

冯冲冲,朱南海,贺小玲.建筑结构的屈曲约束支撑对其抗震加固性能的影响[J].地震工程学报,2019,41(2):353-359.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.353
FENG Chongchong, ZHU Nanhai, HE Xiaoling. Influence of Buckling-Restrained Braces on the Seismic Strengthening Performance of Building Structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2): 353-359. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.353

建筑结构的屈曲约束支撑对其 抗震加固性能的影响

冯冲冲, 朱南海, 贺小玲

(江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:当前方法采用伸臂桁架加固建筑结构时,未考虑建筑结构的屈曲约束支撑力的影响,伸臂桁架与建筑结构的连接不牢固,导致其对建筑结构的抗震加固性能较差。故此,深入分析建筑结构的屈曲约束支撑对其抗震加固性能的影响,设计建筑结构抗震加固方案,利用高强螺栓节点经由连接钢板实现屈曲约束支撑与建筑结构的铰接固定。分别从支撑变形同建筑结构层间位移的关系、建筑结构支撑承载力、多遇地震影响下屈曲约束支撑框架的位移验算,以及罕遇地震影响下屈曲约束支撑的弹塑性位移验算方面,分析屈曲约束支撑对建筑结构抗震加固性能影响。经实验分析得出,建筑结构加入屈曲约束支撑后第一扭转周期同第一平动周期的比值降低 0.14, X、Y 两个方向的砌体墙同建筑结构的刚度比值降低 6.9、8.0,最大顶点位移值降低 15.4 mm、29.3 mm,抗震加固性能大大提高。

关键词: 建筑结构; 屈曲约束支撑; 抗震; 加固; 位移; 承载力

中图分类号: TU398⁺.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)02-0353-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.353

Influence of Buckling-Restrained Braces on the Seismic Strengthening Performance of Building Structures

FENG Chongchong, ZHU Nanhai, HE Xiaoling

(School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology,
Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: The influence of buckling-restrained braces on building structure is not considered in the current methods of structural reinforcement with outriggers. The connection between the outrigger and the building structure is unstable, thus leading to poor seismic strengthening performance of the structure. Therefore, herein, the influence of buckling-restrained braces on the seismic strengthening performance of a building structure is analyzed in detail, and the seismic reinforcement scheme of the structure is designed. The buckling-restrained brace and the structure are fixed by the high-strength bolted joints through connecting steel plates. The influence of

收稿日期: 2018-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408276、51768024); 江西省自然科学基金项目(20151BAB216023、20181BAB206039); 江西省教育厅科技项目(GJJ160618); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201710407019、201710407014)

第一作者简介: 冯冲冲(1995—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要从事钢结构研究。E-mail: 18663211837@163.com。

通信作者: 朱南海(1981—),男,江西赣州人,博士,副教授,主要从事大跨空间钢结构研究。

buckling-restrained braces on the seismic strengthening performance of a structure was studied. The study was based on the relationships among bracing deformation and story drift, bearing capacity, displacement-checking calculations of the buckling-restrained braced frame under frequent earthquakes, and the elasto-plastic displacement-checking calculation of the buckling-restrained brace under the influence of rare earthquakes. The experimental results showed that after adding a buckling-restraint brace to the structure, the ratio of the first period of torsion to the first period of translation was decreased by 0.14; the stiffness ratio of the masonry wall to the building structure in the *X* and *Y* direction was decreased by 6.9 and 8.0, respectively, and the maximum vertex displacement was reduced by 15.4 mm and 29.3 mm, respectively. This indicated that the seismic reinforcement performance of the structure was greatly improved.

Keywords: building structure; buckling-restrained brace; seismic resistance; reinforcement; displacement; bearing capacity

0 引言

受地域环境影响,我国地震区域分布较为广泛^[1],尤其是近年来地震频发,使我国人民生命财产安全受到极大威胁。为了提升地震多发区域人民生活生产的安全性,寻找一种有效的方式对已有建筑进行抗震加固势在必行^[2]。屈曲约束支撑的主要优势在于力学性能评定,变形、耗能与滞回能力较好,其能够防止文献[3]中使用减震钢框架的加固混凝土框架结构时,未考虑罕遇地震作用的弊端;可以避免文献[4]中使用十字形截面屈曲约束支撑加固建筑结构时,使用范围受限的局限性;能够改变文献[5]中采用伸臂桁架加固建筑结构时,未考虑建筑结构的屈曲约束支撑力的影响,伸臂桁架与建筑结构的连接不牢固,导致其对建筑结构的很抗震加固性能较差的问题,因此被广泛地应用在建筑结构抗震

加固工程中。本文采用屈曲约束支撑对建筑结构进行抗震加固,并分析屈曲约束支撑对建筑结构抗震加固性能的影响。

1 屈曲约束支撑对建筑结构抗震加固性能的影响分析

1.1 建筑结构抗震加固方案

由于屈曲约束支撑加固方案具有布置灵活、操作简单、工期短,抗震加固效果好的优点^[6],因此在对建筑结构实施抗震加固时采用屈曲约束支撑加固方案,避免出现底层钢筋混凝土框架同上层砌体墙刚度差异较大的现象,屈曲约束支撑由外围约束构件与核心构件共同组成。以建筑结构功能正常使用为基础,屈曲约束支撑在建筑结构中的部位选取应以能够最大程度发挥其耗能作用为前提。屈曲约束支撑结构框架示意图如图 1 所示。

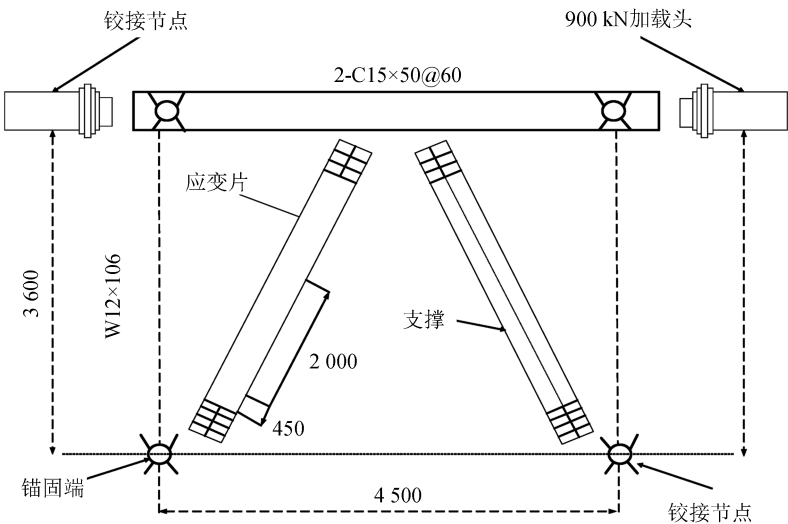


图 1 屈曲约束支撑结构框架示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of the structure with buckling-restrained brace (Unit:mm)

当建筑结构受地震作用影响时,屈曲约束支撑材料承受的力为轴向力^[7],该承受力的运算式为:

$$M = \varphi Q_{\text{ysc}}$$

(1)

式中: M 、 φ 和 Q_{ysc} 分别表示屈曲约束支撑材料设计承载力、强度储备系数和屈曲约束支撑材料真实承载力。其中, φ 通常取值 0.9, $Q_{\text{ysc}} = G_{\text{ysc}} S_{\text{sc}}$, G_{ysc} 和 S_{sc} 分别表示材料屈服应力和材料的静截面面积。

以我国某市的建筑结构为研究对象,该建筑结构中采用 12 根屈曲约束支撑,支撑承载力分别设计成 800 kN、1 000 kN、1 200 kN,详细力学性能参数如表 1 所列。

表 1 建筑结构屈曲约束支撑力学性能参数

Table 1 Mechanical parameters for buckling-restrained braces of the building structure

屈曲约束支撑类型	BRB-1	BRB-2	BRB-3
屈曲约束支撑外观宽度 B/mm	160	220	220
屈曲约束支撑外观高度 H/mm	160	220	220
屈曲约束支撑外观长度 L/mm	3 800	4 200	4 900
设计承载力/kN	800	1 000	1 200
数量	8	2	2

实验对象建筑结构的底层钢筋混凝土框架内所使用的屈曲约束支撑包含两种,分别是单斜形屈曲约束支撑和认字形屈曲约束支撑^[8]。屈曲约束支撑的两端分别同框架柱节点出和框架梁相连,于框架节点及梁下端配置牛腿,利用高强螺栓节点经由连接钢板实现屈曲约束支撑与建筑结构的铰接固定,在该种建筑结构屈曲约束支撑加固方案的基础上,分析屈曲约束支撑对其抗震加固性能影响。

1.2 屈曲约束支撑对其抗震加固性能影响的分析

1.2.1 支撑变形同建筑结构层间位移的关系

受地震作用,建筑结构形成剪切变形的过程中,屈曲约束支撑随之形成轴向变形现象,通过刚度等截面确定屈曲约束支撑弹性的依据是屈曲约束支撑为变截面杆件^[9]。采用式(2)描述等效屈曲约束支撑的轴向变形与轴力间的力学相关性:

$$F_b = \frac{M \times L}{RS}$$

(2)

式中: F_b 、 R 、 S 和 L 分别表示表示屈曲约束支撑轴向变形、外围钢套管的弹性模量、核心构建的截面面积和屈曲约束支撑长度。

通过式(3)描述屈曲约束支撑的轴向变形与建筑结构层间水平位移间的几何相关性:

$$F_b = \Delta \cos \beta$$

(3)

式中: β 表示地震影响系数。

分解 F_b 得到节点连接部位的变形与屈曲约束

支撑的变形,以刚度为依据分配得到的两种变形。上述过程可得到建筑结构屈曲约束支撑的变形方程式如下:

$$F_r = F_b \cdot \frac{j_b}{j_b + j_d}$$

(4)

式中: j_b 和 j_d 分别表示节点连接部位的变形和屈曲约束支撑的变形。

1.2.2 建筑结构支撑承载力分析

设计建筑结构屈曲约束支撑时,按照情况的差异将屈曲约束支撑的承载力分为设计承载力、屈服承载力和极限承载力^[10]。

设计承载力的主要作用是验算静力荷载和分析小震状态,其本质为弹性承载力,表达式为:

$$M_b = 0.9 f_y S_1$$

(5)

式中: M_b 、 f_y 和 S_1 分别表示屈曲约束支撑的设计承载力、屈曲约束支撑钢材的屈服强度标准值和约束屈服段钢材截面面积。

分析建筑结构支撑承载力时通常首先计算一个屈曲约束支撑的截面面积和屈曲约束支撑材料;其次,以计算结果为基础判断屈曲约束支撑的屈服承载力和设计承载力。分析过程中用 S_e 表示一个截面,弹性分析其二力杆,通过对比轴力包络最大值同屈曲约束支撑的设计承载力实现屈曲约束支撑自身的验算,弹性达标的依据为屈曲约束支撑的设计承载力大于轴力最大值^[11]。

屈服承载力的主要作用是分析屈曲约束支撑的弹塑性^[12],其本质为第一次进入屈服的轴向力,计算公式如下:

$$M_{by} = \gamma_y f_y S_1$$

(6)

式中: M_{by} 和 γ_y 分别表示屈曲约束支撑的屈服承载力和屈曲约束支撑钢材的超强系数。

由于受地震影响,屈曲约束支撑材料拉压屈服形成应变强化效应,因此屈曲约束支撑的极限承载力为:

$$M_{bu} = \omega M_{by}$$

(7)

式中: M_{bu} 和 ω 分别表示屈曲约束支撑的极限承载力和应变强化调整系数。

1.2.3 多遇地震影响下屈曲约束支撑框架的位移验算

利用屈曲约束征程的等效线性化获取其等效阻尼与等效刚度,在此基础上,通过底部剪力法、振型分解反应谱法和弹性力学方法等获取建筑结构屈曲约束支撑的地震影响、内力和变形^[13]。受多遇地震影响,建筑结构屈曲约束支撑的最大层间弹性位移要求如下:

$$\Delta i_e \leq [\delta_e]h \tag{8}$$

式中： δ_e 和 h 分别表示层间弹性位移角限值和建筑建构楼层层高。其中 δ_e 值可参照普通钢筋混凝土结构的弹性层间位移限值。

弹性分析过程中,为提升建筑结构的实用性能与性价比,应设置屈曲约束支撑承受的层剪力大于等于总层剪力的某比例^[14],公式描述如下:

$$C_b \geq \varphi C \tag{9}$$

式中: C_b 、 φ 和 C 分别表示屈曲约束支撑承受的层剪力、屈曲约束支撑承受的层剪力同总层剪力的比例系数和屈曲约束支撑的总层剪力。其中 φ 的取值范围通常是 0.4 ~ 0.6,依照受罕遇地震影响的弹塑性位移验算结果变换 φ 值,最大程度地展现受罕遇地震影响时,屈曲约束支撑良好的抗倒塌性能。

1.2.4 罕遇地震影响下屈曲约束支撑的弹塑性位移验算

当前,在确定建筑结构屈曲约束支撑薄弱层弹塑性间位移时缺乏较为适用的简易方程式,因此依照相关规定,需通过非线性时程分析方法验算罕遇地震影响下,建筑结构屈曲约束支撑薄弱层的弹塑性位移。验算过程中,通过屈曲约束支撑的恢复力模型计算屈曲约束支撑对建筑结构的有效刚度与阻

尼比^[15]。

受罕遇地震影响时,式(10) 描述了建筑结构屈曲约束支撑薄弱层弹塑性间位移条件:

$$\Delta i_p \leq [\delta_p]H \tag{10}$$

式(中: δ_p 和 H 分别表示层间弹塑性位移角限值和屈曲约束支撑薄弱层层高。其中,根据屈曲约束支撑结构, δ_p 可取值为 1/80。

2 实验分析

实验采用本文方法分析某建筑结构的屈曲约束支撑对建筑结构的抗震加固性能,分别从结构自振特性、楼层刚度比、层间位移角和顶点位移时程曲线分析等方面对比建筑结构无加入屈曲约束支撑条件下的抗震性能影响情况,详细分析结果如下所述。

2.1 分析结构自振特性的影响

实验采用 12 阶振型实施建筑结构自振特性影响分析,对比建筑结构无屈曲约束支撑和加入屈曲约束支撑条件下,前三阶振型的周期与质量参与系数,结果如表 2 所列。表中的 X 表示 X 方向平动, Y 表示 Y 方向平动, R_z 表示扭转质量参与系数。第一阶周期 T_1 为平动周期,其变化到第三阶周期 T_3 后开始发生扭转,则 T_3 是第一扭转周期。

表 2 建筑结构自振周期与质量参与系数对比结果

Table 2 Comparison between natural periods and mass participation coefficients of building structures with and without buckling-restrained braces

振型	第一阶 $T_1/s (X+Y+R_z)$	第二阶 $T_2/s (X+Y+R_z)$	第三阶 $T_3/s (X+Y+R_z)$	周期比 T_3/T_1
无屈曲约束支撑的建筑结构	0.533 (0.80+0.00+0.18)	0.532(0.00+0.98+0.00)	0.486(0.17+0.00+0.80)	0.91
加入屈曲约束支撑的建筑结构	0.336 (0.86+0.00+0.00)	0.330(0.00+0.90+0.00)	0.260(0.00+0.00+0.70)	0.77
周期特征	X 方向平动	Y 方向平动	扭转	-

分析表 2 得到,建筑结构无屈曲约束支撑条件下和加入屈曲约束支撑条件下,第一扭转周期 T_3 同第一平动周期 T_1 的比值分别是 0.91 和 0.77,降低了 0.14,说明建筑结构的加入屈曲约束支撑可使建筑结构的扭转效应下降,抗震性能提高。建筑结构无屈曲约束支撑条件下的自振周期大于加入屈曲约束支撑后结构的自振周期,主要原因在于屈曲约束支撑能够提升建筑结构抗侧刚度以降低建筑结构的自振周期。

2.2 对楼层刚度比的影响分析

受水平地震影响,建筑结构无屈曲约束支撑和加入屈曲约束支撑条件下,不同层的刚度分布结果和层砌体墙同建筑结构刚度比值如图 2 和表 3 所示。

研究图 2 可得,建筑结构中加入屈曲约束支撑可提升建筑结构抗侧刚度,降低楼层刚度。分析表

3 得出,建筑结构无屈曲约束支撑的条件下, X 方向砌体墙同建筑结构的刚度比值是 8.7, Y 方向砌体墙同建筑结构的刚度比值是 9.8。加入屈曲约束支撑后, X 方向和 Y 方向的砌体墙同建筑结构的刚度比值分别下降了 6.9 和 8.0。同时加入屈曲约束支撑后砌体墙同建筑结构的刚度比值与相关规定中建筑结构 X 、 Y 方向砌体墙同建筑结构的刚度比值大于等于 1 且小于等于 2 的条件相符。从该表中还可以看出,无屈曲约束支撑时建筑结构 X 、 Y 方向都是薄弱层,而加入屈曲约束支撑后建筑的 X 、 Y 方向都不是薄弱层,建筑抗震性能大大提升。实验结果表明,建筑结构中加入屈曲约束支撑可降低楼层刚度,防止建筑结构出现薄弱层。

2.3 分析层间位移角的影响

通过图3描述受水平地震影响后,实验建筑结

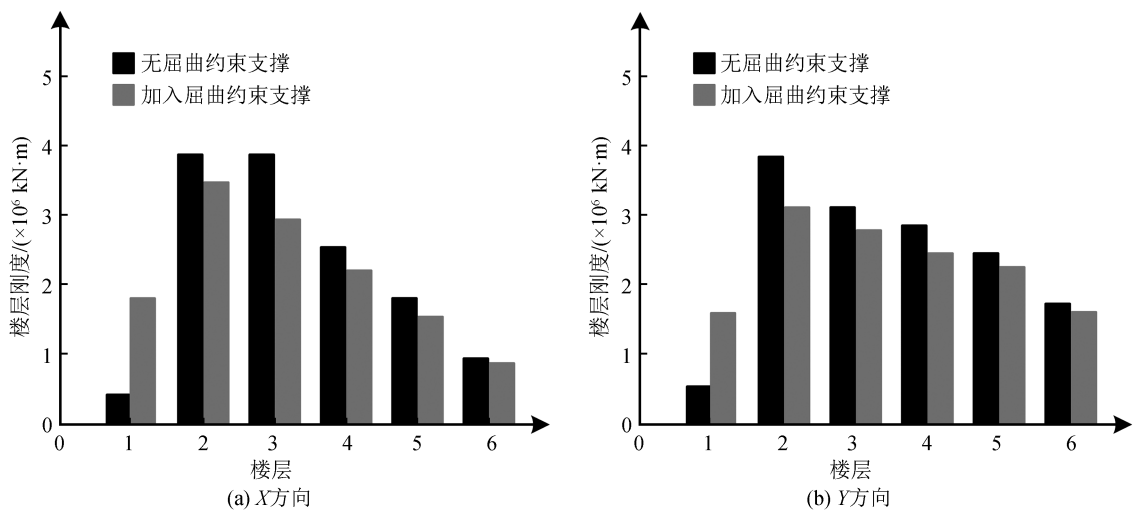


图 2 建筑结构不同楼层的刚度分布情况

Fig.2 Stiffness distribution of different floors of building structure

表 3 层砌体墙同建筑结构刚度比值

Table 3 Values of stiffness ratio of masonry wall to the building structure		无屈曲约束支撑条件下	加入屈曲约束支撑条件下
刚度比	X 方向	8.7	1.8
	Y 方向	9.8	1.8
是否为薄弱层	X 方向	是	否
	Y 方向	是	否

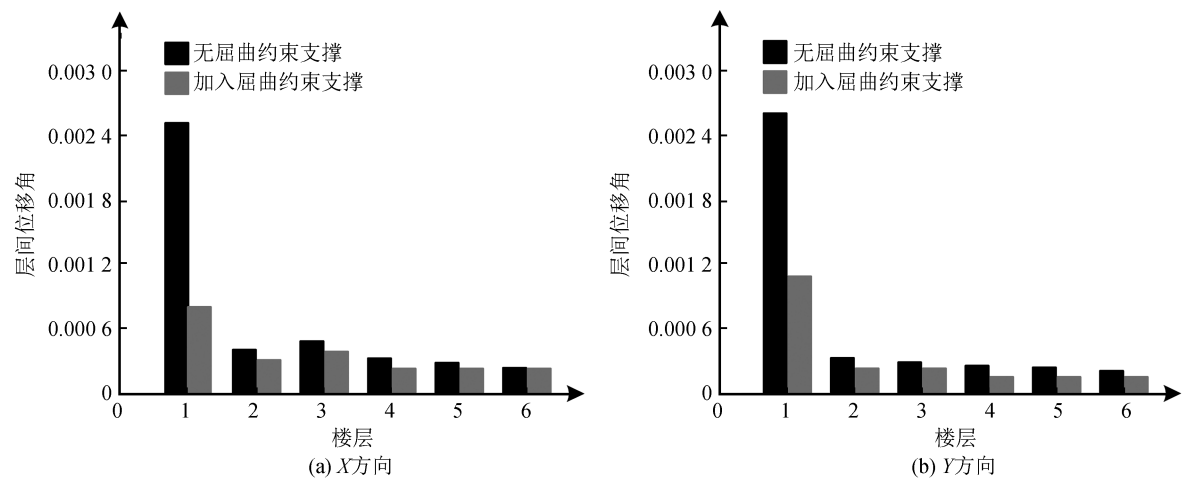


图 3 建筑结构楼层层间位移角

Fig.3 Story drift of different floors of the building structure

构无屈曲约束支撑和加入屈曲约束支撑条件下的层间位移角情况。

研究图 3 得出,建筑结构无屈曲约束支撑条件下 X 方向的最大层间位移出现在建筑结构的最底层,最大层间位移角为 0.002 6;Y 方向的最大层间位移也出现在建筑结构的最底层,最大层间位移角为 0.002 6。而加入屈曲约束支撑后,X 方向的最大层间位移角为 0.000 826,Y 方向的最大层间位移角

为 0.001 1,远远低于比无屈曲约束支撑调节下的最大层间位移。并且加入屈曲约束支撑后建筑 2~6 层的层间位移角均低于无屈曲约束支撑的建筑层间位移角。而在建筑结构抗震性能的相关规定中,对于层间位移角的相关要求是小于等于 0.001 8,因此可以看出无屈曲约束支撑的建筑结构不符合规定要求,而加入屈曲约束支撑后的建筑结构层间位移角符合规定要求。实验结果表明,建筑结构中加入屈

曲约束支撑可降低建筑结构的层间位移角,实现抗震加固功能。

2.4 分析顶点位移时程曲线的影响

图4描述的是受多遇地震影响,建筑结构无屈

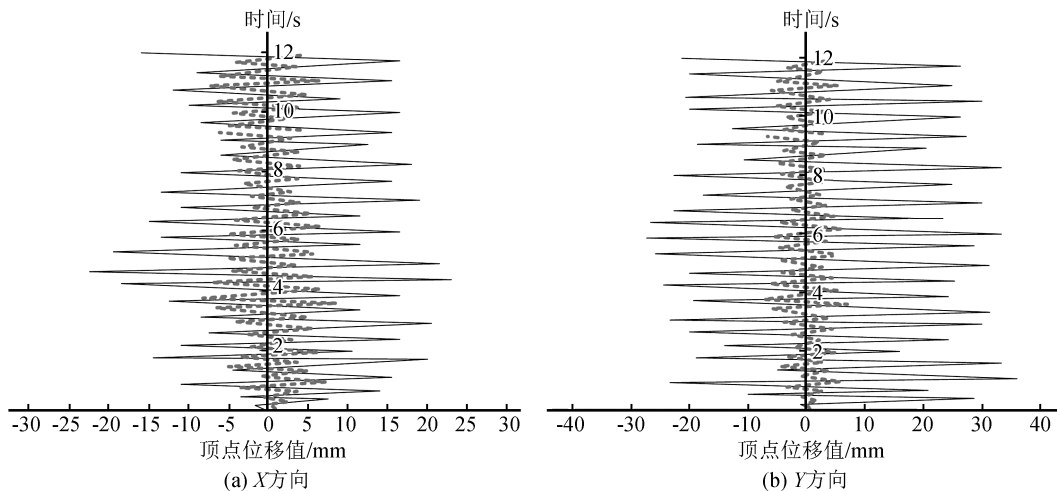


图4 受多遇地震影响建筑结构顶点位移时程曲线

Fig.4 Vertex displacement time-history curves of the building structure under frequent earthquakes

通过图4能够明显得出,受多遇地震影响,无屈曲约束支撑的建筑结构,其X方向的最大顶点位移达到23.8 mm,Y方向的最大顶点位移达到37.2 mm;加入屈曲约束支撑的建筑结构,其X方向的最大顶点位移为8.4 mm,Y方向的最大顶点位移为7.9 mm。加入屈曲约束支撑后建筑结构两个方向的最大顶点位移均小于无屈曲约束支撑的建筑结构的最大顶点位移。实验结果表明,多遇地震中屈曲约束支撑可降低建筑结构的最大顶点位移,实现建筑结构的抗震加固。

3 结论

本文利用屈曲约束支撑对我国某市的建筑结构实施抗震加固,分析屈曲约束支撑对建筑结构的抗震加固性能,获取的结果如下:

(1) 在建筑结构中加入屈曲约束支撑能够使建筑结构的扭转效应下降,提升建筑结构的抗侧刚度以降低建筑结构的自振周期。

(2) 建筑结构中加入屈曲约束支撑后,两个方向的砌体墙同建筑结构的刚度比值分别下降了6.9和8.0,说明屈曲约束支撑能够降低楼层刚度,防止建筑结构出现薄弱层。

(3) 建筑结构无屈曲约束支撑时,两个方向的最大层间位移角均大于1/550,加入屈曲约束支撑后,两个方向的最大层间位移角均小于1/550,表明

曲约束支撑和加入屈曲约束支撑条件下的顶点位移情况。图中的深色实线和浅色虚线分别表示无屈曲约束支撑和加入屈曲约束支撑条件下的顶点位移时程曲线。

屈曲约束支撑能够降低建筑结构的层间位移角。

(4) 受多遇地震影响,建筑架构加入屈曲约束支撑后X、Y两个方向的最大顶点位移值分别降低了15.4 mm和29.3 mm,说明屈曲约束支撑能够降低建筑结构的最大顶点位移,提高建筑结构的抗震加固性能。

鉴于论文篇幅所限,完成时间有限,有关详细的技术环节恕在此不做更多详述,有兴趣的读者可与作者联系讨论。作者水平有限,文中遗漏之处及错误难免,望阅者给予批评指正。

参考文献(References)

- [1] 张国伟,陈鹏,陈博珊,等.屈曲约束支撑钢框架的抗震性能分析[J].工程抗震与加固改造,2016,38(2):86-93.
ZHANG Guowei, CHEN Peng, CHEN Boshan, et al. Seismic Performance Analysis of Buckling Restrained Brace Steel Frame[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(2): 86-93.
- [2] 高祥,李幅昌,王纪元,等.基于节点性能的屈曲约束支撑混凝土框架抗震性能分析[J].工业建筑,2017,47(3):7-11.
GAO Xiang, LI Guochang, WANG Jiyuan, et al. Aseismic Performance of Buckling Restrained Brace Concrete Frame Based on the Performance of the Brace Joint[J]. Industrial Construction, 2017, 47(3): 7-11.
- [3] 徐帅,高向宇,吴军,等.附加减震钢框架的加固混凝土框架结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(8):25-34.
XU Shuai, GAO Xiangyu, WU Jun, et al. Seismic Behavior of

- Concrete Frames Retrofitted with Externally Added Seismic Reductional Steel Frames[J].Journal of Building Structures, 2017,38(8):25-34.
- [4] 郭立行,吴京.铸造十字形截面屈曲约束支撑的抗震性能试验研究[J].建筑钢结构进展,2016,18(3):10-17.
- GUO Lihang, WU Jing. Experimental Study on the Seismic Performance of Casting Cruciform-Shaped Buckling-Restrained Brace[J].Progress in Steel Building Structures, 2016,18(3):10-17.
- [5] 周颖,李宏描,邢丽丽.混合控制消能减震伸臂桁架上海中心抗震性能研究[J].振动与冲击,2016,35(21):188-195.
- ZHOU Ying, LI Hongmiao, XING Lili. Aseismic Performance of Shanghai Center with Hybrid Control Energy Dissipation Outriggers[J].Journal of Vibration and Shock, 2016,35(21):188-195.
- [6] 吴克川,陶忠,胡大柱,等.某中学教学楼屈曲约束支撑加固施工技术研究[J].施工技术,2015,44(16):8-11.
- WU Kechuan, TAO Zhong, HU Dazhu, et al. Construction Technology Research to Seismic Reinforcement with Buckling Restrained Braces of a Middle School[J].Construction Technology, 2015,44(16):8-11.
- [7] VEISMORADI S, AMIRI G G, DARVISHAN E. Probabilistic Seismic Assessment of Buckling Restrained Braces and Yielding Brace Systems[J].International Journal of Steel Structures, 2016,16(3):831-843.
- [8] 郑晓芬,孙汇涓,汪英俊,等.屈曲约束支撑-不规则混凝土结构体系的弹塑性地震反应分析[J].结构工程师,2016,32(4):139-146.
- ZHENG Xiaofen, SUN Huijuan, WANG Yingjun, et al. Elastoplastic Seismic Response Analysis of an Asymmetric-plan Reinforced Concrete Frame with Buckling-restrained Braces[J].Structural Engineers, 2016,32(4):139-146.
- [9] 刘国银.屈曲约束支撑在深圳第二高级技校抗震加固工程中的应用[J].工业建筑,2017,47(1):180-183.
- LIU Guoyin. Application of Buckling Restrained Braces in Aseismic Retrofitting Project of Shenzhen Second Senior Technical School[J].Industrial Construction, 2017,47(1):180-183.
- [10] 朱飞飞,肖亚明.屈曲约束支撑在钢框架办公楼抗震加固中的应用[J].工程抗震与加固改造,2016,38(6):96-101.
- ZHU Feifei, XIAO Yaming. Application of BRBs in Seismic Reinforcement of Steel Frame Structure Office Building[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016,38(6):96-101.
- [11] 丁声荣,霍艳华.混凝土结构建筑物抗震加固强度测试仿真[J].计算机仿真,2017,34(8):429-432.
- DING Sheng-rong, HUO Yan-hua. Strength Test and Simulation of Seismic Strengthening of Concrete Structures[J].Computer Simulation, 2017,34(8):429-432.
- [12] 陆烜.屈曲约束支撑在某混凝土结构薄弱层中的应用[J].建筑钢结构进展,2015,17(3):47-56.
- LU Xuan. The Application of Buckling Restrained Braces in a Concrete Structure with Weak Story[J].Progress in Steel Building Structures, 2015,17(3):47-56.
- [13] 贺强,文艳芳,苏三庆.带屈曲约束支撑的 V 型偏心支撑钢框架抗震性能分析[J].钢结构,2016,31(6):18-22.
- HE Qiang, WEN Yanfang, SU Sanqing. Seismic Performance Analysis of V-shaped Eccentrically Braced Frames with Buckling-restrained Braces[J].Steel Construction, 2016,31(6):18-22.
- [14] 杨家琦,杨超,郁银泉.基于能量的不同类型耗能支撑对钢框架抗震性能的影响[J].建筑结构学报,2016,37(7):105-113.
- YANG Jiaqi, YANG Chao, YU Yinquan. Energy-based Study on Seismic Performance of Steel Frame with Different Types of Energy Dissipating Braces[J].Journal of Building Structures, 2016,37(7):105-113.
- [15] EATHERTON M R, FAHNESTOCK L A, MILLER D J. Computational Study of Self-Centering Buckling-Restrained Braced Frame Seismic Performance[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014,43(13):1897-1914.