

核电厂隔震结构支座力学性能多因素耦合地震响应研究

何文福, 黄一沈, 刘文光, 刘文燕

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘要: 针对隔震支座力学性能与水平变频及竖向荷载的耦合特性, 对其进行水平、竖向力学性能和关性试验研究, 并输入 12 条剪切波速不同的地震波, 对比分析考虑耦合特性与非耦合特性对核电厂隔震结构在地震作用下动力响应的影响。结果表明理论耦合力学模型与试验结果一致; 数值结果显示 AP1000 在地震作用下考虑耦合模型同工况下的隔震层竖向刚度衰减大于水平刚度衰减; 不同地震动因剪切波速的差异对核电厂隔震结构的响应有较大影响, 对于剪切波速较小的软土地基, 双向刚度衰减程度最为显著; 考虑耦合效应模型上部结构的位移响应显著大于非耦合模型。在超设计基准地震下其位移响应和刚度衰减率都有突变趋势, 表明考虑耦合效应模型的支座会进入屈曲破坏阶段, 上部结构进入突变倒塌。因此对超设计基准地震下核电厂隔震结构响应不考虑支座力学性能的耦合将低估结构地震响应。

关键词: 核电厂隔震结构; 多因素耦合; 地震响应; 超设计基准地震

中图分类号: TU352.4

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.17.010

Seismic responses of a nuclear plant isolated structure supported by rubber bearings with a multi-factor coupled mechanical model

HE Wenfu, HUANG Yishen, LIU Wenguang, LIU Wenyuan

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Aiming at rubber bearing mechanical performances' coupling features related to horizontal loading, horizontal deformation and vertical loading, tests for relevance between horizontal and vertical performances of rubber bearings were conducted. Here, considering rubber supporting bearings with a multi-factor coupled mechanical model, the dynamic responses of a nuclear plant isolated structure under 12 waves with different shear wave velocities were simulated and analyzed. The theoretical analysis results agreed well with those of tests. The simulation results showed that the vertical stiffness decay of AP1000 is larger than its horizontal stiffness decay; different earthquakes with different shear wave velocities have large influences on the dynamic responses of the nuclear plant isolation structure, the smaller the shear wave velocity, the larger the stiffness decay rate in both directions; the displacement response of the super-structure of the isolated structure supported by rubber bearings with the coupled model is significantly larger than that supported by bearings without the coupled model; under earthquake beyond design basis, the isolated structure's displacement response and stiffness decay rate have abrupt changes, bearings with the coupled model enter a buckling failure stage and the superstructure enters sudden collapse; therefore, under earthquake beyond design basis, if a nuclear plant isolated structure's dynamic responses are computed not using rubber bearings with the multi-factor coupled mechanical model, its seismic responses can be under-estimated.

Key words: nuclear plant isolated structure; multi-factor coupling; seismic response; earthquake beyond design basis

经过 2011 年福岛核电站的核灾难以后, 在地震下核电结构安全问题一直是世界备受关注的问题。隔震技术的发展和技术成熟度是毋庸置疑的, 将现已成熟的隔震技术应用到核电工程中, 不仅能使核电工程获

得许多潜在好处, 最重要的是可以改善核电厂的整体可靠性和安全性^[1]。庄初立等^[2]基于 ANSYS 和 Midas Gen 软件建立 AP1000 核岛结构有限元模型, 通过分析核岛结构的三维地震响应, 证明了隔震核岛结构的有效性。由此可见, 隔震技术是未来核电抗震能力提高的主要技术之一。

庄初立等^[3]曾提出对于采用拱底隔震的核电厂,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308331; 51478257; 51508414)

收稿日期: 2017-02-27 修改稿收到日期: 2017-05-31

第一作者: 何文福, 男, 博士, 副教授, 1979 年生

需要研究其在水平地震和竖向地震共同作用下的影响。并且在大超设计基准地震下, 隔震支座很可能会因为超出受压极限及支座最大水平位移限值而发生破坏。然而现阶段对于隔震支座我国大多采用简单双向非耦合的力学模型, 计算得到结果会产生一定的误差, 尤其是对于核电结构。实际上, 隔震支座力学模型具有水平及竖向力和位移相互耦合关系, 因此不宜直接采用简化后模型进行分析。

近年来, 一些国外学者开始对支座耦合特性展开相关研究。Kumar 等^[5]指出橡胶支座在地震中会出现受拉并压缩刚度都会受到水平位移影响, 尤其是在特大地震和超设计基准下。Wam 等^[6]对铅芯橡胶支座水平和竖向的耦合响应做了理论与试验分析, 得出当水平位移增大时其竖向刚度会减小, 并指出了竖向刚度会减小到 40%~50%。Venom 等^[7]考虑到在特大地震下, 支座水平刚度的损耗是不可恢复的, 并根据此提出了一种新的支座耦合模型。Kumar 等^[8]用了 10 种隔震系统做模拟, 分析对比了不考虑耦合特性和考虑支座耦合的力学模型的地震响应给出了刚度衰减率并建议在大地震下应该考虑支座耦合的力学模型。我国对核电厂的隔震研究虽较晚, 但还是有了一定的研究成果, 然而国内对于核电隔震结构考虑水平竖向耦合特性的研究还较少。此外, 近断层地震动特征参数与隔震层设置在不同楼层的隔震结构动力响应参数均存在相关性, 且相关程度不同^[9]。Annie 等^[10]指出地震动特性的差异对场地地震反应会产生不同的影响。陈龙伟等^[11-14]认为场地剪切波速作为场地分类的重要指标, 其不确定性对场地地震反应不确定性影响更为显著, 且当剪切波速减小时, 地震动峰值加速度、地表反应谱平台值随之减小, 地表反应谱的特征周期则增大。

为探究不同剪切波速地震波对考虑支座耦合特性模型的影响, 本文对橡胶隔震支座压应力及水平变形耦合力学性能进行理论与试验对比分析, 采用考虑瞬时变化的水平及竖向刚度耦合特性的支座力学模型编制结构地震响应分析程序, 并选用 12 条剪切波速不同的地震波对 AP1000 核电厂结构进行动力响应分析, 研究隔震支座耦合与非耦合模型的核电厂隔震结构地震响应规律以探究支座耦合特性对其影响大小。

I 隔震支座力学相关性试验

为了研究 RB 支座和 LRB 支座的多因素耦合相关性等基本力学性能, 进行 RB 支座和 LRB 支座的不同荷载下及不同变形下的支座水平及竖向力学性能试验。使用的试验加载装置为竖向 10 000 kN 千斤顶, 水平 ± 500 kN 电液伺服加载系统。水平向最大位移

± 200 mm, 单向最大位移 400 mm, 最大采样频率 100 Hz, 试验装置如图 1 所示。

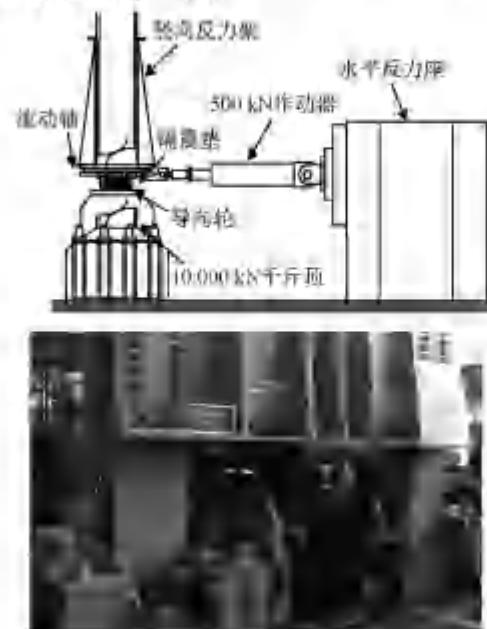


图 1 试验装置及传感器布置图

Fig. 1 Test facility and arrangement of transducer

试验体参数如表 1 所示, 试验支座分别为普通橡胶支座 2 个, 铅芯橡胶支座 2 个。

表 1 试件参数表

试件	Parameter of specimen								mm
	D	d	t ₁	n	T ₁	H	S ₁	S ₂	
RB-01	300	45	2.6	22	58	140	27.40	5.17	
RB-02	300	45	2.6	22	58	140	27.40	5.17	
LRB-01	300	60	2.6	22	58	140	23.08	5.17	
LRB-02	300	60	2.6	22	58	140	23.08	5.17	

注: D 为外径; d 为内孔径; t₁ 为橡胶层厚; n 为橡胶层数; T₁ 为橡胶总厚度; H 为试件总高; S₁ 为第一屈曲系数; S₂ 为第二屈曲系数

试验进行了 4 圈循环加载试验, 计算水平刚度取 4 次反复加载循环的第 3 次循环。由于篇幅的关系, 这里仅给出普通橡胶支座水平刚度、铅芯橡胶支座屈服后刚度随剪应变及压应力耦合相关性的试验结果。

图 2 为 RB 和 LRB 支座屈服后刚度与压应力关系图。在竖向压应力较小时, 屈服后刚度随剪应变变化幅度较小, 但在大压应力时, 屈服后刚度随剪应变的增大而增大。图 3 为试件 RB 型和 LRB 型的竖向荷载-位移关系曲线。加载波形为频率 0.3 Hz 的正弦波, 往复加载 4 次, 取第三次循环的竖向滞回曲线。可以看出实际的竖向压应力和竖向位移曲线是随着加载的过程而不断改变的。

对试验结果进行分析, 数据显示对于水平刚度(铅芯屈服后刚度)和竖向刚度, LRB 最大衰减率分别为

33%、96%, RB 支座最大衰减率分别为 66%、57%。

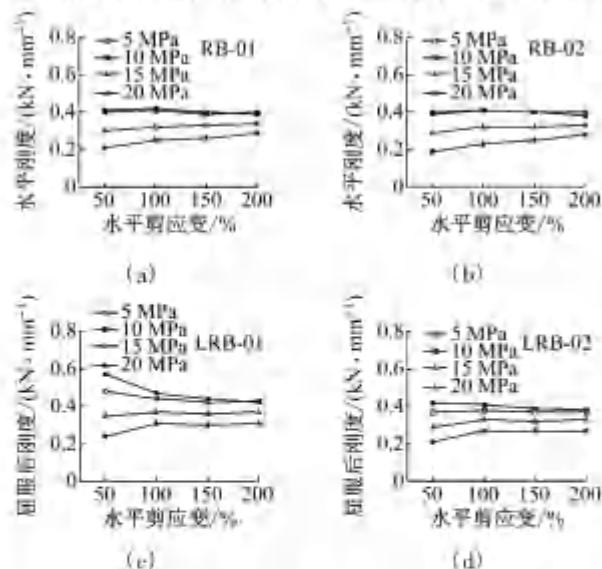


图 2 RB 和 LRB 支座水平(屈服后)刚度与压应力关系图

Fig. 2 Relation of horizontal (post yield) stiffness and vertical compression (RB and LRB)

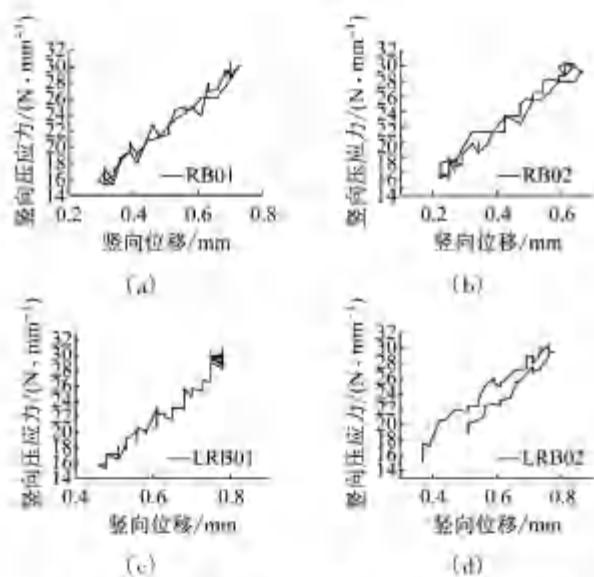


图 3 RB 和 LRB 支座竖向荷载和竖向位移的关系

Fig. 3 Relation of vertical load and displacement (RB and LRB)

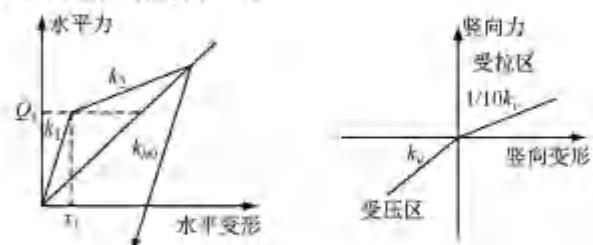
2 隔震支座耦合力学模型

2.1 隔震支座耦合力学模型

现有的大部分隔震结构力学分析模型当中, 铅芯橡胶隔震支座水平力学模型为双线性、三线性模型以及 bowen 模型, 坚向力学模型为拉压相等以及拉压不等模型。图 4(a)、图 4(b) 所示为典型水平双线性及坚向拉压不等模型。

图 4 中 K_m 为屈服后刚度, K_1 为屈服前刚度, K_2 为屈服前刚度, Q_1 为屈服力, x_1 为屈服位移。 $K_m = \frac{GA}{T_p}$, $K_1 = \frac{E_{el}A}{T_p}$, $E_{el} = \frac{E_c E_b}{E_c + E_b}$, E_c 为压缩时的弹性模量, 其值

可表示为 $E_c = 3G(1+2\kappa S_1)$, E_b 为体积弹性模量, G 为橡胶支座剪切模量, S_1 为橡胶支座第一形状系数, T_p 为橡胶层总厚度, A 为支座面积, κ 为修正系数。实际地震作用下支座的水平运动状态如图 5 所示, 其中 A_s 为支座剪切变形为 δ 时有效支座承载面积, 可以得到随着 δ 的增大, 支座有效承载面积 A_s 减小, 导致支座的水平及坚向刚度的变化。



(a) 水平向双线性模型

(b) 坚向双线性模型

Fig. 4 Model of LRB in horizontal and vertical direction

当剪切变形为 δ 时, 橡胶支座的有效承载面积, 用下式求出

$$A_s = \left[1 - \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{\delta}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{D} \right)^2} + \arcsin \left(\frac{\delta}{D} \right) \right\} \right] A \quad (1)$$

式中, D 为支座直径。

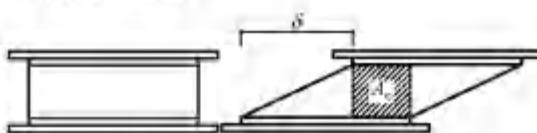


图 5 橡胶支座变形前后形状图

Fig. 5 Shape of LRB before and after deformation

为考虑支座水平变形及竖向荷载对水平刚度的影响, 其多因素耦合水平刚度模型如下

$$\frac{K_h}{K_m} = 1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} \right)^2 \quad (2)$$

式中, K 为多因素水平刚度, σ 为实际压应力, 其值与支座变形和竖向受力相关, σ_{cr} 为支座屈曲压应力, 其屈曲应力如式

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \xi G S_1 S_2 \quad (3)$$

式中: P_{cr} 为屈曲荷载; $\xi = \pi \sqrt{\frac{\kappa}{8(1+2\kappa S_1^2 G/E_b)}}$; S_1 为橡胶支座第一形状系数; S_2 为橡胶支座第二形状系数。

考虑水平位移对竖向刚度的影响的竖向刚度计算公式如下

$$K_v = \frac{A_s}{A} K_v \quad (4)$$

式中, K_v 为竖向初始压缩刚度, 当橡胶支座受拉时, 根据拉伸试验结果, 取拉伸刚度为压缩刚度的 1/10 进行计算^[34]。

2.2 理论与试验结果对比

根据试验结果, 对其和理论公式进行比对, 结果如图 6 所示。其中, 图 6(a) 为 LRB 支座水平刚度与压应力的相关性图, 图 6(b) 为竖向刚度和水平位移的相关性图^[16]。

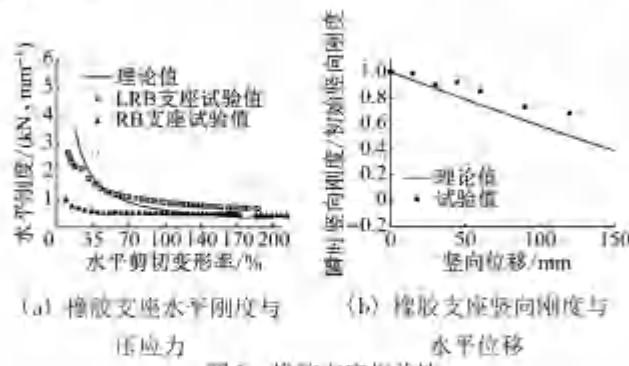


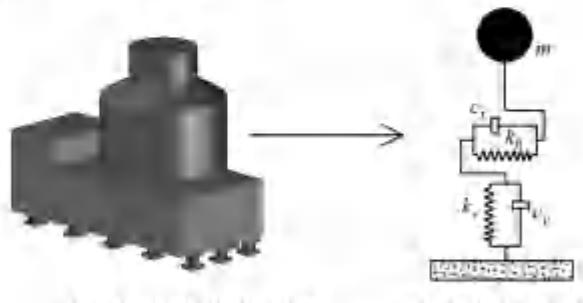
Fig. 6 Correlation of rubber bearings

结合理论与试验可知, 水平刚度的衰减率理论上可达到接近 100%, 但根据试验结果, 对于水平刚度, LRB 的最大衰减率为 33%, RB 的最大衰减率为 66%。实际上, 当支座并未达到最大衰减率时便会因为支座受压超出压应力极限而破坏。其次, 试验得出 LRB 的竖向刚度最大衰减率为 96%, RB 的为 57%, 由此可见, 竖向刚度衰减程度要大于水平刚度衰减程度。

3 多因素耦合地震响应分析

3.1 核电隔震结构耦合效应模型

为了分析地震作用下竖向压力和水平变形对核电隔震结构动力响应的影响, 本文对第三代核电 AP1000 隔震结构模型进行动力分析^[17], 核电隔震结构三维模型图如图 7(a), 上部质量为 12.6 万吨, 隔震结构周期为 2.8 s, 单个支座的基本面压为 10 MPa。由于核电安全壳结构周期约为 0.6 s, 相对于隔震周期较短, 加之本文仅研究隔震层在地震作用下竖向荷载、水平变形与其力学模型耦合效应作用下的响应, 因此把上部结构简化为单质点, 如图 7(b)。



(a) 核电隔震结构三维模型 (b) 单质点模型

图 7 AP1000 单质点简化模型

Fig. 7 Single-particle model of AP1000

通过 MATLAB 软件用纽马克-非线性加速度法进

行编程和时程分析计算。隔震层恢复力模型采用考虑压应力及水平变形影响的隔震支座力学模型。图 8 为考虑耦合效应的编程流程图。

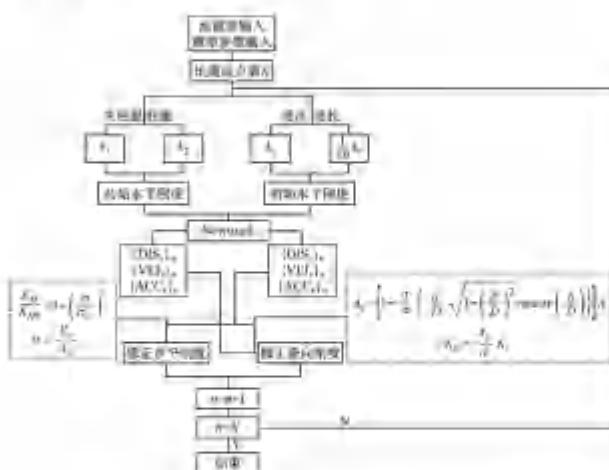


图 8 考虑刚度变化模型程序流程图

Fig. 8 Flow chart of advanced model

3.2 地震动输入

本文参照 United States Geological Survey (USGS) 给出的场地条件分类, 根据地下 30 m 深度范围内的等效剪切波速值将地震波分为三类——软土 Bin1, 中硬土 Bin2 和基岩 Bin3, 并挑选了其中 12 条地震波, 具体地震波选用如表 2 所示。地震动输入工况同时考虑水平和竖向分量, X 方向与 Y 方向的输入峰值之比为 1:2/3^[18]。输入地震动峰值为 0.3g~0.6g 的四个工况。另外, 考虑核电结构在超设计基准地震下的响应, 增加了 0.9g 的工况。

表 2 选用地震波

Tab. 2 The selected ground motions

分类	编号	地震波	地名	PGA/g	剪切波速/(m·s ⁻¹)
Bin1	W1	AKT015	Chuetsu-oki, Japan	6.80	135.40
	W2	FK8020	Nugata, Japan	6.63	133.05
	W3	SMN002	Tottori, Japan	6.61	138.76
Bin2	W4	TRJ000	Loma Prieta	6.93	155.11
	W5	ABN000	Kobe, Japan	6.90	256.00
	W6	BOJ000	Duzce, Turkey	7.14	293.57
Bin3	W7	CG2000	Loma Prieta	6.93	270.84
	W8	YER270	Landers	7.28	353.63
	W9	JOS000	Landers	7.28	379.32
	W10	LO9000	Northridge-01	6.69	670.84
	W11	SGI270	Loma Prieta	6.93	621.20
	W12	WON95	Northridge-01	6.69	1222.52

3.3 地震响应结果分析

3.3.1 地震作用下双向刚度变化分析

表3给出了12条地震波在各工况下的双向最大刚度衰减率。从表中可看出其双向的刚度衰减率与输入地震动均成正比关系。此外,在同一地震峰值输入下,竖向刚度的衰减率相较水平向要略大一些。尤其值得注意的是,在超设计基准地震下,不仅有3条波造成了结构的破坏,而且此时竖向的刚度衰减率要远大于水平向,竖向刚度的变化要更为敏感。对比三种不同剪切波速地震动输入下的刚度衰减率,由此可分析得出剪切波速的差异性对隔震结构刚度衰减率的影响甚大。剪切波速越小,双向刚度减小率就越显著,如W2波作用下水平刚度衰减率在4%~84%,而W8作用下水平刚度衰减率范围仅在5%~11%间波动。出

表3 考虑支座耦合特性模型刚度减小率

Tab. 3 The decrease percentage of stiffness of coupled mechanic model

地震波	方向	地震动输入				
		0.3g	0.4g	0.5g	0.6g	0.9g
W1	X	3.0%	3.0%	7.0%	9.0%	23%
	Z	10%	14%	23%	34%	67%
W2	X	4.0%	9.0%	16%	84%	破坏
	Z	32%	43%	55%	84%	破坏
W3	X	5.4%	7.0%	12%	13%	40%
	Z	18%	23%	28%	37%	67%
W4	X	4.4%	6.0%	7.0%	10%	28%
	Z	29%	38%	44%	50%	68%
W5	X	6.0%	6.0%	7.0%	10%	12%
	Z	6.0%	9.0%	14%	20%	40%
W6	X	5.0%	5.0%	4.0%	6.0%	9.0%
	Z	4.0%	5.0%	8.0%	13%	29%
W7	X	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	9.0%
	Z	12%	13%	14%	16%	22%
W8	X	5.0%	6.0%	7.0%	11%	破坏
	Z	21%	28%	37%	47%	破坏
W9	X	3.0%	3.0%	4.0%	5.0%	10%
	Z	11%	14%	17%	21%	32%
W10	X	6.0%	6.0%	8.0%	7.0%	7.0%
	Z	3.0%	3.0%	5.0%	6.0%	10%
W11	X	7.0%	11%	11%	18%	破坏
	Z	15%	25%	41%	57%	破坏
W12	X	7.0%	8.0%	8.0%	9.0%	13%
	Z	6.0%	9.0%	10%	11%	18%

现该现象是由于剪切波速减小时,地震动峰值加速度也相应减小,加速度反应谱的长周期右移,而长周期部分幅值普遍增大,那么对于隔震结构来说自然更为不利,这一结论也与陈龙伟等的研究内容相符合。

图9给出了超设计基准地震下三条不同剪切波速地震波的水平屈服后刚度和竖向受压刚度的时程图。

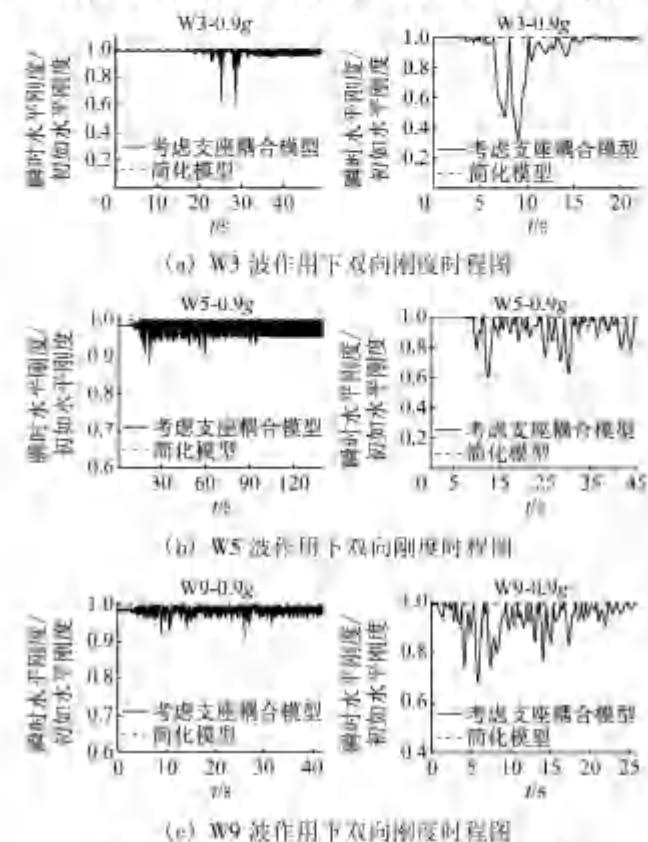


图9 不同剪切波速波作用下双向刚度时程图

Fig. 9 The time history of stiffness in horizontal and vertical direction under waves with different shear wave velocity

3.3.2 隔震层位移对比分析

图10是各工况下最大层间位移增加量。从图中可以看出,三类地震波有一个共同的趋势:即在0.6g~0.9g(超设计基准地震下)层间位移增大量均出现突变,该现象会造成隔震层发生突然的脆性破坏最终导致严重的后果;而在0.3g~0.6g间,对于软土地基的地震波的位移增大量随着输入加速度峰值的增加趋势明显,最大层间位移增加量在W2波作用下达到373mm,中硬土地基的地震波作用下最大层间位移增加量为52mm,基岩场地的地震波作用下该值为55mm。

3.3.3 隔震层加速度对比分析

表4给出了考虑耦合模型与原模型加速度峰值偏差率,其结果显示:(1)考虑支座耦合模型得出的加速度较原模型并未呈现稳定变化的趋势,在不同波作用下,不同工况下,偏差率在正负之间波动,由此可见,考虑支座耦合模型会放大上部结构加速度响应,对核电隔震结构是极其不利的;(2)虽然考虑支座耦合模型与原

模型的加速度响应有偏差, 但总体偏差率较小, W2 波在 0.6g 工况下为 -11%, W11 波在 0.6g 工况下则仅为 6%。这是由于瞬时刚度变化对核电隔震结构整体

产生的效应并不大, 因此加速度偏差率不规律且影响不大。

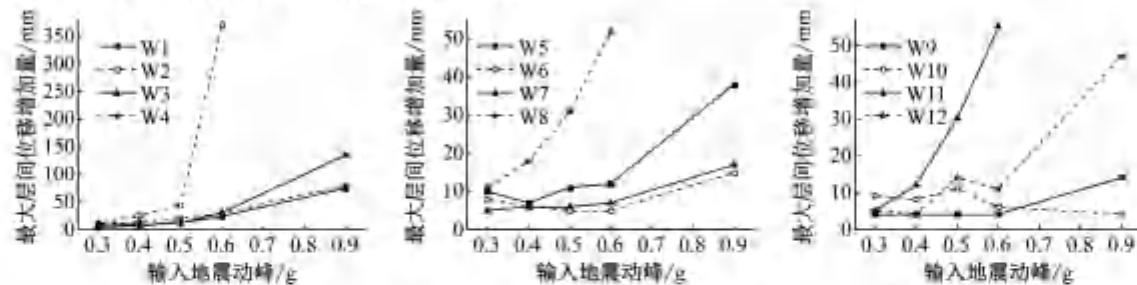


图 10 各工况下最大层间位移增加量

Fig. 10 The maximum increase of displacement under each condition

表 4 考虑耦合模型与原模型加速度峰值偏差率

Tab. 4 The deviation rate of acceleration between coupled mechanic model and simplified model

地震波	0.3g		0.4g		0.5g		0.6g		0.9g			
	考虑耦合模型/(m·s⁻²)	原模型/(m·s⁻²)	偏差率/%									
W1	0.72	0.72	0	0.83	0.83	0	0.94	0.94	0	1.09	1.07	2
W2	1.11	1.11	0	1.41	1.39	1	1.74	1.76	-1	1.95	2.18	-11
W3	0.75	0.75	0	0.85	0.85	0	1.02	1.00	2	1.27	1.23	3
W4	0.97	0.98	-1	1.13	1.15	-2	1.25	1.30	-4	1.37	1.44	-5
W5	0.59	0.59	0	0.71	0.70	1	0.80	0.81	-1	0.89	0.88	1
W6	0.53	0.53	0	0.56	0.57	-2	0.61	0.61	0	0.67	0.67	0
W7	0.61	0.62	-2	0.63	0.64	-2	0.66	0.67	-1	0.73	0.73	0
W8	0.80	0.80	0	1.14	1.11	3	1.55	1.49	4	1.96	1.88	4
W9	0.65	0.65	0	0.74	0.74	0	0.82	0.82	0	0.91	0.91	0
W10	0.43	0.45	-4	0.45	0.44	2	0.47	0.46	2	0.50	0.49	2
W11	0.69	0.69	0	0.88	0.86	2	1.25	1.18	6	1.70	1.61	-6
W12	0.52	0.52	0	0.58	0.58	0	0.64	0.64	0	0.69	0.69	0

注: 偏差率(%) = (考虑耦合模型 - 原模型) / 原模型 * 100%; “-”表示考虑耦合后峰值加速度减小, “+”表示考虑耦合后峰值加速度增大。

4 结论

本文采用了考虑压应力和水平变形影响的橡胶隔震支座耦合力学模型, 分析对比压应力及剪应变耦合理论力学模型与静力试验结果, 并对 AP1000 核电厂隔震结构进行隔震支座耦合力学模型地震响应分析, 主要结论如下:

(1) 对 RB 及 LRB 支座进行压应力及剪应变耦合力学性能试验, 结果得到支座水平刚度和竖向刚度 LRB 最大衰减率分别为 33%、96%, RB 支座最大衰减率分别为 66%、57%。通过支座力学性能耦合理论值

与试验值的对比表明两种结果一致。

(2) 建立了 AP1000 核电结构进行单质点双自由度模型并进行数值模拟分析, 结果显示 AP1000 双向的刚度衰减率与输入地震动均成正比关系。同一地震动输入下 AP1000 竖向刚度衰减率要大于水平刚度衰减率, 尤其是随着输入地震动峰值增大, 该差异性更为明显。剪切波速的变化对隔震结构刚度衰减率的影响甚大, 剪切波速越小, 双向刚度减小率就越显著。

(3) 考虑隔震支座耦合作用对核电结构的水平位移影响显著。剪切波速越小, 其最大层间位移增量会随着输入地震动增加呈现明显上升趋势, 随着剪切

波速增大,由于双向刚度变化对于水平位移产生的影响也会对应减小。

(4) 对于 API000 核电结构的加速度响应,考虑支座耦合特性的模型对上部结构产生的加速度响应并未呈现规律变化,有放大效应也有减小的效果。但根据数值结果,其放大效应并不明显,因为瞬时刚度的变化对于加速度响应影响不大;对于普通隔震结构来说该差别可忽略,但对于核电隔震结构尤其在超设计基准地震下的影响不可忽略。

参 考 文 献

- [1] 沈聚敏,周锡元,高小旺,等.抗震工程学[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [2] 薛初立,张永山,汪大洋. API000 桥岛结构基础隔震设计与参数影响分析[J]. 核动力工程,2016,37(6):45-49.
ZHUANG Chuli, ZHANG Yongshan, WANG Dayang. Seismic isolation design and parameter effect analysis of API000 nuclear island structure [J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(6):45-49.
- [3] 谢礼立,崔长海. 核电工程应用隔震技术的可行性探讨[J]. 地震工程与工程振动,2012,32(1):1-10.
XIE Lili, ZHAI Changhai. A Prospective study on applicability of base isolation in nuclear power plants [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(1):1-10.
- [4] 李忠诚,张涛,许波涛. 基底隔震技术用于核电厂厂房的问卷研究[J]. 核动力工程,2014,35(4):21-26.
LI Zhongcheng, ZHANG Tao, XU Batuo. Application survey and prospect of base-seismic isolation technology for nuclear power plants [J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(4):21-26.
- [5] KUMAR M, WHITTAKER A, CONSTANTINOU M. An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings [J]. Earthquake Eng Struct Dyn, 2014, 43(13):4955-4974.
- [6] KUMAR M. Seismic isolation of nuclear power plants using elastomeric bearings [D]. New York: The State University of New York, 2015.
- [7] WARD G, WHITTAKER A. A study of the coupled horizontal-vertical behavior of elastomeric and lead-rubber seismic isolation bearings [M]. New York: Earthquake Resistant Design, 2006.
- [8] VEMURU V S M, NAGARAJAIAH S, MOSQUEDA G. Coupled horizontal-vertical stability of bearings under dynamic loading [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45(6):913-934.
- [9] KUMAR M, WHITTAKER A S, CONSTANTINOU M C. Response of base-isolated nuclear structures to extreme earthquake shaking [J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 295:860-874.
- [10] 陈焱,张文会,朱爱东,等.不同层隔震结构在近断层地震作用下动力响应分析[J].振动与冲击,2016,35(5):120-124.
HAN Yuan, ZHANG Wenhai, ZHU Aidong. Dynamic response analysis for multi-story structures with different isolation stories under near-fault ground motions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(5):120-124.
- [11] KWOK A O L, STEWART J P, HASHASH Y M A. Nonlinear ground-response analysis of Turkey flat shallow stiff-soil site to strong ground motion [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(1):331-343.
- [12] 陈龙伟,徐欢荣,袁晓明.浅硬场地剪切波速不确定性对场地地震反应的影响[J].地震工程与工程振动,2014,34(4):123-129.
CHEN Longwei, XU Huanrong, YUAN Xiaoming. Influence of shear-wave velocity uncertainty on seismic site response analysis for a shallow stiff site [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(4):123-129.
- [13] 李平,薄景山,孙有为.剪切波速差异性对地震反应的影响[J].世界地震工程,2010,26:133-137.
LI Ping, BO Jingshan, SUN Youwei. Shear wave velocity diversity influence on the seismic response [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26:133-137.
- [14] 曹均峰,冯伟伟,孟凡月,等.剪切波速对场地地表地震动参数的影响[J].震防技术,2013,8(3):252-260.
CAO Junfeng, FENG Weidong, MENG Fanwei, et al. Effect of shear wave velocity on the ground motion parameters of site surface [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2013,8(3):252-260.
- [15] 日本建筑协会著.隔震结构设计[M],刘文光,译.北京:地震出版社,2006.
- [16] 沈朝勇,崔杰,马玉宏.超低硬度隔震橡胶支座的竖向力学性能研究[J].地震工程与工程振动,2012,32(5):137-145.
SHEN Chaoyong, CUI Jie, MA Yuhong. Vertical mechanical property of elastomeric isolators with ultra-low hardness [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(5):137-145.
- [17] 孙汉虹.第三代核电技术 API000 [M].北京:中国电力出版社,2010.
- [18] 核电厂抗震设计规范:GB 50267—97 [S].北京:中国计划出版社,2001.