

混合基础隔震预制装配式高层建筑抗震性能

李春祥, 桑增礼, 曹黎媛, 王振洲

(上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要: 为探究多种耗能装置联合的混合基础隔震系统对预制装配式高层建筑的减隔震效果, 提出了联合使用屈曲约束支撑 (BRB)、非线性液体黏滞阻尼器 (NFVD) 和基础隔震系统 (BIS) 的混合基础隔震系统 (BRB+NFVD+BIS)。定义了 BRB 屈服强度与隔震支座屈服强度比 BIR 和 NFVD 总阻尼系数 α 与隔震支座屈服强度比 NIR 两个参数。通过结构-混合基础隔震系统的动力弹塑性地震响应分析, 揭示了 BIR 、 NIR 和 NFVD 参数对设置 BRB+NFVD+BIS 高层建筑抗震性能的影响规律, 并建议了 BIR 、 NIR 和 NFVD 参数的取值范围。结果表明: 与非隔震预制装配式高层建筑相比, BRB+NFVD+BIS 系统可明显提升梁-柱节点抗震性能, 减小上部结构层间位移角和楼层加速度; 与隔震预制装配式高层结构相比, BRB+NFVD+BIS 系统可明显减小隔震层位移, 梁-柱节点抗震性能、上部结构层间位移角和楼层加速度彼此基本接近。因此, BRB+NFVD+BIS 系统具有更好的隔震层位移控制能力。同时, 结果表明 BRB+NFVD+BIS 系统具有更好的减隔震鲁棒性。

关键词: 混合基础隔震; 预制装配式建筑; 屈曲约束支撑; 非线性液体黏滞阻尼器; BIR ; NIR ; 抗震性能

中图分类号: TU352 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202310025

Seismic performance of prefabricated high-rise buildings with hybrid base isolated systems

LI Chunxiang, SANG Zengli, CAO Liyuan, WANG Zhenzhou

(School of Mechanics and Engineering Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The present paper proposes an hybrid base isolation system referred to as BRB+NFVD+BIS, consisting of the buckling restrained braces (BRB), nonlinear fluid viscous dampers (NFVD), and base isolation system (BIS) to study both the damping and isolation effects of the hybrid base isolation system on prefabricated high-rise buildings. Defined are the ratios of both BRB yield strength to base isolation yield strength and the total damping index of NFVD to base isolation yield strength, respectively designate as BIR and NIR . Based on the dynamic elastic-plastic seismic response analysis of the corresponding systems, the effects of BIR , NIR , and NFVD parameters on the seismic performance of BRB+NFVD+BIS tall buildings have been revealed, and the ranges of BIR , NIR , and NFVD parameters are suggested. Results demonstrate that with respect to the non-isolated prefabricated high-rise buildings, the BRB+NFVD+BIS system can significantly enhance the seismic performance of beam-column connections, reduce both the inter-story drift ratios and floor accelerations of the superstructure. Compared with the base-isolated prefabricated high-rise structures, the BRB+NFVD+BIS system substantially reduces base isolation layer displacement while maintaining almost the same seismic performance to each other in terms of the beam-column connections, inter-story drift ratios, and floor accelerations. Therefore, the BRB+NFVD+BIS system processes better displacement control ability of isolation layer. Simultaneously, the results show that the BRB+NFVD+BIS system has better robustness of both the seismic mitigation and isolation.

Keywords: hybrid base isolation; prefabricated buildings; buckling restrained braces; nonlinear fluid viscous dampers; BIR ; NIR ; seismic performance

预制装配式建筑由于施工质量高、实施方便快捷,可以减少投资和运营间的时间差距^[1]。在实施中,预制混凝土结构会遇到一个重要问题,即如何将预制梁构件更合理地连接到柱上。以往地震经验表明:在预制装配式建筑中,梁-柱节点对其抗震性能的影响不可忽视;在强烈地震作用下,预制装配式建

筑由于其连接部位(预制节点核心区)的脆性破坏可能致使其失去承载能力,而这时其框架构件的塑性变形未充分发展,地震能量不能被有效的消耗^[2]。使用基础隔震技术可以提升预制节点核心区和预制装配式建筑整体抗震性能。基础隔震系统(BIS)的基本原理^[3]为:通过在上部结构和基础之间插入侧向

柔性隔震层延长上部结构自振周期,从而降低传递到上部结构的地震能量,减小上部结构地震作用。因此,BIS降低了结构层间位移角和楼层加速度。显然,隔震策略的主要目标是通过减小转移到上部结构的地震作用实现更有效、更经济的抗震设计。近年来,结构减/隔震技术得到了广泛应用,国内外都相继出现了很多减隔震建筑^[4]。LI等^[5]研发出了一种由叠层橡胶支座和X型钢阻尼器组成的公路桥梁隔震系统,结果表明X型钢阻尼器能够有效抑制支座位移且对桥墩损伤较小。陈瑞生等^[6]对隔震层设置黏滞阻尼器的混合基础隔震系统进行了研究,结果表明黏滞阻尼器能有效减少隔震层位移。KHEDMATGOZAR等^[7]研究了由叠层橡胶支座和黏滞阻尼器混合组成的VD-LRBP系统,结果表明该系统可以有效提升桥梁的抗震性能。MOHEBBI等^[8]研究了设置液体黏滞阻尼器的基础隔震结构抗震性能,发现在远场和近场地震作用下混合隔震框架均能达到设计性能水准。

尽管已有许多减隔震建筑在地震作用下表现出良好减隔震性能,然而,在BIS设计中,仍然面临如下设计难题。隔震层设计需要经过繁琐迭代过程,因而效率低下;传统隔震技术可以减小主体结构地震反应,但同时也放大了隔震层位移,在大震作用下,若隔震层位移过大,则易于导致隔震支座破坏^[9]。此外,在隔震技术应用较多的一些国家往往把隔震技术和减震技术联合使用,以达到将隔震装置和减震装置优势相结合的目的^[10-11]。然而,在这些研究中,基于单一类型耗能装置的混合BIS研究较多,但对于减隔震装置参数研究较少,并且基于多种耗能装置联合的混合BIS研究较少。近年来,随着经济的发展,在一些人口相对密集的经济发达地区,预制装配式高层建筑得到了飞速的发展。但对于布置减隔震装置的预制装配式高层建筑的抗震性能研究相对较少,因而减隔震技术在预制装配式高层建筑中的应用研究日益被关注。为此,本文联合使用多种

耗能装置,开展混合基础隔震预制装配式高层建筑的抗震性能研究,主要包括基于混合耗能装置基础隔震的高层建筑性能与基于混合耗能装置基础隔震的预制装配式高层建筑性能研究,具体研究框架如图1所示。

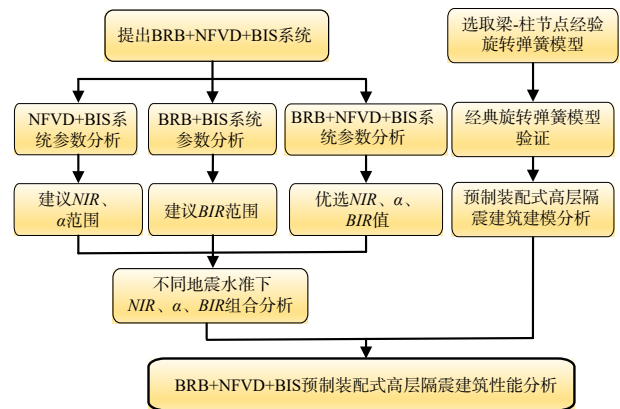


图1 结构-混合基础隔震系统研究框架

Fig.1 Research framework of the structure-hybrid base isolated system

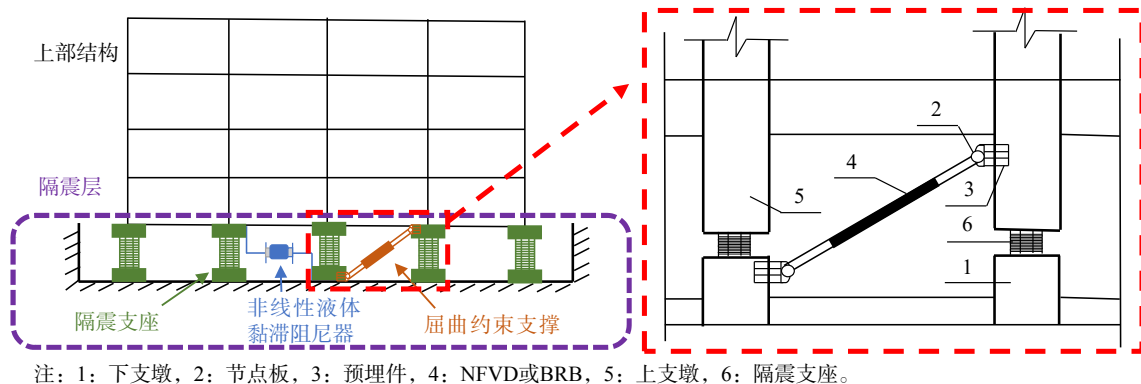
1 BRB+NFVD+BIS系统

BRB+NFVD+BIS系统由BRB、NFVD和BIS联合使用组成,在该混合基础隔震系统中,BRB、NFVD和BIS并联布置在隔震层,其物理模型如图2所示。如图2放大部分所示,BRB+NFVD+BIS系统由隔震支座、NFVD和BRB组成,当只布置NFVD时形成NFVD+BIS系统,只布置BRB时形成BRB+BIS系统,NFVD和BRB在隔震层的安装方式如图2所示。

2 BRB+NFVD+BIS系统参数研究

2.1 结构模型

为研究BRB+NFVD+BIS系统的相关参数,本节首先研究高层钢筋混凝土框架建筑。建筑设计



注: 1: 下支墩, 2: 节点板, 3: 预埋件, 4: NFVD或BRB, 5: 上支墩, 6: 隔震支座。

图2 BRB+NFVD+BIS系统物理模型

Fig.2 Physical model of BRB+NFVD+BIS system

使用年限为 50 年, 抗震设防类别为乙类, 工程抗震设防烈度为 8 度, 结构阻尼比为 0.05, 设计地震加速度为 0.20g, 场地特征周期为 0.55 s, 设计地震分组为第二组, 建筑物场地土类别为二类, 设防地震下地震影响系数 $\alpha_{max}=0.45$ 。该建筑上部结构为 10 层, 每层层高为 3.6 m, 采用基础隔震形式, 在底层柱底布置隔震支座。框架结构混凝土等级为 C30, 纵筋采用 HRB335, 柱截面为 900 mm×900 mm, 柱配筋选用 12Φ22, 梁截面从上到下为 300 mm×900 mm 到 250 mm×700 mm 不等, 楼板厚 130 mm, 结构底层平面图如图 3 所示, 结构三维模型如图 4 所示。根据《建筑抗震设计规范》^[12] 的相关要求和建议, 隔震层隔震支座布置如图 5 所示。选用的基础隔震支座主要参数如表 1 所示, 以 BRB 屈服强度和 NFVD 阻尼系数为变量来研究 NIR 和 BIR 的取值, 并将 NIR 、 BIR 与阻尼指数共同作为变量来研究其对结构抗震性能的影响。

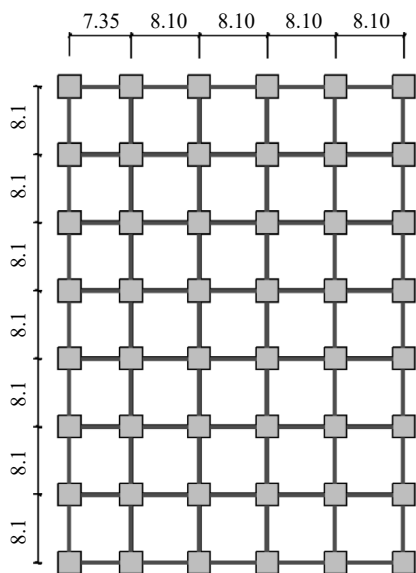


图 3 结构底层平面图(单位: m)

Fig. 3 Structural ground floor plan (Unit: m)

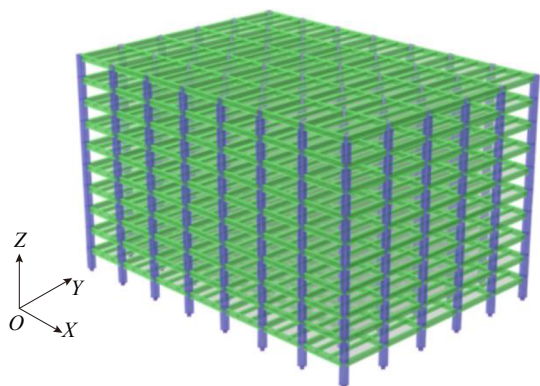


图 4 结构三维模型

Fig. 4 3D model of structure

2.2 NFVD+BIS 系统参数研究

在隔震层布置 NFVD, 形成 NFVD+BIS 系统, 改

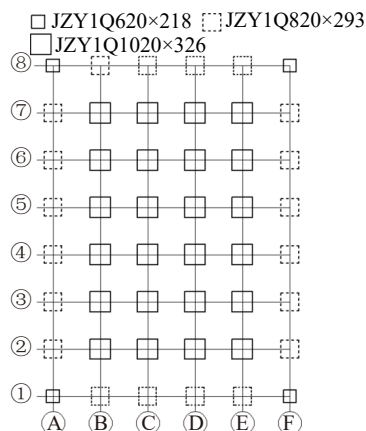


图 5 隔震支座布置

Fig. 5 Layout of isolation bearings

表 1 基础隔震支座主要参数

Tab. 1 Main parameters of base isolation bearings

支座规格	支座承载力/kN	铅芯屈服力/kN	屈服前刚度/(kN·mm ⁻¹)	屈服后刚度/(kN·mm ⁻¹)
JZY1Q1020×326	7854	257	20.90	1.91
JZY1Q820×293	5027	163	16.81	1.53
JZY1Q620×218	2827	90	12.68	1.15

变 NFVD 参数和 NIR , 对结构进行非线性动力分析, 并以隔震层位移、结构最大层间位移和结构顶层位移为评价指标, 将三者量化为与 NIR 和 NFVD 阻尼指数 α 相关的函数, 三维结果如图 6~8 所示, 并绘出等高线如图 9~11 所示。

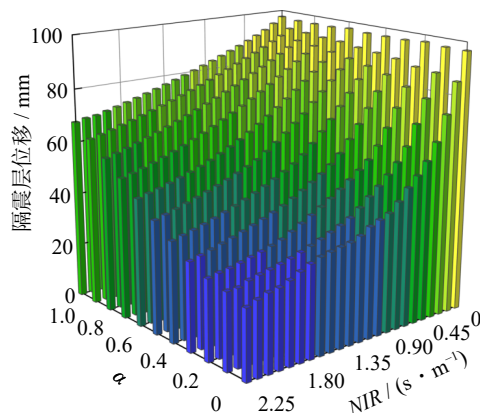


图 6 隔震层位移变化趋势

Fig. 6 Variation trend of displacement of isolation layer

图 6 给出了隔震层位移随 NIR 和 α 的变化趋势。随着 NIR 的增大, 隔震层位移逐渐减小。这是因为当 NIR 增大时, NFVD 在隔震层的出力增大, 耗能能力增加。 α 越小, 隔震层位移随着 NIR 减小的趋势越明显; 为充分发挥 NFVD 减小隔震层位移的作用, 建议选择 $\alpha < 0.4$ 。图 7 给出了结构最大层间位移随 NIR 和 α 的变化趋势。由图 7 可知, 当 α 较小时, 随着 NIR 的增大, 上部结构最大层间位移逐渐增大, 且增大趋势比较明显, 但随着 α 的增大, 这种趋势逐渐

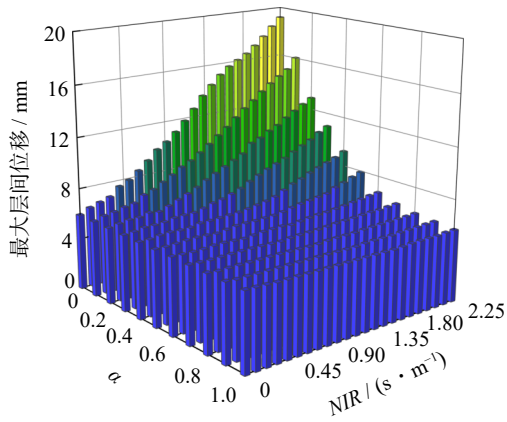


图 7 结构最大层间位移变化趋势

Fig. 7 Variation trend of maximum interstory displacement of structure

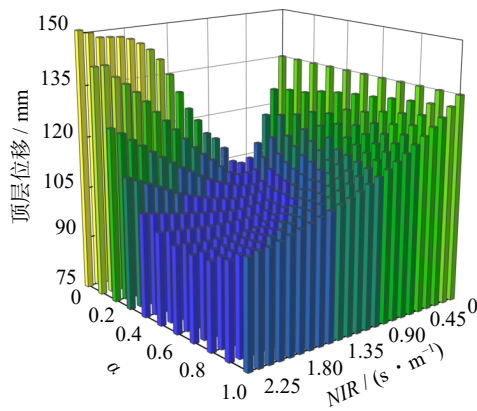


图 8 结构顶层位移变化趋势

Fig. 8 Variation trend of displacement of the top floor of structure

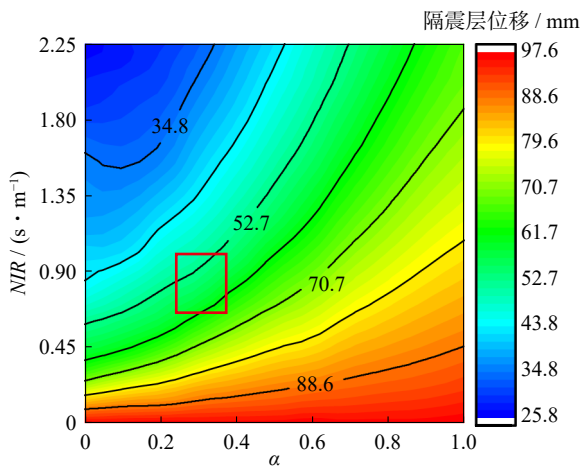


图 9 隔震层位移等高线

Fig. 9 Contours of displacement of isolation layer

减小。这是因为当 α 逐渐增大时, NFVD 在隔震层的耗能能力越来越强, 传递给上部结构的地震能量变得很小。图 8 给出了结构顶层位移随 NIR 和 α 的变化趋势。当 α 较大时, 结构顶层位移随着 NIR 的增大而减小, 且当 α 减小到一定值时, 结构顶层位移随着 NIR 的增大先减小后增大。但无论 α 取何值, 结构顶层位移达到的极小值峰值相差不大。

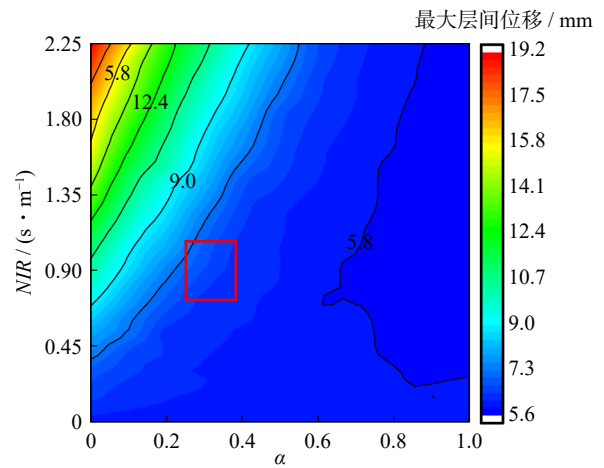


图 10 结构最大层间位移等高线

Fig. 10 Contours of maximum interstory displacement of structure

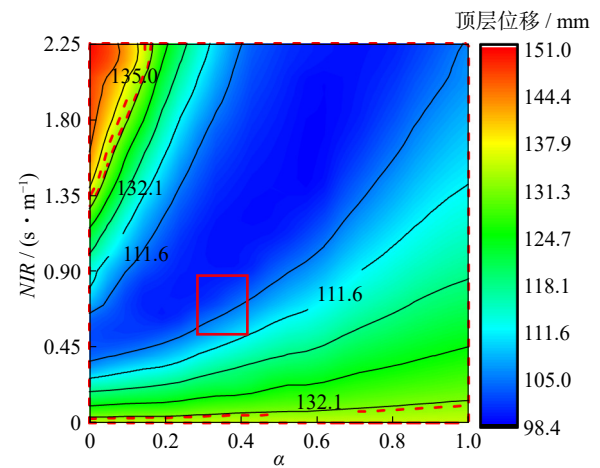


图 11 结构顶层位移等高线

Fig. 11 Contours of displacement of the top floor of structure

图 9~11 分别给出了隔震层位移等高线、结构最大层间位移等高线和结构顶层位移等高线。经计算得: 非隔震结构的最大层间位移为 19.4 mm, 顶层位移为 132.1 mm; 隔震结构的最大层间位移为 5.86 mm, 顶层位移为 135.0 mm, 隔震层位移为 97.2 mm。由图 9 可以看出, 97.2 mm 等高线位置不在图中, 表明与隔震结构相比, 布置 NFVD 对减小隔震层位移无不利影响。由图 10 可知, 5.86 mm 等高线位置和 19.4 mm 等高线位置均不在图中, 说明与隔震结构相比, 适当调整 NIR 和参数 α 虽可适当减小结构最大层间位移, 但几乎与隔震结构层间位移相同。由图 11 可以看出, 132.1 mm 等高线位置和 135.01 mm 等高线位置在图中, 如图 11 中红色虚线所示, 意味着当 NIR 和参数 α 取值不当时, 布置 NFVD 的隔震结构顶层位移甚至超过未布置 NFVD 的隔震结构顶层位移。

对比图 9~11 可以发现, 当 α 很小且 NIR 很大时, 隔震层位移会减小到很小, 但此时结构最大层间位移和顶层位移会变得很大, 并且隔震层位移相邻等高线间距很宽, 说明此时隔震层位移减小速率很缓

慢,此时通过调整参数减小隔震层位移的效果较差;而结构最大层间位移和顶层位移相邻等高线间距很窄,表明此时对参数 α 和 NIR 进行较小的调整都会对最大层间位移和顶层位移产生很大的影响,因此,选择合适的 NIR 和 α 是必要的。通过仔细分析图 9~11,当 $\alpha>0.2$ 时,可避免对上部结构产生很大的不利影响。在 $\alpha>0.2$ 时,随着 NIR 的增大,隔震层位移变化趋势为先迅速下降,然后趋于平缓;结构最大层间位移变化趋势为先趋于平缓,然后迅速上升。以隔震层位移刚达到下降平缓段和结构最大层间位移未明显增加为准则, NIR 的取值范围为 0.5~1.0,此时结构顶层位移也刚好处在最小峰值阶段。

综上所述, α 和 NIR 的取值范围分别为 0.2~0.4 和 0.5~1.0, 分别如图 9~11 中的红色方框所示。

2.3 BRB+BIS 系统参数研究

在隔震层布置 BRB,通过改变 BIR 和结构进行非线性动力分析,对隔震层位移、结构最大层间位移和结构顶层位移进行评估,比较结果如图 12~14 所示。图 12 给出了布置 BRB 后隔震层位移与结构最大层间位移随 BIR 的变化趋势。图 12 中, μ_i 为隔震层位移, μ_f 为结构最大层间位移, μ_{in} 为未布置 BRB 时隔震层位移, μ_{if} 为未布置 BRB 时结构最大层间位移, μ_{io} 为非隔震结构最大层间位移。图 13 给出了布置 BRB 后隔震层位移与上部结构最大位移(相对隔震层顶部)随 BIR 的变化趋势。图 13 中, μ_s 为结构最大位移, μ_{sn} 为未布置 BRB 时隔震结构上部结构最大位移, μ_{so} 为非隔震结构上部结构最大位移。图 14 为布置 BRB 后隔震层位移与最大顶层位移(相对地面)随 BIR 的变化趋势。图 14 中, μ_m 为结构最大顶层位移, μ_{mn} 为未布置 BRB 时隔震结构最大顶层位移, μ_{mo} 为非隔震结构最大顶层位移。由图 12~14 可知,随着

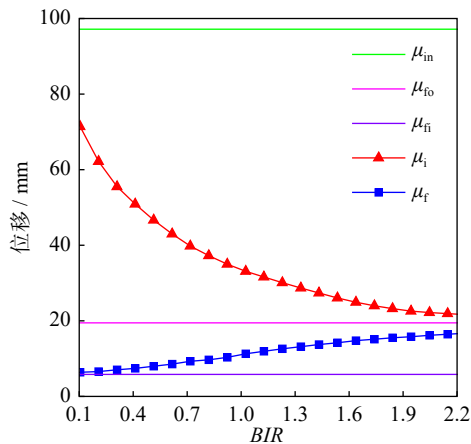


图 12 隔震层位移与结构最大层间位移随 BIR 的变化趋势
Fig. 12 Variation trend of isolation layer displacement and structural maximum inter-story displacement with BIR

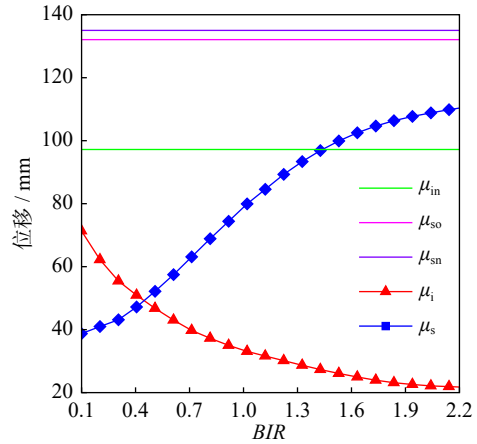


图 13 隔震层位移与上部结构最大位移随 BIR 的变化趋势
Fig. 13 Variation trend of isolation layer displacement and superstructural maximum displacement with BIR

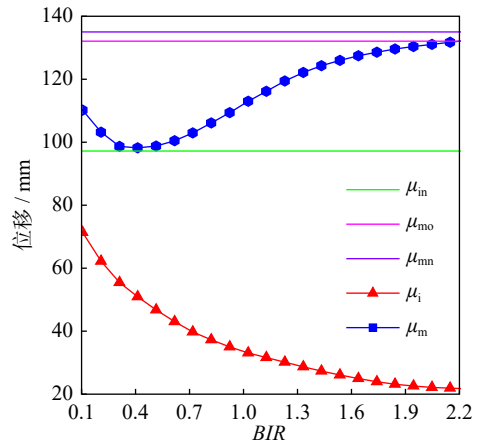


图 14 隔震层位移与结构最大顶层位移随 BIR 的变化趋势
Fig. 14 Variation trend of isolation layer displacement and structural maximum top floor displacement with BIR

BIR 的增大,隔震层位移先迅速减小并趋于平缓;结构最大层间位移逐渐增大,并逐渐接近未设置 BRB 时结构最大层间位移;结构最大顶层位移呈现先减小后增大的趋势,而上部结构最大位移逐渐增大。重要的是,当 BIR 在 0.20~1.00 范围内时, BRB 在有效减小隔震层位移的同时又保证结构不产生过大位移。

2.4 BRB+NFVD+BIS 系统参数对结构的影响

前文分别对 NFVD+BIS 系统和 BRB+BIS 系统进行非线性动力分析,得出了合理的 NIR 、 α 和 BIR 取值范围。本节在隔震层同时布置 NFVD 和 BRB 而形成 BRB+NFVD+BIS 系统,具体方法:首先优选 $NIR=0.92$ 、 $\alpha=0.2$ 和 $BIR=0.92$,计算布置 NFVD+BIS 系统与 BRB+BIS 系统的隔震层位移;然后在隔震层同时布置 BRB 和 NFVD,并将 BIR 和 NIR 减半,均取为 0.46,研究混合系统在不同地震水准下隔震层位移变化行为,隔震层位移和基底剪力分别如表 2 和 3 所示。根据规范要求^[12],在罕遇地震作用下,隔震层支座位移不应大于支座直径的 0.55 倍和各层橡胶厚度之和的 3.0 倍

这二者之中的较小值。经计算其限值为 275 mm, 满足要求。隔震支座的最大压应力为 7.17 MPa, 小于限值 24 MPa, 罕遇地震作用下支座承受的拉应力均小于 1 MPa, 满足规范要求。由设防地震情况可知, 当 $BIR+NIR=0.92$ 时, BRB+NFVD+BIS 系统对隔震层位移的限制效果与单一布置方案的效果相近。多遇地

震作用下, 布置 BRB 会减弱隔震层位移限制效果, 但布置 NFVD 和 BRB+NFVD+BIS 系统下仍有很好的效果。在罕遇和极罕遇地震作用下, 铅芯橡胶支座选用 250% 剪应变对应的参数。对比发现, 在罕遇和极罕遇地震作用下, NFVD 会减弱隔震层位移限制效果, 但 BRB 和 BRB+NFVD+BIS 系统效果依然很好。

表 2 不同地震水准下的隔震层位移

Tab. 2 Displacement of isolation layer under different levels of earthquakes

系统	多遇地震		设防地震		罕遇地震		极罕遇地震	
	隔震层位移/mm	比值/%	隔震层位移/mm	比值/%	隔震层位移/mm	比值/%	隔震层位移/mm	比值/%
隔震结构	22.97	100.00	97.22	100.00	288.64	100.00	524.74	100.00
BRB	19.50	84.88	37.27	38.34	114.87	39.82	212.51	40.50
NFVD	5.53	24.07	51.85	53.34	155.78	53.97	300.24	57.22
BRB+NFVD+BIS	6.70	29.18	40.12	41.27	127.28	44.10	243.88	46.48

表 3 不同地震水准下的基底剪力

Tab. 3 Base shear force under different levels of earthquakes

系统	多遇地震		设防地震		罕遇地震		极罕遇地震	
	基底剪力/kN	比值/%	基底剪力/kN	比值/%	基底剪力/kN	比值/%	基底剪力/kN	比值/%
隔震结构	12913	100.00	17635	100.00	26520	100.00	36081	100.00
BRB	18146	140.53	28713	162.82	31902	120.29	37367	103.56
NFVD	14510	112.37	21706	123.08	26529	100.03	33116	91.78
BRB+NFVD+BIS	16149	125.06	23019	130.53	28917	109.04	34396	95.33

综上, 当地震强度较小时, NFVD 对隔震层位移的限制效果较好; 当地震强度较大时, BRB 对隔震层位移的限制效果较好; 而 BRB+NFVD+BIS 系统在四种地震水准下均对隔震层位移有较好的限制效果, 表明 BRB+NFVD+BIS 系统具有较好的鲁棒性, 并且在大幅减小隔震层位移的同时, 基本不会增大结构基底剪力。

制节点, 点 D、E、F 为其他节点, 其中, 点 B 为内部节点, 点 A 和 C 为外部节点。为验证 ADIBI 等^[13-15]提出的经验旋转弹簧模型的准确性, 本文对试验和模拟的梁-柱节点响应进行了比较。具体方法为: 根据 BAHRAMI 等^[16]的试验, 建立对应的有限元模型, 如

3 BRB+NFVD+BIS 预制装配式高层建筑抗震性能

3.1 预制装配式高层建筑结构模型

将 BRB+NFVD+BIS 系统应用于预制装配式高层建筑, 其底层平面图如图 15 所示, 三维有限元模型如图 16 所示, 隔震支座布置如图 17 所示。

3.2 预制建筑梁-柱节点经验旋转弹簧模型

对预制梁-柱节点建模, 本文采用 ADIBI 等^[13-15]提出的经验旋转弹簧模型, 考虑预制建筑在梁端开裂, 梁-柱相交部分为刚性区域。通过在柱边与梁端交接处添加零长度单元来模拟预制接头, 预制梁-柱主体部分采用 NonlinearBeamColumn 单元建模。简化模型如图 18 所示, A、B、C 三个节点被模拟成预

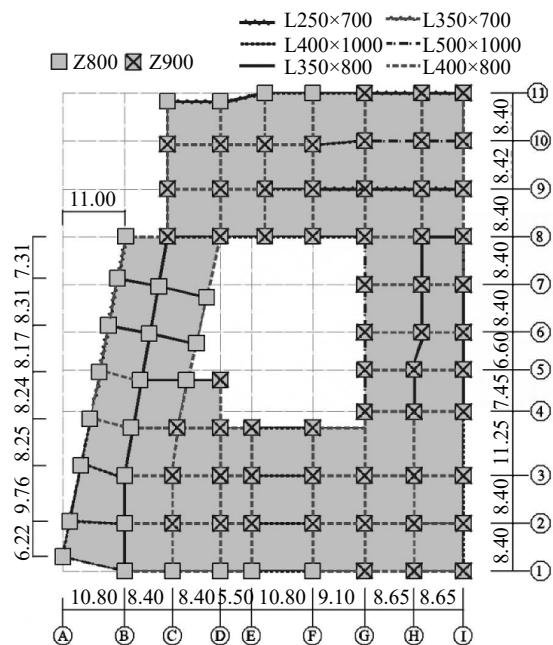


图 15 预制装配式高层建筑底层平面图(单位: m)

Fig. 15 Ground floor plan of prefabricated high-rise building (Unit: m)

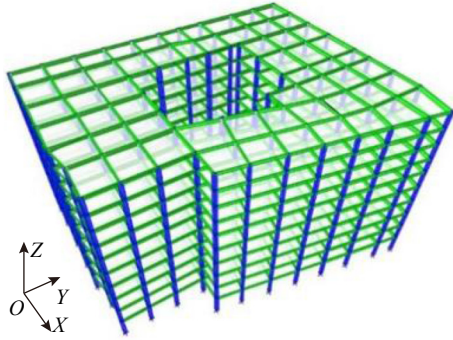


图 16 预制装配式高层建筑三维模型

Fig. 16 3D model of prefabricated high-rise building

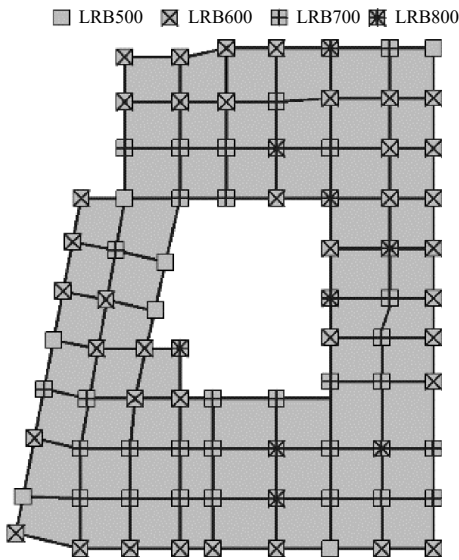


图 17 隔震支座布置

Fig. 17 Layout of isolation bearings

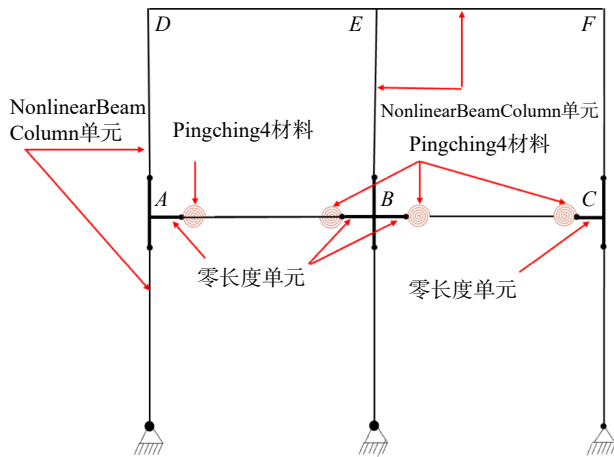


图 18 预制梁-柱简化模型

Fig. 18 Simplified model of prefabricated beams and columns

图 19 所示;在柱顶部施加位移控制荷载 Δd , 对应试验施加到柱高比 4.5% 的往复循环荷载, 如图 20 所示; 试验与数值模拟结果对比如图 21 所示。由图 21 可知, 试验结果和数值模拟结果比较吻合, 表明 ADIBI 等^[13-15] 提出的经验旋转弹簧模型可以很好地模拟预制节点滞回性能。

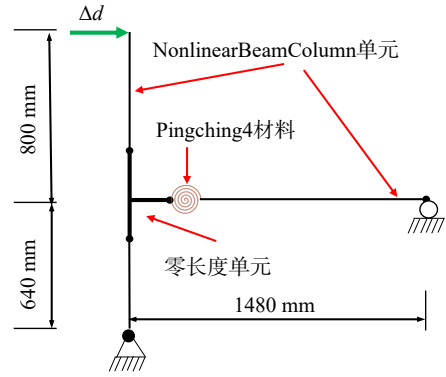


图 19 试验结构的有限元模型

Fig. 19 Finite element model corresponding to the experimental structure

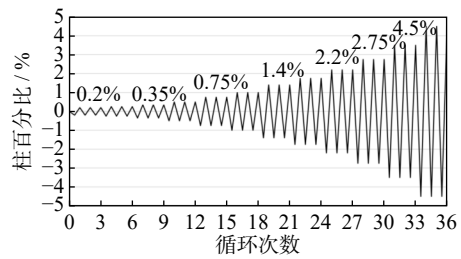


图 20 循环位移荷载

Fig. 20 Load under cyclic displacement

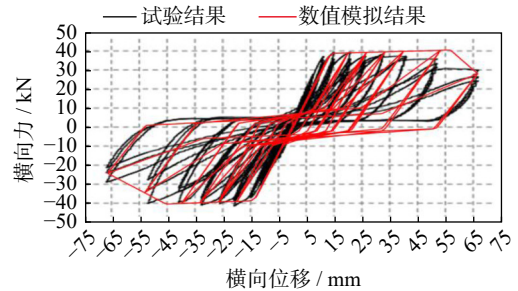


图 21 试验与数值模拟结果对比

Fig. 21 Comparison of experimental and numerical simulation results

3.3 BRB+NFVD+BIS 预制建筑抗震性能

本节研究 BRB+NFVD+BIS 预制装配式高层建筑在近场非脉冲、近场脉冲和远场三种地震作用下的抗震性能, 地震波加速度反应谱与目标谱(规范谱)对比如图 22 所示。对预制装配式非隔震建筑、预制装配式隔震建筑和 BRB+NFVD+BIS 预制装配式建筑的抗震性能进行比较。图 23 给出了三种建筑在不同地震波作用下结构层间位移角、楼层绝对加速度和右下外角柱剪力的对比图。图 23 中, 预制代表预制装配式非隔震建筑, 预制隔震代表预制装配式隔震建筑, BRB+NFVD+BIS 代表 BRB+NFVD+BIS 预制装配式建筑; 均值分别代表近场非脉冲地震、近场脉冲地震和远场地震三种地震波平均值。由图 23 发现, 与预制装配式非隔震建筑相比, 预制装配式隔震建筑和 BRB+NFVD+BIS 系统预制装配式建筑层

间位移角、楼层绝对加速度和剪力都明显减小。将 BRB+NFVD+BIS 系统预制装配式建筑与预制装配式隔震建筑进行对比, 发现在隔震层布置减震装置后, 上部结构层间位移角和楼层加速度增大, 但不明显。通过对比 BRB+NFVD+BIS 系统预制装配式建筑与预制装配式隔震建筑的隔震层位移(如表 4 所示)发现, BRB+NFVD+BIS 系统预制装配式建筑可显著减小隔震层位移。同时, 表 5 给出了 SAP2000 和 OpenSees 对模型模拟的数据误差对比。由表 5 可以看出, 本文建立的模型是合理可信的。

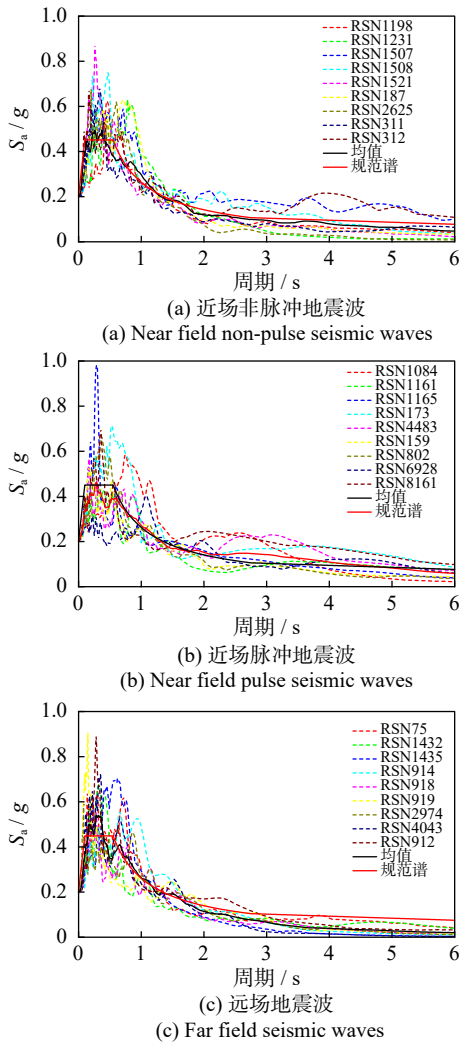


图 22 加速度反应谱与目标谱对比

Fig. 22 Comparison of acceleration response spectra and target spectra

图 24 给出了图 15 中 2 轴所对应一榀框架的计算结果, 其中 IO 阶段、LS 阶段和 CP 阶段分别为立使用阶段、生命安全阶段和防止倒塌阶段, CD 阶段为极限承载状态。由图 24 可以看出设防地震、罕遇地震、极罕遇地震作用下梁塑性铰的形成状况, 反映构件的弹塑性发展。

为更进一步验证 BRB+NFVD+BIS 系统效果, 将 BRB+NFVD+BIS 预制装配式高层建筑与非隔震预制

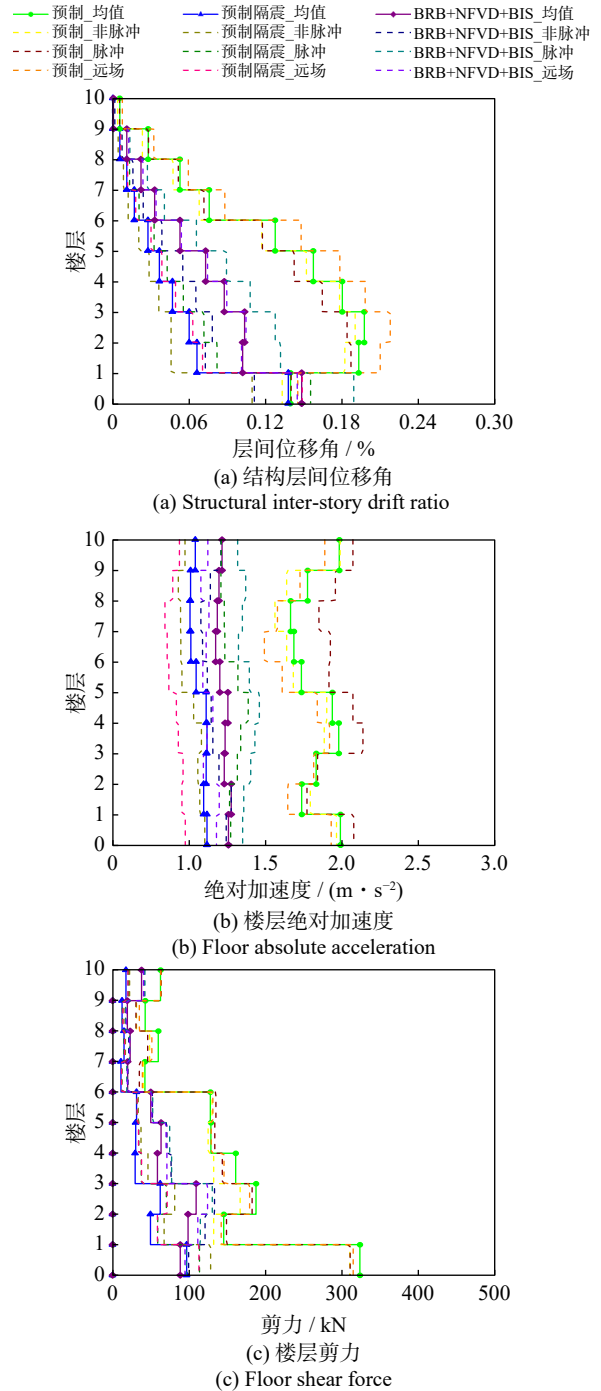


图 23 预制建筑层间位移角、楼层绝对加速度和楼层剪力
Fig. 23 Inter-story drift ratio, floor absolute acceleration and floor shear force of prefabricated building

表 4 设防地震作用下隔震层位移对比(单位: mm)

Tab. 4 Comparison of isolation layer displacement under the design basic earthquake (Unit: mm)

系统	近场脉冲波	近场非脉冲波	远场波	均值
预制装配式隔震建筑	50.05	89.09	60.13	66.42
BRB+NFVD+BIS 预制	33.83	52.84	38.87	41.84

装配式结构和隔震预制装配式结构预制节点的滞回曲线进行对比。选取建筑右下角柱梁端预制节点, 对应梁截面尺寸为 L400 mm×800 mm。分别选择一条近场非脉冲、近场脉冲、远场地震波绘制预制节

表5 设防地震作用下 BRB+NFVD+BIS 预制建筑的不同软件结果

软件	层间位移/mm									
	1层	2层	3层	4层	5层	6层	7层	8层	9层	10层
SAP2000	49.5	54.2	59.2	63.4	66.9	69.4	70.7	71.7	72.2	72.2
OpenSees	50.8	56.3	61.9	66.6	70.6	73.4	74.9	76.0	76.5	76.6
误差	1.2	2.0	2.7	3.2	3.7	4.0	4.2	4.3	4.4	4.4

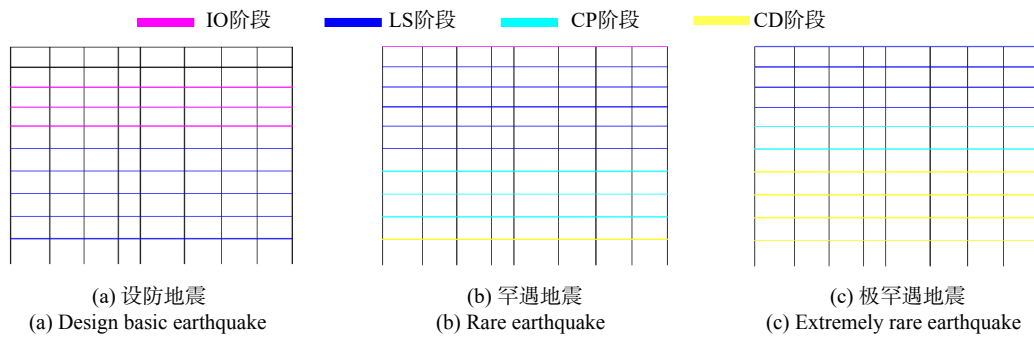


图24 结构塑性发展

Fig. 24 Structural plasticity development

点滞回曲线,如图25所示。图中预制非隔震、预制隔震和 BRB+NFVD+BIS 预制分别代表预制装配式非隔震建筑、预制装配式布置隔震装置建筑和选取合理 BRB+NFVD+BIS 系统参数的 BRB+NFVD+BIS

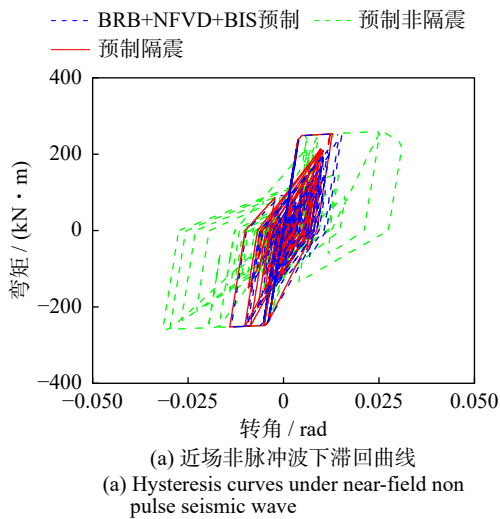
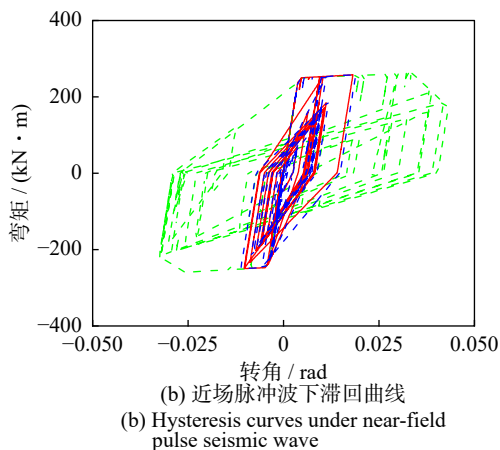
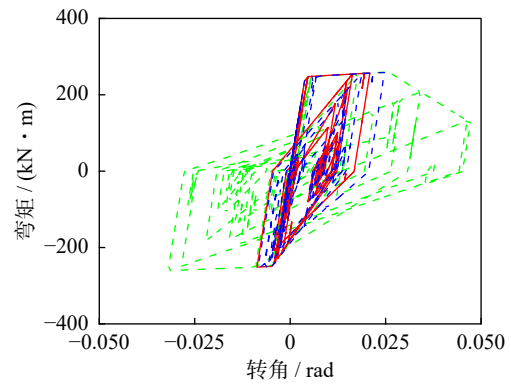
(a) 近场非脉冲波下滞回曲线
(a) Hysteresis curves under near-field non-pulse seismic wave(b) 近场脉冲波下滞回曲线
(b) Hysteresis curves under near-field pulse seismic wave(c) 远场波下滞回曲线
(c) Hysteresis curves under far-field seismic wave

图25 预制节点滞回曲线

Fig. 25 Hysteresis curves of prefabricated nodes

预制装配式建筑。由图25可知,与预制非隔震装配式高层建筑相比, BRB+NFVD+BIS 预制装配式高层建筑节点处转角和弯矩都明显减小,可避免预制节点破坏,表明 BRB+NFVD+BIS 系统可显著提升预制装配式高层建筑梁-柱节点的抗震性能;与隔震预制装配式高层建筑在预制节点处的转角和弯矩接近。

4 结论

本文在混合基础隔震系统和提升预制装配式高层建筑抗震性能两方面开展了研究。在混合基础隔震系统方面,提出了联合使用 BRB 和 NFVD 的 BRB+NFVD+BIS 系统;在预制装配式高层建筑抗震性能提升方面,提出了 BRB+NFVD+BIS 预制装配式高层建筑体系。主要结论如下:

(1) 提出了 BRB+NFVD+BIS 系统,定义了 BRB 屈

服强度与隔震支座屈服强度比 BIR 以及 $NFVD$ 总阻尼系数与隔震支座屈服强度比 NIR , 分别建立了 $NFVD+BIS$ 系统、 $BRB+BIS$ 系统和 $BRB+NFVD+BIS$ 系统三种模型, 揭示了 BIR 、 NIR 、 $NFVD$ 参数对设置 $BRB+NFVD+BIS$ 高层建筑抗震性能的影响规律, 并建议了 BIR 、 NIR 以及 $NFVD$ 参数的取值范围: BIR 取为 0.2~1.0、 NIR 取为 0.5~1.0、 $NFVD$ 参数取为 0.2~0.4。

(2) 与 $NFVD+BIS$ 系统、 $BRB+BIS$ 系统相比, 在多遇地震、设防地震、罕遇地震和极罕遇地震作用下 $BRB+NFVD+BIS$ 系统均能发挥更好的减隔震性能, 表明 $BRB+NFVD+BIS$ 系统具有更好的鲁棒性。

(3) 在近场脉冲、近场非脉冲和远场地震作用下, 与非隔震预制装配式高层建筑相比, $BRB+NFVD+BIS$ 系统明显提升了预制装配式高层建筑梁-柱节点的抗震性能, 减小了上部结构层间位移角和楼层绝对加速度; 与预制装配式隔震结构相比, $BRB+NFVD+BIS$ 系统明显减小了隔震层位移, 提高了节点抗震性能, 而层间位移角和楼层绝对加速度接近。

因此, $BRB+NFVD+BIS$ 系统具有更好的隔震层位移控制能力; 同时, $BRB+NFVD+BIS$ 系统具有更好的减/隔震鲁棒性。

参考文献:

- [1] 卫杰彬, 谭平, 匡珍, 等. 高层装配式层间隔震结构的抗震性能及破坏失效模式研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(增刊1): 171-176.
WEI Jiebin, TAN Ping, KUANG Zhen, et al. Research on seismic performance and damage failure mode of a high-rise prefabricated inter-story isolated structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Sup1): 171-176.
- [2] GUAN D Z, JIANG C, GUO Z X, et al. Development and seismic behavior of precast concrete beam-to-column connections[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018, 22(2): 234-256.
- [3] 苏经宇, 曾德民, 田杰. 隔震建筑概论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 12-13.
SU Jingyu, ZENG Demin, TIAN Jie. Introduction to Isolated Buildings[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 12-13.
- [4] 丁洁民, 吴宏磊, 王世玉, 等. 减隔震技术的发展与应用 [J]. 建筑结构, 2021, 51(17): 25-33.
DING Jiemin, WU Honglei, WANG Shiyu, et al. Development and application of seismic mitigation and isolation technology[J]. Building Structure, 2021, 51(17): 25-33.
- [5] LI J Z, XIANG N L, TANG H, et al. Shake-table tests and numerical simulation of an innovative isolation system for highway bridges[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 86: 55-70.
- [6] 陈瑞生, 吴进标, 刘彦辉, 等. 黏滞阻尼器-基础隔震混合体系优化研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(11): 93-100.
- [7] CHEN Ruisheng, WU Jinbiao, LIU Yanhui, et al. Optimization research for base-isolated structures with fluid viscous dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(11): 93-100.
- [8] KHEDMATGOZAR DOLATI S S, MEHRABI A, KHEDMATGOZAR DOLATI S S. Application of viscous damper and laminated rubber bearing pads for bridges in seismic regions[J]. Metals, 2021, 11(11): 1666.
- [9] MOHEBBI M, NORUZVAND M, DADKHAH H, et al. Direct displacement-based design approach for isolated structures equipped with supplemental fluid viscous damper[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103684.
- [10] PARK S W, GHASEMI H, SHEN J, et al. Simulation of the seismic performance of the Bolu Viaduct subjected to near-fault ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2004, 33(13): 1249-1270.
- [11] LIU Y H, WU J B, DONÀ M. Effectiveness of fluid-viscous dampers for improved seismic performance of inter-storey isolated buildings[J]. Engineering Structures, 2018, 169: 276-292.
- [12] DERINGÖL A H, GÜNEYISI E M. Influence of nonlinear fluid viscous dampers in controlling the seismic response of the base-isolated buildings[J]. Structures, 2021, 34: 1923-1941.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—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, State Administration for Market Regulation. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [14] ADIBI M, TALEBKHAH R, YAHYAABADI A. Simulation of cyclic response of precast concrete beam-column joints[J]. Computers and Concrete, 2019, 24(3): 223-236.
- [15] ADIBI M, MAREFAT M S, ALLAHVIRDIZADEH R. Nonlinear modeling of cyclic response of RC beam-column joints reinforced by plain bars[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16(11): 5529-5556.
- [16] ADIBI M, TALEBKHAH R. Development of seismic fragility curves for the existing RC building with plain bars[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2022, 26(10): 4709-4724.
- [17] BAHRAMI S, MADHKHAN M. Experimental performance of a new precast beam to column connection using hidden corbel[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2017, 18(5): 791-805.

第一作者: 李春祥(1964—), 男, 博士, 教授。

E-mail: Li-chx@shu.edu.cn

通信作者: 曹黎媛(1991—), 女, 博士, 副教授。

E-mail: caoly@shu.edu.cn