

DOI: 10.19701/j.jzjg.22S1405

上海某小学满足中震正常使用要求的 消能减震分析与设计

孔庆宇, 耿耀明, 王永伟

(同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 上海某新建小学教学楼为多层装配式钢框架结构, 所处区域属于地震重点监视防御区, 根据《建设工程抗震管理条例》规定, 需保证发生本区域设防地震时能够满足正常使用要求。本项目从变形和承载力两个方面进行控制, 在设防地震下, 层间位移角不大于 $1/250$, 钢框架梁、钢框架柱不出现塑性铰, 保持弹性。通过采用消能减震技术, 在合适的位置布置小 t 位黏滞阻尼墙, 提高结构的抗震性能。本项目设防地震下的弹塑性时程分析采用有限元软件 SAUSAGE, 经计算分析可知, 黏滞阻尼墙在设防地震作用下发挥耗能作用, 结构基底剪力和层间位移角减震效果明显, 最大层间位移角满足限值要求, 构件性能水平为无损坏状态, 保持弹性, 结构可以保证设防地震下的正常使用。

关键词: 消能减震; 黏滞阻尼墙; 设防地震; 正常使用; 钢框架结构

中图分类号: TU352.1⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-848X(2022)S1-0916-06

Energy dissipation analysis and design of a new primary school building to be normally used under medium earthquake in Shanghai

KONG Qingyu, GENG Yaoming, WANG Yongwei

(Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: A new primary school teaching building in Shanghai is a multi-storey steel frame structure. It is located in a key earthquake surveillance and protection area. According to the Regulations on the Administration of Earthquake Resistance of Construction Projects, it is necessary to ensure that the aforementioned facilities can be normally used in case of a precautionary earthquake. The project is controlled from two aspects of deformation and bearing capacity. Under Medium Earthquake, the inter-layer displacement Angle is no more than $1/250$, and the steel frame beam and column do not appear plastic hinge, so as to maintain elasticity. The seismic performance of the structure can be improved by using energy dissipation technology, placing viscous damping walls with small tonnage at appropriate locations. The project elastic-plastic time history analysis under Medium Earthquake uses finite element software SAUSAGE. Through calculation and analysis, it can be seen that the viscous damping wall under the action of earthquake resistance in play a role of energy consumption. It has obvious damping effect on base shear force and inter-layer displacement Angle under medium earthquake protection, the maximum inter-layer displacement Angle meets the limit requirements, and the performance level of the component is in the state of no damage and remains elastic. The structure can ensure the normal use under medium earthquake.

Keywords: energy dissipation; viscous damping wall; medium earthquake; normal use; steel frame structure

0 引言

随着我国国民经济和城市化水平的发展, 我国对建筑的防震减灾能力提出了更高的要求, 国务院第 744 号文《建设工程抗震管理条例》^[1]第十六条明确提出“位于高烈度设防地区、地震重点监视防御区的新建学校、幼儿园、医院、养老机构、儿童福利机构、应急指挥中心、应急避难

场所等建筑应当按照国家有关规定采用隔震减震等技术, 保证发生本区域设防地震时能够满足正常使用要求。”目前, 相关规范条文对“设防地震下的正常使用要求”无明确规定, 本文从位移和承载能力两个方面进行中震指标控制, 以实际工程为例, 展现采用消能减震技术来确保满足中震下正常使用要求的基本设计思路和流程, 为类似

第一作者: 孔庆宇, 学士, 工程师, 一级注册结构工程师, 主要从事结构设计工作, Email: 32kqy@tjad.cn.

通信作者: 王永伟, 硕士, 工程师, 主要从事结构设计工作, Email: 32wyw@tjad.cn.

工程提供参考。

1 工程概况

本项目位于上海市普陀区，项目总建筑面积 24986m²，其中地上 12086m²，地下 12900m²。地上主体建筑 6 层（局部 4 层或 1 层），地下 2 层，主要建筑功能为教学、办公用房。室外地面至大屋面檐口高度 23.2m<24m，为多层建筑。地上建筑平面尺寸为 101m×37.5m，平面呈“E”形，坐落于大底盘地下室上，建筑平面布局示意图见图 1。

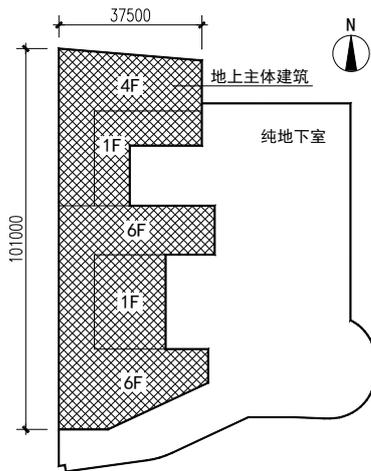


图 1 建筑平面布局示意图

本工程抗震设防类别为乙类，抗震设防烈度为 7 度，基本地震加速度为 0.10g，设计地震分组为第二组，场地类别为 IV 类，特征周期为 0.90s。设计使用年限为 50 年，结构安全等级为二级。

本工程地上主体结构采用装配式钢框架结构体系，框架抗震等级为三级。框架柱采用方钢管，截面尺寸为 450×450~500×500；框架梁采用 H 型钢，截面尺寸为 HN700×300、HN600×200、HN500×200；次梁采用 H 型钢，截面尺寸 HN400×200。楼（屋）盖采用压型钢板组合楼板，板厚为 120mm，局部连接薄弱处采用钢筋桁架楼承板加强。

本项目为新建学校类建筑，所处区域属于地震重点监视防御区，根据国务院第 744 号文《建设工程抗震管理条例》第十六条规定，需采用消能减震技术提高结构的抗震性能，保证发生本区域设防地震时能够满足正常使用要求。本项目在结构中增设黏滞阻尼墙，利用其在地震下的耗能作用，增加结构附加阻尼比，消耗输入结构的地震能量，达到预期减震目标，实现设防地震下的正常使用要求。

为充分发挥阻尼器的耗能作用，阻尼器沿竖向应尽量布置在层间位移较大的楼层^[2]，本项目为以剪切变形为主的框架结构，考虑在结构下部几层和层间位移角较大的局部楼层布置黏滞阻尼墙，故在 1~4 层布置阻尼墙。平面布置上，充分结合建筑墙体位置，采用墙式连接，安装后不影响建筑使用功能和美观。黏滞阻尼墙平面布置示意图见图 2，黏滞阻尼墙典型立面图见图 3。

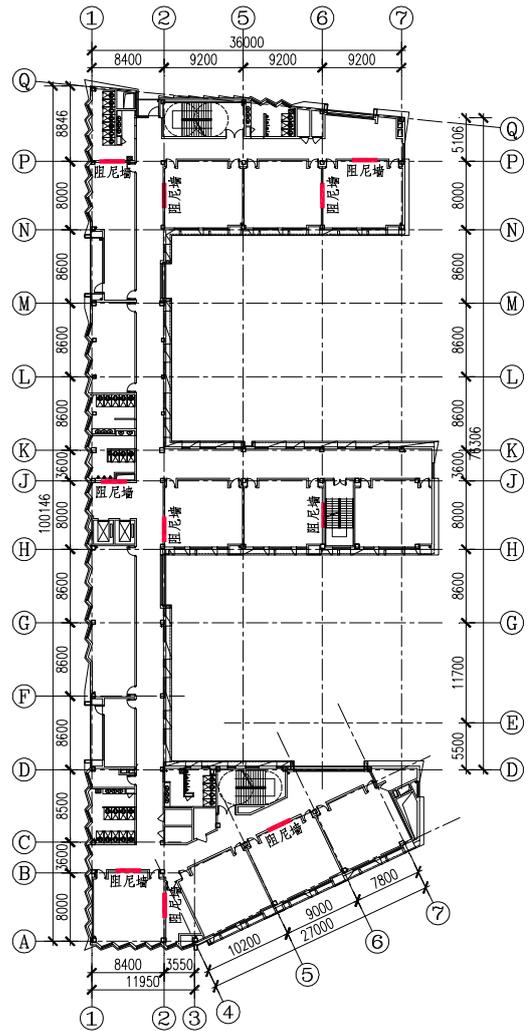


图 2 黏滞阻尼墙平面布置示意图

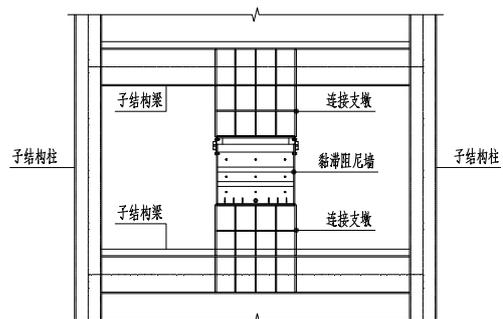


图 3 黏滞阻尼墙典型立面布置示意图

2 结构性能目标及减震原理

2.1 性能目标

根据条例要求,本工程需满足设防地震下正常使用的要求。本工程从位移和承载力两个方面控制,参考规范对小震的相关要求,保证使用的控制指标定为中震下层间位移角不大于1/250,中震下钢框架梁、钢框架柱不出现塑性铰,保持弹性。

2.2 黏滞阻尼墙的工作原理

黏滞阻尼墙^[3]是20世纪80年代由日本学者Mitsuo Miyazaki发明的,是一种速度型阻尼器,由钢制箱体、内钢板、高粘度黏滞材料组成。钢制箱体与下层钢梁连接(直接连接或通过连接支墩过渡连接),内钢板与上层钢梁连接(直接连接或通过连接支墩过度连接)。在地震作用下,结构上下楼层之间将产生相对速度,固定在上层楼面梁的内钢板将会在钢箱内往复运动,使内外钢板之间产生速度梯度引起黏滞材料剪切滞回耗能,从而减小结构的动力反应,达到结构耗能减控的目的^[4]。黏滞阻尼墙构造示意图见图4。

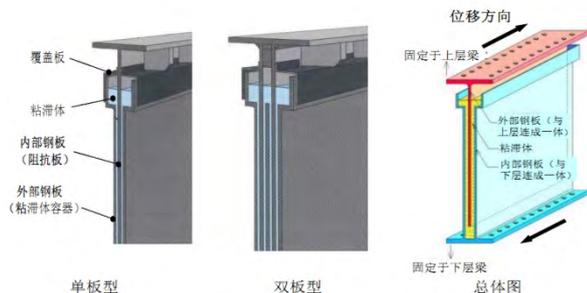


图4 黏滞阻尼墙构造示意图

黏滞阻尼墙^[5]是一种性能良好的消能减震部件,用于建筑结构减震具有以下优点:1)构造连接简单、可靠、美观,维修方便,可更换;2)由于墙体与黏滞材料的作用面积较大,故可吸收较多的地震能量,黏滞阻尼墙内部的黏滞流体材料更易于做到密封,受力耗能更加稳定;3)可以设置在建筑物的墙壁内,安装后不影响建筑使用功能及美观。

黏滞阻尼墙的力学性能可用如下数学公式表达^[6]:

$$F = C \times V^\alpha \quad (1)$$

式中: F 为黏滞阻尼墙的阻尼力,kN; C 为黏滞阻尼墙的阻尼系数,kN/(m/s) $^\alpha$; α 为黏滞阻尼墙的阻尼指数; V 为黏滞阻尼墙的速度,m/s。

非线性黏滞阻尼墙的典型滞回曲线见图5。

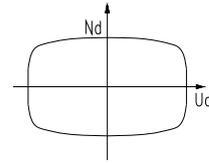


图5 黏滞阻尼墙的滞回曲线

3 结构计算与分析

3.1 结构计算模型与主要参数

多遇地震作用下弹性计算采用YJK和SAUSAGE软件,设防及罕遇地震作用下弹塑性时程分析采用SAUSAGE软件。主要计算假定如下:1)为真实反映楼板的平面内变形,楼板采用弹性膜单元;2)结构固有阻尼比取4%;3)多遇地震和设防地震分析时周期折减系数取为0.7。

在通用有限元软件SAUSAGE中,黏滞阻尼墙的力学模型采用Maxwell模型,本工程拟采用的黏滞阻尼墙性能参数见表1。

表1 黏滞阻尼墙(速度型)设计参数及数量

阻尼系数C/(kN/(m/s) $^\alpha$)	阻尼指数 α	最大行程/mm	最大阻尼力/kN	最大速度/(mm/s)	数量/个
950	0.3	± 100	500	180	40

3.2 反应谱法计算结果

采用YJK软件和SAUSAGE软件分别进行多遇地震作用下反应谱分析,计算结果见表2,两个软件计算结果基本一致,说明计算结果较为可靠。

表2 结构多遇地震作用下反应谱计算结果

计算指标		YJK	SAUSAGE
结构总质量/kN		177585	177738
周期 (XY平动系数+ 扭转系数)	T ₁	1.1532 (0.76+0.14+0.10)	1.182 (0.75+0.11+0.16)
	T ₂	1.1433 (0.22+0.77+0.01)	1.140 (0.27+0.71+0.02)
	T ₃	1.0263 (0.18+0.09+0.73)	1.036 (0.14+0.13+0.73)
周期比(第一扭转 周期/第一平动周期)		0.89	0.88
有效质量 参与系数	X向	95.93%	99.37%
	Y向	95.94%	99.41%
最大层间位移角 (所在楼层)	X向	1/401(3层)	1/397(3层)
	Y向	1/430(3层)	1/439(3层)
剪重比	X向	6.153%	6.049%
	Y向	5.985%	5.971%
最大扭转位移比 (所在楼层)	X向	1.38(3F)	1.389(3F)
	Y向	1.07(3F)	1.049(3F)

3.3 减震分析计算结果

本工程中震弹塑性时程分析选用上海Ⅳ类场地、特征周期为 0.90s、地面运动最大加速度为 100cm/s^2 的 2 条天然地震波和 1 条人工地震波，分别为 SHW1(人工波)、SHW5(天然波)、SHW7(天然波)。各条波有效持续时间均大于 20s，各地震波平均反应谱与规范反应谱对比曲线见图 6，在结构主要自振频率区段内吻合较好，能够在统计意义上相符，而且在各条地震波单独作用下，结构的底部剪力均大于反应谱法求得的底部剪力的 65%且不大于 135%，多条地震波计算得到的结构底部剪力平均值大于反应谱法求得的底部剪力的 80%且不大于 120%，因此，所选地震波满足规范要求^[7]。

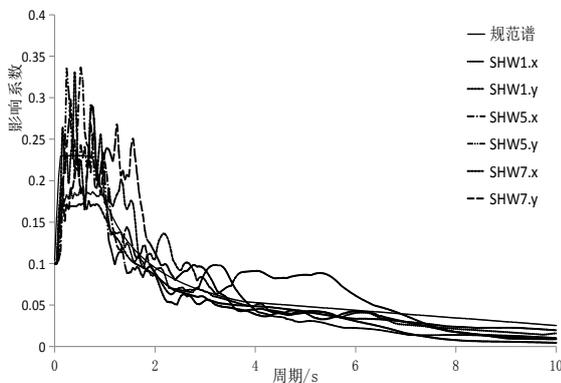


图 6 地震动谱曲线

本工程采用大型有限元分析软件 SAUSAGE (2021) 对结构进行设防地震弹塑性时程分析。以评价结构在设防地震作用下的弹塑性行为。本工程整体模型见图 7。分析时取嵌固端以上即地上结构进行分析。采用重力荷载代表值(恒载+0.5活载)为设防地震动力弹塑性时程分析的初始状态。

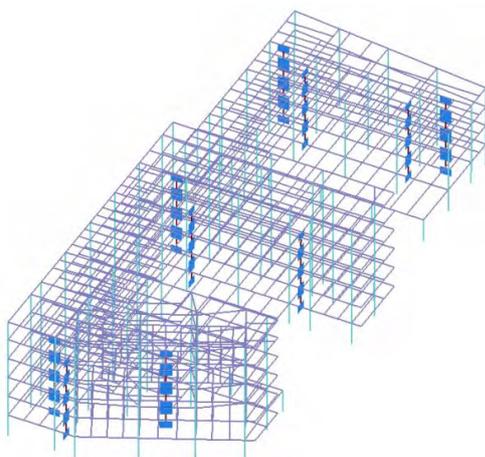


图 7 整体计算三维模型

中震下，设置黏滞阻尼墙的有控结构和不设置黏滞阻尼墙的无控结构基底剪力计算结果见表 3，可以看出，黏滞阻尼墙在中震工况下发挥耗能作用，地震作用明显减小，减震率为 30%~40%。有控模型各层剪力分布曲线见图 8。

表 3 中震下结构基底剪力计算结果

工况	主方向	无控模型 基底剪力/kN	有控模型基 底剪力/kN	减震率 (1-有控/无控)
SHW1_X	X 主向	23841	15496	35%
SHW5_X	X 主向	24690	16295	34%
SHW7_X	X 主向	27710	18842	32%
SHW1_Y	Y 主向	23139	14346	38%
SHW5_Y	Y 主向	25327	16969	33%
SHW7_Y	Y 主向	28499	19949	30%

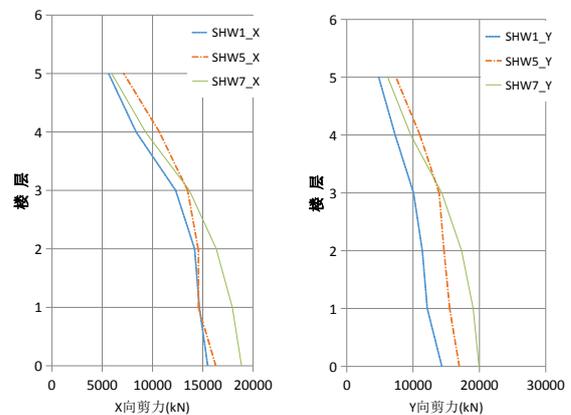


图 8 结构楼层剪力分布图

中震下，设置黏滞阻尼墙的有控结构和不设置黏滞阻尼墙的无控结构层间位移角计算结果见表 4，可以看出，黏滞阻尼墙在中震工况下发挥耗能作用，位移角减震率为 14%~22%。结构设置黏滞阻尼墙后，层间位移角最大为 1/261(X 向)、1/260 (Y 向)，不大于预定的减震目标限值，保证了结构在设防地震下正常使用的目标要求。有控结构各层位移角分布曲线见图 9。

表 4 结构基底剪力计算结果

工况	主方向	无控模型 最大层间位 移角	有控模型 最大层间位 移角	减震率 (1-有控/无控)
SHW1_X	X 主向	1/220	1/261	15.71%
SHW5_X	X 主向	1/244	1/284	14.08%
SHW7_X	X 主向	1/221	1/261	15.33%
SHW1_Y	Y 主向	1/242	1/284	14.79%
SHW5_Y	Y 主向	1/255	1/324	21.30%
SHW7_Y	Y 主向	1/210	1/260	19.23%

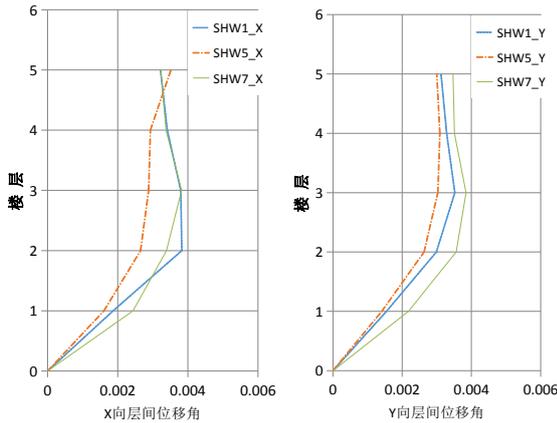


图9 结构楼层位移角分布图

中震下，结构能量耗散情况见图10，可以看到，黏滞阻尼墙在设防地震作用下发挥耗能作用，有效减小了主体结构的损伤，体现了良好的耗能机制。通过基于能量耗散的方法计算的附加阻尼比^[8-9]，SHW1时程下，黏滞阻尼墙可提供5.6%附加阻尼比；SHW5时程下，黏滞阻尼墙可提供4.4%附加阻尼比；SHW7时程下，黏滞阻尼墙可提供4.7%附加阻比。

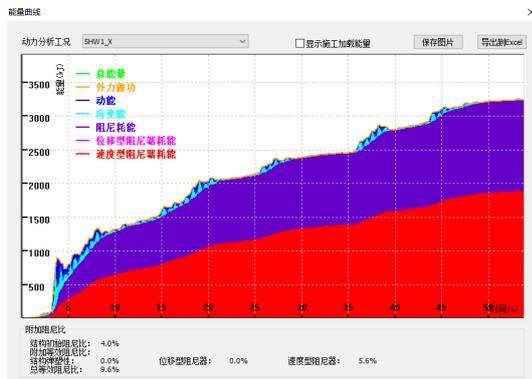


图10 结构能量耗散曲线图（以SHW1为例）

中震下，钢梁性能水平汇总表5，性能水平分布图见图11，可以看出，大部分钢梁的性能水平为无损坏状态，保持弹性，极个别与阻尼墙相连的框架梁出现轻微损坏和轻度损坏，这部分构件截面为HN600×200，截面加大为HN700×300可实现无损坏。整体结构可以达到中震正常使用

表5 中震下钢梁性能水平汇总（三条波包络结果）

楼层	无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	重度损坏	严重损坏
二层	98.6%	0.8%	0.6%	0	0	0
三层	98.4%	0.9%	0.7%	0	0	0
四层	98.8%	0.6%	0.6%	0	0	0
五层	100.0%	0	0	0	0	0
屋面	100.0%	0	0	0	0	0

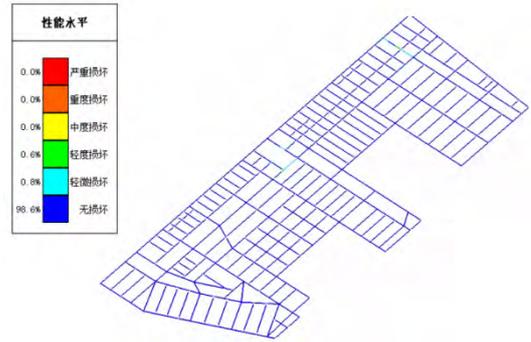


图11 钢梁性能水平分布情况（以二层为例）

的目标要求。

中震下，钢柱性能水平汇总见表6，性能水平分布图见图12，由图可以看出，钢柱及阻尼墙连接支墩的性能水平全部为无损坏状态，保持弹性，可以达到中震正常使用的目标要求。

表6 中震下钢框架柱及阻尼墙连接支墩性能水平汇总

地震波	无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	重度损坏	严重损坏
SHW1	100%	0	0	0	0	0
SHW5	100%	0	0	0	0	0
SHW7	100%	0	0	0	0	0

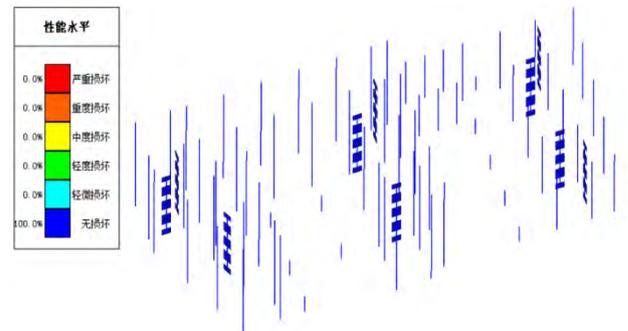


图12 钢柱及阻尼墙连接支墩性能水平分布情况

中震下，梁柱应力时程包络计算结果见图13~14，从图中可以看出，最大应力为278000kPa，即278N/mm²，小于钢材强度设计值，满足弹性要求。

中震下，黏滞阻尼墙典型滞回曲线见图15。由图可知，阻尼墙滞回曲线较为饱满，在中震下已发挥减震耗能作用，效果明显。

3.4 黏滞阻尼墙性能评估

对主体结构进行罕遇地震弹塑性分析，提取黏滞阻尼墙在罕遇地震下的最大出力、最大位移、最大速度。

根据上海市工程建设规范《建筑消能减震及隔震技术标准》(DG/TJ08-2326-2020)^[10]第5.1.5条：消能器极限位移应不小于罕遇地震下消能器

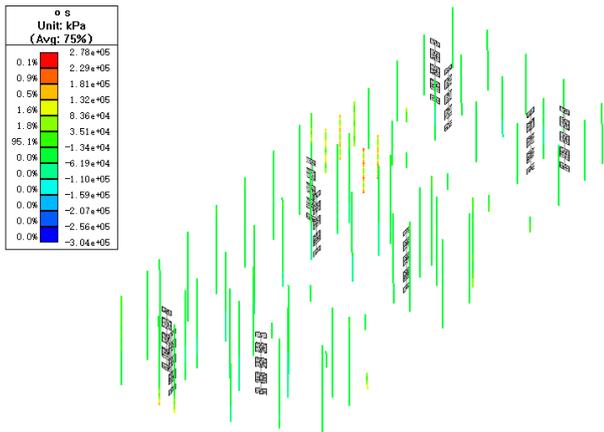


图 13 中震下钢柱应力计算结果/kPa

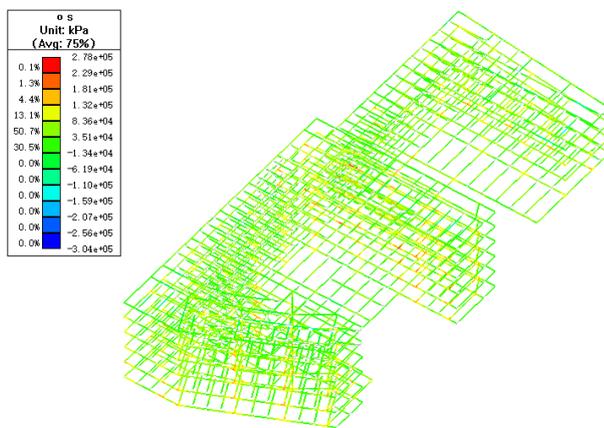


图 14 中震下钢梁应力计算结果/kPa

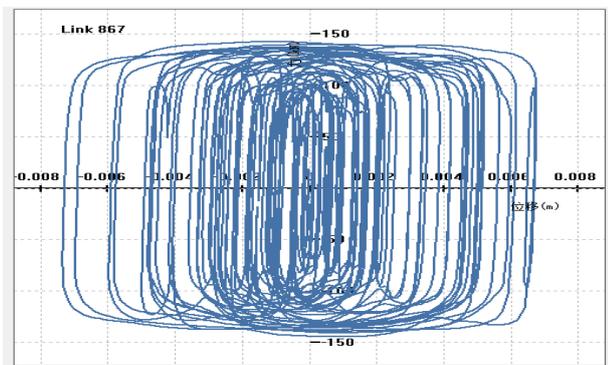


图 15 黏滞阻尼墙典型滞回曲线

最大位移的 1.2 倍, 且不小于弹塑性层间位移角限值。本工程黏滞阻尼墙在罕遇地震下的最大位移为 69.1mm。弹塑性层间位移限值为 $4200 \times 1/50 = 84\text{mm}$ 。本工程取黏滞阻尼墙极限位移取为 100mm, 满足规范要求。

根据上海市工程建设规范《建筑消能减震及隔震技术标准》(DGTJ08-2326-2020) 第 4.2.3 条: 速度相关型消能器极限速度应大于消能器设计速度的 120%。本工程黏滞阻尼墙在罕遇地震下的最大速度(即设计速度)为 148.1mm/s。本工程黏滞阻

尼墙极限速度取为 180mm/s, 满足规范要求。

4 结论

该学校建筑是位于地震重点监视防御区的多层钢框架结构, 为满足中震下正常使用的要求, 采用了消能减震技术。

本文提出“中震下正常使用”的控制指标从位移和承载力两个方面控制, 参考规范对小震的相关要求, 保证正常使用的控制指标定为中震下层间位移角不大于 1/250, 中震下钢框架梁、钢框架柱不出现塑性铰, 保持弹性。

结构设置黏滞阻尼墙后, 中震下, 最大层间位移角不大于预定的限值目标; 钢框架梁大部分处于弹性状态, 极个别与阻尼墙相连的框架梁出现轻微损坏和轻度损坏, 适当加大截面后, 可保持弹性; 钢框架柱及阻尼墙连接构件保持弹性。设置黏滞阻尼墙的结构, 抗震性能得到明显改善, 可以保证结构在设防地震下正常使用的目标要求。

黏滞阻尼墙在设防地震下能够正常工作, 耗能曲线饱满, 满足性能要求。在罕遇地震下最大出力、最大位移、最大速度均小于极限值, 可以正常工作, 满足规范要求。

本文以实际工程为例, 展现采用消能减震技术来确保满足中震下正常使用要求的基本设计思路 and 流程, 为类似工程设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] 建设工程抗震管理条例(国务院令 第 744 号). 中国政府网, 2021 年 8 月 4 日.
- [2] 孟春光. 粘滞阻尼器减震结构设计方法及计算实例[J]. 建筑结构, 2009, 39(S2): 185-189.
- [3] MIYAZAKI M, ARIMA F, KIDATA Y, et al. Earthquake response control design of building using viscous damping walls[C]. In: Proc. 1st East Asian Conference on Structural Engineering and Construction. Bangkok: 1986: 1882-1891.
- [4] 吴美良, 钱稼茹. 粘滞阻尼墙的研究与工程应用[J]. 工业建筑, 2003, 33(5): 61-65.
- [5] 丁洁民, 吴宏磊. 黏滞阻尼技术工程设计与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [6] TAYLOR D P. History, design, and applications of fluid dampers in structural engineering[C]. Proceeding of the Passive Control Symposium. Tokyo: 2002.
- [7] 建筑抗震设计规范: GB50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [8] 翁大根, 李超, 胡岫岩, 等. 减震结构基于模态阻尼耗能的附加阻尼比计算[J]. 土木工程学报, 2016, 49(S1): 19-24, 31.
- [9] 章丛俊, 李爱群. 基于性能的消能减震结构抗震设计思想研究[J]. 建筑结构, 2006, 36(S1): 682-685.
- [10] 上海市建筑消能减震及隔震技术标准: DG/TJ 08-2326-2020[S]. 上海: 同济大学出版社, 2020.