

屈曲约束支撑框架-核心筒混合结构抗震性能

李帼昌,王柄捷,杨志坚,徐丽,高祥

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究屈曲约束支撑在超高层混凝土结构中的适用性,分析有无屈曲约束支撑的超高层混凝土结构抗震性能. 方法 建立屈曲约束支撑框架-核心筒混合结构模型,并采用反应谱分析,静力和动力弹塑性分析对模型进行地震反应分析. 结果表明:小震作用下,屈曲约束支撑处于弹性状态,可为结构提供弹性刚度,结构基底剪力,层间位移角均有所减小;大震作用下,大部分屈曲约束支撑屈服,可帮助结构耗散地震能量. 结论 屈曲约束支撑能够和框架-核心筒结构良好的协同工作;合理布置屈曲约束支撑,可提高结构抗扭刚度,增加了核心筒内有效使用面积,结构总质量明显下降,减小了结构地震反应.

关键词 屈曲约束支撑;框架-核心筒;抗震性能;Pushover 分析;动力弹塑性分析

中图分类号 TU973⁺.2

文献标志码 A

Seismic Performance Analysis of a Hybrid Frame-Core Tube Structure with Buckling-Restrained Brace

LI Guochang, WANG Bingjie, YANG Zhijian, XU Li, GAO Xiang

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The seismic behavior of super high-rise concrete structures with or without buckling restrained braces is analyzed, to investigate the application of buckling-restrained brace (BRB) in super high-rise concrete structure, a model of hybrid frame-core tube structure with BRB was established, response spectrum analysis, pushover analysis and time history analysis were used to assess the seismic performance. When subjected to frequent earthquake, the BRBs were in elastic state, and can provide elastic stiffness for the main structure, both the base shear and the inter-story displacement angle have decreased. When subjected to rare earthquake, a number of BRBs were in post-yielding state, and the seismic energy for main structure could be dissipated. The results showed that BRBs could work well with the frame-core tube structure. Reasonable arrangement of buckling restrained braces can improve the torsional stiffness of structures, the use of BRB could increase the effective area of the core tube, decrease the total mass of structure obviously, and reduce the seismic response of structure.

Key words: buckling-restrained braces; frame-core tube; seismic performance; pushover analysis;

收稿日期:2017-12-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51178276);辽宁省高等学校创新团队项目(LT2014012)

作者简介:李帼昌(1964—),女,教授,博士,博士研究生导师,主要从事结构抗震等方面研究.

time history analysis

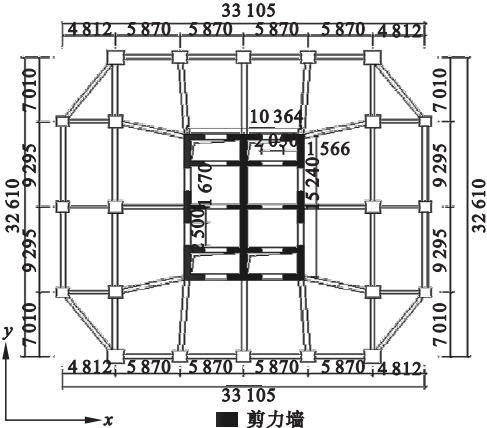
屈曲约束支撑 (Buckling - Restrained Brace, BRB) 是一种新型耗能元件. 与普通支撑相比, 它克服了普通支撑受压易屈曲的缺点, 在受拉和受压状态下, 均能达到屈服, 具有稳定的力学性能. 近年来, 研究人员针对屈曲约束支撑进行了大量研究: 周云等^[1]、李国强等^[2]、Piedrafita 等^[3] 研究了不同形式 BRB 的力学模型、耗能能力等; 赵瑛等^[4]、Maley 等^[5]、Valente^[6] 等先后提出基于抗侧刚度比和基于位移以及基于位移能量谱的屈曲约束支撑 - 钢框架设计方法; Oviedo 等^[7]、Khampanit 等^[8]、白久林等^[9] 先后提出了屈曲约束支撑 - 混凝土框架设计方法; Mazzolani 等^[10]、薛彦涛等^[11] 研究了屈曲约束支撑混凝土 - 框架结构, 并通过试验得出: 应用屈曲约束支撑的结构在抵抗地震的能力方面有所提升; Ahmed 等^[12] 将 BRB 应用于超高层混凝土结构中, 证明了加设屈曲约束支撑对减小结构地震反应有良好的效果.

我国《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)^[13] 指出: 结构体系布置, 宜有多道抗震防线. 屈曲约束支撑作为新型抗侧力构件, 能充分发挥第一道防线的作用. 针对这种情况, 笔者对比分析有无屈曲约束支撑的超高层混凝土结构模型, 研究屈曲约束支撑在超高层混凝土结构中的适用性, 对模型进行反应谱分析和弹塑性分析. 研究表明: 合理布置的屈曲约束支撑可增加结构抗扭刚度, 减小结构地震反应, 屈曲约束支撑可与超高层混凝土结构进行良好地协同工作.

1 结构分析模型概况

美国太平洋地震工程研究中心 (PEER) 为推进高层建筑结构基于性能抗震设计方法在实际工程中的应用, 于 2006 年提出 Tall

Building Initiative (TBI) 研究计划. Task12 作为 TBI 研究计划的一部分, 对实际工程案例进行了一系列的研究, 形成了最终研究报告^[14]. 文献 [15] 参考 Task12 报告中的设计案例 2 (Building 2A), 并结合中国规范, 建立了其文中的模型 Building 2N. 笔者将文献 [15] 中的 Building 2N 作为原模型, 并定义为方案 A. 方案 A 是一栋 42 层住宅, 一层层高 4.17 m, 其余楼层层高 3.2 m, 楼顶有 6.1 m 阁楼, 地上总高度 $(135.7 + 6.1) \text{ m} = 141.8 \text{ m}$. 结构体系为钢筋混凝土框架 - 核心筒结构, 钢筋混凝土梁高分别为 500 mm 和 900 mm, 钢筋混凝土柱截面尺寸为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \sim 1\,500 \text{ mm} \times 1\,500 \text{ mm}$, 剪力墙厚为 400 ~ 600 mm, 混凝土强度为 C40 ~ C60, 抗震设防烈度 8 度, 场地类别 III 类, 设计地震分组 II 组. 为探究屈曲约束支撑在超高层混凝土结构中的应用, 参考方案 A 建立了屈曲约束支撑模型, 定义为方案 B. 该方案去除了核心筒内墙, 增大了核心筒外墙厚度和梁高, 钢筋混凝土梁高为 700 mm 和 1 100 mm, 钢筋混凝土柱截面尺寸为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \sim 1\,500 \text{ mm} \times 1\,500 \text{ mm}$, 剪力墙厚 500 ~ 750 mm, 混凝土强度 C40 ~ C60. 结构平面图如图 1 所示.



(a) 方案A结构平面图

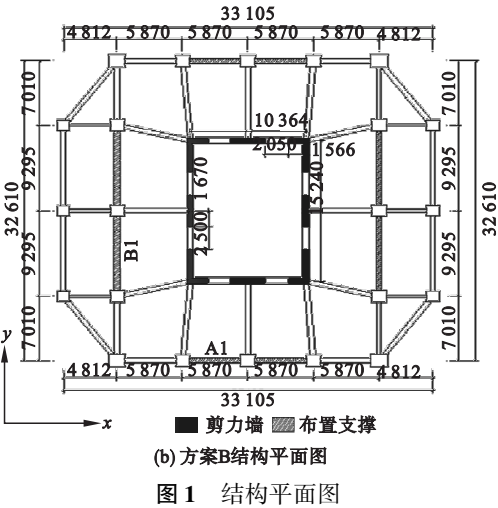


Fig. 1 Typical floor plan of structure

2 支撑布置原则及构件力学模型的选取

屈曲约束支撑应布置在结构受剪比较大的区域,充分发挥其耗能能力,同时不影响整体结构的使用功能和受力性能^[16].

采用 Midas Building 进行建模,模型中楼板的平面内刚度假定为无穷大.在反应谱分析中,所有梁、柱均采用线弹性梁单元,支撑采用两端铰接的线性桁架单元.混凝土剪力墙采用板单元进行模拟.屈曲约束支撑的屈服强度为 235 MPa,支撑的几何尺寸及力学性能见表 1.

表 1 屈曲约束支撑的几何尺寸和力学性能

Table 1 Geometrical and mechanical properties of buckling restrained braces

| 编号 | 截面面积/ mm ² | 支撑长度/ mm | 轴向刚度/ 10 ⁵ (N·mm ⁻¹) | 屈服承载力/ MN | 屈服位移/ mm | 塑性刚度比 |
|-------|--------------------------|-------------|------------------------------------------------|--------------|-------------|-------|
| BRB1 | 22 500 | 6 186 | 3.97 | 3.907 | 9.84 | 0.02 |
| BRB2 | 20 736 | 5 579 | 4.98 | 3.991 | 8.01 | 0.02 |
| BRB3 | 18 225 | 5 579 | 4.38 | 3.508 | 8.01 | 0.02 |
| BRB4 | 13 456 | 5 579 | 3.23 | 2.590 | 8.01 | 0.02 |
| BRB5 | 10 404 | 5 579 | 2.50 | 2.002 | 8.01 | 0.02 |
| BRB6 | 10 000 | 5 777 | 3.32 | 3.252 | 9.81 | 0.02 |
| BRB7 | 8 649 | 5 121 | 4.12 | 3.175 | 7.70 | 0.02 |
| BRB8 | 7 569 | 5 121 | 3.61 | 2.778 | 7.70 | 0.02 |
| BRB9 | 5 476 | 5 121 | 2.61 | 2.010 | 7.70 | 0.02 |
| BRB10 | 4 096 | 5 121 | 1.95 | 1.504 | 7.70 | 0.02 |

在静力弹塑性分析中,梁单元采用 FE-MA356 推荐的非线性恢复力骨架曲线,屈曲约束支撑轴力铰的骨架曲线采用双折线,剪力墙采用纤维单元模拟.剪力墙中混凝土采用《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)^[17]中建议的混凝土本构模型.剪力墙中钢材为双折线本构模型.剪力墙剪切本构模型为三折线.动力弹塑性分析中,梁单元本构模型采用修正武田三折线模型.

3 计算结果及分析

3.1 反应谱计算结果及分析

采用振型分解反应谱法对结构进行多遇

地震作用分析.反应谱分析结构见表 2.方案 B 较方案 A 结构总质量下降 8.9%.当取结构前十阶阵型时,各振型的参与质量之和达到 90% 以上,结构的前 3 阶振型分别为 x 向平动, y 向平动和 z 向扭转.方案 A 前 3 阶振型对应的周期分别为 2.844 s,2.291 s,2 s.方案 B 前 3 阶振型对应周期分别为 2.715 s,2.3 s,1.71 s.由此可知,方案 A 的周期比为 0.703,方案 B 的周期比为 0.63.说明增设屈曲约束支撑增大了结构的抗扭刚度.方案 B 的基底剪力相比于方案 A 在 x 方向下降 7.7%, y 方向下降 14.3%,这是由于方案 B 减少了剪力墙的布置,降低了结构自重,结构

整体地震反应减小.对比结构的层间位移角,方案B相比较于方案A在x方向下降8.2%,在y方向下降3.8%.两方案均满足

规范限值的要求.层剪力、层间位移角的对比情况如图2、图3所示.

表 2 反应谱分析

Table 2 Response spectrum analysis

| 方案 | 结构总质量/t | 基本周期/s | 基底剪力/kN | | 层间位移角 | |
|----|------------|--------|-----------|-----------|---------|---------|
| | | | x 向 | y 向 | x 向 | y 向 |
| A | 61 998.188 | 2.844 | 20 399.85 | 25 072.89 | 1/959 | 1/1 202 |
| B | 56 481.781 | 2.715 | 18 830.38 | 21 492.61 | 1/1 045 | 1/1 250 |

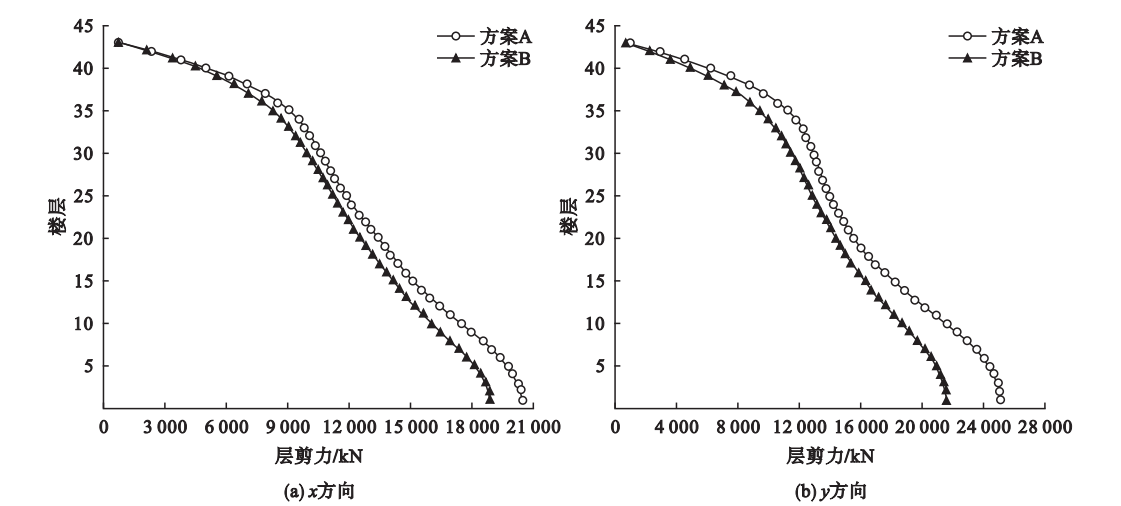


图 2 层剪力对比

Fig. 2 Comparison of floor shear

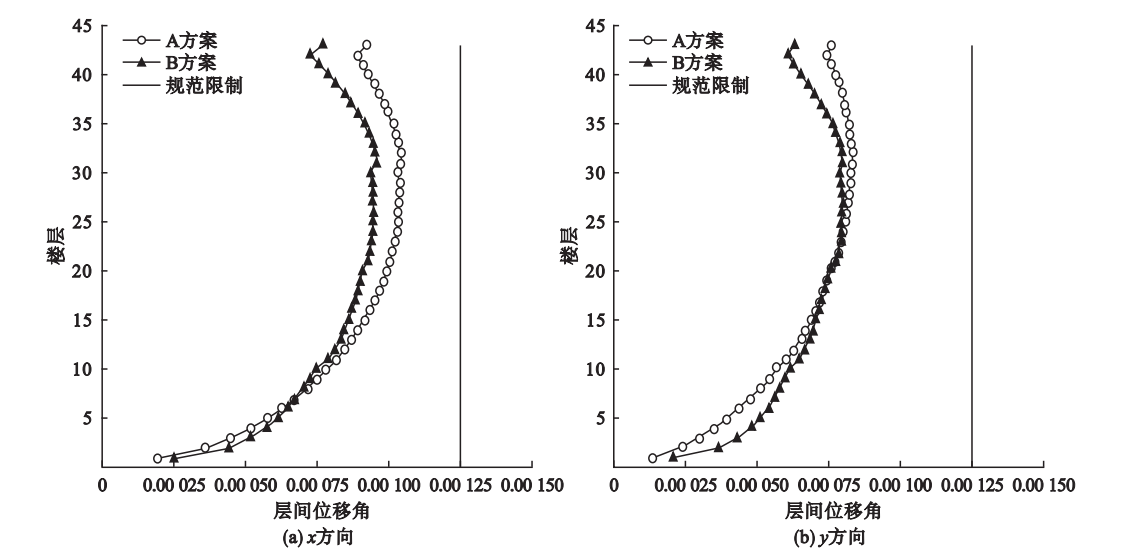


图 3 层间位移角对比

Fig. 3 Comparison of interstory drift ratio

3.2 静力弹塑性分析结果

3.2.1 Pushover 分析的能力曲线

结构在两个方向的 Pushover 曲线如图 4 所示. 图中 M、N 分别为两个方案在 x 方向和 y 方向对应的性能点. 由图可知, 在 x 方向和 y

方向, B 方案的基底剪力均小于 A 方案. 对于 A 方案, 在 x 方向, 顶点位移达到 1.273 m 时, 基底剪力下降, 结构同时大量出铰, 发生破坏. 对于 B 方案, 能力曲线光滑平缓, 没有出现弯折, 说明整体结构屈服是一个渐变的过程.

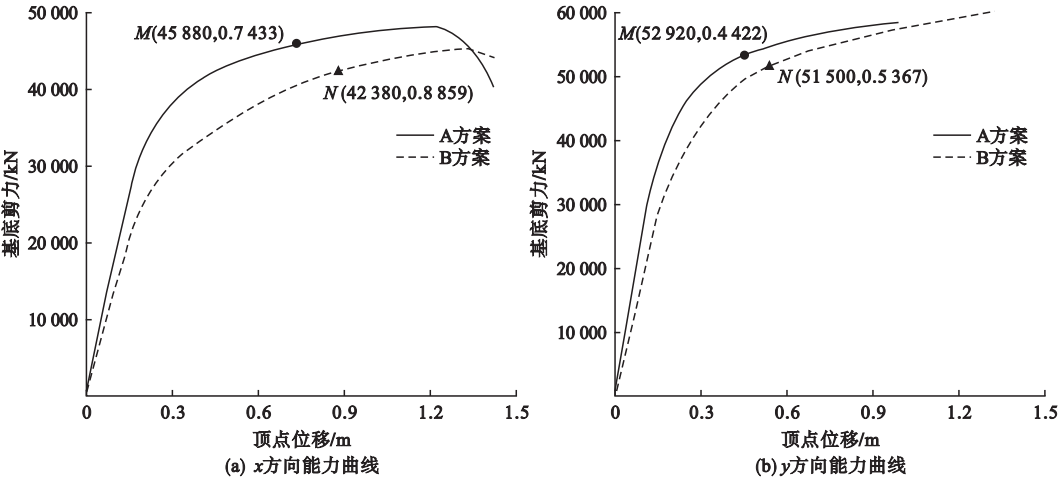


图 4 能力曲线

Fig. 4 Capacity curves

3.2.2 性能点处分析结果

性能点处层剪力对比结果如图 5 所示. 由图可知, A 方案结构基底总剪力在两个方向均大于 B 方案. 在 x 方向上, A 方案基底剪力为 45 693.2 kN, B 方案基底剪力为

41 041.79 kN. 在 y 方向上, A 方案基底剪力为 53 140.01 kN, B 方案基底剪力为 51 371.94 kN. 在两个方向上均为结构的中上部 B 方案的层剪力大于 A 方案, 结构下部 B 方案的层剪力小于 A 方案.

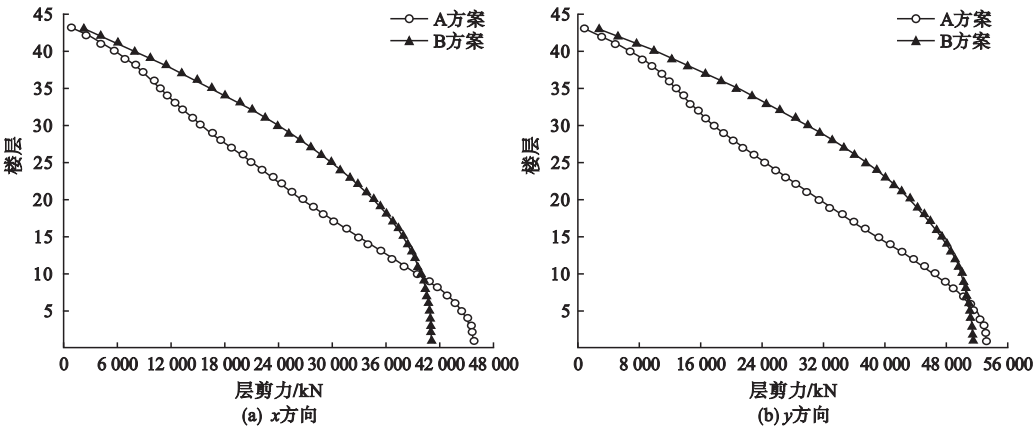


图 5 性能点处层剪力

Fig. 5 Floor shear at performance point

性能点处层间位移角对比结果如图 6 所示. 由图可知, 在两个主方向, A 方案的最大层间位移角均小于 B 方案. 在 x 方向, A 方案最大层间位移角为 $1/146$, 发生在第 8 层. B 方案最大层间位移角为 $1/134$, 发生在第

15 层. 在 y 方向, A 方案最大层间位移角为 $1/267$, 发生在第 21 层. B 方案最大层间位移角为 $1/182$, 发生在第 16 层. 两个方案的层间位移角均满足规范限值要求.

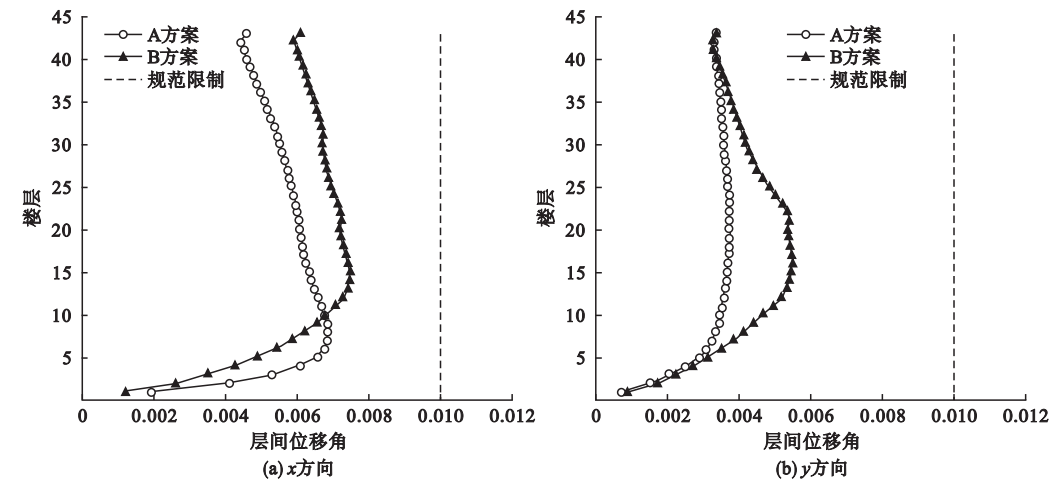


图 6 性能点处层间位移角

Fig. 6 Inter-story displacement angle at performance point

性能点处支撑屈服情况如图 7 所示, x 方向布置在 A1 轴的支撑轴压力如图 7(a) 所示, 图中虚线表示不同支撑的屈服承载力, 可以看出, A1 轴支撑大部分屈服, 只在结构 35

层以上层地震力相对较小的楼层没有发生屈服, B1 轴支撑屈服情况与 A1 轴相类似. 这说明结构在罕遇地震作用下, 绝大部分支撑屈服耗能, 提供附加阻尼, 帮助结构抗震.

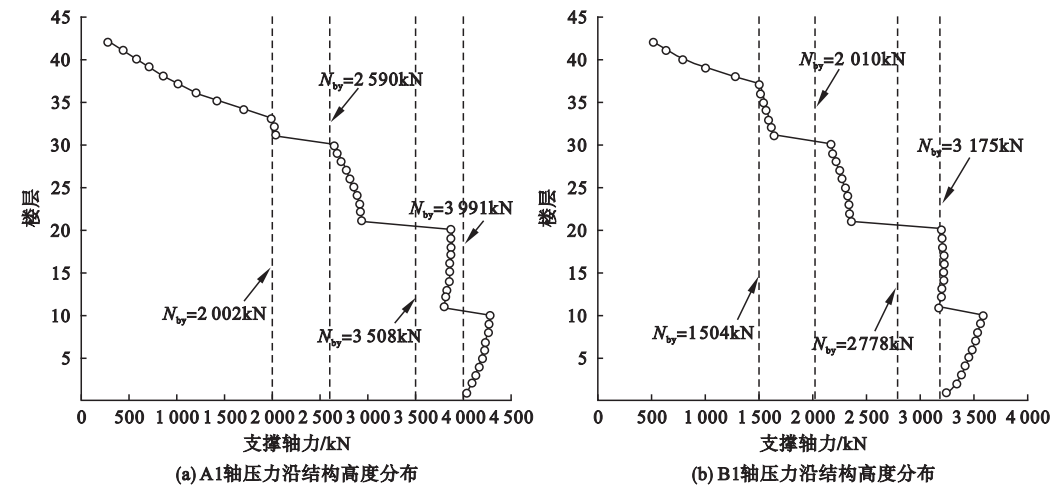


图 7 支撑轴压力沿结构高度分布

Fig. 7 Distribution along the height of the axial force of BRBs

3.3 动力弹性分析结果

3.3.1 地震波选取

笔者所选模型方案的动力时程分析以 PEER 地震动数据库为基础, 选波方法参照杨红等^[18]在杨溥等^[19]建议的双频段选波法基础上, 提出了双周期选波法, 该方法考虑了

三维分析中两个主轴方向水平地震分量及结构的振动特性. 选波由三个频段控制, 容许误差可适当降低. 所选地震波选择集如表 3 所示, 所选 5 组地震波加速度反应谱结果如图 8 所示.

表3 地震波选择集

Table 3 Selected ground motions

| 地震波 | 年份 | 震级 | 地震名称 | 地震台 | $V_{s_30}/(m\cdot s^{-1})$ |
|-----|------|------|---------------------|------------------|-----------------------------|
| GM1 | 1981 | 6.6 | Corinth_Greece | Corinth | 361.40 |
| GM2 | 1989 | 6.93 | Loma Prieta | Coypte Lake Dam | 561.43 |
| GM3 | 2007 | 6.8 | Chuetsu - oki_Japan | Yoshikawaku Joet | 561.59 |
| GM4 | 2007 | 6.8 | Chuetsu - oki_Japan | Ojiya City | 430.16 |
| GM5 | 2008 | 6.9 | Iwate_Japan | MYG004 | 479.37 |

注: V_{s_30} 表示 30 m 深度范围内等效剪切波速。

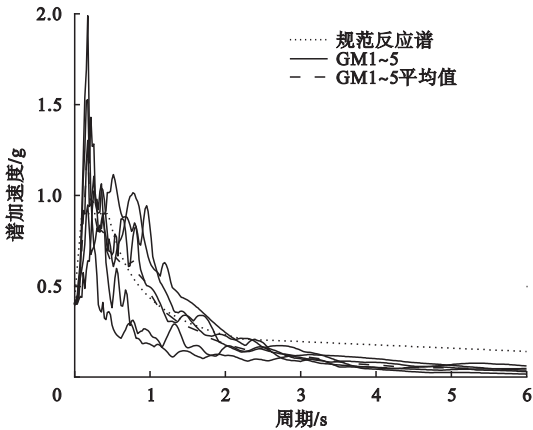


图8 反应谱结果对比

Fig. 8 Comparison of response spectrum

3.3.2 结构时程结果分析

以 GM1 (Corinth_Greece) 组地震动计算

结果为例,A 方案和 B 方案在 GM1 作用下的顶点位移时程曲线如图 9 所示,A 方案和 B 方案在地震动发生前期就发生较大位移,结构地震反应比较强烈. 其中,A 方案在 x 方向的最大顶点位移为 0.454 m,位于 10.86 s,在 y 方向的最大顶点位移为 0.329 m,位于 7.40 s;B 方案在 x 方向的最大顶点位移为 0.522 m,位于 10.82 s,在 y 方向的最大顶点位移为 0.372 m,位于 7.42 s. B 方案相对于 A 方案顶点位移有所增加,说明增设屈曲约束支撑可以在一定程度上约束结构的侧向变形,但 A 方案相对于 B 方案多出的剪力墙在控制位移方面也发挥很大作用^[20].

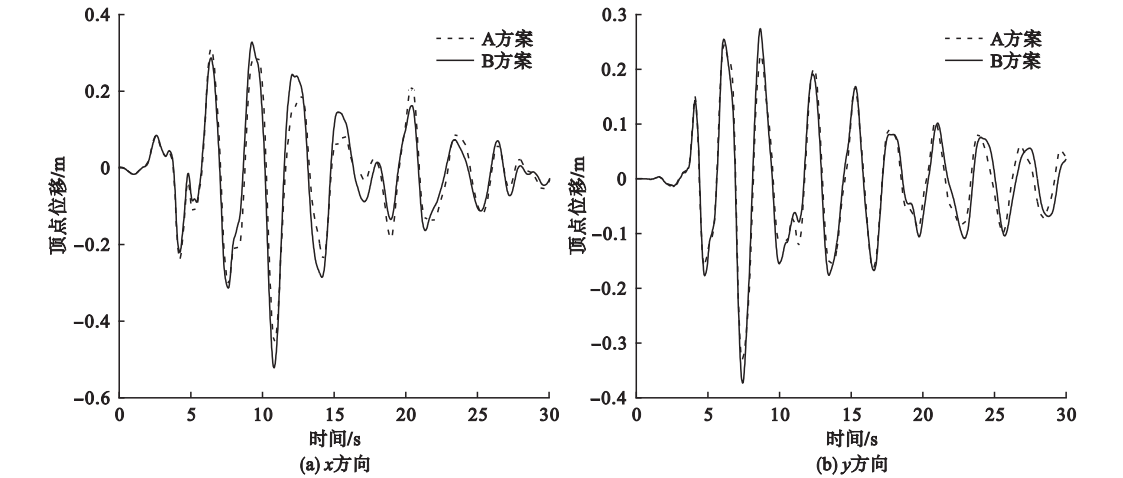


图9 顶点位移时程曲线

Fig. 9 Time history curve of top displacement

A 方案和 B 方案在 GM1 地震动作用下的基底剪力时程曲线如图 10 所示. 从图中曲线可以看出,A 方案在 x 方向的最大基底剪力

为 57 138.3 kN,位于 3.98 s,在 y 方向的最大基底剪力为 71 361.4 kN,位于 4.18 s;方案 B 在 x 方向的最大基底剪力为 48 102.1 kN,位

于 3.98 s,在 y 方向的最大基底剪力为 54 212.4 kN,位于 6.94 s. B 方案在 x、y 方向

的基底剪力相比于 A 方案均有减小,x 方向减小 15.8%,y 方向减小 24%.

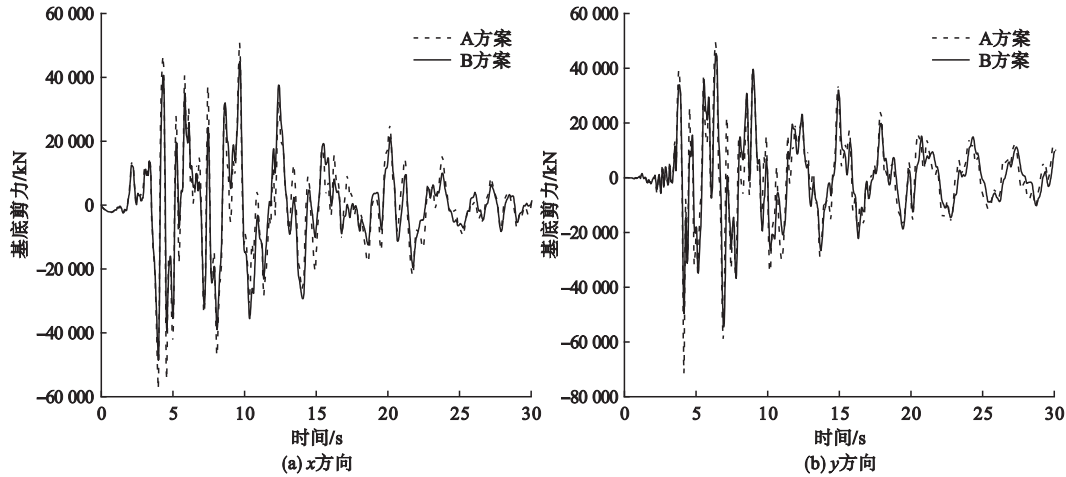


图 10 基底剪力时程曲线

Fig. 10 Time history curve of base shear

4 结 论

(1)在超高层混凝土结构中合理布置屈曲约束支撑代替部分剪力墙,可减轻结构自重,降低结构地震反应,提高结构的抗扭刚度.

(2)根据对 B 方案进行静力弹塑性分析可知:在小震作用下,屈曲约束支撑处于弹性状态,为结构提供了初始弹性刚度;在大震作用下,大部分屈曲约束支撑进入屈服状态,可以为结构抵抗地震作用.

(3)采用屈曲约束支撑,Pushover 曲线整体单调均匀变化.在到达性能点处,结构能力曲线在两个方向均没有明显的下降,在静力和动力弹塑性分析中,两个结构最大层间位移角均满足规范要求.

(4)动力时程分析结果表明,屈曲约束支撑代替部分剪力墙布置在结构中,可以有效减小层间位移角、楼面加速度等结构地震动响应;在满足大震不倒的前提下,结构基底总剪力大幅降低.说明屈曲约束支撑代替部分剪力墙应用于超高层混凝土结构中帮助结构抗震是可行的.

参考文献

[1] 周云,邓雪松,钱洪涛,等.开孔式三重钢管防屈曲耗能支撑性能试验研究[J].土木工程学报,2010,43(9):77-87.
(ZHOU Yun, DENG Xuesong, QIAN Hongtao, et al. An experimental study of the perforation type triple steel tube buckling-restrained brace [J]. China civil engineering journal, 2010, 43(9): 77-87.)

[2] 李国强,胡宝琳,孙飞飞,等.国产 TJI 型屈曲约束支撑的研制与试验[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(5):631-636.
(LI Guoqiang, HU Baolin, SUN Feifei, et al. Development and experimental study on domestic TJI buck-restrained brace[J]. Journal of tongji university (natural science), 2011, 39 (5): 631-636.)

[3] PIEDRAFITA D, CAHIS X, SIMON E, et al. A new perforated core buckling restrained brace [J]. Engineering structures, 2015, 85: 118-126.

[4] 赵瑛,郭彦林.防屈曲支撑框架设计方法研究[J].建筑结构,2010,40(1):38-43.
(ZHAO Ying, GUO Yanlin. Research on design method of buckling restrained braced frames [J]. Building structures, 2010, 40 (1): 38-43.)

[5] MALEY T J, SULLIVAN T J, CORTE G D. Development of a displacement-based design method for steel dual systems with buckling-restrained braces and moment-resisting frames [J]. Journal of earthquake engineering, 2010, 14(S1): 106-140.

[6] VALENTE M. Displacement-based seismic de-

- sign of steel frames strengthened by buckling-restrained braces [J]. Applied mechanics and materials, 2012, 217: 1114 - 1118.
- [7] OVIEDO A J A, MIDORIKAWA M, ASARI T. Earthquake response of ten-story story-drift-controlled reinforced concrete frames with hysteretic dampers [J]. Engineering structures, 2010, 32(6): 1735 - 1746.
- [8] KHAMPAIT A, LEELATAVIWAT S, KOCHANIN J, et al. Energy-based seismic strengthening design of non-ductile reinforced concrete frames using buckling-restrained braces [J]. Engineering structures, 2014, 81: 110 - 122.
- [9] BAI J, OU J. Earthquake-resistant design of buckling-restrained braced RC moment frames using performance-based plastic design method [J]. Engineering structures, 2016, 107: 66 - 79.
- [10] MAZZOLANI F M, CORTE G D, D'ANIELLO M. Experimental analysis of steel dissipative bracing systems for seismic upgrading [J]. Journal of civil engineering and management, 2009, 15(1): 7 - 19.
- [11] 薛彦涛, 金林飞, 韩雪, 等. 钢筋混凝土框架屈曲约束支撑试验研究 [J]. 建筑结构, 2013, 43(1): 1 - 4.
(XUE Yantao, JIN Linfei, HAN Xue, et al. Experimental study on buckling-restrained brace of reinforced concrete frame structure [J]. Building structure, 2013, 43(1): 1 - 4.)
- [12] AHMED M, TAYYABA S, ASHRAF M W. Effect of buckling restrained braces locations on seismic responses of high-rise RC core wall buildings [J]. Shock and vibration, 2015, 2016: 1 - 15.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB50011—2010 [S]. Beijing: China architecture & building press, 2010.)
- [14] MOEHLE J, BOZORGNIYA Y, JAYARAM N, et al. Case studies of the seismic performance of tall buildings designed by alternative means [R]. PEER report: Pacific earthquake engineering research center college of engineering university of california, berkeley, 2011.
- [15] 李梦珂, 卢啸, 陆新征, 等. 中美高层钢筋混凝土框架-核心筒结构抗震设计对比 [J]. 工程力学, 2015, 32(6): 52 - 61.
(LI Mengke, LU Xiao, LU Xinzhen, et al. Comparison of seismic design of high-rise RC frame-core tube structure between China and America [J]. Engineering mechanics, 2015, 32(6): 52 - 61.)
- [16] 罗开海. 屈曲约束支撑体系设计方法 [J]. 建筑结构, 2011, 41(11): 98 - 102.
(LUO Kaihai. Design procedures for buildings incorporating buckling-restrained braces [J]. Building structure, 2011, 41(11): 98 - 102.)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China architecture & building press, 2010.)
- [18] 杨红, 任小军, 徐海英. 双向水平地震下时程分析法中输入波的选择 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(11): 40 - 46.
(YANG Hong, REN Xiaojun, XU Haiying. Selection of input waves in time-history analysis under bi-direction horizontal seismic action [J]. Journal of south China university of technology (natural science edition), 2010, 38(11): 40 - 46.)
- [19] 杨溥, 李英民, 赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标 [J]. 土木工程学报, 2000, 33(6): 33 - 37.
(YANG Fu, LI Yingmin, LAI Ming. A new method for selecting inputting waves for time-history analysis [J]. China civil engineering journal, 2000, 33(6): 33 - 37.)
- [20] 中国建筑标准设计研究院. 全国民用建筑工程设计技术措施: 结构 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
(China Institute of Building Standard Design & Research. National technical measures for design of civil construction: structure [M]. Beijing: China Planning Press, 2009.)