

张亚飞,李利平,刘德稳,等.长周期地震动下框架-剪力墙结构隔减震改造[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(2):13-20. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.003
ZHANG Y F, LI L P, LIU D W, et al. Retrofit of Frame Shear-Wall Structure Under Long Period Ground Motion [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021,36(2):13-20. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.003

长周期地震动下框架-剪力墙结构隔减震改造

张亚飞¹,李利平²,刘德稳^{1,3,*},房思彤¹,赵洁¹,赵龙庆³

(1.西南林业大学 土木工程学院,云南 昆明 650000;2.丽水学院 工学院,浙江 丽水 323000;
3.西南林业大学 博士后流动站,云南 昆明 650000)

摘要:长周期地震作用是一种特殊的震动,框架-剪力墙抗震结构在长周期地震动下的响应与普通地震动下的响应明显不同.运用 ETABS 建立 11 层框架-剪力墙抗震结构及 3 种改造结构(即基础隔震结构、层间隔震结构及阻尼减震结构),分别输入远场类谐波和长周期地震波、近断层脉冲型地震波和普通地震波 3 种不同性质的地震波进行罕遇地震下的非线性时程分析.结果表明:4 种结构在长周期地震动下的地震响应明显,框架-剪力墙抗震结构的响应最大;长周期地震下,采用基础隔震结构、层间隔震结构和阻尼减震结构进行改造后的地震响应减小,受长周期地震动影响区域的框架-剪力墙抗震结构可以运用基础隔震结构、层间隔震结构和阻尼减震结构进行改造;采用基础隔震结构和层间隔震结构进行改造后的减震效果优于运用阻尼减震结构进行改造.

关键词:长周期地震动;框架-剪力墙抗震结构;基础隔震结构;层间隔震结构;阻尼减震结构
中图分类号:P315.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)02-0013-08

Retrofit of Frame Shear-Wall Structure Under Long Period Ground Motion

ZHANG Yafei¹, LI Liping², LIU Dewen^{1,3}, FANG Sitong¹, ZHAO Jie¹, ZHAO Longqing³

(1. College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650000, China;
2. Institute of Technology, Lishui University, Lishui 323000, China;
3. Postdoctoral Research Station, Southwest Forestry University, Kunming 650000, China)

Abstract: The seismic response of frame-shear wall structure under long period ground motion is obviously different from that under ordinary ground motion. 11 story frame-shear wall aseismic structure and three kinds of retrofitted structures, base isolation structure, mid-story isolation structure and supplemental viscous damping structure were established by ETABS, the nonlinear time history analysis of rare earthquakes was carried out by inputting far-field harmonic-alike ground motion, near fault pulse type seismic wave and ordinary seismic wave. Results showed that the seismic response of the four structures is obvious under long period ground motion, and the response of the frame-shear wall structure is the largest; after base isolation structure, mid-story isolation structure and supplemental viscous damping structure, the seismic response is reduced under long period ground motion, the frame-shear wall structure affected by long period ground motion can be retrofitted by base isolation

收稿日期:2019-11-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808467);云南省农业基础基金资助项目(2017FG001-097);云南省博士后基金资助项目(2019)

*通信作者, E-mail: civil_liudewen@sina.com

structure, mid-story isolation structure and supplemental viscous damping structure; the effect of base isolation structure and mid-story isolation structure is better than that of supplemental viscous damping structure.

Keywords: long-period ground motion; frame-shear wall seismic structure; base isolation structure; mid-story isolation structure; supplemental viscous damping structure

长周期地震动与普通地震动具有明显的差异,长周期地震动主要分为远场类谐和长周期地震动及近断层脉冲型地震动.从地震波的加速度反应谱得知:远场类谐和长周期地震动在结构自振周期的4~6 s时加速度会出现第2次峰值,近断层脉冲型地震动在结构自振周期的2~4 s时加速度是峰值的40%~70%;远场长周期地震动具有长持时、低频成分丰富等特性^[1],近断层地震动具有速度脉冲^[2]、滑冲效应^[3]、竖向地震动^[4]和上盘效应^[5]等特性.

长周期地震动带给结构的损伤非常严重,自振周期较大的结构与长周期地震动发生强烈共振,使得结构发生严重破坏.我国地震多发,断裂带较多,发生强震的记录多.2008年汶川地震中监测到长周期地震动成分^[4];云南鲁甸地区建筑结构遭受过长周期地震动的破坏^[6];邢台平原地区在大震中会产生长周期地震动^[7].

对于抗震结构,现有的研究表明:长周期地震动中竖向地震动的分量对结构影响明显,不可忽视^[8].对于隔减震结构,长周期地震动作用下,在基础隔震结构中运用摩擦型支座能有效地避免与具有窄幅频率特性的地震动发生共振^[9],基础隔震能够减小长周期地震动作用下的地震响应,达到一定的减震效果^[10-11].对于层间隔震结构,近断层地震作用下的输入能量小于非隔震结构^[12],近场地震的脉冲类型及脉冲周期对LRB层间隔震结构的非线性响应有明显影响,层间混合隔震能有效地降低非线性反应和隔震层的变形^[13].粘滞阻尼器能够减小结构地震响应^[14-15],MR阻尼器能够减小地震作用下结构的层间位移、绝对加速度,且阻尼器刚度越大越好^[16].

现有对框架-剪力墙结构的研究以抗震结构和普通地震动居多,对于长周期地震动下框架-剪力墙结构隔减震的研究较少.本文运用ETABS软件建立框架-剪力墙抗震结构及3种改造结构(框架-剪力墙基础隔震结构、层间隔震结构、阻尼减震结构)进行非线性时程分析,对比分析长周期地震动作用下4种结构的地震响应.

1 有限元模型建立

1.1 工程概况

现有11层框架-剪力墙抗震结构,长25 m,宽10.5 m,建筑标高40.2 m.底层层高为4.2 m,其他层层高为3.6 m,柱尺寸为450 mm×450 mm和400 mm×400 mm,梁尺寸为400 mm×200 mm,柱混凝土强度等级为C35,梁混凝土强度等级为C30,纵向钢筋型号为HRB335,箍筋型号为HRB300,混凝土保护层厚度为30 mm.设防烈度为8度,场地类别Ⅱ类,地震设计分组为第二组,根据最新建筑抗震设计规范^[17],设计基本地震加速度为0.30g.框架-剪力墙抗震结构的3D图、平面图、框架柱、梁及剪力墙配筋如图1所示.

1.2 基础隔震、层间隔震及阻尼减震模型的建立

建立11层框架-剪力墙3种改造结构的有限元模型,分别为基础隔震结构、层间隔震结构和阻尼减震结构.基础隔震结构的隔震层位于底层,层间隔震结构的隔震层设置在第4层,隔震支座采用铅芯橡胶隔震支座LRB400.由于框架-剪力墙抗震结构底层的层间位移较大,将阻尼器加在底层,阻尼器运用Damper-Bilinear连接单元液体粘滞阻尼器.

非线性液体粘滞阻尼器工作原理:

$$F = CV^\alpha.$$

式中: F 为阻尼器阻尼力; C 为阻尼系数; V 为阻尼器变形速率; α 为阻尼指数.

3种改造结构的配筋及梁、柱尺寸源于原有框架-剪力墙抗震结构,框架柱塑性铰指定为PMM铰,框架梁塑性铰指定为M3铰.基础隔震结构改造如图2所示,层间隔震结构改造如图3所示,阻尼减震结构改造如图4所示.隔震支座和阻尼器参数如表1和表2所示.

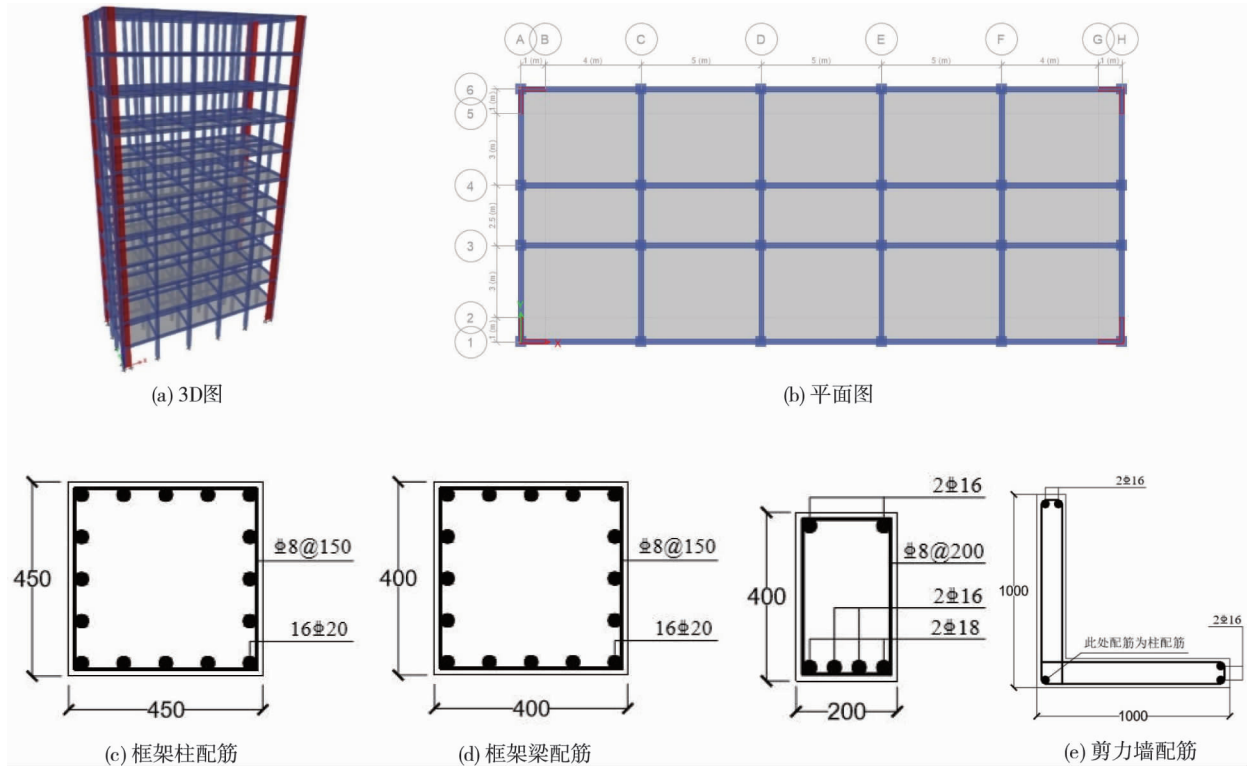


图 1 框架-剪力墙抗震结构

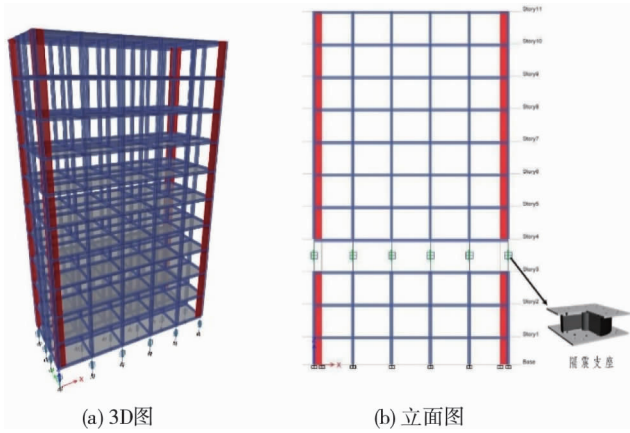


图 2 基础隔震结构改造

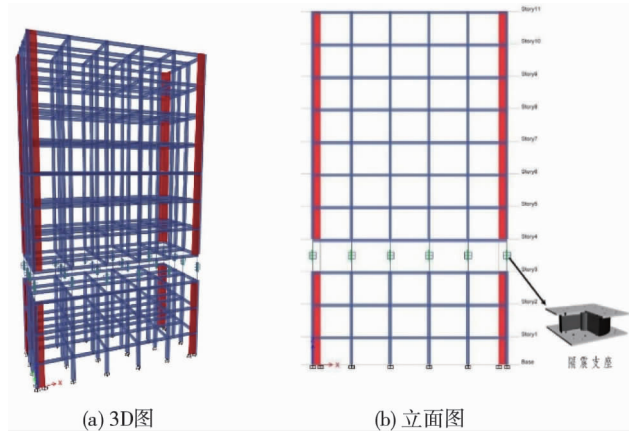


图 3 层间隔震结构改造

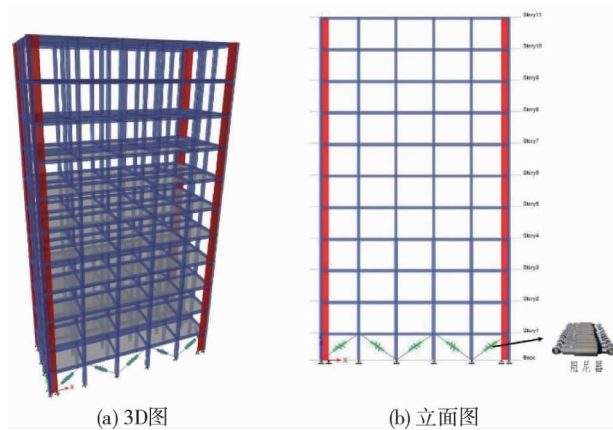


图 4 阻尼减震结构改造

表1 隔震支座参数

支座	有效直径/mm	橡胶总厚度/mm	竖向刚度/(kN/mm)	等效刚度/(kN/m)		屈服前刚度/(kN/m)	屈服力/kN	极限位移/mm
				100%水平剪切变形	250%水平剪切变形			
LRB400	400	73	2 200	1 040	820	8 790	27	219

表2 液体粘滞阻尼器参数

竖向刚度/(kN/mm)	初始阻尼系数/(kN·s·m ⁻¹)	屈服阻尼系数/(kN·s·m ⁻¹)	线性力限值/kN
50	50 000	30 000	100

2 地震波选取

通过美国太平洋地震工程研究中心选取台湾集集地震(1999)的多条地震动记录,选取近断层脉冲型地震波 TCU054, TCU102 的加速度时程曲线如图 5 所示,远场类谐和长周期地震动 ILA048, ILA056 的加速度时程曲线如图 6 所示,普通地震波兰州波与天津波的加速度时程曲线如图 7 所示,3 类地震动的加速度反应谱如图 8 所示,将上述地震波导入 ETABS 进行罕遇地震下的时程分析。

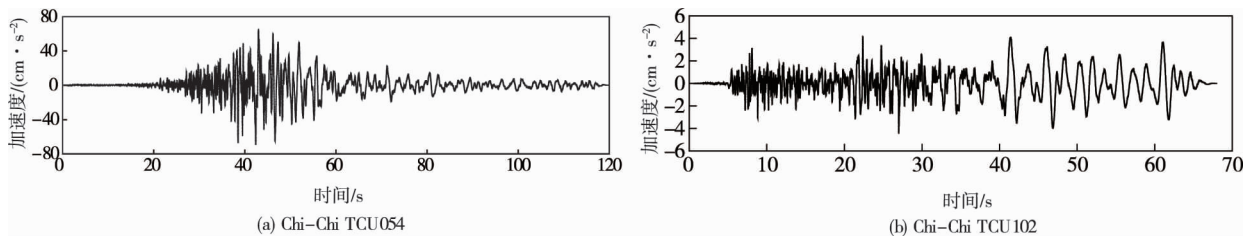


图5 近断层脉冲型地震动加速度时程曲线

由图 5 可知:近断层脉冲型地震动具有速度脉冲、上盘效应等特性,TCU054, TCU102 这 2 种近断层脉冲型地震波的 PGV/PGA 分别为 0.26 和 0.28(PGV 为地震波峰值速度,PGA 为地震波峰值加速度),其中 TCU054 具有向前方向性效应脉冲。

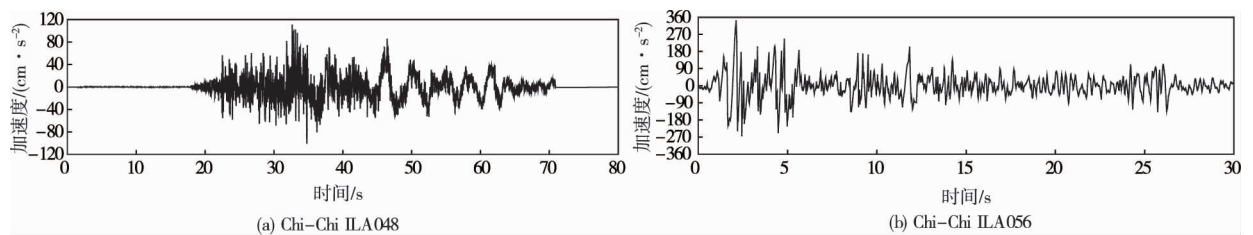


图6 远场类谐和长周期地震动加速度时程曲线

由图 6 可知:远场类谐和长周期地震动 ILA048, ILA056 不仅具有长周期、持时长的特点,并且这 2 条地震动在震动后期阶段具有明显的简谐特性,该 2 种远场类谐和长周期地震动 ILA048, ILA056 的 PGV/PGA 分别为 0.22 和 0.28。

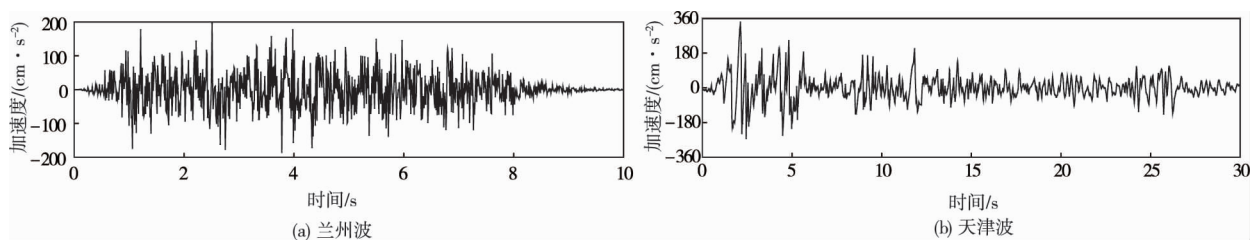


图7 普通地震动加速度时程曲线

由图 7 可知:与远场类谐和长周期地震动及近断层脉冲型地震动有明显的波形特征不同,普通地震动

的时程曲线基本上无规律可循.

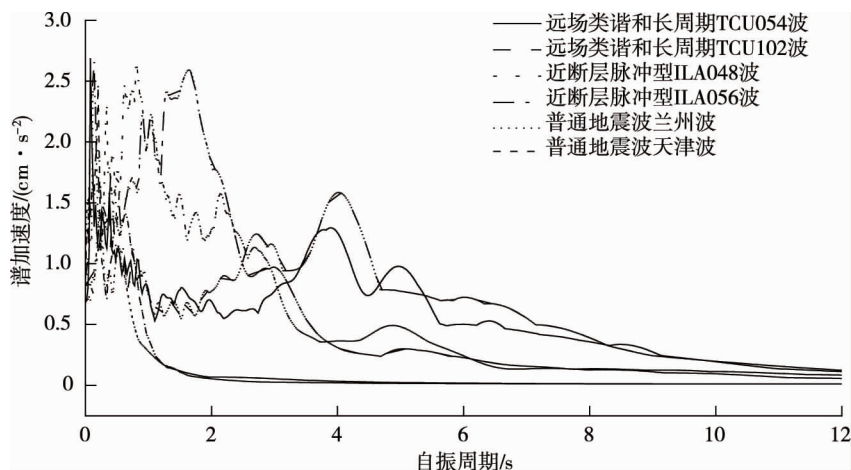


图 8 3 类地震动加速度反应谱

3 分析结果对比

3.1 框架-剪力墙抗震结构地震响应

将选取的 3 类地震波分别输入框架-剪力墙抗震结构和运用基础隔震结构、层间隔震结构及阻尼减震结构进行改造的 4 种结构中,进行罕遇地震(8 度)下的动力非线性时程分析.框架-剪力墙抗震结构在 3 类地震动作用下的层间位移和层间位移角分别如图 9 和图 10 所示.

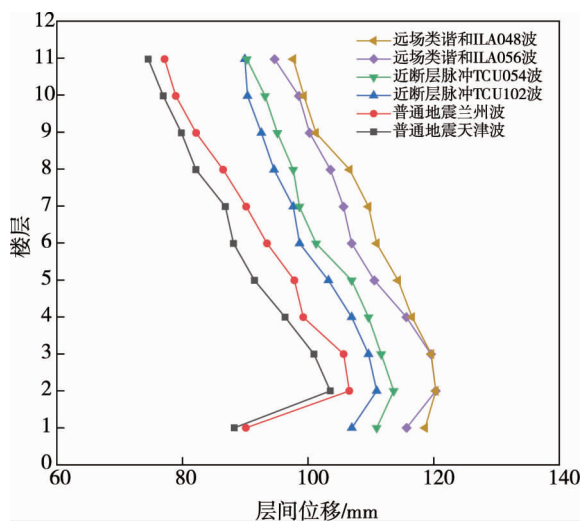


图 9 框架-剪力墙抗震结构层间位移

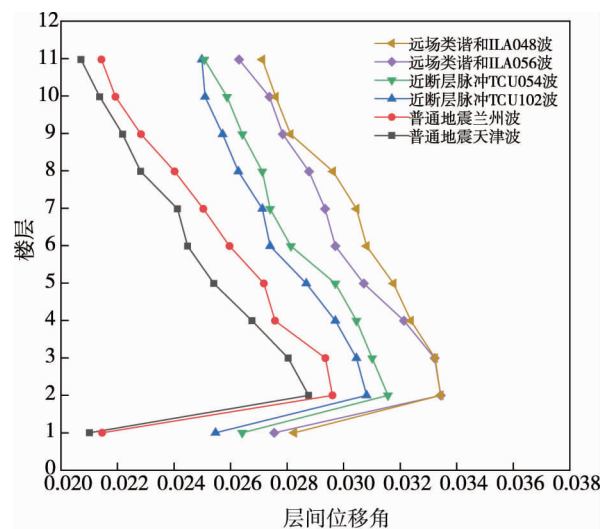


图 10 框架-剪力墙抗震结构层间位移角

由图 9 和图 10 可知:框架-剪力墙抗震结构在长周期地震动作用下的地震响应比普通地震动作用下的地震响应明显,长周期地震动作用下层间位移显著增大,底层位移的增大程度相对较大.根据抗震规范要求,层间位移需小于层高的 1/50(72 mm),而 3 类地震动作用下框架-剪力墙抗震结构的层间位移均已超过抗震规范要求^[17],在长周期地震动作用下,框架-剪力墙抗震结构的层间位移角显著大于普通地震作用.对于处于受长周期地震动影响区域的框架-剪力墙抗震结构需要进行改造处理,否则,当长周期地震动来临时,框架-剪力墙抗震结构会发生严重破坏,且不同长周期地震动下框架-剪力墙抗震结构的地震响应具有差异,远场类谱和长周期地震动作用下框架-剪力墙抗震结构的响应明显增大,各层层间位移相对增大.

3.2 3 种改造结构地震响应

3 种改造结构即基础隔震结构、层间隔震结构、阻尼减震结构在 3 类地震动下的时程分析结果如图 11

所示.图 11 中,第 1 层和第 4 层的位移突变是由于该层为隔震层,在地震作用下隔震支座位移增大,隔震支座吸收地震能量,从而减小结构地震响应.

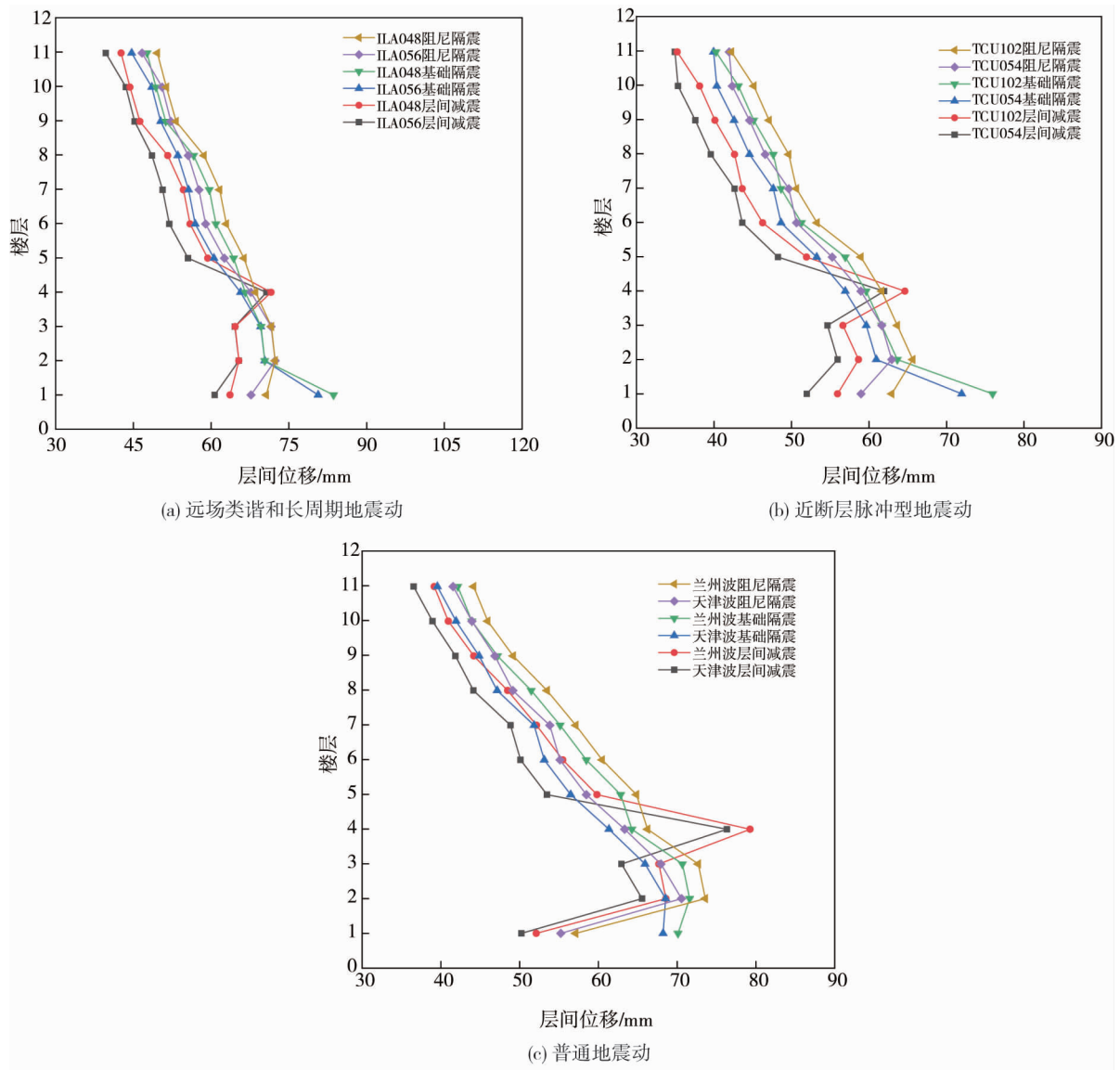


图 11 3 种改造结构在 3 类地震动下的层间位移

由图 11 可知:在长周期地震动作用下,基础隔震结构、层间隔震结构及阻尼减震结构这 3 种改造方法均有良好的减震效果,运用 3 种方法改造后,各层层间位移均在抗震规范要求之内^[17];在长周期地震动作用下,运用基础隔震结构和层间隔震结构进行改造,其减震效果要优于运用阻尼减震结构进行改造;在普通地震动作用下,运用基础隔震结构、层间隔震结构和阻尼减震结构进行改造后也具有一定减震效果,但不如长周期地震动下的减震效果显著.

运用基础隔震结构和层间隔震结构进行改造后的隔震层位移明显增大,但均未超过隔震支座的极限位移,即隔震支座没有破坏,处于正常工作状态.隔震层可以吸收地震波能量,减小结构地震响应,长周期地震动作用时,隔震层位移量明显大于普通地震动作用.4 种结构在长周期地震动作用下的结构塑性铰分布如图 12 所示.

由图 12 可知:长周期地震动作用下,运用基础隔震结构、层间隔震结构和阻尼减震结构进行改造后出现塑性铰的数量明显少于框架-剪力墙抗震结构,且塑性铰出现在梁上,结构相对稳定,不至于出现倒塌的情况;运用基础隔震结构进行改造后塑性铰基本出现在结构上部,结构下部基本不出现塑性铰;运用层间隔震结构进行改造后塑性铰基本出现在隔震层上下层附近,下部居多;运用阻尼减震结构进行改造后下部及中部出现较多塑性铰,上部塑性铰明显减少.

长周期地震动作用下,运用阻尼减震结构进行改造后具有一定的减震效果.与运用阻尼减震结构进行改造的减震效果相比,运用基础隔震结构和层间隔震结构进行改造的减震效果更好.在长周期地震动作用下,运用基础隔震结构和层间隔震结构进行改造,需要考虑隔震层位移,特别是受远场类谐和长周期地震动影响的区域,若隔震层位移超过隔震支座的允许值,可增加位移限制装置进行限位保护.

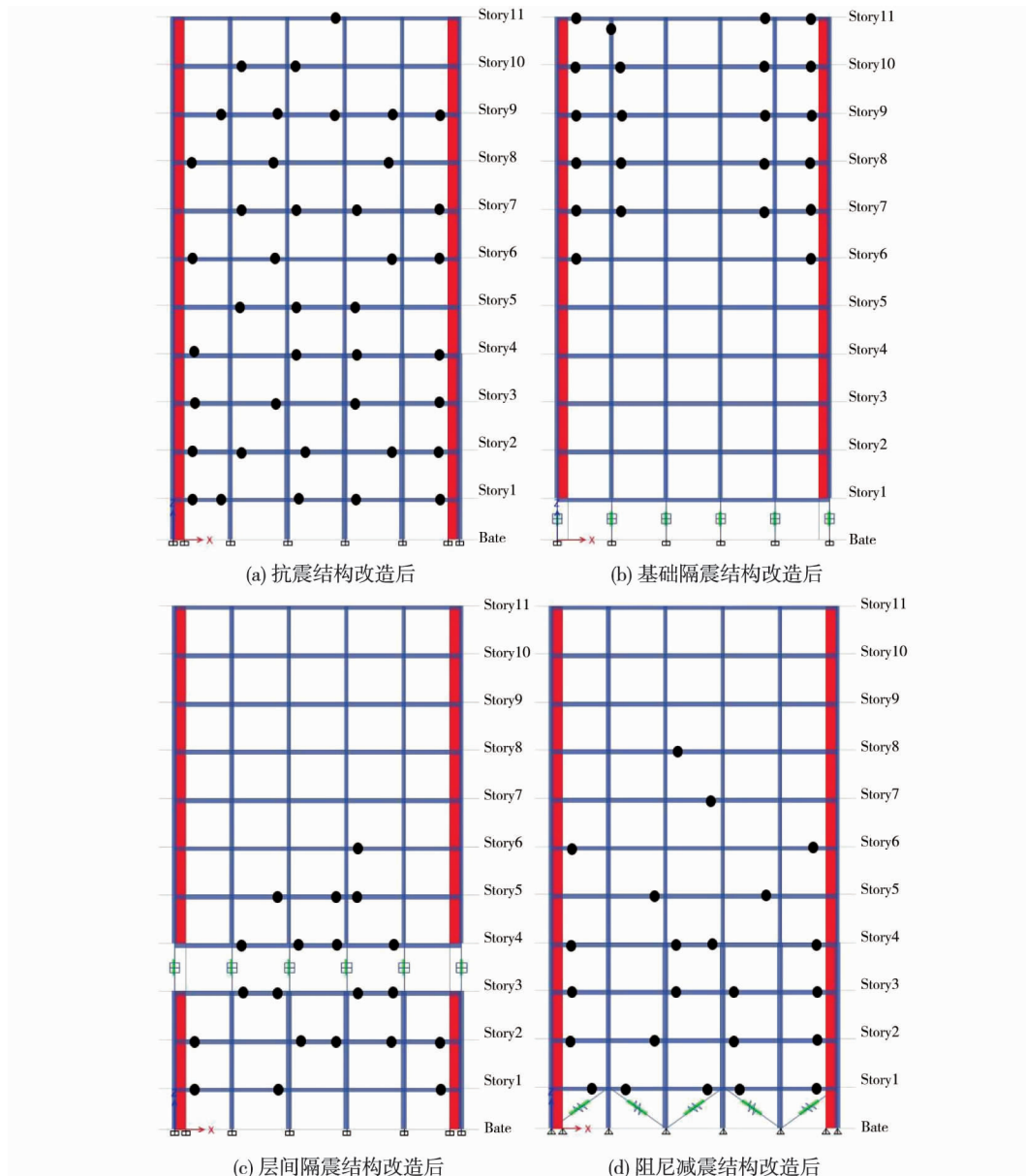


图 12 4 种结构塑性铰分布

4 结论

1) 4 种结构(框架-剪力墙抗震结构、基础隔震结构、层间隔震结构及阻尼减震结构)在长周期地震动下的地震响应明显,框架-剪力墙的抗震结构响应最大.

2) 3 种改造结构(框架-剪力墙基础隔震结构、层间隔震结构和阻尼减震结构)在长周期地震动下均具有良好的减震效果,层间位移、层间位移角显著减小,塑性铰明显减少;在受长周期地震动影响的区域,框架-剪力墙抗震结构可以采用基础隔震结构、层间隔震结构和阻尼减震结构进行改造.

3) 长周期地震动作用下,运用基础隔震结构和层间隔震结构进行改造,其减震效果要优于运用阻尼减震结构进行改造.

参考文献:

- [1] 颜桂云,方艺文,吴应雄.远场长周期地震下层间隔震结构的非线性减震分析[J].振动与冲击,2018,37(4):208-218.
- [2] Somerville P G, Smith N F, Graves R W, et al. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity[J]. Seismological Research Letters, 1997, 68(1): 199-222.
- [3] 江义,杨迪雄,李刚.近断层地震动向前方向性效应和滑冲效应对高层钢结构地震反应的影响[J].建筑结构学报,2010,31(9):103-110.
- [4] 谢俊举,温增平,高孟潭,等.2008年汶川地震近断层竖向与水平向地震动特征[J].地球物理学报,2010,53(8):1796-1805.
- [5] Abrahamson N A, Somerville P G. Effects of the hanging wall and footwall on ground motions recorded during the Northridge earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(1): S93-S99.
- [6] 郭金萍.震源破裂模式对近断层长周期地震动的影响及在云南地区的应用[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2016.
- [7] 贾晓辉,王晓山,付长华,等.邢台地区长周期地震动特征初步分析[J].震灾防御技术,2019,14(1):87-96.
- [8] 周伟.基于汶川地震考虑竖向地震动的RC框架结构抗震性能分析[D].兰州:兰州理工大学,2011.
- [9] Ariga T, Kanno Y, Takewaki I. Resonant behaviour of base-isolated high-rise buildings under long-period ground motions[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2006, 15(3): 325-338.
- [10] Zhang F Y, Pei M, Mao L J, et al. The Bottom-up Underpinning Construction Technology for Base Isolation Reinforcement of the Existing Masonry Structure[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 226:1085-1088.
- [11] Paulson T J, Abrams D P, Mayes R L. Shaking-table study of base isolation for masonry buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 117(11):3315-3336.
- [12] 韩淼,张文会,朱爱东,等.不同层隔震结构在近断层地震作用下动力响应分析[J].振动与冲击,2016,35(5):120-124.
- [13] 颜桂云,吴应雄,陈福全.近场脉冲型地震动下层间隔震的非线性反应与隔震层限位分析[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(6):1185-1197.
- [14] 李波,吴晓涵,宋和平,等.某框架-剪力墙结构采用粘滞阻尼器减震效果分析[J].结构工程师,2017,33(3):116-125.
- [15] 廖述江,何文福,潘响铃,等.某框架-剪力墙结构速度型与位移型阻尼墙减震对比分析[J].建筑结构,2016,46(s2):317-322.
- [16] 赵亚哥白.基于金属橡胶阻尼器耗能减震框架剪力墙体系的抗震研究[D].长春:吉林大学,2012.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].2010.