

高层钢结构中 BRC 撬动技术的减震影响分析

谭燕秋,王颖欣

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;)

摘要:利用有限元分析软件 SPA2000,建立 12 层的钢框架结构,在原框架底层柱 X 方向、Y 方向添加 BRC 结构。分析三种结构方案在 EL-Centro 波、Taft 波和 TRI_TREASURE ISLAND_90 这三种地震波作用下的顶层最大位移、基底剪力和顶层绝对加速度时程分析这几种结构反应。结果表明:BRC 结构与传统钢结构相比,自振周期有所增加,对顶层最大位移和基底剪力的控制效果非常明显,具有显著的减震效果。

关键词:自回复;撬动;屈曲约束柱;时程分析;减震性能

中图分类号:TU973+.212

文献标识码:A

Damping effect analysis of high-rise steel structure with buckling-restrained column

TAN Yan-qiu, WANG Ying-xin

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: By using finite element analysis software SPA2000, 12 layers of steel frame structure were set up. In X direction and Y direction of original framework bottom column, BRC structure was constructed. The top maximum displacement, base shear and top absolute acceleration time history of three structure scheme under the action of seismic wave as follow EL-Centro wave, Taft wave and TRI_TREASURE ISLAND_90 were analyzed. The results show that comparing with the traditional steel structure, the natural vibration period of BRC structure increased. The control effect of top floor of the maximum displacement and basal shear control is very apparent. This structure has obvious damping effect.

Key words: self-centering; rocking; buckling constraint in; time history analysis; damping performance

撬动减震技术是允许上部结构和下部基础脱离,通过上部结构的晃动来隔震的一个新颖的减震设计概念,一般用于钢框架结构减震设计中。撬动减震技术由于抗震性能好、基础构造简化、经济效果明显这些优点,在国际上已成为工程抗震领域一个新的研究热点^[1-4]。我国针对建筑结构撬动减震的研究刚刚起步,孙飞飞等^[5]研究了自回复撬动结构的自回复性能;杨芳等^[6]则对 BRC 撬动减震技术的影响方面进行深入的研究。本文通过一个 12 层钢结构框架算例在地震波作用下

的顶层最大位移、基底剪力和顶层绝对加速度时程这几种结构反应分析,得到 BRC 撬动结构对于高层钢框架结构减震的主要影响方面。

1 屈曲约束柱 BRC 模型的建立

1.1 BRC 的减震原理

自回复撬动减震结构的撬动是通过自回复撬动减震柱柱底的抬起和闭合来实现。本文采用屈曲约束柱(BRC)作为自回复撬动减震底柱。屈曲

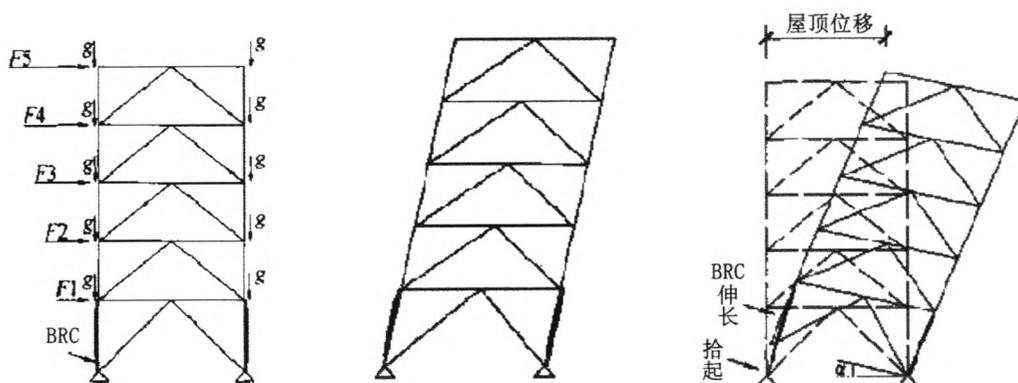


图1 跷动结构示意图

Fig.1 Rocking structural diagram

约束柱(Buckling Restrained Column,简称 BRC) 跷动减震技术是将屈曲约束支撑用作底层柱,大震作用时的竖向拔力将使屈曲约束柱产生较大的变形,产生跷动,同时其优异的滞回耗能又可作为被动控制构件耗散地震输入的能量。根据能力设计的概念,可以将这些屈曲约束柱作为可牺牲构件,并且这种可牺牲构件在破坏或具有较大的残余变形后,还可以被替换,使结构恢复到震前的状态。图1为跷动结构示意图。

1.2 BRC 结构模型的建立

本文对 BRC 跷动结构采用杆系模型,即采用梁单元模拟框架梁、柱。由于跷动结构的塑性变形主要集中在跷动发生处,对于上部结构,假设全部处于弹性状态。BRC 主要承受轴力,与支撑的受力方式接近,可以采用 SAP2000 中的纤维铰模型:在支撑截面的面积上,将截面划分为若干等分,每一个区域都用一个纤维表示(图2),纤维设置在划分区域的几何中心,面积与划分区域相等。

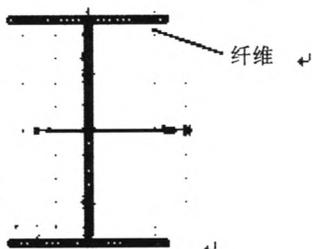


图2 BRC结构的模拟

Fig.2 BRC structure simulation

本文用两个单元分别模拟重力柱和 BRC。建模时,在同一几何位置建立两个单元,一个定义为 BRC,两端采用铰接,另一个定义为重力柱,柱底设置多线性支座,如图3所示。

2 结构模型

2.1 基本数据

选取一个 12 层的纯钢框架结构,建筑总高度 36.3 m,共 12 层,首层层高 3.3 m,2~12 层层高 3 m,室内外高差为 0.3 m,结构平面布置图见图 4。主要构件见表 1。

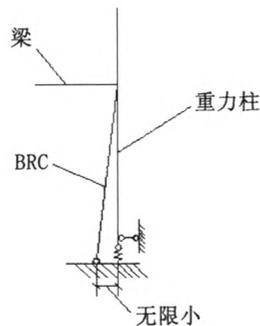


图3 BRC结构与框架结构的连接

Fig.3 The connection of BRC Structure and framework

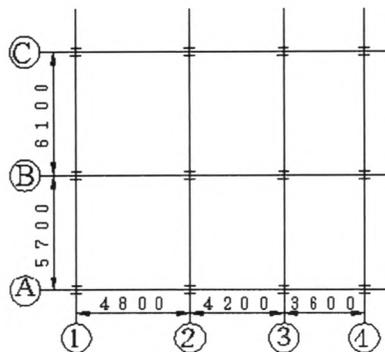


图4 结构平面布置图

Fig.4 Structure layout graph

表 1 主要构件表
Tab.1 Main components

构件	截面 /mm	材料
次梁	300 150 6.5 9	Q345
主梁	500 200 10 16	Q345
上柱	400 400 13 21	Q345
下柱	500 450 16 25	Q345
BRC 支撑	300 150 6.5 9	Q345

2.2 方案布置

方案 1: 12 层纯框架钢结构体系, 为未控结构; 方案 2: 以方案 1 为原型, 在原结构的底层柱上的 X 方向设置 BRC 支撑; 方案 3: 在原结构的底层柱上设置 Y 方向的 BRC 支撑。

本文选取三个地震记录典型的 II、III 类场地上的地震记录(EL - Centro 波和 Taft 波) 以及对结构响应最大的 IV 类场地的 TRI_TREASURE ISLAND_90 波进行分析, 其中 EL - Centro 波峰值为 341.7 cm/s, Taft 波峰值为 152.7 cm/s, TRI_TREASUREISLAND_90 峰值为 155 cm/s。

3 计算结果分析

3.1 动力特性分析

本例采取模态分析里的 Ritz 向量法。由模态

分析, 整理方案前 6 阶模态的自振周期, 结果见表 2。由表 2 知, 方案 2、方案 3 比方案 1 的自振周期有一定的增大, 但增大幅度并不是特别明显。虽然屈曲约束柱也会使结构的刚度有所增加, 但 BRC 减震结构主要是通过结构撬动消耗地震能, 所以一定会比原结构的自振周期有所增大。

表 2 前 6 阶模态的自振周期

Tab.2 The natural vibration period of anterior 6 step modal

模态	方案 1	方案 2	方案 3
1	2.567 696	2.646 931	2.975 199
2	1.991 093	2.368 392	2.116 521
3	1.868 351	1.960 247	1.887 883
4	0.875 916	0.865 856	0.975 064
5	0.662 568	0.741 611	0.657 714
6	0.504 867	0.629 209	0.632 329

3.2 结构地震响应分析

3.2.1 顶层最大位移和基底剪力

由于方案 2、方案 3 的区别在于底层屈曲柱分别安置在原结构底层的 X 方向和 Y 方向, 因此, 本文通过软件的模拟让 EL - Centro 波、Taft 波和 TRI_TREASUREISLAND_90 分别从 X 方向、Y 方向这两种情况下通过三种结构方案, 得到的地震响应分析的数据如下:

表 3 从横向通过地震波的基底剪力和顶层最大位移(X 方向)

Tab.3 The base shear and top of the maximum displacement when transverse seismic go through structure(X direction)

结构方案	基底剪力 /kN			顶层最大位移 /mm		
	Taft	EL - Centro	TRI_TREASUR EISLAND_90	Taft	EL - Centro	TRI_TREASU REISLAND_90
方案 1	1061	3042	3450	56.09	126.7	192.9
方案 2	996.5	3274	3410	51.19	212.3	218.8
方案 3	1338	2983	3858	54.25	156.2	204.3

表 4 从横向通过地震波的基底剪力和顶层最大位移(Y 方向)

Tab.4 The base shear and top of the maximum displacement when transverse seismic go through structure(Y direction)

结构方案	基底剪力 /kN			顶层最大位移 /mm		
	Taft	EL - Centro	TRI_TREASUR EISLAND_90	Taft	EL - Centro	TRI_TREASU REISLAND_90
方案 1	211.2	380.9	170.6	2.464	7.827	7.287
方案 2	17.11	27.07	15.54	1.57	5.12	6.809
方案 3	7.905	15.22	13.32	2.422	6.698	7.946

表5 从纵向通过地震波的基底剪力和顶层最大位移(X方向)

Tab.5 The base shear and top of the maximum displacement when longitudinal seismic go through structure(X direction)

结构方案	基底剪力 /kN			顶层最大位移 /mm		
	Taft	EL - Centro	TRI_TREASUR EISLAND_90	Taft	EL - Centro	TRI_TREASU REISLAND_90
方案1	240.9	532.4	174.8	4.343	15.46	18.22
方案2	17.1	38.15	15.26	4.081	16.46	18.52
方案3	21.72	45.42	13.86	3.194	9.991	12.19

表6 从纵向通过地震波的基底剪力和顶层最大位移(Y方向)

Tab.6 The base shear and top of the maximum displacement when longitudinal seismic go through structure(Y direction)

结构方案	基底剪力 /kN			顶层最大位移 /mm		
	Taft	EL - Centro	TRI_TREASUR EISLAND_90	Taft	EL - Centro	TRI_TREASU REISLAND_90
方案1	909.6	2928	2764	52.67	247.1	222.3
方案2	1051	2696	2570	63.44	253.6	234.1
方案3	751.5	2155	1917	64.54	222.8	213.3

情况一:当地震波横向通过时,由表3和表4中的数据可知,在X方向,方案2、3的基底剪力和顶层最大位移和普通结构相差不大。而在Y方向,方案2在TAFT波、EL - Centro波和TRI_TREASUREISL_90波作用下基底剪力的控制效果分别为91.9%、92.9%和90.9%,顶层最大位移的控制效果则分别为36.3%、34.6%和6.6%;方案3基底剪力的控制效果为96.3%、96%和92.2%,顶层最大位移的控制效果明显。这表明,当地震波从横向通过结构时,在结构X方向安装BRC对地震有很好的控制作用,在Y方向安装BRC对基底剪力有很好的控制效果,而顶层位移的控制效果则与普通结构无太大区别。

情况二:对于从纵向通过的地震波,由表5和表6中的数据可知,在X方向,方案2在TAFT波、EL - Centro波和TRI_TREASUREISL_90波作用下基底剪力的控制效果分别为92.9%、92.8%和91.3%,顶层最大位移的控制效果与原结构相差无几;方案3在三种波的作用下基底剪力的控制效果为91%、91.5%和92%,顶层最大位移的控制效果为26.5%、35.4%和33.1%。而在Y方向,方案2的减震效果并不明显;方案3基底剪力控制效果为17.4%、26.4%和30.6%,顶层最大位移控制效果与普通结构无异。这表明,当地震波纵向通过时,在结构X方向安装BRC可以起到一定的减震效果,而在Y方向安装BRC结构的减震效果非常明显。

综合以上两种情况,当地震波从结构纵向通过结构时,是最理想的应用BRC结构的条件;当

地震波横向通过结构,也可以通过安装BRC对结构起到减震作用。

3.2.2 顶层绝对加速度时程曲线比较

为了更好的比较三种布置BRC的方案,下面给出布置BRC的方案与未控结构的顶层绝对加速度时程曲线图,这里只讨论在纵向地震波作用下的三种方案顶层绝对加速度的时程曲线比较。结构的顶层最大加速度见下表9。由表中的数据得知,在Taft波的作用下方案2使结构的顶层最大加速度比原结构降低了67.2%,方案3为59.8%;在EL - Centro波的作用下,方案2比原结构的顶层最大加速度降低69.2%,方案3降低48.0%。在TRI_TREASUREISLAND_90波的作用下,方案2的顶层最大加速度比原结构减少了27.0%,方案3减少了8.3%。

表7 纵向地震波作用下的顶层最大绝对加速度

Tab.7 The top of the maximum absolute acceleration under the action of vertical seismic wave m/s^2

结构方案	Taft	EL - Centro	TRI_TREASU REISLAND_90
方案1	0.338	0.648	0.218
方案2	0.111	0.199	0.159
方案3	0.136	0.337	0.200

结合顶层绝对加速度的对比图(图5~7),不难看出在Taft地震波从纵向通过结构时,方案2对结构的顶层最大加速度控制效果最好;在EL - Centro波从纵向通过结构时,方案3对顶层最大加速度的控制效果好;而在TRI_TREASUREISLAND_90波作用下结构的顶层最大加速度控制作用不明显。

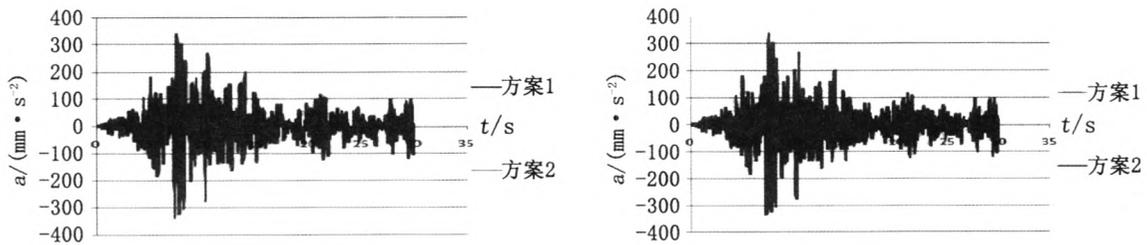


图5 Taft波作用下顶层绝对加速度对比图

Fig.5 Top absolute acceleration contrast diagram under the action of Taft wave

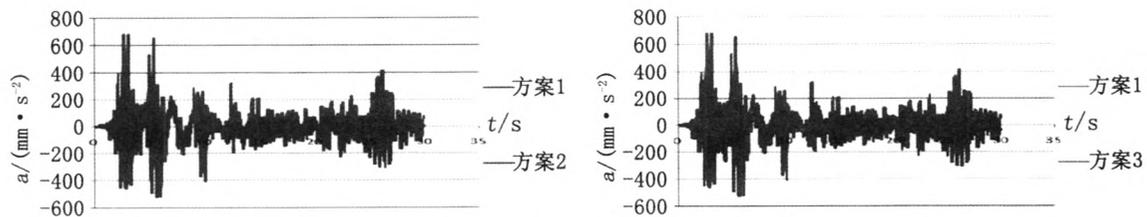


图6 EL-Centro波作用下顶层绝对加速度对比图

Fig.6 Top absolute acceleration contrast diagram under the action of EL-Centro wave

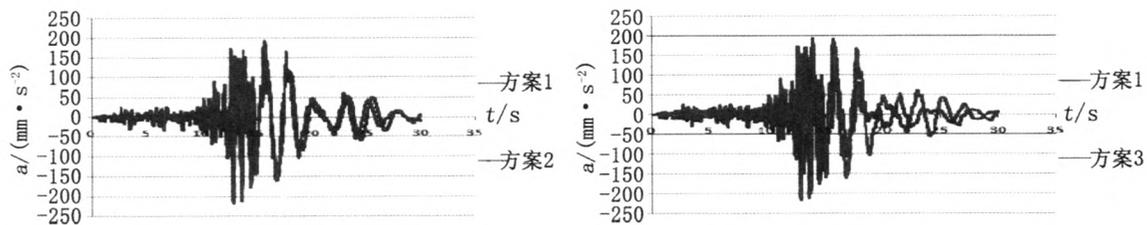


图7 TRI_TREASUREISLAND_90波作用下顶层绝对加速度对比图

Fig.7 Top absolute acceleration contrast diagram under the action of TRI_TREASUREISLAND_90 wave

4 结论

1) BRC 结构比传统钢框架结构的自振周期有所增加。

2) 通过三种结构在三种地震波下的地震响应分析, BRC 结构比传统的钢框架结构在减小地震能方面有显著优势, 但对 BRC 在底层柱的布置方向存在着一定要求。

3) 若结构任意方向布置 BRC, 地震波沿结构平面边长较短的一面传来时的减震效果优于沿结构平面边长较长的方向传播的地震波; 若地震波的方向未知, 在结构设计时, 尽量把 BRC 布置在底层柱数目的方向; 能够使 BRC 结构减震最大化的情况是, BRC 沿结构底层柱数目的方向布置, 而地震波方向垂直于 BRC 布置方向传播。

参考文献:

[1] 谭燕秋, 甄晓慧, 史三元. 双层柱面网壳结构在 BRB

作用下的减震分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2012, 30(1): 57-62.

[2] 石怀荣, 胡娟. 叉车减震垫检测机构动力学性能优化的设计研究[J]. 河北科技大学学报, 2011, 32(4): 54-57.

[3] 刘建彬. 防屈曲支撑及防屈曲支撑钢框架设计理论研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.

[4] 郭彦林, 刘建彬, 蔡益燕, 等. 结构的耗能减震与防屈曲支撑[J]. 建筑结构, 2005, 35(8): 18-23.

[5] 孙飞飞, 曹鹤. 自回复跳动减震结构地震反应分析[J]. 土木工程学报, 2011, 43: 413-422.

[6] 杨芳, 孙飞飞. 重力对屈曲约束柱跳动减震技术的影响[J]. 建筑钢结构进展, 2011, 4(13): 57-64.

(责任编辑 马立)