

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240808001

掉层钢筋混凝土框架结构上接地隔震性能分析*

李悦悦¹, 宋维举^{1,2,3}, 徐军^{4,5}, 和子硕¹

(1. 河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸 056038; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 3. 华恒建设集团有限公司, 浙江宁波 315012; 4. 西华大学建筑与土木工程学院, 四川成都 610039; 5. 工程结构抗震防灾重庆市重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 由于掉层钢筋混凝土框架结构上接地侧和掉层侧的抗侧刚度分布极不均匀, 其上接地层会出现“半层屈服”现象, 不利于结构整体抗震性能发挥。本文基于上接地层抗侧刚度均匀化的设计思想, 通过在上接地层柱底设置水平刚度与掉层侧柱平均抗侧刚度接近的隔震支座来形成上接地隔震结构体系, 分析了该体系在地震下上接地层柱剪力、最大层间位移角和塑性铰的分布情况, 并探讨了隔震支座规格对其抗震性能的影响规律。结果表明: 使用水平刚度与掉层侧平均抗侧刚度接近的隔震支座可显著改善结构上接地层柱剪力分配的不均匀程度, 减小上接地层的最大层间位移角, 避免上接地层柱发生严重局部破坏, 从而降低结构局部倒塌风险; 在设计中可通过控制选用隔震支座的刚度与掉层侧柱平均抗侧刚度的比值来控制结构在罕遇地震作用下的损伤程度, 进而提高结构的整体抗震性能。

关键词: 掉层框架结构; 隔震支座; 抗震性能

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0379-11

Seismic Performance of Split-foundation Reinforced Concrete Frame Structures with Upper Ground Plane

LI Yueyue¹, SONG Weiju^{1,2,3}, XU Jun^{4,5}, HE Zishuo¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. Huaheng Construction Group, Ningbo 315012, China; 4. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 5. Chongqing Key Laboratory of Earthquake Resistance and Disaster Prevention for Engineering Structures, Chongqing 400045, China)

Abstract: Due to the highly uneven distribution of lateral stiffness between the upper grounding side and the split-foundation side of a split-foundation reinforced concrete frame structure, the "half-layer yielding" phenomenon occurs in its upper ground plane, which undermines the overall seismic performance of the structure. Based on the design concept of uniform lateral stiffness in the upper ground plane, an upper-ground isolation structural system was established by installing isolation bearings at the base of the upper ground columns, with horizontal stiffness close to the average lateral stiffness of the split-foundation side columns. The distribution of column shear forces, maximum interstory displacement angles, and plastic hinges in the upper ground plane under earthquake was analyzed, and

* 收稿日期: 2024-08-08; 修回日期: 2024-09-30

基金项目: 工程结构抗震防灾重庆市重点实验室开放基金(KJJ-CQ-2020017)资助

作者简介: 李悦悦(1999—), 女, 硕士。主要从事结构抗震研究。E-mail: 2425866403@qq.com

the influence of isolation bearing specifications on the seismic performance was investigated. The results indicated that using isolation bearings with horizontal stiffness close to the average lateral stiffness of the split-foundation side columns could significantly improve the uniformity of column shear force distribution in the upper ground plane, reduce the maximum interstory displacement angle of this plane, and prevent severe local damage to the upper ground columns, thereby lowering the risk of local structural collapse. In design, the damage level of the structure under rare earthquakes can be controlled by adjusting the ratio of the stiffness of the selected isolation bearings to the average lateral stiffness of the split-foundation side columns, thereby enhancing the overall seismic performance of the structure.

Keywords: split-foundation frame structure; isolation bearings; seismic performance

0 引言

山地建筑依山而建且顺应地势,可以很好地适应原始地貌,在典型的山地城市,如重庆、香港、四川攀枝花等得到了大量的应用,形成了一批具有山地特色的建筑群。山地建筑常见的结构形式包括掉层、吊脚、附崖和错台等^[1]。其中,掉层框架结构是应用最为广泛的山地结构形式之一,其结构特点是同一结构单元内存在两个或两个以上的不等高嵌固端,且最高接地面以下利用山地高差按层设置楼面^[2]。

近年来,国内外学者对掉层框架结构的抗震性能开展了一系列研究,发现掉层框架结构与平地规则结构的地震反应存在明显差异^[3],综合看来,掉层框架结构刚度和质量在垂直、水平方向上的不规则变化使其比平地规则结构有更大的地震破坏风险^[4-6],且平均倒塌能力比平地结构低31%,需要对结构进行抗震、减震、隔震设计^[7-8]。为此,常采用优化设计方法,如:构件配筋加强^[9]、布置金属阻尼器^[10-11]、设置钢支撑^[12-14]或接地梁^[15]等措施来减轻结构竖向不规则性,从而使结构在地震作用下的内力分布更均匀,避免部分薄弱构件过早发生破坏,一定程度上改善了结构的耗能和抗地震倒塌能力,但这些抗震或减震措施却不能从根本上解决结构局部损伤集中的问题;而隔震支座将结构与地面分离可以保护结构免受地震运动的破坏性影响,从而尽量减少地震或者其它干扰引起的振动,其良好的抗震能力对实现可持续的地震恢复力需求具有重要作用,适用于广泛的结构体系^[16-18]。李瑞峰等^[19]将隔震技术运用于吊脚框架结构第二层柱柱底,发现模型上部楼层变形更为均匀、地震倒塌概率更低,

但在实际设计中应适当减小各吊脚柱之间侧向刚度的差异。张龙飞等^[20]和吴晨浩^[21]开展了掉层隔震结构振动台试验,对比了掉层隔震与非隔震结构宏观试验现象、楼层加速度和楼层位移等指标,结果表明掉层隔震结构的扭转效应减小,地震响应得到了有效控制。韩军等^[22]和唐格林^[23]研究了掉层结构上接地方式对建筑抗震性能的影响,对比了上接地采用固接、铰接、隔震和滑动四种支座时掉层结构的抗震性能,指出掉层结构上接地部分采用隔震支座时,整体结构抗震性能较好。

综上所述,掉层框架结构薄弱层位于上接地层,其上接地柱在地震作用下将分配到更多内力,将不可避免率先屈服、过早破坏。但上述研究结论缺乏定量依据,本文以定量研究为基础,针对上接地柱在上接地层刚度占比大的问题,在上接地柱底设置与掉层侧柱平均抗侧刚度相一致的隔震支座形成上接地隔震体系,并通过数值模拟计算来研究其隔震效果及隔震支座设计参数对结构整体抗震性能的影响规律。

1 上接地隔震基本思想

隔震支座可以干涉地震的传播途径,支座耗能后才传至上部结构,在地震作用下比传统抗震结构的地震反应小,震后修复经济^[24-25]。掉层框架结构由于具有不等高接地面,导致其上下接地层的水平抗侧刚度存在极大差异,在地震作用下,上接地层接地部分容易成为薄弱部位,破坏严重^[26-27]。对于这类特殊震害现象,在上接地层接地柱柱底设置与掉层侧柱平均抗侧刚度相近的隔震支座可以改变接地柱柱底的约束形式可以释放其端部的受力,发挥非接地柱的作用,从而改善上接地层接地和非接

地部分的变形协调性,改变其局部地震破坏模式。

为了表述掉层侧柱抗侧刚度的计算过程,本文将掉层框架结构等效简化为多自由度集中质量模型,如图1所示,在此过程中,将掉层部分和上接地层非接地部分各层组成串联系统,其总刚度用公式表示为:

$$k_d = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}} \quad (1)$$

式中, k_i 为等效侧向刚度,是第 i 层内各侧向力构件刚度总和; k_d 为结构掉层部分和上接地层非接地部分各层总刚度。

由串联系统和上接地层接地部分组成并联系统,其总刚度用公式表示为:

$$k_s = k_d + k_u \quad (2)$$

式中, k_u 为上接地部分各侧向力构件刚度总和; k_s 为掉层部分各层和上接地层的总刚度。

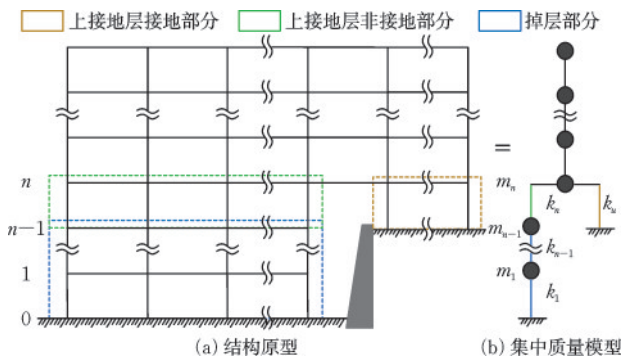


图1 掉层框架等效简化模型^[28]

Fig.1 Equivalent simplified model of split-foundation reinforced concrete frame^[28]

2 掉层框架结构算例设计

为验证不同掉层数和掉跨数下掉层框架结构中隔震支座的使用效果,按照《建筑抗震设计规范》^[29]要求共设计了36个钢筋混凝土掉层框架结构算例模型,其中,多层框架结构上部结构均为4层,掉层部分分别掉1-4层、掉1-4跨,首层层高3.9 m,其余层3.6 m;高层框架结构上部结构均为7层,掉层部分分别掉1-5层、掉1-4跨,首层层高3.6 m,其余层3.3 m。结构算例X向6跨,Y向5跨,开间、进深均为6.0 m,结构算例的构件截面尺寸如表1所示。典型结构立面及配筋如图2所示,依据现行规

范对模型进行配筋设计时,部分超筋梁截面取截面最大允许配筋率2.5%,柱截面取5%,隔震结构由于内力重分布需重新进行配筋设计。

表1 结构梁柱截面尺寸

Table 1 Cross-section dimensions of structural beams and columns

杆件类型	位置	截面尺寸/mm	
多层结构	柱	上接地层以上楼层	550×550
	柱	上接地层和掉层	600×600
	主梁	所有层	300×550
高层结构	次梁	所有层	250×450
	柱	上部楼层最高3层	600×600
		上接地以上3层	650×650
	主梁	上接地层及掉层	700×700
		上接地层以上楼层	300×550
	次梁	上接地层和掉层	300×600
次梁	所有层	250×450	

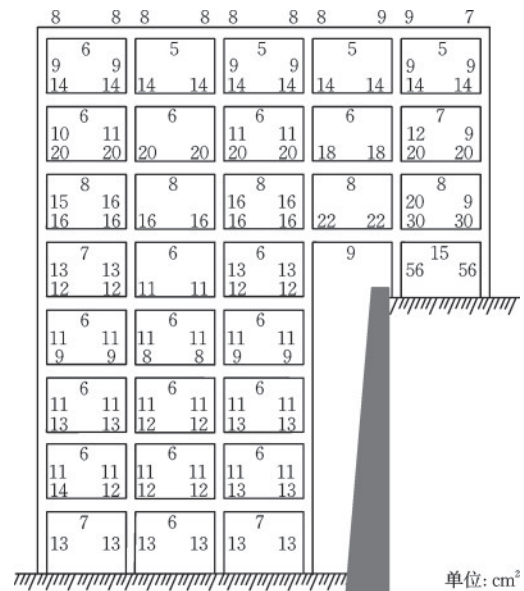


图2 典型结构立面及配筋

Fig.2 Typical structural elevation and reinforcement

结构其他设计参数如下:基本风压取0.4 kN/m²,地面粗糙度B类。楼面恒载标准值取5.0 kN/m²,活载标准值取2.0 kN/m²;屋面恒载标准值取6.0 kN/m²,活载标准值取0.5 kN/m²,楼板厚度100 mm。梁、板、柱混凝土设计强度等级均为C30,混凝土的阻尼比为0.05。梁、柱纵筋选用HRB400,箍筋选用HPB300。结构抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度为0.2g,场地类别为II类,设计地震分组为第二组,特征周期为0.40 s,设防类别为乙类,抗震等级二级。

为了界定上接地隔震方法的适用范围,本文参考徐军^[28]提出的“上接地平均刚度比”的概念和不规则程度分级,在此基础上采用D值法计算各模型的上接地平均刚度比,选出符合上接地隔震方法条件的8个基础模型,其中建立的多层结构为:S6_D2_K4、S7_D3_K4、S8_D4_K3、S8_D4_K4;高层结构为:S11_D4_K3、S11_D4_K4、S12_D5_K3、S12_D5_K4(命名规则为S代表总楼层数,D代表掉层层数,K代表掉跨数,例如结构总楼层数为6,掉层层数为2,掉跨数为4,该模型命名为S6_D2_K4)。

隔震支座一般设置在柱底或剪力墙底部,其数量及直径大小通常根据支座的面压确定,隔震层总水平屈服力决定了隔震支座的水平刚度。根据上述隔震支座基本选用准则,采用“串联”的方式计算掉层侧柱平均抗侧刚度得出各模型隔震橡胶支座选取情况如表2所示,所有支座类型均采用铅芯橡胶支座,其参数选自行业标准《建筑隔震橡胶支座》^[30]。

表2 各模型隔震橡胶支座选取

Table2 Selection of isolation rubber bearings for each model

算例模型	掉层侧柱平均抗侧刚度/ (kN·m ⁻¹)	选用支座规格	选用隔震橡胶支座刚度/ (kN·m ⁻¹)	刚度比
S6_D2_K4	8 187.53	LRB1500	8 600	1.05
S7_D3_K4	5 965.78	LRB1300	6 000	1.01
S8_D4_K3	4 590.28	LRB1200	5 000	1.09
S8_D4_K4	4 694.00	LRB1200	5 000	1.07
S11_D4_K3	8 072.12	LRB1500	8 600	1.07
S11_D4_K4	8 272.26	LRB1500	8 600	1.04
S12_D5_K3	6 582.45	LRB1400	7 200	1.09
S12_D5_K4	6 788.29	LRB1400	7 200	1.06

3 掉层框架结构的抗震性能分析

掉层框架结构与平地规则结构最大的区别是沿顺坡向的不等高接地端,故本文暂不考虑结构横坡向的地震响应,仅选取顺坡向典型框架,分析按掉层侧柱平均抗侧刚度设置橡胶隔震支座的掉层框架隔震结构的弹性和弹塑性地震响应。

3.1 掉层框架结构弹性抗震性能分析

弹性反应谱分析所得各算例模型最大层间位

移角沿楼层的分布情况如图3所示,由图可知,采用上接地隔震后,掉层框架隔震结构上接地层最大层间位移角与之前比下降30%左右,上部楼层的最大层间位移角明显小于非隔震结构,但掉层部分则相反,其原因是设置隔震橡胶支座改变了上接地柱柱底的全约束形式,减小了上接地柱的内力,从而降低了上接地层的抗侧刚度需求,此时结构对掉层部位的抗侧构件需求变大,最大层间位移角也随之增加超越了非隔震结构。此外,掉层框架结构出现最大层间位移角的位置与掉跨数呈现一定规律,当掉跨数为4时,隔震结构与非隔震结构的最大层间位移角均出现在上接地层;掉跨数为3时,隔震结构的最大层间位移角出现在掉层部分。

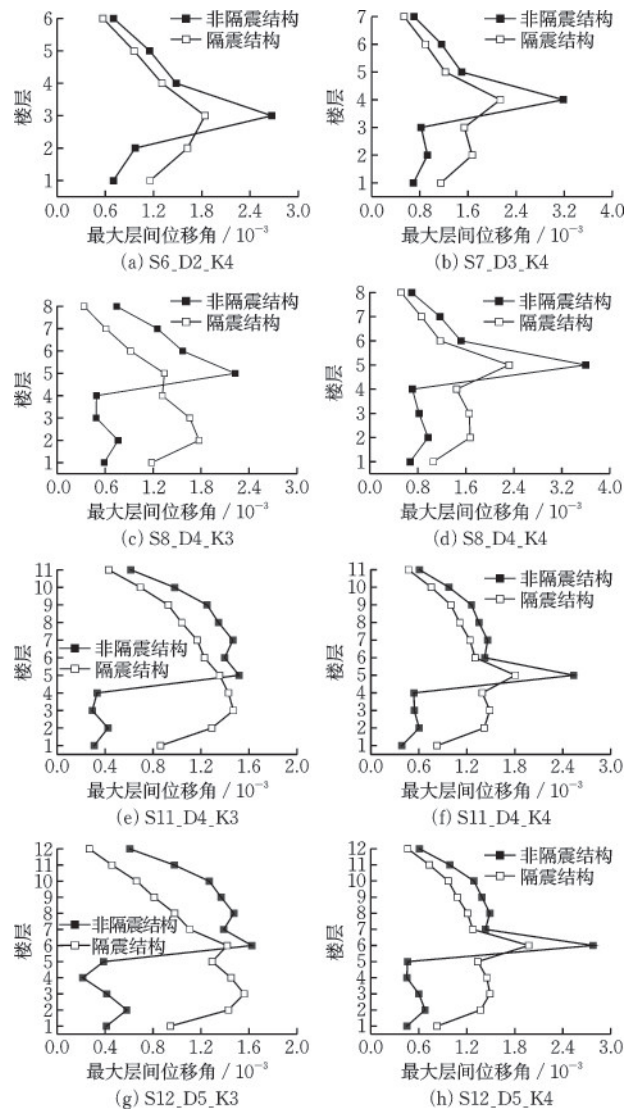


图3 弹性反应谱分析下各模型最大层间位移角分布情况
Fig.3 Distribution of maximum interstory displacement angle of each model under elastic response spectrum analysis

弹性反应谱分析所得各算例模型上接地层柱剪力分布情况如图4所示,其中,柱1-柱6分别对应图2中的轴A-轴F。由图可知,掉层框架非隔震结构上接地层的柱剪力分配极不均匀,剪力集中于上接地柱,非接地柱仅承担少部分的剪力,而隔震结构上接地层的柱剪力较非隔震结构约降低70%,接地柱柱剪力占比约减小30%,这是因为设置橡胶隔震支座后,支座最先耗能,降低了传递给上接地层的内力,同时发挥非接地柱的作用,使上接地层的柱剪力分配更加均匀。当掉跨数为4时,隔震结构上接地层的柱剪力最小;当掉跨数为3时,上接地柱不再是柱剪力最小,并且靠内侧的上接地柱较于外侧柱内力偏大。

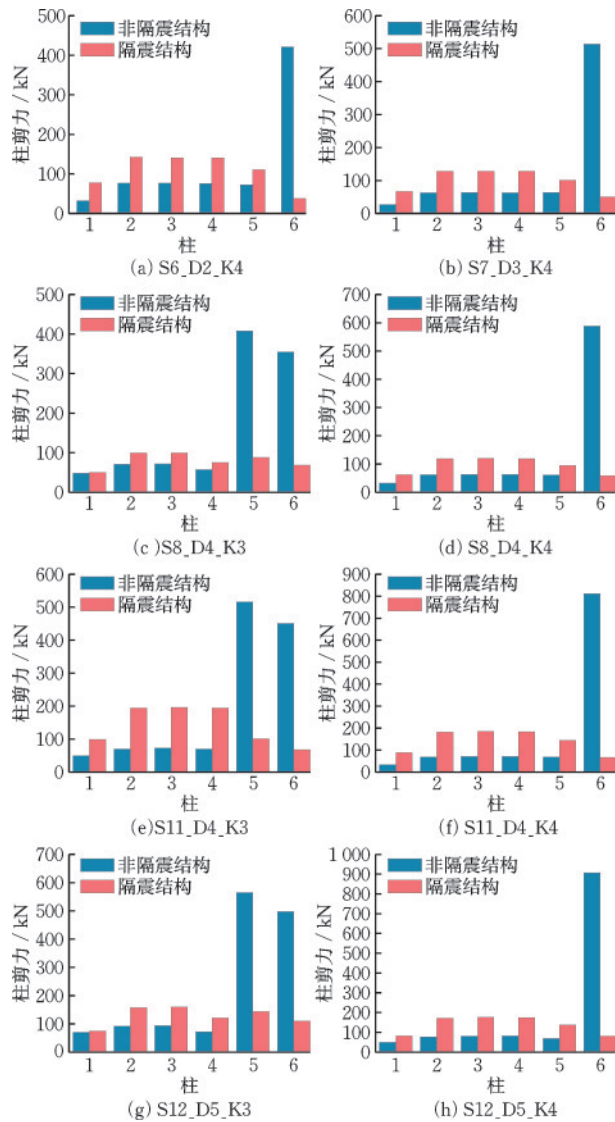


图4 弹性反应谱分析下各模型上接地层柱剪力分布情况
Fig.4 Distribution of shear force of upper-ground-plane columns of each model under elastic response spectrum analysis

3.2 掉层框架结构弹塑性抗震性能分析

本文的8个基础模型均按照双频段选波方法选出2条天然地震动记录,拟合1条人工波,输入到各模型中进行弹塑性时程分析,取各条波计算结果的最大值。各模型输入的地震波如表3所示,所有地震波基本信息如表4所示,模型S8_D4_K3所选地震波反应谱与规范谱拟合情况如图5所示。在实际操作中,地震波均进行了归一化处理,方便将所选地震波的PGA调幅至 400 cm/s^2 。采用双向地震输入方式(X、Y方向的PGA比为1:0.85)输入到8个基础模型中进行顺坡向的弹塑性时程分析,得到掉层框架非隔震模型和隔震模型的塑性铰、最大层间位移角和上接地层柱剪力分布情况,分析掉层框架隔震结构在罕遇地震作用下的地震响应。

表3 各模型地震波选取

Table 3 Selection of seismic waves for each model

算例模型	基本周期/s	所输地震波
S6_D2_K4	0.906	RSN3、RSN6、REN2
S7_D3_K4	1.002	RSN3、RSN5、REN2
S8_D4_K3	0.919	RSN3、RSN5、REN3
S8_D4_K4	1.091	RSN2、RSN5、REN2
S11_D4_K3	1.111	RSN2、RSN5、REN2
S11_D4_K4	1.229	RSN1、RSN5、REN1
S12_D5_K3	1.24	RSN4、RSN5、REN1
S12_D5_K4	1.417	RSN1、RSN3、REN2

表4 地震波信息

Table 4 Information of seismic waves

编号	地震记录名称	地震地点	震级	持时/s
RSN1	Borrego Mtn	San Onofre-So Cal Edison	6.63	45.21
RSN2	San Fernando	2516 Via Tejon PV	6.61	70.19
RSN3	San Fernando	Cedar Springs_Al- len Ranch	6.61	14.74
RSN4	Friuli_Italy-02	Codroipo	5.91	33.57
RSN5	Imperial Valley-06	Chihuahua	6.53	51.59
RSN6	Imperial Valley-06	El Centro Differential Array	6.53	39.10
REN1	—	—	—	—
REN2	—	—	—	—
REN3	—	—	—	—

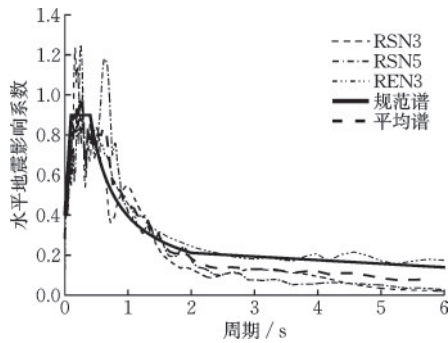


图5 地震波反应谱与规范谱拟合情况

Fig.5 Fitting of seismic wave response spectrum and canonical spectrum

罕遇地震作用下各算例模型上接地层柱剪力分布情况如图6所示,可以发现非隔震结构上接地层柱剪力之和相对在小震作用下非隔震结构上接地层柱剪力之和要偏大,原因是在罕遇地震作用过程中结构剪力需求变大,由于上接地柱的约束方式为全约束,故上接地层的剪力主要集中在上接地柱,结构存在局部地震破坏风险。此时在上接地柱柱底设置隔震支座,隔震结构中上接地柱地震剪力较非隔震结构下降40%~80%,占比相对减小10%~40%,总体看来结构跟小震作用下的柱剪力分配规律一致,上接地层柱剪力分配更加均匀并且上接地柱剪力需求降低,当结构掉跨数为4时尤为明显。

罕遇地震作用下部分非隔震模型和隔震模型顺坡向中间一榀框架塑性铰分布情况如图7所示,圆点表示出现塑性铰的位置,根据塑性铰的变形控制能力和损伤程度,将塑性铰的发展分为3个状态,分别是:立即使用状态IO,生命安全状态LS,防止倒塌状态CP。IO前构件完好无损,LS前构件也满足一般要求,CP前构件发生破坏,直至CP点结构塑性铰达到了塑性发展的极限状态,超过CP点后结构存在残余应力不再继续破坏或直接倒塌。

由图7可知,非隔震结构上部结构的出铰率明显高于隔震模型,其多数楼层的梁端存在塑性铰,较为严重的梁损伤常出现在上接地柱柱顶侧,当梁的大部分杆件出现塑性铰后,柱端开始出铰,由图中规律可发现柱端出铰往往发生在上接地柱底部,当其损伤程度较大超过CP点时,说明结构发生局部破坏,损伤路径发生了改变,此时主要由上接地层的上一层掉层侧柱承担地震能量,故该位置柱也会出现塑性铰。较于非隔震结构,隔震结构上部楼层的梁端塑性铰数量减小,上接地柱柱端也不再产生塑性铰,总体上其局部地震破坏程度较非隔震结构明显减轻,结合图6上接地层柱剪力分配情况可

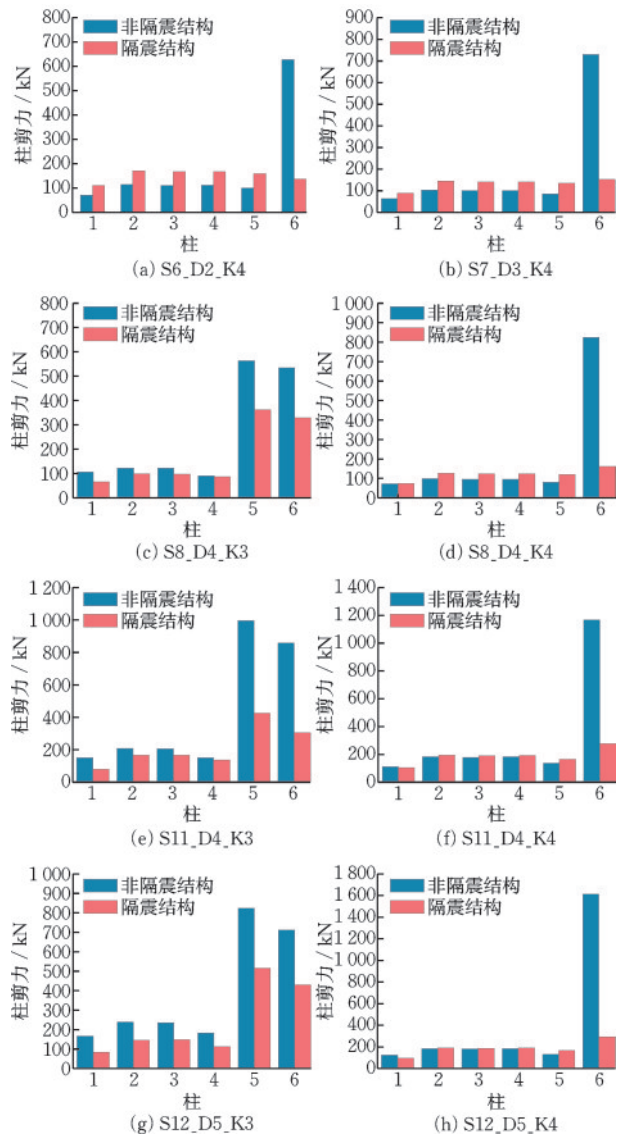


图6 罕遇地震下各模型上接地层柱剪力分布情况

Fig.6 Distribution of shear force of upper-ground-plane columns of each model under rare earthquakes

知,设置隔震橡胶支座后上接地层刚度分布更均匀,但结构掉层侧构件受力变大,导致塑性铰开始向掉层部分发展。

罕遇地震作用下各算例模型最大层间位移角沿楼层的分布情况如图8所示,可以发现上接地隔震后结构的位移减小率在10%~20%,位移响应改善程度低于弹性分析,并且掉跨数的改变不会影响最大层间位移角的出现位置。由图7可知,隔震体系上部楼层的塑性铰转移到了结构的掉层部分,故隔震结构上部楼层的最大层间位移角较非隔震结构偏小,掉层部分则偏大,整体观察最大层间位移角沿楼层的变化趋势可发现使用与掉层侧柱水平抗侧刚度接近的隔震橡胶支座没有完美解决结构本身竖向刚度分布不规则的问题,结构的刚心与质

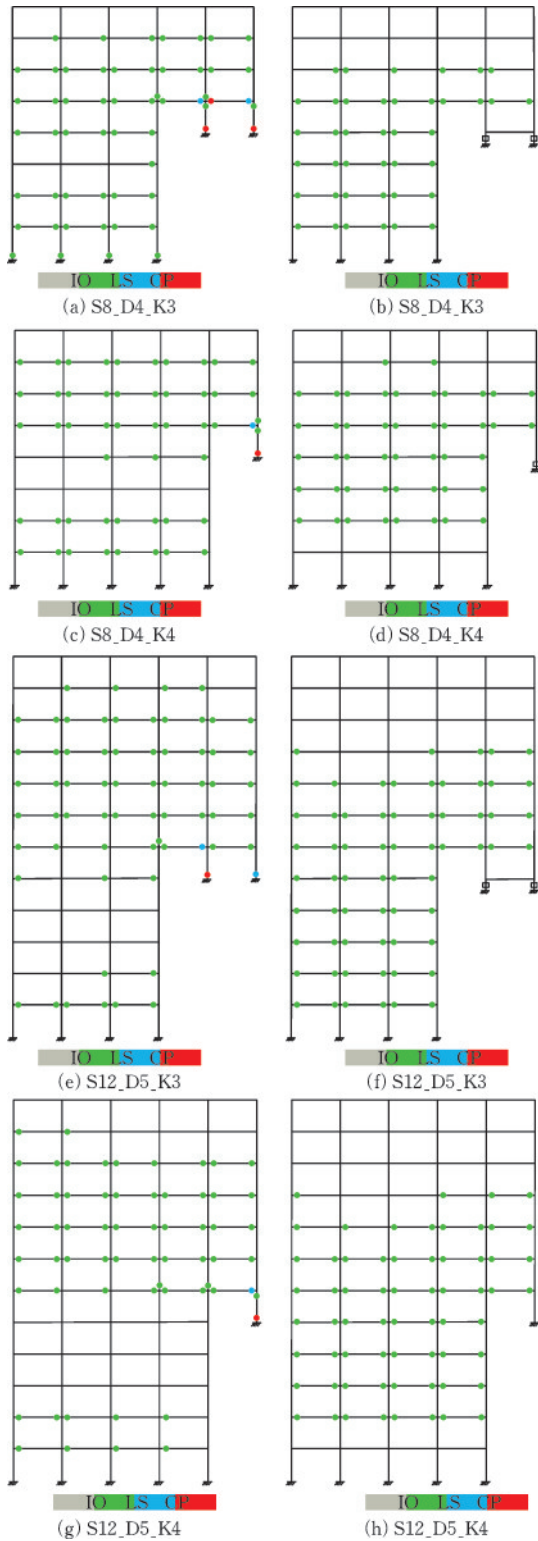


图7 罕遇地震作用下非隔震模型和隔震模型的塑性铰分布
Fig.7 Distribution of plastic hinges of non-isolation and isolation models under rare earthquakes

心并没有重合,此时可以适当加大掉层部分构件尺寸提高掉层部分的受力,或者降低隔震橡胶支座规格,使结构的刚心与质心更加接近,从而提高结构整体的稳定性和抗震性能。

按照上接地层刚度均匀化的思想在上接地柱柱底设置隔震橡胶支座,由图6可知上接地隔震设计使上接地层的剪力分配更加合理,图7、图8表示改善上接地柱柱底的全约束形式会改变结构在地震作用下的内力路径,导致掉层侧构件受力变大,说明结构的质心和刚心仍有较大的偏心距,在上接地柱底设置隔震支座,通过减小上接地隔震支座的刚度可以调节刚心的位置,使其尽可能靠近质心,从而控制结构的侧向位移,避免结构发生局部破坏。

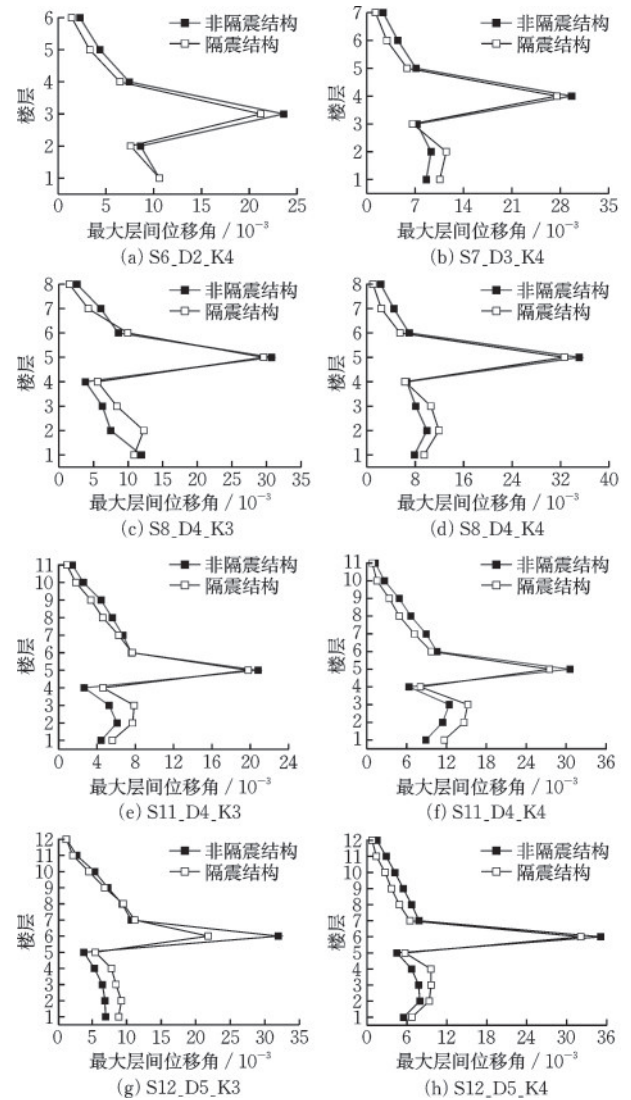


图8 罕遇地震下各模型最大层间位移角分布情况
Fig.8 Distribution of maximum interstory displacement angle of each model under rare earthquakes

4 不同规格支座下掉层框架结构的抗震性能

根据上述的掉层框架结构的上接地隔震设计

方法流程,本节同样以顺坡向的掉层框架结构为研究对象,在原本的掉层隔震结构模型的基础上不断减小支座规格,通过分析其最大层间位移角的分布情况,考察隔震橡胶支座水平刚度与掉层侧柱平均抗侧刚度的刚度比变化下掉层框架结构的地震响应。

4.1 弹性反应谱分析下结构的最大层间位移角

图9给出了弹性反应谱分析下各掉层框架隔震结构与非隔震结构的最大层间位移角分布情况,

因不同算例刚度不同,支座选用型号也不同,为方便表述本文以所选用的支座规格代表相应的算例模型,例如LRB1500代表选用隔震支座直径为1500mm的算例模型。

由图可知,掉层框架非隔震结构与隔震结构最大层间位移角的分布规律与3.1节基本相同,这里不再赘述。此外,可以发现各隔震模型之间最大层间位移角的分布情况在上接地层以上楼层无明显差异,说明改变橡胶隔震支座的刚度不会引起结构

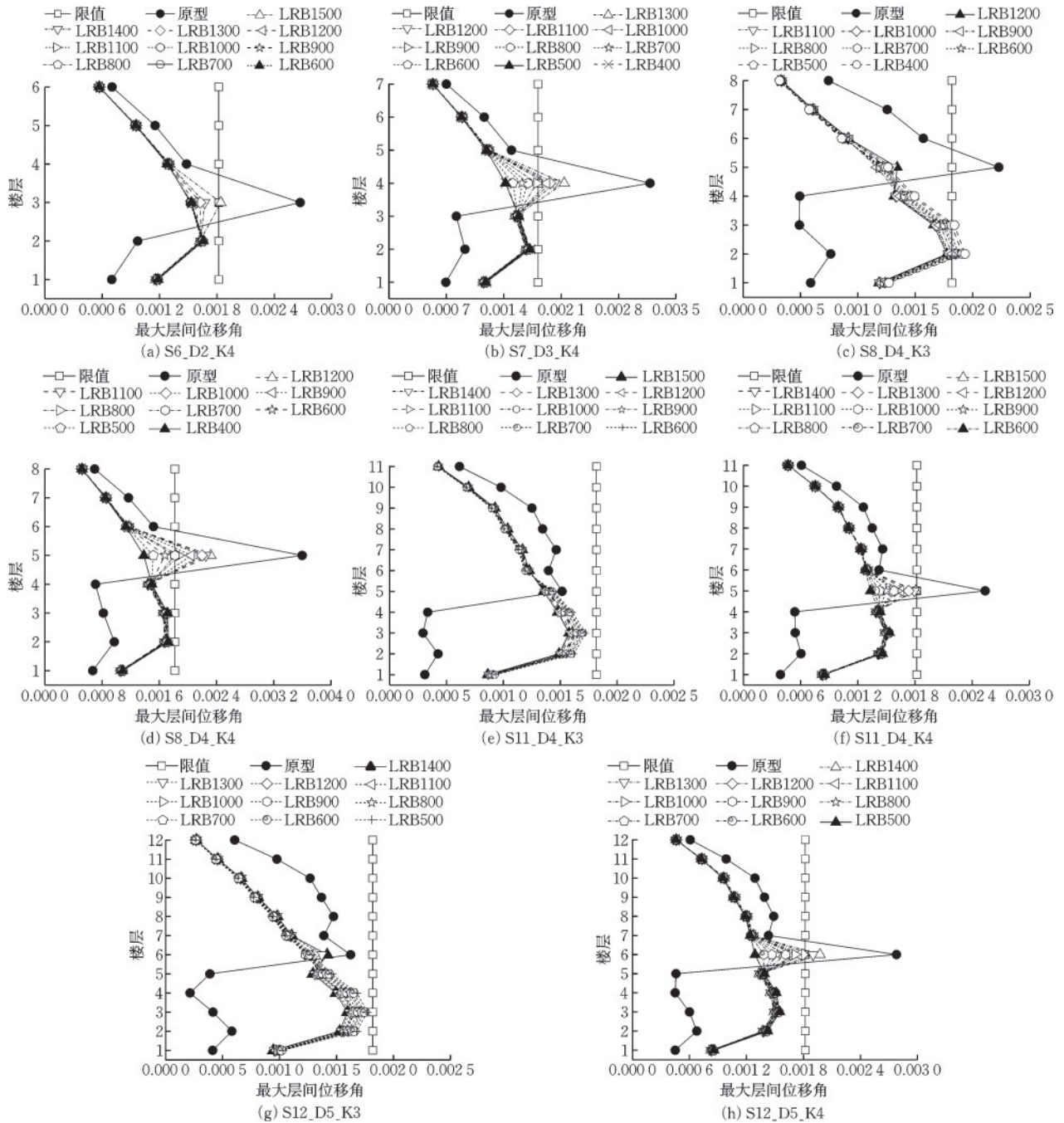


图9 最大层间位移角分布情况

Fig.9 Distribution of maximum interstory displacement angle

在最大层间位移角的变化;而在上接地层,掉层框架隔震结构的最大层间位移角分布情况与橡胶隔震支座的刚度掉层侧平均抗侧刚度的比值有关,当刚度比接近1时,隔震结构在上接地层的最大层间位移角最大,反之则相反;在掉层部分,掉层框架隔震结构的最大层间位移角与刚度比和掉跨数均有关,掉3跨且当刚度比接近1时,掉层部分的最大层间位移角越小,此时隔震结构有更好的地震响应,掉4跨时各掉层框架隔震结构的最大层间位移角差

别不大,此时,使用满足安全性能要求的小规格支座效果佳也更加经济。

4.2 罕遇地震下结构的最大层间位移角

图10给出了罕遇地震作用下各掉层框架隔震结构与原型最大层间位移角分布情况,由图可知,各模型与弹性反应谱分析下的最大层间位移角分布规律基本一致,但隔震模型与非隔震模型的最大层间位移角均出现在上接地层。当结构掉跨数为4

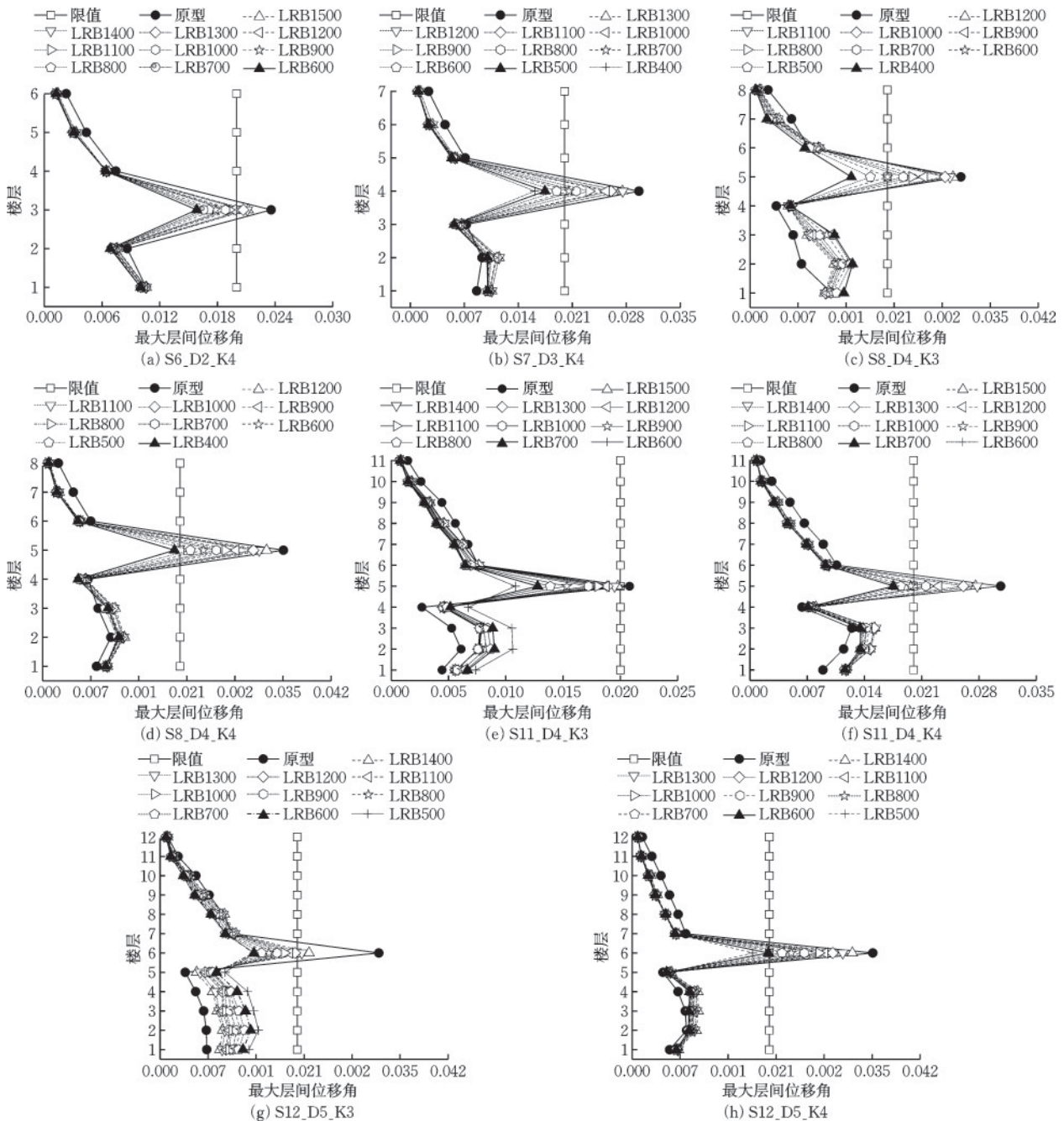


图10 最大层间位移角分布情况

Fig.10 Distribution of maximum interstory displacement angle

且选用支座与掉层侧柱平均抗侧刚度接近1时,其上接地层和掉层部分最大层位移角越大,掉3跨时结构掉层部分最大层间位移角则相反。

为更加准确分析不同规格支座下各模型的地震响应情况,表5给出了在使用不同规格隔震橡胶支座下各隔震模型较原型上接地层各指标分配的最优结果,包括位移减小率和上接地柱剪力占比。结合表中各指标变化规律,可得在满足隔震层总屈服力和选用隔震橡胶支座最小直径的前提下,所选支座的刚度与掉层侧平均抗侧刚度比值降低30%左右时,位移和上接地柱占比均呈现出合理减小的趋势。

结合表5中数据及图10中最大层间位移角分布,可以发现结构选用隔震橡胶支座与掉层侧柱平均抗侧刚度的刚度比在0.3左右时,结构在整个楼层中最大层间位移角和柱剪力占比更均匀,从而最大程度上可以避免结构的侧向变形集中于局部楼层,说明适当降低刚度比后结构各抗震指标呈现更合理的分布,此时结构损伤也较为理想。

表5 上接地层各指标分配

Table 5 Distribution of different indicators of upper ground plane

模型	编号	刚度比	位移 减小率/%	上接地柱 剪力占比/%
S6_D2_K4	LRB600	0.28	32.84	8.76
S7_D3_K4	LRB500	0.32	41.11	10.23
S8_D4_K3	LRB400	0.33	51.96	45.28
S8_D4_K4	LRB400	0.32	45.24	11.76
S11_D4_K3	LRB700	0.34	38.56	35.15
S11_D4_K4	LRB700	0.33	42.85	17.93
S12_D5_K3	LRB600	0.35	57.12	51.53
S12_D5_K4	LRB600	0.34	43.43	13.06

5 结 论

针对掉层框架结构上接地层内力集中于上接地柱,而非接地柱无法发挥作用的问题,本文根据上接地层刚度均匀化的思想设计上接地柱柱底橡胶隔震支座的匹配刚度,利用有限元分析软件建立掉层框架非隔震模型和隔震模型并展开了弹性反应谱分析和弹塑性动力时程分析,通过考察掉层框架结构的最大层间位移角、柱剪力和塑性铰等指标研究结构上接地隔震性能,所得结论如下:

(1) 根据弹性分析和弹塑性分析结果,与传统非隔震掉层结构相比,采用上接地隔震设计后,结构上接地层的内力分布呈现均匀化,整体损伤程度更低,掉层结构天生的竖向刚度分布极不均匀情况也可得到极大改善,根本性改善了结构局部倒塌失效破坏模式。

(2) 适当减小隔震橡胶支座刚度与掉层侧柱平均抗侧刚度的比值可以进一步改善结构天生的竖向不规则程度,当刚度比在0.3左右且掉3跨时的结构柱剪力分配更符合实际情况,掉4跨的结构侧向变形明显不再集中于局部楼层。

参考文献:

- [1] 戴志中. 现代山地建筑接地诠释[J]. 城市建筑, 2006(8): 20-24.
Dai Z Z. The annotation on the earthing of contemporary mountainous building [J]. Urbanism and Architecture, 2006(8): 20-24. (in Chinese)
- [2] 王丽萍. 山地建筑设计地震动输入与侧向刚度控制方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
Wang L P. Design ground motion input and control method of lateral stiffness for building structures on the slope [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [3] Tang Y Y, Li Y M, Jiang B L, et al. Study on redistribution of internal force and plastic hinge development of mountainous building structures with foundations at two different elevations [J]. Buildings, 2023, 13(4): 909.
- [4] 赵炜. 掉层框架结构强震破坏模式研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
Zhao W. Study on failure modes of RC frame structures supported by foundations with different horizontal levels under strong ground motions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [5] Xu G, Li A. Seismic performance and improvements of stepback steelframes [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2021, 25(2): 163-187.
- [6] Patil R T, Raghunandan M. Seismic collapse risk of reinforced concrete hillside buildings in Indian Himalayan belt [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2021, 19(13): 5665-5689.
- [7] Bahuguna A, Firoj M. Numerical simulation of seismic response of Slope-Foundation-Structure interaction for mid-rise RC buildings at various locations [J]. Struc-

- tures, 2022, 44: 343-356.
- [8] Magapu S, Setia S. Fragility curves for assessment of seismic vulnerability of buildings on slopes [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 173: 108069.
- [9] 唐洋洋, 李英民, 韩军, 等. 配筋加强的掉层框架结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(19): 226-233.
Tang Y Y, Li Y M, Han J, et al. Shaking table test for strengthened-reinforcement frame structure supported by foundations with different elevations [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(19): 226-233. (in Chinese)
- [10] 韩军, 张岩, 范天霖, 等. 布置金属阻尼器的RC掉层框架结构减震性能分析[J]. 土木工程学报, 2022, 55(增1): 209-218.
Han J, Zhang Y, Fan T L, et al. Study on damping performance of RC frame structure supported by foundations with different elevations with metal damper [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(Sup1): 209-218. (in Chinese)
- [11] 范天霖. 金属阻尼器应用于RC掉层框架结构的减震性能分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
Fan T L. Research on seismic performance analysis of metal dampers applied to RC step-terrace frame structure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
- [12] 刘立平, 李瑞锋, 殷尧日, 等. 钢支撑-钢筋混凝土掉层框架结构抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2024, 41(1): 182-192.
Liu L P, Li R F, Yin Y R, et al. Experimental study on seismic performance of reinforced concrete split-foundation frame structures with steel braces [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(1): 182-192. (in Chinese)
- [13] Chen S C, Zheng L Y, Yan W M, et al. Seismic performance of post-tensioned precast concrete joints improved with curved steel braces [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2022, 26(3): 1461-1479.
- [14] Li R F, Liu L P, Yin Y R, et al. Seismic performance of RC split-foundation frame structures with steel braces in the mountainous area [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2022, 22(3n04): 2240011.
- [15] 徐军, 李英民, 赖永余, 等. 设有接地梁的掉层钢筋混凝土框架抗震性能试验及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 60-68.
- Xu J, Li Y M, Lai Y Y, et al. Experiment and finite element analysis of seismic behavior of split-foundation RC frame with earthing beam [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 60-68. (in Chinese)
- [16] Yenidogan C. Earthquake-resilient design of seismically isolated buildings: A review of technology [J]. Vibration, 2021, 4(3): 602-647.
- [17] 黄潇, 胡志祥, 刘运林. 极罕遇地震作用下LRB基础隔震结构地震响应特性[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(3): 436-444.
Huang X, Hu Z X, Liu Y L. Seismic response behavior of LRB base-isolated structure under extreme rare earthquakes [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 436-444. (in Chinese)
- [18] 赵畅, 于旭, 庄海洋, 等. 考虑SSI效应的基础隔震框架结构抗震性能水平分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 1024-1034.
Zhao C, Yu X, Zhuang H Y, et al. Horizontal analysis of seismic behavior of base isolated frame structure considering SSI effect [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(5): 1024-1034. (in Chinese)
- [19] 李瑞锋, 刘立平, 尹力, 等. 隔震支座布置形式对坡地吊脚楼结构抗震性能的影响研究[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(1): 148-157.
Li R F, Liu L P, Yin L, et al. Study on the influence of the layout of isolation bearings on the seismic performance of stilted buildings on the slope [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(1): 148-157. (in Chinese)
- [20] 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[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(9): 24-32, 44.
Zhang L F, Tao Z, Pan W, et al. Shaking table test on isolated step-terrace frame structure in mountainous area [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(9): 24-32, 44. (in Chinese)
- [21] 吴晨浩. 隔震技术在某掉层结构应用中的探讨[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
Wu C H. Discussion on the application of isolation bearing in a step-terrace structure engineering [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)

(本文编辑: 池营营)

(下转第 453 页)