

文章编号: 0258-0926(2016)S2-0070-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S2.0070

CAP1400 控制棒驱动线抗震试验研究

李琦¹, 李朋洲¹, 李锡华¹, 孙磊¹, 杜建勇¹, 李天勇¹, 谢永诚²

1. 中国核动力研究设计院, 成都, 610213; 2. 上海核工程研究设计院, 上海, 200233

摘要: 在多点激励试验装置上, 对大型先进压水堆 CAP1400 控制棒驱动线进行抗震试验研究。试验中采用多频波法在控制棒驱动线 2 个方向同时地震激励, 得到了控制棒驱动线在低水平地震 (LLSE) 和安全停堆地震 (SSE) 下的应变值和加速度值。试验结果表明, CAP1400 控制棒驱动线在地震载荷作用下能够保持其结构完整性和功能完好性。

关键词: CAP1400; 抗震试验; 控制棒驱动线

中图分类号: TL351+.5 **文献标志码:** A

Study on Seismic Test of CAP1400 Control Rod Drive Line

Li Qi¹, Li Pengzhou¹, Li Xihua¹, Sun Lei¹, Du Jianyong¹, Li Tianyong, Xie Yongcheng²

1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China;

2. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai, 200233, China

Abstract: The seismic test of CAP1400 control rod drive line was conducted on the multiple point excitation test device. The horizontal direction and vertical direction of the CRDL were excited with multi-frequency earthquake time history at the same time. The strain values and acceleration of test piece under LLSE and SSE level were measured. The seismic test shows that CAP1400 CRDL can keep the structural integrity and operability under the seismic condition.

Key words: CAP1400, Seismic test, Control rod drive line

0 引言

CAP1400 是在先进非能动型压水堆 (AP1000) 基础上消化、吸收、开发的具有我国自主知识产权、功率更大的大型先进压水堆。作为核电厂反应堆中唯一的有活动部件的设备, 控制棒驱动线在地震条件安全功能的可靠性, 将直接关系到核电厂的安全性和经济性。为了验证 CAP1400 控制棒驱动机构 (CRDM) 在地震条件下能否快速落棒, 需要对设备进行抗震鉴定试验。

1 控制棒驱动线结构

CRDM 是反应堆的重要动作部件, 通过其动作来带动组件在堆芯内的上下移动。CRDM 的安全功能主要有 2 方面: 保持其作为反应堆冷却剂系统承压边界的结构完整性; 保持事故工况

下快速释棒插入堆芯使反应堆实现安全停堆的可运行性。落棒时间是其安全分析评价的一个重要依据参数。

控制棒驱动线由多个细长柔性部件组成, 对地震比较敏感。由于存在间隙、碰撞、摩擦等非线性因素, 通过数学模型分析计算难以合理可信地证实其在地震作用下的可运行性。当分析不能够合理可信地证实抗震 I 类设备的完整性和可运行性时, 必须用试验法进行鉴定。因此, 对 CAP1400 控制棒驱动线采用竖井式多点激振抗震试验装置进行抗震鉴定试验。

2 试验方法

2.1 试验样机

CAP1400 控制棒驱动线抗震试验的试验件

主要包括：CRDM、导向筒组件（CRGT）、模拟燃料组件（Replica FA）、黑控制棒组件（RCCA）和棒位探测器（DRPI）。试验采用全尺寸的 CAP1400 控制棒驱动线样机作为试验对象，燃料组件采用模拟件（内部采用乏燃料芯块），其他部件均采用工程样机。

2.2 地震激励方法

反应堆与控制棒驱动线有多处关联，地面的地震运动通过各个关联点传递给控制棒驱动线。因各个关联点楼层高度不同，地震响应也各异。本项目的地震激励点选择为压力容器顶盖、堆芯上板、堆芯下板、上部支撑板。为了使模拟地震更加真实，采用水平激励的和竖向激励同时进行。

2.3 CRDM 边界条件模拟

试验前利用 ANSYS 程序对 CAP1400 控制棒驱动线模拟支承结构进行了仿真分析，目的是为了对模拟支承装置的可行性进行验证，并确定各部件的几何尺寸，同时也保证了模拟支承结构的刚度和强度。

在 CRDM 顶部设计了动态限位结构，该点的输入为反应堆 CRDM 顶部支承处的位移时程。采用这一技术后，边界条件模拟更加真实，在保证驱动机构在可能发生的最大范围内保持自由状态的前提下，驱动机构管座根部应力也得到了有效减小。

2.4 试验内容

2.4.1 动态特性探查试验 在 CAP1400 控制棒驱动线安装于竖井装置后，在抗震试验前后均进行了控制棒驱动线水平方向的动态特性探查试验，对控制棒驱动线在安装状态下的基阶固有频率进行探查。

2.4.2 试验工况 地震试验包括 5 次低水平地震（LLSE）试验和 1 次安全停堆地震（SSE）试验。地震试验载荷为各个激励点的绝对位移时程，并采用多频波法进行。LLSE 地震载荷取 SSE 地震载荷的一半。

试验中的测量参数主要包括应变信号、加速度信号、位移信号和落棒信号。

3 试验结果

3.1 动态特性探查试验

采用在驱动线结构的水平向输入加速度幅值不大于 0.2 g 的随机波方法，得到了控制棒驱动线

驱动机构、上部导向筒、下部导向筒、模拟燃料组件 4 个部件的传递函数和动态特性数据，结果表明，各部件的基阶固有频率在抗震试验前后略有变化。

3.2 地震试验

3.2.1 地震激励模拟 图 1 为 SSE 试验中 5 个激励点的响应位移与要求位移曲线比较，其中通道 1~通道 5 位移依次为压力容器顶盖处水平向位移、上部支撑板处水平向位移、堆芯上板处水平向位移、堆芯下板处水平向位移、堆芯下板处垂向位移，可以看到各个激励点很好地模拟了地震要求载荷。图 2 为 SSE 试验中某激励点加速度响应谱（TRS）对输入加速度反应谱（RRS）的包络情况。TRS 为试验中激励点实际测得加速度时程计算的加速度反应谱，RRS 为激励点原始加速度时程计算的加速度反应谱。由图 2 可知，LLSE

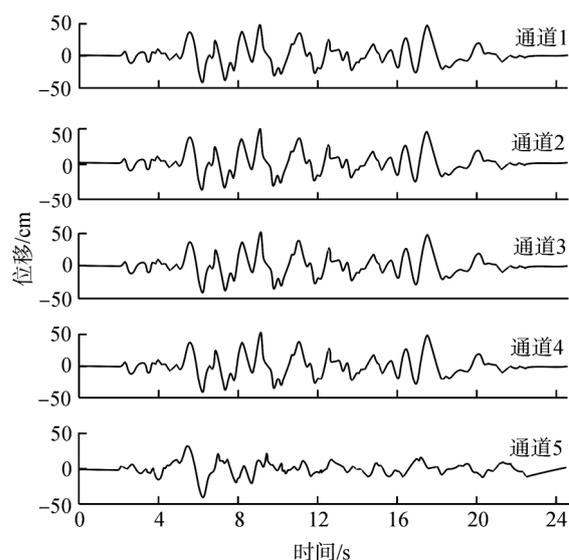


图 1 激励点位移曲线比较

Fig. 1 Comparison of Input and Response Displacements

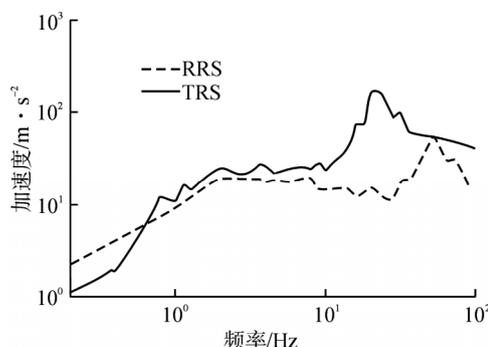


图 2 激励点加速度反应谱曲线比较

Fig. 2 Comparison of TRS and RRS

试验中,激励点加速度响应谱能够包络输入加速度反应谱。

3.2.2 功能测试

(1) 正常运行功能:在 LLSE 工况下,进行了控制棒驱动线的提升、下插、保持和落棒等运行性能测试。结果表明,控制棒驱动线能正常进行提升、下插,控制棒上下运动正常,且能够在设定位置保持。

(2) 安全停堆功能:在 SSE 工况下,进行了控制棒驱动线的落棒功能测试,结果表明,控制棒能够实现落棒功能。

3.2.3 加速度和应变响应 CRDM 顶部最大加速度达到 $67.11g$ ($g=9.81 \text{ m/s}^2$)。在试验过程中,磁轭线圈部件和 CRDM 顶部加速度信号明显有碰撞信号,判断磁轭线圈部件与 CRDM 顶部存在碰撞和电磁干扰。

试验中 CRDM 与压力容器顶盖模拟支撑连接处根部最大应变达到了 1017.02×10^{-6} 。

3.2.4 结构检查 抗震试验完成后,对试验件进行了检查,各试验部件没有发现明显的变形损伤,结构保持完整。

4 结论及展望

利用多点激励竖井试验装置,模拟了

CAP1400 控制棒驱动线在实堆的边界条件,对 CAP1400 控制棒驱动线足尺样机进行了 5 次 LLSE 和 1 次 SSE 地震试验,获得了 CRDM 的落棒时间、关键点的应变和加速度等数据,同时验证了 CAP1400 控制棒驱动线在地震工况下结构的完整性和功能完好性。

控制棒驱动线抗震试验作为控制棒驱动线抗震性能检验的关键性试验,对于确定驱动线的设计方案和提高抗震性能起着至关重要的作用。在福岛事故以后,关于控制棒驱动线在超基准地震下的安全性能评价成为一个亟待解决的重要问题。通过多次控制棒驱动线的抗震鉴定试验,发现以绝对位移作为控制信号的双向多点激励方法代表了这一技术目前的较高水平。

参考文献:

- [1] 国家核安全局. 核设备抗震鉴定试验指南:HAF J0053 [S]. 北京:国家科委核安全中心,1995.
- [2] 国家核安全局. 核电厂的抗震设计与鉴定:HAD102/02 [S]. 北京:中国法制出版社,1996.
- [3] 张之华,钱达志,张征明,等. 磁悬浮控制棒驱动线抗震试验研究[J]. 核动力工程,2012,33(2):37-41.

(责任编辑:马蓉)