

# 长周期地震下错层隔震结构响应研究



刘麟, 刘德稳\*, 张兰芳

西南林业大学土木工程学院, 云南昆明 650000

**摘要:** 错层隔震结构是由基础隔震结构发展而来的一种新型的隔震结构, 目前在山地掉层结构中应用十分广泛, 在普通地震下有良好的隔震效果。但在很多地区存在长周期地震动问题, 在云贵川山地地区中也有发现。结构自振周期的延长与长周期地震动低频部分可能引发的共振不容忽视, 长周期地震下错层隔震结构响应研究还不完善。建立了两个不同的错层隔震结构有限元模型, 节选了六条地震波, 在有限元软件 SAP2000 中进行了普通地震动和长周期地震动(包括近断层脉冲型长周期地震动和远场类谐和长周期地震动)下的非线性时程响应分析。结果表明: 错层隔震结构周期延长, 总体地震响应减小, 有一定隔震效果; 在长周期地震动作用下, 错层隔震结构的层间剪力、支座位移和层间位移角等比普通地震波有所增大; 在远场类谐和地震动作用下, 结构支座位移、层间剪力、结构出铰量和结构应力明显区别于近断层脉冲型地震作用, 并且两个结构存在显著差异。山地错层结构具有竖向刚度不均匀的特点, 结构薄弱位置位于接地层附近, 工程中应给予更多关注。

**关键词:** 防灾减灾工程; 长周期地震动; 非线性时程响应分析; 错层隔震结构; 减震性能

**DOI:** [10.57237/j.se.2022.01.004](https://doi.org/10.57237/j.se.2022.01.004)

## Study on Seismic Response of Staggered Story Isolated Structure Under Long-period Earthquake

Liu Lin, Liu Dewen\*, Zhang Lanfang

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650000, China

**Abstract:** The staggered story isolated structure is a new type of isolated structure developed from the base isolated structure. It has great isolation performance under ordinary earthquakes. However, the problem of long-period earthquakes exists in many areas. The prolongation of the natural vibration period of the structure and the resonance caused by the low-frequency part of the long-period earthquakes should not be ignored. The research on the response of the staggered story isolated structure under the long-period earthquake is not perfect. Two finite element models of staggered story isolated structure were established and non-linear time-history response analysis were carried out under ordinary earthquakes and long-period earthquakes, which including near-fault pulse-type long-period earthquakes and far-field harmonic-like long-period earthquakes. Results show that the natural vibration period of the staggered story isolated structure is prolonged, the seismic response is reduced. Under long-period earthquakes, the story drift angle, bearing displacement, story shear, plastic hinges and stress damage of staggered story isolated structure are partly larger than those of ordinary earthquakes. Under the far-field harmonic-like earthquakes, isolation performance is significantly different from those under the near-fault pulse-type earthquakes. And there are significant differences between the two models. The structure has the characteristics of vertically irregular structures and the weak position of the structure is located near the isolation layer, so more attention should be paid to the project.

\*通信作者: 刘德稳, [civil\\_liudewen@sina.com](mailto:civil_liudewen@sina.com)

**Keywords:** Disaster Prevention and Mitigation Engineering; Long-period Earthquakes; Non-linear Time-history Response Analysis; Staggered Story Isolated; Isolation Performance

## 1 引言

错层隔震结构是由基础隔震结构发展而来的一种新型的隔震结构。基础隔震结构的隔震层设置在结构底部,且位于同一水平面。错层隔震(Staggered story isolated)结构则将隔震层分为了两个部分,两部分隔震层存在高差,不在同一水平面,如图1所示。海口美兰机场二期航站楼是中国首个且规模最大的错层隔震建筑[1],其效果图如图2所示,隔震层布置图如图3所示。

基础隔震结构应用较多且开展研究时间较早[2-6];错层隔震结构的研究正在急速发展中[7],王丽萍[8]对掉层结构进行受力特性、动力特性及抗震性能分析,表明对于山地掉层结构的薄弱层或薄弱部位进行内力调整措施和抗震构造措施可加强其抗震性能。张龙飞等[9]对山地掉层隔震结构进行了振动台试验研究,结果表明,山地掉层隔震结构扭转效应减小,具有良好的抗震性能;吴正佳[10]对山地掉层框架隔震结构进行了振动台试验研究,结果表明,上接地层和顶层为结构的薄弱部分,两隔震层同侧偏心是结构扭转效应的主要影响因素;骆辉军[11]对掉层基础隔震结构进行了有限元模拟,结果表明,掉层基础隔震结构上接地柱及以上楼层的层间剪力比值受掉层层数和掉层跨度影响较大。

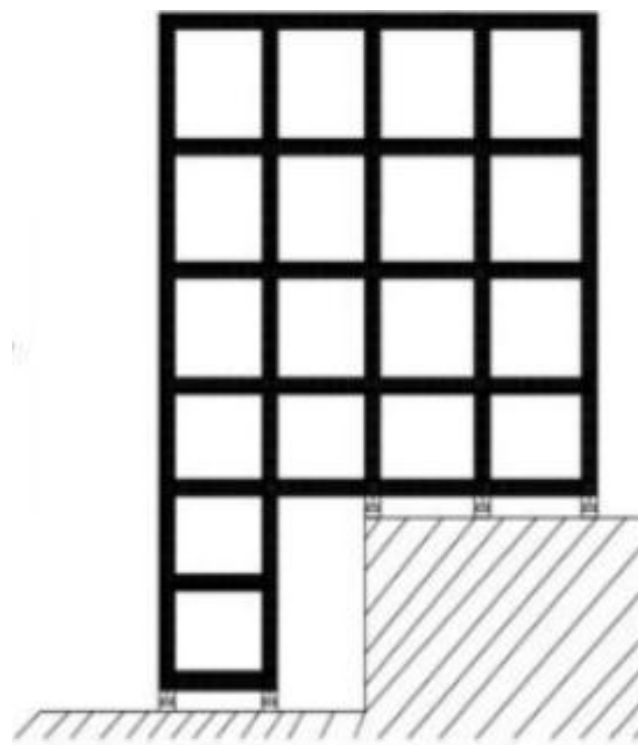


图1 错层隔震结构图



图2 海口美兰机场二期航站楼效果图

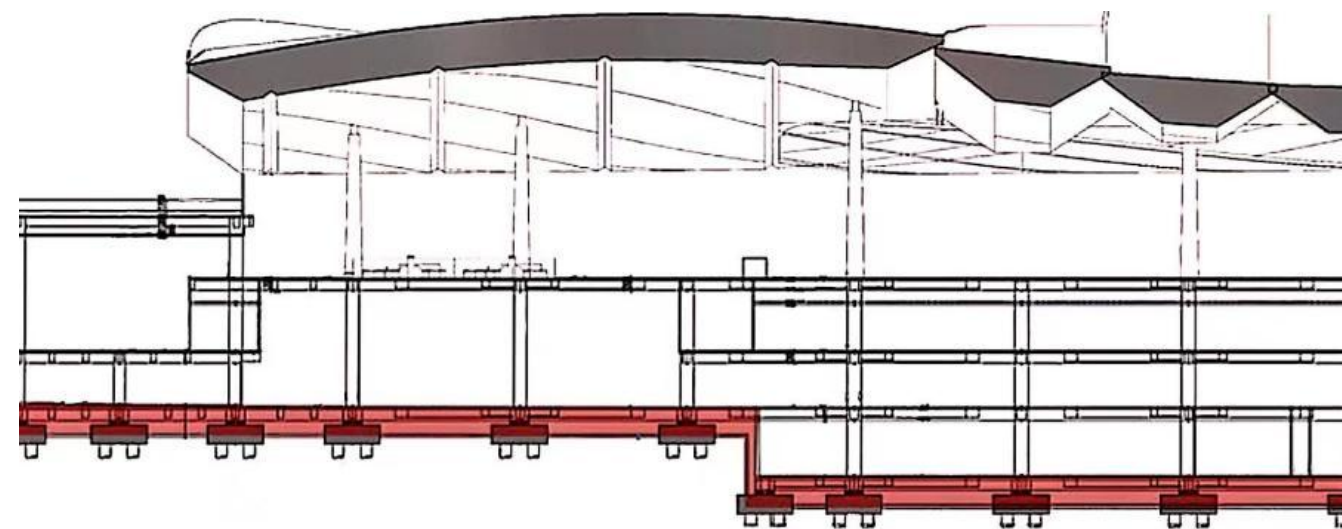


图 3 海口美兰机场二期航站楼隔震支座布置图

以上研究均基于普通地震动的研究，没有考虑长周期地震下的隔震结构响应。兰晓雯[12]和邱立珊[13]基于汶川地震，对四川长周期地震动反应谱进行研究，前者研究得出目前四川地区的确存在长周期地震动问题，并建立长周期衰减关系；后者给出了长周期地震动的输入提供了有力的参考。李永义[14]等认为对川滇地区长周期地震动的衰减关系研究是有必要的。董晓燕[15]等认为辽河平原及周边地区长周期地震动可能会发生，所以表明长周期地震下错层隔震结构的地震响应研究很有必要，并且对比普通地震动会发生较大变化。

考虑长周期地震动的错层隔震结构地震响应尚无研究，基于此，本文建立了错层隔震结构有限元模型，进行长周期（包括近断层脉冲型长周期地震动和远场类谐波和长周期地震动）及普通地震动下的非线性时程分析，从结构的层剪力、层间位移角、顶部加速度、支座变形等方面分析不同地震下结构响应的区别，为长周期地震

下错层隔震结构的响应研究提供一定的参考。

2 错层隔震结构有限元模型

2.1 概述

建立了两个 9 层错层隔震结构有限元模型如图 4 所示，结构设计信息如图 5 所示，根据中国抗震规范，抗震设防类别为乙类，场地类别 III 类，抗震设防烈度为 8 度。其设计地震分组为第二组，设计基本地震加速度为 0.20g，设计特征周期为 0.55s[16]。建筑采用框架结构，建筑高度为 34m，每层层高均为 3.6m；隔震层高差 7.2m。框架柱混凝土强度等级为 C30；剪力墙混凝土等级为 C30，框架梁混凝土等级为 C30，板厚 180mm。梁、柱的保护层厚度均为 40mm。纵筋型号为 HRB400，箍筋型号为 HPB300[16]。梁、柱的纵筋配筋情况及箍筋信息见表 1，箍筋间距 150mm。

表 1 框架截面信息表

构件类型	构件位置	截面尺寸	钢筋信息		
			保护层厚度/mm	箍筋直径/mm	纵筋尺寸
Frame column	1~ 9	500 ×500	40	4	8 C 9
Frame beam	1~ 9	300 ×500	40	4	8 C 9

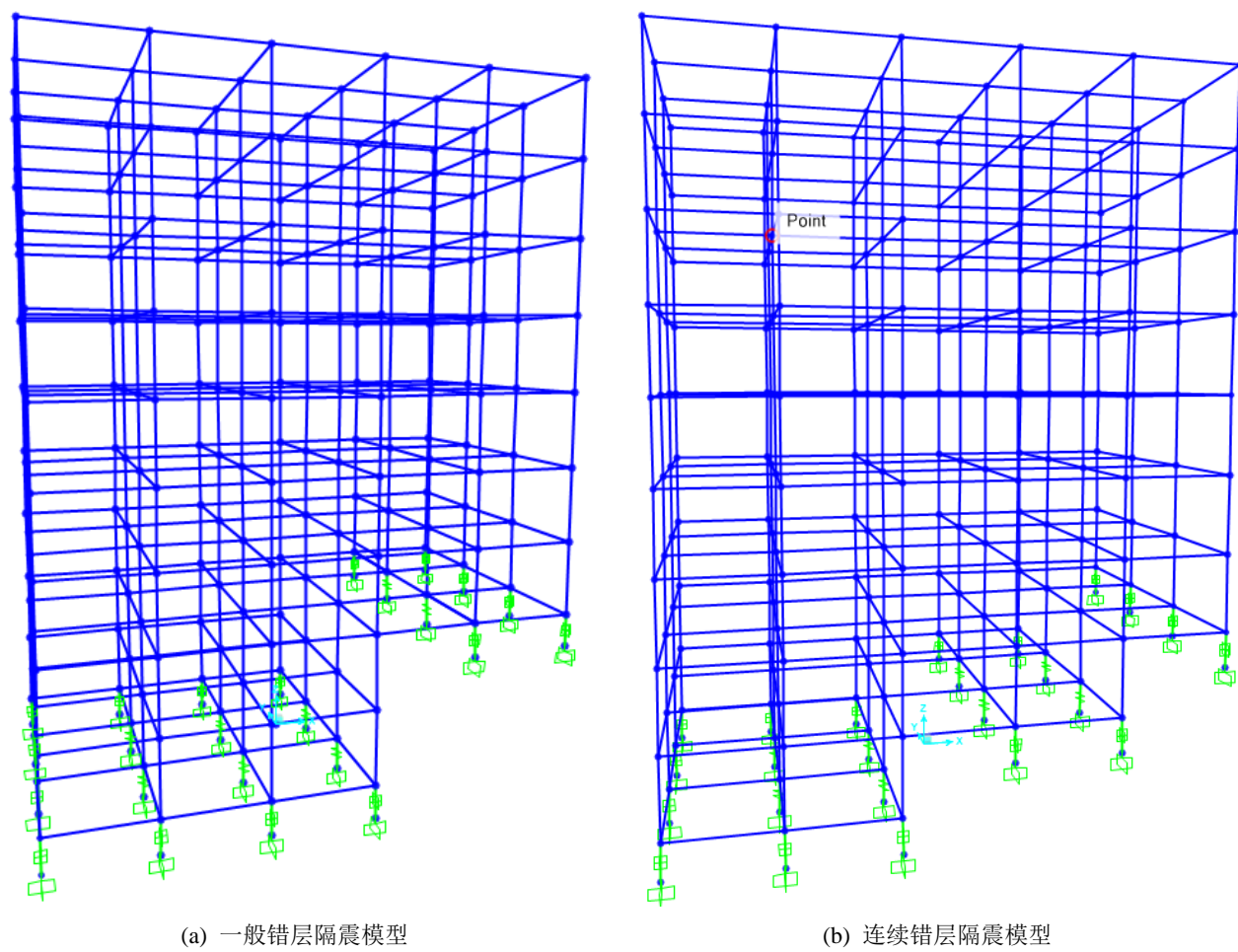
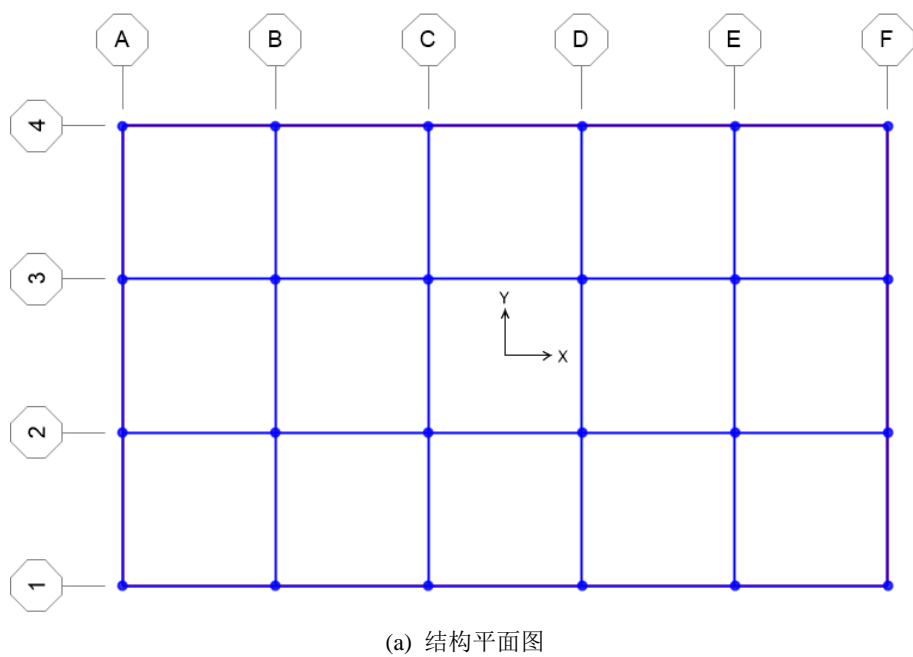


图 4 错层隔震结构有限元模型图





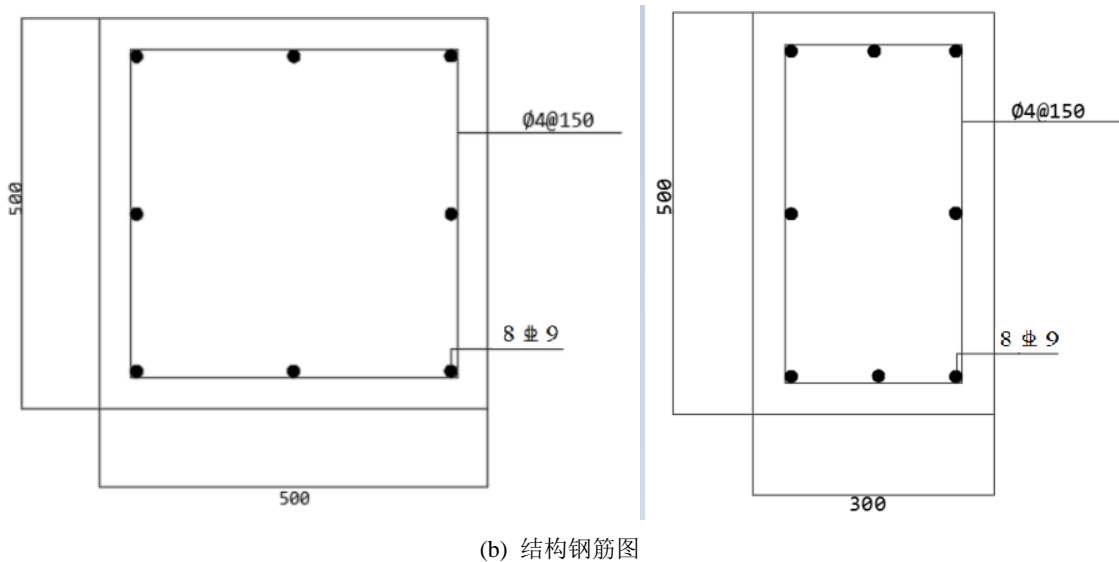


图 5 错层隔震结构设计信息图

2.2 错层隔震结构的非线性参数

隔震层不在同一水平面，存在高差，分为上层隔震层和下层隔震层，两个隔震层布置 16 个 LRB600 铅芯橡胶隔震支座和 8 个 LNR600 普通橡胶隔震支座信息见表 2。C30 混凝土非线性材料运用 Takeda 滞回类型，HRB400 钢筋非线性材料运用 Kinematic 滞回类型。框架柱运用 PMM 塑性铰，框架梁和连梁运用 M3 塑性铰。

表 2 隔震支座参数

型号	有效直径/mm	橡胶总厚度/mm	屈服前刚度/ $\text{kN m}^{-1}$	等效刚度		竖向刚度/ $\text{kN mm}^{-1}$	屈服力/kN	极限位移/mm
				100%水平剪切变形/ $\text{kN m}^{-1}$	250%水平剪切变形/ $\text{kN m}^{-1}$			
LNR600	600	112	-	850	850	1800	-	330
LRB600	600	112	11370	1450	1450	2100	63.0	330

2.3 长周期地震动的界定

党育[17]在对长周期地震动的界定方面提出了大致的两种方法，分别是定性和定量两类。

(1) 定性分析

赵艺[18]等提出了界定长周期地震动的有效公式。赵晨晓[19]通过大量分析提出参考 Baker 界定脉冲型地震动的方法，用长周期分量为基础，运用逻辑回归来确定长周期地震动的界定指标；其中将长周期分量能量比和长周期分量峰值比为因变量进行逻辑回归也可以得到界定指标。袁伟泽[20]等提出长周期地震动累积滞回耗能比值谱的计算计算公式与弹塑性时程计算结果接近。

(2) 定量分析

李雪红[21]等、赵艺[18]等利用界定长周期地震动的有效公式：

$$\beta_L = \frac{\sum T_i^2 \left( \frac{S_a(T_i)}{PGA} \right)}{\sum T_i^2}$$

其中 $T_i$ ——阻尼比为 5%时加速度反应谱等间距离散周期，取值范围为 $[2,10]$ ； $S_a(T_i)$ —— $T_i$ 对应的加速度反应谱值； $PGA$ ——加速度峰值。

而党育等[17]定义一个参数 a：

$$a = \frac{PSD[2s,10s]}{PSD[0s,10s]}$$

其中结构的周其范围取 $[0s,10s]$ ； $PSD[2s,10s]$ 表示 2~10s 范围内的功率谱密度的面积， $PSD[0s,10s]$ 表示功率谱密度总面积。

上述都对长周期地震动的界定给出了明显的定量

区分， $\beta_L>0.4$ ； $a\geq 30\%$ 时为长周期地震动。

火明譔[22]等对长周期地震动特性进行了详细叙述，长周期地震动灾害具有：方向性效应、滑冲效应、竖向地震动及上盘效应等特性。基于以上研究，选取了四条有效的长周期地震动，对结构进行研究分析。

一般将长周期地震动分为两类，一种是近断层脉冲型地震动，另一种是远场类谐和地震动。目前国内外一般用震中距作为区分远近场的依据，可将震中距大于 10km 的地震动定义为远场地震动。徐龙军[23]将断层距范围为 40km 至 100km 的地震动定义为远场地类谐和地震动。本文结合徐龙军的方法与场地类型，将长周期地震动分为远场类谐和地震动和近断层脉冲型地震动。

2.4 地震波信息

在美国太平洋地震中心的台湾集集地震多条记录中选取了 5 条长周期地震动，分别为 2 条远场类谐和

地震动 CHY092 波、TCU006 波和 2 条近断层脉冲型地震动 TCU052 波、TCU068 波，还选取了 2 条普通地震动 TCU078 波、EL CENTRO 波进行对比分析，地震动基本信息见如表 3，地震动的加速度反应谱如图 6 所示。

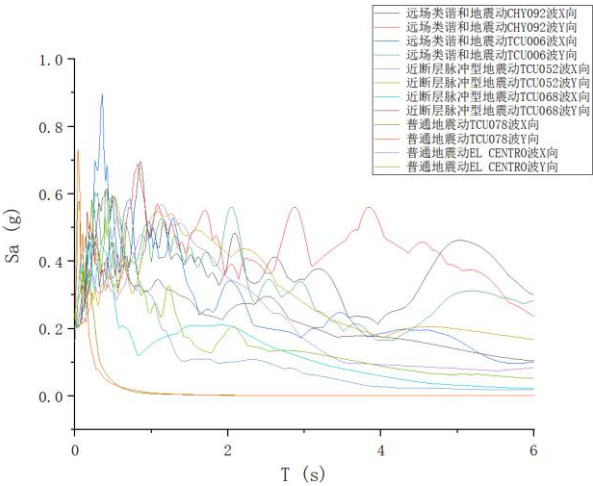


图 6 地震波加速度反应谱

表 3 地震波信息表

Seismic wave		Magnitude	Epicentral distance/km	PGA/cm s <sup>-2</sup>
远场类谐和地震动	CHY092	7.7	90.4	101.13
	TCU006	7.7	66.3	75.27
近断层脉冲型地震动	TCU052	7.7	1.8	437.21
	TCU068	7.7	3.0	494.40
普通地震动	TCU078	7.7	11.5	33.03
	EL CENTRO	6.4	11.0	349.80

3 长周期地震下错层隔震结构响应研究

3.1 模态分析

错层隔震结构各阶模态周期如表 4 所示。

表 4 错层隔震结构模态周期表

自振周期	抗震结构 (一般错层隔震结构)	隔震结构 (一般错层隔震结构)	抗震结构 (连续错层隔震结构)	隔震结构 (连续错层隔震结构)
T1/s	0.865	2.321	1.077	2.345
T2/s	0.499	1.915	0.927	2.133
T3/s	0.474	1.848	0.890	2.009
T4/s	0.327	0.537	0.345	0.612
T5/s	0.272	0.336	0.295	0.533
T6/s	0.252	0.328	0.285	0.514
T7/s	0.193	0.291	0.194	0.341
T8/s	0.168	0.282	0.164	0.298
T9/s	0.165	0.262	0.160	0.281
T10/s	0.130	0.224	0.136	0.239
T11/s	0.111	0.189	0.136	0.2012
T12/s	0.109	0.187	0.129	0.192

由表 4 可以看出对于一般隔震结构，一般以地震力系数从宏观上反映了隔震效果的好坏，与隔震结构周期延长程度相对应，即周期延长越长，隔震效果越好[23]。

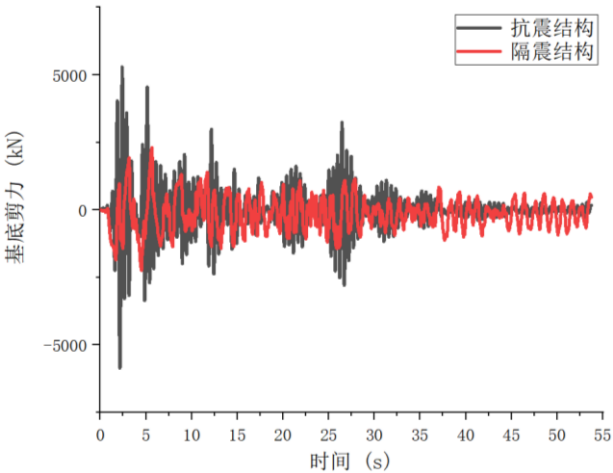
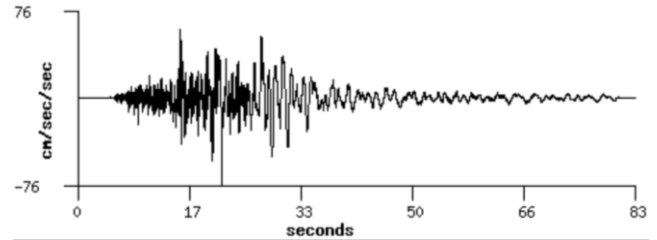


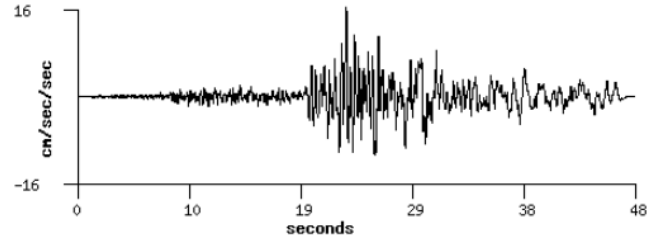
图 7 基底剪力对比图

本文所模拟的有限元模型前三阶自振周期平均提高了 2-3.5 倍左右，在普通地震动下有良好的隔震效果，EL CENTRO 波作用下基底剪力隔震前后对比如图 7 所示。但是根据时程反应谱分析，长周期地震动与普通地震动在幅值分布上存在着很大的差距，长周期地震动时程反应谱 CHY092 如图 8 (a) 所示，TCU006 如图 8 (b) 所示。长周期地震动卓越周期较大，具有长持时性，低频成分远多于普通地震动，且远场类谐波和

地震动存在“双峰”现象。在隔震结构提高自振周期的同时，如果长周期地震动的卓越周期与结构自振周期相近的话，就可能会发生共振，使地震响应加大，导致结构超过预期设计的变形而产生危害。



(a) CHY092

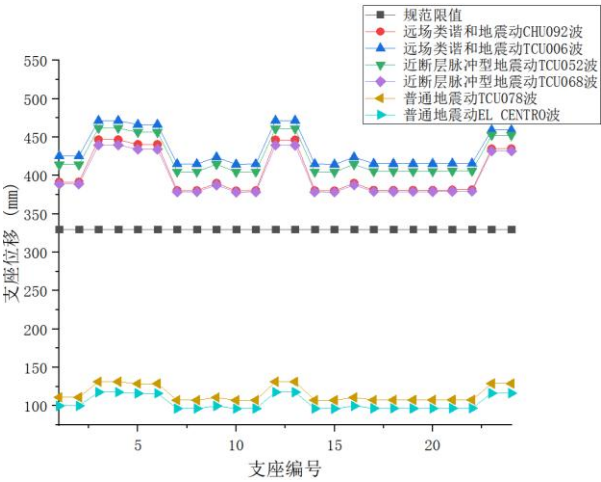


(b) TCU006

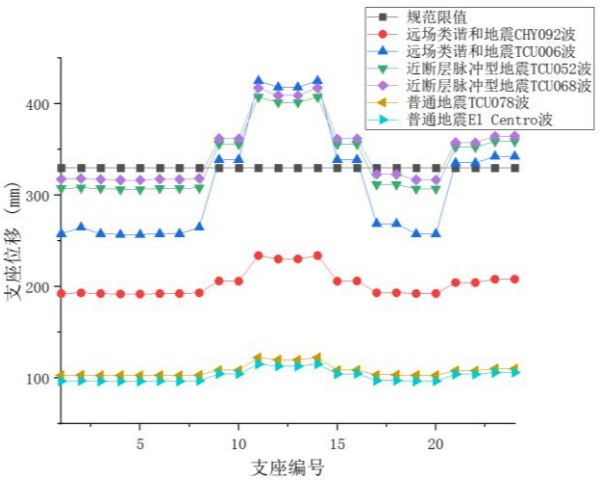
图 8 地震时程反应谱

3.2 长周期地震下错层隔震结构减震性能

对错层结构进行动力时程分析，计算出结构的支座变形。得出的结果如图 9 所示。



(a) 一般错层隔震模型



(b) 连续错层隔震模型

图 9 支座位移对比图

由图 9 可以看出一般错层隔震模型在所有地震动作用下，上部隔震层的 8 个隔震支座的支座位移均大

于下层隔震层。同样在连续错层隔震结构中,上部隔震支座的支座位移均大于下部隔震支座,并且超限。在普通地震动作用下,隔震结构仍然保持良好的隔震效果,支座位移保持在规范值之内。在长周期地震动作用下,无论是远场类谐波和地震动或是近断层脉冲型地震动,都可能使隔震结构的支座位移超过了规范值330mm [16]。按照常规隔震支座选型无法满足长周期地震下的隔震要求。长周期地震下,隔震支座存在失效可能,这也是研究长周期下错层隔震结构的必要性所在。

为改善错层结构的隔震性能,将结构隔震层改为布置16个LRB800铅芯橡胶隔震支座和8个LNR800普通橡胶隔震支座。得出结构的支座变形如图10所示。

由图10可以看出将隔震支座更改布置后,隔震结

构在长周期地震动作用下,结构仍然保持良好的隔震效果,支座位移均保持在规范值440mm[16]之内,并且在长周期地震下,所有支座的支座位移均大于普通地震。支座位移最大值仍然位于上接地层。一般错层隔震结构的支座位移均大于连续错层隔震结构。

改善后的错层隔震结构层间位移角对比如图11所示。可以看出在普通地震下,两个结构的层间位移角数值与变化规律基本一致。在隔震层所在的楼层,也就是前三层,长周期地震作用下的层间位移角大于普通地震动作用下的层间位移角,并且两个模型的变化规律有所不同:连续错层隔震结构中,近断层脉冲型地震下结构的一至二层的层间位移角明显大于一般错层隔震结构。远场类谐波和地震下,两个结构的层间位移角变化规律与大小基本相同。

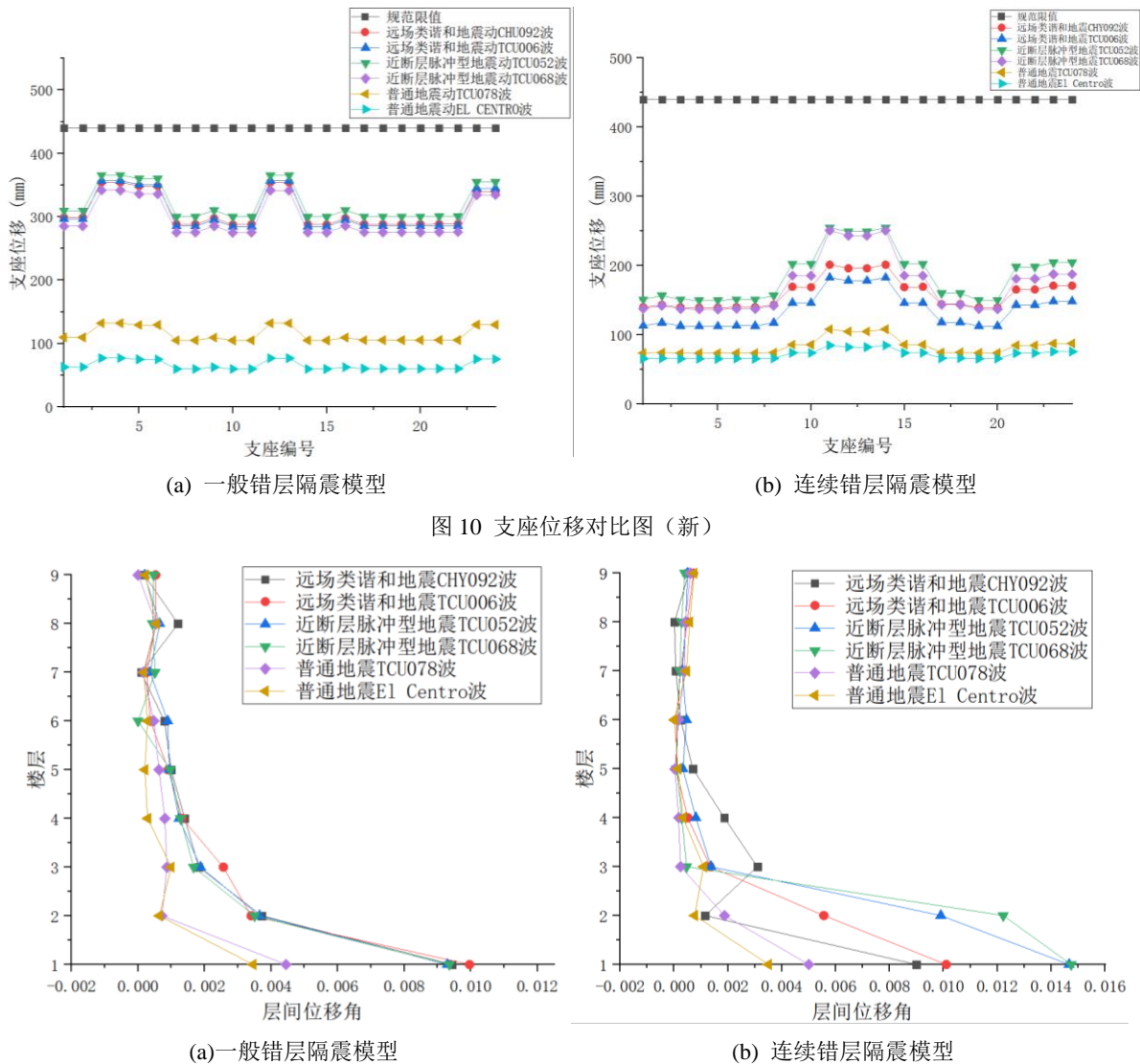


图10 支座位移对比图(新)

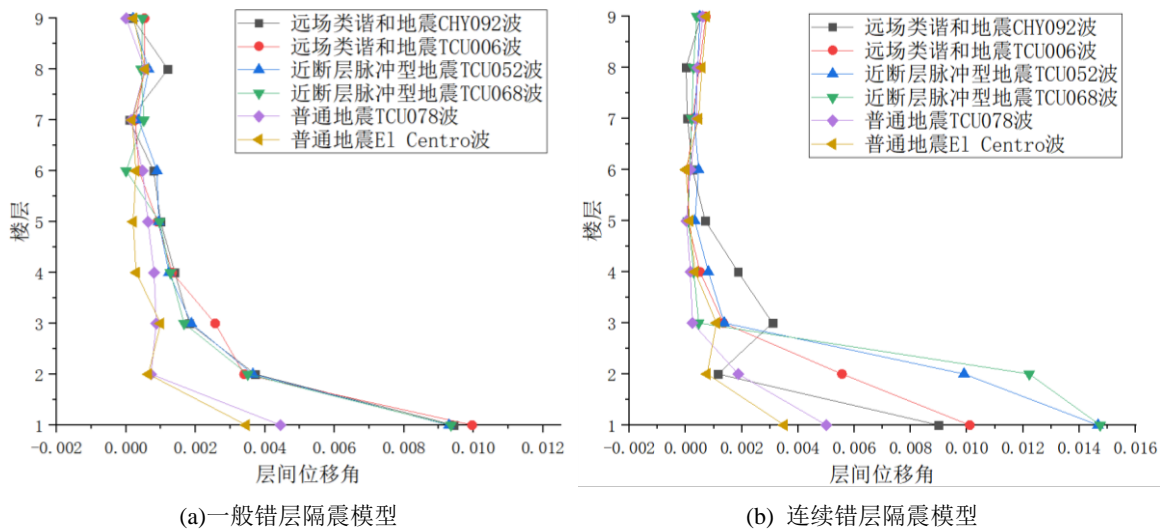


图11 层间位移角对比图



长周期地震下隔震结构的层剪力如图 12 所示。  
两个结构的层间剪力变化规律显然不同。由图 12 (a) 可以看出一般错层隔震结构在长周期地震下，隔震结构前四层的层间剪力明显大于普通地震。长周期地震下隔震结构层间剪力在第三层出现峰值，之后层间剪力逐渐减小，但是在第六层以后又出现上升现象。在结构第三层，远场类谐和地震下的层间剪力与近断层脉冲

型地震下区别不大。在普通地震下隔震结构层间剪力随楼层增高，变化较为平缓。而由图 12 (b) 可以看出连续错层隔震结构在所有类型地震作用下，结构层间剪力变化规律趋近一致。在结构首层，长周期地震下，层间剪力均大于普通地震作用。除 El Centro 波，其余四条地震波作用下，层间剪力的最大值均出现在第三层。结果表明，长周期地震对隔震结构具有复杂的影响。

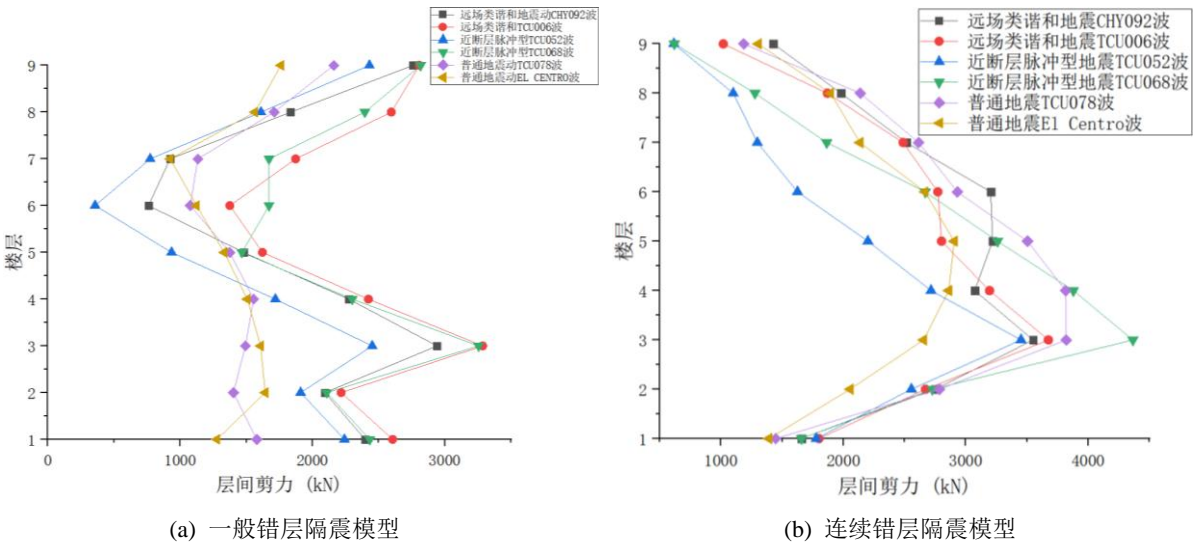


图 12 层间剪力对比图

### 4 长周期地震下错层隔震结构损伤

通过时程对比分析，长周期地震下和普通地震下错层隔震结构损伤具有差异。选取远场类谐和地震动 CHY092、近断层脉冲型地震动 TCU052 和普通地震动 TCU078 进行研究对比。

一般错层隔震结构框架部分出铰情况对比如图 13 所示。

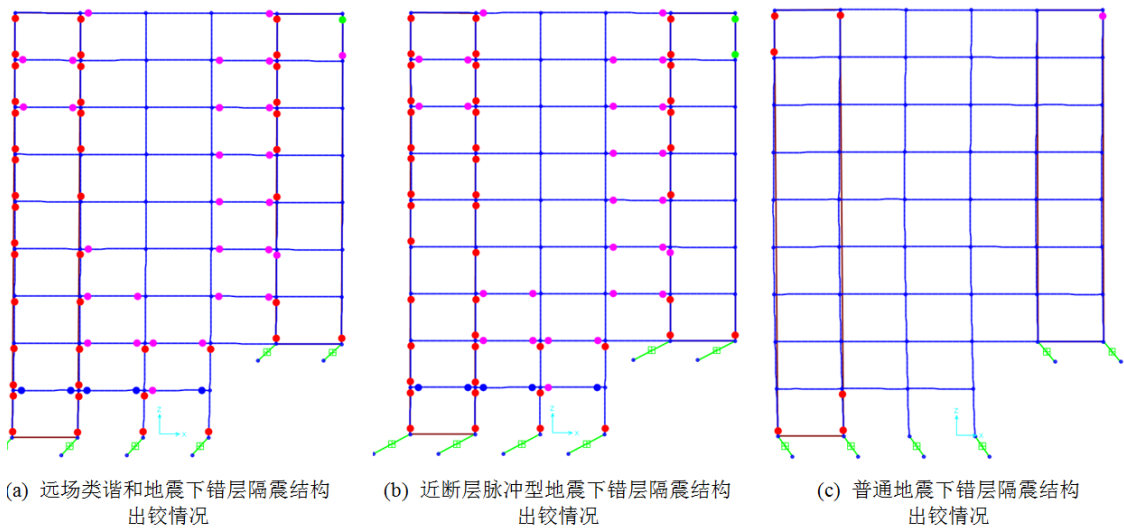


图 13 错层结构出铰情况对比图 (图中红色圆点为塑性铰)

由图 13 可以看出在普通地震作用下, 隔震结构出铰量较少, 结构损伤不是很大。但是在长周期地震作用下, 隔震结构出铰量增加, 结构损伤增加。在远场类谐波和地震作用下, 出铰量较近断层脉冲型地

震动变化不大。长周期地震和普通地震下错层隔震结构塑性铰大部分位于结构前三层和结构顶层。

连续错层隔震结构框架部分出铰情况对比如图 14 所示。

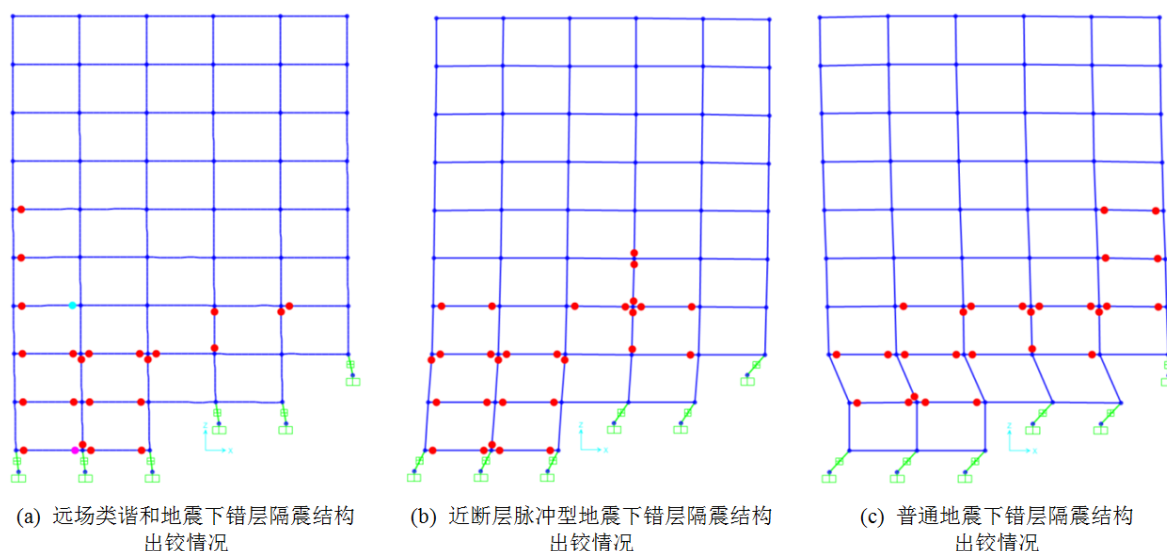


图 14 错层结构出铰情况对比图 (图中红色圆点为塑性铰)

由图 14 可以看出在结构首层普通地震作用下, 隔震结构出铰量较少, 结构损伤不是很大。但是在长周期地震作用下, 结构首层出铰量增加, 结构损伤增加。

对比两个结构出铰量可以看出, 一般错层隔震结

构上部出铰量较大, 连续错层结构上部基本没有出铰情况。但连续错层结构在普通地震下, 靠近隔震层的楼层仍然存在出铰情况, 而一般错层隔震结构没有这样的情况, 两个结构的出铰量存在显著差异。

一般错层隔震结构应力对比如图 15 所示。

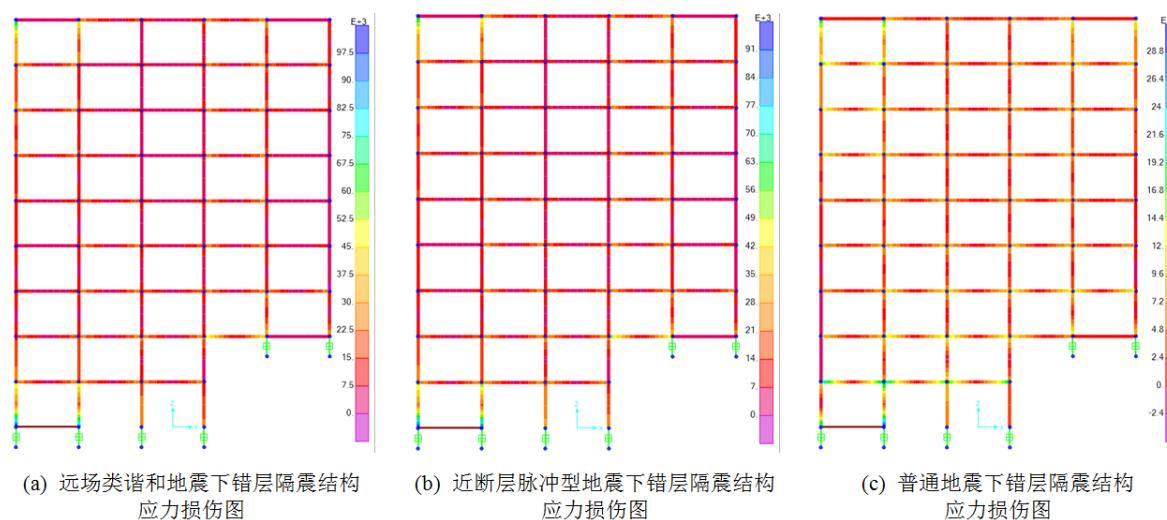


图 15 错层隔震结构应力损伤对比图

由图 15 可以看出, 长周期地震下错层隔震结构应力损伤明显增大, 且远场类谐波和地震损伤大于近断层

脉冲型地震。在长周期地震和普通地震下, 损伤严重的部分相似, 均位于隔震层上部一层至二层处。

连续错层隔震结构应力对比如图 16 所示。

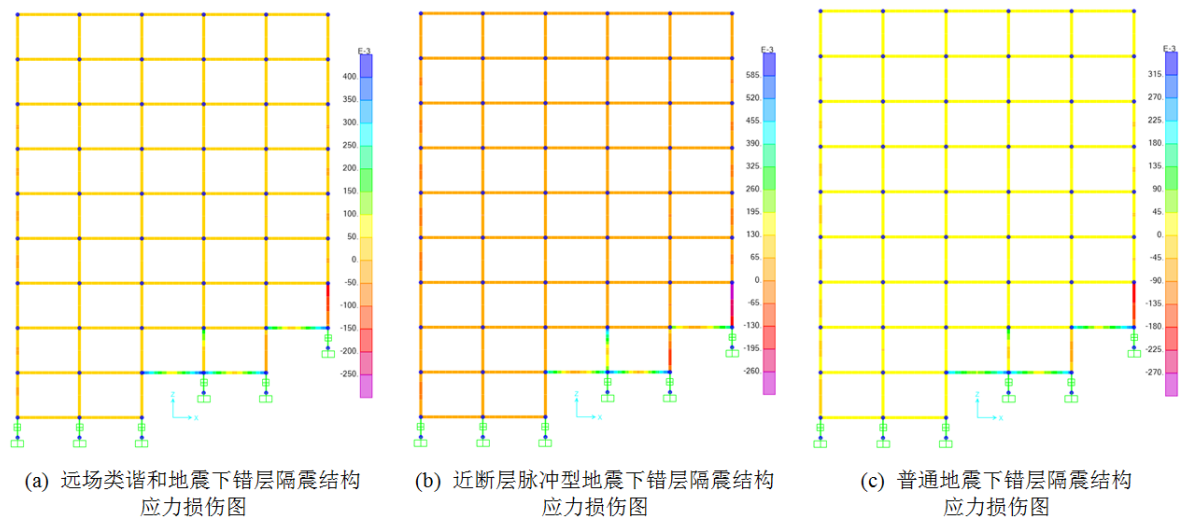


图 16 连续错层隔震结构应力损伤对比图

由图 16 可以看出，长周期地震下连续错层隔震结构应力损伤明显增大，且近断层脉冲型地震损伤大于远场类谐和地震。在长周期地震和普通地震下，损伤严重的位置相似，均位于隔震层附近。

对比两个结构的应力损伤可以看出，两个结构在长周期地震下应力损伤都大于普通地震。且损伤严重的位置都相同，均位于隔震层附近。但是在长周期地震下的情况有所不同，一般错层隔震结构远场类谐和地震损伤较大，而连续错层隔震结构则近断层脉冲型地震损伤较大。

从结构出较量、应力损伤可知：结构的薄弱层位于靠近隔震层的部分，损伤都明显高于结构其他部位。

## 5 结语

建立了两个错层隔震结构模型，进行罕遇地震下的动力时程响应分析，并分普通地震和长周期地震进行对比分析，得出以下结论：

- (1) 普通地震下，两个错层隔震结构周期都有所延长，基底剪力明显减小，总体地震响应减小，隔震支座位移远小于限值，隔震结构取得了良好的隔震效果；
- (2) 长周期地震下，错层隔震结构层间位移角、支座位移、层间剪力、出较量和应力损伤均大于普通地震作用。并且按照罕遇地震进行验算所选取的隔震支座，在长周期地震下，支座位移超过了规范限值，通过改善隔震支座布置后，支座位移达

到了限值以内。但是两个结构在长周期地震下的地震响应存在很大不同。

- (3) 长周期地震卓越周期长、低频成分丰富，对于结构周期较长的结构影响十分复杂。而将长周期地震分为远场类谐和地震和近断层脉冲型地震研究，可以发现，在远场类谐和地震下，结构的支座位移、层间剪力、框架剪力、出较量和应力损伤都不同于近断层脉冲型地震。山地错层结构具有竖向刚度不均匀的特点，结构薄弱位置位于接地层附近。
- (4) 本文通过对两个错层隔震结构进行对比，发现对于长周期地震下，按照以往罕遇地震验算无法达到抗震要求。对于不同错层结构的地震响应同样具有差异性。错层结构对于复杂山地场地利用具有重大帮助，以后会对于更加复杂的结构在长周期地震下的响应进行持续研究。本文不足之处在于对于复杂错层结构缺乏振动台实验数据支撑，以后会努力补足，并且随着当今社会发展，可以对竖向不规则且平面不规则结构展开研究，对于复杂结构工程具有实际意义。

## 参考文献

- [1] 梁华站, 郭思壮, 王磊, 王凤然, 郑辉才, 谭海娜. 美兰机场二期航站楼错层隔震施工技术. 上海: 中国建筑第八工程局有限公司, 2020.

- [2] Kelly, James M. Base isolation linear theory and desing. *Earthquake Spectra*, 2012, 6 (2): 223-244.
- [3] Castaldo P, Tubaldi E. Influence of ground motion characteristics on the optimal single concave sliding bearing properties for base-isolated structures. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2018, 104: 346-364.
- [4] Zhou Y, Li X, Chen Z. Seismic Responses Analysis of Base-Isolated LNG Storage Tank [M] // *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*. Springer, Singapore, 2018.
- [5] Jiazeng Shan, Zhiguo Shi, Nan Gong, Weixing Shi. Performance improvement of base isolation systems by incorporating eddy current damping and magnetic spring under earthquakes. *Structural Control and Health Monitoring*, 2020, 27 (6).
- [6] 尚守平, 胡立豪. 基础隔震结构的减震耗能特性分析 [J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40 (01): 12-21.
- [7] Pérez-Rocha Luis Eduardo, Avilés-López Javier, Tena-Colunga Arturo. Base isolation for mid-rise buildings in presence of soil-structure interaction [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 151.
- [8] 王丽萍. 山地建筑结构设计地震动输入与侧向刚度控制方法. 重庆: 重庆大学, 2010: 40-48.
- [9] 张龙飞, 陶忠, 潘文, 等. 山地掉层框架隔震结构振动台试验研究. *建筑结构学报*, 2020, 41 (9): 24-32.
- [10] 吴正佳. 山地掉层框架隔震结构扭转效应及其试验研究. 昆明: 昆明理工大学, 2018: 121-134.
- [11] 骆辉军. 山地掉层结构的隔震研究. 广州: 华南理工大学, 2019: 35-58.
- [12] 兰晓雯. 基于汶川地震动衰减特征的四川长周期地震动反应谱研究. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [13] 邱立珊. 基于汶川地震记录的远场长周期地震动设计反应谱研究. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [14] 李永义, 周正华. 川滇地区基岩长周期地震动衰减关系研究的迫切性. 第三届防灾减灾工程学术会议论文集. 南京工业大学, 58-63, 2015.
- [15] 董晓燕, 范晓军, 索锐. 辽宁地区长周期地震动灾害预测及防灾对策. *防灾减灾学报*, 29 (03): 5-8, 2013.
- [16] GB50011-2016, 建筑抗震设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [17] 党育, 李连峰. 长周期地震动的界定及对应场地发生概率. *兰州理工大学学报*, 44 (06): 112-117, 2018.
- [18] 赵艺, 于建杰. 远场长周期地震动选取及界定. *山西建筑*, 44 (04): 38-39, 2018.
- [19] 赵晨晓. 基于 HHT 的地震动长周期分量提取与长周期地震动界定方法. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [20] 袁伟泽, 杨永胜, 陈清军, 等. 基于长周期地震动记录的能量谱初探. 上海: 同济大学, 211-220, 2013.
- [21] 李雪红, 王文科, 吴迪, 等. 长周期地震动的特性分析及界定方法研究. *振动工程学报*, 27 (05): 685-692, 2014.
- [22] 火明譔, 赵亚敏, 陆鸣. 近断层地震作用隔震结构研究现状综述. *世界地震工程* 28(3):161-170, 2012.
- [23] 徐龙军, 胡进军, 谢礼立. 特殊长周期地震动的参数研究特性. *地震工程与工程振动*, 2006, 28 (6): 20-28.