

快堆堆芯水平抗震分析的单组件初步分析

文 静¹, 陆道纲²

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要:快堆堆芯抗震分析是堆芯设计的重要组成部分, 它将为堆芯在地震作用下的结构完整性评价和堆芯反应性变化分析提供必要的数据库, 同时为控制棒的可插入性评价提供参考。本文采用有限元程序 FINAS, 以中国实验快堆为例, 对快堆堆芯水平抗震的计算方法和模型进行研究, 进行了单组件初步分析, 其中包括模态分析、自由振动分析和与刚性墙壁的碰撞分析, 为堆芯多组件水平抗震分析作好了准备。

关键词:中国实验快堆; 堆芯; 抗震分析; FINAS 程序

中图分类号: TL425

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2007)02-0148-05

Single Assembly Preliminary Analysis for Horizontal Seismic Analysis on Fast Breeder Reactor Core

WEN Jing¹, LU Dao-gang²

(1. *China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-95, Beijing 102413, China;*

2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Seismic analysis is one of important parts of fast breeder reactor (FBR) core design. It is necessary for structural integrity assessment and analysis of variation of reactivity under the earthquake. Moreover some important data for qualification of the scram capability of the control rods during the earthquake could be provided. In the paper, FINAS, one finite element code developed by Japanese engineers, was used. The calculation model and method were studied on single assembly in China Experimental Fast Reactor (CEFR), as an example. Some preliminary analyses were carried out, which prepare for the seismic analysis on multiple assemblies in FBR core.

Key words: China Experimental Fast Reactor; core; seismic analysis; FINAS code

快堆堆芯组件的抗震安全评价是堆芯设计的重要组成部分, 也是反应堆取得装料许可证的必要条件之一。通过堆芯抗震分析, 可获取地震作用下的堆芯组件变形、组件间的碰撞力、组件的内力等, 为地震作用下堆芯的结构完整

性评价和堆芯反应性变化分析提供必要数据, 同时为控制棒的可插入性评价提供参考。

国内针对压水堆堆芯抗震分析与试验较多^[1], 但快堆堆芯抗震分析在国内尚属首次。本文采用日本有限元程序 FINAS 进行分析。

该程序经过了程序对程序和程序对试验的严格验证,在日本很早已完全商业化,在日本的理工科大学和很多研究院,特别是核研究与工程领域得到了广泛的应用,在日本实验快堆“JOYO”和原型快堆“MONJU”的设计与建造过程中,包括堆芯抗震等,多次应用该程序完成了各种复杂的分析,得到了普遍的认可^[2]。本工作以中国实验快堆(CEFR)为例,对快堆堆芯水平抗震的计算方法和模型进行研究,完成单组件的初步分析,为多组件水平抗震分析作准备。

1 CEFR 堆芯组件结构简介

CEFR 堆芯由初始装料状态经多次换料后达到平衡态,处于平衡态时的组件分布示于图 1。堆芯布置 712 根组件,包括燃料组件(FA)、乏燃料组件(SFA)、中子源组件(NS)、钢屏蔽组件(SS)、硼屏蔽组件(BS)、控制棒 CR(安全棒、调节棒、补偿棒)组件等 6 大类。同一大类组件分为几小类。堆芯总体结构基本沿东西方向轴线对称。所有组件浸没在液钠中。堆芯组件的最外侧布置有围板和围筒。

堆芯所有组件外形尺寸均相同,主体部分呈正六边形,对边距 59mm,组件排列为蜂窝

状,中心距 61 mm。所有组件的管脚插放在栅板联箱的同一高度的插孔内,头部为自由端,上部由位于组件侧面的定位块(Top Pad)径向定位,整个组件重量由下部球座支撑承受,管脚下部插在管座中。为防止燃料组件因温度升高而向堆芯中心弯曲,在燃料组件上转换区的上部,即靠近组件的中部高度,另加有定位块(Middle Pad)。各组件间、组件与围筒间以及组件下部管脚与管座间皆留有一定间隙。

地震情况下,堆芯组件管脚与管座间、上部和中部凸台高度处组件间及堆芯最外侧组件与围板间均存在间隙,导致了边界条件的高度非线性;液钠与组件间存在流固耦合作用。这些给堆芯抗震分析带来极大困难。

2 单组件梁模型简化与模态分析

所有组件的长细比皆大于 40。在地震作用下,各组件主要表现出梁的特性,剪切变形可忽略,同时不考虑组件绕自身轴的扭转。根据质量和刚度等效的原则,采用密度折算和长度加权的办法将单根组件简化为有限个变截面面积 A 和有限个变弯曲惯量 I 的梁。

单根组件在空气中简化后的梁特性参数列于表 1。表中 L 为长度, A_e 为等效面积, I_e 为等效弯曲惯量,单位分别为 mm、 mm^2 、 mm^4 。

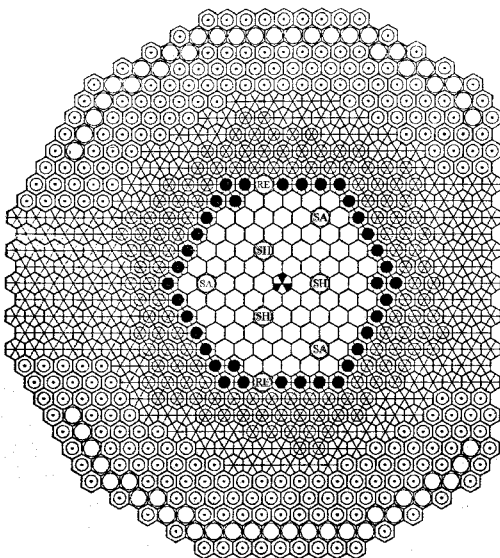


图 1 CEFR 堆芯组件布置图

Fig. 1 Layout of assemblies in CEFR core

图例	说明	数量
	燃料组件	81
	乏燃料组件	56
	2型钢屏蔽组件	37
	3型钢屏蔽组件	132
	4型钢屏蔽组件	167
	硼屏蔽组件	230
	安全棒组件	3
	调节棒组件	2
	补偿棒组件	3
	中子源组件	1

在单根组件简化的基础上进行模态分析。模态分析需要完成2个目标:确定模拟单根组件的最小单元数量和为单根组件的自由振动分析和与刚性墙壁的碰撞分析提供特征向量。

采用SBEAM2单元模拟单根组件。为减小多组件分析的工作量和计算时间,同时保证计算精度,需确定模拟单根组件的最少单元数

量。忽略组件下部的管脚与管座之间的间隙,采用不同数量单元模拟,以燃料组件为例完成了模态分析,同时采用ANSYS程序进行了对比,计算结果列于表2。表2中列出了前4阶频率的计算结果。可看出,采用14个单元模拟单根组件已具有足够的精度。在后面的分析中,全部采用14个单元模拟单根组件。

表1 各类组件简化后的梁特性参数

Table 1 Character parameters of varied simplified assemblies

FA			CR			SS12 ¹⁾			SS34 ²⁾			NS		
<i>L</i>	<i>A_e</i>	<i>I_e</i>	<i>L</i>	<i>A_e</i>	<i>I_e</i>	<i>L</i>	<i>A_e</i>	<i>I_e</i>	<i>L</i>	<i>A_e</i>	<i>I_e</i>	<i>L</i>	<i>A_e</i>	<i>I_e</i>
300	463.4	53 866	300	788.2	64 115	300	788.2	64 115	300	788.2	64 115	300	788.2	64 115
97	380.7	137 572	55	1 873.1	451 268	46	1 873.1	111 535	46	1 873.1	111 535	46	1 873.1	111 535
963	1 569.2	111 535	615	2 369.3	111 535	440	2 364.0	111 535	440	2 364.0	111 535	440	2 364.0	111 535
387	1 569.2	111 535	28	240.3	111 535	52	1 390.6	111 535	52	1 390.6	111 535	52	1 390.6	111 535
53	1 440.7	393 735	44	860.0	111 535	522	2 439.4	111 535	522	2 580.8	111 535	522	2 320.3	111 535
484	2 228.5	578 929	318	1 249.9	111 535	373	2 439.4	111 535	373	2 580.8	111 535	373	2 320.3	111 535
226	531.8	72 080	276	1 249.9	111 535	486	2 530.5	111 535	486	2 530.5	111 535	486	25 305	111 535
			230	805.6	111 535	65	1 059.1	217 637	65	1 059.1	217 637	65	1 059.1	217 637
			418	962.4	341 423	109	738.3	206 163	109	738.3	206 163	214	561.2	88 761
			214	561.2	88 761	117	509.7	41 019	117	509.7	41 019			

注:1) SS1 和 SS2 具有完全相同的截面面积和弯曲惯量参数,采用 SS12 同时代表 SS1 和 SS2,下同

2) SS3 和 SS4 具有完全相同的截面面积和弯曲惯量参数,采用 SS34 同时代表 SS3 和 SS4,下同

表2 采用不同数量单元计算得到的燃料组件频率

Table 2 Eigen frequencies of FA for varied number of elements

单元数量	燃料组件频率/Hz				相对偏差/%	程序
	第1阶	第2阶	第3阶	第4阶		
350	3.919 1	27.853	86.563	184.64	0	ANSYS
62	3.918 4	27.837	86.476	184.70	-0.018	ANSYS
38	3.917 4	27.847	86.538	184.84	-0.043	ANSYS
14	3.902 4	27.796	85.675	188.75	-0.430	ANSYS
14	3.918 9	27.838	86.541	185.17	-0.005	FINAS

3 液钠影响的模拟

地震作用下液钠对组件的影响采用虚拟附加质量法。液体附加质量包括:1) 组件内部腔体内所容纳的液钠质量;2) 组件外部结构所排开液钠的总体积所对应的液钠质量。将附加质量根据密度折算增加梁的横截面面积,同时保持弯曲惯量不变。考虑液钠影响后的各类组件的特征频率列于表3。与空气中计算结果比较,组件的特征频率降低了5%~8%,这与国际上的试验结果(4%~10%)吻合得较好^[3]。

表3 各类组件在液钠中的特征频率

Table 3 Eigen frequencies of assemblies in sodium

组件类别	特征频率/Hz			
	第1阶	第2阶	第3阶	第4阶
FA	3.62	25.42	78.93	168.94
CR	4.66	27.07	75.26	160.50
SS12	3.41	21.83	61.53	119.63
SS34	3.39	21.50	60.87	118.67
NS	3.47	22.38	62.75	121.34

4 间隙的模拟与自由振动分析

所有组件的下部管脚与管座之间均存在一定间隙,在多组件抗震分析中完全采用真实的间隙单元模拟较为困难,工作量和计算量巨大。为减少工作量和计算量,根据组件整体动态特性主要是第一阶特征频率等效的原则,将下部间隙采用一等效弹簧模拟^[4]。计算方法为单根组件自由振动分析。

带弹簧-间隙元和等效弹簧的振动分析模型示于图2。根据第2节中模态分析得到的特征向量施加初始平动和转动位移,然后释放,让组件进行自由振动。组件头部位移随时间变化曲线示于图3。从图3可知组件的第1阶特征频率。调整代替真实间隙的弹簧的刚度,当2种不同模型的第1阶特征频率相等时,所对应的弹簧的刚度即为等效弹簧刚度。在液钠中,各组件下部管脚与管座之间间隙的等效弹簧刚度列于表4。

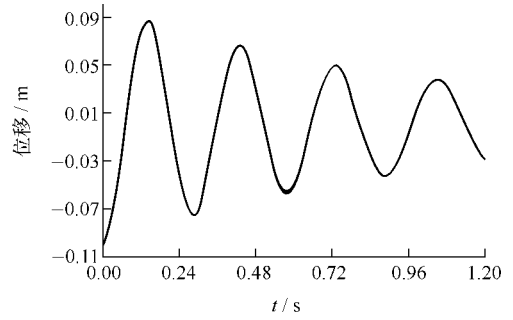


图3 燃料组件头部顶端位移-时间曲线

Fig. 3 Time history of displacement at top end of FA

法为直接时间积分法中的Newmark-β方法。时间步长是关键参数。

计算得到的组件上部凸台(垫块)处的位移随时间变化的曲线示于图5。组件与墙壁的碰撞力随时间变化曲线示于图6。采用不同的时间步长可得不同的结果(表5)。一般对于非线性分析,15%以内的计算误差在工程中属于可接受范围。从表5可看出,采用不大于0.05 ms的时间步长进行分析是可以接受的。

表4 液钠中各组件管脚与管座间隙的等效弹簧刚度
Table 4 Equivalent stiffness of spring to simulate gap between spike of assembly and diagrid

组件类别	间隙/mm	等效刚度/(N·m ⁻¹)
FA	1.5	8.8×10 ⁵
CR	1.5	7.0×10 ⁵
SS12	1.5	8.0×10 ⁵
SS3	1.5	8.0×10 ⁵
SS4	0.5	3.3×10 ⁶
NS	1.5	7.5×10 ⁵

表5 不同时间步长的计算结果比较

Table 5 Comparison of results for varied time increments

时间步长/s	碰撞力/N	误差/%
1.0×10 ⁻⁶	1.430 22×10 ⁴	0
1.0×10 ⁻⁵	1.450 69×10 ⁴	1.43
2.0×10 ⁻⁵	1.473 51×10 ⁴	3.03
5.0×10 ⁻⁵	1.544 93×10 ⁴	8.02
1×10 ⁻⁴	1.673 79×10 ⁴	17.03
2×10 ⁻⁴	1.890 37×10 ⁴	32.17
1×10 ⁻³	结果不收敛	

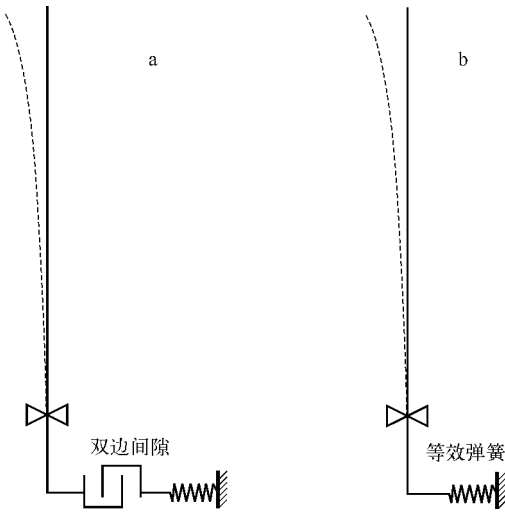


图2 带间隙(a)和带等效弹簧(b)模型

Fig. 2 Model with gap(a) and equivalent spring(b)

5 单组件与刚性墙壁的碰撞分析

进行单根组件与刚性墙壁的碰撞分析的主要目标是为多组件抗震分析确定合适的时间步长。计算模型示于图4。管脚与管座间的间隙采用等效弹簧模拟,在组件上部凸台高度处与刚性墙壁的碰撞采用弹簧-间隙元(PAIR NODES)模拟,与图3类似给组件施加初始位移后自由释放。计算模型中采用 Rayleigh 结构阻尼,阻尼取值为临界阻尼的2%。计算方

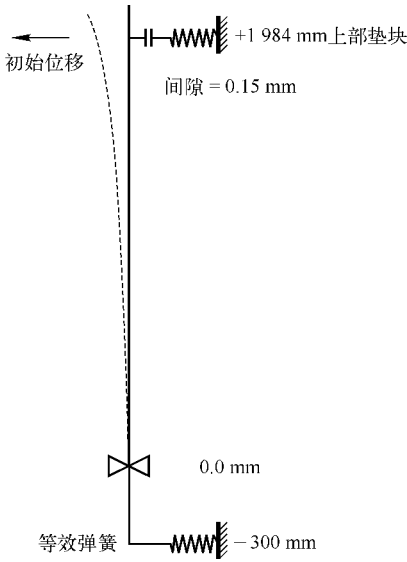


图4 燃料组件与刚性墙壁碰撞分析模型

Fig. 4 Shock analysis model of FA against rigid wall

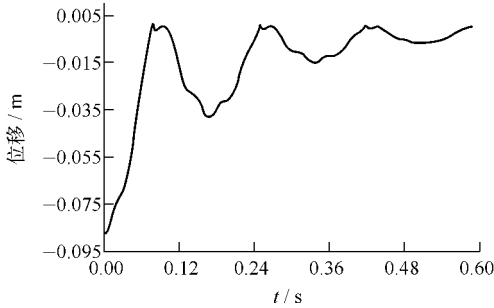


图5 组件上部凸台高度处位移-时间曲线

Fig. 5 Time history of displacement at top pad of FA

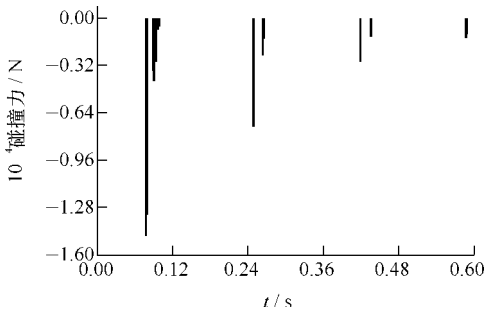


图6 碰撞力-时间曲线

Fig. 6 Time history of shock force

6 结论

以 CEFR 为例,采用日本有限元程序 FINAS,对快堆堆芯水平抗震分析的计算模型和方法进行研究,完成了 CEFR 堆芯单组件的模态分析、自由振动分析及单组件与刚性墙壁的碰撞分析,为堆芯多组件抗震分析奠定了基础。

参考文献:

- [1] 杜修力,陈厚群. 核电厂堆芯燃料组件地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(2): 57-60.
- DU Xiuli, CHEN Houqun. Seismic response analysis of the fuel assemblies in the nuclear power plant core [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(2): 57-60 (in Chinese).
- [2] MORISHITA M, RINEJSKI A, FONTAINE B, et al. Main features and results of the IAEA co-ordinated research program on intercomparison of LMFR seismic analysis codes[R]. Lyon: SMiRT, 1997.
- [3] ASAYAMA T. Analysis of symphony experiment, Vol 1, Eigen value and free vibration analysis, DMT/97/431[R]. [S.l.]: JNC, 1997.
- [4] ASAYAMA T. Analysis of symphony experiment, Vol 2, Preliminary analysis, DMT/97/544[R]. [S.l.]: JNC, 1997.