

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.01.033

某装配整体式框架结构隔震设计与分析

何雁斌

(福州市建筑设计院, 福建 福州 350011)

摘要: 为了提高装配整体式框架结构的抗震性能和优化预制构件配筋,通过结构方案对比选型,优选出隔震层位于地下室柱顶的基础隔震方案。采用 ETABS 有限元软件建模分析,综合考虑结构的高宽比、隔震层偏心率以及对地下室独立柱嵌固条件等因素进行隔震层设计,并验算隔震层抗风、隔震支座的应力和位移以及上部结构的变形。结果表明:隔震技术能有效降低上部结构的水平地震作用,提高装配整体式框架结构的抗震性能。

关键词: 装配整体式框架结构;基础隔震;抗震性能

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)01—0193—06

Isolation Design and Analysis of a Monolithic Precast Concrete Frame Structure

HE Yanbin

(Fuzhou Architectural Design Institute, Fuzhou, Fujian 350011, China)

Abstract: In order to improve the seismic performance of the monolithic precast concrete frame structure and optimize the reinforcement of the prefabricated members, the base isolation scheme which means the seismic isolation layer should be located on the top of the basement column is selected by comparison of different structural schemes. The finite element software ETABS is used to model and analyze the isolation layer. Considering the aspect ratio of the structure, the eccentricity of the isolation layer and the embedded condition of the independent column in the basement, and examining the wind resistance of the isolation layer, the stress and displacement of the isolation bearing and the deformation of the superstructure. The results show that the isolation technology can effectively reduce the horizontal seismic action of the superstructure and improve the seismic performance of the assembled integral frame structure.

Keywords: monolithic precast concrete frame structure; base-isolated structure; seismic performance

装配式建筑具有工业化生产、施工速度快、节能环保可持续发展等优点,是建筑产业化的发展趋势,国家也陆续出台了一系列的政策,大力推动装配式建筑的发展^[1]。然而国内外多次强震震害调查结果表明,预制装配式框架结构在地震发生时遭受严重破坏甚至倒塌^[2-4]。新发展的隔震技术能够通过延长结构的自振周期减少结构的水平地震作用,在实际地震中表现出的良好抗震性能,已被广泛应用于实际工程中^[5-8]。将隔震技术应用到装配式建筑上是提高其抗震性能的有效手段。

文献[9]通过振动台试验研究了预制混凝土剪

力墙(PCSW)隔震结构的抗震性能,隔震后结构的加速度、层间位移、层间剪力的显著减少。颜磊等^[10]通过对某装配式混凝土剪力墙结构进行有限元非线性分析,结果表明,隔震后的装配式建筑具有良好的抗震性,隔震措施能够显著起到减震的效果,提高结构的安全储备。袁爱珍等^[11]对某高装配率装配整体式框架剪力墙结构进行隔震设计,分析表明,隔震措施能有效地减小上部结构的地震作用和优化主体结构受力构件配筋。谭平等^[12]采用1/2缩尺模型对新型装配式隔震节点进行研究,并与现浇节点进行对比,分析表明,隔震技术能大幅提高装

装配式结构的安全性和抗震性能。

本文采用 ETABS 有限元软件对某高层装配式框架结构进行三维建模,考虑结构的高宽比、隔震层偏心率以及对地下室独立柱嵌固条件等因素进行隔震设计和分析,并验算了隔震层抗风、隔震支座的应力和位移以及上部结构变形等指标。将隔震技术应用到装配式建筑上,为类似工程提供参考案例。

1 工程概况及结构选型

1.1 工程概况

工程建设地点位于福建省沿海地区,为某公司综合办公楼,结构体系为钢筋混凝土装配整体式框架结构,地下室、一层柱为现浇钢筋混凝土结构,二层及以上梁板柱均采用预制构件。总建筑面积约 5 300 m²,建筑总高度 28.50 m。地下一层,底层层高 6.60 m,2 层—5 层高 3.9 m,屋面及机房层层高 3.3 m。建筑平面如图 1、2 所示,结构竖向构件布置如图 3 所示。

本地区抗震设防烈度 7 度(0.15g),50 年一遇基本风压为 0.60 kN/m²。设计地震分组第二组,III 类场地,场地特征周期 0.55 s,按丙类建筑进行抗震设防。

1.2 结构方案选型

根据设防烈度及结构高度分别对抗震方案和隔震方案进行选型。对于抗震方案,结构体系采用框架剪力墙结构;对于采用隔震方案,暂按隔震后降低半度即 7 度 0.10g 试算,两种结构体系典型构件的截面尺寸及混凝土总用量见表 1。

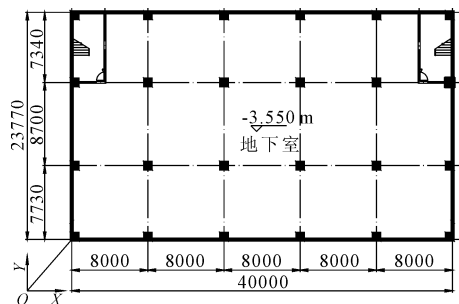


图 1 地下一层平面图

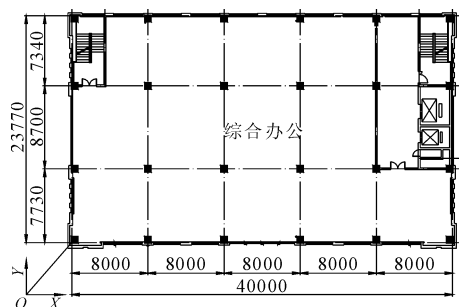


图 2 二层~五层平面图

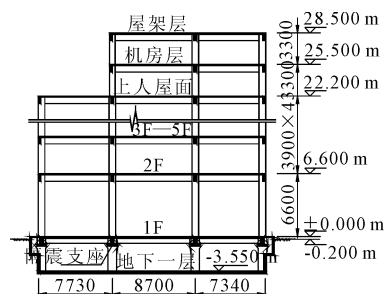


图 3 结构竖向构件布置

表 1 结构构件设计信息

楼层号	板厚/mm	框架梁尺寸/mm × mm		柱子尺寸/mm × mm		剪力墙厚/mm		混凝土量/m ³	
		抗震	隔震	抗震	隔震	抗震	隔震	抗震	隔震
5F 以上	140	400 × 900	300 × 800	700 × 700	600 × 600	400	—	—	—
2F—5F	140	450 × 900	300 × 800	800 × 800	700 × 700	400	—	1773	1454
1F	180	450 × 900	450 × 800	800 × 800	700 × 700	450	—	—	—
地下一层	—	—	—	900 × 900	800 × 800	450	—	385	346

由表 1 可见,采用隔震方案有以下优点:(1)结构体系采用框架结构,无需剪力墙,预制构件种类和模具数量减少,提高构件的生产效率,节省造价;(2)框架梁柱截面变小,相应节点钢筋数量和构件重量减少,方便运输和施工安装;(3)总混凝土用量较抗震方案降低,预制率提高。综上所述,本工程决定采用隔震方案。

2 结构计算模型

采用 ETABS 软件建立结构的三维模型,见图

4。结构模型包括了地下室独立柱、隔震层和上部个结构层。框架梁、柱采用带有塑性铰的 Frame 单元模拟,楼板采用 Slab 单元模拟。隔震支座采用 Isolator1 单元来模拟。层叠橡胶隔震支座(LNR)选用线性恢复力模型,铅芯隔震支座(LRB)选用非线性恢复力模型,隔震支座本构关系见图 5。

3 地震波的选取

依据《建筑抗震设计规范》^[4](GB 5011—2010)

要求,按建筑场地类别和设计地震分组选用 5 条实际强震记录和 2 条人工模拟的加速度时程曲线。地震记录时程曲线见图 6,时程曲线持续时间见表 2,

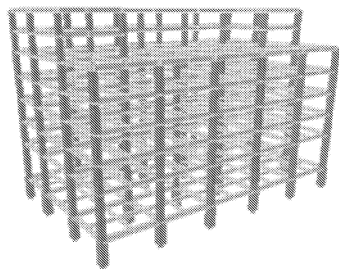


图 4 隔震结构计算模型

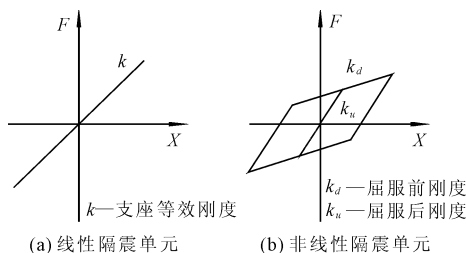


图 5 隔震支座本构关系

7 条地震记录反应谱和规范反应谱曲线见图 7。

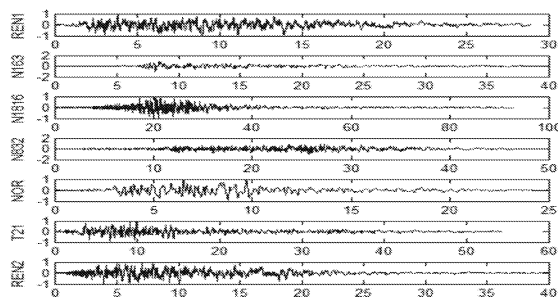


图 6 地震记录时程曲线

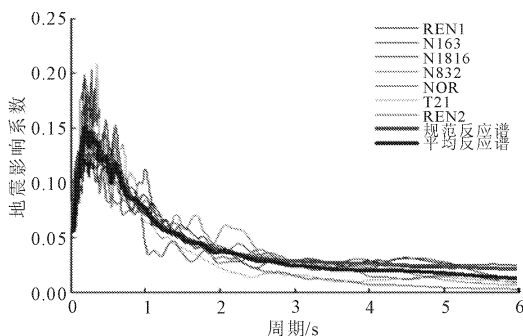


图 7 地震记录反应谱与规范反应谱

表 2 时程反应谱持续时间表

简称	地震波全称	第一次达到该时程曲线最大峰值 10% 对应的时间/s	最后一次达到该时程曲线最大峰值 10% 对应的时间/s	有效持续时间/s	结构周期/s	有效持续时间/结构周期
REN1	0.55S V3	0.835	28.630	27.795	3.048	9.1
REN2	0.55S V4	1.161	33.568	32.407	3.048	10.6
NOR	NORTHRCP106	1.738	21.425	19.687	3.048	6.5
N163	NGA_163IMPVALL. H - CAL_FP	4.504	37.726	33.222	3.048	10.9
N832	NNGA_832LANDERS. ABY_FN	3.543	45.941	42.398	3.048	13.9
T21	taft21	0.643	47.920	47.277	3.048	15.5
N1816	NGA_1816HECTOR. 0534c_FP	7.540	54.820	47.280	3.048	15.5

由表 2、图 7 可见,实际的强震记录和人工模拟波形的有效持续时间为结构基本周期的 6.5 倍 ~ 15.5 倍,地震记录反应谱与规范反应谱接近,结构在主要周期点上相差小于 20%,满足规范^[4]要求。

经验算,上述各条波计算所得基底剪力不小于振型分解反应谱计算结果的 65%,平均值不应小于振型分解反应谱法计算结果的 80%,所选地震波满足要求。

4 隔震支座选型及布置

本项目建筑的平面、立面比较规则,结构高宽比为 1.20(28.5 m/23.77 m),小于规范^[4]高宽比 4 的

限值。为增加地下室净高,满足建筑使用功能,地下室采用不带拉梁独立柱形式,将隔震支座设置在独立柱柱顶,通过加大地下室独立柱的截面尺寸并设置 300 mm 厚度钢筋混凝土地下室外墙等措施,使之满足嵌固的刚度比要求。

根据重力荷载代表值作用下框架柱的轴力,选取 600 mm、700 mm 和 800 mm 三种尺寸的铅芯隔震支座,隔震支座力学性能参数详见表 3,隔震支座编号及布置见图 8。

隔震层刚度中心与质量中心宜重合,设防地震作用下的偏心率不宜大于 3%,隔震层偏心率的计算公式如下^[13-14]:

表 3 隔震支座力学性能参数

类别	竖向刚度 /(kN·mm ⁻¹)	等效水平刚度 ($\gamma = 100\%$) /(kN·mm ⁻¹)	等效阻尼比 ($\gamma = 100\%$)	屈服后刚度 /(kN·mm ⁻¹)	屈服力/kN	数量/个
LRB600	2100	1580	23.0	1010	63	19
LRB700	3250	2070	23.0	1190	113	10
LRB800	3750	2280	23.0	1300	151	3

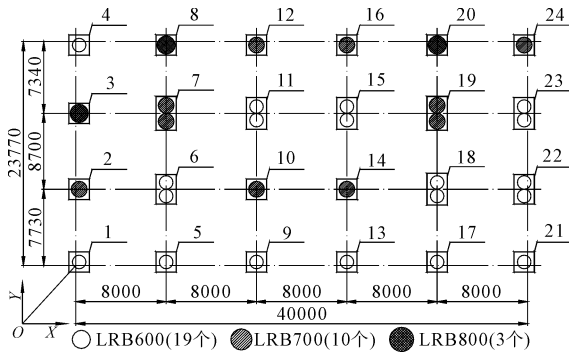


图 8 隔震支座编号及布置图

$$\rho_X = \frac{e_X}{R_X}, \rho_Y = \frac{e_Y}{R_Y} \quad (1)$$

$$R_X = \sqrt{K_t / \sum K_{eX,i}}, R_Y = \sqrt{K_t / \sum K_{eY,i}} \quad (2)$$

式中： e_X, e_Y 为隔震层在 X 向、 Y 向重心与刚心的偏心距； R_X, R_Y 为隔震层的回转半径； $K_t, K_{eX,i}, K_{eY,i}$ 分别为抗扭转刚度和第 i 个隔震支座 X 方向和 Y 方向的等效刚度。

由式(2)可知,偏心率与抗扭转刚度成反比,抗扭转刚度 K_t 越大,偏心率越小。在布置隔震支座时,应尽量将大直径的铅芯支座布置在建筑周边,以增大隔震层的抗扭刚度。本项目隔震层偏心率计算结果见表 4, X 向和 Y 向偏心率均在 3% 以内,满足要求。

表 4 隔震层偏心率

坐标	重心 /m	刚心 /m	偏心距 /m	抗扭转 刚度 K_t	回转半 径/m	偏心率 $\rho/\%$
X 向	27.15	27.28	0.134	13829454	15.5	0.86 < 3
Y 向	16.27	15.95	0.324			2.09 < 3

5 隔震结构地震响应计算分析

5.1 隔震结构模态分析

7 度(0.15g)在设防地震($PGA = 150 \text{ cm/s}^2$)作用下,采用 ETABS 对隔震结构和非隔震结构进行模态分析,两种结构模型前 3 阶振型自振周期如表 5 所示。

表 5 隔震前后结构周期

振型	周期/s		周期放大系数
	非隔震结构	隔震结构	
1	1.36	3.05	2.23
2	1.30	3.04	2.33
3	1.18	2.39	2.02

由表 5 可见,隔震后,结构的自振周期明显变长,第 1 振型周期由隔震前的 1.36 s 延长到隔震后的 3.05 s,放大了约 2.23 倍。扭转周期与平动周期之比由隔震前 0.864 变成 0.784,结构的扭转效应减少。

5.2 水平向减震系数

本项目为高层建筑,按规范^[4]除了要计算隔震与非隔震各层层间剪力的最大比值外,还需要计算隔震与非隔震各层倾覆力矩的最大比值,取二者的较大值。分析非隔震结构与隔震结构在各地震波下的 X, Y 方向层剪力和各层倾覆力矩可见,隔震后,结构底层 X, Y 方向平均剪力分别由 13 377 kN、12 680 kN 降低到 4 328 kN、4 445 kN,减少了 67.4% 和 64.8%;结构底层 X 方向平均倾覆弯矩由 255 868 kN·m 降低到 69 543 kN·m,减少了 72.7%, Y 方向平均倾覆弯矩由 251 095 kN·m 降低到 70 586 kN·m,减少了 71.9%。隔震支座有效减小了地震能量向结构上部的传递。对比隔震前后结构各层剪力、倾覆力矩之比可得,各层的水平向减震系数 β 如表 6 所示。

表 6 水平向减震系数 β

层号	层间剪力比		层间倾覆弯矩比	
	X 向	Y 向	X 向	Y 向
8	0.158	0.149	0.155	0.145
7	0.172	0.170	0.165	0.159
6	0.203	0.198	0.187	0.181
5	0.220	0.221	0.204	0.197
4	0.235	0.243	0.216	0.214
3	0.259	0.271	0.228	0.230
2	0.291	0.305	0.250	0.257
1(隔震层)	0.326	0.352	0.273	0.281
X, Y 向最大值	0.352		0.281	

由表 6 数据对比可知,水平向减震系数 $\beta = 0.352 (0.27 < 0.352 < 0.4)$,隔震后层间剪力和倾覆弯矩大幅度减少,层间剪力至少减少了 64.8%,倾覆弯矩至少减少了 71.9%。隔震后水平地震影响系数最大值 $\alpha_{\max} = \beta \alpha_{\max} / \psi$ 接近 6 度 ($0.05g$) $\alpha_{\max} = 0.04$ 水平,相对于隔震前 $\alpha_{\max} = 0.12$ 水平向地震作用减少 $(0.12 - 0.053) / 0.12 = 55.8\%$ 。

5.3 隔震层验算

在罕遇地震 ($PGA = 310 \text{ cm/s}^2$) 作用下,对隔震结构进行非线性动力时程分析,验算隔震层抗风、隔震支座拉压应力以及位移是否满足规范要求。

5.3.1 隔震层抗风验算

根据规范^[4]12.1.3 条,采用隔震的结构风荷载的产生的总水平力不宜超过结构总重力的 10%。本结构风荷载的产生的总水平力为 1 783.3 kN,总重力为 108 390 kN,风荷载作用下的总水平力仅为总重力荷载的 $1783.3 / 108390 = 1.64\%$,满足要求。

根据《叠层橡胶支座隔震技术规程》^[15] (CECS 126:2001)4.3.4 条规定,抗风装置应按下式进行验算:

$$\gamma_w V_{wk} \leq V_{Rw} \quad (3)$$

式中: V_{Rw} 为隔震支座的水平屈服荷载设计值; V_{wk} 为风荷载作用下隔震层的水平剪力标准值。本工程 $V_{Rw} = 2780 \text{ kN}$; $V_{wk} = 1783.3 \text{ kN}$, $\gamma_w = 1.4$; 即 $\gamma_w V_{wk} = 1.4 \times 1783.3 \text{ kN} = 2496.6 \text{ kN} < 2780 \text{ kN}$,隔震层抗风验算满足要求。

5.3.2 隔震支座屈重比验算

屈重比为隔震支座屈服力之和与上部结构总重力荷载代表值的比值,屈重比越小,减震效果越好,屈重比推荐范围 2% ~ 3%^[13]。

根据 SATWE 计算结果,上部结构总重力荷载代表值为 108 390 kN,隔震层所有铅芯支座的总屈服力为 2 780 kN,屈重比为 $2780 / 108390 = 2.6\%$,屈重比满足要求。

5.3.3 隔震支座水平位移验算

隔震支座的水平位移限值为隔震支座有效直径的 0.55 倍和各橡胶层总厚度 3 倍二者的较小值^[4]。本工程有 LRB600、LRB700、LRB800 三种隔震支座,根据直径最小的 LRB600 支座的直径与橡胶层厚度确定隔震层各支座的水平位移限值 $[u_d] = 336 \text{ mm}$ 。

按规范^[4]12.2.6 条验算各隔震支座在罕遇地震下作用水平位移见图 9,隔震支座水平位移最大值为 154 mm,考虑到隔震层的刚心与上部结构的重心偏差 2.09% (Y 向),乘以放大系数 1.15 倍,

$154 \times 1.15 = 177 \text{ mm}$,仅为水平位移限值 $[u_d]$ 336 mm 的 52.7%。

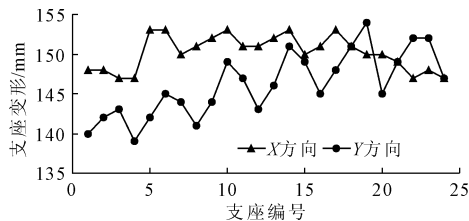


图 9 隔震支座水平位移

5.3.4 隔震支座应力验算

为保证隔震橡胶支座在地震作用下剪切变形后的强度和稳定性,验算支座的长期应力和短期应力。

(1) 长期应力是指支座在重量荷载代表值作用下的平均应力。采用荷载组合: $1.0 \times$ 恒荷载 + 0.5 活荷载,各隔震支座压应力分布见图 10。

(2) 短期应力为隔震支座在长期应力基础上叠加上罕遇地震作用下的竖向压、拉应力。隔震支座短期极大压应力验算采用的荷载组合: $1.0 \times$ 恒荷载 + 0.5 活荷载 + $1.0 \times$ 水平地震,隔震支座短期极小应力验算采用的荷载组合: $1.0 \times$ 恒荷载 $\pm 1.0 \times$ 水平地震,各隔震支座短期应力分布见图 11。

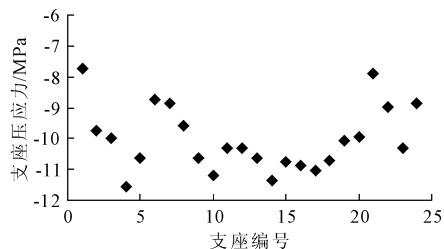


图 10 隔震支座长期应力

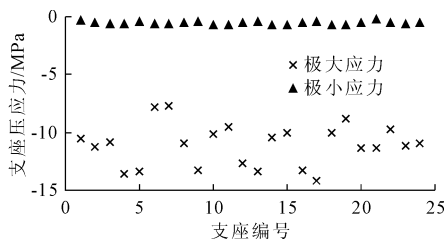


图 11 隔震支座短期应力

由图 10、图 11 可知,隔震支座的长期应力比较均匀,压应力最大值仅为 $11.56 \text{ MPa} \leq 15 \text{ MPa}$,罕遇地震作用下支座压应力极大值为 $14.17 \text{ MPa} < 30 \text{ MPa}$,隔震支座压应力最小值为 0.22 MPa (压),隔震支座未出现拉应力,满足规范^[4]要求。

5.4 上部结构变形

在罕遇地震 ($PGA = 310 \text{ cm/s}^2$) 作用下,隔震后

结构水平方向的变形主要集中在隔震层,上部结构各层的层间位移角最大值 $1/288$,结构的破坏程度处于轻微至中等破坏^[7],能够达到大震不倒的设防目标。而非隔震结构上部各层层间位移角最大值为 $1/125$,有较大的弹塑性变形,已处于中等破坏。隔震层以下,地下室独立柱的位移角为 $1/1881$,完全处于弹性状态。整体结构具备有足够的刚度和抗震承载力,结构具备足够的安全度。

6 结 论

(1) 隔震后结构的水平方向变形主要集中在隔震层,结构具有良好的抗震性,隔震措施能大幅度地提高装配式建筑的安全性能。

(2) 采用隔震措施后,装配式建筑的混凝土用量降低、预制率提高,上部结构截面尺寸和配筋减少,便于预制构件的生产、运输和安装。

(3) 隔震后结构的自振周期延长了 2.23 倍,水平地震影响系数最大值为 0.351,水平向地震作用减少了 55.80%;隔震支座最大水平位移仅为水平位移限值得 52.70%,隔震支座的长期应力比较均匀,隔震支座未出现拉应力。

(4) 在罕遇地震作用下,上部结构各层的层间位移角最大值 $1/288$,结构仅发生轻微至中等破坏;隔震层以下,地下室独立柱的位移角为 $1/1881$,完全处于弹性状态。隔震后结构有足够的抗震承载力和安全度。

参考文献:

- [1] 刘东卫,蒋洪彪,于磊,等.中国住宅工业化发展及其技术演进[J].建筑学报,2012(4):10-18.
- [2] Park R. Seismic design and construction of precast concrete buildings in New Zealand[J]. PCI Journal,2002,47

(5):60-75.

- [3] Korkmaz H H, Tankut T. Performance of a precast concrete beam-to-beam connection subject to reversed cyclic loading[J]. Engineering Structures, 2005, 27(9): 1392-1407.
- [4] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [5] 吴应雄.底层柱顶隔震框架结构设计方法[J].水利与建筑工程学报,2016,14(2):67-72.
- [6] 吴应雄.某工程底层柱顶隔震结构抗震性能评价[J].水利与建筑工程学报,2015,13(5):41-46.
- [7] 林顺建.某幼儿园隔震结构设计与抗震性能分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):146-151.
- [8] 齐杰,孙建琴,李文娟,等.高烈度区多层 RC 框架结构隔震设计与分析[J].特种结构 2018,35(6):66-71,107.
- [9] 王维,李爱群,贾洪,等.预制混凝土剪力墙隔震结构振动台试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(6):35-43.
- [10] 颜磊,张纪刚,石岩,等.装配式混凝土剪力墙隔震结构地震反应模拟分析[J].低温建筑技术,2017,39(9):55-59,62.
- [11] 袁爱珍,卢德辉,张华平,等.某高层装配式建筑隔震分析与设计[J].广东土木与建筑,2018,25(7):28-31.
- [12] 谭平,李洋,匡珍,等.装配式隔震结构中隔震节点抗震性能研究[J].土木工程学报,2015,48(2):10-17.
- [13] 丁洁民,吴宏磊.减隔震建筑结构设计指南与工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [14] 傅金华.日本抗震结构及隔震结构的设计方法[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [15] 叠层橡胶支座隔震技术规程:CECS 126:2001[S].北京:中国工程建设标准化协会标准,2001.