

DOI:10.19701/j.jzjg.20220477

消能减震加固技术在既有建筑改造工程中的应用

关 宇

(北京市建筑设计研究院有限公司, 北京 100062)

摘要: 既有建筑为原北京市商标厂印刷车间,改造后功能为小学校教学楼,采用黏滞阻尼器进行消能减震加固。对与消能减震部件相连的构件进行加固,其他部位仅需要少量加固即可满足抗震性能要求,减少了对结构构件的直接加固的工作量。采用 SAP2000 软件对结构进行小震下 FNA(快速非线性)时程分析,为校核计算附加阻尼比的准确性,对比了一周能量比法和模态耗能比法的计算结果。采用 SUASAGE 软件对结构进行大震弹塑性时程分析,验算加固后结构抗震性能,并对子结构进行设计。分析结果表明,设置黏滞阻尼器对既有建筑进行消能减震加固改造,黏滞阻尼器耗能作用明显,避免了大范围的结构构件加固工作;应采用不同计算方法复核,保证附加阻尼比计算的准确性。

关键词: 既有建筑改造;消能减震加固;黏滞阻尼器;附加阻尼比

中图分类号: TU318 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-848X(2023)08-0090-05

[引用本文] 关宇. 消能减震加固技术在既有建筑改造工程中的应用[J]. 建筑结构, 2023, 53(8): 90-94. GUAN Yu. Application of energy dissipation reinforcement technology in an existing building transformation project[J]. Building Structure, 2023, 53(8): 90-94.

Application of energy dissipation reinforcement technology in an existing building transformation project

GUAN Yu

(Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100062, China)

Abstract: The existing building is the printing workshop of Beijing Trademark Factory. After the reconstruction, the function is the primary school teaching building. The fluid viscous damper was used for energy dissipation reinforcement. The members connected to the energy dissipation and damping components were reinforced, and the other parts only need a small amount of reinforcement to meet the seismic performance requirements, reducing the workload of direct reinforcement of structural members. SAP2000 software was used to carry out FNA (fast nonlinear analysis) time-history analysis of the structure under frequent earthquakes. In order to check the accuracy of the calculation of the additional damping ratio, the calculation results of the one-cycle energy ratio method and the modal energy ratio method were compared. SUASAGE software was used to carry out rare occurrence earthquake elastic-plastic time-history analysis of the structure. The seismic performance of the strengthened structure was checked, and the substructure was designed. The analysis results show that the fluid viscous damper has an obvious effect on energy dissipation of existing buildings, which avoids a large range of structural member reinforcement. Different calculation methods should be adopted for recheck to ensure the accuracy of the calculation of additional damping ratio.

Keywords: existing building transformation; energy dissipation reinforcement; fluid viscous damper; additional damping ratio

1 工程概况

本工程位于北京市西城区马连道东街,原为北京市商标印刷厂,其改造前实景见图 1。改造前设计建造于 1987—1989 年,为现浇框架梁、框架柱、采用预制板和后浇叠合层的四层框架结构,局部五层,无地下室。大屋面结构标高为 17.350m,局部机房标高为 21.240m,首层层高为 6.090m,其余层层高为 4.200m,建筑面积约为 7 000m²,基础形式为大直径扩底墩,上设承台、连系梁,桩身及扩大头部分

为人工开挖并设置混凝土护壁。

本工程改造后建筑功能为小学校教学楼,改造后实景见图 2。后续使用年限 30 年,对应《建筑抗震鉴定标准》(GB 50023—2009)^[1](简称鉴定标准)中的 A 类建筑,检测公司提供的检测报告显示:第一级和第二级鉴定结论均为“结构整体不满足抗震鉴定要求,应采取加固或其他相应处理措施”。本工程应按照鉴定标准的要求进行加固设计,加固前后的设计参数对比见表 1。

作者简介: 关宇,硕士,高级工程师,一级注册结构工程师,主要从事建筑工程结构设计,Email:612624@qq.com。



图 1 改造前实景照片



图 2 改造后实景照片

表 1 设计参数对比

类别	加固前设计标准	加固后设计标准
结构设计使用年限/年	50	30
抗震设防类别	标准设防类	重点设防类
基本地震加速度/g	0.2	0.2
抗震设防烈度	8 度	8 度
基本风压/(kN/m ²)	0.45	0.45
场地类别	II 类	II 类
结构安全等级	二级	二级
框架抗震等级	无	四级

按照加固前结构设计图纸,采用 PKPM 软件鉴定加固模块进行建模计算,加固前结构的主要构件信息见表 2。

表 2 主要结构构件信息

结构构件		尺寸/mm	强度等级
框架柱	边柱	500×600	300#
	中柱	500×700	
框架梁	主梁	300×900	250#
	次梁	300×550	
楼板厚度	预应力圆孔板	240	250#
	现浇叠合层	80	

注:强度等级为老规范里面混凝土强度表达方式。

经计算,加固前结构前三阶振型周期为 $T_1 = 1.4390s$, $T_2 = 0.9713s$, $T_3 = 0.8586s$, 周期比为 $T_3/T_1 = 0.597$, 最大位移比为 1.19, 结构布置较规则。小震作用下结构 X、Y 向最大层间位移角分别为 1/437 和 1/485。

2 加固方案比选

2.1 功能改变后面临的问题

《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ 11—78)^[2](简称 78 抗规)中没有明确的抗震等级要求,第 83、84 条对梁柱抗震构造有要求。按照鉴定标准第 6.1.1 条,后续使用年限 30 年的 A 类建筑,抗震等级宜取四级。由于改变功能后变为重点设防类建筑,鉴定标准第 6.2.4 条给出了框架梁柱的最小构造要求。通过三本规范的对比及原始图纸实际情况,本项目构造要求均满足抗震四级及重点设防类建筑构造要求。

由于《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016 年版)^[3](简称 16 抗规)的地震水平影响系

数比 78 抗规增大了约 1.79 倍,导致加固前结构的小震下最大层间位移角超过 16 抗规限值 1/550,大震下超过限值 1/50,且构件配筋大部分不满足计算要求,需要对大部分梁柱进行加固处理。

2.2 传统加固方案

传统加固方案是采用增加剪力墙改变结构体系的方法,将框架结构变为框架-抗震墙结构。传统加固方案可有效控制结构层间变形,通过剪力墙抵抗大部分地震作用从而减少框架加固量。由于本工程基础形式为大直径扩底墩,增加剪力墙会造成结构自重增加较多,相应位置需要对基础进行加固补桩。

2.3 消能减震加固方案

黏滞阻尼器仅提供附加阻尼而不提供刚度,不会增加结构的地震作用,布置灵活,小震下就可以实现耗能^[4],适用于结构构件承载力不足但房屋刚度与设计目标相差不多的情况。

屈曲约束支撑(BRB)通常设计为小震下不屈服耗能而只提供刚度,中、大震下屈服耗能,适用于房屋刚度明显不足的情况。由于 BRB 增加了结构刚度,会使结构的地震作用增大,尤其是子结构受力很大。

加固前结构整体刚度与设计目标相差不多,结合阻尼器的特点、建筑功能要求等实际情况,最终采用黏滞阻尼器加固方案。采用消能减震加固方案可极大地减少对结构构件的直接加固^[5-7],只需要对与消能减震部件相连接的构件进行加固,其他构件仅需要进行少量加固即可满足设计要求。经计算对比,采用消能减震加固方案构件加固量仅为传统加固方案的 1/4,两种方案的对比见表 3。

表 3 加固方案对比

加固方案	工期	施工难易度	加固范围	经济性
传统加固	长	大	80%梁柱	一般
消能减震加固	短	一般	20%梁柱	优

3 消能减震加固方案设计

3.1 阻尼器布置及参数

黏滞阻尼器按照对称、均匀、周边、分散的大原则,再结合建筑功能需要进行平面布置。在竖向尽量上下对位连续布置。1~4 层阻尼器平面布置见图 3。为保证建筑功能要求,本项目采用两种连接方式,见图 4。

根据结构位移、受力条件来确定阻尼器的型号,包括设计阻尼力、设计行程等参数。通过时程分析多次试算,最终阻尼器参数见表 4。

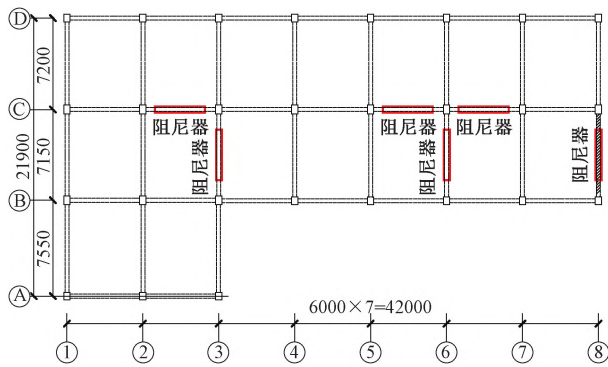


图 3 阻尼器平面布置图

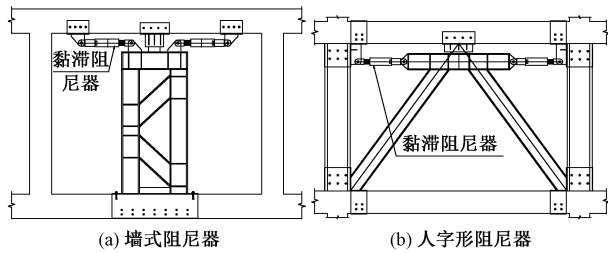


图 4 黏滞阻尼器连接方式示意图

表 4 阻尼器参数

型号	阻尼系数 /(kN/(m/s) ^a)	速度指 数 a	设计阻尼 力/kN	设计行程 /mm
NZW-270kN-e65	350	0.3	270	65

3.2 小震计算分析

加固后小震下最大层间位移角满足限值 1/550,大震下满足限值 1/50。梁柱截面仅少部分需要加固,没有需要增大截面的加固位置。由于黏滞阻尼器不提供刚度,只需要在 PKPM 中输入需要的阻尼比就可以进行试算。最终计算结果见表 5。由表 5 可知,结构附加阻尼比达到 7%、整体阻尼比达到 12%时可以达到既定目标。

表 5 两种结构阻尼比结构响应计算结果

参数		5%阻尼比(加固前)	12%阻尼比(加固后)
最大层间 位移角	X 向	1/437	1/579
	Y 向	1/485	1/613
基底剪 力/kN	X 向	2 429	1 876
	Y 向	3 094	2 351

附加阻尼比计算方法通常有两种:

(1)一周能量比法。根据 16 抗规第 12.3.4 条及《建筑消能减震技术规程》(JGJ 297—2013)^[8](简称消规)第 6.3.2 条计算消能减震结构的附加阻尼比 ζ_d :

$$\zeta_d = \sum_{j=1}^n W_{ej} / 4\pi W_s$$

式中: W_{ej} 为第 j 个消能减震部件在结构预期位移下往复循环一周所消耗的能量; W_s 为设置消能减震部

件在结构预期位移下的总应变能。

(2) 模态耗能比法。采用模态耗能比法计算 ζ_d :

$$\zeta_d = \zeta_0 E_d / E_c$$

式中: E_d 为消能减震部件时程累积耗能; E_c 为加固后结构初始阻尼累积耗能; ζ_0 为加固后结构初始阻尼比。

为保证 SAP2000 分析模型(图 5)的准确性,对比 PKPM 和 SAP2000 中模型的基本参数,见表 6。由表 6 可知,两模型质量相差 0.5%,前三周期最大相差 3.8%,说明两模型相差不大,可以用于数值模拟计算。

表 6 模型参数对比

对比项		PKPM	SAP2000	差值%
周期/s	T_1	1.335 1	1.300 0	2.63
	T_2	0.973 0	0.936 0	3.80
	T_3	0.867 4	0.835 0	3.73
质量/t		4 751.584	4 729.84	0.46

依据 16 抗规第 5.1.2 条规定,选取两条人工波、五条天然波共计七条地震波加速度时程曲线。各条地震波作用下结构基底剪力与振型分解反应谱计算结果对比见表 7。每条时程曲线计算所得的结构底部剪力均超过振型分解反应谱法计算结果的 65%,7 条时程曲线计算所得的结构底部剪力平均值大于振型分解反应谱法计算结果的 80%,满足规范要求。

使用 SAP2000 软件进行小震下快速非线性时程分析,分别采用基于应变能的方法和基于模态耗能的方法来计算附加阻尼比,计算结果见表 8、9。

表 7 基底剪力对比

地震波	X 向		Y 向	
	基底剪力/kN	比值/%	基底剪力/kN	比值/%
反应谱	2 429	100.0	3 094	100.0
RH2	1 747	71.9	2 380	76.9
RH3	1 766	72.7	2 242	72.4
TH3	2 123	87.4	2 426	78.4
TH057	2 343	96.5	2 263	73.1
TH016	1 864	76.7	3 276	105.9
TH002	2 555	105.2	3 059	98.9
TH019	1 983	81.6	3 298	106.6
平均值	2 054	84.6	2 707	87.5

注:比值为时程分析结果与反应谱法分析结果的比值。

表 8 一周能量比法计算附加阻尼比

地震波	RH2		RH3		TH3		TH057	
	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向
附加阻尼比/%	12.3	11.8	13.1	12.1	11.8	10.7	11.1	10.9
地震波	TH016		TH002		TH019		平均值	
	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向
附加阻尼比/%	12.2	11.1	11.9	12.3	10.3	11.2	11.8	11.4

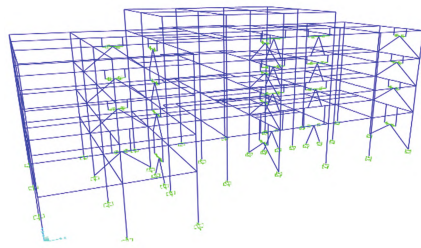


图 5 SAP2000 分析模型

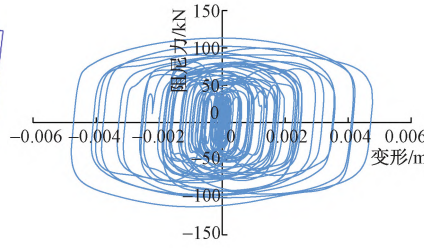


图 6 典型黏滞阻尼器滞回曲线

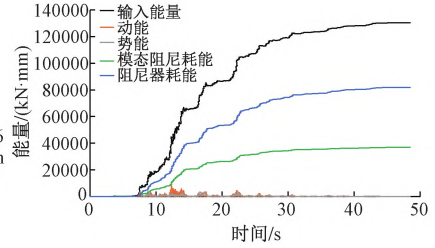


图 7 模态法耗能曲线

表 9 模态耗能比法计算附加阻尼比

地震波	RH2		RH3		TH3		TH057	
	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向
附加阻尼比/%	11.2	10.2	12.0	11.1	10.5	9.2	9.9	9.5
地震波	TH016		TH002		TH019		平均值	
	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向
附加阻尼比/%	10.7	10.2	10.7	10.2	9.0	9.7	10.6	10.2

由表 8、9 可以看出,一周能量比法计算的结果比模态耗能法要大一些,这是因为一周能量比法计算阻尼器耗能是按照每个阻尼器最大出力和最大位移乘积计算耗能(黏滞阻尼器滞回曲线见图 6),而实际各个黏滞阻尼器不可能同时达到最大位移和最大出力。模态耗能比法(耗能曲线见图 7)是通过每个时刻的积分得到能量,能够准确考虑每个黏滞阻尼器的真实耗能,相对一周能量比法更为准确。

在实际设计中,不仅应考虑理论计算公式与实际情况间存在的问题,还应考虑真实结构与计算模型等效之间存在的误差。《云南省建筑消能减震设计与审查技术导则》(云建震[2018]337号)^[9]第 4.1.9 条中指出,“设计中应考虑阻尼器性能偏差、连接安全缺陷等不利影响,在附加阻尼比取用时应留有安全储备。在进行主结构设计时,实际采用的附加阻尼比不宜高于计算值的 80%”。《建筑消能减震及隔震技术标准》(DG/TJ 08-2326—2020)^[10]第 6.3.2 条中,同时考虑了附加阻尼比公式存在的问题和实际结构装配的影响,分别对一周能量比法的结果乘以 70%的折减系数和对模态耗能比法的结果乘以 90%的折减系数,进行修正。此外本项目为加固改造项目,实际安装条件比新建工程更为不利,最终附加阻尼比为 7%。

3.3 大震计算分析

采用 SAUSAGE 软件进行结构大震弹塑性时程分析。采用基于显式积分的动力弹塑性分析方法,直接模拟结构在地震作用下的非线性反应。

框架梁柱性能水平分别见图 8、9。框架梁和框

架柱端部在大震作用下均出现一定程度的破坏,损伤因子^[11]的最大平均值在 0.5 以下,属于中度破坏。

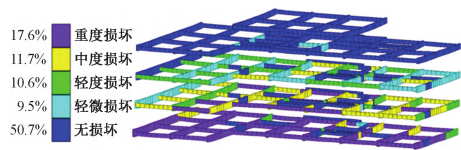


图 8 梁性能水平图

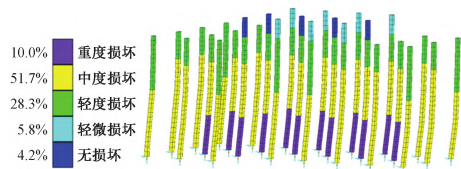


图 9 柱性能水平图

大震弹塑性平均层间位移角如表 10 所示,其中 X、Y 向最大平均层间位移角分别为 1/113、1/142,均小于规范限值 1/50,满足要求。

表 10 大震平均层间位移角

楼层		1	2	3	4	5
平均层间位移角	X 向	1/113	1/168	1/229	1/343	1/774
	Y 向	1/142	1/229	1/323	1/494	1/838

大震作用下典型黏滞阻尼器滞回曲线见图 10。阻尼器最大出力为 179kN,最大行程为 62mm,均小于设计参数,满足要求。大震下附加阻尼比结果见表 11,黏滞阻尼器最高可以提供 3.1%的附加阻尼比。

3.4 子结构设计

子结构是指直接与消能减震部件直接相连的

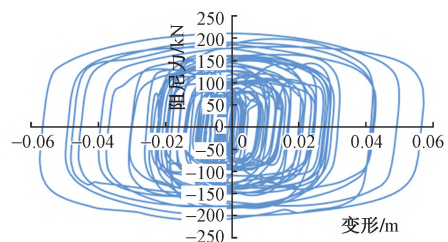


图 10 大震下黏滞阻尼器滞回曲线

主体结构单元。依据消规第 6.4.2 条要求,按重要构件进行复核,进行大震作用下极限承载力验算。在采用 SAUSAGE 软件进行大震计算时,应注意设置子结构相关构件材料为弹性,防止因为大震作用下子结构进入塑性造成内力减小。本项目采用 *PMM* 屈服面对大震作用下的子结构进行验算。典型 *PMM* 屈服曲面见图 11。经复核本项目所有子结构在大震作用下的包络内力均满足极限承载力要求。

表 11 模态耗能比法计算大震附加阻尼比

地震波	RH2		RH3		TH3		TH057	
	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向
附加阻尼比/%	3.7	3.6	3.2	3.7	2.1	3.2	2.0	2.0
地震波	TH016		TH002		TH019		平均值	
	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向
附加阻尼比/%	3.4	3.1	3.1	3.3	3.1	3.1	3.2	3.1

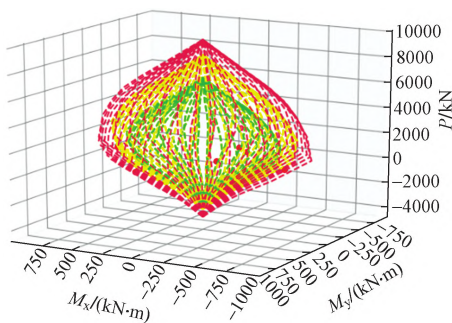


图 11 子结构 *PMM* 屈服曲面

依据消规第 6.4.5 条条文明,与黏滞阻尼器连接的框架梁柱箍筋加密区长度应从连接板外侧进行计算,框架梁跨中与黏滞阻尼器相连处也应设置箍筋加密区。对子结构的梁柱采用全长间距 100mm 粘贴扁钢箍加固处理。依据《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2015)附录 E 要求,节点板轴向承载力设计值取 1.2 倍设计速度下的阻尼力。黏滞阻尼器连接节点板见图 12,现场安装照片见图 13。

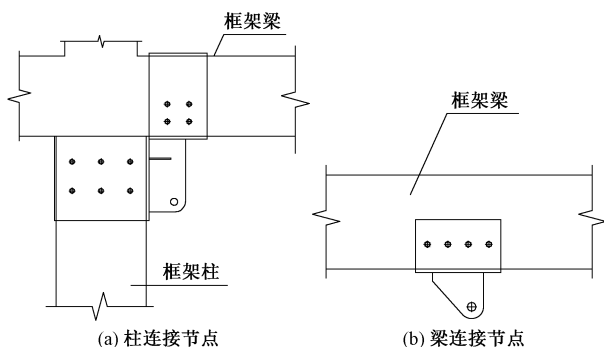


图 12 黏滞阻尼器连接节点



图 13 黏滞阻尼器现场照片

4 结论

(1) 通过加固方案的对比,最终选择了黏滞阻尼器减震加固方案。经计算分析,采用消能减震加固技术不仅能有效保证结构在地震作用下的安全,还能避免大范围的结构构件加固工作,与传统加固方式相比有节约工期、减少造价、对建筑功能影响小、容易更换等特点。

(2) 实际设计中,不仅应考虑理论计算公式与实际情况间存在的问题,还应考虑真实结构与计算模型等效之间存在的误差,应采用不同计算方法进行复核以保证附加阻尼比计算的准确性。

(3) 子结构应严格按照规范相关要求进行加固,以保证在大震下黏滞阻尼器能充分发挥耗能作用。

参考文献

- [1] 建筑抗震鉴定标准:GB 50023—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 工业与民用建筑抗震设计规范:TJ 11—78[S].北京:中国建筑工业出版社,1978.
- [3] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].2016年版.北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [4] 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.
- [5] 孙亚娟.黏滞阻尼器在中小学框架结构校舍抗震加固中的应用研究[D].昆明:昆明理工大学,2013:30-43.
- [6] 王健.黏滞阻尼器在框架结构抗震加固中的应用[D].北京:北京交通大学,2015:4-9.
- [7] 李泽民,白羽,李镜潭.黏滞阻尼器在某框架结构中的减震分析[J].建筑结构,2017;47(S1):613-615.
- [8] 建筑消能减震技术规程:JGJ 297—2013[S].北京:建筑工业出版社,2013.
- [9] 云南省建筑消能减震设计与审查技术导则:云建震[2018]337号[A].昆明:云南省住房和城乡建设厅,2018.
- [10] 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.
- [11] 上海现代建筑设计(集团)有限公司技术中心.动力弹塑性时程分析技术在建筑结构抗震设计中的应用[M].上海:上海科学技术出版社,2013.