

某教学楼框架结构的黏滞阻尼器减震加固设计*

沈伟, 李爱群, 苏毅, 鲁风勇, 宋前恩

(东南大学建筑工程抗震与减振研究中心, 江苏 南京 210096)

摘要: 介绍了位于抗震设防烈度Ⅶ度区的某中学6层教学楼所采用的黏滞流体阻尼器的消能减震加固的计算和设计。该教学楼为现浇混凝土框架结构, 考虑到其建筑使用功能和抗震要求, 在1~6层优化布置了52套黏滞流体阻尼器, 时程分析结果表明: 黏滞流体阻尼器可大量耗散地震动能, 显著降低了结构的地震响应。

关键词: 消能减震设计; 混凝土框架; 黏滞流体阻尼器; 时程分析

中图分类号: TV352

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)02-0273-07

0 引言

目前, 既有建筑抗震加固方法本质上是以“硬抗”为主, 通过增强结构的抗侧能力、延性和整体性能来提高结构的抗震能力(陈婷婷, 2012); 常用的加固方法主要包括加大构件截面、增设墙体、粘贴钢板等(郭健, 2004; 张鑫等, 2011), 这些方法对建筑原装修和结构构件的破坏均较大, 且施工繁琐、工期长(徐彤等, 2000)。近年来, 国内外学者提出的消能减震技术改变了传统的抗震理念, 由结构和减震装置共同来抵御外界的地震作用; 进行抗震加固时, 阻尼器及支撑构件可预先制作, 现场安装, 施工方便且施工周期短。因此, 结构消能减震技术应用于中小学校舍安全工程中, 具有其独特的优越性(贺军利, 汪大绥, 2005)。

结构消能减震设计是指在房屋结构中设置消能装置, 通过局部变形提供附加阻尼, 以消耗输入上部结构的地震能量, 达到预期设防要求(李爱群, 2007)。具体就是把结构的某些构件(支撑、剪力墙、连接件等)设计成消能杆件, 或在结构的某些部位(层间空间、节点、连接缝等)安装消能支撑, 在小震下, 这些消能杆件(或消能装置)和结构共同工作, 结构本身处于弹性状态并满足正常使用要求; 大震或大风下, 随着结构侧向变形的增加, 消能杆或者消能装置产生较大的阻尼(黄镇, 2007), 大量消耗输入结构地震

或风振能量, 使结构的动能或者变形能转化为热能等形式消耗掉, 迅速衰减结构的地震反应, 使主体结构避免出现明显的非弹性状态。

1 工程概况

某中学教学楼地上6层。第1层层高4.2 m, 其他层层高3.7 m, 主体建筑总高度为24.3 m。结构模型如图1所示。

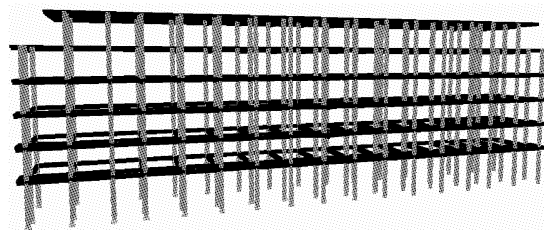


图1 某中学教学楼结构模型

Fig. 1 Model of the structure of a middle school teaching building

该结构采用现浇钢筋混凝土框架体系, 设计使用年限50年, 框架抗震等级二级, 抗震设防烈度Ⅶ度, 设计基本地震加速度0.1 g, 建筑场地为Ⅳ类, 设计地震分组为第二组。

该结构设计于2000年, 按照现有规范进行校核计算, 发现存在以下问题: 结构在多遇地震作用下的最大弹性层间位移角大于规范规定的限值1/550, 结构在罕遇地震作用下的最大弹塑性位移

* 收稿日期: 2013-10-10.

角远大于规范规定的限值 1/50。如果采用常规加固方法,增加柱、梁截面,会对建筑内原有的装修造成极大破坏,且工期长;同时,在常规加固之后,还应该对建筑物进行再装修。考虑到该建筑是教学楼,校方希望通过暑假两个月时间完成该楼的加固工作,经技术和经济综合比较,同意采用结构消能减震技术。

2 结构消能减震设计方案

2.1 消能支撑布置

依据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)、《建筑消能阻尼器》(JG/T209-2007)以及校方提供的建筑设计图、结构布置图和设计分析结果,在 1~6 层适当位置沿结构的两个主轴方向分别设置黏滞阻尼器,从而降低结构的地震反应(表 1),阻尼器的支撑方式有斜撑和人字撑两种类型(图 2)。

表 1 各楼层阻尼器布置类型和数量

Tab. 1 The type and number of the arrangement dampers in each floor

楼层	阻尼器支撑类型		方向		各楼层数量
	斜撑	人字撑	X 向	Y 向	
1	1	8	5	4	9
2	1	8	5	4	9
3	1	8	5	4	9
4	1	8	5	4	9
5	1	8	5	4	9
6	1	6	3	4	7
合计	6	46	28	24	52

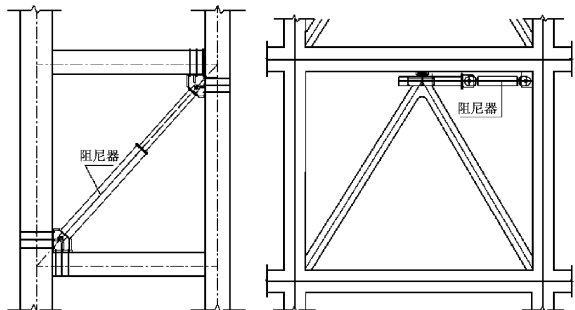


图 2 阻尼器支撑方式

(a) 斜撑; (b) 人字撑

Fig. 2 The support way of the dampers

(a) spag; (b) herringbone bridging

2.2 消能器的选用

工程采用双出杆型黏滞流体阻尼器对结构进行消能减震。阻尼器由缸筒、活塞、阻尼通道、阻尼介质(黏滞流体)和倒杆等部分组成(图 3)。

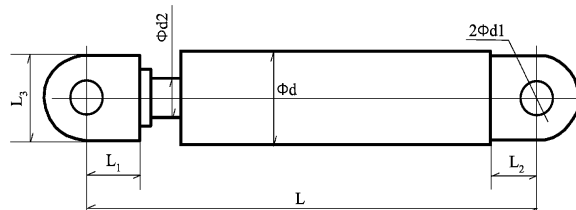


图 3 双出杆黏滞流体阻尼器外形示意图

Fig. 3 Sketch map of external form of the dual rod viscous fluid dampers

当工程结构因振动而发生变形时,安装在结构中的黏滞流体阻尼器的活塞与缸筒之间发生相对运动,由于活塞前后的压力差使黏滞流体从阻尼通道中通过,从而产生阻尼力,耗散外界输入结构的振动能量,达到减轻结构振动响应的目的(孟春光, 2009)。阻尼器的阻尼力和变形之间的关系可以描述为

$$F = CV^\alpha \quad (1)$$

式中, C 为阻尼系数, V 为阻尼器变形速率, α 为阻尼指数。本工程采用阻尼器参数如表 2 所示。

表 2 黏滞流体阻尼器参数

Tab. 2 The parameter of viscous fluid dampers

阻尼器类型	阻尼指数 α	阻尼系数 C / $\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	最大行程 / mm	最大阻尼力 / kN
A	0.35	1200	± 50	500
B	0.35	1000	± 50	500
C	0.3	800	± 50	500

3 地震作用下的结构消能减震分析

结构抗震设计采用 SATWE 软件,多遇地震下的弹性时程分析采用 ETABS NonlinearC V9.7.3 软件,设防烈度和罕遇地震作用下的动力弹塑性时程分析采用 PERFORM-3D V4.0.3 软件。时程分析所使用的地震波取 5 条国际上具有完整时程校正的

符合工程场地土特质的典型地震记录和 2 条根据该工程附近场地的地貌和地质特性制成的人工地震波，计算结果取 7 条地震波时程分析结果的包络值。

3.1 结构模型校核

采用 SATWE、ETABS 和 PERFORM-3D 软件对

结构进行综合分析，为判断模型的可靠性，提取各软件的模态分析结果、总质量和层剪力的计算结果进行对比。ETABS、SATWE 和 PERFORM-3D 模型计算的结构总质量分别为 5 346 t、5 359 t 和 5 365 t。模型的前 9 阶周期见表 3，模型反应谱分析的层间剪力结果对比见表 4。

表 3 模态分析结果对比
Tab. 3 Contrast of model analysis results

计算软件	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SATWE	1. 460 9	1. 365 1	1. 197 3	0. 467 4	0. 442 9	0. 385 9	0. 259 9	0. 252 3	0. 219 8
ETABS	1. 454 83	1. 352 39	1. 194 38	0. 464 77	0. 438 7	0. 384 06	0. 258 27	0. 249 87	0. 218 69
PERFORM-3D	1. 462 1	1. 359 2	1. 200 4	0. 467 1	0. 440 9	0. 386	0. 259 6	0. 251 1	0. 219 8

表 4 弹性反应谱的层剪力计算结果对比
Tab. 4 Contrast of story shear of elastic response spectrum

楼层	X 向层剪力/kN			Y 向层剪力/kN		
	SATWE 结果	ETABS 结果	PER-3D 结果	SATWE 结果	ETABS 结果	PER-3D 结果
6	766	727	735	660	619	632
5	1 390	1 363	1 379	1 183	1 147	1 159
4	1 926	1 921	1 930	1 620	1 598	1 610
3	2 374	2 391	2 389	1 979	1 973	1 977
2	2 727	2 765	2 775	2 267	2 277	2 269
1	2 972	3 019	3 056	2 472	2 491	2 488

3.2 地震波的选取

本工程设计地震波选用 KOCAELI (KOCA)、NORTHRIGE (NOR)、R2、WASHINGTON (WASH)、WESTMORELAND (WEST)、SH1 (人工波)、SH4 (人工波) 共 7 条。通过对波在频域内的综合调整，使得各条波在Ⅶ度多遇地震 (35 gal) 的反应

谱与我国《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010) 相对应的不同水准设计谱基本一致。两条人工地震波 SH1、SH4 是根据该工程附近场地的地貌和地质特性制成的。基底剪力对比见表 5。Ⅶ度多遇 (35 gal) 设计地震动和 5% 阻尼比规范设计谱对比如图 4 所示。

表 5 多遇地震作用下各地震波基底剪力
Tab. 5 The base shear of each seismic waves under frequent earthquake

方向	地震波	KOCA	NOR	R2	WASH	WEST	SH1	SH4	平均值
X 向	剪力/kN	3 066	2 852	2 991	2 604	2 198	2 398	2 796	2 701
	比值	1. 015 6	0. 944 7	0. 990 7	0. 862 5	0. 728 1	0. 794 3	0. 926 1	0. 894 6
Y 向	剪力/kN	288 5	197 0	281 0	223 1	228 3	162 4	234 2	230 6
	比值	1. 158 2	0. 790 8	1. 128 1	0. 895 6	0. 916 5	0. 651 9	0. 940 2	0. 925 9

注：比值 = 地震波作用下的基底剪力/反应谱的基底剪力。

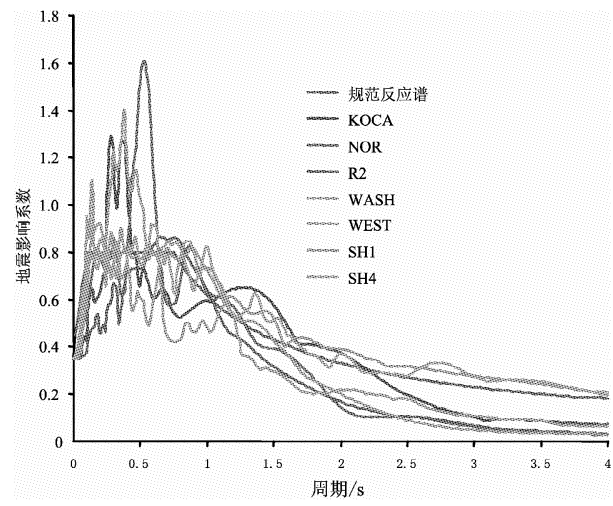


图4 设计地震动和5%阻尼比规范设计谱对比
Fig. 4 Contract between design ground motion and standard design spectrum of damping ratio of 5%

3.3 多遇地震作用下结构弹性时程分析

对无控结构和有控结构分别进行多遇地震作用下的弹性时程分析采用非线性快速时程分析方法 (FNA), 对结构整体及其构件承载力进行设计和复合, 得出楼层剪力、层间位移角等结构宏观响应, 计算结果表明多遇地震作用下无控结构不满足弹性目标, 最大层间位移角大于规范要求的1/550, 有控结构则能满足弹性目标, 层间位移角均能满足规范限值。限于篇幅, 在这里不一一列出。最后对其结果进行比较, 得出各条地震波作用下, 有控结构相对于无控结构的层剪力减震率 (表6、表7)。

表6 X向各条地震波的层间剪力减震率

Tab. 6 Reducing rate of intersstory shear of each seismic wave in X direction

楼层	KOCA	NOR	R2	WASH	WEST	SH1	SH4	平均值
6	44.94%	17.92%	33.79%	33.98%	20.10%	1.23%	18.71%	24.38%
5	42.22%	15.68%	36.07%	36.71%	22.04%	13.13%	26.62%	27.50%
4	42.81%	19.32%	35.64%	36.80%	16.54%	22.15%	30.65%	29.13%
3	46.39%	22.46%	34.34%	35.66%	24.04%	23.15%	27.80%	30.55%
2	45.23%	24.87%	35.67%	38.39%	33.64%	19.79%	25.25%	31.83%
1	44.94%	23.74%	38.58%	40.16%	35.41%	16.15%	22.12%	31.59%

表7 Y向各条地震波的层间剪力减震率

Tab. 7 Reducing rate of inter story shear of each seismic wave in Y direction

楼层	KOCA	NOR	R2	WASH	WEST	SH1	SH4	平均值
6	KOCA	NOR	SILC	WASH	WEST	SH1	SH4	34.38%
5	57.34%	28.14%	14.90%	26.55%	43.74%	34.97%	35.00%	30.07%
4	54.68%	26.35%	13.41%	16.99%	35.48%	35.63%	27.92%	29.35%
3	52.12%	30.77%	8.75%	12.85%	35.52%	39.40%	26.02%	32.47%
2	51.93%	23.82%	16.69%	20.66%	39.83%	42.11%	32.24%	38.19%
1	53.81%	23.84%	29.50%	31.87%	47.19%	44.92%	36.21%	32.54%

3.4 罕遇地震作用下结构弹塑性时程分析

采用 Perform-3D 软件对结构在罕遇地震作用下的结构响应进行了动力弹塑性分析, 计算结果如图5所示。

3.5 等效附加阻尼比

黏滞阻尼器对结构的减震作用可以通过附加等效阻尼比的方式进行考虑, 等效附加阻尼比 ξ_a 可以按照下式进行估算:

$$\xi_a = \sum_j W_{qj} / (4\pi W_s). \quad (2)$$

式中, W_{qj} 为第 j 个耗能部件在结构预期层间位移 Δu_j 下往复循环一周所消耗的能量; W_s 为设置耗能部件的结构在预期位移下的总变形能。

按照 (2) 式算得的结构 X 向等效附加阻尼比为 10.12%, Y 向等效附加阻尼比为 11.03%。保守地取等效附加阻尼比为 10%, 即结构总阻尼比为 15%。

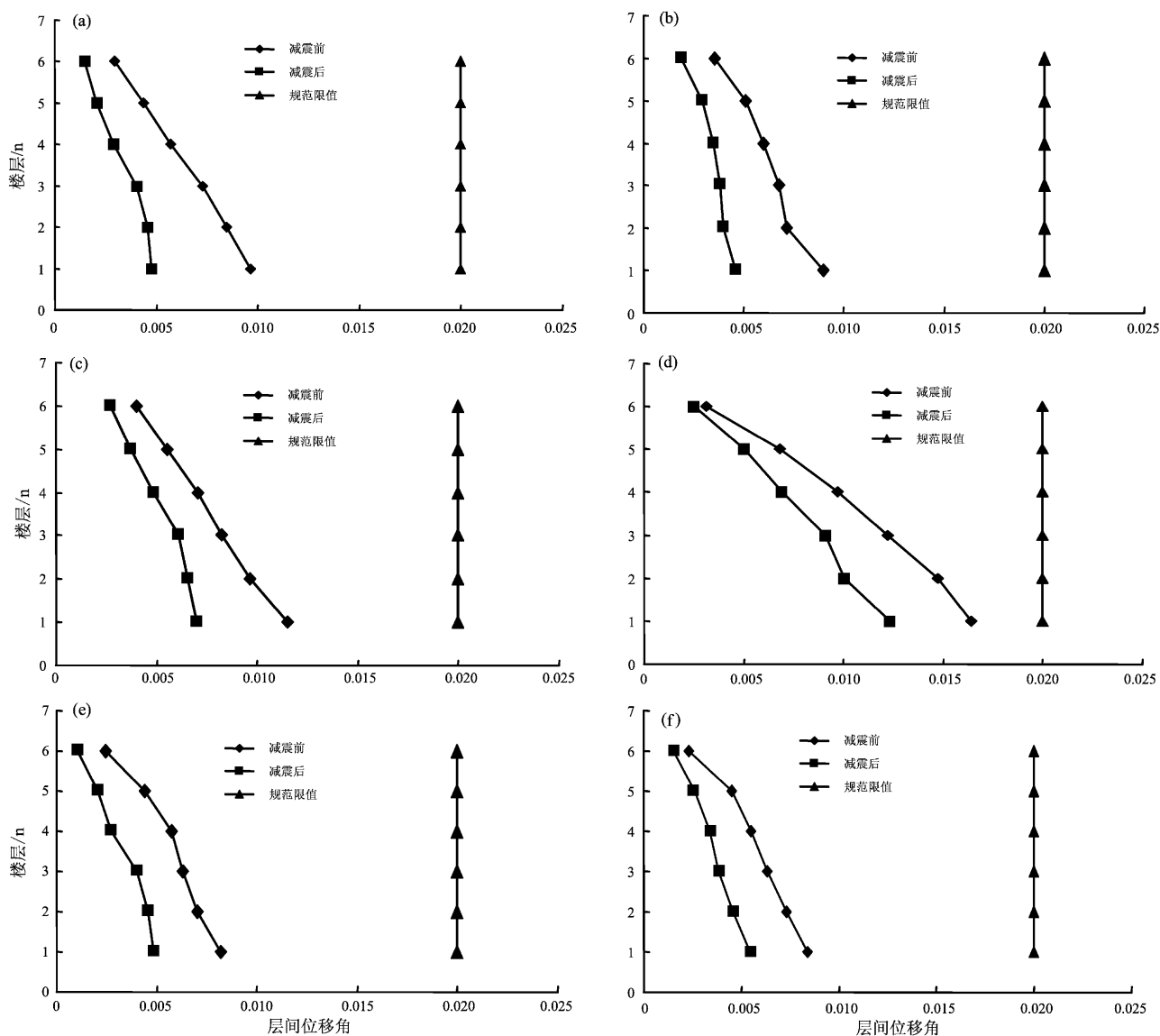


图5 结构弹塑性时程分析下的层间位移角对比

(a) X向 KOCA 波; (b) Y向 KOCA 波; (c) X向 WEST 波; (d) Y向 WEST 波; (e) X向 SH4 波; (f) Y向 SH4 波

Fig. 5 Interstory displacement angle contract in analyze of structure elastic plastic time history

(a) KOCA wave in X direction; (b) KOCA wave in Y direction; (c) WEST wave in X direction; (d) WEST wave in Y direction; (e) SH4 wave in X direction; (f) SH4 wave in Y direction

3.6 等效阻尼比验证

将计算得到的等效阻尼比 15% 输入 ETABS, 采用反应谱计算方法, 得到每一层的地震力, 将其与 5% 阻尼比下的结果作对比, 如表 8 所示, 等效阻尼比减震率 = (5% 阻尼比层剪力结果 - 15% 阻尼比层剪力结果) / 5% 阻尼比层剪力结果; 减震结构减震率 = (5% 阻尼比层剪力结果 - 加阻尼器结构的时程分析层剪力结果) / 5% 阻尼比层剪力结果。

由表 8 可知, 15% 阻尼比的 ETABS 模型反应谱方法得到的楼层地震力减震率基本小于 ETABS

得到的在时程分析下的地震力减震率, 对于第五、第六层的楼层地震力减震率稍大于时程分析下的地震力减震率, 而原结构在第五、第六层已加强配筋, 综上, 可以认为采用 15% 的等效阻尼比是偏于安全的, 可以采用此数值进行结构抗震加固计算和设计。

4 结论

某中学教学楼采用了黏滞流体阻尼器消能减

震技术,本文对该结构在Ⅶ度(0.1 g)多遇、罕遇地震作用下的减震前和减震后工作性能分别进行了计算分析,得出以下主要结论:

(1) 采用黏滞流体阻尼器对该结构进行减震设计是有效的。

表8 X向、Y向各条地震波的层间剪力减震率

Tab. 8 Reducing rate of interstory shear in X and Y directions

方向	楼层	5%阻尼比 (反应谱结果)	15%阻尼比 (反应谱结果)	等效阻尼 比减震率	减震结构 减震率
X向	6	766.1	526.8	31.24%	24.38%
	5	1 389.7	965.6	30.51%	27.50%
	4	1926.2	1347.7	30.04%	29.13%
	3	2 373.7	1 669.0	29.69%	30.55%
	2	2 726.6	1 924.9	29.40%	31.83%
	1	2 971.6	2 106.0	29.13%	31.59%
Y向	6	660.1	459.5	30.40%	34.38%
	5	1 183.5	834.5	29.49%	30.07%
	4	1 619.6	1 152.8	28.82%	29.35%
	3	1 979.4	1 418.3	28.35%	32.47%
	2	2 267.2	1 632.4	28.00%	38.19%
	1	2 472.2	1 787.8	27.69%	32.54%

(2) 根据与 SATWE 计算结果比较可知,采用 ETABS 和 PERFORM-3D 建立的计算模型合理,分析软件计算结果可靠。

(3) 按照本项目建筑场地类别和设计地震分组选用了5条天然波和2条人工波,每条地震波计算所得未减震结构的底部地震剪力均大于反应谱

法计算结果的65%,平均值大于反应谱法计算结果的80%,符合《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)的要求。采用这7组地震加速度时程曲线下各自最大地震响应值的平均值作为时程分析的最终计算值,结果可靠。

(4) 在现有布置52套阻尼器的情况下,结构在地震作用下的反应均有所减小。在Ⅶ度(0.1 g)常遇地震作用下,X向基底剪力平均减震率约31.59%,Y向基底剪力平均减震率约32.54%。

(5) 经过计算并综合考虑得出黏滞流体阻尼器附加给结构X向和Y向的等效阻尼比均为10%。

(6) 该工程采用消能减震技术后,在不加大大构件截面的前提下,结构抗震性能大为提高,满足了现行规范的要求,具有明显的经济效益。

参考文献:

- 陈婷婷. 2012. 现有建筑结构抗震鉴定及加固设计研究[D]. 北京: 北京工业大学, 1-4.
- 郭健. 2004. 钢筋混凝土结构加固改造方法的研究及工程应用[D]. 长沙: 湖南大学, 7-17.
- 贺军利, 汪大绥. 2005. 消能减振房屋抗震设计方法研究述评[J]. 世界地震工程, 26(4): 148-156.
- 黄镇. 2007. 非线性黏滞阻尼器理论与试验研究[D]. 南京: 东南大学, 5-7.
- 李爱群. 2007. 工程结构减振控制[M]. 北京: 机械工业出版社.
- 孟春光. 2009. 黏滞阻尼器减震结构设计方法及计算实例[J]. 建筑结构, 39(S2): 185-189.
- 徐彤, 周云, 李良. 2000. 结构减震控制技术在抗震加固改造中的应用[J]. 建筑结构, 30(10): 63-66.
- 张鑫, 李安起, 赵考重. 2011. 建筑结构鉴定与加固改造技术的进展[J]. 工程力学, 28(1): 1-11.
- GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S].
- JG/T209-2007, 建筑消能阻尼器[S].

Seismic Retrofit Design of a Teaching Building with Frame Structure by Using Viscous Field Damper

SHEN Wei, LI Ai-qun, SU Yi, LU Feng-yong, SONG Qian-en

(*Research Center for Earthquake Resistance and Energy Dissipation of Engineering Structures, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China*)

Abstract

The calculation and design of energy-dissipated seismic retrofit of a 6-story teaching building in a middle school located in seismic fortification intensity of VII by using viscous fluid dampers is introduced. The structure of the teaching building is the cast-in-situ concrete frame. Considering the using function and seismic performance demand of the building, the teaching building is optimally arranged 52 viscous dampers from the first to the sixth story. The dynamical time history analysis results indicate that the viscous fluid dampers effectively dissipate the energy of structure vibration and obviously reduce the seismic response of the structure.

Key words: energy-dissipated seismic retrofit design; concrete frame; viscous fluid dampers; time history analysis