

消能减震技术在历史建筑改造中的应用

张 坚

(上海建筑设计研究院有限公司, 上海 200041)

[摘要] 不同于一般建筑,历史保护建筑的改造要求设计保存历史的原貌,而此类建筑原先的结构设计往往未考虑抗震或抗震性能远远不能满足现行规范要求,造成了保护与抗震的矛盾。采用消能减震技术,选择合适的阻尼器,布置于建筑允许的部位可以很好地解决上述矛盾。结合四行仓库项目的改造,浅谈消能减震技术在历史保护建筑中的应用。

[关键词] 历史保护建筑;消能减震结构;阻尼器

中图分类号: TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-848X(2015)S2-0478-04

Energy-dissipation design in promotion of historic conservation building

Zhang Jian

(Shanghai Institute of Architectural Design & Research, Shanghai 200041, China)

Abstract: Different from ordinary structural design, promotion of historic conservation building generally asks engineer to keep original structure elements. But the archiac design can not meet the current seismic requirement, thus brings the conffliction between historic protection and earthquake resistance. Energy-dissipation technology is a good way to solve the problem. Chosing right dampers and putting them to the right place, we can achieve a good solution. This paper will present the energy-dissipation design of Si Hang Storage for example.

Keywords: historic conservation building; energy-dissipation structure; damper

1 历史建筑改造要求

随着城市发展,老建筑的数量将超过新建筑成为城市文化的重要传承,其中相当部分具有特殊的价值与意义,称之为“历史建筑”。根据《中华人民共和国文物保护法》、《中国文物古迹保护准则》及《雅典宪章》、《威尼斯宪章》等国际宪章,历史建筑的保护修缮及再利用需遵循以下原则设计:

(1)最小干预原则,即:尊重原使用功能、最小干预、精心选择合适的新功能。

(2)真实性、整体性原则,即:尊重历史、保护为先,执行文物建筑保护的真实性、整体性原则。

(3)可逆性、可识别性原则,即:为满足现在的安全、舒适要求,增设、更新所需的设施设备需执行可逆性、可识别性原则。

(4)可持续利用原则,即:优先对原有结构、材料、构件保护性利用。同时更新设备,合理设计功能,使之适应现代使用的保护性利用。

这些保护要求往往与现行的抗震目标相矛盾,给结构工程师带来难题,消能减震技术提供了解决这个问题的途径。

2 常用消能减震技术

2.1 技术路线

现行抗震设计一般采用“抗”的思路,即通过设计

主体结构的刚度与强度抵抗地震作用。然而地震作用的实质是惯性力,其大小与结构的质量和刚度密不可分。历史建筑传统加固时增加了构件强度,同时也增大了结构刚度,加大了房屋遭受的地震作用。消能减震技术则是基于“耗”的原则设计,即:设置附加消能器消耗地震能量,基本不改变原结构动力特性。对抗震能力低,地震变形大的历史建筑,以消能器增加结构阻尼,依靠结构非弹性变形耗散更多的地震能量,在无法大幅提高原构件承载力的前提下,实现抗震性能的提升。

2.2 设计方法

《建筑消能减震技术规程》指出:对于消能减震结构,无法预先估计主体结构在加入消能部件后的最终变形情况,只能是预先假设一个阻尼比,将消能部件布置于结构中,并调整消能器的数量和位置,再对消能减震结构进行计算,反算出消能器在相应的阻尼比情况下的位移,通过消能器的恢复力模型和相应的公式求解消能减震结构的附加阻尼比,并反复迭代,使计算出的附加阻尼比与预先假设的阻尼比接近时,则计算结束。

作者简介:张坚,高工,第一结构所所长,执行总工,Email: zhangjian@siadr.com.cn。

2.3 消能减震应用的几个问题

消能减震技术涉及到的几个常见问题简介如下。

2.3.1 消能器分类

常用的消能器可分为位移相关型、速度相关型和复合型三种。位移相关型有金属屈服阻尼器和摩擦型阻尼器,速度相关型有粘滞液体阻尼器和粘弹固体阻尼器,复合型为前两者的组合,这里从略。摩擦型阻尼器是利用滑动元件间摩擦耗能,其优点是在较小水平力下可保持结构不动,提供一定的刚度;当遭遇较大地震作用时开始运动耗能,从而减轻建筑损害。缺点是长期压力作用下容易产生冷粘结,期望的摩擦系数不能保证,另外高速往复运动下阻尼器高温工作性能不能保证。金属阻尼器利用软钢屈服后稳定的滞回特性达到耗能,其优点是可以同时提供阻尼和刚度,环境及温度适应性好,长期性能稳定。缺点是相同装置在不同地震作用下表现效果的差异性较大,另外装置的平面外稳定需特别设计。粘弹性阻尼器是通过粘弹性材料的剪切变形耗散地震能量,其优点是响应迅速,小振幅下即可工作,耗能能力强。缺点是环境因素十分敏感,耗能能力局限于一定温度范围及频率区段。粘滞阻尼器由活塞与阻尼液相对运动产生阻尼,其优点是对结构主频几乎无影响,可有效控制结构的加速度,减小结构的附加作用。缺点是温度升高粘滞系数降低,粘滞液有渗漏问题以及强地震响应滞后问题。

2.3.2 消能器选择

侧移小或抗风舒适度控制的建筑,选择粘弹性或粘滞性消能装置更合适,在较小变形时阻尼器就能发挥作用,达到一定阻尼力。金属阻尼器则需要一定量的相对位移才能屈服耗能,摩擦阻尼器水平力小于静止摩擦力时并不工作。如结构同时需要增加阻尼及侧向刚度时,可选择金属阻尼器、摩擦阻尼器或粘弹阻尼器。如果不期望增加刚度,粘滞阻尼器则是最好的选择。当建筑所处环境的温度变化较大,考虑选择金属或摩擦阻尼器,因为粘弹和粘滞阻尼器的消能能力受温度影响较大。

对于历史建筑,往往抗侧刚度较小,地震位移大,抗震冲能力弱。由于相对于加速度,速度增加有时间的滞后,不宜选用速度型消能器,建议考虑采用同时增加结构刚度及阻尼的金属阻尼器。

2.3.3 连接结构

为保证消能器遭遇地震时有效工作,与其相连的支承构件应能承担消能器施加给节点的最大作用力,并提高抗震构造,设计时建议这些构件按中震弹性进行强度验算,构造上推荐采用钢结构或型钢混凝土实

现延性。

下面以笔者实践的四行仓库工程为例,简单介绍消能减震技术在历史建筑改造中的应用。

3 四行仓库的消能减震设计

3.1 项目简介

四行仓库建筑面积 32931m^2 ,采用钢筋混凝土板柱体系,共5层。原由 ATKINSON&DALLAS. LTD(通和洋行)设计,始建于1931~1935年。建成后不久,就经历了1937年战火的洗礼,2014年被公布为上海市市级文物保护单位,2015年为纪念抗战胜利70周年进行修缮,并改造为抗战纪念馆及创意办公用途。



沿苏州河立面现状照片,深色为六七层加建部分。图片来源:邱致远摄



改造设计六七层立面整体后退

图1 改造立面示意

文管局保护要求对原有结构“既保护建筑历史原貌,又尽量提高各项指标;既要依法合规,又要加快流程”的总体设计原则,明确要求保留无梁楼盖结构形式。

抗震鉴定报告提出,房屋在外观和内在质量、层数和高度、材料强度、柱的构造等方面基本能满足现行抗震鉴定标准A类房屋的要求,不足之处主要有:房屋采用板柱结构,抗侧刚度较弱;6层屋面东西向框架梁较少,不满足双向框架要求;光一分库与光四分库之间间距较小;少数柱截面宽度尺寸小于300mm;填充墙内未设拉结筋与柱有效连接。

3.2 设计要点

(1) 抗震目标确定

建筑功能的提升要求新改造的四行仓库具有一定的抗震性能,在遭遇地区基本设防烈度地震作用时能有效地保证内部人员的生命安全。根据文物保护最小干预的原则,考虑采用消能减震技术提升抗震性能,具体设定抗震性能目标如表1所示。

(2) 阻尼器比选

针对确定的性能目标,分别比选了粘滞阻尼墙、防屈曲钢板剪力墙及软钢阻尼器三种不同的耗能元

件小震下对结构的作用,分析结果见表 2。

抗震性能目标					表 1
抗震烈度	6 度小震	7 度小震	7 度中震	7 度大震	
层间位移角	—			<1/50	
构件性能	柱	基本弹性	满足 A 类 鉴定要求	—	不出现破坏性 塑性铰
	梁	基本弹性	满足 A 类 鉴定要求	—	不出现破坏性 塑性铰
	板	—	混凝土应力 < f_{tk}	钢筋应力 < f_{yk}	—
楼层综合抗震 能力指数	>1				

消能器比选					表 2
阻尼比		原结构	软钢阻尼器	防屈曲钢板墙	粘滞阻尼墙
		0.05	0.11	0.07	0.07
周期(s)	X	1.83	1.66	1.69	1.82
	Y	1.59	1.46	1.56	1.58
基底剪力 ($\times 10^4$ kN)	X	1.95	1.66	1.68	1.82
	Y	2.24	1.90	1.95	2.13
层间位移角	X	1/354	1/529	1/434	1/385
	Y	1/291	1/531	1/315	1/303

分析表明,阻尼器在增加结构阻尼的同时,也增加了结构刚度。因此需要谨慎地选择合适的阻尼产品才能达到理想的消能减震效果。

(3) 软钢阻尼器

结合建筑分隔位置,分别在层 1 布置 20 组,层 2~4 每层各布置 8 组,共 44 组软钢阻尼器,平面位置如图 2 所示。阻尼器采用墙支撑方式与原建筑相衔接,如图 3 所示,耗能特性滞回曲线如图 4 所示。

(4) 分析结果

表 2 表明设置软钢阻尼器后多遇地震下结构周期由 1.83s 提高到 1.65s,意味结构刚度有所加强;表 3 表明总阻尼比由 5% 提升至 11.55%,意味结构耗能

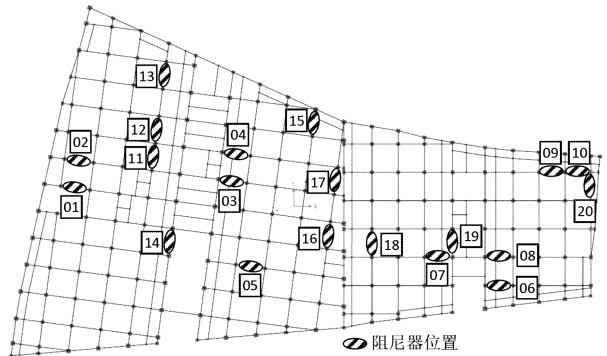


图 2 建筑层 1 软钢阻尼器的平面位置示意

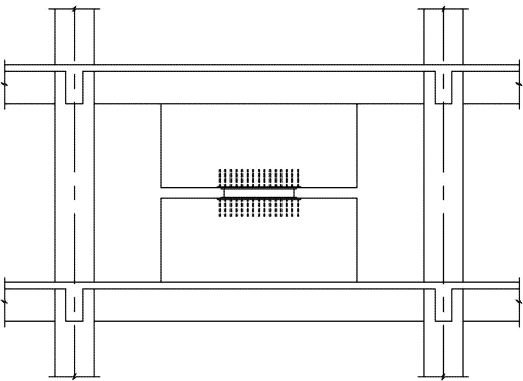


图 3 位移型软钢阻尼器采用墙支撑连接示意

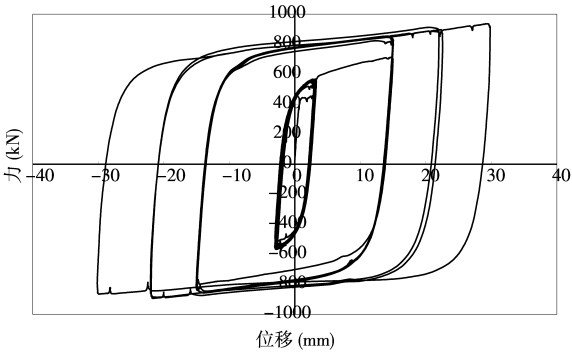


图 4 位移型软钢阻尼器的滞回曲线

能力有所提升;表 4~7 表明,大震性能点时,框架柱的塑性铰发展程度最大只达 LS-CP 阶段,无破坏性塑性铰,避免了结构的倒塌;表 8 表明结构楼层综合承载能力得到提升,实现了设定抗震目标。

结构的有效总阻尼比的计算过程 表 3

次数	阻尼器的总 功/(kN·m)	结构总应变 能/(kN·m)	结构固有的 阻尼比	阻尼器的有 效阻尼比	结构的有效 总阻尼比
第 1 次	423.1	758.8	5.00%	4.44%	9.44%
第 2 次	474.3	594.6	5.00%	6.35%	11.35%
第 3 次	438.1	532.0	5.00%	6.55%	11.55%
第 4 次	432.3	525.5	5.00%	6.55%	11.55%

原结构罕遇地震 X 向塑性铰发展程度 表 4

步长	位移/m	基底剪 力/kN	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	总
0	0.0007	0	2490	0	0	0	0	0	0	0	2490
1	0.0507	16542.135	2489	1	0	0	0	0	0	0	2490
2	0.0573	18697.018	2363	121	6	0	0	0	0	0	2490
3	0.1076	33734.527	2165	83	242	0	0	0	0	0	2490
4	0.1586	41249.176	2079	85	109	217	0	0	0	0	2490
5	0.2087	46431.106	2030	131	101	228	0	0	0	0	2490
6	0.2152	46949.777	2005	155	94	236	0	0	0	0	2490
7	0.2152	45629.832	1975	174	91	249	0	1	0	0	2490
8	0.2291	47106.223	1975	174	91	245	0	3	2	0	2490

设置软钢阻尼器罕遇地震 X 向塑性铰发展程度 表 5

步长	位移/m	基底剪力/kN	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	总
0	0.0004	0	2534	0	0	0	0	0	0	0	2534
1	0.0098	4916.5298	2533	1	0	0	0	0	0	0	2534
2	0.0378	16467.078	2512	0	22	0	0	0	0	0	2534
3	0.0598	25178.639	2506	6	22	0	0	0	0	0	2534
4	0.0812	33252.137	2464	48	22	0	0	0	0	0	2534
5	0.1033	40502.117	2359	144	23	8	0	0	0	0	2534
6	0.1254	45918.781	2221	218	83	12	0	0	0	0	2534
7	0.1501	50594.453	2161	123	228	22	0	0	0	0	2534
8	0.1738	54650.273	2114	107	263	50	0	0	0	0	2534
9	0.2011	59010.898	2082	86	181	185	0	0	0	0	2534
10	0.2104	60448.449	2058	97	147	232	0	0	0	0	2534

设置软钢阻尼器罕遇地震 Y 向塑性铰发展程度 表 7

步长	位移/m	基底剪力/kN	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	总
0	0.0000	0	2534	0	0	0	0	0	0	0	2534
1	0.0086	6476.8481	2533	1	0	0	0	0	0	0	2534
2	0.0339	22619.553	2511	3	20	0	0	0	0	0	2534
3	0.0515	33350.984	2500	12	22	0	0	0	0	0	2534
4	0.0693	42673.738	2385	126	22	1	0	0	0	0	2534
5	0.0869	49254.898	2221	232	79	2	0	0	0	0	2534
6	0.1046	53735.625	2147	186	191	10	0	0	0	0	2534
7	0.1223	57624.445	2058	176	273	27	0	0	0	0	2534
8	0.1397	60760.469	1984	218	225	107	0	0	0	0	2534
9	0.1569	63294.281	1903	245	176	210	0	0	0	0	2534
10	0.1720	65154.762	1861	219	190	264	0	0	0	0	2534

原结构在罕遇地震 Y 向塑性铰发展程度 表 6

步长	位移/m	基底剪力/kN	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	总
0	0.0001	0	2490	0	0	0	0	0	0	0	2490
1	0.0182	10031.282	2489	1	0	0	0	0	0	0	2490
2	0.0333	18428.135	2484	6	0	0	0	0	0	0	2490
3	0.0515	28437.17	2373	116	1	0	0	0	0	0	2490
4	0.0698	37277.481	2200	246	44	0	0	0	0	0	2490
5	0.0880	43252.613	2133	154	203	0	0	0	0	0	2490
6	0.1067	46773.582	2060	145	283	2	0	0	0	0	2490
7	0.1257	49658.121	1978	195	216	101	0	0	0	0	2490
8	0.1439	51883.496	1900	223	121	246	0	0	0	0	2490
9	0.1633	53379.586	1878	146	195	270	0	1	0	0	2490
10	0.1806	54262.328	1878	140	200	268	0	2	2	0	2490

7 度大震结构抗震能力指数 表 8

楼层	原结构(β)	结构增设软钢阻尼器后(β)
1	0.81	1.49
2	0.83	1.54
3	0.73	1.34
4	0.72	1.32
5	0.67	1.23
6	0.63	1.17

参 考 文 献

[1] DGTJ 08-108—2014 优秀历史建筑保护修缮技术规程[S]. 上海:同济大学出版社,2014.

[2] JGJ 297—2013 建筑消能减震技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

[3] DG/TJ 08-32—2008 高层建筑钢结构设计规程[S]. 上海:同济大学出版社,2008.

[4] 汪大绥,张坚. 世茂国际广场主楼与裙房减振弱连接设计[J]. 建筑结构,2007,37(5):17-19,37.

[5] 李波. 消能减震结构基于性能的抗震设计理论与方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007.

[6] 王勇. 历史保护建筑适用性评价研究[J]. 建筑学报,2011.

3.3 小结

设置 44 个软钢阻尼器对四行仓库进行加固后,可以得到以下结论:1)结构构件抗震能力可满足 6 度设防;2)房屋楼层综合抗震能力可满足 7 度设防;3)房屋遭遇 7 度罕遇地震作用时塑形开展明显改善,可以实现大震不倒的目标。