

摇摆防屈曲支撑钢框架抗震性能分析*

孙祚帅[†] 张国伟 丁梦婷

(北京建筑大学 工程结构与新材料北京市高等学校工程研究中心,北京 100044)

摘要 基于防屈曲支撑钢框架(BRBSF)和摇摆防屈曲支撑钢框架(RBRBSF)拟静力试验,建立 BRBSF 和 RBRBSF 的有限元模型,利用 OpenSees 有限元软件对试验框架中采用的梁端削弱截面(RBS)进行分析,研究 RBS 对 BRBSF 和 RBRBSF 性能影响,并基于有限元模型进一步分析 BRB 参数对 RBRBSF 的影响. 研究表明,梁端设置 RBS 可减小 BRBSF 梁柱节点弯矩,实现塑性铰外移,但对 RBRBSF 梁柱节点弯矩影响较小,BRB 参数的改变对 RBRBSF 屈服荷载和承载能力有一定影响,但对框架柱轴力影响较小.

关键词 摇摆防屈曲支撑钢框架, OpenSees, 梁端削弱截面, 防屈曲支撑, 等效刚度

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-062

引言

防屈曲支撑(BRB)作为一种新型耗能元件,在既有框架加固和高层钢框架减震等工程中应用越来越多^[1-3],Cale Ash,S.E 和 Alison Shaw PE 对 BRB 加固既有框架的实际工程进行分析,提出 BRB 加固既有框架的方法. 国内外学者对防屈曲支撑框架进行了多次试验探究^[4-7],研究防屈曲支撑框架在地震作用下的屈服耗能机制. 研究表明,防屈曲支撑框架抗震性能优于普通钢支撑框架,BRB 能够为框架提供附加阻尼比,消耗地震能量并保护主体框架.

将 BRB 应用到高层钢框架中时,水平地震力作用下 BRB 分解产生的轴力传递至框架柱中,并在柱底不断累积,造成基础与柱底之间拉力过大,从而导致基础设计的难题. 因此本团队提出摇摆防屈曲支撑钢框架(RBRBSF)结构体系,该体系通过放松柱底与基础之间的拉力,使框架在侧向力作用下摇摆,同时为实现框架结构“强柱弱梁”机制,保护主要受力构件,保证节点处不出现塑性铰,在摇摆框架中设置梁端削弱截面(Reduced Beam Section,简称 RBS). 本文基于摇摆防屈曲支撑钢框架(RBRBSF)和防屈曲支撑钢框架(BRBSF)拟静力试验,建立试验框架数值分析模型,通过对比分析研究 RBS 对 BRBSF 和 RBRBSF 出铰机制的影

响,并基于有限元模型进一步分析 BRB 核心段长度和核心段面积对 RBRBSF 抗震性能的影响.

1 有限元模型的建立

试验框架为单榀一层一跨,共四榀,分别为编号 BRBSF-1 和 BRBSF-2 的防屈曲支撑钢框架以及编号为 RBRBSF-1 和 RBRBSF-2 的摇摆防屈曲支撑钢框架,其中 BRBSF-1 和 RBRBSF-1 为第一组试验框架,BRBSF-2 和 RBRBSF-2 为第二组试验框架,试验框架构造和详细参数见参考文献[8].

RBRBSF 有限元模型如图 1 所示,其中梁柱构件采用基于刚度法的梁柱单元,BRB 核心段采用 Steel02 材料的 Truss 单元,连接段采用刚臂单元模拟 BRB 与主体的连接,摇摆柱脚中柱底与基础的连接采用 Gap 单元模拟,放松受拉约束使柱脚可以抬起,并利用弹性梁柱单元定义刚臂模拟柱底板,采用 Steel01 材料的 Truss 单元模拟柱脚摩擦阻尼器. 在 OpenSees 中,零长度纤维截面单元可以用来模拟塑性铰,因此 RBS 处塑性铰的出现采用零长度截面单元模拟. 在 RBS 处定义两个相同节点,用削弱后的纤维截面定义零长度纤维截面单元,截面材料本构与框架梁本构一致.

BRBSF 和 RBRBSF 有限元模型的建立和正确性验证过程详见参考文献[9]. 数值模拟过程中的加载制度与试验框架一致,经模拟与试验结果对

2019-08-25 收到第 1 稿,2019-11-12 收到修改稿.

* 北京未来城市设计高精尖创新中心(UDC2016030200)和 QN03 青年教师卓越支持计划(X18099)

[†] 通讯作者 E-mail:szsguardian@163.com

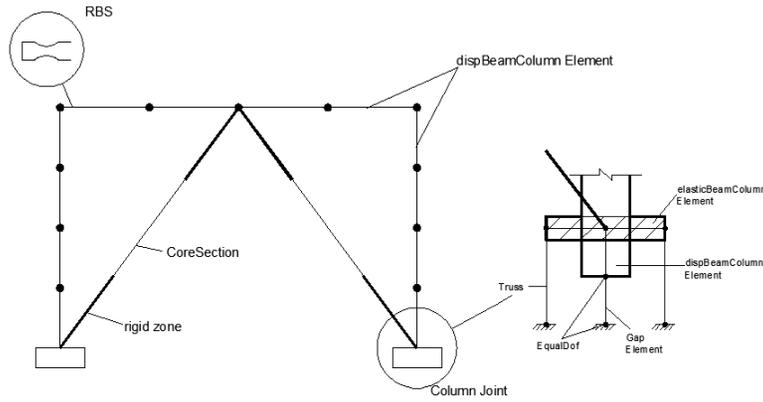


图1 RBRBSF有限元模型

Fig 1 The finite element model of RBRBSF

比,有限元模型能较好反映 RBRBSF 和 BRBSF 抗震性能,适用于 BRBSF 和 RBRBSF 非线性分析。

2 数值模拟结果分析

2.1 梁端削弱截面分析

试验共设计两组不同参数 RBS,第一组试验框架采用 RBS-1,第二组试验框架采用 RBS-2,具体 RBS 参数如表 1 所示。

表 1 RBS 参数表

Table 1 RBS parameters table

Frame number	RBS number	l_a/mm	l_b/mm	l_c/mm
BRBSF-1	RBS-1	150	83	18
BRBSF-2	RBS-2	160	83	25
RBRBSF-1	RBS-1	150	83	18
RBRBSF-2	RBS-2	160	83	25

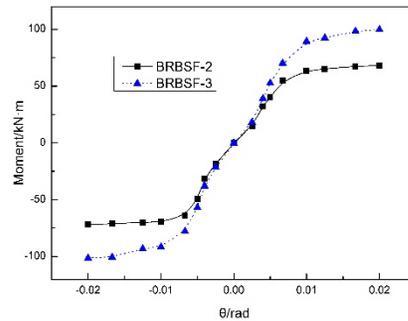
以 BRBSF-2 和 RBRBSF-2 有限元模型为基础,分别建立未设置 RBS 的防屈曲支撑钢框架(BRBSF-3)和摇摆防屈曲支撑钢框架(RBRBSF-3)有限元模型,加载制度分别与 BRBSF-2 和 RBRBSF-2 一致,并与 BRBSF-2 和 RBRBSF-2 梁柱节点处弯矩对比,梁柱节点 M- θ 曲线如图 2 所示。

如图 2(a),设置 RBS 可大幅度减小 BRBSF 梁柱节点弯矩, $\theta=1/50$ 时梁柱节点弯矩降低 28%。经分析,RBS 设置的目的是保证“强节点、弱构件”原则,使得塑性铰出现在削弱截面处,因此设置 RBS 最终实现塑性铰外移。RBS 根据文献[10]中极限弯矩计算公式和塑性铰外移条件公式得框架梁极限弯矩为 $87.04kN \cdot m$ 。BRBSF-3 梁柱节点弯矩大于极限弯矩并形成塑性铰;BRBSF-2 梁柱节点最大弯矩为 $73.4kN \cdot m$,小于极限弯矩且不形成塑性铰,此时 RBS 处极限弯矩为 $59.1kN \cdot m$,满足塑性铰外移

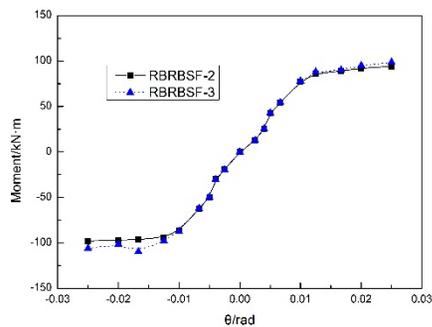
条件。

如图 2(b),位移加载等级较小时,RBRBSF-2 和 RBRBSF-3 梁柱节点处弯矩基本一致,当柱脚抬起后,RBRBSF-2 梁柱节点处弯矩变小, $\theta=1/50$ 时 RBRBSF-2 梁柱节点处弯矩比 RBRBSF-3 梁柱节点处弯矩小 8%,表明设置 RBS 可降低 RBRBSF 梁柱节点处弯矩,但并不明显。

为进一步研究 RBS 对 RBRBSF 影响,改变表 1 中对应 RBS 的三个截面参数,应用于 RBRBSF 中。



(a) BRBSF



(b) RBRBSF

图 2 梁柱节点 M- θ 曲线

Fig 2 The skeleton curve of the beam column joint

经分析,设置RBS对RBRBSF水平承载力影响较小,但可以降低梁柱节点弯矩,RBS的三个参数对于RBRBSF水平承载力和梁柱节点处弯矩影响较小,设计时按照AISC358-10^[11]设计建议确定即可。

考虑到RBS会降低梁端截面的承载能力,在试验框架设计时参考AISC358-10设计建议进行RBS的设计.通过试验表明^[8],在小震下框架梁有足够刚度,RBS不会影响框架梁端承载力。

2.2 防屈曲支撑参数影响分析

引入防屈曲支撑(BRB)等效刚度 k ^[12],按照各自部分的线刚度进行串联求得,计算公式如式(1)和(2):

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \quad (1)$$

$$k_3 = \frac{EA_{BRB}}{L_{BRB}} \quad (2)$$

式中, k_3, k_2, k_1 分别为核心段、过渡段、连接段刚度, A_{BRB} 为BRB核心段面积, L_{BRB} 为BRB核心段长度。

以RBRBSF-2模型为基准算例,改变RBRBSF中防屈曲支撑(BRB)核心段长度 L_{BRB} 和核心段面积 A_{BRB} ,这相当于改变BRB的等效刚度 k ,研究参数改变对RBRBSF屈服荷载、承载能力和框架柱轴力的影响.BRB参数如表2所示,定义采用BRB-1-BRB-7的RBRBSF为第一组模型,采用BRB-5、BRB-8-BRB-13的RBRBSF为第二组模型。

表2 BRB构件参数表

Table 2 The parameter table of BRB component

BRB number	Length of core segment length L_{BRB}/mm	Core area A_{BRB}/mm^2	Length of BRB /mm	Angle /°	Length of transition /mm	Equivalent stiffness $k /10^6\text{N/mm}$
BRB-1	500	900	1560	52	360	3.7
BRB-2	530	900	1560	52	360	3.5
BRB-3	600	900	1560	52	360	3.1
BRB-4	700	900	1560	52	360	2.6
BRB-5	840	900	1560	52	360	2.2
BRB-6	1000	900	1560	52	360	1.9
BRB-7	1100	900	1560	52	360	1.7
BRB-8	840	700	1560	52	360	1.7
BRB-9	840	800	1560	52	360	2.0
BRB-10	840	1000	1560	52	360	2.5
BRB-11	840	1200	1560	52	360	2.9
BRB-12	840	1400	1560	52	360	3.4
BRB-13	840	1500	1560	52	360	3.7

2.2.1 屈服荷载和承载能力

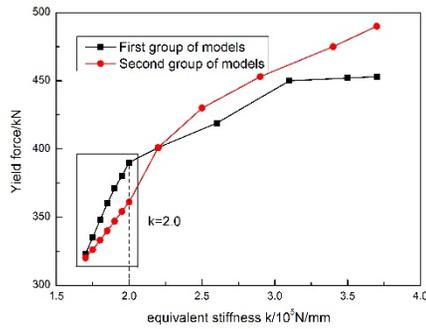
根据公式(1),BRB等效刚度 k 与 A_{BRB} 和 L_{BRB} 相关,且与 A_{BRB} 成正比,与 L_{BRB} 成反比.BRB参数改变对RBRBSF-2屈服荷载和最终状态(层间位移角 $\theta=1/40$)下承载力影响如图3所示,随着 L_{BRB} 减小或 A_{BRB} 增大,按照公式(1)计算得到的BRB等效刚度 k 增大,BRB为框架提供的抗侧刚度增大,两组模型中RBRBSF的屈服荷载和最终状态下的承载力均呈现不断增大的趋势.如图方框中所示,为保证结果的可靠性,在 $k < 2.0$ 时,增加数据量。

如图3(a)所示,当BRB等效刚度 $k > 2.2$ 时,随BRB等效刚度 k 增大,RBRBSF的屈服荷载增长幅度减小,因此当 L_{BRB} 较小时,减小 L_{BRB} 虽然可以增大其等效刚度 k ,但对RBRBSF屈服荷载影响较小;当

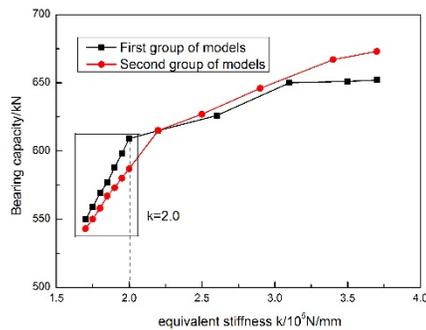
BRB的等效刚度 $k < 2.2$ 时,随 k 增大,RBRBSF的屈服荷载增长幅度较大,此时 $L_{BRB} > 840\text{mm}$.如图3(b)所示,当BRB等效刚度 $k < 2.0$ 时,随 k 增大,RBRBSF最终状态下的承载力基本呈线性增长趋势;当 $k > 2.0$ 时,随 k 增大,RBRBSF最终状态下承载力增长幅度减小。

如图3和图4所示,随着 A_{BRB} 和 L_{BRB} 的变化,导致BRB等效刚度 k 改变,而两组模型的RBRBSF屈服荷载、承载力和延性比曲线走势均相同。

从理论计算结果及数值模拟结果分析图3(a)曲线趋势.第一组模型控制变量为 L_{BRB} ,因此 A_{BRB} 及核心段屈服强度为定值,根据公式计算得出BRB屈服荷载为281kN,整体模型屈服荷载的限值为468kN,如表3所示,理论值与模拟值的比值随等效



(a)屈服荷载
(a)Yield Force



(b)承载力
(b)Bearing capacity

图 3 屈服荷载和承载力

Fig 3 Yield force and bearing capacity

刚度 k 提升逐渐接近于 1. 当屈服荷载达到 468kN 时, k 再提升, RBRBSF 的屈服荷载也不会得到提升, 因此屈服荷载曲线上升趋势变缓. 第二组模型控制变量为 A_{BRB} , 如表 4 所示, 第二组模型理论值与模拟值的比值逐渐增大, 由于理论值线性增长, 相应的第二组模型屈服荷载模拟值增长速度变缓, 屈服荷载曲线上升趋势变缓.

从 RBRBSF 工作机制角度进一步分析图 3(b)

表 3 第一组模型屈服荷载模拟值与计算值

Table 3 Simulation and calculated Values of yield load of the first group of models

Equivalent stiffness/N/mm	Value of modeling/kN	Value of calculation/kN	Ratio
1.7	325.04	468	1.44
1.9	368.5	468	1.27
2.2	399.67	468	1.17
2.6	420.7	468	1.11
3.1	456	468	1.02
3.5	460.5	468	1.01
3.7	463	468	1.01

表 4 第二组模型屈服荷载模拟值与计算值

Table 4 Simulation and calculated values of bearing capacity of the second group of models

Equivalent stiffness /N/mm	Value of modeling/kN	Value of calculation/kN	Ratio
1.7	320.01	364	1.13
2.0	362.58	416	1.15
2.2	399.67	468	1.17
2.5	435.52	520	1.19
2.9	462.3	626	1.35
3.4	477.5	730	1.53
3.7	493	782	1.59

曲线趋势. 随着框架水平荷载的增加, BRB 先于柱脚摩擦阻尼器屈服, 虽然 BRB 依然为框架提供一定抗侧刚度, 但由于柱脚的抬起, 框架整体刚度不再随 BRB 等效刚度 k 的增大而呈线性增长. 同时文献[12]中的分析结果表明, L_{BRB} 越小, RBRBSF 柱脚抬起高度越高. 因此当 L_{BRB} 较大时, k 较小, 柱脚抬起高度小, RBRBSF 承载力随 k 的增大呈线性增长趋势; 而 L_{BRB} 较小时, k 较大, 相同位移加载等级下柱脚抬起高度较高, k 的提升对整体框架刚度的提升效果不再明显, 因此承载力曲线上升趋势逐渐变缓.

如图 4 所示, 随着 BRB 等效刚度 k 的增大, RBRBSF 延性比不断减小, 当两组模型的屈服荷载曲线增长趋势变缓时, 承载力曲线也会呈现增长变缓的趋势, 且会提前进入该趋势.

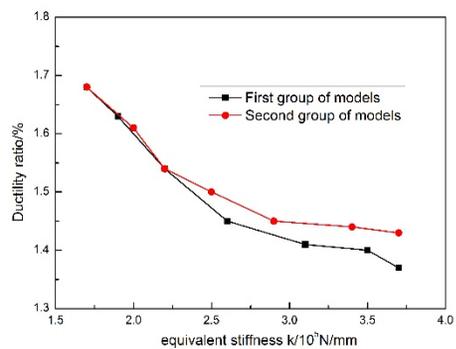


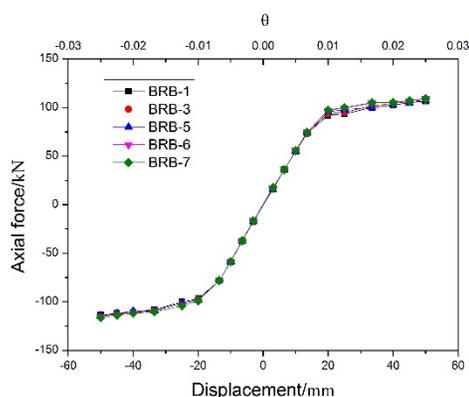
图 4 延性比曲线

Fig.4 Ductility ratio curve

通过分析 A_{BRB} 和 L_{BRB} 对 RBRBSF 屈服荷载和承载力的影响, 建议 RBRBSF-2 中 BRB 核心段面积应小于 800mm^2 , 核心段长度应大于 840mm , 综合分析 BRB 等效刚度应取 $k < 2.0$.

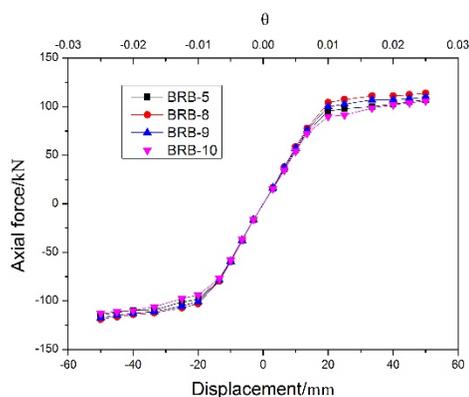
2.2.2 框架柱轴力

文献[9]中对 BRBSF 和 RBRBSF 框架轴力进行了对比,结果表明,摇摆柱脚的设置可以减小框架柱轴力.为研究摇摆机制下不同 BRB 构件对框架柱轴力影响,提取其中八个模型的框架柱轴力数据并分析,结果如图 5 所示.如图 5(a),随 L_{BRB} 增大,框架柱轴力基本无变化,如对比分别采用 BRB-1 和 BRB-5 的 RBRBSF 框架柱轴力骨架曲线,最终状态(框架侧移 50mm)框架柱轴力仅相差 2%,表明 L_{BRB} 改变不会影响 RBRBSF 框架柱轴力大小;如图 5(b),对比分别采用 BRB-8 和 BRB-10 的 RBRBSF 框架柱轴力骨架曲线,最终状态框架柱轴力相差 7.2%,表明 A_{BRB} 对 RBRBSF 框架柱轴力大小基本无影响.



(a)第一组模型

(a)The first group of models



(b)第二组模型

(b)The second group of models

图 5 不同 BRB 构件 RBRBSF 框架柱轴力骨架曲线

Fig 5 Axial force skeleton curve in column of RBRBSF with different BRB

3 结论

基于防屈曲支撑钢框架(BRBSF)与摇摆防屈

曲支撑钢框架(RBRBSF)拟静力试验与数值模拟,得出以下结论:

(1) 设置梁端削弱截面(RBS)对 BRBSF 影响较大,合理的参数选择可以降低梁柱节点弯矩,实现塑性较外移,但 RBS 参数的改变对 RBRBSF 影响较小.在 RBRBSF 设计时,若采用 RBS,按照 AISC358-10 建议确定 RBS 的三个参数即可.

(2) BRB 核心段面积和核心段长度对 RBRBSF 屈服荷载和承载能力有影响.随着 BRB 核心段长度增大,等效刚度减小,RBRBSF 屈服荷载和承载力减小;随着 BRB 核心段面积增大,等效刚度增大,RBRBSF 屈服荷载和承载力增大,但增长幅度随 BRB 等效刚度增大的幅度变缓.为保证 BRB 核心段面积和核心段长度对 RBRBSF 影响的最大化,设计时建议等效刚度应小于 2.0.

(3) 虽然摇摆柱脚的设置会放松柱底与基础之间的拉力,减小框架柱轴力,但是 BRB 核心段面积和核心段长度的改变对 RBRBSF 框架柱轴力影响较小.

参 考 文 献

- 1 Shaw A, Bouma K. Seismic retrofit of the marin county hall of justice using steel buckling-restrained braced frames. In: American Society of Civil Engineers Structures Congress 2004-Nashville, Tennessee, United States (May 22-26, 2004), 2004:1~11
- 2 Eghbali M, Asadian E, Amiri G G. Seismic performance of steel frames equipped with buckling-restrained braces (BRBs) using nonlinear static and dynamic analyses. *Journal of Vibro Engineering*, 2017, 19(2):1131~1146
- 3 Ash C, Bartoletti S. Seismic rehabilitation of an existing braced frame hospital building by direct replacement with BRBs. In: ATC and SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures. 2009:68~74
- 4 吴徽,张国伟,赵健,等.防屈曲支撑加固既有 RC 框架结构抗震性能研究. *土木工程学报*, 2013, 46(7): 37~46 (Wu H, Zhang G W, Zhao J, et al. Seismic performance of existing RC frame structures reinforced with buckling-restrained braces. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(7): 37~46(in Chinese))
- 5 Mahrenholtz C, Lin P, Wu A, et al. Retrofit of reinforced concrete frames with buckling-restrained braces. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2015, 44(1): 59~78

- 6 Tsai K, Hsiao P. Pseudo-dynamic test of a full-scale CFT/BRB frame—Seismic performance of buckling-restrained braces and connections. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 37(7):1099~1115
- 7 Fahnestock L A, Ricles J M, Sause R. Experimental evaluation of a large-scale buckling-restrained braced frame. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 133(9):1205~1214
- 8 Zhang G W, Chen P, Zhao Z W, et al. Experimental study on seismic performance of rocking buckling-restrained brace steel frame with lift able column base. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 143:291~306
- 9 张国伟,孙祚帅,赵紫薇.基于OpenSees摇摆防屈曲支撑钢框架抗震性能分析.工程抗震与加固改造,2019,41(2):20~24(Zhang G W, Sun Z S, Zhao Z W. Seismic performance analysis of rocking buckling-restrained braced steel frame based on OpenSees. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*.2019,41(2):20~24 (in Chinese))
- 10 陈廷国,赵广军.钢框架延性节点塑性铰外移的机理研究.钢结构,2014,29(12):25~31(Chen T G, Zhao G J. The mechanism research of steel frame ductility node. *Steel Construction*, 2010, 29(12):25~31 (in Chinese))
- 11 ANSI/AISC 358-10 Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, 2010
- 12 张国伟,陈鹏,陈博珊.屈曲约束支撑钢框架的抗震性能分析.工程抗震与加固改造,2016,38(2):86~93(Zhang G W, Chen P, Chen B S. Seismic performance analysis of buckling restrained brace steel frame. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2016, 38(2):86~93 (in Chinese))

SIMULATION ON SEISMIC PERFORMANCE OF THE ROCKING BUCKLING-RESTRAINED BRACED STEEL FRAME *

Sun Zuoshuai[†] Zhang Guowei Ding Mengting

(Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Structural Engineering and New Materials, Beijing 100044, China)

Abstract Based on the quasi-static tests of the buckling-restrained steel frame (BRBSF) and the rocking buckling-restrained steel frame (RBRBSF), the finite element models of BRBSF and RBRBSF are established, using opensees to analyze the reduced beam section (RBS) in the test frame, studying the influence of RBS on the performance of BRBSF and RBRBSF, and further studying the influence of BRB parameters on the RBRBSF based on the finite element model. The results show that the setting of RBS at the end of the beam can reduce the bending moment of BRBSF beam-column joints and realize the plastic hinge external movement, but it has little effect on the bending moment of RBRBSF beam-column joints, and the change of BRB parameters has a certain influence on the RBRBSF yield load and bearing capacity, but has little effect on the axial force in the column.

Key words rocking buckling-restrained braced steel frame (RBRBSF), OpenSees, reduced beam section (RBS), buckling-restrained brace (BRB), equivalent stiffness

Received 25 August 2019, revised 12 November 2019.

* The project supported by the Beijing Advanced Innovation Center for Future Design (UDC2016030200) and QN03 Young Teacher Excellence Support Program(X18099)

[†] Corresponding author E-mail: szsguardian@163.com