

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.05.023

近断层地震动作用下含防屈曲支撑的层间 隔震结构地震响应分析

刘海洋¹, 荣强¹, 李博文¹, 陈永涛²

(1. 烟台大学 土木工程学院, 山东 烟台 264005;

2. 青岛金源工程检测有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 为研究近断层地震动下防屈曲支撑对层间隔震结构的影响,基于 SAP2000 有限元分析软件,建立高层建筑结构模型,输入近断层地震波,分析对比近断层地震动作用下传统层间隔震与含防屈曲支撑的层间隔震结构地震响应。研究表明:防屈曲支撑的加入对隔震体系平动控制影响不大,但会降低结构的扭转效应。防屈曲支撑解决了隔震支座在罕遇地震下位移超限问题,隔震层支座滞回曲线更加饱满。与传统隔震结构相比,防屈曲支撑增加了结构刚度导致结构地震响应有所放大,但大幅降低了隔震层处的地震响应。因此,含防屈曲支撑的层间隔震结构可有效降低隔震支座的水平位移,但需要注意结构地震响应指标的变化。

关键词: 层间隔震;近断层地震动;防屈曲支撑;滞回曲线

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)05-0148-07

Seismic Response Analysis of Story Isolation Structure with Buckling Brace Under Near-fault Ground Motion

LIU Haiyang¹, RONG Qiang¹, LI Bowen¹, CHEN Yongtao²

(1. School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China;

2. Qingdao Jinyuan Engineering Testing Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000, China)

Abstract: In order to analyze the influence of buckling-restrained brace on story isolation structure under near-fault ground motion, based on SAP2000 finite element analysis software. Analysis and comparison of seismic response of traditional story isolation structure and story isolation structure with buckling brace under near-fault ground motion were carried out. The results show that the addition of buckling-restrained brace has little effects on the translational control of the isolation system, but it will reduce the torsional effects of the structure. Buckling-restrained brace solves the displacement overrun problem of isolation bearings under rare earthquakes, and the hysteretic curve of isolation layer bearings is richer. Compared with the traditional isolation structure, the buckling restrained brace increases the structural stiffness, which leads to the amplification of the seismic response of the structure, but greatly reduces the seismic response at the isolation layer. Therefore, the story isolation structure with buckling support can effectively reduce the horizontal displacement of the isolation bearing, but it is necessary to pay attention to the change of the seismic response index of the structure.

Keywords: story isolation; near-fault ground motion; buckling-restrained brace; hysteresis curve

层间隔震是在隔震技术上发展的新型减震控制方法,通过将隔震层设置于基础之上的某一层柱顶,

收稿日期:2022-07-10

修稿日期:2022-08-03

基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME238)

作者简介:刘海洋(1998—),男,硕士研究生,研究方向为结构工程。E-mail:liuhaiysh@163.com

通讯作者:荣强(1975—),男,博士,副教授,主要从事结构抗震减灾等方面工作。E-mail:rqmp@163.com

进而对结构进行地震反应控制^[1-3],许立英等^[4]对混凝土框架的一层独立柱顶隔震结构进行振动台试验和数值模拟,证明了采用第一层柱顶隔震方法可以提高薄弱层钢筋混凝土框架结构的抗震能力。张亚飞等^[5]建立了错层隔震结构并与层间隔震进行分区对比,验证了错层隔震结构在普通地震动作用下减震效果更优,远场地震下效果稍弱于层间隔震结构。吴应雄等^[6]在层间隔震的基础上考虑土-结构相互作用(SSI效应),开展软土地基上层间隔震结构的振动台试验,研究发现SSI效应会放大层间隔震结构的地震响应,降低隔震结构减震效果。

尽管层间隔震的隔震效果优异,但是遭遇到大幅值、长周期、短持时的近断层地震后隔震层会产生过大的层间位移。Yan等^[7]研究近断层地震动下层间隔震的地震响应,发现隔震层在近断层地震作用下发生位移超限,并提出支座保护机制,减小隔震层位移。杨林等^[8]通过对基础隔震模型进行了软着陆保护试验得出:软着陆隔震结构起到保护承载支座,控制隔震层位移在允许范围内的作用。韩淼等^[9-10]提出在隔震层设置缓冲限位保护机构,并研究了限位装置参数对上部层间最大位移的影响,明确了限位装置的设计参数的选取原则和方法。樊剑等^[11]为降低隔震支座位移给隔震结构安装限位装置,并研究其碰撞响应,研究发现限位装置在降低了支座位移的同时增大了结构地震响应。赖振峰

等^[12]研发了一种柔性限位保护装置,能够在超防烈度地震作用下有效降低隔震支座的水平位移。李玉琴^[13]将基础隔震与防屈曲支撑组合在一起得出,在近断层脉冲地震作用下,防屈曲支撑的加入提高了隔震结构的抗震性能。

综上所述,为探讨近断层地震动作用下防屈曲支撑能否保护隔震支座,控制隔震层位移,本文采用SAP2000建立层间隔震结构模型,运用组合隔震方式,在层间隔震结构中安装防屈曲支撑。分析近断层地震作用下结构的自振周期、层间位移角、楼层加速度、层间剪力、隔震层位移以及隔震支座滞回曲线等指标,探讨含防屈曲支撑的层间隔震体系的地震响应。

1 数值模型

1.1 工程概况

按照规范设计一栋钢筋混凝土框架结构宿舍楼,II类场地类别地震分组为三组。设防烈度8度,基本地震加速度为0.2g,建筑类型为丙类。模型平面布置如图1所示,结构共12层,除底层层高3.3m其余均为3.0m,隔震层高度为0.3m。混凝土强度为C40,受力钢筋与箍筋分别为HRB400和HRB335,屋面恒载5kN/m²楼面恒载3.55kN/m²,屋面和楼面活载均为25kN/m²。其他均采用软件默认属性。结构平面尺寸为48.0m×12.6m。

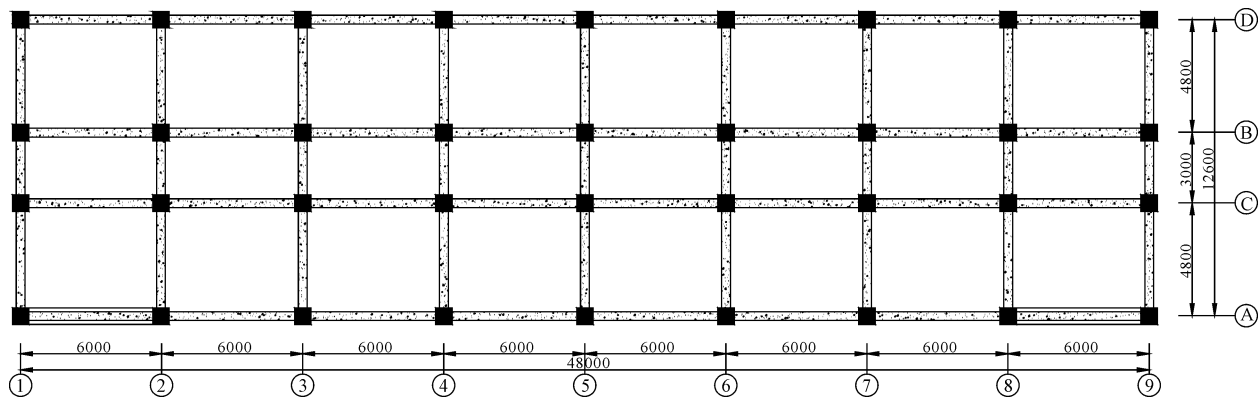


图1 柱网布置图(单位:mm)

1.2 隔震层初步设计

本文隔震模型每隔三层选取一层作为隔震层布置位置,分别为三、六、九层。隔震支座参数如表1所示。通过《高层建筑混凝土结构技术规程》^[14](JGJ 50009—2010)计算隔震支座受压面积,确定铅芯橡胶隔震支座共需要36个。其中角柱4个,中柱及边柱32个。角柱采用直径600mm的LRB600,

其余均为直径700mm的LRB700。

1.3 模型参数定义

通过SAP建立模型时,用Rubber Isolator模拟铅芯橡胶隔震支座,连接方式采用两点连接,设防地震与罕遇地震水平刚度分别为100%与250%。参数如表1所示。防屈曲支撑作为新型耗能构件,小震时可提供刚度减少结构位移,在中震与大震时可

提高阻尼比,提供较大的耗能能力。在有限元软件 SAP2000 中选用 Plastic(Wen)模型,需要输入初始线性刚度,屈服承载力,屈服刚度比,屈服指数,防屈曲支撑设计参数如表 2 所示。连接方式仍选用两点连接方式,与铅芯橡胶隔震支座连接在一起,并布置在层间隔震体系中的隔震层横向框架上^[15],具体设置图如图 2 所示。

表 1 铅芯橡胶隔震支座力学性能参数

型号 G6.0	LRB600	LRB700
有效直径/mm	600	700
橡胶总厚度/mm	96	110
橡胶剪切模量/MPa	0.55	0.55
竖向刚度/(kN·m ⁻¹)	2930	4451
屈服前刚度/(kN·m ⁻¹)	11046	11046
屈服后刚度/(kN·m ⁻¹)	1390	1893
等效水平刚度 100%	2247	3058
/(kN·m ⁻¹) 250%	1448	1971
屈服力/kN	94.2	128.2

表 2 防屈曲支撑设计参数

截面面积/mm ²	6541
支撑吨位/t	56
长度/m	3
有效刚度/(kN·m ⁻¹)	285600
屈服荷载/kN	2000
屈服刚度比	0.05
屈服指数	2

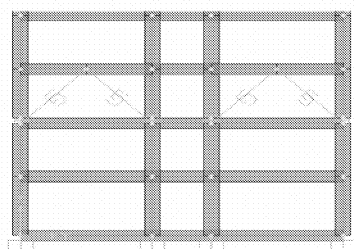


图 2 防屈曲支撑布置图

2 模态分析

根据抗震规范的要求,选取我国台湾集集地震中的三条地震波(TCU120EW、TCU68EW和TCU72EW)作为结构的地震动输入,对结构的基础

固定、传统层间隔震和含防屈曲支撑的层间隔震三种体系进行地震响应分析,前六阶自振周期如表 3 所示,结构的前两阶振型振动形式以 X 向和 Y 向的平动为主,第三阶振动形式以扭转为主。加入防屈曲支撑后,结构自振周期相较传统层间隔震体系明显降低,但前两阶自振周期仍大于基础固定结构,第三阶自振周期低于基础固定结构。这说明防屈曲支撑的加入对隔震结构平动周期影响不大,但会降低结构的扭转周期。相比传统层间隔震,含防屈曲支撑的三层、六层、九层隔震周期比分别降低 46%、48%、49%,减少了结构的扭转效应。

表 3 各结构体系振型质量参与系数

结构体系	振型序号	周期/s	周期比	振型质量参与系数		
				UX	UY	RZ
基础固定	1	1.194		80.19	0.00	0.00
	2	1.159	0.900	0.00	79.19	0.00
	3	1.069		0.00	0.00	79.53
三层隔震	1	2.091		84.92	0.00	0.00
	2	2.076	0.735	0.00	84.80	0.00
	3	1.536		0.00	0.00	84.13
传统层间隔震	1	1.846		70.16	0.00	0.00
	2	1.829	0.687	0.00	69.41	0.00
	3	1.268		0.00	0.00	59.15
九层隔震	1	1.522		65.61	0.00	0.00
	2	1.501	0.640	0.00	64.14	0.00
	3	0.978		0.01	0.04	34.18
三层隔震	1	1.632		0.00	84.57	0.00
	2	1.583	0.396	84.71	0.00	0.00
	3	0.647		0.00	0.00	83.51
含防屈曲支撑的层间隔震	1	1.486		0.00	74.10	0.00
	2	1.461	0.355	75.95	0.00	0.00
	3	0.528		0.01	0.00	58.66
九层隔震	1	1.310		76.02	0.01	0.00
	2	1.304	0.324	0.01	73.43	0.00
	3	0.424		0.14	0.56	31.72

3 层间隔震体系的地震响应

3.1 多遇地震下隔震效果对比分析

根据《抗规》^[16],有限元模型在进行多遇地震分析时,需将地震波峰值改为 70 cm/s²。层间隔震体系在多遇地震作用下的最大地震响应如表 4 所示。

多遇地震作用下,除九层隔震层间剪力最大值大于基础固定结构外,其它隔震体系层间剪力、层间位移角和顶层加速度最大值均小于基础固定结构,这表明在近断层地震动作用下,层间隔震体系隔震

层布置在结构中下层的隔震效果更好。相较于传统层间隔震结构,防屈曲支撑的加入增大了结构的整体刚度,使结构各项数据均大于传统隔震结构,但仍小于基础固定结构。这说明多遇地震作用下,防屈曲支撑的加入会放大结构的地震响应,减弱了隔震支座的隔震效果。

表 4 多遇地震下层间隔震结构的最大地震响应

结构类型	层间剪力最大值/kN	层间位移角最大值/%	顶层加速度最大值/(m·s ⁻²)
基础固定	6939.16	0.199	1.977
传统层间隔震	三层隔震	5021.601	1.238
	六层隔震	5888.409	1.290
	九层隔震	7059.945	1.656
含防屈曲支撑的层间隔震	三层隔震	6739.855	1.366
	六层隔震	6907.237	1.427
	九层隔震	7972.157	1.714

3.2 罕遇地震下隔震效果对比分析

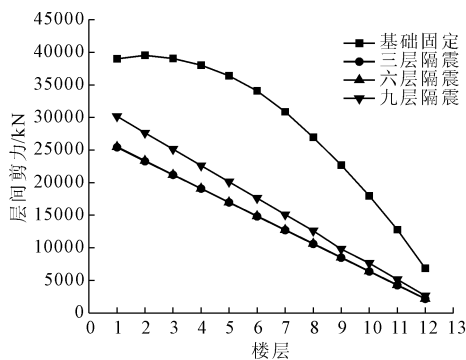
修改地震波加速度峰值为 400 cm/s²,模拟隔震结构处于罕遇地震下,分析结构基础固定、传统层间隔震和含防屈曲支撑的层间隔震体系的地震响应,分析结果如下。

3.2.1 层间剪力

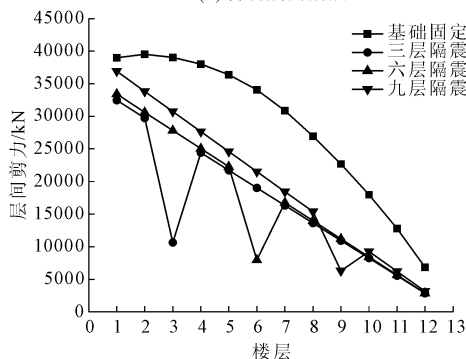
由图 3 可知,罕遇地震作用下,传统层间隔震与含防屈曲支撑的层间隔震结构都能起到良好的隔震效果。其中,三层隔震结构体系的基底层间剪力最大值最小,隔震效果最明显。对比传统层间隔震结构,含防屈曲支撑的层间隔震结构基底剪力最大值有了提升,这是由于加入防屈曲支撑使隔震结构整体刚度偏大导致,但在隔震层位置,层间剪力大幅度下降且低于传统隔震结构,这说明防屈曲支撑可有效降低隔震层处的层间剪力,防止结构在隔震层处发生破坏。

3.2.2 层间位移角

图 4 所示为罕遇地震下隔震结构的层间位移角,三层隔震结构最大层间位移角大于 0.83%,达到中等破坏要求,导致传统层间隔震结构层间位移角在隔震层位置发生突变。虽然减弱了相邻楼层的扭转效应,但也使隔震层处层间位移角成为峰值。加入防屈曲支撑后,导致建筑结构层间位移角整体增大,但有效限制了隔震层处的有效位移,避免结构因隔震层位移过大而产生的倾覆作用。

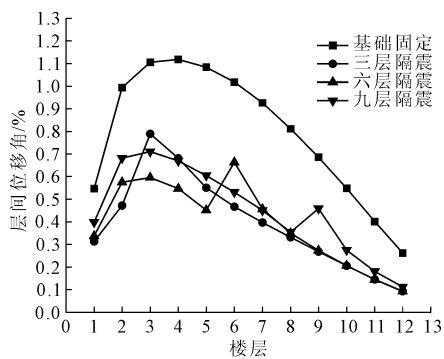


(a) 传统层间隔震

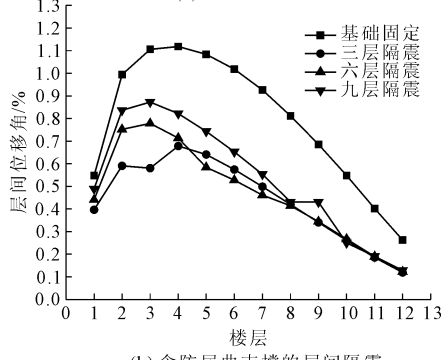


(b) 含防屈曲支撑的层间隔震

图 3 各结构体系的层间剪力峰值



(a) 传统层间隔震



(b) 含防屈曲支撑的层间隔震

图 4 各结构体系层间位移角

3.2.3 顶层加速度

图 5 为近断层地震作用下两种隔震体系各楼层加速度的平均值,罕遇地震作用下,传统三层隔震与

六层隔震分别在三层与五层处产生加速度极大值,且三层隔震处极大值超过基础固定结构。加入防屈曲支撑后,三层隔震与六层隔震加速度极大值有所降低,提升了结构的隔震性能。含防屈曲支撑下九层隔震结构在隔震层位置出现加速度峰值且增大为传统九层隔震的 1.48 倍,顶层加速度增大 38%。由此可见,防屈曲支撑与橡胶隔震支座的组合隔震布置在结构中下层隔震效果更好。

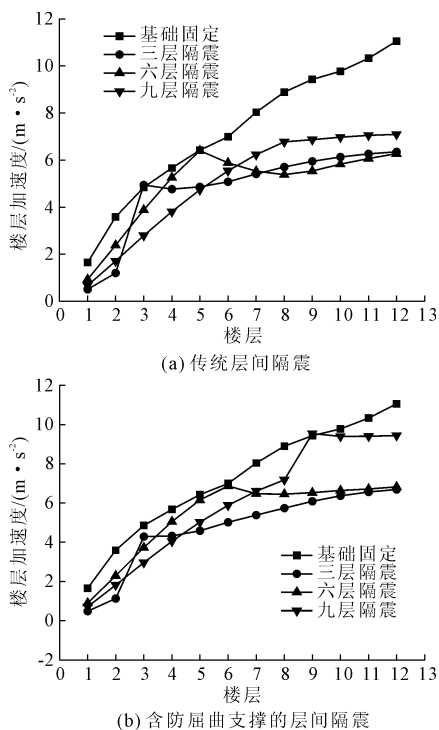


图 5 各结构体系顶层加速度

3.3 防屈曲支撑参数变化影响

结构整体响应系数的提升是由于防屈曲支撑增加结构整体刚度,建立 Plastic (Wen) 连接属性时需输入线性分析有效刚度与非线性分析刚度参数,分别将线性与非线性下刚度参数降为原参数的 70% 和 50%,对比分析不同参数下含防屈曲支撑的三层隔震对结构地震响应的影响。

各地震响应比值是由改变参数后的地震响应变化量与原楼层地震响应的比值。由图 6(a)可知,随着线性分析中有效刚度参数下降,隔震层位置层间剪力大幅提升,70% 原有效刚度时,隔震层处剪力增大 28%,50% 原有效刚度时,层剪力增大 49%。除隔震层外其他层间剪力随着有效刚度的降低而减小,且降低幅度保持平稳状态。非线性分析下刚度参数的降低仅对隔震层处剪力产生较大影响,50% 原有刚度时降低为原来的 70%。这说明改变有效

刚度与非线性分析下刚度对结构层剪力产生效果相反,且有效刚度参数的改变对层间剪力影响更大。

如图 6(b)所示,防屈曲支撑参数的降低导致隔震层下部结构楼层加速度降低,上部结构楼层加速度增大。非线性分析下刚度参数的改变对楼层加速度影响更大。图 6(c)中线性有效刚度的降低导致除隔震层外层间位移角降低,最大降低幅度达到 9.4%。非线性刚度的降低仅会减少四层的层间位移角,变化幅度最大为 3.4%。由此可见,线性有效刚度的降低对降低结构地震响应更加有利。

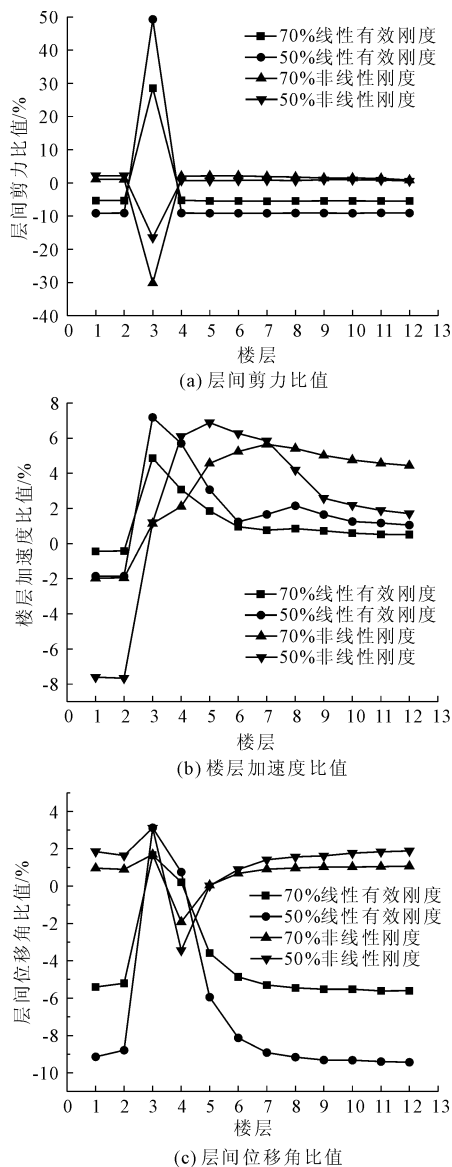


图 6 防屈曲支撑参数变化对地震响应的影响

3.4 罕遇地震下隔震层分析

3.4.1 隔震层核核

《建筑抗震设计规范》^[16] (GB 50011—2010) 规定隔震支座水平位移不应超过隔震支座 0.55 倍直

径和支座橡胶总厚度三倍中的最小值。本文中隔震支座 LRB600 的位移限值为 288 mm, LRB700 的位移限值为 330 mm。层间隔震结构共有 36 个铅芯橡胶隔震支座,通过数值计算可知,罕遇地震下传统三层隔震结构中隔震支座 LRB600 与 LRB700 的水平位移为 426.573 mm 和 428.341 mm,六层隔震结构中隔震支座 LRB600 的水平位移为 311.498 mm,均不能满足规范要求,导致结构可能出现倾覆;传统九层隔震结构的隔震支座未出现支座位移超限。

罕遇地震作用下,加入防屈曲耗能支撑后,三层隔震结构中隔震支座 LRB600 与 LRB700 的水平位移降低为 156.212 mm 和 158.800 mm,六层隔震结构中隔震支座 LRB600 的水平位移降为 126.427 mm。均不足传统状态下隔震支座最大位移的一半,并且在加入防屈曲支撑后,层间隔震结构的水平位移最大值均满足规范要求。

3.4.2 隔震支座滞回曲线

对罕遇地震作用下,橡胶隔震支座的滞回曲线的影响进行分析对比。图 7、图 8 分别为破裂向前方向性效应 (TCU120EW) 与滑冲效应 (TCU068EW) 下层间隔震结构的 1 号橡胶隔震支座的滞回曲线。1 号支座直径为 600 mm,位于层间隔震层的角柱位置,与防屈曲支撑连接在一起。

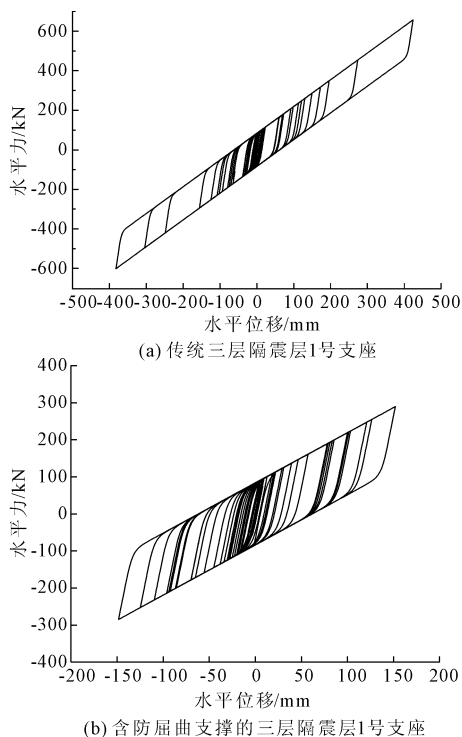


图 7 各结构体系隔震支座滞回曲线 (TCU120EW)

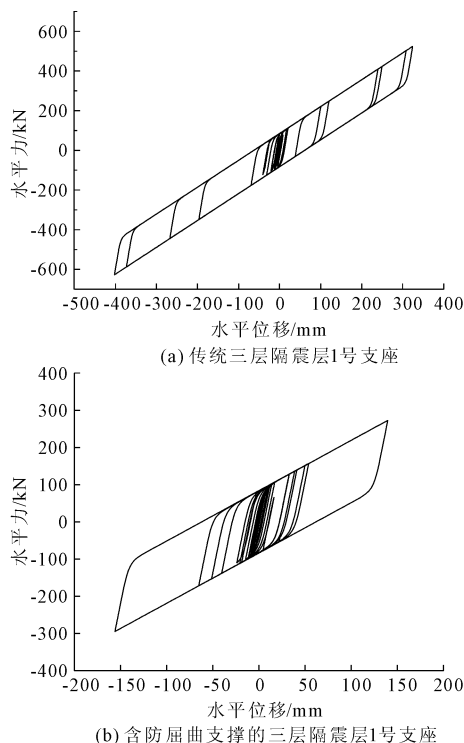


图 8 各结构体系隔震支座滞回曲线 (TCU068EW)

破裂向前方向性效应下,对比分析隔震支座的滞回曲线可以得出:在加入了防屈曲支撑后,层间隔震结构完成一圈滞回曲线所需要的水平力变为原来的 1/2,位移减少为原来的 0.36 倍。滞回曲线的饱满性得到大幅提升,隔震支座性能大幅提升。所需水平力的降低,使隔震支座更早的吸收能量,更快发挥隔震性能。

滑冲效应下,传统层间隔震隔震支座滞回曲线较破裂向前方向性效应下更加单薄,防屈曲耗能支撑的加入提高了隔震支座的滞回性能,滞回曲线完成一圈所需的水平力与位移均降低 50% 左右,但滞回曲线并不饱满,说明隔震支座性能并未完全发挥。

4 结 论

通过 SAP2000 分别建立了基础固定、传统层间隔震和含防屈曲支撑层间隔震三种结构体系的模型,通过改变防屈曲支撑参数,进行了结构地震响应分析,主要结论如下:

(1) 防屈曲支撑减少结构自振周期,增大结构层剪力、层间位移角、楼层加速度,层间隔震可以减小高层框架结构的地震响应,但会增大结构的自振周期。将两者结合起来可充分发挥两者的优点,满足规范要求。

(2) 防屈曲支撑增加结构刚度,放大了结构地

震响应。但降低了结构在隔震层处的地震响应。说明防屈曲耗能支撑可有效降低隔震层位置的地震响应,采用组合隔震方式时布置在结构的中下层效果更好。

(3) 更改罕遇地震下的防屈曲支撑的参数,发现线性有效刚度变化较非线性刚度对结构地震响应影响更大,且线性有效刚度的降低会减弱隔震层以外的地震响应,隔震效果提升更大。

(4) 罕遇地震作用下加入防屈曲支撑后,隔震层橡胶支座的位移满足规范要求,有效避免层间隔震结构发生倾覆效应。防屈曲支撑下层间隔震结构的橡胶隔震支座位移与水平力均减小,滞回曲线表现更加饱满。

参考文献:

[1] Diana F, Elena M. Insights into inter-story isolation design through the analysis of two case studies [J]. *Engineering Structures*, 2020, 215: 110660.

[2] Tian K, Liu W G, Feng D M, et al. Dynamic characteristic analysis and shaking table test for a curved surface isolated structure [J]. *Engineering Structures*, 2020, 203: 109847.

[3] 韩 森,张文会,朱爱东. 近断层地震动对层间隔震结构动力响应影响分析 [J]. *世界地震工程*, 2015, 31(2): 1-7.

[4] Xu L Y, Lin Y Q, Wu Y X. Seismic response analysis of a first-story isolated reinforced concrete frame building with independent columns [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(14): 3140-3152.

[5] 张亚飞,刘德稳,房思彤,等. 超高层错层隔震体系地震响应研究 [J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(S1): 10-17.

[6] 吴应雄,郑泽炜,颜桂云,等. 远场长周期地震动下桩-土-层间隔震结构振动台试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(12): 11-22.

[7] Yan G Y, Chen F Q. Seismic performance of midstory isolated structures under near-field pulse-like ground motion and limiting deformation of isolation layers [J]. *Shock & Vibration*, 2015: 1-17.

[8] 杨 林,闫维明,周锡元,等. 软着陆保护橡胶支座隔震体系振动台试验研究与比较 [J]. *地震工程与工程振动*, 2006, 26(3): 210-214.

[9] 韩 森,沙千里,温增平. 近断层区橡胶支座隔震结构限位研究 [J]. *世界地震工程*, 2013, 29(1): 74-79.

[10] 韩 森,韩 蓉,孟令帅,等. 近断层地震作用下软限位对层间隔震结构动力响应影响分析 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(15): 231-238.

[11] 樊 剑,刘 铁,魏俊杰. 近断层地震下摩擦型隔震结构与限位装置碰撞反应及防护研究 [J]. *土木工程学报*, 2007, 40(5): 10-16.

[12] 赖振锋,刘彦辉,张超洋. 隔震结构限位保护装置软碰撞研究 [J]. *工程抗震与加固改造*, 2021, 43(3): 73-81.

[13] 李玉琴. 屈曲约束支撑与基础隔震结构的应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.

[14] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 50009—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[15] 陆 宁. 近断层地震动作用下层间隔震体系的减震性能研究 [D]. 烟台: 烟台大学, 2020.

[16] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

(上接第 147 页)

[7] 梅国雄,胡铨波,梅 岭. 利用桩底沉渣的桩基室内模型试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(S1): 3252-3259.

[8] 武崇福,王再新,季 焱. 后注浆对旋挖钻孔灌注桩受力性能影响研究 [J]. *燕山大学学报*, 2017, 41(5): 457-464.

[9] 熊玉春. 沉渣强度特性及桩侧摩阻力强化弱化效应研究 [J]. *工业建筑*, 2019, 49(1): 107-114.

[10] 赵佩胜,于 亮,王 为. 钻孔灌注桩桩底沉渣压浆处理技术 [J]. *地下空间与工程学报*, 2009, 5(1): 129-132.

[11] 曾庆友. 二重管高压旋喷洗孔、注浆法在砼灌注桩缺

陷处理中的应用 [J]. *福建建筑*, 2020, 270(12): 104-109.

[12] 刘金波,郭金雪,张 寒,等. 灌注桩承载力不满足要求处理原则、方法及案例 [J]. *施工技术*, 2017, 46(12): 160-165.

[13] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

[14] 建筑桩基检测技术规范: JGJ 106—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[15] 吴继敏,董志高,董 平. 钻孔灌注桩桩底沉渣对桩承载性状影响 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*. 2008, 9(5): 546-551.