

带限位装置的基础隔震结构反应谱研究

熊仲明¹, 黄汉英¹, 虞子良², 陈 轩¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 深圳市建筑设计研究总院, 广东 深圳 518031;)

摘要: 带限位装置的并联基础隔震体系具有摩擦耗能及限位的能力, 其隔震效果明显. 通过单自由度并联基础隔震结构模型, 研究了结构体系摩擦系数及阻尼比对加速度谱和隔震层位移谱的影响, 建立了不同类场地的远、近场地震作用下地震影响系数谱及隔震层位移谱, 采用时程分析、隔震结构反应谱及规范反应谱分别对实际工程进行了计算, 得到并联基础隔震结构层间剪力及层间位移的差异. 研究表明, 场地类别及地震动特性对基础隔震结构反应谱影响作用较大; 隔震结构反应谱计算数值与时程分析结果相近, 而规范反应谱计算结果偏大, 说明规范反应谱用于基础隔震结构的设计与计算需进行相应的系数折减. 研究成果可为基础隔震结构反应谱在实际工程中的应用提供参考依据.

关键词: 并联基础隔震结构; 地震反应谱; 摩擦系数及阻尼比; 远、近场地震

中图分类号: TU 352.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)02-0172-07

Response spectra of base-isolated structure with limiting stopper

XIONG Zhongming¹, HUANG Hanying¹, YU Ziliang², CHEN Xuan¹

(1. College of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shenzhen General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd, Shenzhen 518031 China;)

Abstract: Based-isolated structure with limiting stopper has the capacity of energy consuming and limiting, whose isolated effect is obvious. By the base-isolated structure model of the single degree of freedom, the paper analyzed the friction coefficient and damping ratio influence on the spectra of acceleration and isolation layer displacement, and established the spectra of seismic influence coefficient and isolation layer displacement under the far-near earthquake. Results showed that the type of seismic field and characteristics of ground motion have a big impact on isolated structure response spectra. Finally, the study compared the layer shear force and displacement calculated by the time-history analysis, and isolated structure response spectra and standard response spectra. The calculated results of isolated response spectra and time-history analysis proved quite close. However, numerical results of the standard response spectra would be larger, which means the corresponding coefficients of response spectra should have a reduction if the standard response spectra was applied for base-isolated structure design and calculation. The results can serve as a reference for base-isolated structure response spectra applied in real construction.

Key words: base-isolated structure; seismic response spectra; friction coefficient and damping ratio; far-near earthquake

现阶段, 各国的抗震结构设计中一般都以地震反应谱法为基本方法. 反应谱法考虑了结构动力特性和地震动特性的相互关系, 基于统计分析的基础, 给出了不同类型地震波(不同发震机制、不同震中距、不同场地), 不同固有周期单自由度体系的最大响应^[1]. 其具有运用性强, 操作简单等特点.

在基础滑移隔震结构反应谱研究中, Mo-

staghel 等人基于两质点等代模型研究了上下部质量比及摩擦系数对纯滑移隔震结构的加速度和滑移位移谱的影响^[2]; Qamaruddin 等人分析了两质点等代模型的砖混结构加速度, 滑移位移和残留位移谱, 并分析了模型参数和摩擦系数对地震谱的影响^[3]. 洪峰等人使用等效线性化方法, 由随机模型获得了纯滑移隔震刚性结构的最大滑移的均值和标准差, 并根据最大滑移反应的均值, 给出

收稿日期: 2016-01-20

修改稿日期: 2017-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278395); 住房和城乡建设部科学技术项目(2016-k5-044)

作者简介: 熊仲明(1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究结构抗震、隔震, 土与结构相互作用. E-mail: 631678230@qq.com

了结构滑移反应谱^[4];东南大学毛利军对67条地震波按02版抗震规范规定的特征周期分类,对两类场地地下纯滑移隔震结构体系的反应谱进行统计分析,指出了其统计特征^[1];熊仲明等人建立了滑移隔震结构的多自由度计算模型,分别对比了滑移隔震体系等代单自由度刚体模型、双自由度模型与多自由度滑移位移谱、滑移量时程分析曲线^[5];樊剑、唐家祥提出了连续型指数摩擦力模型,绘制了上部结构动力系数反应谱和基底最大滑移量反应谱^[6]。

在叠层橡胶支座基础隔震结构反应谱的研究中,何文福等人根据弹塑性理论,基于单质点弹塑性反应分析结果建立了橡胶支座基础隔震结构的弹塑性反应谱,通过与振动台试验结果的对比证实了新提出的弹塑性反应谱的良好的精确性^[7];李森锋通过等效线性化方法建立了橡胶支座隔震结构弹塑性反应谱,并研究了结构阻尼比、第二刚度系数以及近远场地震条件对弹塑性反应谱的影响^[8];黄海荣基于等代两自由度模型研究了铅芯橡胶支座基础隔震结构设计反应谱与位移反应谱,并用多质点隔震结构的动力时程分析结果验证了新建反应谱的可靠性^[9]。

不难发现,现已成果为人们了解基础自由滑移和叠层橡胶支座隔震结构反应谱奠定了一定基础,但对于带限位装置的摩擦隔震体系反应谱规律还缺乏认识。

带限位装置的摩擦隔震体系是一种新型的隔震体系,该结构体系在地震作用下通过摩擦垫耗能,同时利用其限位装置减小结构位移,避免了结构震后复位的困难。本文利用 Matlab/Simulink 仿真工具^[10],建立了单质点并联基础隔震结构模型,研究了结构体系摩擦系数及等效阻尼比对隔震结构反应谱的影响,绘制了不同类场地的远、近场地震作用下的基础隔震结构地震影响系数及隔震层位移谱,最后基于工程模型实例,比较了规范谱、隔震谱及时程分析分别计算隔震结构动力响应的差异,为带限位装置的并联基础隔震结构工程应用提供理论参考。

1 带限位装置并联隔震结构弹塑性恢复力模型

由于限位器双线性模型所给出的恢复力和位移关系曲线中存在拐点,若在程序中分别定义弹性阶段的刚度和屈服后刚度,使得程序的编写趋

于复杂,而且计算结果在拐点附近不太稳定。故并联基础隔震结构弹塑性恢复力 $Q(x)$ 采用 Bouc-Wen 模型进行模拟,该模型恢复力 Q 由 Q_e 和 Q_h 两部分组成,分别代表弹性恢复力和滞回力, Q 的表达式为^[11]

$$Q = Q_e + Q_h = k_e x + k_h z = a k_1 x + (1-a) k_1 z \quad (1)$$

式中: k_1 为限位器弹性刚度; $k_e = a k_1$, $k_h = (1-a) k_1$, a 为屈服后刚度 k_2 与弹性刚度 k_1 之比; x 为隔震层位移; z 为描述滞回特性的变量,其变化范围为 $|z| \leq x_y$,且当 $|z| = x_y$ 时,表明此时处于屈服阶段, z 可由下式表示:

$$\dot{z} = \dot{x} \left[A - (\beta + \gamma \operatorname{sgn}(\dot{z})) \left| \frac{z}{x_y} \right|^n \right] \quad (2)$$

式中: x_y 为结构的屈服位移, A 控制限位器滞回环的幅度, γ 、 β 控制滞回环的一般形状, n 控制滞回环的光滑程度,其值越大说明 Bouc-Wen 模型曲线越接近于理想双线性弹塑性模型。本文选取的参数值为 $A=1$, $\gamma=0.5$, $\beta=0.5$, $n=30$,其恢复力如图1所示。 F_u 及 F_y 分别为体系极限荷载及屈服荷载; x_u 为体系极限位移; k_{eq} 为隔震限位装置等效刚度,由于隔震限位装置在地震作用下将进入塑性阶段,而结构反应谱以线弹性理论为基础建立,故需将非线性的隔震装置进行等效线性化处理,等效具体步骤为:(1)首先假定隔震层位移为 D_{D0} ,并根据隔震层水平恢复力模型得到等效刚度 K_{eq1} 和等效阻尼比 ζ_{11} ;(2)由结构的总质量 M 和等效刚度 K_{eq1} 计算出隔震结构的等效周期 T_{eq1} ;(3)按照文献^[12]提供的公式结合等效阻尼比 ζ_{11} 和等效周期 T_{eq1} 计算得到此时的水平地震影响系数 a_1 ,并可得到隔震层剪力 F_1 ;(4)根据隔震层剪力和其水平恢复力,可计算得到新的隔震层位移 D_D ;(5)重复以上过程,在计算过程中需不断迭代直到 D_D 满足收敛条件。

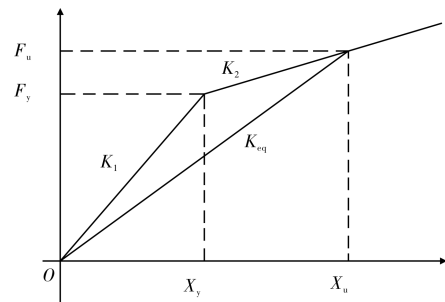


图1 基于 Bouc-wen 的弹塑性恢复力模型

Fig. 1 Elastoplasticity resilience model based on the Bouc-Wen

2 带限位装置基础隔震结构反应谱的建立

将带限位装置的基础隔震结构简化为有阻尼的单自由度体系, 由于并联基础隔震结构滑移层及弹塑性恢复力装置存在, 故方程中应考虑隔震层摩擦力和恢复力, 在地震作用下基础隔震结构的运动微分方程为

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + Q(x) + F_f = -m\ddot{x}_g(t) \quad (3)$$

其中: m 为单自由度体系的质量; c 为单自由度体系的阻尼系数; $\ddot{x}(t)$ 、 \dot{x} 和 $x(t)$ 分别为体系的相对加速度, 相对速度及相对位移; $Q(x)$ 为限位装置的弹塑性恢复力; F_f 为并联隔震结构的摩擦力, 隔震层摩擦力选用库伦摩擦力模型进行模拟, 并建立 Simulink 摩擦力仿真子模型^[10]; $\ddot{x}_g(t)$ 为地震动加速度。

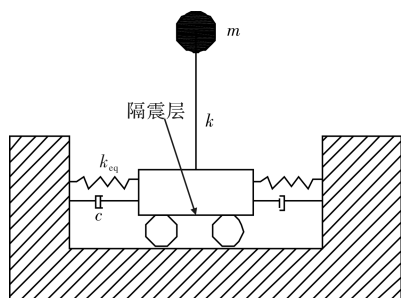


图2 单自由度并联隔震结构模型

Fig. 2 Based-isolated structure model

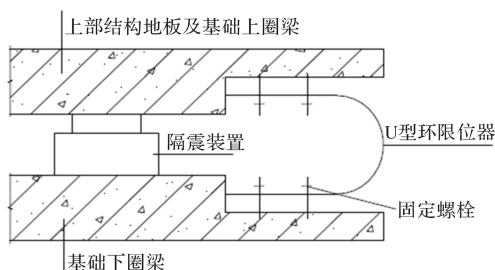


图3 U型限位器

Fig. 3 Limiting stopper of U shape

由于基础隔震结构其上部结构的层间刚度远大于隔震层的水平刚度, 地震中上部结构的层间水平位移很小而主要集中于隔震装置处, 上部结构在地震作用下只做水平整体移动。如果不考虑上部的扭转作用, 则隔震结构可以简化为单质点的动力分析模型, 图2所示为并联基础隔震结构单自由度体系简化计算模型。并联基础隔震结构在地震作用下滑动时, 结构的整体刚度由隔震层等效刚度提供。等效刚度决定了并联基础隔震结

构的振动周期, 隔震结构的基本周期 $T = 2\pi\sqrt{m/k_1}$ 。根据《建筑抗震设计规范》GB50011-2010 中对隔震层水平等效刚度及等效阻尼比规定:

$$k_1 = \sum k_{eq} \quad (4)$$

$$\zeta_1 = \sum k_{eq} \zeta_{eq} / k_1 \quad (5)$$

其中: ζ_1 为隔震层等效阻尼比, ζ_{eq} 为由试验确定的隔震限位装置等效阻尼比。通过改变隔震层水平等效刚度来改变结构的振动周期, 在实际工程中主要设置隔震层中布置的限位装置数量来实现。本文选取U型限位器(图3)为并联基础隔震结构的限位装置, 限位器恢复力模型采用上诉 Bouc-wen 模型, 其相应的工程参数采用文献^[13]中试验数据, 其屈服荷载为 1.4313×10^4 N, 屈服位移为 10.13 mm, 极限荷载为 2.7485×10^4 N, 极限位移为 154.06 mm, 屈服后刚度为 1.054×10^5 N/m。

3 等效阻尼比及摩擦系数对并联基础隔震结构反应谱的影响

根据上诉反应谱的建立方法, 利用 Matlab/Simulink 工具对单质点并联基础隔震结构模型进行时程分析。由于隔震结构的振动周期普遍较长, 时程分析周期延长至 10 s, 并联基础隔震结构的主要影响因素为结构的阻尼比, 结构体系摩擦系数。本文选取等效阻尼比为 5%、15%、25%、35%, 阻尼比处于 5%~40% 符合隔震结构要求; 隔震层摩擦系数为 0.05、0.1、0.15、0.2。输入相当于 7 度罕遇地震下(220 gal)的 El Centro 波, 图4为等效阻尼比及摩擦系数对加速度谱和隔震层位移谱的影响。

由图4分析可知: (1)在短周期 $T < 1.5$ s 内, 等效阻尼比越大结构加速度越小, 阻尼比对隔震层位移影响较小。在中长周期 $1.5 \text{ s} < T < 6 \text{ s}$ 内, 等效阻尼比越大结构加速度越大, 而隔震层位移越小。随着周期的延长, 阻尼比对加速度的影响也不断减小。(2)摩擦系数对加速度谱及位移谱的影响比等效阻尼比影响显著。短周期 $T < 1.8$ s 内, 摩擦系数越大加速度越小, 隔震层位移也越小。在中长周期 $T > 1.8$ s 时, 摩擦系数越大加速度越大, 而隔震层位移越小。

4 不同场地类别对并联基础隔震结构反应的影响

反应谱通常受震级、震中距、场地条件及震

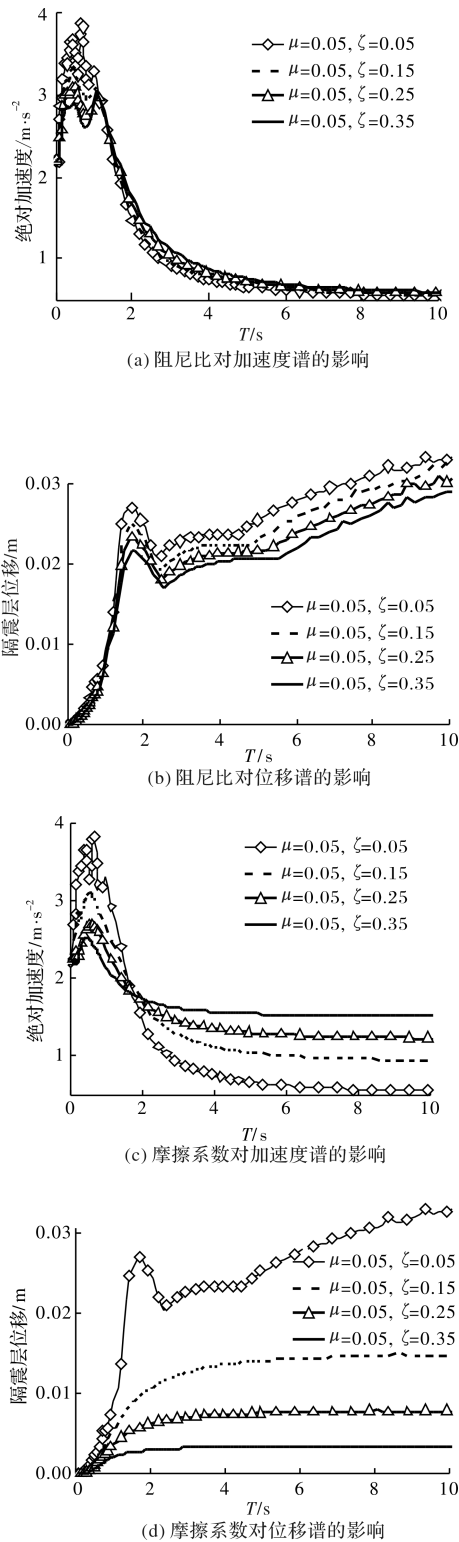


图 4 阻尼比及摩擦系数对加速度谱和位移谱的影响
Fig. 4 Damping ratio and friction coefficient effect on the response spectra

源机制等多种因素的影响. 为获得具有普遍意义的反应谱, 本文取 PEER 记录地震波, 按照文献 [14] 方法, 进行了大量地震动记录的统计分析. 首先, 根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010) 将场地土按照剪切波速和覆盖层厚度分为四类,

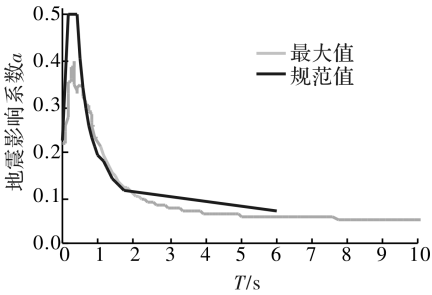
由于隔震结构不宜建于Ⅳ类场地, 故本文将场地土分为Ⅰ、Ⅱ及Ⅲ类; 其次, 确定近场地震和远场地震划分标准. 本文在计算中将断层距小于 20 km 定义为近场地震, 但当速度时程中含有明显的脉冲时断层距可延长至 25 km, 在此范围外的为远场地震. 每类场地均选取 20 条远、近地震波进行时程分析, 并计算每类场地反应极值. 最后, 将地震峰值加速度调整为七度罕遇地震烈度 (220 gal) 幅值, 结构隔震层摩擦系数取为 0.05, 等效阻尼比为 0.05, 与规范反应谱进行对比. 同时, 引入地震影响系数:

$$a = S_a / g \tag{6}$$

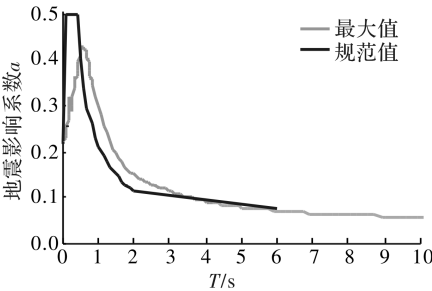
式中: S_a 为单质点隔震结构的绝对加速度, g 为重力加速度. 表 1 为七度罕遇地震作用下阻尼比为 0.05 的规范反应谱参数数据, a_{\max} 为地震影响系数最大值, T_g 为特征周期. 图 5—图 6 为不同类场地地震影响系数及隔震层位移曲线, 图 6 中虚线为各类场地不同地震波作用下位移曲线.

表 1 规范反应谱参数数据 ($\zeta=0.05$)

场地类别		设计地震分组	a_{\max}	T_g
一类	近场	第二组	0.50	0.35
	远场	第三组	0.50	0.40
二类	近场	第二组	0.50	0.45
	远场	第三组	0.50	0.50
三类	近场	第二组	0.50	0.60
	远场	第三组	0.50	0.70



(a) Ⅰ类场地(近场)



(b) Ⅰ类场地(远场)

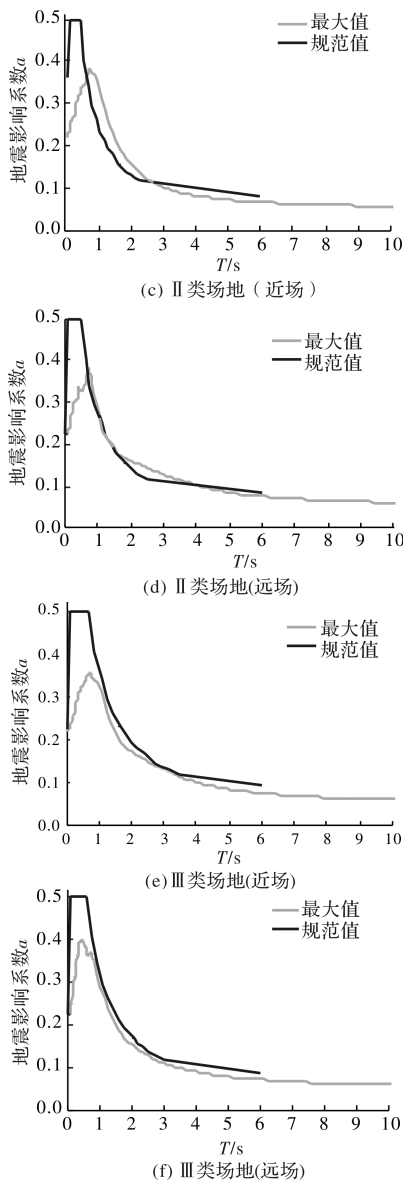


图5 不同类场地地震影响系数

Fig. 5 Seismic influence coefficient of different fields

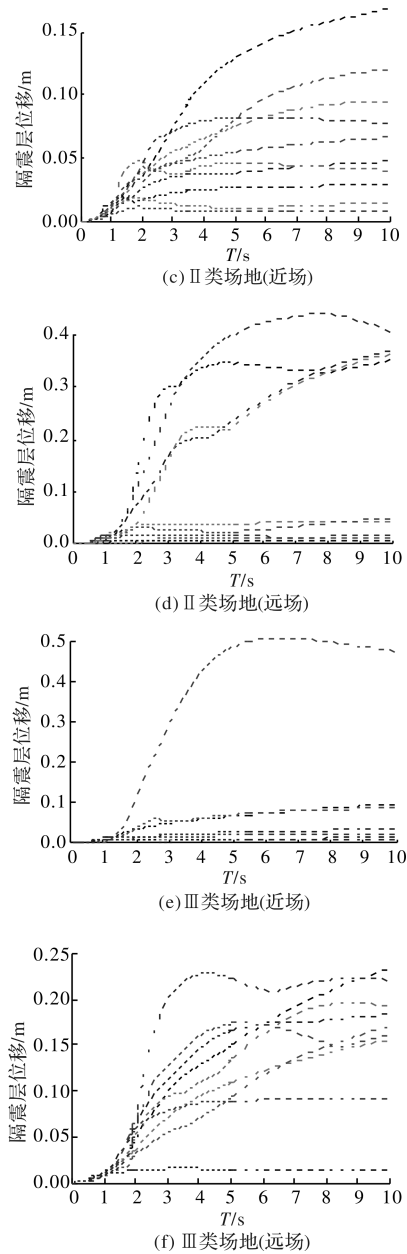
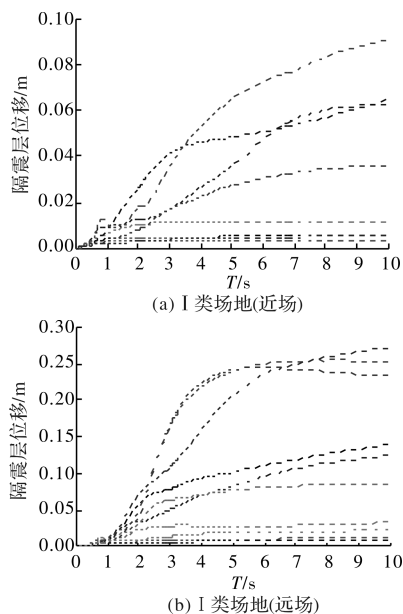


图6 不同类场地隔震层位移曲线

Fig. 6 Isolation layer displacement of different Sites

由图5-图6分析可知:(1)各类场地地震影响系数曲线变化趋势相同,与抗震规范反应谱类似,均具有明显的四段式变化阶段。地震影响系数值随着结构周期的延长不断下降直至平缓;平台段的抗震规范谱最大地震影响系数均比并联基础隔震结构大;在长周期下降段时,规范谱地震影响系数下降速率均比隔震结构慢,其值也相应要大。(2)同类场地类型,远场地震作用下的隔震结构地震影响系数平台峰值比近场地震峰值大,这是由于远场地震长周期成分比短周期成分多,导致长周期基础隔震结构的地震反应增加。在长周期段,远、近场的地震影响系数差异较小,但近场地震作用下的地震影响系数曲线的下降速率要大于远



场地地震。(3)不同类场地的地震影响系数差异较小,但由于特征周期差别,Ⅲ类场地的基础隔震结构地震影响系数值平台段最长。(4)不同类场地的隔震层位移曲线变化趋势也相同,均随着结构周期的增大而不断增加,并最终趋于平缓。(5)同类场地,远场地震作用下的隔震层位移值均比近场值大,这是由于远场地震的地震特性引起。(6)不同类场地下,隔震层位移值表现为:Ⅲ类>Ⅱ类>Ⅰ类,远场大于近场。场地特征周期与隔震结构自振周期越接近,地震反应越强。

5 工程实例对比分析

选取滑移隔震试验模型进行工程分析,如图 7 所示,该模型为 5 层框架结构,首层柱尺寸为 750 mm×750 mm,2~5 层柱尺寸为 600 mm×600 mm,主梁为 300 mm×600 mm,次梁为 200 mm×400 mm,板厚 100 mm,隔震层厚 100 mm,首层层高为 4.2 m,其余层层高为 3.6 m,柱距为 6 m,隔震层平面尺寸为 15 m×15 m,隔震层用 0 层代替,原尺寸模型参数见表 2。模型缩尺比例为 1:5,2~5 层设置混凝土配重块,尺寸为 0.8 m×0.8 m×0.3 m。建筑场地为Ⅱ类场地,地震分组为第二组,抗震设防烈度为 7 度,场地特征周期为 0.45 s,结构阻尼比取为 0.05,摩擦系数为 0.05。



图 7 试验缩尺模型

Fig. 7 Experimental model

表 2 工程模型相关参数

Tab. 2 Parameters of the engineering model

楼层数	质量/kg	刚度/kN·m ⁻¹		高度/m
		X 方向	Y 方向	
5	146E+3	1.4029E+5	1.4029E+5	3.6
4	146E+3	1.5589E+5	1.5589E+5	3.6
3	146E+3	1.6184E+5	1.6184E+5	3.6
2	146E+3	1.8435E+5	1.8435E+5	3.6
1	171E+3	3.4395E+5	3.4395E+5	4.2
隔震层(0)	146E+3	—	—	—

根据表 2 中的参数,通过 Matlab 编程计算基础隔震结构限位状态的频率和振型,限位时隔震层的等效刚度取为 3.2×10⁴ kN/m,结构四周单方向共布置 4 个 U 型限位器。结构的前三阶频率及正则化前的振型如表 3 所示,正则化后振型如图 8 所示。输入Ⅱ类场地近场地震波(220 gal)进行时程分析,计算结果取平均值。表 4 为时程分析、隔震谱及规范谱计算的层间剪力及层间位移对比,括号中为层间剪力系数。

表 3 结构前三阶频率及振型

Tab. 3 The first frequency and three vibration model

工况	一阶	二阶	三阶
自振频率	5.37	18.77	35.33
自振振型	-0.328	-0.495	-0.387
	-0.355	-0.467	-0.218
	-0.394	-0.262	0.350
	-0.430	0.054	0.603
	-0.455	0.365	0.161
	-0.469	0.576	-0.539

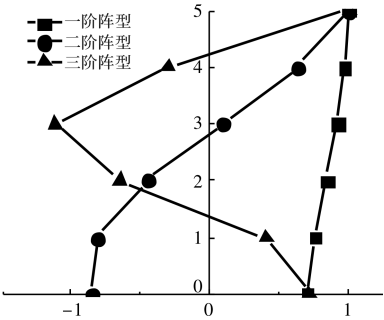


图 8 正则化后结构前三阶振型

Fig. 8 The first three vibration model after regularization

表 4 不同计算方法结果对比

Tab. 4 Results comparison by different calculation methods

层数	层间剪力/kN			层间位移/mm		
	时程分析	隔震谱	规范谱	时程分析	隔震谱	规范谱
0	—	—	—	30.9	34.5	63.2
1	6.67E2 (0.08)	6.91E2 (0.09)	1.34E3 (0.18)	1.32	1.48	2.78
2	6.48E2 (0.11)	6.75E2 (0.12)	1.18E3 (0.20)	2.41	2.78	5.22
3	5.97E2 (0.14)	6.17E2 (0.14)	9.84E2 (0.23)	2.53	2.98	5.62
4	5.76E2 (0.20)	6.42E2 (0.22)	7.67E2 (0.26)	2.72	3.20	6.03
5	3.80E2 (0.26)	4.30E2 (0.29)	6.87E2 (0.47)	2.78	3.31	6.24

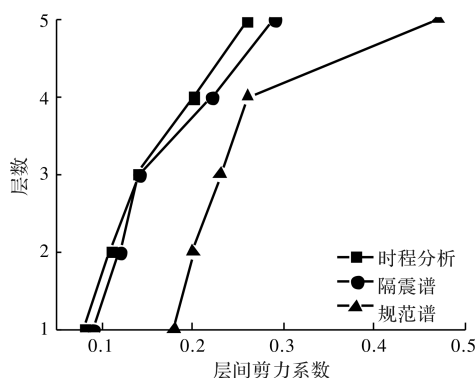


图7 层间剪力系数分布图

Fig. 7 The layout of layered shear force coefficient

由表4及图7分析可知:(1)由并联基础隔震结构反应谱计算的层间剪力及层间位移与时程分析结果相近,而按抗震规范反应谱计算的结果偏大,结构顶层层间剪力系数差异为:81%(规范谱)、12%(隔震谱),层间位移差异为:124%(规范谱)、19%(隔震谱)。产生差异的主要原因为基础隔震结构的自振周期较长且主要地震反应集中于反应谱的长周期部分,规范设计反应谱长周期段下降速率慢,谱值偏大,在基础剪力计算偏小。从而经一步说明抗震规范反应谱用于基础隔震结构设计及计算是偏于安全的,在规范反应谱平台段及长周期段需要进行相应的系数折减。(2)层间剪力系数随着楼层数增加而增大,且三者计算结果皆满足建筑抗震规范中对于楼层最小剪力系数值的要求。

6 结论

研究了摩擦系数及阻尼比对并联基础隔震结构反应谱的影响,并以不同类场地的远、近场地震波为地震动输入绘制了相应场地的基础隔震结构反应谱,最后基于工程实例对比分析了规范谱、隔震谱及时程分析结果的差异。由以上分析可得出结论:

(1)摩擦系数对并联隔震结构反应谱的影响大于结构阻尼比。摩擦系数及阻尼比对隔震结构加速度反应谱在不同的周期段内有不同的影响趋势,而隔震层位移谱值均随着摩擦系数及阻尼比的增大不断减小。

(2)不同类场地的基础隔震结构地震影响系数谱及隔震层位移谱的变化趋势一致。基础隔震结构地震影响系数谱值与规范地震影响系数谱在平台段及长周期段差异较大。远场地震作用下的地震影响系数值及隔震层位移一般大于近场地震作

用下影响系数及位移值。由于Ⅲ类场地特征周期较长,基础隔震结构地震反应大,隔震层位移值相比较较大。

(3)建筑结构抗震规范谱用于并联基础隔震结构的设计及计算时,其动力响应值比隔震谱及时程分析结果要大。因此,建议在应用规范反应谱在实际基础隔震结构工程设计及计算时,可以进行相应系数折减,能够保证安全要求。

参考文献 References

- [1] 毛利军, 李爱群. 基础滑移隔震体系的地震反应谱[J]. 土木工程学报, 2004, 37(2): 58-65.
MAO Lijun, LI Aiqun. Earthquake response spectrum of sliding base seismic-isolation system[J]. China civil engineering journal, 2004, 37(2): 58-65.
- [2] MOSTAGHEL N, HEJAZI H, TANBAKUCHI J. Response of sliding structures to harmonic support motion[J]. Earthquake Engrg. Struct. Dyn., 1983, 11(3): 355-366.
- [3] QAMARUDDIN M, Arya A S, CHANDRA B. Seismic response of brick buildings with sliding substructure[J]. J. Struct. Engrg., ASCE, 1986, 112(9): 2001-2011.
- [4] 洪峰, 王允红. 摩擦基底隔震刚性结构滑移反应谱的确定[J]. 世界地震工程, 1998, 14(2): 17-22.
HONG Feng, WANG Yunhong. Determination of sliding displacement response spectra of rigid structures with friction base isolation[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 1998, 14(2): 17-22.
- [5] 熊仲明, 陈轩, 虞子良. 基础滑移隔震体系位移谱研究, 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(4): 467-476.
XIONG Zhongming, CHEN Xuan, YU Ziliang. Study of sliding displacement spectrum on the sliding base isolation structure[J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(4): 467-476.
- [6] 樊剑, 唐家祥. 基于指数摩擦力模型滑移隔震结构的动力特性, 振动与冲击, 2000, 19(3): 30-33.
FAN Jian, TANG Jiaxiang. Study on seismic response characteristics of sliding structures base on exponential friction model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(3): 30-33.
- [7] 何文福, 刘文光, 杨晓, 等. 隔震结构弹塑性反应谱分析研究[J]. 振动与冲击, 2010, 19(3): 30-33.
HE Wenfu, LIU Wenguang, YANG Xiao, et al. Elasto-plastic response spectra of isolated structures[J]. Journal of vibration and shock, 2010, 19(1): 30-33.
- [8] 李森锋. 基础隔震结构反应谱研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2012.
LI Miaofeng. Research on the response spectrum of base isolation structure[D]. Hunan: Hunan University, 2012.

(下转第191页)

4 结语

提出了新型传感机理-拱梁组合体系的光纤光栅压力传感器设计方法,拱梁组合式光纤光栅压力传感器压力灵敏度系数试验值为 $1.40 \times 10^{-3} \text{ nm/N}$,理论值为 $1.21 \times 10^{-3} \text{ nm/N}$,两者偏差 13.5%。通过对压力传感器进行静态性能分析,传感器线性度误差为 0.57%,迟滞性误差为 1%,重复性误差为 2%,综上,静态误差为 2.3%。研究结果表明:拱梁组合式光纤光栅压力传感器测量精度高、线性度好,在土压力测量方面具有良好的工程应用前景。

参考文献 References

- [1] 兰春光,刘航.工程化光纤光栅液体压力传感器的研制[J].仪器仪表学报,2013,34(9):2154-2159.
LAN Chunguang, LIU Hang. Development of FBG-based liquid pressure sensor for engineering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9): 2154-2159.
- [2] 黄俊.光纤光栅压力传感的研制与应用[D].武汉理工大学,2013.
HUANG Jun. Development and application of fiber Bragg grating pressure sensors [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [3] 罗建花,开桂云.轮辐式光纤光栅压力传感器的设计与实现[J].光子学报,2006,35(1):106-108.
LUO Jianhua, KAI Guiyun. The design and realization of spoke FBG pressure sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(1): 106-108.
- [4] 张智禹,于文革.一种新型FBG微力传感器[J].传感器与微系统,2014,33(3):70-75.
ZHANG Zhiyu, YU Wenge. A novel FBG micro-force sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(3): 70-75.
- [5] 孙立晔,张嫚,李闯,孙丽.基于杠杆原理的高灵敏度光纤光栅压力传感器试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(1):80-85.
SUN Liye, ZHANG Man, LI Chuang, SUN Li. High sensitivity fiber Bragg grating pressure sensor experiment based on the principle of leverage [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2016, 32(1): 80-85.
- [6] 潘洪亮,董惠娟,何俊,张广玉.井下油套环空级联式光纤光栅压力传感器的研制[J].光电子·激光,2012,23(10):1842-1846.
PAN Hongliang, Dong Huijuan, He Jun, ZHANG Guangyu. Fabrication of cascaded fiber grating pressure sensor for annulus of rod pumping wells [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012, 23(10): 1842-1846.
- [7] 孙搏,隋青美,王静.微型布拉格光栅土压力传感器的设计与试验[J].仪表技术与传感器,2016,10:21-27.
SUN Bo, SUI Qingmei, WANG Jing. Design and test of micro bragg grating soil pressure sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(10): 21-27.
- [8] Alexis Bimis, Dimitris Karalekas. Experimental evaluation of hardening strains in a bioceramic material using an embedded optical sensor [J]. Meccanica, 2015, 50(2): 541-547.
- [9] SUN Li, LI Chuang, LI Jun, ZHANG Chunwei, DING Xiaosu. Strain Transfer Analysis of a Clamped Fiber Bragg Grating Sensor [J]. Applied Science, 2017, 7(2): 1-11.

(编辑 沈波)

(上接第178页)

- [9] 黄海荣,朱玉华.基础隔震结构反应谱研究[J].结构工程师,2010,26(3):123-129.
HUANG Hairong, ZHU Yuhua. Studies on design response spectrum for base-isolated structures [J]. Structural Engineers, 2010, 26(3): 123-129.
- [10] 薛定宇,陈阳泉.基于Matlab/Simulink的系统仿真技术和应用[M].北京:清华大学出版社,2012.
XUE Dingyu, CHEN Yangquan. Technology and application of Matlab/Simulink system simulation [M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 2012.
- [11] 刘伟庆,章征涛.结构抗震控制的动态仿真分析方法研究[J].防灾减灾工程学报,2004,20(4):382-388.
LIU Weiqing, ZHANG Zhengtao. Research on the Method of Dynamic Simulation for Seismic controlled Structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 20(4): 382-388.
- [12] 王曙光,杜东升,刘伟庆,等.隔震结构不同阻尼比地震影响系数曲线的改进研究[J].建筑结构学报,2009,30(3):112-119.
WANG Shuguang, DU Dongsheng, LIU Weiqing, et al. Research on seismic influence coefficient of seismic isolated structure with different damping ratio [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(3): 112-119.
- [13] 熊仲明,霍晓鹏,苏妮娜.一种新型滑移隔震体系的理论分析和研究[J].振动与冲击,2008,29(10):135-139.
XIONG Zhongming, HUO Xiaopeng, SU Nina. Theoretical analysis and study on a new kind of sliding base isolation system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 29(10): 135-139.
- [14] 翟长海,公茂盛,谢礼立.工程结构等延性地震抗力谱研究.地震工程与工程振动,2004,24(1):22-29.
ZHAI Changhai, GONG Maosheng, XIE Lili. On seismic resistance spectra of constant ductility of structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(1): 22-29.

(编辑 沈波)