

支撑布置形式对多重抗侧力结构体系抗震性能的影响

惠宽堂¹, 沈艺超², 史庆轩¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 住房和城乡建设局, 浙江 湖州 313000)

摘要: 多重抗侧力混合结构是通过楼板将半刚性连接钢框架、屈曲约束支撑钢框架和混凝土芯筒连接起来协同工作的多重抗力体系。为了比较不同支撑布置形式对该结构体系抗震性能的影响, 设计了 5 个方案的三维多重抗侧力混合结构, 利用有限元软件 ABAQUS 建模分析。通过罕遇地震作用下的动力弹塑性时程分析, 研究了支撑布置形式对结构变形的影响; 基于能量反应的抗震性能分析, 从结构整体滞回耗能占比和滞回耗能分配关系两个角度, 分析了支撑布置形式对结构滞回耗能的影响。探讨支撑不同布置方式的优劣, 为多重抗侧力结构体系设计提供依据。

关键词: 混合结构; 支撑布置形式; 时程分析; 结构变形; 滞回耗能

中图分类号: TU973.14

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)06-0813-06

Influences of braces layout forms on seismic behaviors of the multi-lateral resistant mixed structure

XI Kuantang¹, SHEN Yichao², SHI Qingxuan¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Bureau of Housing and Urban Rural Construction, Huzhou 313000, China)

Abstract: Multi-lateral resistant mixed structure is composed of semi-rigid connection steel frame, buckling restrained braces and concrete core tube through the floor. To compare the different layout of braces for seismic behavior of this structural system, five different layout forms of the three dimensional multi-lateral resistant mixed structure were designed in this paper. The models were established by finite element software ABAQUS. Through elastic-plastic time history analysis under the action of the rare earthquake, the layout of braces for the structural deformation were studied. Based on the seismic behavior of the energy response analysis, from the views of the hysteretic energy dissipation accounted for of the whole structure and the relationship of hysteretic energy dissipation distribution, the layout forms of braces for the hysteretic energy were studied. Both advantages and disadvantages of the layout forms of braces were discussed, which may serve as reference for the design of multi-lateral resistant mixed structural system.

Key words: mixed structure; braces layout forms; time history analysis; structural deformation; hysteretic energy

近年来, 钢-混凝土混合结构体系大量运用于高层、超高层复杂建筑中, 混合结构体系兼有钢结构施工速度快和混凝土结构刚度大、成本低的优点, 被认为是一种符合我国国情的较好的高层建筑结构形式^[1]。文献[2]基于混合结构的优缺点提出了多重抗侧力钢-混凝土混合结构, 即装备有屈曲约束支撑半刚性连接钢框架-混凝土芯筒混合结构, 根据弹性理论推导了在水平荷载作用下侧移和内力的简化算法。文献[3]通过计算不同支撑类型及支撑布置方式下钢框架支撑结构的顶点位移, 研究了支撑形式对多、高层钢框架结构抗侧刚度的影响。文献[4]通过计算支撑布置方式相同 6 层和 20 层框架的顶点位移, 考察竖向支撑对不同高度框架的承载能力和侧移刚度的影响, 以及相同高度下, 支撑方式不同对框架的承载能力和侧移刚度的影响。文献[5]

根据屈曲约束支撑与钢框架的合理刚度比设计 4 种不同布置方式的结构模型, 采用多种分析方法比较了不同屈曲约束支撑布置方式对抗震性能的影响。从传统支撑布置形式的研究^[3-7]可以发现, 研究对象均为钢框架, 针对多重抗侧力结构体系支撑布置形式的研究甚少, 研究过程中往往将钢框架结构简化为平面模型, 将等效重力荷载用集中质量的方式均布到梁柱节点中。本文根据一典型的高层钢-混凝土混合结构布置形式^[8]设计了一内核心筒-外钢框架混合结构, 通过在外钢框架配置支撑形成多重抗侧力结构体系。保持结构各层用钢量不变, 改变支撑布置形式, 利用 ABAQUS 软件对其进行罕遇地震作用下的动力弹塑性时程分析, 从结构变形、滞回耗能及损伤角度入手分析支撑布置形式对整体结构抗震性能的影响。

1 模型介绍

本文设计了一个 12 层的带屈曲约束支撑外钢框架内混凝土核心筒的混合结构。模型各层层高为 4 m, 结构平面布置形式呈“九宫格”, 尺寸为 12 m×12 m, 其高宽比 $H/B=4$, 混凝土核心筒面积约占 11.1%, 其结构布置平面图见图 1。

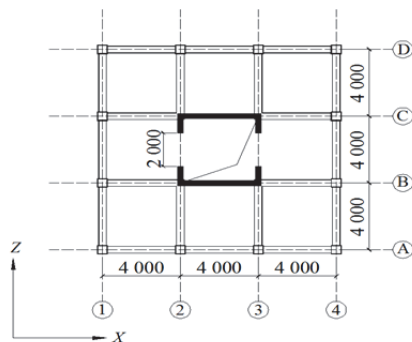


图1 结构平面布置图
Fig.1 Layout of structure

门洞大小为 2 000 mm×2 800 mm. 梁柱为箱型截面, 柱截面为 $\square 500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 梁截面为 $\square 400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 混凝土楼板厚 120 mm, 双层双向配筋, 配筋率为 0.88%. 混凝土核心筒墙厚 300 mm, 根据《高规》^[9]要求, 底部加强部位的高度取底部两层, 底部加强区角部墙体约束边缘构件沿墙肢的长度取墙肢截面高度的 1/4. 8、9 度抗震设计时, 应在混凝土筒体四角墙内设置型钢柱, 故适当提高底部加强区及其上一层约束边缘构件纵向配筋率, 取 3.6%, 水平配筋率为 1.8%, 分布筋双层双向均为 0.8%. 同理, 上部楼层构造边缘构件纵向配筋率也适当提高, 取 2%, 水平配筋

率为 1%, 分布筋双层双向均为 0.8%.

钢材选用 Q235, 屈服强度 $f_y=235 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$, 弹性模量 $E_s=2.06 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$, 钢材密度为 $7\,850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; 混凝土强度为 C30, 弹性模量 $E_0=21.1 \text{ GPa}$, 泊松比为 0.2, 密度为 $2\,400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 屈曲约束支撑的轴向刚度为 $4 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 轴向屈曲变形均为 $\delta_y=1.6 \text{ mm}$, 半刚性连接转动刚度 R_e 为 $10^8 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$, 屈服转角为 $\theta_y=0.002 \text{ rad}$.

保持结构每层支撑数目不变, 改变支撑布置位置形成多个模型, 不同的支撑布置方案见图 1. 方案 1 支撑布置在外框架边跨, 同列支撑方向一致; 方案 2 支撑布置位置同方案 1, 同列支撑方向交替相错; 方案 3 支撑布置在外框架中跨, 呈小 X 型; 方案 4 支撑布置在外框架, 边中结合, 每三层一循环, 呈大 X 型; 方案 5 支撑布置在剪力墙和外框架之间, 类似伸臂桁架, 不同点在于每层布置。

《抗规》^[10]指出, 在计算地震作用时, 建筑结构的重力荷载代表值应取永久荷载标准值和可变荷载组合值之和, 可变荷载的组合值系数取 0.5. 在有限元建模时将重力荷载代表值折算到楼板密度中. 根据《荷载规范》^[11], 楼面及屋面活载取 2.0 kN/m^2 , 电梯机房取 7 kN/m^2 .

结构抗震设防烈度 8 度(0.2 g), 地震波峰值为 400 gal, 采用单向地震作用, 作用方向为 Z 轴, 本文采用 El Centro 波(II 类场地)、Taft 波(III 类场地)和江油波(II、III 类场地)用于动力弹塑性时程分析, 地震波持时均为 25 s. 罕遇地震作用时结构阻尼比取 0.05, 结构阻尼按照 Rayleigh 计算。

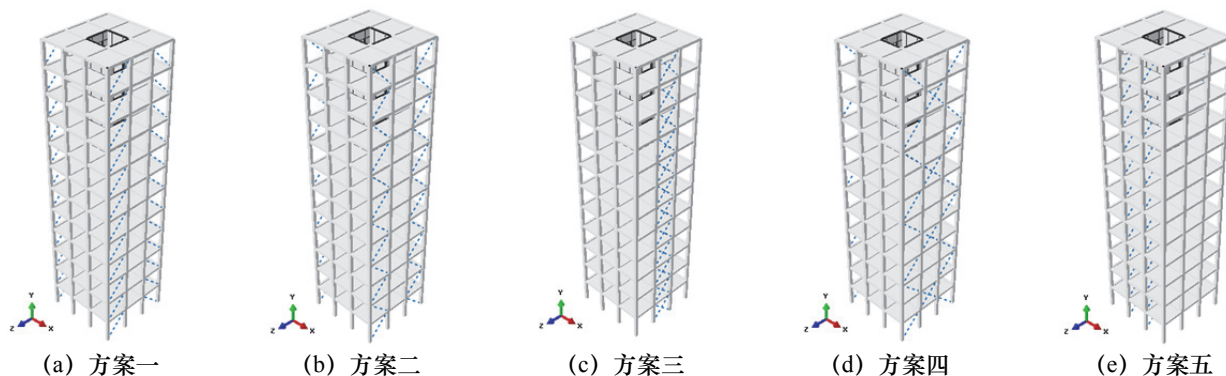


图1 不同支撑布置方案
Fig.2 Different layout of braces

2 有限元建模与分析

2.1 有限元模型

本文分析利用有限元软件 ABAQUS. 钢梁、钢柱采用三维一阶梁单元 B31, 剪力墙和混凝土楼板

采用一次缩减积分四边形壳单元 S4R. 支撑和半刚性连接采用两个节点连接单元模拟. 该单元由 6 个单独的“弹簧”组成, 每个弹簧对应 6 个自由度的一个(轴向、剪切、扭转和三个转动). 定义一个转动弹簧 $M-\theta$ 关系或一个轴向弹簧 $N-\delta$ 关系, 而其它

自由度完全约束。

屈曲约束支撑和半刚性连接均采用双线性随动强化模型，考虑弹性刚度的 1/100 作为屈曲后的残余刚度，如图 2、图 3 所示，屈曲约束支撑极限变形设定为屈服变形的 12 倍^[12]。

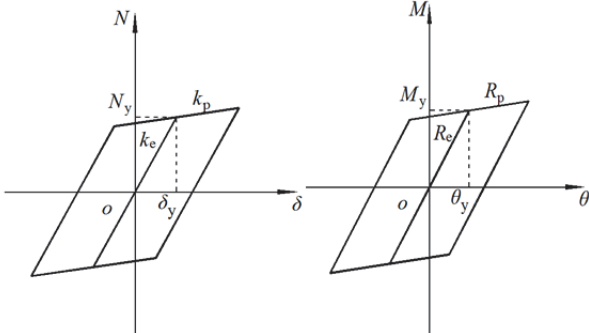


图 2 屈曲约束支撑 $N-\delta$ 滞回模型

图 3 半刚性节点 $M-\theta$ 滞回模型

Fig.3 $N-\delta$ hysteresis model of buckling restrained

Fig.4 $M-\theta$ hysteresis model of brace semi-rigid connections

钢材采用双线性随动强化模型，在循环荷载作用下，无刚度退化且考虑包辛格效应，强屈比为 1.2，极限应力所对应的极限塑性应变为 0.024。混凝土采用损伤塑性模型(CDP)^[13]，应力-应变关系参考《混规》^[14]计算，损伤因子按公式^[15](1)求得。

$$d_k = \frac{(1-\beta)\varepsilon^{\text{in}} E_0}{\sigma_k + (1-\beta)\varepsilon^{\text{in}} E_0} \quad (k=t, c) \quad (1)$$

式中： t 、 c 分别代表拉伸和压缩； β 为塑性应变与非弹性应变的比例系数，受压时取 0.35~0.7，受拉时取 0.5~0.95； ε^{in} 为混凝土受拉压情况下的非弹性阶段应变， $\varepsilon^{\text{in}} = \varepsilon - \sigma_k / E_0$ 。

2.2 模态分析

首先对不同布置形式下的结构进行模态分析，采用单向地震作用，仅研究对结构响应较敏感的模态，即 Z 轴向自振周期，见表 1，由表 1 可知：结构第 1 阶模态自振周期从小到大排序为：方案 5<

方案 4<方案 1<方案 2<方案 3，方案 5 模型刚度最大，方案 3 模型刚度最小，不同的支撑布置方案得到周期的最大值和最小值相差 7.5%。观察模态 4、5 可知各模型高阶模态周期趋于一致。图 4 绘制了地震作用方向的前三阶振型图，支撑布置对主振型基本无影响，前三阶主振型基本相同。

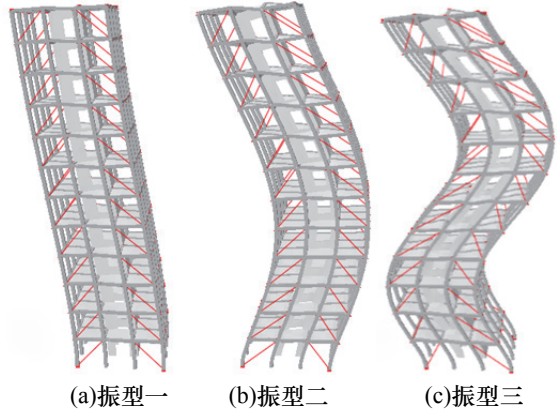


图 4 方案一 Z 轴向前三阶振型图

Fig.5 First three moments of project 1 in the Z axial

表 1 不同布置形式模型 Z 轴向自振周期/s

Tab.1 Natural vibration period of different layout forms of braces in the Z axial / s

编号	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
模态 1	0.895	0.898	0.908	0.880	0.840
模态 2	0.260	0.260	0.261	0.257	0.251
模态 3	0.132	0.132	0.132	0.132	0.130
模态 4	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088
模态 5	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066

2.3 结构变形

图 6 为各模型在不同地震作用下的层间位移角曲线。观察图 6 (a)、(c)可知，方案 5 各层的层间位移角均较小，方案 3 各层的层间位移角均较大，方案 1 与方案 2 层间位移角曲线几乎重合。观察图 6(b)可以发现，方案 4、5 层间位移角曲线形状区别于其他 3 个方案。

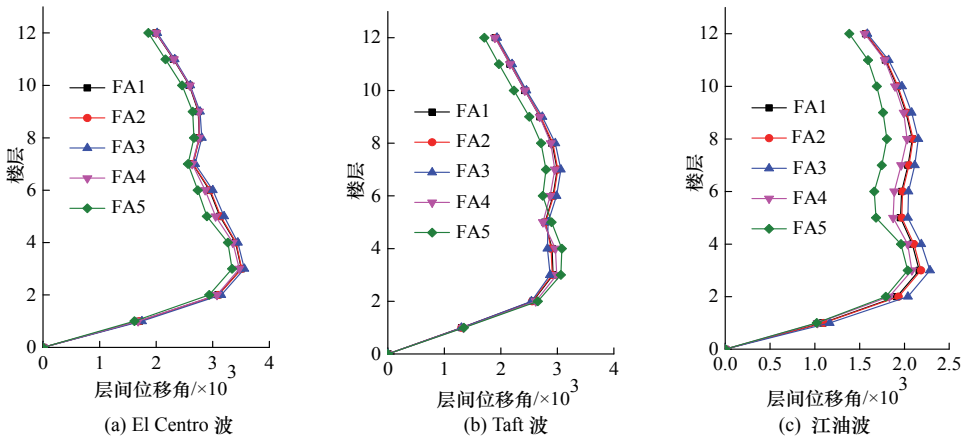


图 5 各模型层间位移角曲线

Fig.6 Interlayer displacement angle curve of models

表 2 各模型结构响应
Tab.2 Structural response of models

模型	最大层间位移角						顶层侧移峰值/mm		
	El Centro 波		Taft 波		江油波		El Centro 波	Taft 波	江油波
	大小/ $\times 10^{-3}$	位置/层	大小/ $\times 10^{-3}$	位置/层	大小/ $\times 10^{-3}$	位置/层			
方案 1	3.504	3	2.996	7	2.165	3	110.7	112.9	78.3
方案 2	3.512	3	3.008	7	2.185	3	111.2	113.3	78.9
方案 3	3.559	3	3.062	7	2.285	3	113.5	114.1	81.7
方案 4	3.470	3	2.990	3	2.084	3	108.4	111.9	74.6
方案 5	3.342	3	3.079	4	2.036	3	101.8	106.0	65.7

为量化分析支撑布置形式对结构响应的影响,表 2 针对最大层间位移角和顶层位移进行了分析. 从表中数据可发现如下规律: (1) 不同地震波作用下结构顶层侧移规律一致, 结构响应 $A-5 < A-4 < A-1 < A-2 < A-3$; (2) El Centro 波和江油波作用下结构最大层间位移角规律一致且同种地震波作用下结构最大层间位移角出现位置相同, 结构响应 $A-5 < A-4 < A-1 < A-2 < A-3$. Taft 波作用下, 方案 4 和方案 5 最大层间位移角出现位置下移.

3 结构滞回耗能分析

3.1 整体结构滞回耗能研究

图 7 绘制了三种地震波作用下各方案结构滞回耗能沿楼层分布曲线. 传统钢-混凝土混合结构^[16]滞回耗能从下至上急剧减少, 底层滞回耗能最多、损伤最严重. 由图 7 可知, 设计模型在不同地震波作用下第三楼层滞回耗能最多, 上部楼层滞回耗能均匀减少, 耗能分布更加合理.

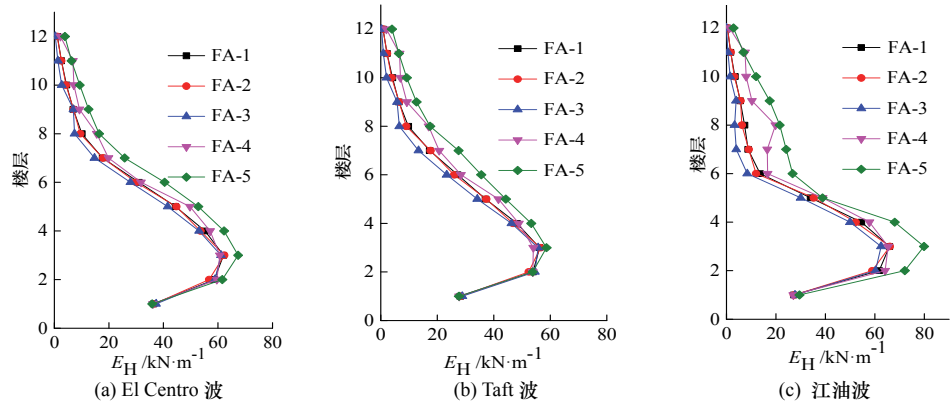


图 7 结构滞回耗能沿楼层分布曲线

Fig.7 Distribution curve of structural hysteretic energy dissipation along the floor

对于混合结构要尽量避免底部滞回耗能过多, 充分发挥上部结构的滞回能力. 对比各组方案滞回耗能曲线可以发现, 不同地震波作用方案 5 耗能最优, 方案 4 次之, 方案 3 最差. 对比方案 1 和方案 2 可以发现, 支撑布置方向相同楼层滞回耗能相当, 而布置方向不同的楼层方案 2 滞回耗能小于方案 1, 故判定方案 1 优于方案 2.

3.2 滞回耗能构成关系研究

上一小节从结构整体滞回耗能分析布置形式对结构抗震性能的影响, 本小节将从滞回耗能构成关系来研究布置形式对结构抗震性能的影响. 将多重抗侧力体系滞回耗能划分为六个部分, 定义如下:

$$E_H = E_{HF} + E_{HP} + E_{HB} + E_{HW} + E_{HS} + E_{HL} \quad (2)$$

式中: E_H 为结构总滞回耗能; E_{HF} 为钢框架滞回耗能; E_{HP} 为楼板滞回耗能; E_{HB} 为屈曲约束支撑滞回耗能; E_{HW} 为混凝土剪力墙墙肢滞回耗能; E_{HS} 为半刚性节点滞回耗能; E_{HL} 为混凝土剪力墙连梁滞

回耗能. 定义剪力墙滞回耗能占比 γ_{HW} 、屈曲约束支撑滞回耗能占比 γ_{HB} 及连梁滞回耗能占比 γ_{HL}

$$\gamma_{HW} = (E_{HW} / E_H) \times 100\% \quad (3)$$

$$\gamma_{HB} = (E_{HB} / E_H) \times 100\% \quad (4)$$

$$\gamma_{HL} = (E_{HL} / E_H) \times 100\% \quad (5)$$

在 8 度罕遇地震作用下, 本文设计模型钢框架始终处于弹性阶段, $E_{HF} = 0$, 文献[17]研究了 10、15 和 20 层的混合结构, 前两者钢框架不参与滞回耗能, 与研究结果一致; 钢框架梁与核心筒相连的半刚性节点部分进入塑性状态, 楼板与梁柱交接处发生塑性变形, E_{HS} 和 E_{HP} 较小, 相对 E_{HW} 、 E_{HB} 和 E_{HL} 可以忽略不计. 故仅针对剪力墙、屈曲约束支撑和连梁滞回耗能进行分析.

观察图 8、图 9 和图 10 可以发现, 不同地震作用下, 屈曲约束支撑滞回耗能占比从小到大排列均为: $A-3 < A-2 < A-1 < A-4 < A-5$; 剪力墙滞回耗能占比从小到大排列均为: $A-5 < A-4 < A-1 < A-2 < A-3$; 剪力

墙连梁滞回耗能占比从小到大排列均为: A-5<A-4<A-1<A-2<A-3. 方案 5 在地震作用下支撑耗能占比最多, 利用率最高, 剪力墙墙肢及连梁耗能占比最

少; 方案 3 支撑耗能占比最少, 利用率最低, 剪力墙墙肢及连梁耗能占比最多. 故从滞回耗能构成角度来看, 方案 5 最理想, 方案 4 次之, 方案 3 最差.

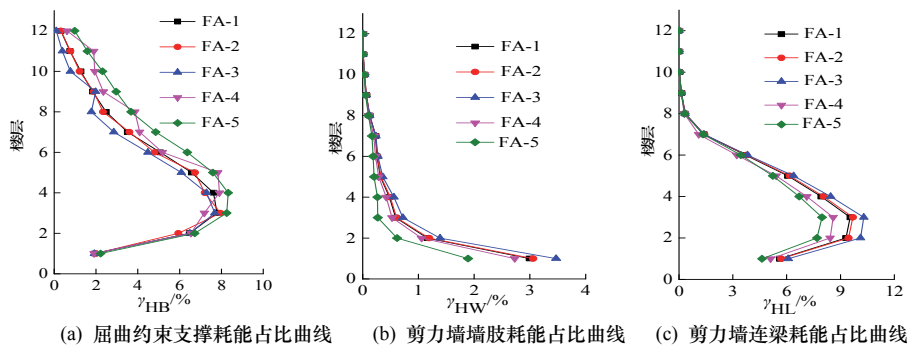


图 8 El Centro 波作用下各方案滞回耗能构成占比曲线

Fig.8 Proportion curve of hysteretic energy dissipation of each projects under the action of El Centro earthquake

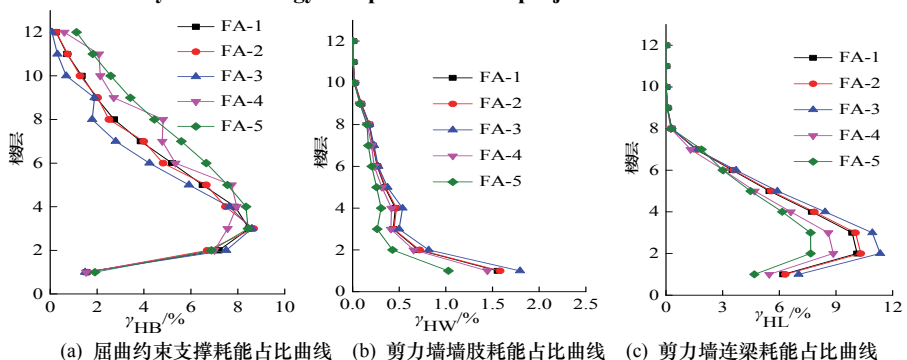


图 9 Taft 波作用下各方案滞回耗能构成占比曲线

Fig.9 Proportion curve of hysteretic energy dissipation of each projects under the action of Taft earthquake

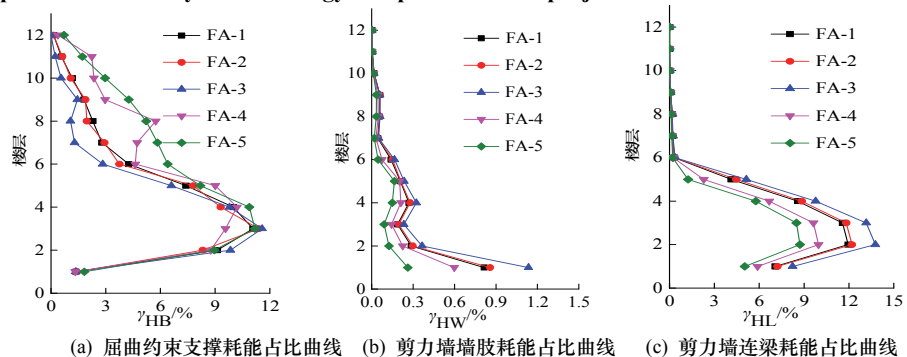


图 10 江油波作用下各方案滞回耗能构成占比曲线

Fig.10 Proportion curve of hysteretic energy dissipation of projects under the action of Jiang You earthquake

4 剪力墙墙肢损伤

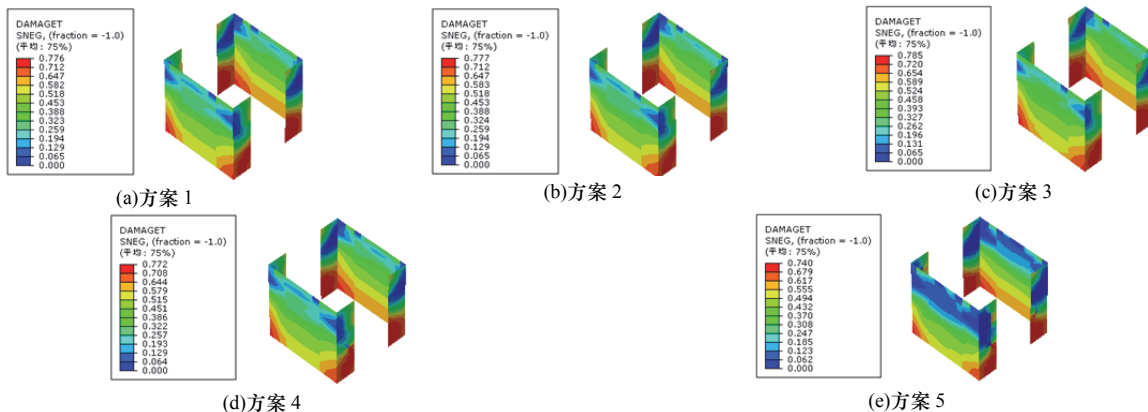


图 11 El Centro 波作用下各模型受拉损伤云图

Fig.11 Damage of tension of models under the action of El Centro earthquake

作为多重抗侧力体系的第一道防线屈曲约束支撑震后经检查,可以方便地更换损坏的支撑,起到“保险丝”的作用。多重抗侧力体系的第二道防线-混凝土核心筒的连梁部位吸收大量的地震能量,有效地避免墙肢损伤严重。为探讨支撑不同布置形式的优劣,依据混凝土损伤塑性模型的定义,从宏观角度观察底层墙肢震后受拉损伤情况。3条地震波中 El Centro 作用下底层剪力墙墙肢损伤最为严重,由图 11 可知,方案 5 损伤最小,方案 3 损伤最严重。Taft 波和江油波作用下损伤规律同 El Centro 波,篇幅有限故不赘述。

5 结论

本文设计了 5 个结构布置方案,进行了罕遇地震作用下的动力弹塑性时程分析,从结构变形、滞回耗能及损伤角度入手评判结构抗震性能优劣。综上所述,多重抗侧力混合结构支撑布置方案 5 抗震性能最优,方案 4 次之,方案 3 最差。

参考文献 References

- [1] 李国强,周向明,丁翔. 高层建筑钢-混凝土混合结构模型模拟地震振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001,22(2):2-7.
LI Guoqiang, ZHOU Xianming, DING Xiang. Shaking table study on a model of steel-concrete hybrid structure tall buildings [J]. J. of Building Structures, 2001,22(2):2-7.
- [2] 李亮,李国强,汪利. 水平荷载作用下新型钢-混凝土混合结构简化计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(4):1-8.
LI Liang, LI Guoqiang, WANG Li. Simplified algorithm of the multi-lateral resistant steel-concrete mixed structure under lateral load [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013,30(4):1-8.
- [3] 彭观寿,高轩能,陈明华. 支撑布置对钢框架结构抗侧刚度的影响 [J]. 工业建筑, 2008,38(5): 83-88.
PENG Guanshan, GAO Xuanneng, CHEN Minghua. Effects of layout of bracing on lateral stiffness of steel frames [J]. Industrial Construction, 2008, 38(5):83-88.
- [4] 周学军,陈鲁,曲慧. 多、高层钢结构支撑的布置方式对框架侧向刚度的影响[J]. 钢结构, 2003, 18(4): 51-54.
ZHOU Xuejun, CHEN Lu, QU Hui. Effects of layout of braces for multistorey and high-rise steel structures on lateral stiffness of frames[J]. Steel Construction, 2003,18 (4):51-54.
- [5] 刘金,赵林,刘庆梅,等. 屈曲约束支撑布置方式对多层框架抗震性能影响[J]. 建筑结构, 2011(S1):158-161.
LIU Jin, ZHAO Lin, LIU Qingmei, et al. Study on the influences on support layout form to seismic behaviors of the buckling-restrained braces[J]. Building Structure, 2011 (S1): 158-161.
- [6] 黄怡,王元清,石永久. 支撑布置方式对多高层钢结构抗震性能的影响分析[J]. 钢结构, 2005, 20(5): 46-49.

- HUANG Yi, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu. Analysis of seismic behaviors of multistorey and high-rise steel structures with different layout of braces[J]. Steel Construction, 2005,20(5): 46-49.
- [7] 贾明明,张素梅,吕大刚,等. 抑制屈曲支撑布置原则对钢框架抗震性能的影响[J]. 工程力学, 2009,26(7):140-146.
JIA Mingming, ZHANG Sumei, LÜ Dagang, et al. Influence of layout principle of buckling-restrained braces on aseismic performance of steel frame[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(7):140-146.
- [8] 陆铁坚,秦素娟,罗应松,等. 高层钢-混凝土混合结构拟动力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009,30(3):27-35.
LU Tiejian, QIN Sujuan, LUO Yingsong, et al. Pseudo dynamic experimental study on highrise steel-concrete hybrid structure[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(3): 27-35.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ3-2010[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. Technical specification for concrete structures of tall building:JGJ3-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [10] 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. GB50011-2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范:GB50009-2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of housing and urban-rural development of the people's republic of China. Load code for the design of building structures: GB50009-2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [12] American institute of steel construction, inc. Seismic provisions for structural steel buildings ANSI/AISC341-05[S]. Illinois: Chicago, 2005: 84-87.
- [13] ABAQUS Inc. Abaqus theory manual [M]. 2010.
- [14] 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.
- [15] 张劲,王庆扬,胡守营,等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 127-130.
ZHANG Jing, WANG Qingyang, HU Shouying, et al. Parameters verification of concrete damaged plastic model of ABAQUS [J]. Building Structure, 2008, 38(8):127-130.
- [16] 刘哲锋. 地震能量反应分析方法及其在高层混合结构抗震评估中的应用[D]. 湖南: 湖南大学, 2006.
LIU Zhefeng. Energy-based seismic design method and application in seismic evaluation of tall building hybrid structure [D]. Hunan: Hunan University, 2006.

(编辑 吴海西)