

袁梦醒,陈望,刘彦辉,等.柱顶层间隔震体系增量动力响应研究[J].地震工程学报,2020,42(4):872-880.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.872

YUAN Mengxing, CHEN Wang, LIU Yanhui, et al. Incremental Dynamic Response of Inter-story Isolation System on Top of Columns[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(4): 872-880. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.872

柱顶层间隔震体系增量动力响应研究

袁梦醒, 陈 望, 刘彦辉, 谭 平, 金建敏

(广州大学工程抗震研究中心, 广东 广州 510405)

摘要: 针对悬臂柱顶有拉梁和无拉梁层间隔震体系的抗震性能问题,运用增量动力分析(IDA)方法进行弹塑性分析,模拟结构从弹性到弹塑性直至最后倒塌的全过程。通过调幅地震动得到相应的层间位移角及峰值加速度,分别绘制单条与多条 IDA 曲线分析拉梁对隔震结构动力响应的影响,研究两种结构的抗震性能。结果表明:在相同性能点,有拉梁和无拉梁对纤维铰弯矩值和曲率值基本无影响,而在不同性能点,纤维铰状态明显不同;两种体系从正常使用阶段到防止倒塌阶段所需的加速度峰值的差距慢慢增大;在极罕遇地震下,柱顶有拉梁层间隔震体系的下部结构抗震性能要高于柱顶无拉梁层间隔震体系。

关键词: 层间隔震; 拉梁; 增量动力分析; 极罕遇地震; 抗震性能

中图分类号: TU352.12

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)04-0872-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.872

Incremental Dynamic Response of Inter-story Isolation System on Top of Columns

YUAN Mengxing, CHEN Wang, LIU Yanhui, TAN Ping, JIN Jianmin

(Engineering Research Center for Earthquake Resistance, Guangzhou University, Guangzhou 510405, Guangdong, China)

Abstract: To study the seismic performance of inter-story isolation systems with and without a straining beam on the top of cantilever columns, we used the incremental dynamic analysis (IDA) method to simulate the whole process from elasticity to elasto-plasticity until structural collapse. We obtained the story drift ratio and peak acceleration by modulating the amplitude of the ground motions. We then plotted IDA curves to explore the influence of the straining beam on the dynamic response of the isolation structure and to study the seismic performances of the two structures. The results show that at the same performance point, the straining beam has no effect on the bending moment and curvature values of the fiber hinge, but at different performance points, the state of the fiber hinge is significantly different. The difference between the peak acceleration of the two systems increases from the normal-use state to the collapse-prevention state. When subjected to extremely rare earthquakes, the seismic performance of the sub-structure in the inter-story isolation system with a straining beam on top of the cantilever column is higher than that without a straining beam. **Keywords:** inter-story isolation; straining beam; incremental dy-

收稿日期:2019-10-24

基金项目:国家自然科学基金(51778163);国家重点研发计划重点专项(2016YFE0127600);广州市属高校科研项目(1201610135,1201620162)

第一作者简介:袁梦醒(1993—),女,河南浉池人,硕士研究生,研究方向:结构隔震研究。

通信作者:刘彦辉(1980—),男,河南扶沟人,教授,研究方向:结构减震控制研究。E-mail:Liuyanhui2012@163.com。

dynamic analysis (IDA); extremely rare earthquake; seismic performance

Keywords: inter-story isolation system; pull-beam; the incremental dynamic analysis (IDA); extremely rare earthquakes; seismic performance

0 引言

近年来增量动力分析 (incremental dynamic analysis, IDA) 方法的发展与运用得到土木界学者的高度重视。2002 年, Vamvatsikos^[1] 对 IDA 方法的基本原理和实施过程做了详细总结。IDA 方法作为一种参数分析方法, 能反映出结构在强震作用下的刚度、承载力以及变形能力的变化过程^[2], 目前已被广泛应用于结构基于性能的抗震评估中^[3-7]。马肖彤等^[8] 针对一典型的 20 层钢筋混凝土框架剪力墙结构, 利用增量动力分析方法研究结构的地震反应和抗倒塌性能。化明星等^[9] 针对某大底盘多塔结构高层建筑超限情况, 采用基于性能目标的抗震设计方法, 确保结构在地震作用下具有良好的抗震性能。吴应雄等^[10-11] 采用有限元软件证明柱顶隔震技术可以提高一层弱框架结构的抗震性能, 并通过测试检验隔震层的工作性能, 得到隔震层具有快速复位特性的结论。柱顶隔震层的存在会导致结构整体刚度变化, 对于串联层间柱顶隔震结构, 可以通过在悬臂柱顶设置拉梁的方式来增加柱顶隔震层下部的额外刚度。杜永峰等^[12] 通过计算无连梁柱与有连梁柱串联隔震系统的临界荷载来探讨参数变化对隔震体系稳定性的影响。贾益纲等^[13] 采用三维实体退化虚拟层合单元非线性有限元分析法对 RC 空间框架模型进行仿真分析, 结果表明: 板顶钢筋对 RC 框架结构抗侧屈服机制影响最大。吴应雄等^[14] 研究了底层带拉梁框架柱和独立柱这两种不同的柱顶隔震体系在不同幅值地震作用下的地震响应。王健康等^[15] 研究了钢梁与混凝土的界面滑移效应对钢-混凝土组合梁的静力性能和自振频率的影响。徐刚等^[16] 对 4 个框架结构算例进行大震弹塑性分析, 结果表明采取改进措施的带拉梁掉层框架结构的抗震效果最为显著。陈望^[17]、秦熙等^[18] 研究了悬臂柱尺寸、P-Δ 效应、下部结构有无拉梁结构对结构整体动力响应的影响。

基于上述研究, 本文拟通过 ETABS 有限元软件建立分析模型, 运用增量动力分析方法分别绘制有、无拉梁柱顶隔震体系的 IDA 曲线, 分析拉梁对隔震结构动力响应的影响, 以研究两种结构的抗震性能。

1 模型概况

图 1 为首层悬臂柱有拉梁柱顶隔震结构的 3D

模型。结构构件尺寸列于表 1。上部结构层高 3.7 m, 隔震层取 4.2 m, 悬臂柱高 2.5 m, 截面边长为 0.4~0.8 m。纵向 4 跨, 跨度为 8.4 m; 横向 3 跨, 跨度边跨为 8.1 m; 中间走廊宽 2.4 m。梁的混凝土等级为 C30, 1 层和 3 层柱的混凝土等级为 C40, 3 层以上为 C30。结构按乙类建筑设防, 抗震设防烈度为Ⅷ度 (0.3g), 地震分组为第三组, 特征周期为 0.45 s, 使用年限为 50 年, 建筑场地类别为Ⅱ类。



图 1 带拉梁的柱顶隔震结构 3D 模型
Fig.1 3D model of the column-top isolation structure with straining beam

表 1 结构构件尺寸表 (单位: mm)

Table 1 Size of structure members (Unit: mm)			
楼层	柱截面尺寸	梁截面尺寸	
1	-	400×200 (拉梁)	
3	500×500	800×300	600×300 (走廊)
4~6	500×500	650×300	400×300 (走廊)

隔震层设置于底层悬臂柱顶, 隔震装置采用橡胶隔震支座, 布置采用一柱一支座的形式。橡胶支座的型号分别为 LRB500、LRB600 和 LNR600, 其力学性能参数列于表 2。支座力学模型采用 Bouc-Wen 模型。

运用 ETABS 有限元软件进行结构动力响应分析时, 在杆端设置塑性铰, 利用杆端的弹塑性转角来描述整个杆件的弹塑性。框架非线性铰的定义主要分为梁的塑性铰和柱的塑性铰, 对于梁一般定义主方向的弯矩铰, 对于柱一般定义 P-M-M 铰, 运用集中非线性模型来模拟梁柱的非线性。(本文选取无拉梁层间柱顶隔震体系悬臂柱尺寸 650 mm×650 mm 和有拉梁层间柱顶隔震体系悬臂柱尺寸 600 mm×600 mm 作为弹塑性分析的构件尺寸。)

表 2 橡胶隔震支座力学性能模型参数

类别	LRB500		LRB600	LNR600
数量/个	12		2	6
等效阻尼比/%	26.5(100%)		26.5	-
竖向刚度/(kN·mm ⁻¹)	1 839		2 445	2 097
等效水平刚度(100%)/(kN·mm ⁻¹)	1.459(100%)	0.841(250%)	1.68	0.909
屈服前刚度/(kN·mm ⁻¹)	9.01		10.37	-
屈服后刚度/(kN·mm ⁻¹)	0.723	0.807	0.929	-
屈服力/kN	40.1	62.6	90.2	-
橡胶层总厚度/mm	68.6	96	120	120
支座总高度(不含法兰板)/mm	133	164	233	233
法兰板厚度/mm	15	15	25	25
屈服后刚度比	0.089 6	0.089 6	0.089 6	-

为了得到更准确的预测结果,选取 10 条天然波 (T1~T10)对结构进行弹塑性分析(表 3)。将这 10 条天然波的时程曲线经过归一化处理后如图 2 所示,全部天然波的反应谱曲线如图 3 所示。

表 3 10 条天然地震记录

Table 3 Ten natural earthquake records				
时程名称	编号	发震时间	名称	测震站台
T1	LK0573	1999 年	ChiChi	CHY061
T2	LK0488	1999 年	ChiChi aftershock	CHY050
T3	LK0490	1999 年	ChiChi aftershock	CHY063
T4	LK0524	1999 年	ChiChi aftershock	CHY058
T5	LK0690	1980 年	Irpinia EQ	AULETTA, 270
T6	RSN1000	1994 年	Northridge-01	LA-Pico &. Sentous
T7	RSN1810	1999 年	Hector Mine	Mecca-CVWD Yard
T8	RSN1177	1999 年	Kocaeli_Turkey	ZEY TINBURNU
T9	RSN2694	1999 年	ChiChi_Taiwan-04	CHY015
T10	RSN6879	2010 年	Darfield_New Zealand	ADCS

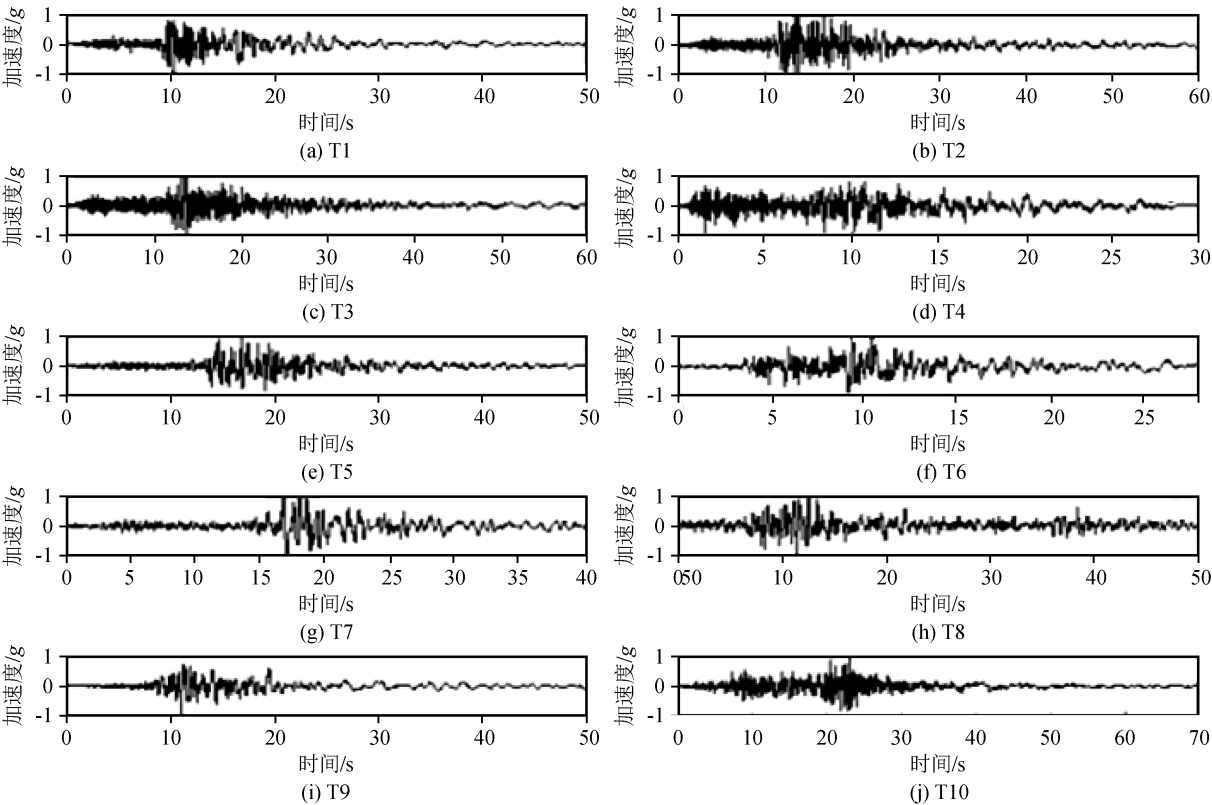


图 2 10 条天然波的时程曲线图

Fig.2 Time history curves of ten natural waves

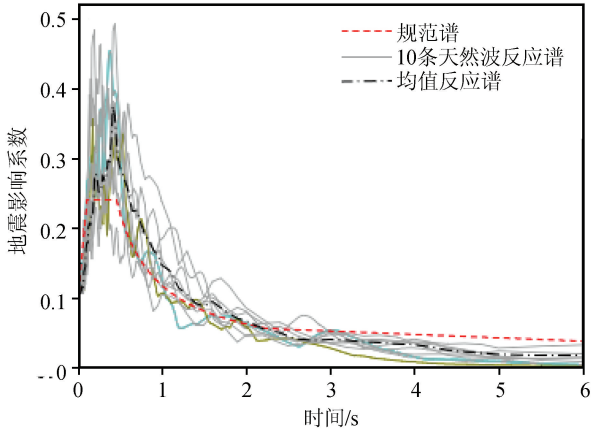


图 3 10 条天然波的时程反应谱图

Fig.3 Time-history response spectra of ten natural waves

2 增量动力弹塑性分析方法

本文选用的 IDA 参数分别为:IM(Intensity Measure),其指标是峰值加速度 PGA ;DM(Damage Measure),其指标是最大层间位移角 θ_{max} 。IDA 法的基本原理是通过输入一系列不同强度的地震记录对结构进行弹塑性分析,从而得到整体结构在未来某个地震等级下所对应的动力响应。

3 单条 IDA 曲线绘制

本文以整个建筑物作为分析对象,将所有地震动记录归一化后采用等步长法和变步长法对地震波进行调幅。为了保证足够多的数据,选取恒定步长 $\Delta\lambda=0.1g$ 对地震波进行调幅,在结构的层间位移角达到倒塌指标后采用变步长的调幅方法改变地震波。

3.1 无拉梁层间柱顶隔震体系的单条 IDA 曲线

对于无拉梁柱顶隔震体系,下部结构的处理主要是对各个悬臂柱插入相对应的 P-M-M 铰,然后输入 T10 波归一化后的地震动记录。由于 IDA 分析时第一次要进行弹性分析,所以地震波峰值以 $0.1g$ 为起点,对结构进行弹塑性时程分析,从而得到悬臂柱的层间位移角 θ_i ;然后按照 $0.1g$ 的步长进行地震波的调幅,即 $a_i=a_1+\Delta\lambda\cdot(i-1)$;再按照第一次的分析方法对结构进行相应分析,依次得到悬臂柱的位移角,直到悬臂柱层间位移角的值发散,停止调幅。经过数次调幅,我们得到几个离散点,将得到的数据散落在坐标轴上,则可以得到悬臂柱在该地震作用下基于峰值加速度的 IDA 曲线(图 4)。

按照 GB50011-2010《建筑抗震设计规范》^[19],将结构状态划分为正常使用、立即使用、生命安全和防止倒塌四个阶段。由图 4 可得,T10 波下的 IDA 曲线有四个阶段:初期为较明显的弹性阶段,约为坐

标原点至 $\theta_i=1/550$ 范围内,在性能水平阶段对应正常使用阶段原点(NO 点);当加速度峰值超过该范围后构件开始屈服,按照新隔震规范所规定的下部结构层间位移角在曲线斜率开始发生较大弯曲时($\theta_i=1/275$),IDA 曲线上对应的临界点定义为 IO 点,NO 点至 IO 点阶段在性能水平中对应于立即使用阶段;加速度峰值不断增加,当悬臂柱的层间位移角到达 $\theta_i=1/150$ 时,该点为 LF 点,IO 点至 LF 点被称为生命安全阶段;当加速度加载到一定值时,悬臂柱的层间位移角达到 $\theta_i=1/50$,对应点被称为结构不倒塌的极限状态点(CP 点),从 LF 点至 CP 点在性能水平阶段中对应防止倒塌阶段;加速度再次增加,直到 IDA 曲线趋于平缓,即 θ_i 趋于无穷大,则定义为结构动力失稳点(GI 点)。

通过图 5 可以找出结构的三个主要性能点:不

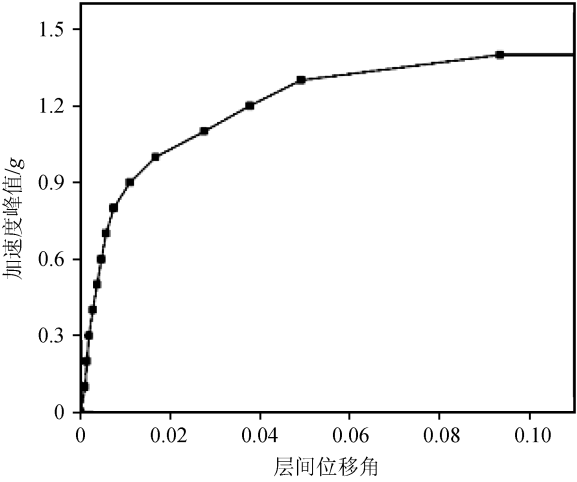


图 4 T10 波的 IDA 曲线

Fig.4 IDA curve of T10 wave

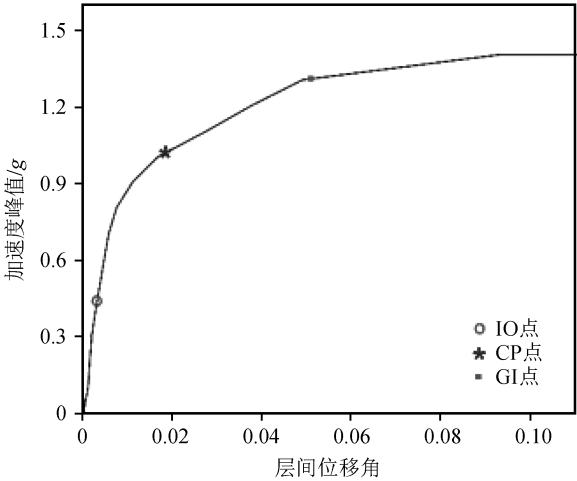


图 5 T10 波的 IDA 曲线性能点

Fig.5 Performance points on the IDA curve of T10 wave

需修复 IO 点、不倒塌点 CP 点、失稳点 GI 点,这三个性能点的值分别为:当 $\theta_{\text{IO}}=1/275$ 时,T10 地震波加速度峰值为 $a_1=0.498g$;当 $\theta_{\text{CP}}=1/50$ 时,加速度峰值为 $a_2=1.030g$;当 $\theta_{\text{CP}}=+\infty$ 时,加速度峰值

为 $a_3=1.302g$ 。当下部结构在无需修复 IO 点与不倒塌 CP 点时,悬臂柱的 P-M-M 铰状态有明显区别。此处以 A1 柱为例,其柱顶纤维铰状态如图 6 所示。在无需修复 IO 点时,

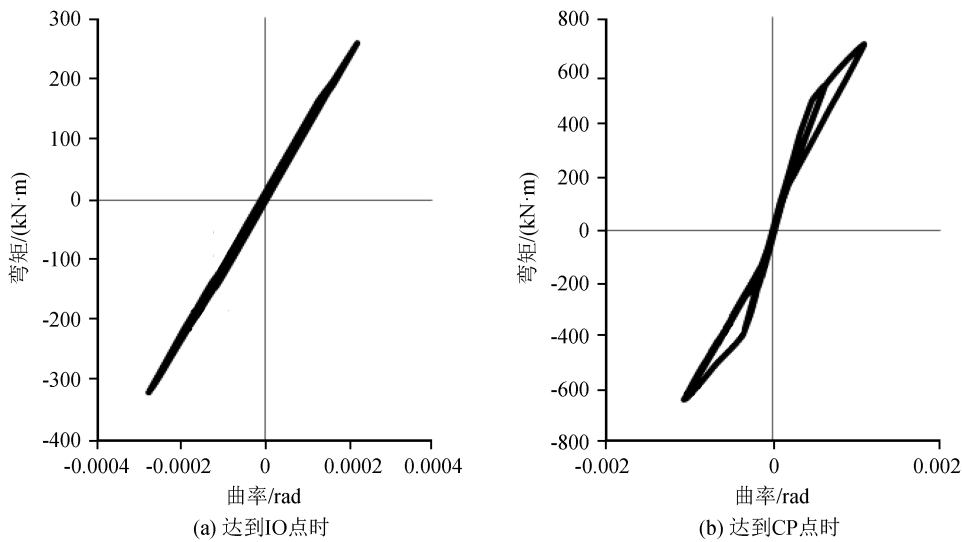


图 6 A1 柱顶纤维铰状态
Fig.6 State of fiber hinge on the top of A1 column

柱顶弯矩最大值为 $259.41\text{ kN}\cdot\text{m}$,最大曲率为 $0.000\ 22\text{ rad}$;而在不倒塌 CP 点时,柱顶弯矩最大值为 $703.13\text{ kN}\cdot\text{m}$,最大曲率为 $0.001\ 09\text{ rad}$ 。

3.2 有拉梁层间柱顶隔震体系的单条 IDA 曲线

对于有拉梁柱顶层间隔震体系,下部结构的处理主要是对各个悬臂柱插入相对应的 P-M-M 铰,对于拉梁插入相对应的 M3 铰,同样选用归一化的 T10 波作为调幅对象,分析方法和步骤与无拉梁柱顶隔震体系一致。经多次调幅后,可得如图 7 所示的 IDA 曲线。由图 7 可得,有拉梁的柱顶隔震体系 IDA 曲线与无拉梁的柱顶隔震体系 IDA 曲线大体一致,均由四个阶段组成:正常使用阶段(原点到 NO 点)、立即使用阶段(NO 点到 IO 点)、生命安全阶段(IO 点到 LF 点)与防止倒塌阶段(LF 点到 CP 点)。划分各阶段的层间位移角值也与无拉梁情况一致,唯一不同的是在 IO 点与 CP 点时所需的加速度峰值比无拉梁柱顶隔震体系大,侧面说明了有拉梁柱顶隔震体系具有更好的稳定性。有拉梁柱顶层间隔震体系 IDA 曲线的标注性能点如图 8 所示。

当下部结构处于无需修复 IO 点与不倒塌 CP 点时,悬臂柱的 P-M-M 铰状态有明显区别。由图 8 可得结构的三个性能点的值分别为:当 $\theta_{\text{IO}}=1/275$ 时,T10 地震波加速度峰值为 $a_1=0.602g$;当 $\theta_{\text{CP}}=1/50$ 时,加速度峰值为 $a_2=1.530g$;当 $\theta_{\text{CP}}=+\infty$

时,加速度峰值为 $a_3=1.830g$ 。此处以 A1 柱为例,其柱顶纤维铰状态如图 9 所示。在无需修复 IO 点时,柱顶弯矩最大值为 $295.77\text{ kN}\cdot\text{m}$,最大曲率为 $0.000\ 26\text{ rad}$;而在不倒塌 CP 点时,柱顶弯矩最大值为 $827.54\text{ kN}\cdot\text{m}$,最大曲率为 $0.001\ 53\text{ rad}$ 。对比有无拉梁的层间柱顶隔震体系可知:在相同的性能点,下部结构有拉梁和无拉梁对纤维铰弯矩值和曲率值基本无影响;在不同的性能点,CP 点较 IO 点弯矩值增大而曲率值减小。

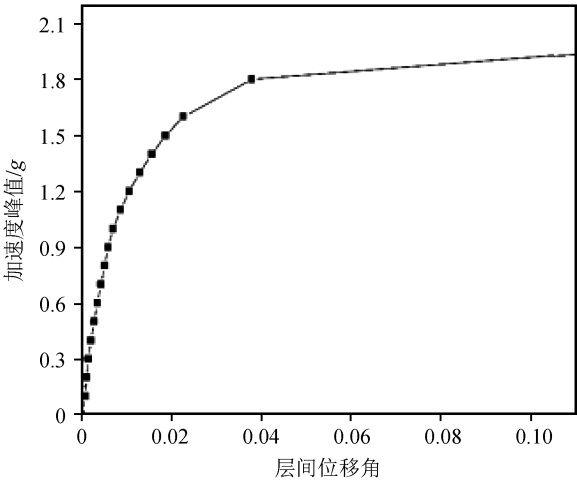


图 7 T10 波的 IDA 曲线

Fig.7 IDA curve of T10 wave

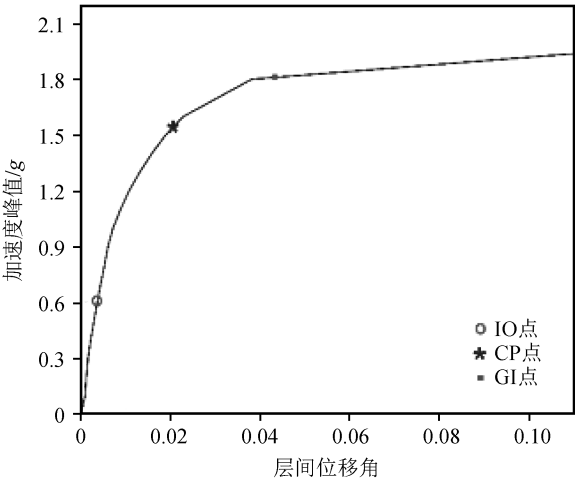


图 8 T10 波的 IDA 曲线性能点

Fig.8 Performance points on the IDA curve of T10 wave

4 多条 IDA 曲线绘制

选择 10 条地震动记录对结构进行弹塑性时程

分析,以有效保证结构分析覆盖地震下非线性行为的全范围。本文选择按 IM 统计的方法分析,以降低地震波自身差异性对结果的影响,即求出同一 IM 下多个 DM 的均值 μ_{DM} 以及 μ_{DM} 所对应的自然对数的标准差 $\sigma_{\ln DM}$;然后以 IM 为纵坐标、 μ_{DM} 为横坐标,即 (μ_{DM}, IM) ,连接各点后得出 50% 分位线的 IDA 曲线;最后计算出 $\mu_{DM} e^{\pm \sigma_{\ln DM}}$,得到各 $(\mu_{DM} e^{\pm \sigma_{\ln DM}}, IM)$ 点,分别连接各离散点后就得到了 16% 和 84% 分位线的 IDA 曲线。

4.1 无拉梁柱顶隔震体系的多条 IDA 曲线

按照 3.1 节中单条 IDA 曲线的绘制方法,对 10 条地震动记录进行调幅和增量动力时程分析,将结果汇总于同一 DM-IM 坐标系下,并绘制所有地震动的 IDA 曲线(图 10)。找出各条 IDA 曲线中不同性能点所对应的 IM 值,将结果列于表 4。由表 4 可得,T4 波与 T5 波的能量相对比较稳定,所以达到 GI 点所需的地震加速度较大;所有地震波达到 IO

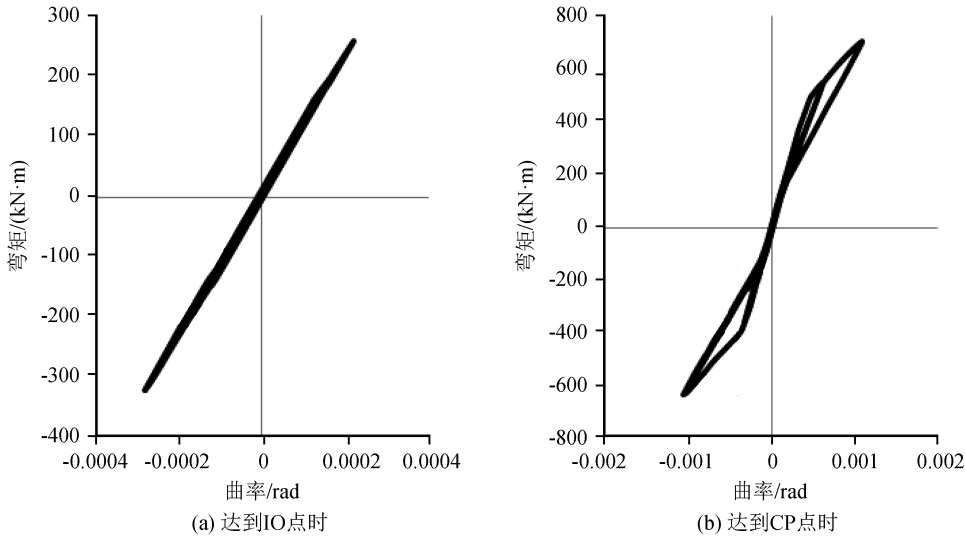


图 9 A1 柱顶纤维铰状态

Fig.9 State of fiber hinge on the top of A1 column

表 4 全部地震波的性能点

Table 4 Performance points of all seismic waves

地震波 序号	IO		CP		GI	
	加速度/ g	θ_i	加速度/ g	θ_i	加速度/ g	θ_i
T1	0.498	1/275	1.169	1/50	1.906	$+\infty$
T2	0.457	1/275	1.166	1/50	1.710	$+\infty$
T3	0.627	1/275	1.399	1/50	2.273	$+\infty$
T4	0.694	1/275	1.926	1/50	4.802	$+\infty$
T5	0.689	1/275	2.094	1/50	3.625	$+\infty$
T6	0.457	1/275	1.038	1/50	2.734	$+\infty$
T7	0.445	1/275	1.121	1/50	2.055	$+\infty$
T8	0.491	1/275	1.156	1/50	1.810	$+\infty$
T9	0.439	1/275	0.933	1/50	2.104	$+\infty$
T10	0.498	1/275	1.030	1/50	1.302	$+\infty$

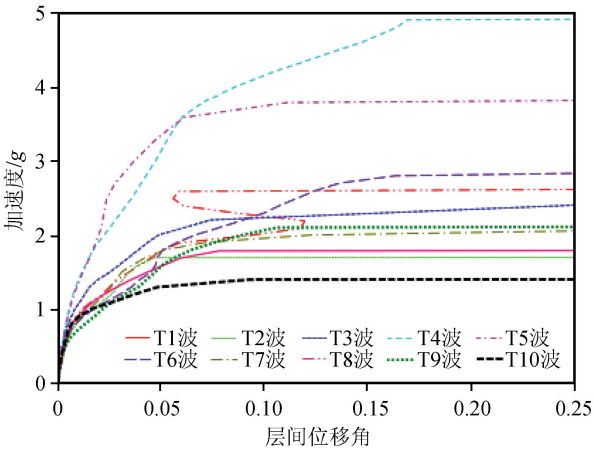


图 10 无拉梁模型的 10 条 IDA 曲线

Fig.10 Ten IDA curves of model without straining beam

点所需的地震加速度值相差不是很大,大致都在 $0.5g$ 左右,但达到 CP 点后其所需的地震加速度值的差异性开始体现出来;到 GI 点后,不同地震波又有很明显的差异性。

4.2 有拉梁柱顶隔震体系的多条 IDA 曲线

按照上述方法,在同一 DM-IM 坐标系下绘制出所有地震动下有拉梁柱顶隔震体系的多条 IDA 曲线(图 11),并将各条 IDA 曲线中不同性能点所对

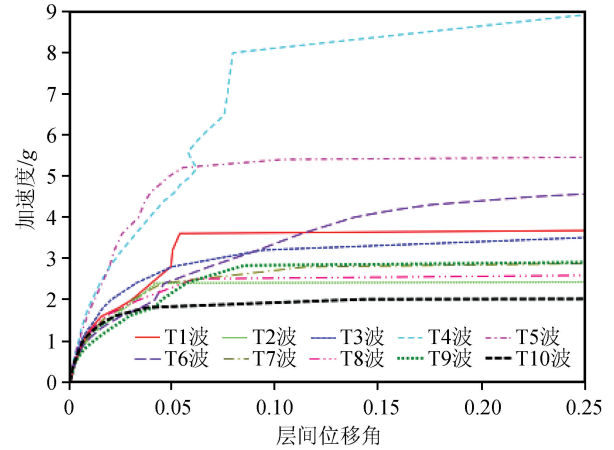


图 11 有拉梁模型的 10 条 IDA 曲线

Fig.11 Ten IDA curves of model with straining beam

表 5 全部地震波的性能点

Table 5 Performance points of all seismic waves

地震波 序号	IO		CP		GI	
	加速度/ g	θ_i	加速度/ g	θ_i	加速度/ g	θ_i
T1	0.612	1/275	1.709	1/50	3.614	$+\infty$
T2	0.554	1/275	1.512	1/50	2.543	$+\infty$
T3	0.748	1/275	1.962	1/50	3.425	$+\infty$
T4	0.851	1/275	2.935	1/50	8.220	$+\infty$
T5	0.816	1/275	2.941	1/50	5.367	$+\infty$
T6	0.587	1/275	1.473	1/50	3.473	$+\infty$
T7	0.577	1/275	1.605	1/50	2.466	$+\infty$
T8	0.603	1/275	1.609	1/50	2.514	$+\infty$
T9	0.544	1/275	1.287	1/50	2.850	$+\infty$
T10	0.602	1/275	1.530	1/50	1.830	$+\infty$

应的 IM 值列于表 5。由图 11 得出,输入不同的地震动记录,其下部结构的 IDA 曲线存在很大的差异性,有的地震波在地震加速度 $1.3g$ 左右时就进入了防止倒塌阶段,而有的波能量较小,在地震加速度 $3g$ 时才到达防止倒塌阶段。同时,有拉梁模型进入 IO 点所需的加速度稍大一些。对于 CP 点,无拉梁结构在地震加速度平均值为 $1.15g$ 时就到达极值,而有拉梁结构在地震加速度平均值为 $1.70g$ 时才到达极值。有拉梁柱顶隔震体系在其下部结构尺寸小于无拉梁柱顶隔震体系的基础上,达到结构性能点所需的加速度峰值仍高于无拉梁隔震体系。这个数据可以从侧面说明在极罕遇地震下有拉梁结构具有更好的抗震性能。

为了降低各条 IDA 曲线的离散性,选择 16%、50% 和 84% 的分位曲线来统计无拉梁体系与有拉梁体系的 IDA 曲线,最后得出有、无拉梁模型分位曲线的对比图(图 12)。根据图 12,找出有、无拉梁

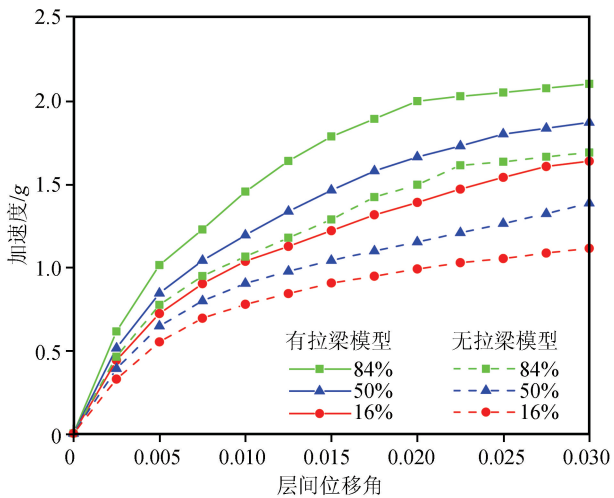


图 12 有无拉梁模型分位曲线的对比

Fig.12 Comparison between quantile curves of models with and without straining beam

表 6 结构各性能水平所对应的能力值

Table 6 The capability values corresponding to each performance level of the structure									
模型	分位 曲线	正常使用(NO)		立即使用(IO)		生命安全(LF)		防止倒塌(CP)	
		θ_i	加速度/ g	θ_i	加速度/ g	θ_i	加速度/ g	θ_i	加速度/ g
无拉梁模型	16%	1/550	0.283	1/275	0.474	1/150	0.634	1/50	0.988
有拉梁模型		1/550	0.365	1/275	0.576	1/150	0.847	1/50	1.389
无拉梁模型	50%	1/550	0.329	1/275	0.551	1/150	0.791	1/50	1.154
有拉梁模型		1/550	0.393	1/275	0.678	1/150	0.988	1/50	1.656
无拉梁模型	84%	1/550	0.386	1/275	0.639	1/150	0.903	1/50	1.503
有拉梁模型		1/550	0.481	1/275	0.811	1/150	1.137	1/50	1.985

体系相对应的框架结构在不同性能水平下的能力值,作对比得到表 6。从表 6 可知:从正常使用阶段到防止倒塌阶段,有拉梁柱顶隔震体系与无拉梁柱顶隔震体系之间所需的加速度峰值的差距慢慢增大。

5 结论

本文采用增量动力分析(IDA)方法,通过调幅地震波得到相应的层间位移角及峰值加速度,分别绘制单条与多条 IDA 曲线,比较了有、无拉梁对隔震结构动力响应的影响,研究了两种结构的抗震性能,并得到以下结论:

- (1) 对于层间柱顶隔震体系而言:在相同的性能点,下部结构有拉梁和无拉梁对纤维铰弯矩值和曲率值基本无影响;而在不同的性能点,两种结构的纤维铰状态则明显不同。
- (2) 通过对比有拉梁模型和无拉梁模型的性能曲线,得出正常使用阶段到防止倒塌阶段,有拉梁柱顶隔震体系与无拉梁柱顶隔震体系之间所需的加速度峰值的差距慢慢增大。
- (3) 对于下部结构,输入不同的地震动记录,结构时程分析所得到的 IDA 曲线是不同的:有拉梁柱顶隔震体系在下部结构尺寸小于无拉梁柱顶隔震体系的基础上,达到结构性能点所需的加速度峰值仍高于无拉梁隔震体系,这从侧面说明,在极罕遇地震下有拉梁结构具有更好的抗震性能。

参考文献(References)

[1] VAMVATSIKOS D.Seismic Performance,Capacity and Reliability of Structures as Seen through Incremental Dynamic Analysis[D].Stanford;Stanford University,2002:5-50.

[2] 苏宁粉,信卓,白国良,等.基于振动台试验的高层剪力墙结构增量动力分析研究[J].建筑结构学报,2018,39(7):76-83,94.

SU Ningfen,XIN Zhuo,BAI Guoliang,et al.Incremental Dynamic Analysis of High Rise Shear Wall Structure Based on

Shaking Table Test[J].Journal of Building Structures,2018,39(7):76-83,94.

[3] ASGARIAN B,JALAEFFAR A.Incremental Dynamic Analysis of Steel Braced Frames Designed Based on the First,Second and Third Editions of the Iranian Seismic Code (standard No.2800)[J].The Structural Design of Tall and Special Buildings,2011,20(2):190-207.

[4] CHRISTOVASILIS I P,FILIATRAULT A,CONSTANTINOUM C,et al.Incremental Dynamic Analysis of Woodframe Buildings[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2009,38(4):477-496.

[5] MANDER J B,DHAKAL R P,MASHIKO N,et al.Incremental Dynamic Analysis Applied to Seismic Financial Risk Assessment of Bridges[J].Engineering Structures,2007,29(10):2662-2672.

[6] 周颖,吕西林,卜一.增量动力分析法在高层混合结构性能评估中的应用[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(2):183-187,193.

ZHOU Ying,LU Xilin,BO Yi.Application of Incremental Dynamic Analysis to Seismic Evaluation of Hybrid Structure[J].Journal of Tongji University (Natural Science),2010,38(2):183-187,193.

[7] 马千里,叶列平,陆新征,等.采用逐步增量弹塑性时程方法对 RC 框架结构推覆分析侧力模式的研究[J].建筑结构学报,2008,29(2):132-140.

MA Qianli,YE Lieping,LU Xinzheng,et al.Study on Lateral Load Patterns of Pushover Analysis Using Incremental Dynamical Analysis for RC Frame Structures [J]. Journal of Building Structures,2008,29(2):132-140.

[8] 马肖彤,包超,马艳,等.框架剪力墙结构抗震动力性能与抗侧向倒塌能力研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(11):113-117.

MA Xiaotong,BAO Chao,MA Yan,et al.Research on Seismic Dynamic Performance and Lateral Collapse Resistant Capacity of Frame Shear Wall Structure[J].Journal of Safety Science and Technology,2019,15(11):113-117.

[9] 化明星.某设置黏滞阻尼墙大底盘多塔结构性能化设计[J].建筑结构,2019,49(增刊 2):445-447.

HUA Mingxing.Performance-based Seismic Design of a Multi-tower Structure with Viscous Damping Wall [J]. Building

- Structure, 2019, 49(Supp2): 445-447.
- [10] WU Y X, HUANG P Y, HUANG Y, et al. Isolation on the Top of Columns of a Building Analysis Based on ETABS[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 174-177: 1994-2000.
- [11] 吴应雄, 祁皑, 颜学渊. 某首层柱顶隔震结构动力特性测试研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(6): 147-152.
- WU Yingxiong, QI Ai, YAN Xueyuan. Study on Text of Dynamic Properties for a First-floor Isolation Structure[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(6): 147-152.
- [12] 杜永峰, 朱前坤, 李慧. 加连梁柱串联隔震系统的弹性屈曲[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(5): 1902-1907.
- DU Yongfeng, ZHU Qiankun, LI Hui. Elastic Buckling of Serial Seismic Isolation System Connected with Column and Coupling Beam[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(5): 1902-1907.
- [13] 贾益纲, 刘鹏程, 伍国强, 等. 楼板参数对 RC 框架结构抗侧屈服机制影响非线性仿真分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(13): 86-92.
- JIA Yigang, LIU Pengcheng, WU Guoqiang, et al. Nonlinear Simulation Analysis on Effect of Slab Parameters on Lateral Yield Mechanism of RC Frame Structure[J]. Building Structure, 2019, 49(13): 86-92.
- [14] 吴应雄, 黄净, 陆剑峰, 等. 考虑不同底层结构形式和刚度的柱顶隔震结构试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(3): 521-534.
- WU Yingxiong, HUANG Jing, LU Jianfeng, et al. Experimental Study of Column-top Isolation Structure Considering Different Structural Forms and Stiffness of the Bottom Structure[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(3): 521-534.
- [15] 王健康, 袁波, 张勇, 等. 考虑界面滑移的钢-混凝土组合梁的承载能力分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2018, 35(5): 87-92.
- WANG Jiankang, YUAN Bo, ZHANG Yong, et al. Analysis of Bearing Capacity Of Steel-concrete Composite Beam Considering Interface Slip[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2018, 35(5): 87-92.
- [16] 徐刚, 李爱群, 陈素芳. 山地掉层框架结构地震易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(3): 341-347.
- XU Gang, LI Aiqun, CHEN Sufang. Seismic Vulnerability Analysis of Moment Frames Supported by Stepped Foundation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(3): 341-347.
- [17] 陈望. $P-\Delta$ 效应下层间(柱顶)隔震体系弹塑性动力响应研究[D]. 广州: 广州大学, 2018.
- CHEN Wang. Elastic-Plastic Seismic Response Analysis of Inter-story (Column Top) Isolation System Considering $P-\Delta$ Effect[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018.
- [18] 秦熙, 刘彦辉, 陈望, 等. 地震作用下考虑 $P-\Delta$ 效应的柱顶隔震结构的动力响应[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(4): 41-48.
- QIN Xi, LIU Yanhui, CHEN Wang, et al. Dynamic Response of Structures with Isolations on the Top of the Columns Considering $P-\Delta$ Effects under Earthquake[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2019, 41(4): 41-48.
- [19] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- GB50011—2010 Code for Seismic Design of Building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.