

# 汶川地震典型教学楼附加 BRB 支撑防倒塌加固效果分析<sup>1</sup>

唐代远<sup>1</sup>, 陆新征<sup>1</sup>, 马玉虎<sup>1</sup>, 叶列平<sup>1</sup>, 陈适才<sup>2</sup>

(1. 清华大学土木工程系, 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 北京工业大学城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 本文以汶川地震震中附近的一栋典型 RC 框架结构为背景, 采用 BRB 支撑加固来增强其抗震能力, 并采用基于动力增量分析(IDA)的地震倒塌易损性分析方法, 对加固后的抗倒塌能力及其影响参数进行了分析。结果显示, 以结构抗倒塌能力为目标, BRB 支撑方案的加固效果要好于普通支撑加固方案, 相同参数情况下, A 形支撑布置方案的加固效果好于 X 形支撑布置方案。

**关键词:** 汶川地震; RC 框架结构; 倒塌率; 防倒塌对策; 加固方案

**中图分类号:** TU352 **文献标识码:** A

## 1 概述

2008 年的汶川 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, 也有按 01 版《抗震规范》设计建造的结构发生了倒塌<sup>[1]</sup>。例如: 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(图 1), 部分在余震中倒塌, 这些框架结构建筑均是 2007 年建成, 按照我国 2001 版抗震规范《建筑抗震设计规范 GB50010-2001》设计建造<sup>[2,3]</sup>。



图 1 漩口中学建筑震害示意图(网络照片)

汶川地震后, 建筑结构抗地震倒塌能力开始引起地震工程界关注, 并认为应以结构的抗倒塌能力为目标, 完善现有抗震设计方法。与此同时, 汶川地震后很多建筑需进行抗震加固, 相应的抗震加固方法包括: 增强构件承载力、增强构件延性、基础隔震、附加子结构等加固方法。但是, 目前的抗震加固主要是依据现行《抗震规范》的标准确定抗震加固程度, 而对加固后结构的抗地震倒塌能力的改善效果缺乏定量研究。近年来得到广泛关注的基于动力增量分析(IDA)的倒塌易损性分析方法, 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<sup>[4]</sup>。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, 获得在不同地面运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。本文以

<sup>1</sup>基金项目: 国家科技支撑计划项目 2009BAJ28B01; 工程院重大咨询项目(编号: 2010-ZD-4); 国家自然科学基金重点项目资助(90815025); “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”(编号: EESR2010-03)

作者简介:

唐代远(1988-), 男, 硕士研究生, 从事混凝土结构抗震研究, tdy05@mails.tsinghua.edu.cn, 北京清华大学土木工程系, 100084;

陆新征(1978-), 男, 博士, 副教授, 从事防灾减灾和非线性计算, luxz@tsinghua.edu.cn, 010-62795364, 北京清华大学土木工程系, 100084;

马玉虎(1986-), 男, 硕士研究生, 从事混凝土结构抗震研究, myh08@mails.tsinghua.edu.cn, 北京清华大学土木工程系, 100084;

叶列平(1960-), 男, 博士, 教授, 博导, 从事混凝土结构与结构抗震研究, ylp@mail.tsinghua.edu.cn, 010-62795330, 北京清华大学土木工程系, 100084。

陈适才(1979-), 男, 博士, 讲师, 主要从事防灾减灾研究, csc@bjut.edu.cn, 北京工业大学建工学院防灾减灾研究所, 100124。

漩口中学主教学楼的典型 RC 框架结构教学楼为背景 (见图 2), 基于 IDA 方法研究采用防屈曲支撑 (BRB 支撑) 不同加固方案的抗倒塌能力, 以进一步确定更合理的结构抗震加固方案。

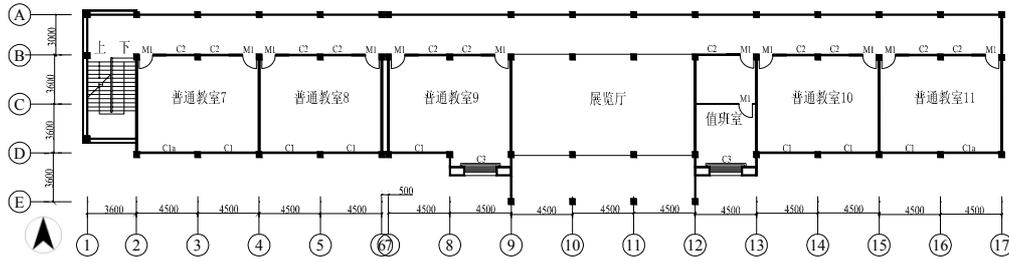


图 2 教学楼平面简图

## 2 加固方案

教学楼建筑平面见图 2, 详细震害现象和结构信息参见文献[5], 在其发生倒塌的短轴方向框架采用防屈曲支撑 (BRB 支撑) 加固, 支撑加固考虑 X 形和 A 形两种布置方案, 见图 3。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五种工况:

- 工况 1: 采用 I25A 钢支撑, 每 2 榀框架安装一套支撑 (工况代号: I25)
- 工况 2: 采用 I20A 钢支撑, 每 2 榀框架安装一套支撑 (工况代号: I20)
- 工况 3: 采用 I20A 钢支撑, 每 4 榀框架安装一套支撑 (工况代号: I20-1/2)
- 工况 4: 采用 I20A 钢支撑, 每 8 榀框架安装一套支撑 (工况代号: I20-1/4)
- 工况 5: 采用 I20A 钢支撑, 每 12 榀框架安装一套支撑 (工况代号: 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。

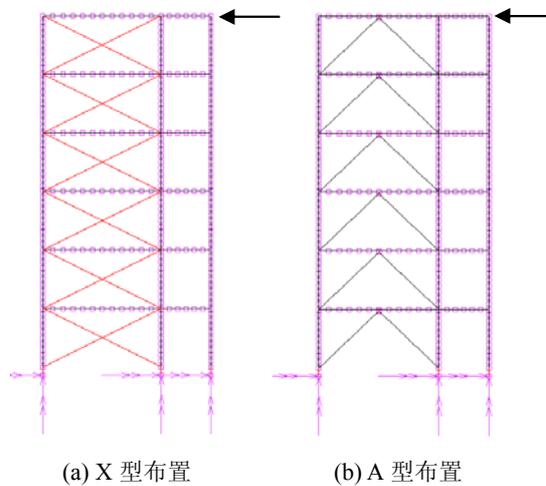


图 3 教学楼加固方案

IDA 分析所采用的地震动记录为美国 ATC-63 建议的 22 条远场地震动记录<sup>[6]</sup>, 再补充常用的 El-Centro 地震动记录, 采用 THUFIBER 程序<sup>[7]</sup>建立结构分析模型, BRB 支撑的滞回模型取平行四边形模型<sup>[8]</sup>。分析模型考虑了基础和楼板的影响, 详见[5]。为考虑箍筋约束影响, 核心区混凝土本构采用 Bousalem<sup>[9]</sup>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, 本文直接以“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”<sup>[7]</sup>作为结构倒塌的判据。

### 3 BRB 支撑加固效果分析

#### 3.1 推覆分析结果

对 BRB 支撑加固后的框架进行了推覆分析，推覆方向为向左（较为不利的方向），分析得到的各个方案的基底剪力-顶点位移曲线见图 4。可见 BRB 支撑加固后，结构的刚度和承载力都有明显提高，但延性显著降低。

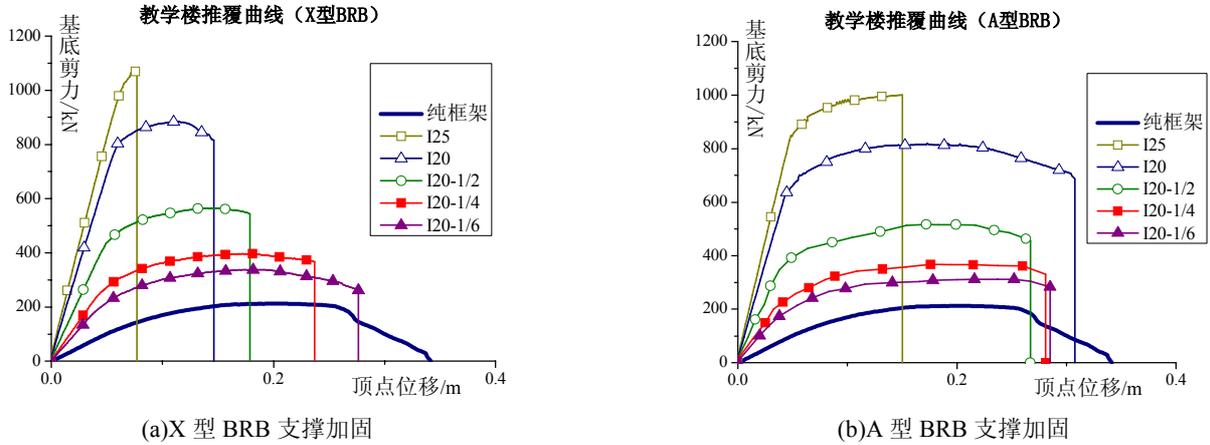


图 4 BRB 支撑方案推覆分析结果

#### 3.2 IDA 倒塌率分析

对 BRB 支撑加固后的框架进行 IDA 倒塌易损性分析，计算结果如图 5 和表 1。从图 5 可以看出，增加 BRB 支撑后，结构在大震 ( $S_a=S_{a,MCE}$ , MCE: Maximal Considered Earthquake, 设计大震) 下的倒塌概率明显降低，在特大震 ( $S_a=2S_{a,MCE}$ ) 时效果也很好。但是当地震强度继续增大 ( $S_a>4S_{a,MCE}$ ) 时，倒塌率反而增大 (图 5)，其原因分析如下：

对于 RC 框架结构，附加支撑有两方面效果，一方面添加支撑后结构的承载力提高，且支撑具有耗能能力，从而可改善结构的抗倒塌能力。另一方面支撑会增大结构的刚度，增加地震力，且更不利的是会增加柱子的轴压力，使得柱子的变形能力降低，反而会影响结构的抗倒塌能力。

一般说来，如果一条地震动的能量输入比较稳定，或者地震强度较小时，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，或者地震强度较大时，结构很快就破坏，支撑的耗能效果出不来，增加轴力的不利因素反而成了主导。

进一步，以 I-20 工况为例，A 形和 X 形 BRB 支撑的对比如图 6 所示，从图中可以看出，同样的 BRB 支撑数量，人字形 (A 形) (图 3b) 的效果同样要好于 X 字形 (图 3a) 的效果。

表 1 BRB 支撑方案倒塌率计算结果

分析工况	X 型支撑布置				A 型支撑布置		
	CMR	$S_a(T_1)/S_{a(T_1),MCE}$		CMR	$S_a(T_1)/S_{a(T_1),MCE}$		
		1.0(大震)	2.0(特大震)		1.0(大震)	2.0(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%	

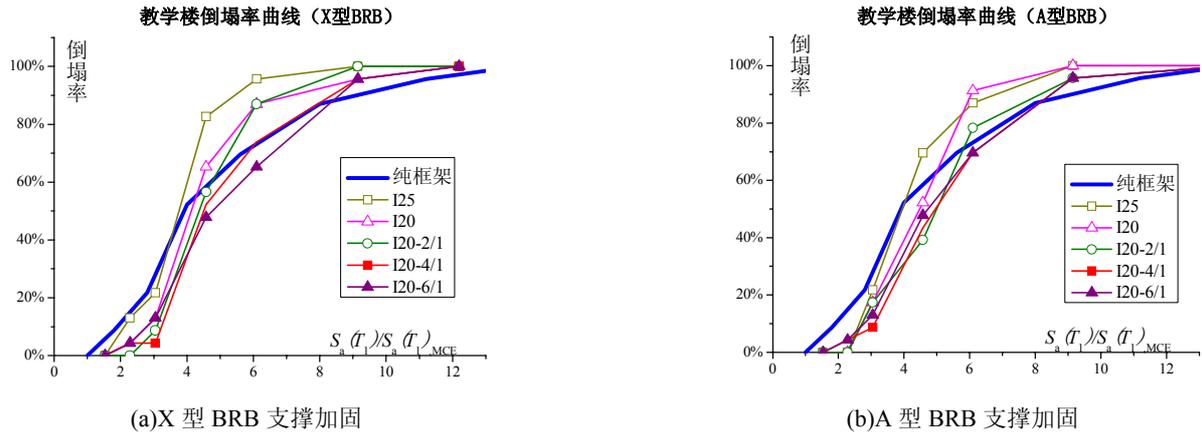


图 5 BRB 支撑方案 IDA 倒塌率曲线

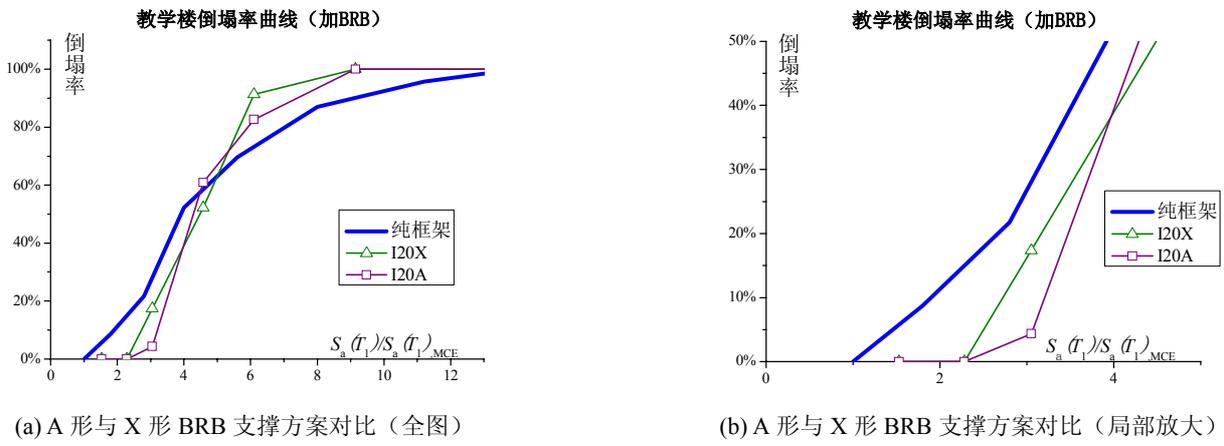


图 6 BRB 支撑方案倒塌率曲线比较

为了比较 BRB 支撑加固方案与普通支撑加固方案，采用与 BRB 支撑加固方案相同的布置形式和分析工况，建立相应的普通支撑加固模型，并且各方案中支撑截面积、屈服强度均与 BRB 支撑加固方案相同。普通支撑的滞回模型采用文献[5]中的 18 参数支撑模型，该模型能较全面的模拟钢支撑复杂滞回行为。

把效果较好的 BRB 支撑加固 (I20-1/2 和 I20-1/4) 分析结果和普通支撑加固分析结果进行对比，如图 7 所示。可以看出，同样的支撑面积，BRB 支撑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。

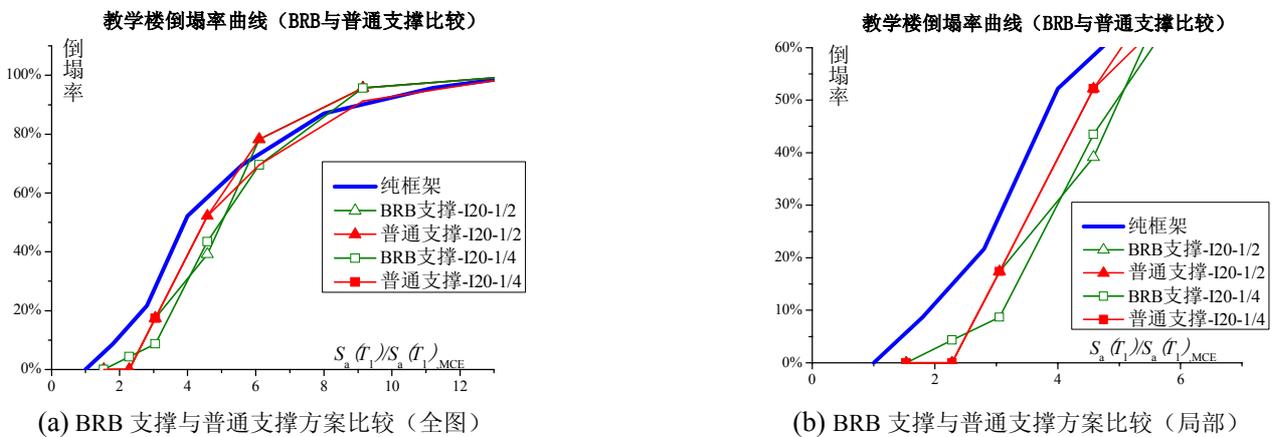


图 7 BRB 支撑与普通支撑方案倒塌率曲线比较

## 4 结论

本文采用设置防屈曲支撑 (BRB 支撑) 的抗震加固方案，基于 IDA 倒塌易损性分析，对汶川地震中典型 RC

框架结构的抗震加固效果进行了分析, 得到以下结论:

(1) 同样的支撑面积, BRB 支撑加固方案要好于普通支撑加固方案。A 形支撑布置方案相对 X 形支撑对框架结构加固更加有利。

(2) 对于 BRB 支撑加固方案, 支撑在地震中起到耗能(有利因素)和增大柱子轴力(不利因素)两个作用, 在大震和特大地震下倒塌率有明显降低, 在超大地震下倒塌率又反而可能会增加, 需要根据工程实际情况选择合适的加固方案。

## 参考文献

- [1] 清华大学土木结构组, 西南交通大学土木结构组, 北京交通大学土木结构组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9  
Analysis on building seismic damage in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9.
- [2] 叶列平, 陆新征, 赵世春, 李易. 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的分析[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 67-76.  
Ye LP, Lu XZ, Zhao SC, Li Y. Seismic collapse resistance of RC frame structures ----Case studies on the seismic damage of several RC frame structures under extreme ground motion in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(6): 67-76.
- [3] 叶列平, 李易, 潘鹏. 漩口中学建筑震害分析[J]. 建筑结构, 2009, 39(11): 54-57  
Ye LP, Li Y, Pan P. Investigation of the seismic damages of building structures in Xuankou Middle School, Yinxiu Town [J]. Building Structures, 2009, 39(11): 54-57
- [4] 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 XZ, Ye LP, Study on the seismic collapse resistance of structural system [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(1): 13-18.
- [5] 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]. 清华大学, 2010.  
Ma YH. Seismic damage simulation and collapse resistance strategies of typical RC frames during the Great Wenchuan Earthquake [D]. Tsinghua University, 2010.
- [6] Quantification of building seismic performance factors [S]. ATC-63 Project Report (90% Draft), FEMA P695 / April 2008.
- [7] 陆新征, 叶列平, 缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 中国建筑工业出版社, 2009.  
Lu XZ, Ye LP, Miao ZW. Elasto-plastic analysis of buildings against earthquake [M], Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.
- [8] 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]. 清华大学, 2007.  
Cheng GY. Study on energy-based seismic design methodology and application in steel braced frames [D]. Tsinghua University, 2007.
- [9] B. Bousalem, N. Chikh. Development of a confined model for rectangular ordinary reinforced concrete columns [J]. Materials and Structures, 2007, 40: 605-613.

## Study on the Effect of Strengthening a Typical RC Frame in Wenchuan Earthquake with BRB Brace

Tang Dai-yuan<sup>1</sup>, Lu Xin-zheng<sup>1</sup>, Ma Yu-hu<sup>1</sup>, Ye Lie-ping<sup>1</sup>, Chen Shi-cai<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, MOE, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

**Abstract:** This paper is based on a typical RC frame that was closed to the epicenter and collapsed during the Wenchuan Earthquake. The seismic collapse resistance of the frame was strengthened by BRB brace. Collapse fragility analysis based on incremental dynamic analysis is implemented for each strengthening scheme to compare their effects and to analyze the influence of critical parameters. The results show that the BRB brace performs better than the conventional brace. With the same strengthening parameters, the A-shaped bracing scheme is better than the X-shaped scheme.

**Keywords:** Wenchuan Earthquake, RC frame structure; collapse probability; collapse prevention measure; strengthening.