

# 倒V形钢支撑加固RC框架的PUSHOVER分析

吴永河, 习会峰, 穆建春

(广东石油化工学院建筑工程学院, 广东 茂名 525000)

**摘要:**为揭示倒V形钢支撑加固RC框架在罕遇地震作用下的性能,建立了4层RC框架结构及在RC框架结构上后加钢支撑的结构模型,并对模型进行了PUSHOVER分析.从基底剪力-顶点位移曲线、楼层位移曲线及出铰顺序等方面对结构在罕遇地震作用下的抗震性能进行了评估.结果表明,在罕遇地震作用下,后加倒V形钢支撑的RC框架结构达到性能点时的基底剪力较原RC框架结构大,顶点位移较原RC框架结构小;钢支撑作为第一道抗震防线能吸收大部分的地震能量,对梁、柱构件能起有效的保护作用;此外,钢支撑对抗连接倒塌也有较大的现实意义.

**关键词:**倒V形支撑;RC框架结构;PUSHOVER分析;抗震性能

**中图分类号:**TU323.5      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7930(2013)01-0005-05

采用钢支撑加固RC框架结构是一种经济、高效的抗震加固方法<sup>[1-5]</sup>.近年来,国内外学者对钢支撑加固RC框架结构的研究主要集中在刚度影响、延性性能及常遇地震作用下的抗震性能等方面,H. Ghaffarzadeh等人对内嵌钢支撑的RC框架的侧向刚度、抗侧力及延性性能等方面作了研究<sup>[6-9]</sup>,A. Massumi和A. A. Tasnimi研究了内嵌交叉支撑与RC框架的不同连接方式对加固性能的影响<sup>[10]</sup>,Viswanath K. G等人利用有限元程序对内嵌支撑加固RC框架结构进行了抗震性能分析<sup>[11]</sup>,穆建春等人研究了交叉钢支撑对RC框架结构的影响<sup>[12]</sup>.迄今钢支撑加固RC框架在罕遇地震作用下的抗震性能研究甚少,基于此,本文在一4层RC框架的基础上增设倒V形钢支撑,运用SAP2000对结构进行PUSHOVER分析,探讨了钢支撑加固RC框架结构在罕遇地震作用下的抗震性能.

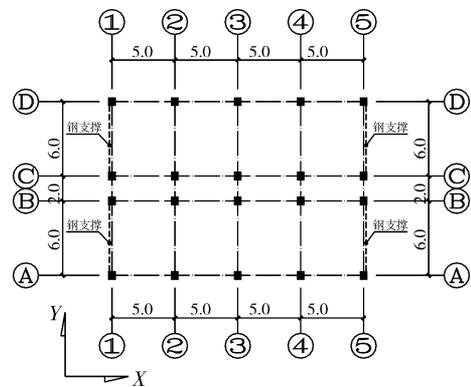


图1 结构平面布置图(m)

Fig. 1 Structure plan(m)

## 1 结构模型及分析工况

### 1.1 结构模型

#### 1.1.1 原结构

原结构为4层RC框架结构,其结构平面布置见图1示,层高均为3m,C30砼,1~4层梁、板、柱截面尺寸见表1所示.各层楼面恒载均为 $2.5 \text{ kN/m}^2$ ,活载均为 $2.0 \text{ kN/m}^2$ ,各梁均布恒载 $6 \text{ kN/m}$ .

#### 1.1.2 带钢支撑结构

在原结构的Y向两边榭后加倒V形钢支撑即得带支撑结构.钢支撑与原结构铰接,截面为 $\text{HW}175 \times 175 \times 7.5 \times 11$ ,Q235钢.增设钢支撑后的结构模型透视图见图2所示.

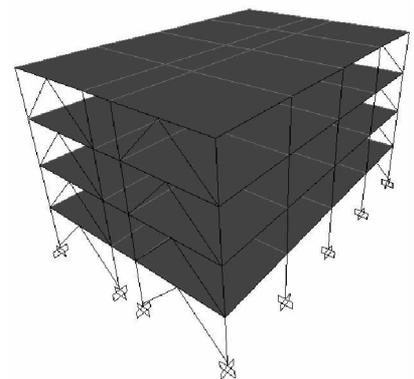


图2 带支撑结构透视图

Fig. 2 Structure model

收稿日期:2012-05-08      修改稿日期:2013-01-04

基金项目:广东科技计划项目(2011A030200016)

作者简介:吴永河(1975-),男,广东茂名人,硕士,主要从事抗震与加固改造研究.

运用大型有限元软件 SAP2000 建立结构模型,以杆单元模拟梁、柱及支撑,壳单元模拟板,并于所有梁端设置程序默认的弯矩铰,所有柱端设置程序默认的轴力-弯矩铰,所有钢支撑中部设置程序默认的轴力铰。

## 1.2 分析工况

假设结构位于抗震设防烈度为 7 度,地震加速度为 0.1 g,地震分组为第一组的地区.首先对结构进行重力荷载及常遇地震作用的内力分析及配筋设计,然后定义“重力非线性+PUSHOVER-X”、“重力非线性+PUSHOVER-Y”分析工况对结构进行双向 PUSHOVER 分析,PUSHOVER 工况的侧向力加载采用加速度荷载模式。

## 2 计算结果

经 PUSHOVER 分析的结构基底剪力-顶点位移曲线、楼层位移及位移角曲线、塑性铰出铰机制如下。

### 2.1 基底剪力-顶点位移

原结构及带支撑结构的基底剪力-顶点位移曲线如图 3 所示.结构达到性能点时的基底剪力及顶点位移见表 2 所示。

由图 3(a)及表 2 可知,在结构 X 方向,多遇地震作用下达达到性能点时,原结构及带支撑结构的基底剪力仅相差 0.33%,位移相等,两结构均处于弹性工作阶段.罕遇地震作用下达达到性能点时,两结构的基底剪力及顶点位移基本相等,基底剪力仅相差 2.94%,顶点位移仅相差 2.86%,说明在结构 Y 向增设钢支撑对 X 向的抗震性能无影响。

由图 3(b)及表 2 可知,在结构 Y 方向,多遇地震作用下达达到性能点时,带支撑结构的基底剪力较原结构增大 137.76%,位移减少 28.57%.罕遇地震作用下达达到性能点时,原结构与带支撑结构的基底剪力及顶点位移相差更大,带支撑结构基底剪力较原结构增大 231.68%,顶点位移减少 56.41%。

### 2.2 楼层绝对位移及位移角

原结构及带支撑结构达到性能点时的楼层绝对位移曲线如图 4 所示,楼层位移角曲线如图 5 所示。

由图 4(a)可知,结构 X 方向的变形曲线呈切剪形,在同一地震水准下,两结构 X 方向的楼层位移基本相等,最大位移均出现在顶层.罕遇地震的顶点位移较多遇地震顶点位移增大 400%。

由图 4(b)可知,两结构 Y 向变形曲线均呈切剪形,最大位移均出现在结构顶层.结构的顶点位移,多遇地震作用下带支撑结构较原结构减少 33%,罕遇地震作用下减少 53.66%。

由图 5(a)可知,在结构的 X 方向,多遇地震作用下达达到性能点时,两结构的各层位移角相等,且均是第 2 层的位移角最大,但满足规范<sup>[13]</sup>关于多遇地震位移角限值的要求.罕遇地震作用下达达到性能点时,虽然带支撑结构第 1、2、3 层的位移角较原结构增大,最大增幅 16.75%,但位移角满足规范<sup>[13]</sup>关于位移角限值要求。

表 1 构件截面尺寸表(m)

Tab.1 The dimensions of component(m)

构件	梁		柱	板厚
	X 向	Y 向		
截面	0.25×0.5	0.25×0.6	0.35×0.4	0.12

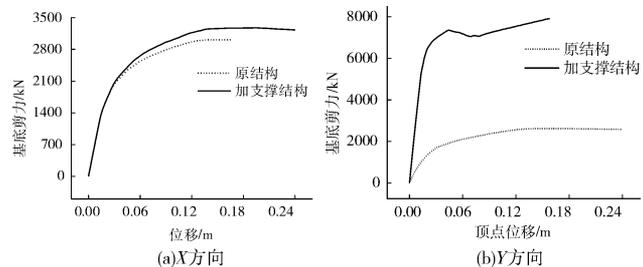


图 3 基底剪力-顶点位移曲线图

Fig.3 The base shear force-top displacement curves

表 2 性能点的基底剪力及顶点位移

Tab.2 The base shear force and top displacement of performance points

地震	结构	基底剪力/kN		顶点位移/m	
		X	Y	X	Y
多遇	原结构	622.76	560.33	0.007	0.007
多遇	带支撑结构	624.80	1328.90	0.007	0.005
罕遇	原结构	2151.71	1837.63	0.035	0.039
罕遇	带支撑结构	2214.96	6094.98	0.036	0.017

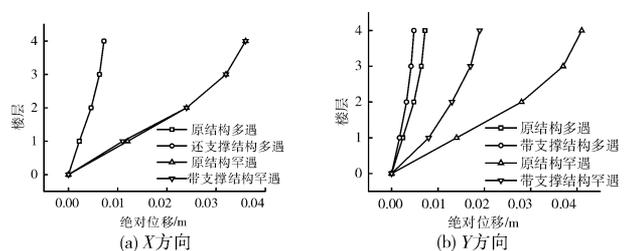


图 4 楼层绝对位移

Fig.4 The absolute displacement of the storey

由图 5(b)可知,在结构的 Y 向,多遇地震作用下达性能点时,结构楼层位移角均满足规范<sup>[13]</sup>限值要求,带支撑结构的楼层位移角较原结构有所降低,降幅最大为第 2、3 层,达 37.5%。罕遇地震作用下,结构楼层位移角均满足规范<sup>[13]</sup>限值要求,但带支撑结构的楼层位移角较原结构大幅降低,最大降幅为第 2 层,达 64.24%。

### 2.3 出铰机制

#### 2.3.1 多遇地震作用下

(1) X 向出铰机制 多遇地震作用下结构 X

向达到性能点时,原结构及带支撑均是 PUSHOVER 第 3 步,查阅 SAP2000 结构模型知,原结构及带支撑结构均未出现塑性铰。

(2) Y 向出铰机制 多遇地震作用下结构 Y 向达到性能点时,原结构为 PUSHOVER 第 3 步,带支撑结构为第 2 步。因结构 Y 向增设钢支撑,故取带钢支撑的 1 轴及不带钢支撑的 3 轴框架作为研究对象,其出铰机制如图 5、图 6 所示(图中数字表示出铰顺序,下同)。由图 5(a)可知,多遇地震作用达性能点时,原结构的部分框架梁端开始屈服,出现塑性铰,铰状态处于“B(屈服)”与“IO(直接使用)”<sup>[14]</sup>之间。由图 5(b)可知,带支撑结构在多遇地震作用下并无塑性铰出现。

由图 6(a)可知,原结构非边榀框架的部分梁端也出现了塑性铰,但数量较边榀框架少。由图 6(b)可知,带支撑结构也出现了塑性铰,但铰数量较原结构少。铰状态亦处于“B”与“IO”之间。

#### 2.3.2 罕遇地震作用下

(1) X 向出铰机制 原结构及带支撑结构 X 方向达到性能点时均为 PUSHOVER 第 15 步,取 C 轴框架为研究作为研究对象,该榀框架达到性能点时出铰机制如图 7 所示。由图 7 可知,原结构及带支撑结构 C 轴框架的出铰顺序、出铰部位及铰数量基本相同,首层柱脚均屈服,其余楼层的梁端基本上都出现了塑性铰,铰状态处于“B”与“IO”之间。

(2) Y 向出铰机制 原结构及带支撑结构 Y 方向达到性能点分别是 PUSHOVER 第 17、第 8 步,同取带支撑的 1 轴及不带支撑的 3 轴框架作为研究对象,其达到性能点时的出铰机制分别如图 8、图 9 所示。

由图 8 可知,两结构 1 轴框架的出铰机制不同,原结构的出铰部位主要集中在各层梁端、首层柱脚及中柱柱端,塑性铰数量较带支撑结构多。带支撑结构塑性铰主要集中在梁端,虽然首层柱端也出现塑性铰但数量较少,梁柱端塑性铰状态均处于“B”与“IO”之间。在 PUSHOVER 的第 7 步,首层钢支撑中部出现塑性铰并且立即达到“C”点(屈服并开始失去承载力)<sup>[14]</sup>。

从图 9 可知,虽然两结构的塑性铰状态均处于“B”与“IO”之间,原结构 3 轴框架的塑性铰出铰机制同其 1 轴框架相同,但带支撑结构的出铰机制与原结构不同,带支撑结构塑性铰主要出现在梁端且数量

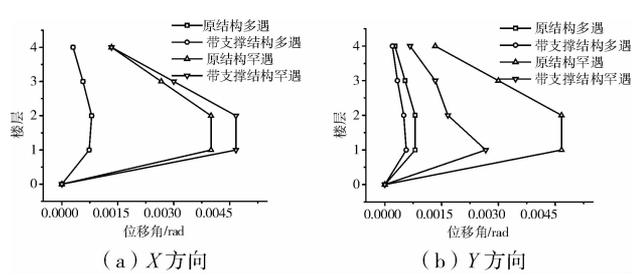


图 5 楼层位移角  
Fig. 5 The displacement angle of the storey

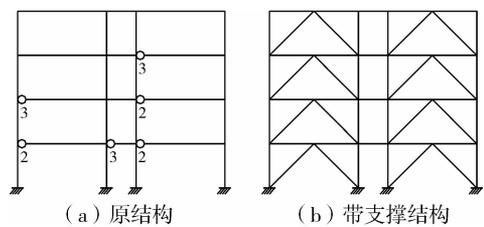


图 6 多遇地震下结构①轴出铰机制  
Fig. 6 The plastic hinge diagram of 1 axis under frequent earthquake

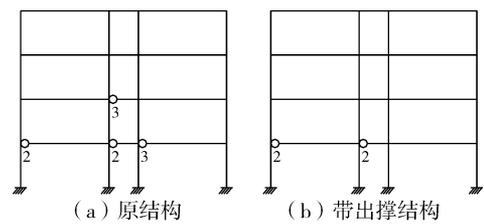


图 7 多遇地震下结构③轴出铰机制  
Fig. 7 The plastic hinge diagram of 3 axis under frequent earthquake

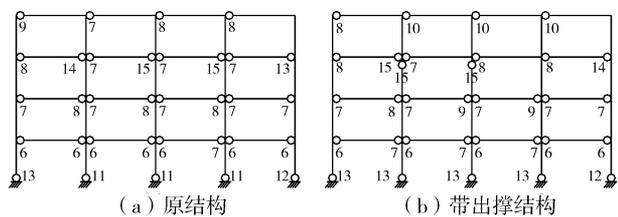


图 8 罕遇地震下结构③轴出铰机制  
Fig. 8 The plastic hinge diagram of C axis under rare occurrence earthquake

较少,且柱脚的塑性铰出现时间较延迟。

### 3 抗震性能评价

综上计算结果可知,在原结构Y向增设钢支撑后,结构Y向刚度增加,罕遇地震作用下结构Y向抵御地震作用的能力增强。由于结构X方向没有增设钢支撑,故结构X方向刚度不受影响,X方向的抗震性能亦基本不变。在结构Y向增设钢支撑后,结构在罕遇震作用下Y向的顶点位移、层间位移角大大减小。虽然从顶点位移及层间位移角的角度分析,原结构及带支撑结构均能满足规范<sup>[13]</sup>大震不倒的性能要求,但是,从原结构及带支撑结构的出铰机制角度显示,增设钢支撑的结构Y向的出铰部位、出铰顺序及出铰数量更符合大震不倒的抗震性能要求。

### 4 结 语

通过上述分析,可知在类似本文的设计条件下,倒V形钢支撑可有效地减少RC结构在罕遇地震作用下的层间位移角,改变RC结构的出铰机制使之更符合抗震理念,较好地提高了RC结构的抗震性能。此外,增设倒V形钢支撑后,首层柱脚仍然是抗震薄弱部位,抗震加固时应予以加强,倒V形钢支撑可作用为结构的第一道抗震防线,在罕遇地震作用下率先破坏,消耗了大量地震能量的同时保护了梁柱构件,且作为多余约束,对防止结构在罕遇地震作用下连续倒塌具有重要意义。

### 参考文献 References

- [1] SARNO L Di, MANFREDI G. Seismic assessment of a RC school building retrofitted with innovative braces [M]. London: Taylor & Francis Group, 2009.
- [2] MU Jian-chun, WU yong-he. Applied study of section steel-concrete combination strengthening method and external bracing method in seismic strengthening [C]// International Conference on Earthquake Engineering the 1<sup>st</sup> Anniversary of Wenchuan Earthquake, 2009.
- [3] 吴永河, 习会峰, 李胜强, 等. 混凝土框架上钢框架增层的抗震加固设计[J]. 建筑结构, 2010(S2):25-29.  
WU Yong-he, XI Hui-feng, LI Sheng-qiang, et al. Seismic Strengthening Design of Steel-frame Adding Storey on Concrete Frame Structure[J]. Building Structure, 2010(S2):25-29.
- [4] 李中军, 张金库, 宋环宇. 某高校行政主楼加固设计[J]. 结构工程师, 2010, 4(2):146-149.  
LI Zhong-jun, ZHANG Jin-ku, SONG Huan-yu. Strengthening Design of a College Administration Building[J]. Structure Engineering, 2010, 4(2):146-149.
- [5] 吴清波. 上海中奥电梯研发中心结构加层设计与施工关键技术研究[J]. 结构工程师, 2010, 8(4):120-124.  
WU Qing-bo. Key Technology Research of Storey-Adding Design and Construction of ZHONG AO Elevator R& D Center Shanghai[J]. Structure Engineer, 2010, 8(4):120-124.
- [6] GHAFFARZADEH H, MAHERI M R. Cyclic Tests on the Internally Braced RC Frames [J]. JSEE; Fall 2006, 8(3):177-186.
- [7] GHAFFARZADEH H, MAHMOUD R Maheri. Capacity interaction between the steel bracing and concrete frame [C]// The 7<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering. Istanbul, Turkey, 2006.
- [8] YOUSSEF M A, GHAFFARZADEH H, M Nehdi. Seismic performance of RC frames with concentric internal steel bracing [J]. Engineering Structures 2007, 29:1561-1568.
- [9] 范苏榕. 钢支撑加固钢筋混凝土框架结构的试验研究[D]. 南京:南京工业大学, 2002.  
FAN Su-rong. Experimental Research on the Aseismic Retrofitting of Reinforced Concrete Frame Structure with Steel Braces [D]. Naijing: Nanjing University of Technology, 2002.
- [10] MASSUMI A, TASNIMI A A. Strengthening of low ductile reinforced concrete frames using steel X-bracings with different details [C]// The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.

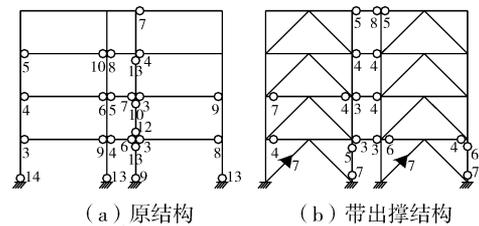


图9 罕遇地震下结构①轴出铰机制

Fig. 9 The plastic hinge diagram of 1 axis under rare occurrence earthquake

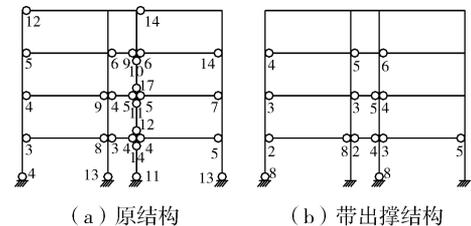


图10 罕遇地震下结构③轴出铰机制

Fig. 10 The plastic hinge diagram of 3 axis under rare occurrence earthquake

- [11] Viswanath K G, Prakash K B, Anant Desai. Seismic Analysis of Steel Braced Reinforced Concrete Frames[J]. International Journal of Civil and Structure Engineering, 2010,1(1):112-114.
- [12] 吴永河,李胜强,习会峰,等.后加交叉钢支撑对 RC 框架结构的影响研究[J].结构工程师,2011,8(4):50-57.  
WU Yong-he, LI sheng-qiang, XI hui-feng, et al. Study on the Effect of Crossed Steel Bracing on RC Frames[J]. Structure Engineering, 2011,8(4): 50-57.
- [13] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
GB50011-2010 Code for Seismic Design of Building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [14] 北京金土木软件技术有限公司. PUSHOVER 分析在建筑工程抗震设计中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.  
Civil King Software Technology Co., Ltd. PUSHOVER analysis on building engineering seismic design of application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

## PUSHOVER analysis on inverted V-shape steelbrace strengthening RC frame structure

WU Yong-he, XI Hui-feng, MU Jian-chun

(Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

**Abstract:** In order to reveal the performance of RC frame structure with inverted V-shape steel brace under function of rare earthquake, 4-layer RC frame structure and the RC structure with inverted V-shape steel brace as well as PUSHOVER on model is performed. The evaluation on anti-seismic performance is performed under function of rare earthquake for structure from such aspects as base shear- top displacement curve, floor displacement curve and hinged out mechanism. The results show that under function of rare occurrence earthquake, the base shear while RC frame structure with inverted V-steel brace reaching the performance point is greater than the one of original RC frame structure, and the top displacement is less than the one of original RC frame structure. As the first anti-seismic defensive line, the steel brace can absorb most earthquake energy to play the effective protection for beam and column elements. Additionally, the steel brace is provided with greater practical significance for resisting the progressive collapse.

**Key words:** *Inverted V-shape brace; RC frame structure; PUSHOVER analysis; seismic behavior*

---

**Biography:** WU Yong-he, Maoming 525000, P. R. China, Tel:0086-13828670385, E-mail:wuyonghe0001@163.com

(上接第 4 页)

## Increment transverse isotropic damage theory and numerical analysis

LIU Jun-qing, LI Hong-xiao, LI Qian

(School of Science, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to research the damage on the mechanical properties of materials the increment of effective stress equation is established, based on the transverse isotropic damage theory as a foundation, by introducing damage variable factor and the tectonic effective damage tensor  $M(D)$ . Similar to the plastic flow analysis method the relationship between elastic-strain the effective elastic-strain is acquired. By the von Mises yield criterion, plastic fourth-order symmetric stiffness tensor is obtained. The stress-strain curve of variation is discussed through the uniaxial tensile and finite element of a flat plate with a hole, giving the influence of damage on the material. The results show that the deformation is accelerated by the material damage.

**Key words:** *transverse isotropic damage; increment; the plastic deformation; stiffness tensor; finite element simulation*

---

**Biography:** LIU Jun-qing, Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel:0086-13991319036, E-mail:liujunqingjd@126.com