

# Discussion on the application of numerical simulation in seismic safety evaluation of major projects

Congnong Xie

China Nuclear Power Design Co., Ltd. (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong, 518000, China

## Abstract

This study focuses on seismic safety evaluation for major engineering projects, emphasizing its significance and investigating the application of numerical simulation in this field. Given the large-scale nature and high-risk characteristics of major engineering projects, which involve substantial life and property safety concerns, the complexity of geological conditions in project sites introduces significant challenges. Factors such as uncertainties in seismic wave propagation, geological structures, and geotechnical properties substantially influence seismic hazard assessment and engineering seismic design. Numerical simulation demonstrates unique advantages by incorporating complex influencing factors and effectively integrating seismic-geological information, enabling more accurate prediction of seismic hazards. Research indicates that numerical simulation provides scientific foundations for seismic design and safety protection of major engineering projects, playing a crucial role in ensuring engineering safety. The findings highlight the vital importance of this methodology in safeguarding critical infrastructure against seismic threats.

## Keywords

numerical simulation; major engineering; seismic safety evaluation; nuclear power plant; dynamic fracture simulation

## 数值模拟在核电厂地震安全性评价中应用探讨

谢从农

深圳中广核工程设计有限公司, 中国·广东 深圳 518000

## 摘要

本文关注核电厂地震安全性评价, 阐明其重要性, 探究数值模拟在此领域中的应用情况。核电厂对于安全要求的特殊性——极端事故状况下的放射性后果, 使得其对地震安全性的要求是所有工程中最高的。如核电厂址所处地质条件复杂, 地震波传递的不确定性、地质构造、岩土特性等因素对地震安全性评价及工程抗震设计影响显著, 而数值模拟能够考虑更为复杂的因素, 有效整合地震地质信息, 较为准确的预测地震危险性。研究显示, 数值模拟给核电厂抗震设计和安全防护给予科学依据, 对保障核安全意义重大。

## 关键词

数值模拟; 地震安全性评价; 核电厂; 地震地质

## 1 引言

随着经济的持续发展, 国家对清洁能源需求日益增长, 核电项目日益增多。此类工程安全极为重要, 如果被地震破坏, 造成的后果是无法接受的。而工程场地的地质构造、地层岩性、活动断层分布等地质条件, 会显著改变地震波传播特性, 可能加剧地震对工程的破坏, 也可能由于对地震风险的高估导致厂址被“人为”颠覆。由于传统地震安全性评价方法的局限性, 数值模拟技术有着独特的优点, 给解决这些问题带来了新的机会。本文想讨论数值模拟在核电厂地震安全性评价方面的应用, 探讨其如何提升评价的精确度与完整性, 为工程抗震设计提供坚实的理论支撑。

【作者简介】谢从农(1988-), 男, 中国湖北黄石人, 本科, 从事构造地质学、地震地质学研究。

## 2 核电厂地震安全性评价的重要性

### 2.1 核电厂的特点与地震风险

核电站的运行周期内, 遭受超过其设计基准的地震影响时可能会导致核泄漏, 从而对周围地区的生态环境和人民健康造成不可接受的危害。例如: 日本‘3·11’地震引发的核电安全危机虽不是直接由地震引起, 而是叠加由地震激发的海啸、人为决策失误等因素导致, 但也给核电站安全性评价提出新的挑战, 即地震链式灾害的分析与评估。

### 2.2 地震安全性评价的目标与意义

地震安全性评价是运用科学的方法和手段来评判重大工程场地在工程寿期内可能遭受的地震危险性程度, 其主要目的是判定工程场地的地震危险性, 预估地震动参数, 为后续工程结构的抗震设计, 施工以及运作提供依据。地震安全性评价的精准性可以有效地削减工程在地震中的风险, 保证

人民的生命财产安全,守护社会稳定和经济的可持续发展<sup>[1]</sup>。

### 3 数值模拟在地震安全性评价中的优势

#### 3.1 考虑复杂因素的能力

数值模拟能够综合考量地质构造中的断层走向、倾角、断层面起伏等几何特征,场地的第四纪沉积物厚度、岩土体类型及力学参数等地质条件,以及不同地质介质的弹性模量、泊松比等物理特性。传统的地震危险性评估中地震动的计算依赖传统的地震动衰减关系,不能有效的凸显因断层几何、场地效应等的复杂性造成的地面运动的差异,而基于曲线网格有限差分的动力学模拟方法能有效考虑断层复杂几何结构、背景应力场、介质速度结构变化、地形起伏对地表地震动分布的影响。

#### 3.2 预测地震动的准确性

通过数值模拟,能更好地预测地震动在时间和空间上的分布情况。相比基于经验衰减关系的预测方法,数值模拟方法能够更真实地模拟地震波的传播和衰减规律,为工程结构抗震设计提供更可靠的地震动输入。基于动力学破裂模拟的地震动与经验衰减关系预测的地震动对比,可以克服传统经验衰减关系不能有效表征特定场地特性等方面的不足。

#### 3.3 灵活性与可重复性

数值模拟有着很高的适应性,可以按照工程需求的多样性以及地质环境的复杂性,灵活地改变模型参数和边界条件,这种改变的灵活性保证了模拟结果能更好地反映出实际情况。此外,数值模拟结果的可重复性给研究人员带来方便,让他们可以反复做实验,比较不同模拟条件下得到的结果,这样就推动了科学研究的深入发展,研究人员能更仔细地分析数据,更深刻地认识地震现象,对模型的精确程度和可信程度进行严格检验,数值模拟给地震安全性评价赋予了更为详尽、深入的数据支撑,提升了地震预报和防灾减灾的能力,给社会的可持续发展和人民的生命财产安全给予了稳固的技术保证<sup>[2]</sup>。

### 4 数值模拟在地震安全性评价中的劣势

数值模拟的劣势主要源于自然系统的复杂性、数据与资源的限制,以及人为因素(如专业知识与模型选择)。

#### 4.1 创建模型与假设的局限性

由于地质复杂性难以完全刻画,地震涉及断层破裂、波传播、土壤-结构相互作用等复杂过程,数值模型常需简化地质结构的非均质性、各向异性等特征,导致局部细节缺失。而且物理过程的理想化,例如:忽略地震波传播中的散射效应或非线性材料行为(如土壤液化),可能低估实际地震的破坏力。

#### 4.2 计算资源与时间成本高昂

高精度模拟对算力需求大,三维高分辨率模型需要高性能计算支持,对硬件和软件资源要求较高,可能限制其在资源有限地区的应用。而且复杂模型的长时间模拟可能导致

结果滞后,难以满足实时评估或工程项目需求。

#### 4.3 参数与初始条件的不确定性

由于一定深度地质数据获取困难,地下结构参数(如断层几何、应力分布)依赖间接观测(如地震波反演),存在较大不确定性。初始条件(如震源机制)的微小误差可能在模拟中放大,导致结果偏差,尤其在长期预测中更为显著。

#### 4.4 验证与校准的挑战

大地震复发周期长,历史记录有限,实测地震数据稀缺,导致难以获取足够数据验证模型。现有观测数据也可能存在噪声或覆盖不全,导致校准过程不够充分。

#### 4.5 专业性与软件依赖性

数据模拟在地震安全性评价应用需使用者需兼具地震学、工程学及计算机科学背景,不当操作可能导致模型误设。而且输出结果多为复杂数据集,非专业人士可能忽视关键细节(如峰值加速度的空间分布),导致决策失误。

不同算法(如有限元法、谱元法)的适用场景差异可能影响结果,软件自身的误差或未经验证的模块也可能引入偏差。若忽视经验模型或实地调查,仅凭软件模拟数值结果评估风险,可能造成安全措施不足或过度冗余。

### 5 数值模拟在核电站地震安全性评价中的应用探讨

#### 5.1 核电站地震危险性评估现状

目前,核电站地震安全性评价遵从工程场地地震安全性评价<sup>[3]</sup> I级工作标准,以极罕遇地震动参数确定、能动断层鉴定为主要工作目标,通过综合概率地震危险性分析和确定地震危险性分析结果得出。然而,由于构造环境的复杂性、观测资料信噪比的有限性和计算方法的局限性,在开展地震危险性评价过程中不可避免地会遇到各种不确定性问题,包括认知不确定性与随机不确定性。而对于这类不确定性问题,目前仅依赖于传统经验衰减关系,利用有限观测数据和简单的拟合,获取的地表地震动空间分布形式也较为简单,针对复杂几何结构的发震断层、地下传播介质和场地特征等带来的非线性问题,仅通过添加经验性校正项的方法对影响因素进行简单表征,最终计算结果存在一定程度的“失真”。

另外核电站是高度敏感的设施,当下的评估办法在应对这些多维度,多层次的复杂状况时常显得力有未逮。此外,地震活动的随机性与不确定性也给核电站地震危险性评定及选址上增添了很多难题。于是,寻找更精确的评定方法就成了核电站地震安全性评价中的迫切需求。数值模拟技术的出现,给这个问题的解决给予了新的思路和途径。数值模拟技术利用地震波的传播、核电站结构动力响应及核安全系统运行状态的模拟来更真实的反应地震对核电站的影响,不仅可以考虑地震动的强弱,可以分析地震波在核电站场地上传播特性、核电站结构动力特性及核安全系统可靠性,从而得

到更全面、准确的地震安全性评价结果。

## 5.2 基于动力学破裂模拟的应用

南方科技大学陈晓非院士团队历时十余年联合开发的曲线网格有限差分算法,在地震破裂过程三维动力学模拟上处于国际领先地位。该方法基于物理规律(波动方程+摩擦定律)来约束地震破裂和传播过程,可考虑断层三维几何结构、地形起伏等复杂情况,能模拟完整的地震动传播过程。以粤港澳大湾区设定地震研究为例,研究人员利用该方法对区域内的陆上和海上断裂进行分析。对于西江断裂,通过建立三维几何模型,考虑断层面周边初始应力、临界距离和内聚力随深度分布等因素,模拟其强地面运动过程,得到不同方向的地面运动分量,为该区域核电站等重大工程的地震安全性评价提供了详细的基础数据<sup>[4]</sup>。

这种动力学破裂模拟办法不但给出了地震动的时空分布情况。此外显示了地震波在不同介质中传播的规则,这对于认识核电站场地效应非常关键,凭借分析模拟得到的结果,就可以判定不同断层活动给核电站也许带来的实际影响,包含地震动的峰值加速度,加速度反应谱等主要参数,这些参数对于核电站结构的抗震设计和安全评判有着直接的引导意义。此外,这种方法还可以考虑到核电站结构和地基之间的相互影响,剖析地震作用下的结构动力反映,诸如位移、应力、应变等参数进而评判结构的抗震能力,这对于找到结构的薄弱之处,改良抗震设计很有价值。

## 5.3 应用思路

首先基于现有地震安全性评价方法确定对目标工程场地的地震危险性贡献最大的地震震源,即确定控制性震源位置及大小。基于曲线网格有限差分方法开展控制性地震的动力学破裂和强地面运动过程模拟,给出充分考虑各种复杂因素的强地面运动分布图。

在模拟过程中,特别重视考虑断层几何形态、地形起伏、地壳介质不均一性、地震波传播路径效应等因素,以保证模拟结果的准确性与可靠性。此外可结合核电站标准设计特

点,诸如结构形式,地基状况等,实施有针对性的分析和评价,从而保证评价结果实用有效。在实际操作过程中还要注意核电站的关键部位的地震响应分析工作,以反应堆厂房,安全壳这类重要的结构为例,要仔细分析在地震影响下的应力,应变分布情况以及可能出现的破坏形式,借助数值模拟技术可以模拟这些结构在强烈地震动时的动力响应状况,进而找出其中潜藏的安全风险,并据此开展结构加固和改进设计等工作。此外,还可以考虑到核电站在运转期间产生的动态变化情况<sup>[5]</sup>。

## 6 结论与展望

考虑数值模拟在重大工程地震安全性评价中优劣势,为提升地震安评的可靠性,数值模拟需结合物理实验、历史震例分析和现场监测,采用多方法交叉验证,并持续优化模型算法与计算效率。进一步深化数值模拟与地质勘察的融合,充分利用地质大数据,精细刻画地质结构模型,更准确地反映地质因素对地震动及工程场地响应的影响,在重大工程地震安全性评价中发挥更大的作用,给保障人民的生命财产安全和社会经济的稳定发展提供更好的技术支持。

## 参考文献

- [1] 吴一凡.重大建设项目档案管理实践初探——以国家地震烈度速报与预警工程项目海南子项目为例[J].办公室业务,2024,(21):157-159.
- [2] 张正霞,谷利国,吕睿,等.地震重大工程建设项目档案管理实践——以山西地震预警工程项目为例[J].中国档案,2024,(07):44-45.
- [3] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.GB17741-2025工程场地地震安全性评价[S].北京:中国标准出版社,2025.
- [4] 青海省重大工程场地地震安全性评价报告技术审查管理细则[N].青海日报,2024-03-06(019).
- [5] 水利系.水利系在重大工程场址地震危险性评估方面取得重要进展[N].新清华,2023-11-03(004).