

2.4 乏燃料贮存格架抗震试验和数值分析研究

➤ 简要信息

【获奖类型】应用一等奖

【任务来源】上海核工程研究设计院

【课题起止时间】2014年1月~2015年12月

【完成单位】中国水利水电科学研究院、上海核工程研究设计院

【主要完成人】胡晓、张艳红、钱浩、高建勇、李晨、杨陈、王海波、张锴、李春雷、许亮华

➤ 背景

本项目隶属于国家科技部重大专项课题“CAP1400 核岛重大设备设计技术研究（课题编号：2011ZX06002-002）”的子课题“乏燃料贮存格架抗震和跌落非线性分析及试验验证研究”，重点在开展乏燃料贮存格架抗震试验及分析研究，通过试验来验证分析技术的准确性，为乏燃料贮存格架国产化做好技术铺垫。上海核工程研究设计院是该重大专项的科研设计总负责单位，中国水利水电科学研究院承担了乏燃料贮存格架的抗震试验和分析工作。

通过 CAP1400 乏燃料贮存格架试验件抗震试验研究，对贮存格架抗震分析模型及方法进行验证和修正。最终形成一套完整的、具有自主知识产权的燃料贮存格架抗震试验和非线性分析技术，为指导贮存格架设备设计和设计优化提供技术支撑。

➤ 主要内容

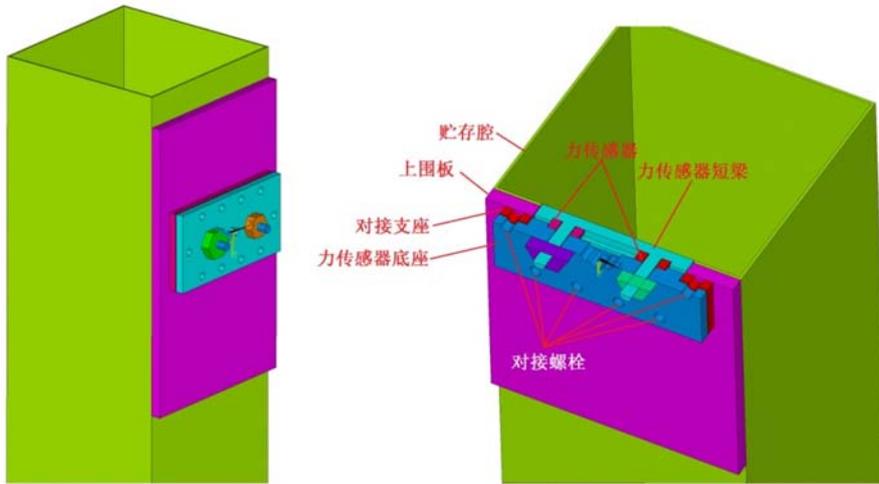
- 乏燃料贮存格架动态特性分析和刚度计算
- 乏燃料贮存格架非线性抗震分析
- 3×3型和1×9型的贮存格架试验件单腔试验，包括1组模拟/等效燃料组件在无水 and 有水两种环境的抗震试验
- 3×3型和1×9型的贮存格架试验件多腔试验，包括3组、6组和9组燃料组件在无水 and 有水两种环境的抗震试验



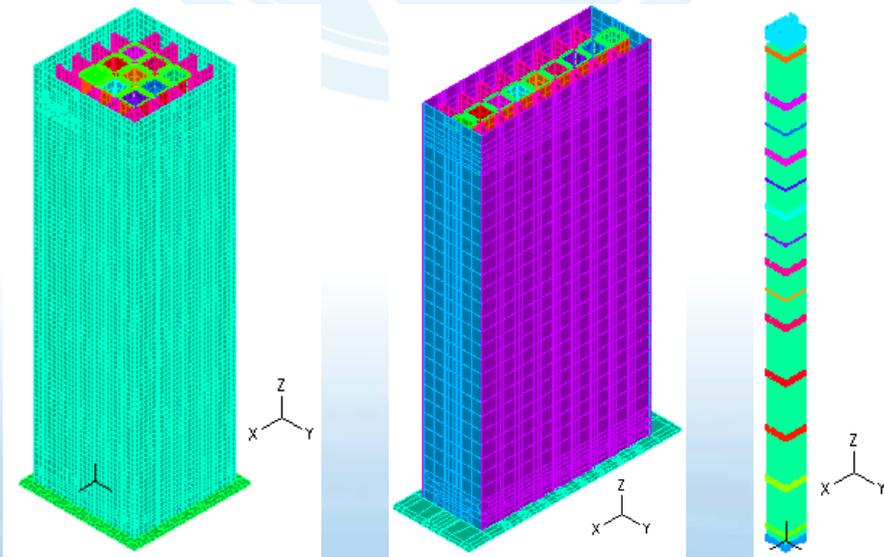
1×9 型的贮存格架试验件



3×3 型的贮存格架试验件



碰撞力测定装置



3×3、1×9 贮存格架及燃料组件有限元模型

➤ 创新点

乏燃料贮存格架为卸出堆芯的乏燃料组件提供贮存空间, 并保证对于核电站寿期内所有可能的运行或事故工况乏燃料均能满足次临界存放的要求。确保乏燃料贮存格架的安全与可靠运行对于核电厂的连续、稳定、安全运行具有重要意义。根据标准审查大纲 3.8.4 的要求, 乏燃料贮存格架在地震载荷下需保持其结构完整性。AP1000 和 CAP1400 的乏燃料贮存格架为获得更好的抗震性能, 贮存格架底部采用非螺栓连接的自由式结构, 地震载荷下具有碰撞、滑移等非线性特性。AP1000 技术转让中乏燃料贮存格架不属于技转设备, 其设计、分析均为 Holtec 专利技术, 非美国西屋公司所有, 没有技转资料, 亦未转让专用分析软件。

本研究通过自主研发, 系统掌握了具有自主知识产权的自由式乏燃料贮存格架非线性抗震分析技术, 并采用等比例贮存腔和模拟燃料组件进行抗震试验, 对分析技术进行了试验验证。

该分析技术已用于三门核电站第三代先进压水堆核电 AP1000 乏燃料贮存格架安装偏差的不符合项的工程问题解决。并应用于大型先进压水堆核电站 CAP1400 的乏燃料贮存格架的设计与改进。本技术为乏燃料贮存格架国产化和自主化做了技术支撑。乏燃料贮存格架的抗震试验采用等比例 (1:1) 的乏燃料贮存格架贮存腔和燃料芯块等效密度的模拟燃料组件, 获得了多种地震工况下的贮存格架和燃料组件碰撞载荷、加速度、应力等数据, 国内之前没有研究, 填补了国内空白。

本成果的创新点包括:

- 通过自主研发, 掌握了一套完整的、经过等比例模型试验验证的自由式燃料贮存格架整池非线性抗震分析技术。突破了国外对自由式乏贮存格架抗震时程分析技术的垄断, 并在三门 AP1000 和石岛湾 CAP1400 的乏燃料贮存格架工程问题解决和自主设计中做了工程应用, 为乏燃料贮存格架国产化、自主化做了技术支撑。
- 自由式燃料贮存格架抗震分析中, 考虑了贮存格架的碰撞、滑移、倾倒 (晃动)、扭转和流固耦合等非线性效应。
- 乏燃料贮存格架抗震分析中, 自主推导了水动力质量公式获得了水动力质量矩阵, 用以模拟流固耦合效应。通过结构动态特性分析和贮存格架

三维建模计算获得结构局部刚度，使模型更精确和符合实际。以上分析方法相对秦山和巴基斯坦 300MWe 核电站及红沿河核电站贮存格架分析和美国 Holtec AP1000 贮存格架分析有所改进，使模型更精确和符合实际。

- 研究获得乏燃料贮存格架分析用满足功率谱密度（PSD）或等同要求的时程生成实现路径和方法，满足了 HAF·J0053《核设备抗震鉴定试验指南》的要求，属国际先例。
- 通过开展乏燃料贮存格架抗震试验，掌握了乏燃料贮存格架抗震试验方法，对不同水平方向、数量的燃料组件在有水/无水工况下的地震反应影响进行了试验研究，获得了相关参数，属国内首次。对燃料组件与贮存格架贮存腔之间的碰撞载荷等非线性响应进行了验证。

➤ 推广应用情况

本课题通过对乏燃料贮存格架进行抗震试验研究，形成了一套完整的燃料贮存格架碰撞载荷测定及抗震试验技术。通过对贮存格架试验件的抗震试验，对分析方法和模型进行了验证。该试验技术具有自主知识产权，为贮存格架设备国产化提供了支撑。经试验验证的乏燃料贮存格架非线性抗震分析技术已应用于 CAP1000 和 CAP1400 等核电厂乏燃料贮存格架设计，并适用于其他二代、三代压水堆堆型中采用自由式结构的乏燃料贮存格架。同时相关技术可应用于指导设备设计改进和设计优化，保证了核电厂的长期安全运行和燃料组件贮存的安全性。