

地震科技前沿快报

2020 年第 9 期 (月刊 总第 21 期)

中国地震局科学技术委员会
中国地震局地震预测研究所

中国科学院兰州文献情报中心
中国科学技术信息研究所

本期概要

- 1、借助 UCERF3-ETAC 模型对 2019 年加州里奇克雷斯特地震序列进行可操作性地震预报
 - 2、海啸地震：巨型逆冲断裂前缘冲起构造的垂向弹起
 - 3、多学科 SINAPS 研究项目的主要成果：迈向核设施地震安全的综合分析
-

多学科 SINAPS 研究项目的主要成果：迈向核设施

地震安全的综合分析

本研究概述了 SINAPS 法国研究项目及其主要成就。SINAPS 的具体名称是“地震和核设施：安全的改善与维持”(Earthquake and Nuclear Facility: Improving and Sustaining Safety)，其已经将广泛的研究界聚集在一起，并提出了针对核设施的创新性地震安全分析。这个为期五年的项目是在 2011 年东日本大地震之后由法国政府资助的，此次地震引发的海啸还造成了福岛第一核电站的重大事故。这场灾难发生后不久，国际核安全界质疑当前在设计和定期审查阶段用于定义和考虑核设施地震荷载的方法。在此背景

下，全球核权威人士要求核执照持有人进行“压力测试”，以评估其现有设施承受极端地震运动的能力。本研究展示了法国的核监管框架，以强调其中的关键问题和科学挑战。对法国当前做法的分析以及对更好地评估核设施抗震裕量的需求有助于形成 SINAPS 的科学路线图。SINAPS 旨在对数据库的完整性和空缺进行连续性分析（涉及所有数据类型，包括地质、地震、现场特征、材料等），并对用来描述物理现象的模型（例如地震运动的预测、场地效应、土壤和结构相互作用、线性和非线性波传播、用于结构分析的非线性域中的材料本构关系）的可靠性和缺陷进行分析，同时，亦对地震安全评估方法论的相关性和缺点进行探讨。对方法（确定性或概率性）和国际先进水平下可用数据进行的这种批判性分析系统地解决了不确定性问题。研究者介绍了 SINAPS 在地震综合分析的每个步骤中取得的关键结果，尤其是不确定性识别、量化和传播。重点介绍了从 SINAPS 获得的经验教训。SINAPS 倡导一种创新的集成方法，该方法与法国核安全局（ASN）最近发布的 22 号准则（准则 ASN # 22 2017）相一致，并为法国改善当前的实践开辟了新前景。相关成果发表在 2020 年 5 月的 *Pure and Applied Geophysics* 上。

本研究的相关背景：

（1）福岛事后，补充性安全研究。继 2011 年 3 月日本太平洋海岸发生 9 级大地震之后，海啸导致许多人丧生且损失巨大，还导致福岛核电站发生了严重的核事故。核事故引发了全世界核当局的迅速反应，敦促所有核电厂经营者对其现有结构进行地震风险和安全分析。在法国，作为补充安全研究的初始阶段（2011—2012 年），于 2011 年进行了现场分析和验证。

（2）SINAPS 项目的实施。SINAPS 的主要目标是：对各个参数进行

分级，并在每个步骤评估不确定性的影响；提出一种创新的方法对地震波传播进行建模；改进抗震裕量评估方法；提出有关研究与开发行动和数据获取及工程实践方面的建议。

(3) 法国核设施的地震风险监管框架。在法国，核安全由 ASN 在一系列具有不同法律地位的文件框架内进行处理。主要框架如图 2 所示。

(4) 法国关于核安全的地震风险管理（从 20 世纪 60 年代至今）。图 3 以时间顺序总结了适用于法国的管理所有基础核设施（不包括深层存储）地震风险的参考文件，这些文件在 1960—2006 年（设计原则的最新修订日期）适用。

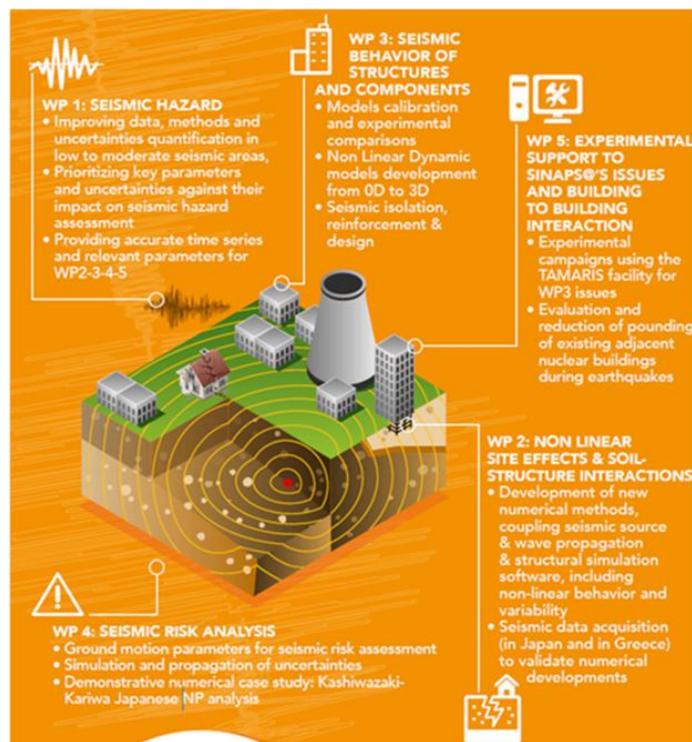


图 1 以地震风险评估链的步骤为基础的 SINAPS 项目的组织（摘自 Berge-Thierry 等，2017）

(5) 法国核地震背景与 SINAPS 研究之间的联系。作为第一优先事项，可靠的置信度和重现期与地震灾害后果的联系被明确肯定，因为不可能避免任何概率评估。对于相同的地震水平，有必要理解特定核设施相对于另

一核设施的总体风险,和/或对两个核设施之间的各种危险进行分级。其次,提倡采用一种综合方法来计算地震波场,从其在断层上的成核,通过复杂的地质介质传播,再到结构基础,最后传播至敏感设备。

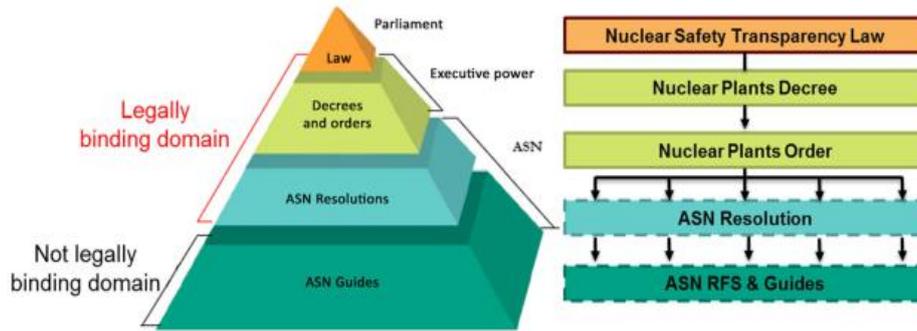


图2 法国有关核安全的文件说明

(6) 确定 SINAPS 的特征和研究方向。由于法国的具体情况,确实有必要改善概率性实践以满足新的安全要求。SINAPS 促进了工具的开发,使之有可能朝着概率地震分析的方向发展,相关分析结果与代表不确定性传播的置信度相关。

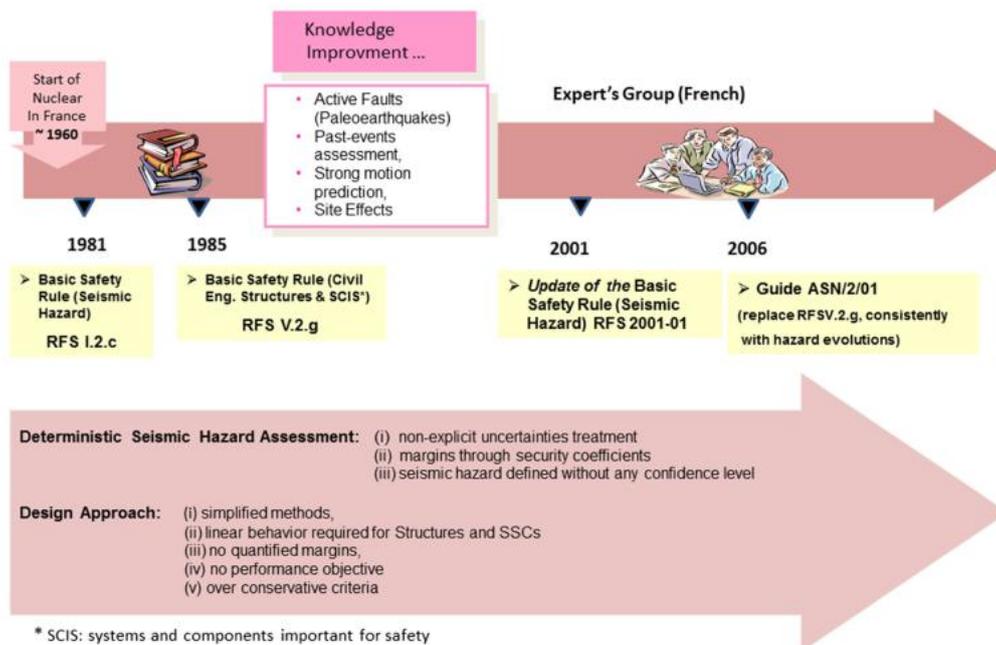


图3 法国有关地震风险的参考文件的出版和更新历史

本研究首先从 SINAPS 的主要贡献和经验总结的角度介绍了地震危险性评估的主要科学进展，然后介绍非线性场地效应与土壤结构相互作用，分析其主要组成部分和土壤-结构物耦合，并对强地面运动的非线性土壤模型和 站点及数据采集进行验证，并给出一些研究实例。之后，分析了结构与设备的抗震性能，介绍了相关的科学挑战和研究成果。然后，讨论了地震风险评估。最后，以实验方式研究了阻尼与建筑-建筑间的相互作用。

在过去的 5 年中，SINAPS 在整个核设施地震安全分析领域开展了许多研究活动。SINAPS 研究最初主要针对：①法国自 20 世纪 70 年代以来的监管实践，其以确定性安全方法（以设计为目的而编写）为基础；②因为缺乏任何批准的专门文件（描述针对现有设施的可接受的做法），法国核设施安全审查的长期经验需要被重新审视；③日本发生的核电站事故带来巨大科学挑战，以及工程实践中不可避免的问题，特别是核设施抗震裕量的评估。

SINAPS 的主要成就和建议：

（1）SINAPS 通过改进不确定性的传播方法并提高其表现，有助于更好地确定传递给建筑物的地震动中出现不确定性的关键因素。

（2）SINAPS 提出了“控制点”的新定义，用于评估参考基岩（露头或深部基岩）的地震危险性。

（3）SINAPS 允许将结构模型从非常简单的模型改进为复杂模型。

（4）SINAPS 研究发现结构非线性计算的相关性，这有利于利用能量耗散和内部作用力的重新分配进行安全裕度的分析。

（5）SINAPS 调查了与特定地点地震灾害相兼容的时间序列的敏感步骤和关键步骤。

(6) 无论地震风险分析中的研究主题如何，SINAPS 都显示并强调了投资临时和永久性仪器网络的必要性，无论其是记录地震（从非常弱的运动到非常强烈的运动）或噪声，还是表征静态、动态、线性和非线性的土壤和结构行为。

(7) 法国核参与方现在应考虑 SINAPS 的数据、经验教训和建议，以提出最好的参考资料——适用于设计新装置或现有核设施评估。

整体而言，本研究清楚地表明，SINAPS 已经能够通过概率地震分析提出一种创新方法。SINAPS 的研究表明，有必要明确跟踪地震分析每个步骤中的不确定性，但也强调，需要避免对其进行任何重复计算。为实现此目标，该项目强烈建议对参考基岩的地震危险性进行最终评估，并使用兼容的相关假设和方法进行特定地点的地震响应评估，同时对物理现象进行准确建模。通过介绍和分析法国在核领域的背景和实践，SINAPS 显示了当前确定性方法的不兼容性，该方法无法对任何抗震裕量进行量化。然后，通过在不同主题领域中进行的研究、开发的工具和推广的方法，SINAPS 确实增强了为从业人员提供抗震裕量评估的能力。最后，SINAPS 伙伴关系已经能够提出建议，至少是可以改善法国目前在核领域的地震分析，并且确定了进一步的研究需求。

来源：Berge-Thierry C, Voldoire F, Ragueneau F, et al. Main Achievements of the Multidisciplinary SINAPS@ Research Project: Towards an Integrated Approach to Perform Seismic Safety Analysis of Nuclear Facilities. *Pure and Applied Geophysics*, 2020, 177(5): 2299–2351.

美科学家将开发新的综合地球动力学模型框架

2020年1月6日，美国克莱姆森大学发布新闻称，该校研究人员 Timo Heister 获得了美国国家科学基金会（NSF）250 万美元的资助，将开发一个新的综合地球动力学模型框架，该框架将提供从地球地幔边界到其表面的真实模拟。

地幔厚度超过 1800 英里，处于地球表面和超热地核之间，由热的富含铁的岩石组成，这些岩石缓慢向上移动，逐渐冷却。这种被称为对流的传热过程会引起一系列地质事件，从而导致地震、火山爆发或山脉形成。

长久以来，研究人员希望更好地了解对流过程和其他地球动力学活动，但由于压力和温度过高，无法深入研究地幔了解正在发生的情况。取而代之的是，科学家们使用地震成像来进行推断，并依靠计算模型来模拟岩石和构造板块在数千至数百万年时间尺度上的缓慢运动，从而推测出地球表面以下发生了什么。

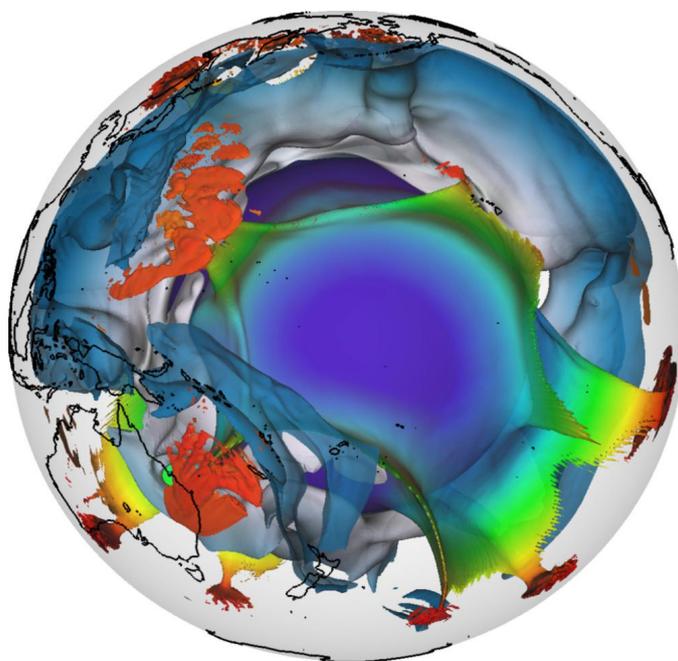


图 1 模型时间 2.5 亿年后，全球地幔对流的最终状态

新框架将基于 Heister 和其他团队成员在过去八年中创建的开源软件工具——地球对流问题的高级求解器 (Advanced Solver for Problems in Earth's Convection, ASPECT), 其可模拟地幔中的过程, 已被全球地球科学研究人员广泛使用。

ASPECT 的模拟有可能提供对广泛主题的巨大洞察, 包括构造板块运动和形变随时间和空间的变化、岩浆流动和地球内部的水循环、深部地球的结构和地表演化等。据 Heister 称, 他将使用地震活动、构造板块运动、地核温度以及地震学家、地球和行星科学家生成的其他数据作为 ASPECT 的数据源, 在高性能计算工具上运行 ASPECT 模拟, 比如克莱姆森大学的 Palmetto 集群和其他超级计算机。

研究人员将使用 ASPECT 来计算出一个参考状态, 帮助人们尽可能地了解地幔的当前状况。一方面, 科学家可以利用参考状态进行区域高分辨率模拟; 另一方面, 科学家可以进行他们自己的全球模拟, 以确定地球表面下的岩石如何对压力作出反应, 特别是在构造板块边界。

来源: Clemson mathematician helps deepen understanding of Earth's mysterious mantle

<https://newsstand.clemson.edu/mediarelations/clemson-mathematician-helps-deepen-understanding-of-earths-mysterious-mantle/>

加科学家首次证明慢地震与板块边界的动态流体过程有关

2020年1月22日，加拿大渥太华大学发布新闻称，该校的一个研究小组取得了一项重要突破，首次证明慢地震与板块边界的动态流体过程有关，这将有助于更好地了解慢地震的起源和行为。

慢地震是近20年前科学家发现的一种新型地震。这些地震产生的运动非常缓慢（一次地震可以持续几天，甚至几个月），以至于几乎无法察觉。它们不像普通地震那样可怕和破坏性强，其不会引发地震波或海啸。这些地震发生在一个板块在另一个板块之下滑动的区域（称为“俯冲带断层”），与发生规则地震的区域相邻，但更深。同时，其行为也与常规地震大为不同。

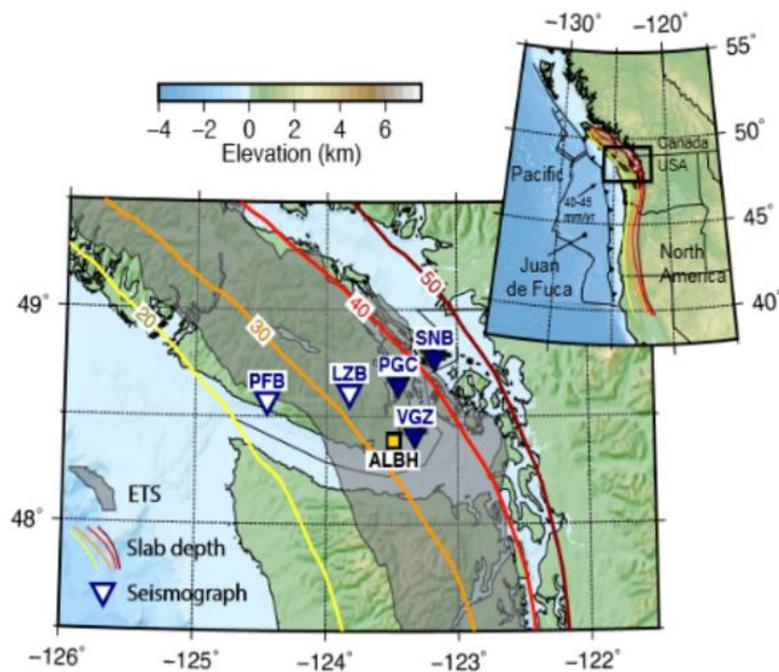


图1 地震仪器的安装位置（灰色阴影区表示慢地震发生的地方）

加拿大渥太华大学地球与环境科学系的研究人员对此进行研究，他们利用类似于超声波成像的技术和地震记录绘制出这些慢地震发生区域的

地球结构图，通过分析发生地震的岩石的性质，得出结论：这些慢地震与板块边界的动态流体过程有关。慢地震相当复杂，此前研究表明，许多慢地震的理论模型要求这些流体的压力在地震周期内波动。

事实上，2009年，渥太华大学的 Audet 教授曾亲自提出证据，证明慢地震发生在地球内部流体压力异常高的地区。Audet 教授表示，地球深处的岩石充满了液体，尽管其数量很小。在 40 km 深处，施加在岩石上的压力非常大，通常会把液体挤出，就像挤压海绵一样。然而，这些流体被禁锢在岩石中，实际上是不可压缩的。因此，流体压力上升到非常高的值，这基本上削弱了岩石，并产生慢地震。

过去几年的几项研究表明，这些事件与流体压力的动态变化有关，但迄今为止，还没有确凿的经验证据。该研究则建立了第一个直接证据，证明流体压力确实在慢地震期间波动。

来源：uOttawa Researchers Find Evidence to Explain Behavior of Slow Earthquakes

<https://media.uottawa.ca/news/uottawa-researchers-find-evidence-explain-behavior-slow-earthquakes>

Jeremy M, Gosselin Pascal Audet, Clément Estève, Morgan McLellan, Stephen G, Mosher Andrew J. & Schaeffer. Seismic Evidence for Megathrust Fault-Valve Behavior During Episodic Tremor and Slip. Science Advances, 2020, 6 (4): eaay5174, doi: 10.1126/sciadv.aay5174

主 送：中国地震局领导