous damper in the bottom is greater than that in the middle and upper part. Besides, the inter-story force and inter-story displacement angle decrease when the number of viscous damper

收稿日期: 2015-09-25

基金项目: 四川省科技支撑计划(2014SZ0110)

作者简介: 高剑(1981-), 男, 高级工程师, 主要从事石化工程钢结构抗震设计研究, (E-mail) gaojian@cnpccci. cn.

潘毅(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师, (E-mail) panyi@home. swjtu. edu. cn.

Received: 2015-09-25

Foundation item: Science and Technology Support Program of Sichuan Province (No. 2014SZ0110)

Author brief: Gao Jian (1981-), senior engineer, main research interest: steel structure seismic design of petrochemical engineering, (E-mail) gaojian@cnpccci. cn.

Pan Yi (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, (E-mail) panyi@home. swjtu. edu. cn.

increases, but the decrease amplitude reduces gradually. In addition, the influence of damping coefficient on the damping effect of the petrochemical steel structure is greater than that of the damping index. So the damping coefficient should be given priority to consider in the structure design for better seismic performance.

Keywords: petrochemical steel structure; rare earthquake; energy dissipation; influence factor; viscous damper

中国是地震多发的国家,很多石化企业的炼油厂处在七度及以上烈度区。地震导致的炼油厂基础设施破坏,不但会给石化企业造成较大的直接经济损失,而且会引发严重的次生灾害,如火灾、爆炸、水源污染等,造成更大的间接损失。目前,石化行业是按照《石油化工构筑物抗震设计规范》(SH 3147—2014)进行抗震设计,这就意味着罕遇地震下仍然需要靠结构的塑形变形来耗散地震能量。尽管炼油厂的构筑物多采用钢结构,但由于其破坏后的严重后果,在罕遇地震下仍然存在较大的地震风险。

采用黏滞阻尼器的消能减震技术已经在民用建筑领域得到广泛应用,很多学者对黏滞阻尼器的力学性能也进行了深入研究。周云等^[1-3]对黏滞阻尼器在民用建筑中的设计方法和连接方式等进行了研究。翁大根等^[4]对黏滞阻尼器力学模型和性能参数进行了研究。孙传智等^[5]对黏滞阻尼器的阻尼参数进行了研究。胡岚^[6]对设置黏滞阻尼器的煤气化工业厂房的抗震性能进行了分析。高云鹏等^[7]对带减震构造的立式 LNG 球罐的减震性能进行了分析。Tubaldi 等^[8]采用基于性能的方法对安装了黏滞阻尼器的民用建筑进行了地震风险性评估。Hejazi 等^[9]采用有限元软件对设置有黏滞阻尼器的混凝土框架结构进行了弹塑性分析。Kang 等^[10]采用跷跷板原理提出了钢结构中设计黏滞阻尼器的新方法。然而,上述减震设计的研究仅限于民用建筑和部分工业建(构)筑物,鲜有见于在石化钢结构领域的研究和应用。

针对石化钢结构的特点,为提高其抵御罕遇地震的能力,以八度区某大型炼油厂重整装置反应器为例,按照现行抗震设计规范,设置黏滞阻尼器,对罕遇地震作用下减震前后的石化钢结构进行弹塑性时程计算,并对影响减震的关键因素进行了分析。

1 石化钢结构特点和减震影响因素

1.1 石化钢结构特点

由于石化行业的生产工艺和设备的特殊性,石

化钢结构与普通民用钢结构相比,有如下结构特点:

1)层高较高,且层高不一。在石化钢结构中,由于设备和管线等安装、生产、检修等的需要,往往使结构层的层高很大,且有时上下层高不同。

2)恒载较大,且重心较高。由于工艺要求,石化设备的尺寸较大,且荷载较大,因此,各层楼面荷载的重心较高,如图 1(a)所示。石化钢结构中塔器类设备的种类较多,这类设备往往穿越多层,可能导致石化钢结构的刚度和质量分布不均匀。

3)活载较多,且受力复杂。结构中的活载主要有平台均布活载、平台检修活载、各类机器的当量活载、温度变化在设备支承面上引起的摩擦荷载、振动荷载等。此外,由于生产工艺的需要,一般情况下设备和管线的布置都是不均匀的,所以结构荷载也是不均匀的,受力比较复杂。

4)结构布置受制工艺流程。石化钢结构的平面布置和竖向布置既要满足工艺要求,还应满足设备和管道的安装、检修要求,这对结构中如何布置黏滞阻尼器提出了更高的要求。

1.2 减震影响因素

在石化钢结构中,过大的层间变形可能导致设备和管线破坏,引起有害物质的泄露,甚至导致火灾、爆炸等极端破坏,因此,层间最大位移角就成为设计的控制性标准。此外,由于结构的荷载较大,为了满足承载力和抗震的要求,现有石化钢结构的截面尺寸都比较大。采用减震设计后,能否在保证同样安全水准的前提下,适当减小截面尺寸,或者不减小截面尺寸,分析其安全水准的提高,是值得研究的问题。因此,层间剪力也是石化钢结构抗震设计中的关键指标。

基于层间最大位移角和层间剪力这两个指标,在石化钢结构中设置黏滞阻尼器,在罕遇地震作用下,拟对以下影响其减震性能的关键因素进行分析。

1)阻尼器的设置位置。文献[1]和[11]均指出,在阻尼器布置上,黏滞阻尼器宜沿结构竖向均匀布置,也可在结构薄弱层单独布置。因此,在减震设计

中,将阻尼器布置在合理的位置,可以增强耗能效果,不仅耗能增加,而且结构抵抗地震风险的能力也将得到提高。笔者根据石化钢结构的特点,对阻尼器的不同布置位置进行分析,并将其与减震前的结构进行对比。

2) 阻尼器的数量。在减震设计中,结构附加阻尼比的大小直接影响能量消耗的多少,而对于同类阻尼器,数量的多少又直接影响附加阻尼比的大小。因此,阻尼器的数量直接影响结构的减震效果。

3) 阻尼器的阻尼参数。由文献[12-14]中黏滞阻尼器的力学模型可知,粘滞阻尼器提供的阻尼力 F 与其两端的相对速度 V 有如下关系:

$$F = -CV^\alpha = \begin{cases} -CV^\alpha, V \geq 0 \\ C(-V)^\alpha, V < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: C 为阻尼系数; α 为阻尼指数。在采用黏滞阻尼器减震进行结构的消能减震设计时,可以通过调整阻尼系数和阻尼指数来调节阻尼力的大小,从而提高阻尼器的减震效果。在保证结构安全的前提下,应尽量控制附加阻尼器提供的阻尼力,这样可以降低结构的建造成本^[5]。因此,通过调节阻尼系数和阻尼指数,对比分析不同阻尼参数对石化钢结构减震效果的影响。

2 结构模型

2.1 工程背景

石化钢结构的工程为某大型炼油厂重整装置反应器,结构总高度为 40.6 m,共 11 层,如图 1 所示。工程抗震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度值 $0.30g$,场地类别为 II 类,设计地震分组为第一组,场地特征周期 $T_g = 0.35$ s。

2.2 分析模型

根据重整装置反应器的结构布置,采用软件 SAP2000 建立有限元模型,如图 2 所示。在石化钢结构中,受到生产工艺的限制,石化设备布置存在不均匀的现象。一些设备是直接落地的,这些设备的荷载在建模时直接传递给基础;另一些设备是作用在钢构架层上,这些设备的重力在建模时作为集中荷载考虑,按照《石油化工构筑物抗震设计规范》(SH 3147—2014),将这些设备的质量均匀分配给其穿过的各层,再进行抗震分析。考虑到塔器类设备与各层楼板的连接类似刚接,对楼板刚度的削弱不大,故楼板没有开洞处理。按照文献[15]中有关地震波选取的要求,选择 II 类场地上的 3 条地震波,

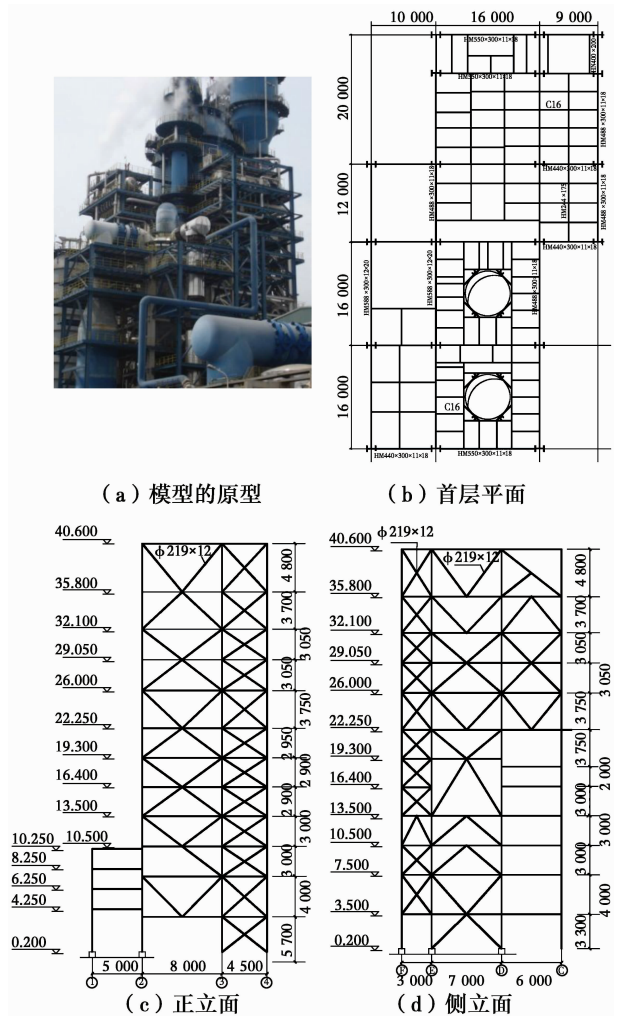


图 1 结构布置

Fig. 1 Structural layout

天然波 El Centro、Usa 00684 和人工波 ACC2, 3 条地震波的加速度反应谱与规范反应谱对比如图 3 所示,根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)的规定,罕遇地震 8 度 ($0.3g$) 时时程分析所用地震加速度时程的最大值 510 cm/s^2 ,将上述地震波进行调整,并考虑双向地震作用 $X:Y = 1:0.85$,输入有限元模型中进行分析。

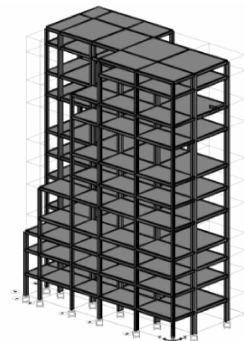


图 2 有限元分析模型

Fig. 2 FEA model

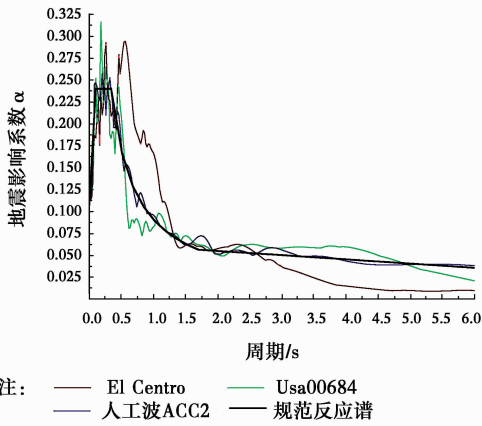


图 3 地震波加速度反应谱与规范反应谱对比
Fig. 3 Seismic acceleration response spectrum compared with standard response spectrum

3 关键影响因素分析

3.1 基本参数

采用 SAP2000 中的非线性连接单元 Damper 模拟黏滞阻尼器,其中黏滞阻尼器的力学参数如表 1 所示。根据中国石油工程建设公司的意见,黏滞阻尼器的连接方式采用人字形连接,以便于管线连接、石化设备安装与检修。黏滞阻尼器安装在第 1~5 层,每层数量为 6 个,X 向与 Y 向各 3 个,其平面布置如图 4 所示。

表 1 黏滞阻尼器计算参数

Table 1 Viscous damper parameters calculation

阻尼系数 $C/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	阻尼指数 α
400	0.2

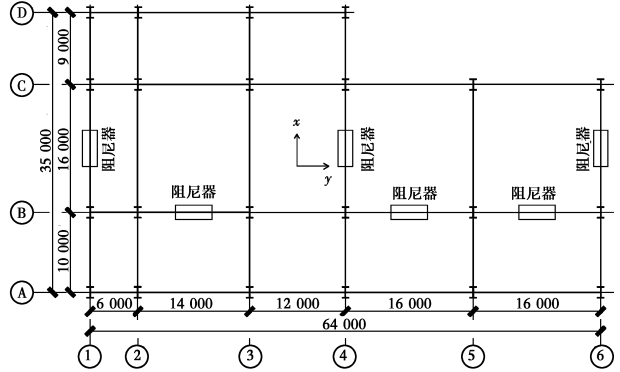


图 4 黏滞阻尼器数量为 6 的平面布置

Fig. 4 Layout of six viscous dampers

3.2 黏滞阻尼器的设置位置对减震性能的影响

根据 3.1 节基本参数的设定,黏滞阻尼器力学参数如表 1 所示,其数量为每层 6 个,平面布置如图 4 所示。按照 3 种不同竖向位置进行设置,即底部(第 1~3 层)、中部(第 4~6 层)和上部(第 8~10 层)。在罕遇地震作用下,分别计算这 3 种情况,其结果如图 5 所示。在对石化钢结构进行有限元分析时,所选 3 条地震波的计算结果的规律类似,限于篇幅,仅以 El Centro 波为例说明,下文相同。

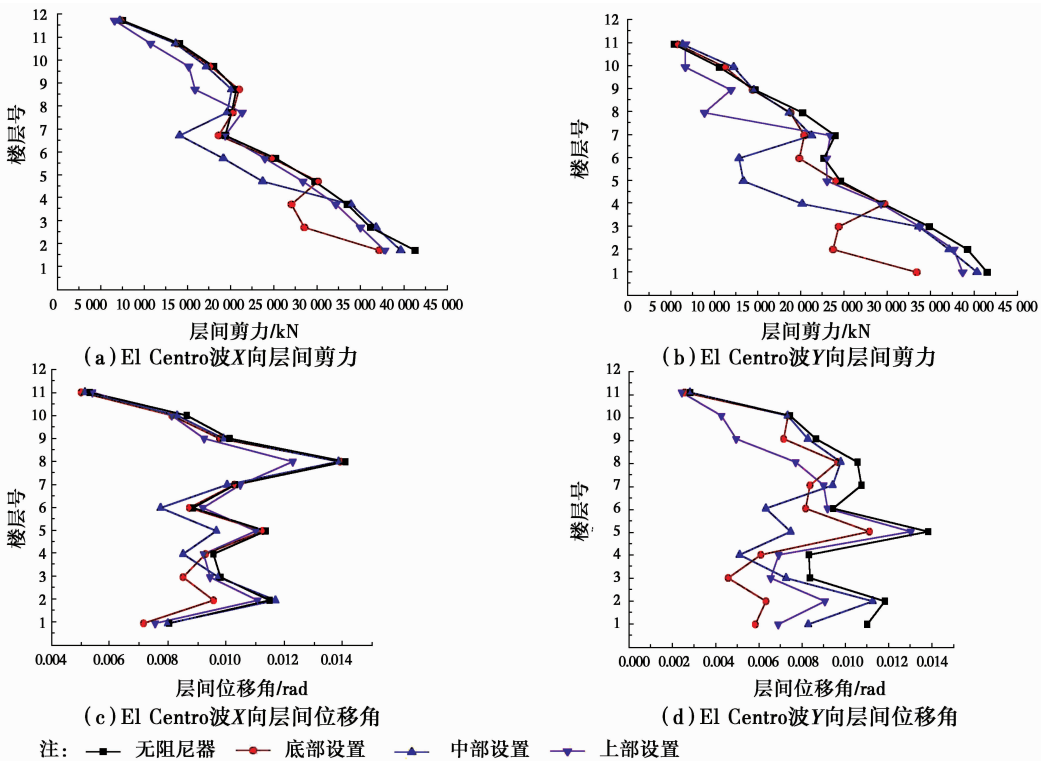


图 5 罕遇地震下阻尼器不同设置位置的减震对比

Fig. 5 Viscous dampers damping effect comparison with different position setting under the action of rare earthquake

对比 3 种不同竖向布置的计算结果,可以得出:

1) 相比设置前的结构,设置黏滞阻尼器楼层的层间剪力会大幅降低。布置在结构底部、中部的层间剪力要小于布置在上部的层间剪力。

2) 设置黏滞阻尼器后,设置黏滞阻尼器的楼层的层间位移角明显减小。总体上看,黏滞阻尼器布置在结构底部比布置在中、上部,更有利于减少层间位移角。

3) 对于石化钢结构,黏滞阻尼器的设置位置除宜沿结构竖向均匀布置外,还要考虑生产工艺的要求。如果生产工艺不允许在该楼层布置时,黏滞阻尼器应布置于该楼层的相邻楼层。

将黏滞阻尼器设置在结构中,在地震作用下,阻尼器可以有效消耗地震能量,降低其所在楼层的地震响应。在相同地震作用下,阻尼器布置在底部楼层在减小所在楼层地震响应的同时,又可以减小地震作用向上部楼层的输入,使得黏滞阻尼器布置在结构底部比布置在中、上部消能更有效。

3.3 黏滞阻尼器的数量对减震性能的影响

对石化钢结构进行消能减震设计时,阻尼器的数量也是重要因素。根据 3.1 节基本参数的设定,黏滞阻尼器力学参数如表 1 所示,其分布楼层为 1~5 层。按照 3 种不同的数量设置,分别为每层 6 个(图 4)、每层 8 个(图 6)和每层 10 个(图 7)。在罕遇地震作用

下,分别计算了这 3 种情况,其结果如图 8 所示。

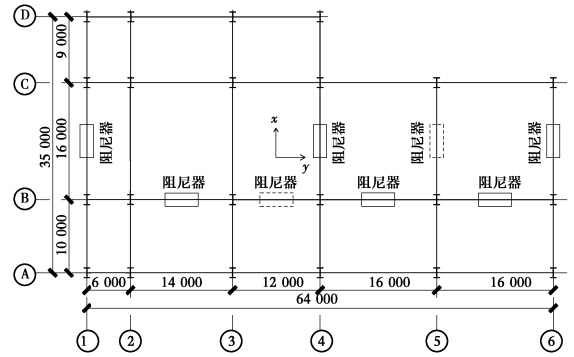


图 6 黏滞阻尼器数量为 8 的结构布置

Fig. 6 Layout of eight viscous dampers

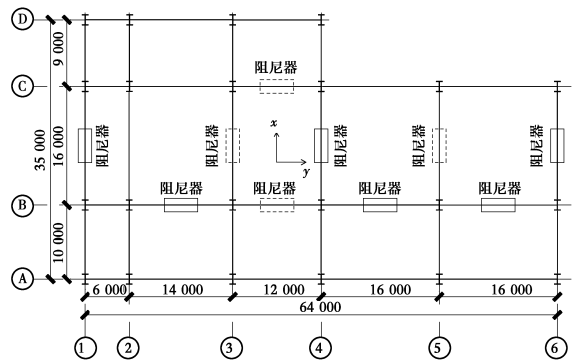


图 7 黏滞阻尼器数量为 10 的结构布置

Fig. 7 Layout of ten viscous dampers

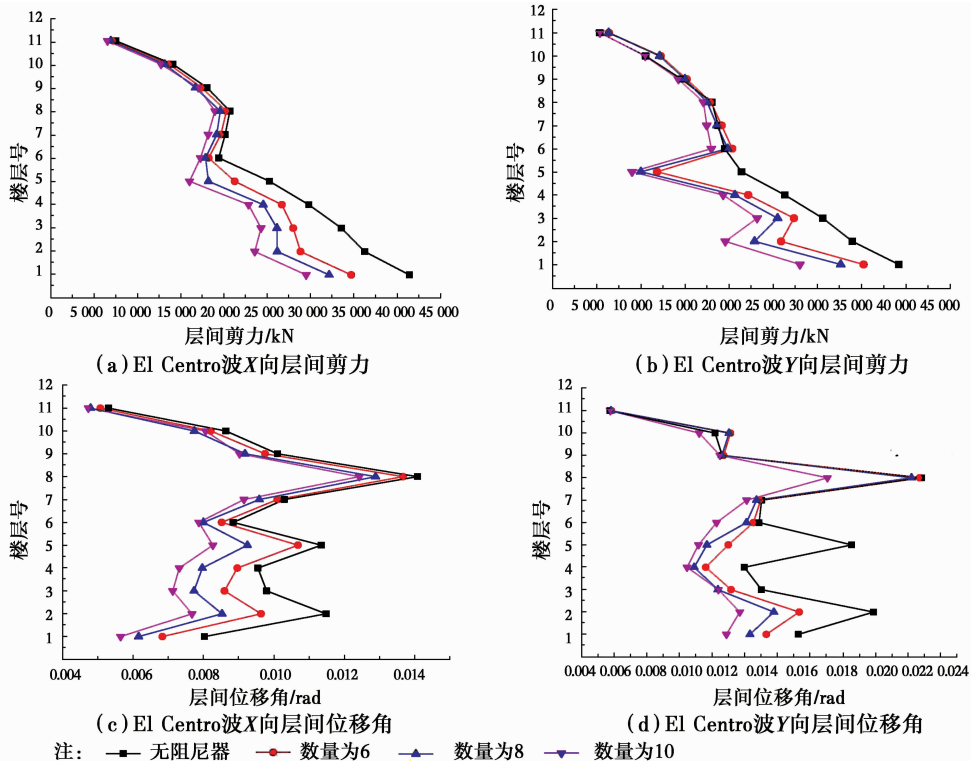


图 8 罕遇地震下不同数量阻尼器的减震对比

Fig. 8 Different number of viscous dampers damping effect comparison under the action of rare earthquake

对比 3 种不同设置数量的分析,可以得出:

1)对比设置不同数量粘滞阻尼器的结构,层间剪力和层间位移角都会随着黏滞阻尼器数量的增加而减小,但减小幅度逐渐降低。

2)对于未设置黏滞阻尼器的楼层,在罕遇地震作用下,层间剪力和层间位移角均略有减小,但减小幅度有限。

3)结构的减震能力随着黏滞阻尼器的增加而增强,但数量过多,阻尼器将不能充分利用。因此,在石化钢结构的减震设计中,宜通过试算确定黏滞阻尼器的数量,避免徒增工程造价。

结构中设置黏滞阻尼器,在一定范围内减震效果随附加阻尼比的增加而增大,当附加阻尼比增加超出此范围之后,由于阻尼器不能充分发挥消能作用,消能减震的增大幅度将逐渐减小。一方面,当阻尼器类型相同时,提高阻尼器的使用数量即增加结构附加阻尼比,导致部分阻尼器不能充分发挥消能作用,很不经济;另一方面,当阻尼器数量不变而增加结构附加阻尼比,使得阻尼器正常工作时阻尼力过大,导致钢支撑因刚度不足而屈服,影响阻尼器充

分发挥消能作用。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中规定的消能部件附加结构的有效阻尼比超过 25%时,宜按 25%计算,原因也是如此。

3.4 黏滞阻尼的参数对减震性能的影响

在采用黏滞阻尼器进行结构的消能减震设计时,可以通过调整黏滞阻尼器的阻尼系数和阻尼指数来提高阻尼器的减震效果。根据 3.1 节基本参数的设定,黏滞阻尼器为每层 6 个,平面布置如图 4 所示,分布楼层为 1~5 层,按照 3 组不同力学参数(如表 2 所示)的黏滞阻尼器,将其布置在石化钢结构的有限元模型中,在罕遇地震作用下,分别计算这 3 种情况,其结果如图 9 所示。

表 2 黏滞阻尼器计算参数

Table 2 Viscous damper parameters calculation

分组	阻尼系数	
	$C/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$	
A	200	0.20
B	200	0.30
C	400	0.20

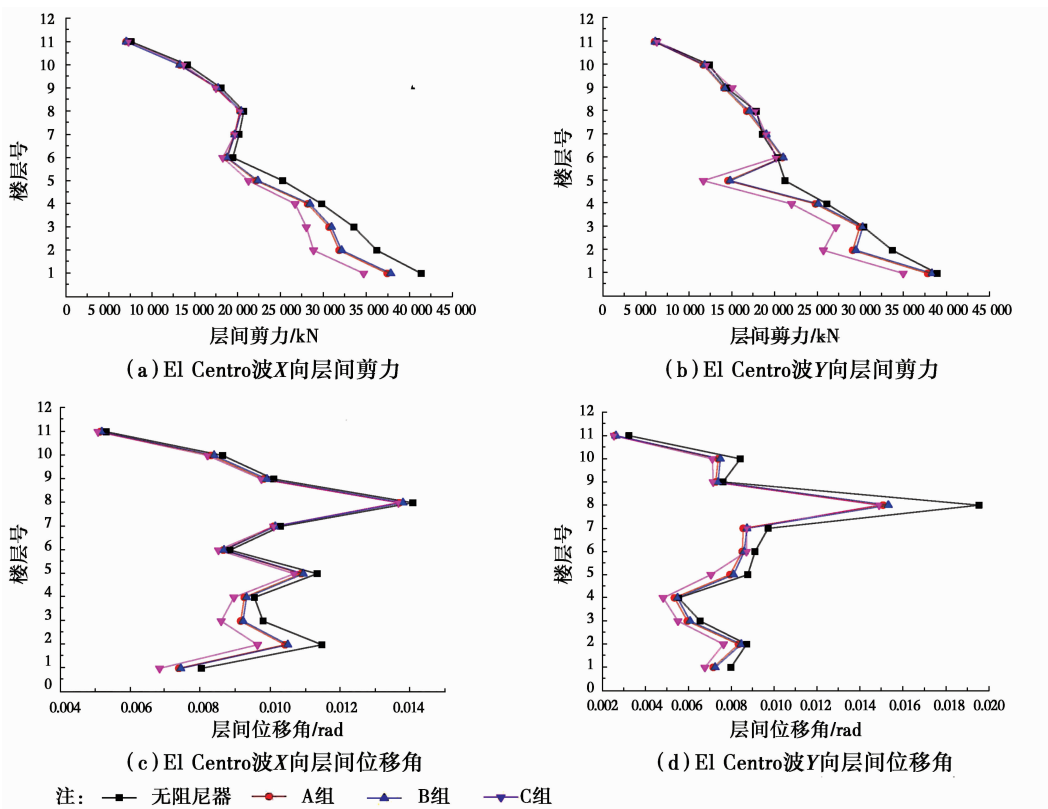


图 9 罕遇地震下阻尼器不同阻尼参数的减震对比

Fig. 9 Viscous dampers damping effect comparison with different damping parameters under the action of rare earthquake

对比 3 组不同阻尼参数的分析结果,可以得出:

1)对比 A 组和 B 组的曲线,即增大黏滞阻尼器的阻尼指数,结构的层间剪力和层间位移角均无明显变化。

2)对比 A 组和 C 组的曲线,即增大黏滞阻尼器的阻尼系数,阻尼器所在楼层的层间剪力和层间位移角均明显减小。

3)黏滞阻尼器的阻尼系数对其耗能效果影响远大于阻尼指数,因此,在进行黏滞阻尼器减震结构设计时,应该优先调整阻尼系数。

从式(1)能够得出,通过调节阻尼系数和阻尼指数可以调整阻尼力的大小,进而影响阻尼器的减震效果,在实际计算中 α 一般介于 0.2 到 1.0 之间,而 C 的取值一般很大,通过调节阻尼系数相比阻尼指数更易调整阻尼力,因此,从黏滞阻尼器的力学模型也可得出,阻尼系数对其耗能效果影响远大于阻尼指数。

4 结 论

结合石化钢结构的特点,以某大型炼油厂重整装置反应器为例,建立有限元数值模型,设置黏滞阻尼器进行罕遇地震下的减震设计,并对阻尼器的设置位置、数量和阻尼参数等影响因素进行了分析,得出如下结论:

1)黏滞阻尼器所在楼层的层间剪力和层间位移角显著减小,布置在结构底部的减震效果优于布置在中、上部。黏滞阻尼器的设置位置除宜沿结构竖向均匀布置外,还要考虑生产工艺的要求,必要时可向相邻楼层调整,布置原则应使得上下层结构层间位移角尽量一致。

2)随着黏滞阻尼器数量的增加,层间剪力和层间位移角都会随之减小,但减少幅度逐渐降低。在石化钢结构的减震设计中,可采用试算确定阻尼器数量。

3)黏滞阻尼器阻尼系数对石化钢结构减震效果的影响大于阻尼指数,减震设计中宜优先调整阻尼系数以获得较好的抗震性能。

参考文献:

[1] 周云. 粘滞阻尼减震结构设计[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2006.
Zhou Y. Nianzhi zuni jianzhen jiegou sheji [M].

Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2006. (in Chinese)

[2] 汪大洋,周云,王烨华,等. 粘滞阻尼减震结构的研究与应用进展[J]. 工程震动与加固改造, 2006, 28(4): 22-31.

Wang D Y, Zhou Y, Wang Y H, et al. State-of-the-art of research and application on structures with viscous damper [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(4): 22-31. (in Chinese)

[3] 周云,林绍明,邓雪松,等. 设置悬臂肘节型黏滞阻尼器高层结构的减震效果分析[J]. 工程震动与加固改造, 2014, 36(2): 8-14.

Zhou Y, Lin S M, Deng X S, et al. Analysis of seismic mitigation effect on high-rise building with cantilever-toggle-brace viscous dampers [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(2): 8-14. (in Chinese)

[4] 翁大根,张超,吕西林,等. 附加黏滞阻尼器减震结构实用设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 80-88.

Weng D G, Zhang C, Lyu X L, et al. Practical design procedure for a energy-dissipated structure with viscous dampers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 80-88. (in Chinese)

[5] 孙传智,李爱群,缪长青,等. 减震结构粘滞阻尼器参数优化分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 80-85.

Sun C Z, Li A Q, Miao C Q, et al. Parameter optimization analysis of viscous dampers for dissipation structure [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(1): 80-85. (in Chinese)

[6] 胡岚. 装粘滞流体阻尼器的高层钢结构煤气化工业厂房减震研究[D]. 武汉:武汉工业大学,2008.

Hu L. Seismic behavior of steel coal gasification highrise building with fluid viscous dampers [D]. Wuhan: Wuhan University, 2008. (in Chinese)

[7] 高云鹏,赵鸣. 带减震构造的立式 LNG 球罐减震性能分析[J]. 特种结构, 2013, 30(5): 57-64.

Gao Y P, Zhao M. Damping performance analysis about vertical LNG spherical tank with damping structure [J]. Special Structures, 2013, 30(5): 57-64. (in Chinese)

[8] Tubaldi E, Barbato M, Dall'Asta A. Performance-based seismic risk assessment for buildings equipped with linear and nonlinear viscous dampers [J].

- Engineering Structures, 2014, 78: 90-99.
- [9] Hejazi F, Zabihi A, Jaafar M S. Development of elasto-plastic viscous damper finite element model for reinforced concrete frames [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 65: 284-293.
- [10] Kang J D, Tagawa H. Seismic performance of steel structures with seesaw energy dissipation system using fluid viscous dampers [J]. Engineering Structures, 2013, 56: 431-442.
- [11] 张志强,李爱群. 建筑结构黏滞阻尼器减震设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:67-68.
- [12] Hart G C, Wong K. Structural dynamics for structural engineers [M]. Wiley, 1999: 483-530.
- [13] 汤昱川,张玉良,张铜生. 粘滞阻尼器减震结构的非线性动力分析[J]. 工程力学, 2004, 21(1): 67-71.
- Tang Y C, Zhang Y L, Zhang T S. Nonlinear dynamic analysis of structures with viscous dampers [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21 (1): 67-71. (in Chinese)
- [14] Hatzigeorgiou G D, Pnevmatikos N G. Maximum damping forces for structures with viscous dampers under near-source earthquakes [J]. Engineering Structures, 2014, 68, 1-13.
- [15] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)