

文章编号:1673-2049(2011)02-0021-07

汶川地震典型 RC 框架结构抗倒塌加固效果分析

陆新征^{1,2}, 马玉虎^{1,2}, 唐代远^{1,2}, 叶列平^{1,2}, 韩 强³

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;
3. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:以汶川地震震中附近的一栋典型 RC 框架结构为背景, 分别采用普通支撑、防屈曲支撑(BRB)和粘滞阻尼器支撑 3 种加固方案来提高其抗震能力, 并采用基于动力增量分析(IDA)的地震倒塌易损性分析方法, 对各种加固方案的抗倒塌能力及其影响参数进行了分析。结果表明:以结构抗倒塌能力为目标, 粘滞阻尼器支撑加固方案的效果优于 BRB 加固方案, 而 BRB 方案的加固效果要优于普通支撑加固方案; 相同参数情况下, A 型支撑布置方案的加固效果优于 X 型支撑加固。

关键词:汶川地震; RC 框架结构; 倒塌率; 抗倒塌; 动力增量分析

中图分类号: TU352 **文献标志码:** A

Strengthening Effect Analysis of Seismic Collapse Resistance of Typical RC Frame Structures in Wenchuan Earthquake

LU Xin-zheng^{1,2}, MA Yu-hu^{1,2}, TANG Dai-yuan^{1,2}, YE Lie-ping^{1,2}, HAN Qiang³

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Taking a typical reinforced concrete (RC) frame structure that was close to the epicenter during the Wenchuan Earthquake as background, the seismic collapse resistance of the frame was strengthened by attached substructures, including conventional brace, buckling-restrained brace(BRB) and viscous damper brace. Seismic collapse fragility analysis method based on incremental dynamic analysis (IDA) was implemented for each strengthening scheme to compare their effects and to analyze the influence of critical parameters. The results show that the viscous damper brace strengthening scheme performs better than the BRB, and the BRB performs better than conventional brace. With the same strengthening parameters, the strengthening effect of A-shaped bracing scheme is better than that of the X-shaped scheme.

Key words: Wenchuan Earthquake; reinforced concrete frame structure; collapse possibility; seismic collapse resistance; incremental dynamic analysis

0 引 言

2008 年的四川汶川 M8.0 级特大地震中, 不少

地震区遭遇烈度大大超过设防烈度, 不仅有大量老旧建筑发生倒塌破坏, 很多按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)^[1]设计建造的结构也发生了

收稿日期: 2011-01-05

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAJ28B01); 国家自然科学基金重点项目(90815025); 中国工程院重大咨询项目(2010-ZD-4); 城市与工程安全减灾教育部重点实验室开放基金项目、北京市重点实验室开放基金项目(EESR2010-03)

作者简介: 陆新征(1978-), 男, 安徽芜湖人, 副教授, 工学博士, E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn.

倒塌^[2]。如位于汶川地震震中映秀镇附近的漩口中学,其新建教学楼群发生严重破坏,这些框架均是 2007 年建成,按照中国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)设计建造^[3-4]。

汶川地震引起地震工程界对建筑结构抗地震倒塌能力的关注。为提高建筑抗地震倒塌能力,提出了很多抗震加固改造方法,包括增强构件承载力、增强构件延性、基础隔震、附加子结构加固等。但是这些抗震加固方法主要是依据现行《建筑抗震设计规范》的抗震设计目标确定抗震加固程度,而加固后结构的抗地震倒塌能力的改善效果还缺乏定量研究。近年来,得到广泛关注的基于动力增量分析(Incremental Dynamic Analysis,简称 IDA)的倒塌率分析方法,为评价不同结构体系的抗倒塌能力提供了相对客观的评价标准^[5]。IDA 方法通过选取一组具有足够代表性的地震波(超过 20 条),对结构进行动力时程分析,通过不断增大地震动强度直至结构发生倒塌,获得在不同地震动强度下结构倒塌的易损性,进而对不同结构体系的抗震能力进行评价。本文中笔者以漩口中学一栋典型 RC 框架结构教学楼为背景,基于 IDA 方法研究不同加固方案的抗倒塌效果,以进一步确定更合理的抗震加固方案。

1 加固方案

漩口中学的建筑群震害情况如图 1 所示,教学楼建筑平面如图 2 所示,详细震害现象和结构信息见文献[6]。在其发生倒塌的短轴方向框架采用支撑加固,加固方案包括:加普通支撑、加防屈曲支撑(Buckling-restrained Brace,简称 BRB)和加粘滞阻尼器支撑 3 种方案。普通支撑和 BRB 加固考虑 X 型和 A 型 2 种布置方案,如图 3 所示。为了研究支撑截面和数量对结构抗倒塌能力的影响,每种支撑布置方案又分为以下 5 种工况:



图 1 漩口中学建筑震害

Fig. 1 Seismic Damage of Buildings in Xuankou Middle School

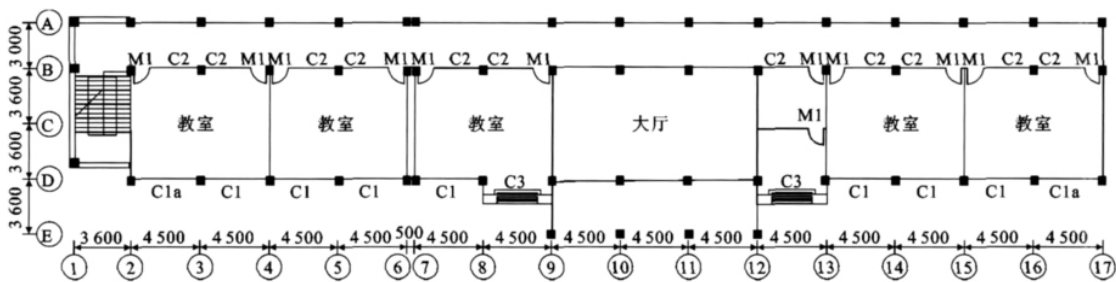


图 2 教学楼平面(单位:mm)

Fig. 2 Plane of Classroom Building (Unit:mm)

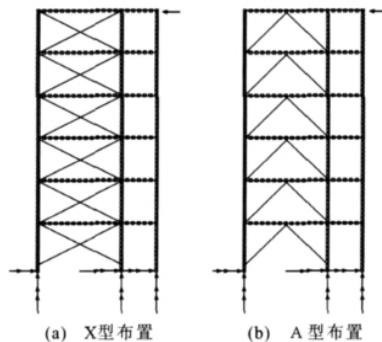


图 3 教学楼加固方案

Fig. 3 Strengthening Schemes of Classroom Buildings

工况 1:采用 I25A 钢支撑,每 2 榀框架安装 1

套支撑(工况编号:I25)。

工况 2:采用 I20A 钢支撑,每 2 榀框架安装 1 套支撑(工况编号:I20)。

工况 3:采用 I20A 钢支撑,每 4 榀框架安装 1 套支撑(工况编号:I20-1/2)。

工况 4:采用 I20A 钢支撑,每 8 榀框架安装 1 套支撑(工况编号:I20-1/4)。

工况 5:采用 I20A 钢支撑,每 12 榀框架安装 1 套支撑(工况编号:I20-1/6)。

对于工况 5,由于该教学楼的横向教室数量有限,做不到每 6 个教室加 1 副支撑,这里仅作为理论研究。

对于 BRB 加固方案,为了方便与普通支撑加固方案进行比较,采用与普通支撑加固方案相同的布置形式和分析工况,并且各方案中支撑截面面积、屈服强度均与普通支撑加固方案相同。

粘滞阻尼器支撑加固方案如图 4 所示,每 2 榀框架安装 1 套速度型阻尼器,阻尼器的出力 F_D 为

$$F_D = DV \quad (1)$$

式中: D 为阻尼系数; V 为速度。

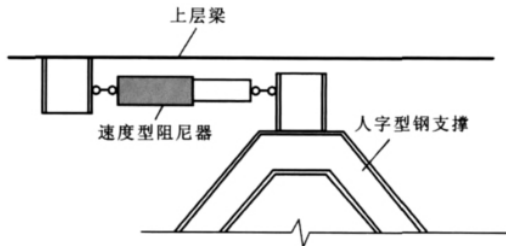


图 4 粘滞阻尼器支撑加固方案

Fig. 4 Viscous Damper Brace Strengthening Scheme

变化不同的阻尼系数 $D[D=1.0 \times 10^5 \sim 2.5 \times 10^6 \text{ N} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}]$,研究阻尼力对结构抗倒塌能力的影响。

IDA 分析所采用的地震波为美国 AT-63 建议的 22 条远场地震波^[7],再补充常用的 El Centro 波,采用 THUFIBER 程序^[8]建立结构分析模型。分析模型考虑了基础和楼板的影响,见文献^[6]。考虑箍筋约束影响,核心区混凝土本构模型采用 Bousalem 等^[9]提出的适用于钢筋混凝土构件的箍筋约束混凝土模型。基于 THUFIBER 程序优异的非线性计算能力,直接以结构楼层丧失竖向承载力而不能维持保障人员安全的生存空间作为结构倒塌的判据。

2 普通支撑加固方案

2.1 滞回模型

普通支撑的滞回模型采用图 5 所示的模型,其中, K_0^+ 、 K_u^+ 分别为支撑的初始刚度和卸载刚度, N 为支撑轴力, ϵ 为支撑应变, N_y^+ 、 N_u^+ 和 N_y^- 、 N_u^- 分别为支撑在受拉、受压方向的屈服强度和峰值强度, $N_u^+ = \alpha N_y^+$, $N_y^- = \beta N_y^+$, $N_u^- = \alpha_c \beta N_y^+$, ϵ_y 、 ϵ_p 分别为支撑屈服应变和峰值应变, ϵ_{close} 为捏拢段终点应变, $\epsilon_{\text{close}} = \omega \epsilon_p$, N_{max}^+ 为考虑损伤累积后的最大轴压力, $N_{\text{max}}^+ = d^+ N_{\text{max}0}^+$, ϵ_{max} 、 $N_{\text{max}0}^+$ 分别为支撑在受拉方向经历的最大拉应变和对应的轴力, d^+ 为损伤累积系数, $d^+ = 1.0 - \frac{E_{h,\text{eff}}}{3.0CN_{y0}\epsilon_{y0}}$, $K_u^+ = K_0^+ |\epsilon_{\text{max}}/\epsilon_y|^{-\alpha_k}$, $E_{h,\text{eff}}$ 为有效累积塑性耗能, N_{y0} 、 ϵ_{y0} 分别为初始屈服轴力和对应的应变, α 、 β 、 γ 、 α_c 、 α_k 、 η 、 ω 、 η_c 、 η_{soft} 、 C 、

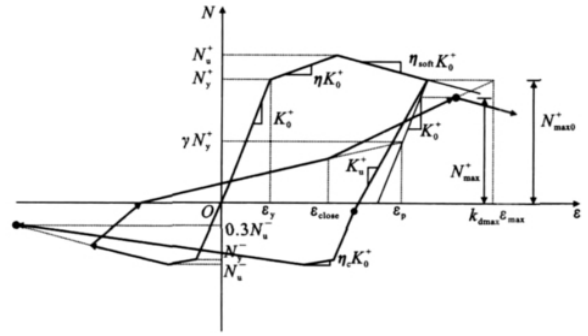


图 5 普通支撑的滞回模型

Fig. 5 Hysteresis Model of Conventional Brace

$k_{d\text{max}}$ 为量纲一的系数,含义见文献^[9]。该模型的主要特点包括:可以考虑支撑构件的屈服、强化和软化特性;可以考虑支撑构件的捏拢特性;可以考虑构件在往复加载下的累积损伤特性;可以考虑正向、反向屈服强度的不同特性;可以考虑卸载刚度退化特性;可以考虑支撑受压失稳等各种特性。

2.2 推覆分析结果

首先采用推覆分析了解加普通支撑对结构受力和变形模式的影响。推覆方向为向左(较为不利的方向),分析得到各加固工况下的基底剪力-顶点位移曲线如图 6 所示。采用普通支撑加固后,结构的刚度和承载力都有明显提高,且随着普通支撑加固量的增加而增大,但是同时结构的延性却随着普通支撑加固量的增加有所降低,这是因为设置普通支撑后会增加框架柱的轴压力,而对于该框架结构,柱轴压比已接近极限轴压比,故轴压力进一步增加会导致柱的延性降低,这是支撑加固对结构抗震可能产生的不利影响。由推覆分析可知,采用普通支撑加固后,既有有利作用(结构承载力提高),也有不利作用(结构刚度增大,地震力增大,而延性却降低),故仅根据推覆分析结果很难对结构抗震加固效果进行评判。为了进一步对比不同加固方案的效果,以下对各加固工况进行 IDA 倒塌率分析。

2.3 IDA 倒塌率分析结果

通过 IDA 倒塌率分析,得到普通支撑加固后各加固工况下倒塌率的对比,如图 7 和表 1 所示。图 7 中的纵坐标为倒塌率,即在某一地震强度下发生倒塌的地震动记录数量和总地震动记录数量的比例;横坐标为地震动强度指标,本文中采用第 1 周期谱加速度 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标,根据文献^[3]、^[7]、^[8]中的研究,该指标离散度较小且周期适用性较广。表 1 中的系数 R_{CMR} 为倒塌储备安全系数,即相应结构倒塌率为 50% 时的地震动强度和设

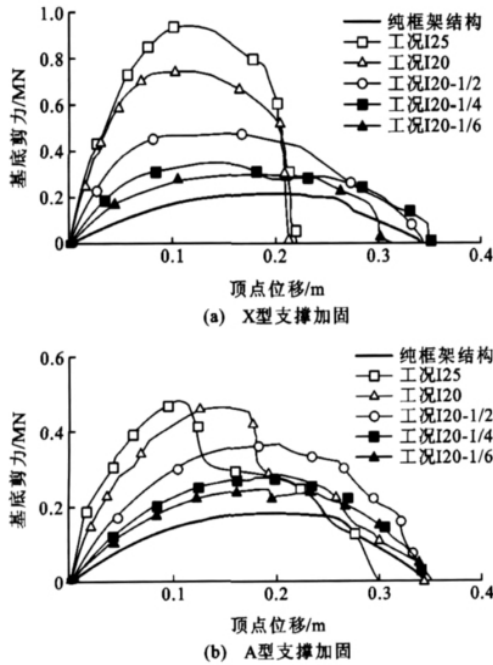


图 6 普通支撑加固方案 Pushover 分析结果
Fig. 6 Pushover Analysis Results of Conventional Brace Strengthening Scheme

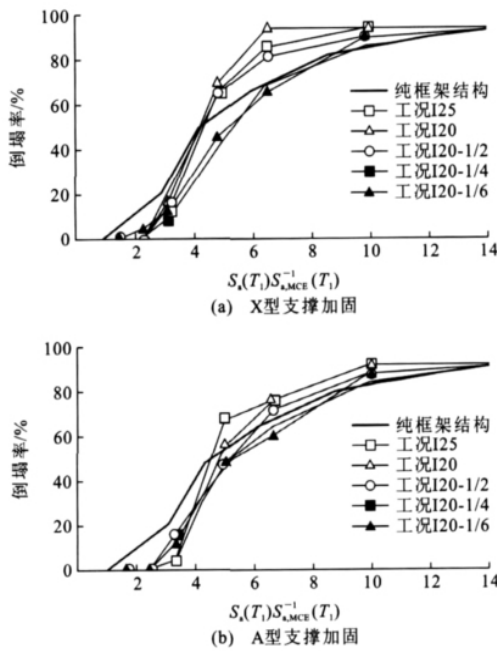


图 7 普通支撑加固方案 IDA 倒塌率曲线
Fig. 7 IDA Collapse Possibility Curves of Conventional Brace Strengthening Scheme

计大震地震动强度的比值。

倒塌储备安全系数为

$$R_{CMR} = S_a(T_1)_{50\%} / S_{a,MCE}(T_1) \quad (2)$$

式中： $S_a(T_1)_{50\%}$ 为有 50% 地震输入出现倒塌对应的地震动强度； $S_{a,MCE}(T_1)$ 为规范建议罕遇地震下

表 1 普通支撑加固方案倒塌率计算结果

Tab. 1 Calculation Results of Collapse Possibility of Conventional Brace Strengthening Scheme

工况编号	X 型支撑			A 型支撑		
	R_{CMR}	倒塌率/%		R_{CMR}	倒塌率/%	
		大震	特大震		大震	特大震
I25	4.05	0.0	0.0	4.05	0.0	0.0
I20	3.91	0.0	0.0	4.28	0.0	0.0
I20-1/2	4.02	0.0	0.0	4.49	0.0	0.0
I20-1/4	4.91	0.0	0.0	4.49	0.0	0.0
I20-1/6	4.74	0.0	1.5	4.49	0.0	0.0

的地震动强度。

如果结构在某一地震动强度下,有 50% 的地震输入发生了倒塌,则该地震动强度就是结构体系的平均抗倒塌能力 $S_a(T_1)_{50\%}$ 。系数 R_{CMR} 是结构抗倒塌能力的评价指标, R_{CMR} 越大,表示结构抗倒塌的储备越高,即抗倒塌能力越大。

由图 7 可以看出:增加普通支撑后,结构在大震 [$S_a(T_1) = S_{a,MCE}(T_1)$] 下的倒塌率明显降低,在特大震 [$S_a(T_1) = 2S_{a,MCE}(T_1)$] 时效果也很好;当地震动强度继续增大 [$S_a(T_1) > 4S_{a,MCE}(T_1)$] 时,倒塌率反而增大(图 7)。其原因分析如下,对于 RC 框架结构,附加普通支撑有 2 个方面效果:一方面添加普通支撑后结构的承载力提高,且普通支撑具有耗能能力,从而可改善结构的抗倒塌能力;另一方面普通支撑会增大结构的刚度,增加地震力,且更不利的是会增大柱的轴压力,使得柱的变形能力降低,反而会影响结构的抗倒塌能力。

一般说来,如果 1 条地震动的能量输入比较稳定,或者地震动强度较小时,结构倒塌前经历的往复振动次数多,这时普通支撑的耗能作用发挥得比较好,可使结构抗倒塌能力有所改善。而对于脉冲型地震,或者地震动强度较大时,结构很快就会被破坏,普通支撑的耗能效果不出来,增加轴力的不利因素反而成了主导。

加普通支撑结构的典型倒塌破坏模式如图 8 所示。图 8(a) 为加普通支撑后效果明显改善的破坏模式,其地震动输入记录为 Kobe 波(1995 年)。无支撑结构在 $S_a(T_1) \geq 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时就发生倒塌,而有支撑结构在 $S_a(T_1) \geq 4.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时才发生倒塌。在该地震动输入下,当结构发生倒塌时(11~12 s),已经往复振动多次,支撑可充分发挥其耗能作用,且结构塑性较分布较均匀,也提供了较大的耗能能力。图 8(b) 为在 Duzce 波(1999 年)地震动输入,无支撑结构在 $S_a(T_1) \geq 7.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时就发生倒塌,而有

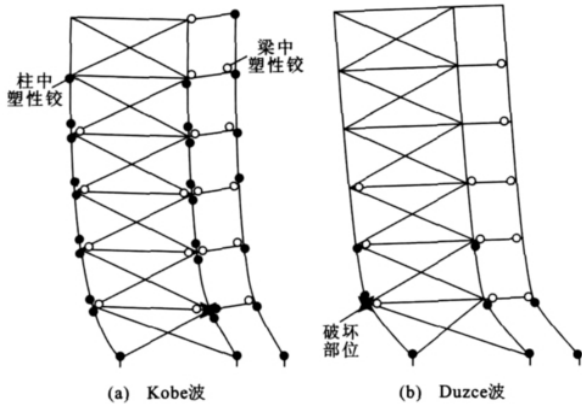


图 8 加普通支撑结构的破坏模式
Fig. 8 Failure Modes of Conventional Brace Strengthened Structure

支撑结构在 $S_a(T_1) \geq 4.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时才发生倒塌,加普通支撑后结构抗倒塌能力反而降低。这是由于 Duzce 波地震动为典型的脉冲型地震,在该地震动输入下仅经历了第 1 个脉冲后,教室一侧的边柱柱顶即因轴压力和变形过大而发生破坏,普通支撑的耗能能力发挥很有限,抗倒塌能力反而降低,且倒塌时结构自身的塑性铰数量也很少,塑性程度也很小。

对于不同支撑形式,以 I20 工况为例,IDA 倒塌率分析结果对比如图 9 所示。由图 9 可以看出,同样的支撑数量和截面,A 型支撑的效果要优于 X 型支撑。这是因为 X 型支撑很容易增大底层柱的轴压力,进而给结构抗倒塌带来不利影响。

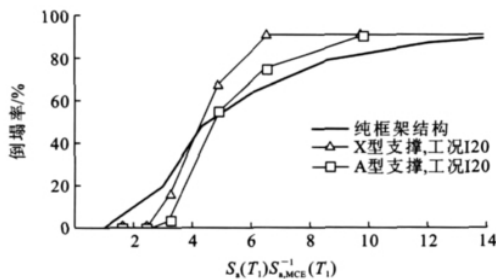


图 9 普通支撑加固方案 IDA 倒塌率曲线比较
Fig. 9 Comparisons Among IDA Collapse Possibility Curves of Conventional Brace Strengthening Scheme

3 BRB 加固方案

3.1 滞回模型

考虑采用 BRB 对框架结构进行加固,BRB 的滞回模型取平行四边形模型^[10]。为与普通支撑加固方案比较,BRB 的截面面积和屈服强度的取值与普通支撑相同。

3.2 推覆分析结果

对 BRB 加固后的框架结构进行了推覆分析,推覆方向为向左(较为不利的方向)时,分析得到各工况下的基底剪力-顶点位移曲线如图 10 所示。可见,与普通支撑加固的情况类似,BRB 加固后,结构的刚度和承载力都有明显提高,但延性显著降低。

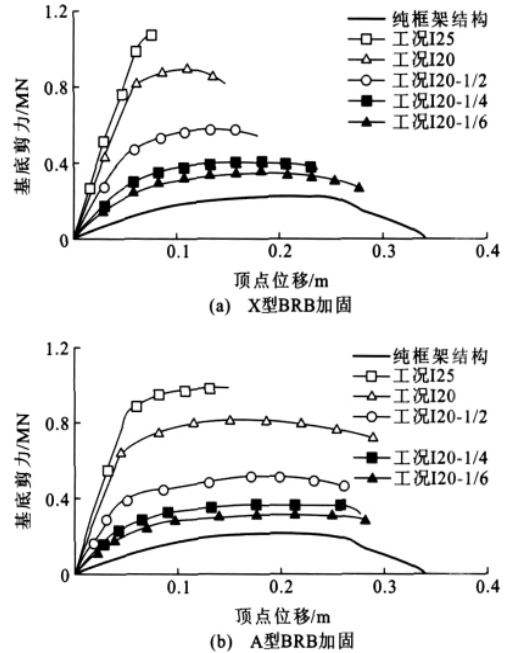


图 10 BRB 加固方案 Pushover 分析结果
Fig. 10 Pushover Analysis Results of BRB Strengthening Scheme

3.3 IDA 倒塌率分析结果

对 BRB 加固后的框架结构进行 IDA 倒塌率分析,计算结果如表 2 和图 11 所示。由图 11 可以看出,其结果与普通支撑加固情况比较相似,在大震和特大震下倒塌率有明显降低。在更大的地震下倒塌率又反而可能会增大,其原因与普通支撑类似。

表 2 BRB 加固方案倒塌率计算结果
Tab. 2 Calculation Results of Collapse Possibilities of BRB Strengthening Scheme

工况编号	X 型支撑			A 型支撑		
	R_{CMR}	倒塌率/%		R_{CMR}	倒塌率/%	
		大震	特大震		大震	特大震
I25	3.76	0.0	4.6	3.96	0.0	0.0
I20	4.13	0.0	1.5	4.46	0.0	0.0
I20-1/2	4.37	0.0	0.0	4.99	0.0	0.0
I20-1/4	4.51	0.0	1.5	4.93	0.0	1.5
I20-1/6	4.77	0.0	1.5	4.70	0.0	1.5

以 I-20 工况为例,A 型和 X 型 BRB 的对比如图 12 所示。由图 12 可以看出,同样的 BRB 型支撑

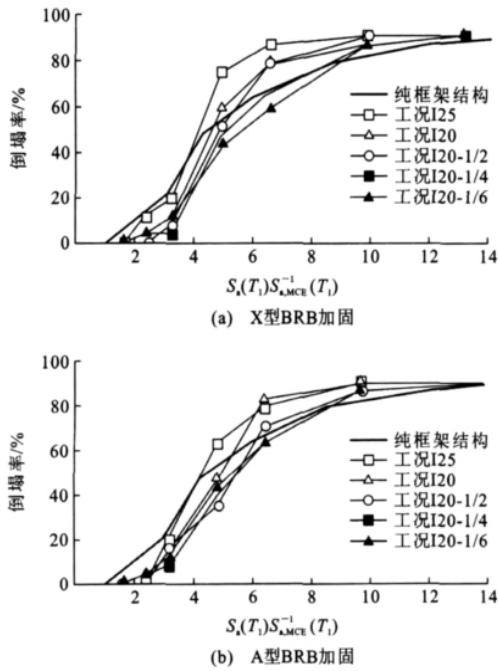


图 11 BRB 加固方案 IDA 倒塌率曲线

Fig. 11 IDA Collapse Possibility Curves of BRB Strengthening Scheme

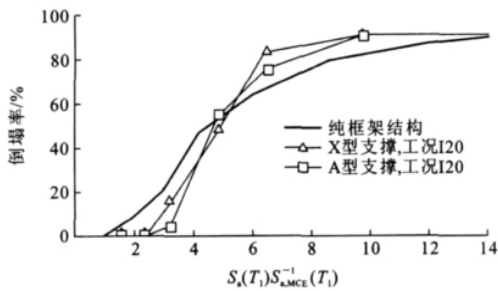


图 12 BRB 加固方案 IDA 倒塌率曲线比较

Fig. 12 Comparisons Among IDA Collapse Possibility Curves of BRB Strengthening Scheme

数量,人字型(A型)的效果同样要优于X型的效果,这与普通支撑形式加固效果的结论是一致的。

将效果较好的 BRB 加固(I20-1/2、I20-1/4)分析结果和普通支撑加固分析结果进行对比,如图 13 所示。由图 13 可以看出,同样的支撑面积,BRB 加固的效果总体比普通支撑要好,这是由于 BRB 在一个循环里面耗散的能量比普通支撑大。

4 粘滞阻尼器加固方案

对粘滞阻尼器加固后的框架结构进行了 IDA 倒塌率分析,变换不同的阻尼系数 D ,分析得到的倒塌率结果如表 3 和图 14 所示。可见,采用 A 型阻尼器方案后,结构的抗倒塌能力明显提高,且粘滞阻尼器出力越大,抗倒塌效果越好。

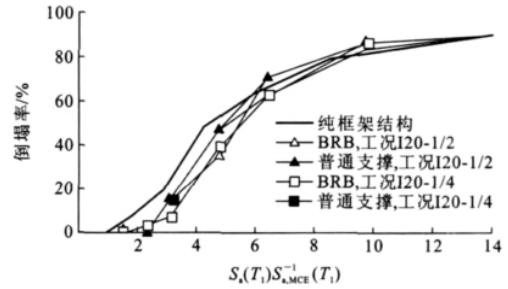


图 13 BRB 与普通支撑加固方案倒塌率曲线比较

Fig. 13 Comparisons Between Collapse Possibility Curves of BRB and Conventional Brace Strengthening Scheme

表 3 粘滞阻尼器加固方案倒塌率计算结果

Tab. 3 Calculation Results of Collapse Possibilities of Viscous Damper Strengthening Scheme

$D/[10^6 \text{ N} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}]$	R_{CMR}	倒塌率/%	
		大震	特大震
2.5	8.22	0.0	0.0
1.2	7.77	0.0	0.0
0.5	6.57	0.0	1.5
0.2	5.66	0.0	1.5
0.1	4.73	0.0	1.5

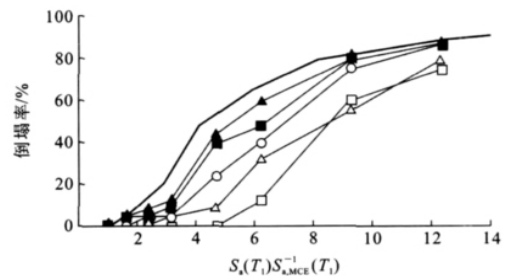


图 14 粘滞阻尼器加固方案 IDA 倒塌率曲线

Fig. 14 IDA Collapse Possibility Curves of Viscous Damper Strengthening Scheme

通过比较图 7、11 和图 14,综合来说,A 型支撑的抗倒塌效果优于 X 型支撑;BRB 的抗倒塌效果优于普通支撑;加粘滞阻尼器后结构的抗倒塌效果有显著提高,效果优于加普通支撑和 BRB 方案。

5 结 语

(1)同样的支撑面积,粘滞阻尼器加固方案的效果优于 BRB 加固方案,而 BRB 加固方案的效果要优于普通支撑加固方案;粘滞阻尼器的出力越大,抗倒塌效果越好;A 型支撑布置方案相对 X 型支撑对框架结构加固更加有利。

(2)对于普通支撑和 BRB 加固方案,其支撑在地震中起到耗能(有利因素)和增大柱轴力(不利因素)2 个作用,在大震和特大震下倒塌率有明显的降

低,在超大地震下倒塌率反而可能会增加,需要根据工程实际情况选择合适的加固方案。对于加粘滞阻尼器方案,在各地震动强度下倒塌率均显著降低。

参考文献:

References:

- [1] GB 50011—2001,建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2001,Code for Seismic Design of Building [S].
- [2] 清华大学、西南交通大学、北京交通大学土木工程结构专家组.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(4):1-9.
Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Southwest Jiaotong University and Beijing Jiaotong University. Analysis on Seismic Damage of Buildings in the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures,2008,29(4):1-9.
- [3] 叶列平,陆新征,赵世春,等.框架结构抗地震倒塌能力的研究——汶川地震极震区几个框架结构震害案例分析[J].建筑结构学报,2009,30(6):67-76.
YE Lie-ping, LU Xin-zheng, ZHAO Shi-chun, et al. Seismic Collapse Resistance of RC Frame Structures—Case Studies on Seismic Damages of Several RC Frame Structures Under Extreme Ground Motion in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures,2009,30(6):67-76.
- [4] 叶列平,李易,潘鹏.漩口中学建筑震害调查分析[J].建筑结构,2009,39(11):54-57,29.
YE Lie-ping, LI Yi, PAN Peng. Seismic Damages of Building Structures of Xuankou Middle School in Yingxiu Town[J]. Building Structure,2009,39(11):54-57,29.
- [5] 陆新征,叶列平.基于 IDA 分析的结构抗地震倒塌能力研究[J].工程抗震与加固改造,2010,32(1):13-18.
LU Xin-zheng, YE Lie-ping. Study on the Seismic Collapse Resistance of Structural System[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2010,32(1):13-18.
- [6] 马玉虎.汶川地震典型框架结构震害分析和防倒塌对策研究[D].北京:清华大学,2010.
MA Yu-hu. Seismic Damage Simulation and Collapse Resistance Strategies of Typical RC Frames During the Great Wenchuan Earthquake[D]. Beijing:Tsinghua University,2010.
- [7] ATC-63,Quantification of Building Seismic Performance Factors[S].
- [8] 陆新征,叶列平,缪志伟.建筑抗震弹塑性分析[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
LU Xin-zheng, YE Lie-ping, MIAO Zhi-wei. Elastic-plastic Analysis of Buildings Against Earthquake [M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2009.
- [9] BOUSALEM B,CHIKH N. Development of a Confined Model for Rectangular Ordinary Reinforced Concrete Columns [J]. Materials and Structures,2007,40(6):605-613.
- [10] 程光煜.基于能量抗震设计方法及其在钢支撑框架结构中的应用[D].北京:清华大学,2007.
CHENG Guang-yu. Study on Energy-based Seismic Design Methodology and Application in Steel Braced Frames[D]. Beijing:Tsinghua University,2007.