

既有 RC 框架建筑 BRB 与黏滞阻尼器加固抗震韧性对比分析

郑雄辉, 刘文锋*, 秦艳慧

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要: 基于《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 38591—2020) 中的评价方法, 对高层框架结构的原结构、黏滞阻尼器加固结构以及采用防屈曲支撑 (BRB) 加固结构 3 种结构进行评估, 比较 3 种结构的韧性评估结果。结果表明: 黏滞阻尼器加固结构的修复费用比 BRB 加固结构修复费用低; 黏滞阻尼器与 BRB 加固均可降低构件的损伤等级, 从而降低修复时间, 但黏滞阻尼器加固结构修复时间减少较为明显; 黏滞阻尼器加固结构与 BRB 加固结构均降低了结构的损伤等级, 从而大幅降低人员伤亡率, 但黏滞阻尼器加固结构人员伤亡率减少较为明显。本研究结果可为高层框架结构加固方法的韧性评估比较和提升提供重要参考。

关键词: 既有建筑; 黏滞阻尼器; 防屈曲支撑; 韧性评价; 韧性提升

中图分类号: TU318

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)05-0001-09

Comparative analysis of seismic toughness of existing RC frame buildings reinforced by BRB and viscous dampers

ZHENG Xionghui, LIU Wenfeng*, QIN Yanhui

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Based on the evaluation method in the Evaluation Standard for Seismic Resilience Assessment of Buildings (GB/T 38591—2020), three kinds of high-rise frame structures, i. e., the original structure, the viscous damper reinforced structure and BRB (anti-buckling support) reinforced structure, are evaluated, and the toughness evaluation results of the three structures are compared. The results show that: the reduction of the repair cost of the viscous damper reinforcement is more significant than that of BRB reinforcement structure; both the viscous damper and the BRB reinforcement can reduce the damage grade of the component and thus reduce the repair time, but the reduction of the repair time of the viscous damper reinforced structure is more obvious; both the viscous damper reinforced structure and the BRB reinforced structure can reduce the damage grade of the structure, thus significantly reducing the casualty rate, but the viscous damper reinforced structure has a more obvious reduction in the casualty rate. The results of this study can provide an important reference for the evaluation, comparison and improvement of toughness of reinforcement methods for high-rise frame structures.

Key words: existing buildings; viscous damper; anti-buckling support (BRB); toughness evaluation; toughness enhancement

收稿日期: 2023-07-31

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2023MD036)

作者简介: 郑雄辉 (1998—), 男, 江西景德镇人。硕士, 研究方向为结构工程抗震。E-mail: 876217369@qq.com。

* 通信作者: 刘文锋 (1966—), 男, 山东青岛人。博士, 教授, 主要从事结构工程抗震方面的研究。E-mail: lwf6688@sohu.com。

近年来,建筑抗震的韧性评估逐渐成为结构工程和地震工程界关注的焦点,大批国内外学者对该领域进行了系列相关研究。CHANG等^[1]提出韧性措施和韧性框架将预期地震损失和抗震性能目标相联系,并进行案例分析表明韧性评估超越传统的损失估算,更好地为决策提供资料。MILES等^[2]提出了功能恢复的综合概念模型,比较了各个层次的备灾减灾决策系统的区别。BRUNEAU等^[3]给出了应急设施建设与抗震能力量化方法,并描述了抗震性能、易损性曲线与韧性函数的关系。杨静等^[4]提出我国城市抗震韧性现状,并指出城市抗震韧性与单体结构抗震韧性的关系。薛荣刚等^[5]对某教学楼进行韧性评价分析,并对该建筑进行评级。董尧等^[6]对高层框架-剪力墙结构进行了评估,并与我国《建筑抗震设计规范》^[7]设防目标进行对比。王啸霆等^[8]开发了配套的韧性评价软件,并对减隔震结构进行评估,得出隔震结构更容易获得较高的抗震韧性等级。文献[9-12]提出了抗震韧性评估方法及各类构件易损性函数。奥雅纳工程咨询有限公司(Arup)提出了基于韧性的抗震设计方法(REDi)^[13],我国于2020年发布《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 38591—2020)^[14](以下简称《标准》)。潘楚云等^[15]对比了国内外抗震韧性评估方法的优劣,并针对性地对其进行改善。

虽然当前研究对建筑结构韧性评估已较多,形成了成熟的韧性评估体系,但其中对既有混凝土框架建筑进行韧性评估与韧性提升的方法介绍均很少。基于目前研究情况,本文对现有混凝土框架建筑进行抗震韧性评估,根据评估结果,进行加固韧性提升,以确保建筑震后快速恢复使用功能。在原案例建筑结构基础上,选取了最常用的防屈曲支撑(BRB)和黏滞阻尼器,设计了该建筑的加固方案,对加固后建筑进行抗震韧性评估,并对比了其对抗震韧性的影响。

1 韧性评价标准

韧性评估的步骤^[13]包括:①整合有效建筑信息;②对于已有建筑,建立结构模型,并进行时程分析以获取数据;③对建筑采用有限元软件计算其动力特性及抗震性能;④根据工程需求参数,综合考虑结构构件和非结构构件的易损性数据,以确定评价对象所涵盖的所有构件的损伤状态;⑤根据评价对象所有构件的受损情况,计算其在设定的地震水准下所需的修复费用、修复时间以及人员伤亡情况;⑥根据修复费用、修复时间和人员伤亡指标,进行综合评估,确定其抗震韧性等级。流程如图1所示。

建筑抗震韧性评价指标分别为建筑修复费用、修复时间和人员伤亡,对其进行评估后,对评估指标使用蒙特卡洛法计算出拟合值(84%保证率),划分3个指标的韧性等级,并选取3个指标的最低韧性等级作为该建筑的抗震韧性等级,3个指标等级标准如表1所示。

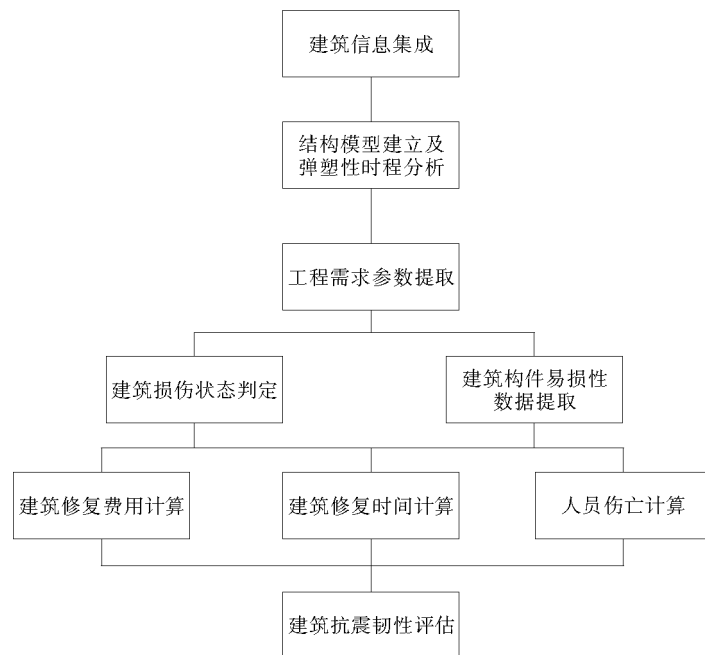


图1 抗震韧性评估流程

表1 韧性指标^[14]

等级	地震水准	建筑修复费用指标/%	建筑修复时间指标/d	人员伤亡指标
三星	罕遇地震	≤ 5	≤ 7	$\gamma_H \leq 10^{-4}$, 且 $\gamma_D \leq 10^{-5}$
二星	罕遇地震	(5, 10]	(7, 30]	$\gamma_H \leq 10^{-3}$, 且 $\gamma_D \leq 10^{-4}$
一星	设防地震	[0, 10]	(7, 30]	$\gamma_H \leq 10^{-3}$, 且 $\gamma_D \leq 10^{-4}$

注: γ_H 为人员受伤率; γ_D 为人员死亡率。

2 原型案例

2.1 建筑基本信息

本案例为 12 层混凝土框架结构,结构总高度为 39.6 m,其中每层层高为 3.3 m,建筑总面积为 5349.36 m²。建筑抗震设防烈度为 8 度(0.24g),设计地震分组为第二组,场地为 II 类。具体结构布置如图 2、图 3 所示。

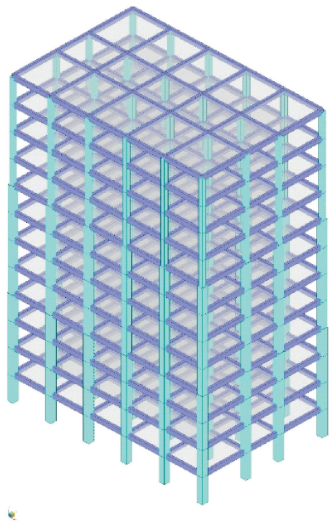


图 2 结构三维图

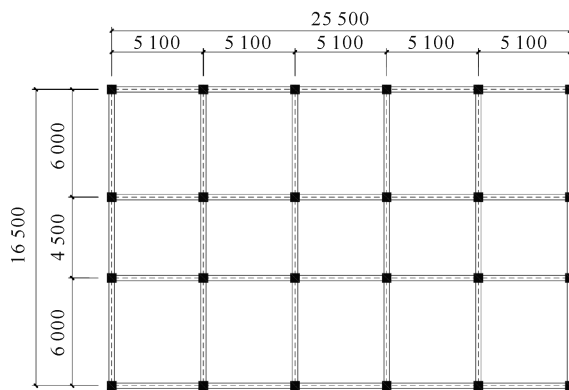


图 3 结构平面(单位:mm)

基于《标准》,统计建筑内结构构件及非结构构件,其中结构构件按照尺寸配筋规格归并分类。结构构件信息见表 2,非结构构件信息见表 3,根据定额计算建筑成本为 3586.31 万元。

表 2 结构构件信息

结构构件类型	构件尺寸/mm	编码	楼层	总数量/件
框架柱	750×750	C. F. KZ. 01	1—4	96
	700×700	C. F. KZ. 02	5—8	96
	500×500	C. F. KZ. 03	9—12	96
框架梁	300×600	C. F. KL. 01	1—12	192
	300×500	C. F. KL. 02	1—12	264

表 3 主要非结构构件信息

非结构构件类型	构件易损性编码	楼层	每层数量	非结构构件类型	构件易损性编码	楼层	每层数量
玻璃幕墙	BE. F. 01. 01	1—12	277.2 m ²	VAV 箱带卷盘	MEP. M. 08. 01	1—12	2 个
填充墙	BI. P. 01. 01	1—12	220 m ²	消防喷淋水管	MEP. P. 05. 01	1—12	200 m
吊顶	BI. C. 01. 01	1—12	420 m ²	楼梯	BI. S. 02. 01	1—12	4 片
冷水管	MEP. P. 01. 01	1—12	100 m	电梯	MEP. L. 01. 01	1—12	2 个
热水管 1	MEP. P. 02. 01	1—12	50 m	冷水机组	MEP. M. 02. 01	12	1 组
热水管 2	MEP. P. 02. 02	1—12	50 m	冷却塔	MEP. M. 03. 02	12	1 座
污水管	MEP. P. 03. 01	1—12	75 m	空气处理机组	MEP. M. 10. 01	12	1 组
喷头立管	MEP. M. 06. 01	1—12	80 个	电机控制箱	MEP. E. 02. 01	1—12	4 个
支管及风口	MEP. M. 07. 01	1—12	100 m				

2.2 结构地震响应分析

2.2.1 分析模型建立与地震波选取

根据《标准》规定,提取所需的工程需求参数,采用非线性有限元软件 SAUSAGE 建立案例结构弹塑性分析模型。

根据《标准》规定,采用时程分析法进行地震响应分析时,应选取不少于 11 条地震波(其中天然地震波不少于 2/3)^[12]。本研究根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)规定,设防地震动与罕遇地震动选取 11 条地震波,所选的每条时程曲线计算所得的结构底部剪力均不小于振型分解反应谱法计算结果的 65%,多条时程曲线计算平均值应不小于振型分解反应谱法计算结果的 80%^[7],其反应谱与规范反应谱对比如图 4、图 5 所示。

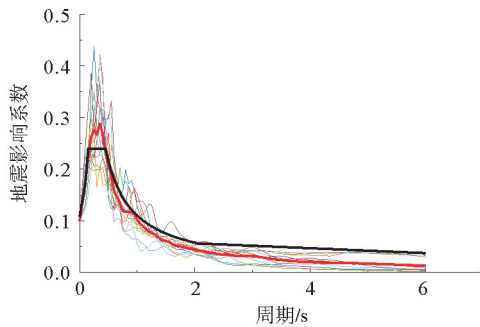


图4 设防地震动反应谱与规范反应谱对比

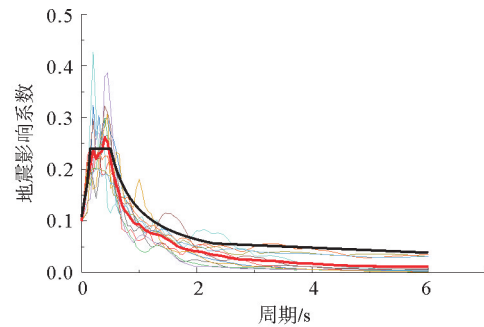
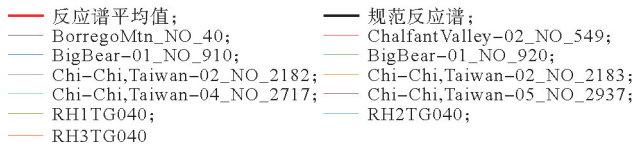
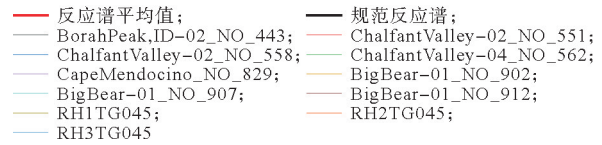


图5 罕遇地震动反应谱与规范反应谱对比



2.2.2 结构弹塑性时程分析

采用上文所选地震波,进行双向输入的时程分析,主方向与次方向的比例为 1 : 0.85,地震动主方向沿结构弱轴(X 方向)方向输入上述地震波。采用该模型进行模态分析得到结构基本周期为 1.502 s (X 方向)。

结构在设防和罕遇地震作用下,最大层间位移角平均值分别为 0.34% 和 0.80%,最大层加速度平均值分别为 2.22 和 3.33 m/s^2 。结构的地震响应如图 6 所示。

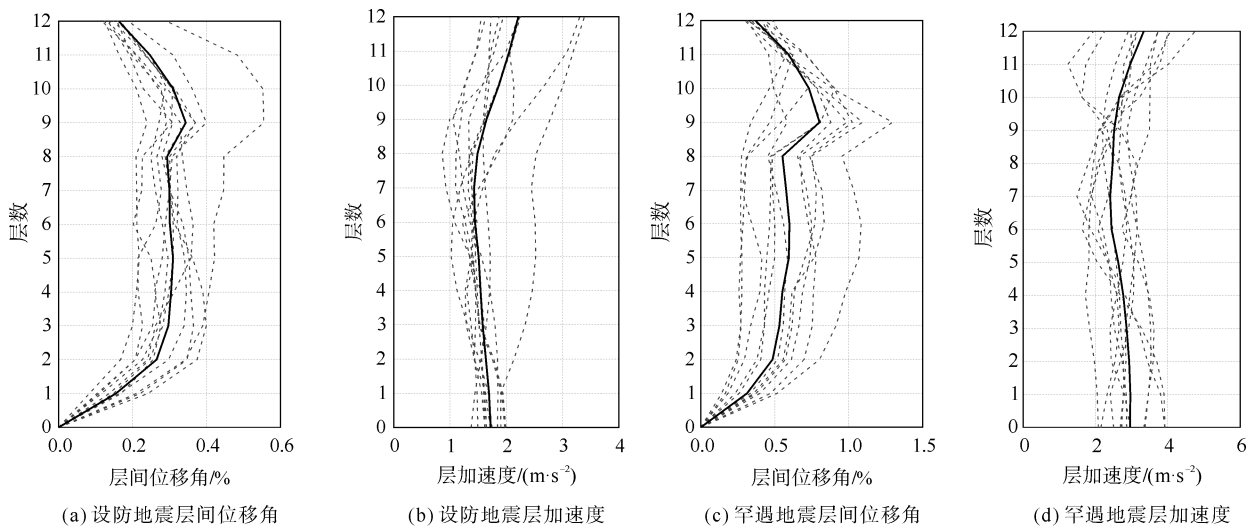


图6 结构地震响应

— 平均值

根据《标准》,残余层间变形决定建筑是否可以修复。本文按照文献[9]中有关残余层间变形计算公式进行估算,如式(1)所示。根据文献[9]中提示,可通过结构的 Pushover 曲线得到最大层间屈服位移角(Δ_y)为 0.51%,计算得出结构在设防和罕遇地震作用下,最大残余层间变形分别为 0.05%,均小于《标准》中要求的 0.5%,可以对结构进行韧性评估。BRB 加固与黏滞阻尼器加固结构残余层间变形均小于原结构,因此本文直接对加固结构进行评估。

$$\Delta_r = \begin{cases} 0 & \Delta \leq \Delta_y \\ 0.3(\Delta - \Delta_y) & \Delta_y < \Delta \leq 4\Delta_y \\ \Delta - 3\Delta_y & 4\Delta_y < \Delta \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δ_r 为残余层间变形; Δ 由非线性动力分析确定的各层最大层间位移角; Δ_y 为层间屈服位移角。

2.3 抗震韧性评价

2.3.1 修复费用

计算修复费用步骤:①计算各层中处于各类构件对应的各个损伤状态修复费用;②在考虑修复工程量对同类构件进行折减后,计算同层内所有构件修复费用总和;③计算根据楼层进行折减后的每层修复费用总和。

设防和罕遇地震水准下结构构件、非结构构件修复费用如表 4 所示。

表 4 结构修复费用 万元

构件类别	设防地震下	罕遇地震下
结构构件	43.4	108.4
非结构构件	203.3	333.3

分析修复费用结果可知:

1) 设防和罕遇地震作用下,该建筑的修复费用分别为 246.7 和 441.7 万元,其对应的修复费用指标分别为 6.8% 和 12.3%,结合表 1,建筑的修复费用评价为一星。

2) 在设防和罕遇地震作用下,由于非结构构件成本相对于结构构件高出较多,因此非结构构件修复费用相对较高,占比分别约为 82.4% 和 75.5%。由于最大平均层间位移角从 0.34% 增加至 0.80%,最大平均层加速度从 2.22 m/s² 增加至 3.33 m/s²,非结构构件和结构构件损伤加大,修复费用显著增加。

2.3.2 修复时间

修复时间计算分为 2 个阶段。第 1 阶段是结构构件修复和楼梯修复,第 2 阶段是围护构件、隔断构件、吊顶、管线和电梯等非结构构件修复^[13],如图 7 所示。建筑的修复时间应按照主要修复工作的先后次序,以每层主要修复工作中最长时间作为建筑修复时间的评价指标。

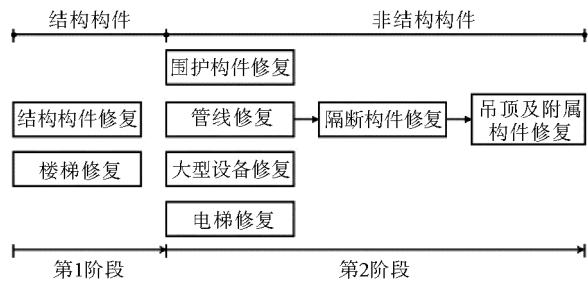


图 7 修复时间流程

设防和罕遇地震作用下,建筑结构的修复时间如表 5 所示,由表 5 可知:

表 5 结构修复时间 d

阶段类别	设防地震下	罕遇地震下
第 1 阶段	34.6	71.8
第 2 阶段	3.4	5.4

1) 结构在设防和罕遇地震作用下的修复时间分别为 38.0 和 77.2 d,均大于表 1 中修复时间一星所规定的 30 d,结构的建筑修复时间指标无法达到一星标准。

2) 结构构件的数量远大于修复时间较长的非结构构件(电梯等)的数量,结构构件的修复时间较非结构构件的修复时间更长。

表 6 结构人员伤亡率

地震水准	人员受伤率 γ_H	人员死亡率 γ_D
设防地震	2.12×10^{-4}	2.85×10^{-5}
罕遇地震	6.50×10^{-3}	1.14×10^{-3}

2.3.3 人员伤亡

人员受伤率 γ_H 和人员死亡率 γ_D 直接影响人员伤亡韧性评级。结合表 1 和表 6,评估结构的人员伤亡为一星。

3 加固混凝土框架结构韧性评价

3.1 阻尼器布置设计

结合建筑的结构体系特点及使用功能,采用防屈曲支撑(BRB)对结构进行加固,并在1—12层四角角柱总共布置了96个BRB,如图8所示,其相关参数及数量详见表7。

本文同时采用黏滞阻尼器对结构进行加固,对比2种常用阻尼器对既有混凝土框架建筑韧性的提升。为防止阻尼器布置位置对减震结果的影响,每层黏滞阻尼器加固结构分布位置与BRB分布位置相同,即仍使用图8中阻尼器分布位置,其相关参数及数量详见表8。

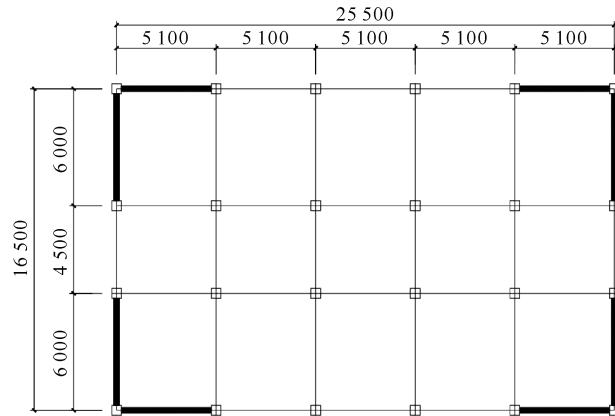


图8 阻尼器分布位置(单位:mm)

表7 BRB 参数

楼层	阻尼器数量/(个·层 ⁻¹)		阻尼器参数		
	X 方向	Y 方向	有效刚度 $K/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	屈服力 V_y/kN	屈服后刚度比 K_i
1—12	4	4	142 875	500	0.05

表8 黏滞阻尼器参数

楼层	阻尼器数量/(个·层 ⁻¹)		阻尼器参数	
	X 方向	Y 方向	阻尼系数 $C/(\text{kN} \cdot \text{s}^{-\alpha} \cdot \text{m}^{-\alpha})$	阻尼指数 α
1—12	4	4	800	0.2

以2.2节建立的SAUSAGE弹塑性分析模型为基础,在其之上直接布置阻尼器,建立加固后案例建筑的弹塑性模型。其中BRB由位移阻尼器单元和斜撑单元串联模拟;黏滞阻尼器由人字型斜撑及速度型阻尼器串联构成。根据文献[14],BRB加固结构的等效阻尼比 ξ_a 为6.1%,黏滞阻尼器加固结构的等效阻尼比 ξ_a 为12.5%。由于BRB和黏滞阻尼器性能保证了自身在地震作用下不发生损坏,因此不参与结构损伤评估。

3.2 结构响应分析

设防和罕遇地震作用下,加固结构的地震响应分布如图9、图10所示,其减震率见表9。设防地震下2种加固结构的层间位移角均明显降低。由表9可知,BRB加固结构层间位移角峰值平均值为0.25%,相较于原结构层间位移角均值减少了23.5%,黏滞阻尼器加固结构层间位移角峰值平均值为0.16%,相较于原结构层间位移角均值减少了52.9%;BRB加固结构层加速度峰值平均值为2.39 m/s^2 ,相较于原结构层加速度峰值均值增加了7.6%;黏滞阻尼器加固结构层加速度峰值平均值为1.72 m/s^2 ,相较于原结构层加速度峰值均值减少了22.5%。

罕遇地震下BRB加固结构的层间位移角同样得到明显降低,相较于原结构减少了35%,层加速度则减少不明显,相较于原结构仅减少了1%,黏滞阻尼器加固结构的层间位移角和层加速度均有明显降低,相较于原结构分别减少了53.8%与10.2%。

对比分析结果,发现在结构中设置BRB仅对层间位移角有较好减震效果,黏滞阻尼器却对层间位移角与层加速度都有较好减震效果。

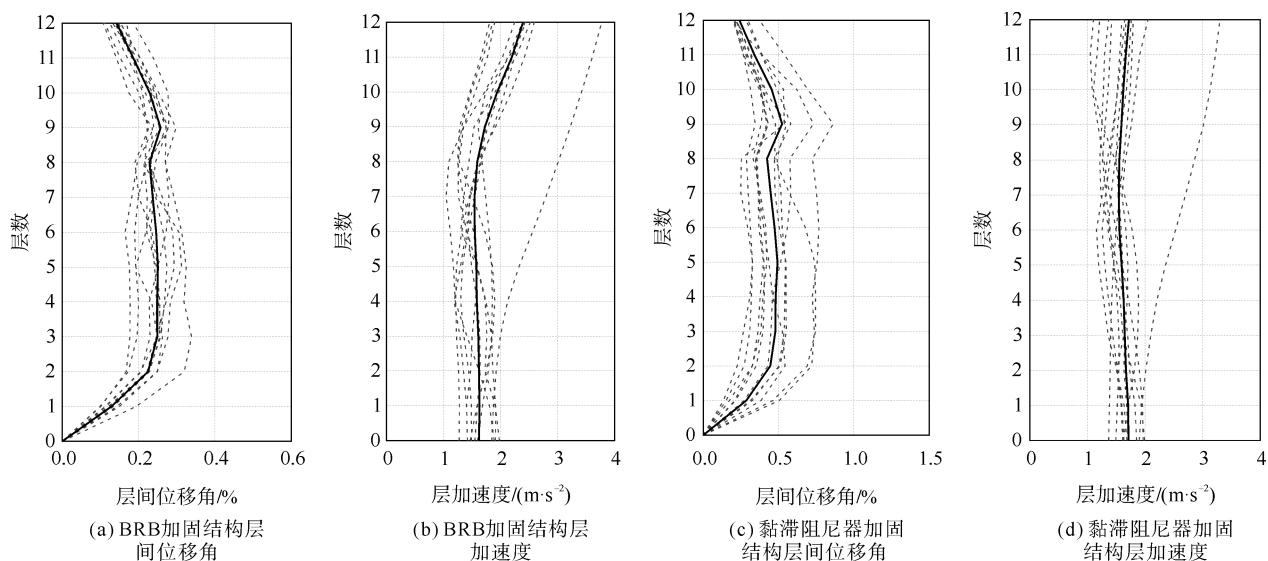


图 9 设防地震作用加固结构响应

—— 平均值

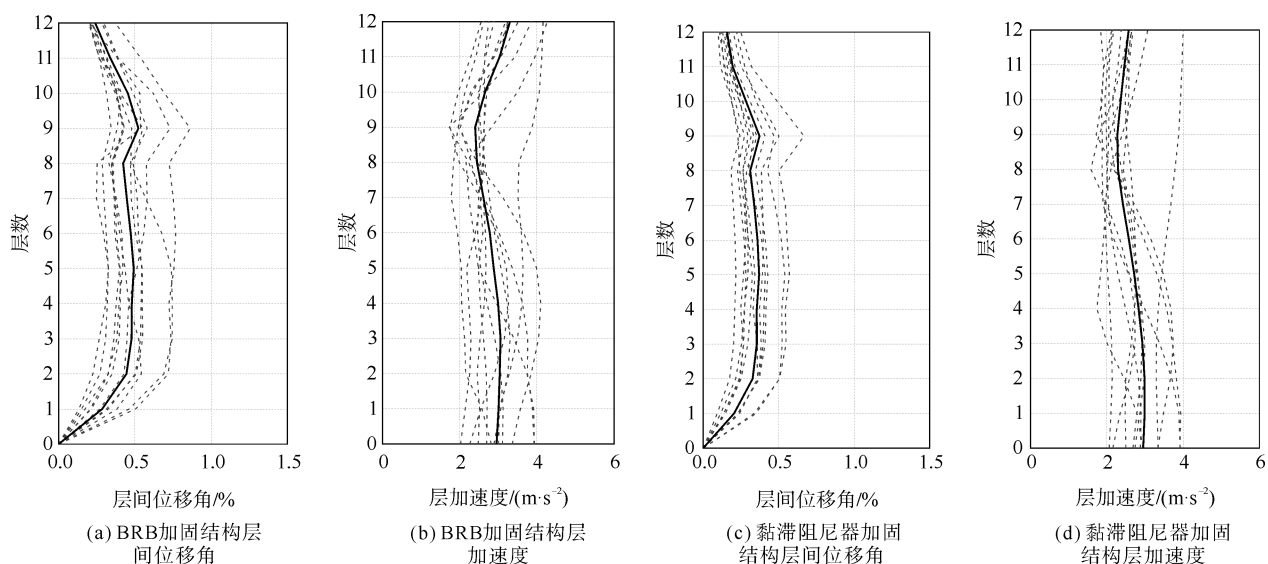


图 10 罕遇地震作用加固结构响应

—— 平均值

表 9 BRB 加固结构减震率

加固结构类型	地震水准	工程需求参数	减震前	减震后	减震率/%
BRB 加固结构	设防地震	层间峰值位移角峰值平均值/%	0.34	0.25	23.5
		层加速度峰值平均值/($m \cdot s^{-2}$)	2.22	2.39	-7.6
	罕遇地震	层间峰值位移角峰值平均值%	0.80	0.52	35.0
		层加速度峰值平均值/($m \cdot s^{-2}$)	3.33	3.30	1.0
黏滞阻尼器加固结构	设防地震	层间峰值位移角峰值平均值%	0.34	0.16	52.9
		层加速度峰值平均值/($m \cdot s^{-2}$)	2.22	1.72	22.5
	罕遇地震	层间峰值位移角峰值平均值%	0.80	0.37	53.8
		层加速度峰值平均值/($m \cdot s^{-2}$)	3.33	2.99	10.2

3.3 修复费用评级

加固结构在设防和罕遇地震作用下的修复费用如表 10 所示,由表 10 可知:

1) 在设防和罕遇地震下, BRB 加固结构的修复费用指标分别为 6% 和 10.4%, 结合表 1 评估其修复费用等级为一星; 黏滞阻尼器加固结构修复费用指标分别为 4.5% 和 8.5%, 结合表 1 评估其修复费用等级为两星。

2) BRB 加固后层加速度与原结构差距不大, 但其层间位移角明显降低, 导致多种构件的损伤降低, 进而修复费用明显降低; 黏滞阻尼器减震效果显著, 对应楼层的层间位移角和层加速度均有较大减小, 结构构件和非结构构件损伤均显著减少。黏滞阻尼器加固结构相较于 BRB 加固结构, 层加速度与层间位移角也同样有所降低, 因此黏滞阻尼器加固结构修复费用较 BRB 加固结构更低。

表 10 加固结构修复费用 万元

加固结构类型	构件类型	设防地震下	罕遇地震下
BRB 加固结构	结构构件	35.6	70.3
	非结构构件	188.8	305.5
黏滞阻尼器加固结构	结构构件	23.1	48.4
	非结构构件	138.0	256.1

3.4 修复时间

加固结构在设防和罕遇地震作用下的修复时间如表 11 所示,由表 11 可知:

1) 设防和罕遇地震作用下, BRB 加固结构修复时间分别为 30.3 和 49.6 d, 均大于 30 d, 结合表 1, 评估其修复时间等级为零星; 黏滞阻尼器加固结构修复时间分别为 21.3 和 37.8 d, 结合表 1, 评估其修复时间等级为一星。

2) 设防地震下, BRB 结构修复时间较原结构降低了 20.26%, 黏滞阻尼器加固结构的修复时间较原结构降低了 43.95%; 罕遇地震下, BRB 结构修复时间较原结构降低了 35.8%, 黏滞阻尼器加固结构的修复时间较原结构降低了 51.04%。由于第 1 阶段修复时间为主要修复时间, 且黏滞阻尼器加固后结构构件损伤均小于 BRB 加固结构, 因此黏滞阻尼器加固修复时间减小更为明显。

表 11 加固结构修复时间 d

加固结构类型	阶段类别	设防地震下	罕遇地震下
BRB 加固结构	第 1 阶段	27.4	45.3
	第 2 阶段	2.9	4.3
黏滞阻尼器加固结构	第 1 阶段	18.6	33.7
	第 2 阶段	2.7	4.1

3.5 人员伤亡

结合表 12 和表 1, 得出 BRB 加固结构的人员损伤等级为一星; 黏滞阻尼器加固结构的人员损伤等级为二星。

表 12 加固结构人员伤亡率

加固结构类型	地震水准	人员受伤率 γ_H	人员死亡率 γ_D
BRB 加固结构	设防地震	1.14×10^{-4}	1.39×10^{-5}
	罕遇地震	5.33×10^{-3}	9.31×10^{-4}
黏滞阻尼器加固结构	设防地震	1.52×10^{-6}	0
	罕遇地震	5.30×10^{-4}	8.67×10^{-5}

4 结论

本文以既有混凝土框架建筑为研究对象, 根据《标准》评价了该建筑的抗震韧性水准, 计算修复费用、修复时间和人员伤亡。为提升其抗震韧性, 对该类建筑进行 BRB 加固和黏滞阻尼器加固, 并研究了 2 种技术对抗震韧性的影响规律, 得出以下结论:

1) 既有混凝土框架建筑的韧性指标无法满足《标准》的一星等级, 且该结构的修复时间远大于韧性评估标准;

2) BRB加固建筑结构的抗震韧性等级虽然未得到提升,但其韧性评估各项指标均得到一定程度地降低;

3) 黏滞阻尼器加固建筑的修复时间等级从零星提升至一星,建筑修复费用和人员损伤等级均从一星提升至二星,建筑结构的抗震韧性等级得到了提升;

4) 相较于BRB加固技术,黏滞阻尼器加固技术可以减轻地震结构响应,更有效地提升既有框架建筑抗震韧性。

参考文献(References):

- [1] CHANG S E, SHINOZUKA M. Measuring improvements in the disaster resilience of communities[J]. *Earthquake Spectra*, 2004(3): 739-755.
- [2] MILES S B, CHANG S E. Modeling community recovery from earthquakes[J]. *Earthquake Spectra*, 2006(2): 439-458.
- [3] BRUNEAU M, REINHORN A. Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities[J]. *Earthquake Spectra*, 2007(1): 41-62.
- [4] 杨静, 李大鹏, 翟长海, 等. 城市抗震韧性的研究现状及关键科学问题[J]. *中国科学基金*, 2019, 33(5): 525-532.
YANG Jing, LI Dapeng, ZHAI Changhai, et al. Key scientific issues in the urban earthquake resilience[J]. *Science Foundation of China*, 2019, 33(5): 525-532.
- [5] 薛荣刚, 黄丽红, 宫海军, 等. 基于建筑抗震韧性评价标准的某教学楼抗震韧性评价分析[J]. *建筑结构*, 2021, 51(S1): 60-65.
XUE Ronggang, HUANG Lihong, GONG Haijun, et al. Evaluation and analysis of seismic toughness of a teaching building based on the evaluation standard of seismic toughness[J]. *Building Structure*, 2021, 51(S1): 60-65.
- [6] 董尧, 徐铭阳, 吕大刚. 高层RC框架-剪力墙结构地震风险与抗震韧性评估[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(S1): 31-42.
DONG Yao, XU Mingyang, LV Dagang. Seismic risk and seismic toughness evaluation of RC frame-shear wall structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(S1): 31-42.
- [7] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010, Code for seismic design of building[S].
- [8] 王啸霆, 潘鹏, 王涛, 等. 基于《建筑抗震韧性评价标准》的算例分析[J]. *建筑结构*, 2020, 50(16): 57-63.
WANG Xiaoting, PAN Peng, WANG Tao, et al. Case study based on Standard for Seismic Resilience Assessment of Buildings[J]. *Building Structure*, 2020, 50(16): 57-63.
- [9] FEMA P-58-1, Seismic performance assessment of buildings Volume 1: Methodology[S]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [10] FEMA P-58-2, Seismic performance assessment of buildings Volume 2: Implementation guide[S]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [11] FEMA P-58-4, Seismic performance assessment of buildings Volume 4: Methodology for assessing environmental[S]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [12] FEMA P-58-5, Seismic performance assessment of buildings Volume 5: Expected seismic performance of code-conforming buildings[S]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [13] ALMUFTI I, WILLFORD M. Resilience-based earthquake design (REDiTM) rating system[R/OL]. (2018-05-22) [2023-07-30].
<https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/redi-rating-system>.
- [14] GB/T 38591—2020, 建筑抗震韧性评价标准[S].
GB/T 38591—2020, Standard for seismic resilience assessment of buildings[S].
- [15] 潘楚云, 曲激婷, 张东旭. 国内外建筑抗震韧性研究进展[J]. *建筑结构*, 2021, 51(S2): 432-441.
PAN Chuyun, QU Jiting, ZHANG Dongxu. Research progress on seismic toughness of buildings at home and abroad[J]. *Building Structure*, 2021, 51(S2): 432-441.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)