比萨大学，意大利

# 利用数值仿真对大坝进行地震安全评估

**比萨大学的研究人员使用数值仿真研究各种地震事件中大坝安全评估的准确性和可靠性。**

作者 GEMMA CHURCH

在所有类型的大型建筑物开发中，结构完整性和遵守相关规范至关重要。数值仿真可以对此类评估提供很大的帮助，但前提条件是评估使用的数学模型需要有合理的假设，而对于大坝的地震安全评估这类问题，则需要更严格的方法。大型建筑物结构的失效会造成巨大的安全隐患，常常会导致严重的后果，特别是在遇到地震时意味着更高的风险。

大坝是建造于河流和溪流之上的巨大屏障，通过限制水流来达到灌溉和水力发电等目的。由于大坝会与土壤和水产生独特的相互作用，传统的建筑建模技术不能直接应用于大坝。评估大坝-水库-土壤系统的行为是一项复杂的工作。多年来，人们一直采用近似和简化的方法进行这方面的研究。然而，意大利比萨大学的研究人员通过不断的努力和创新，使大坝仿真的准确性和可靠性迈上了一个新台阶，并有望使这些庞大建筑在未来变得更加安全。

在地震激励作用下，混凝土重力坝、水库和地基形成一个耦合系统。目前尚没有一种准确的方法可以对这种复杂系

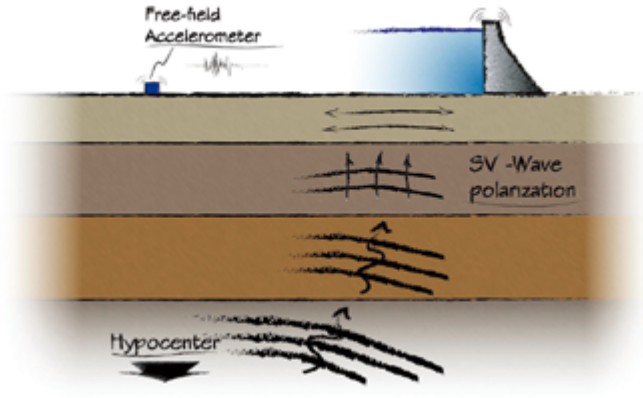


**图 1.** 地形上因地震产生的弹性波示意图。图注：Free-field Accelerometer - 自由场加速度计；SV-Wave polarization - SV 波极化方向；Hypocenter - 震源

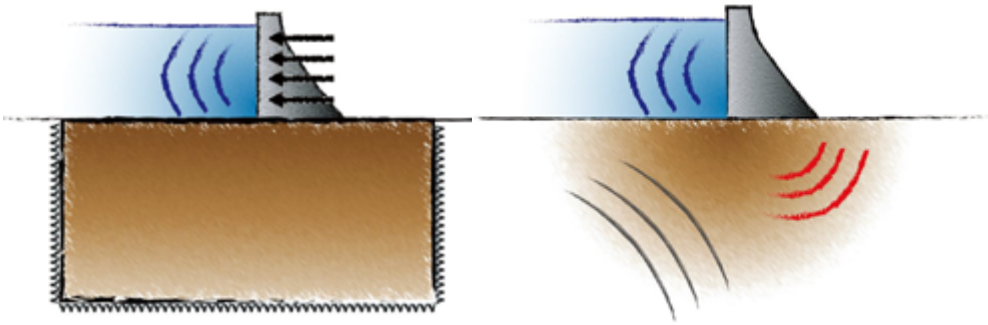

**图 2.** 无质量地基模型（左）与无限地形模型（右）之间能量传递方向的比较图。

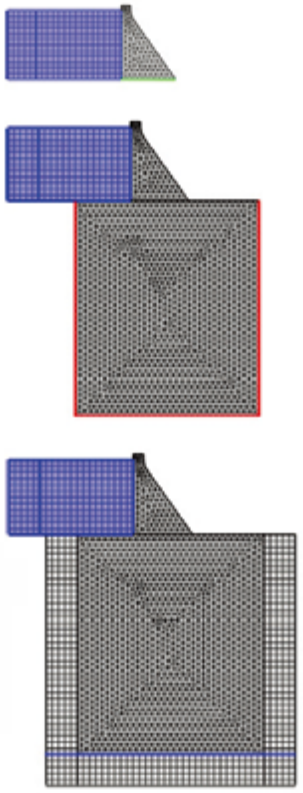

**图 3.** 以上三种建模技术采用的几何形状：刚性地基（上）、无质量地基（中）和无限地形（下）。

统进行评估，因此人们经常忽略土和结构间的相互作用，或直接通过简化假设进行粗略估计。但是不考虑这些相互作用会产生某些风险，例如坝体的内部可能出现没有预计到的大应力。

## ⇨ 土壤和结构相互作用

运动学效应和惯性效应都是土和结构相互作用的一部分，然而人们却很少考虑惯性效应。土壤运动学受土体柔度控制和结构刚度的影响，而惯性效应则受结构和土壤密度特性的影响。构成大坝的混凝土砌块在受到震动时会在土壤中来回移动，但土壤是有质量的，不会简单地随着混凝土板的移动而运动。土壤和结构会相互影响，这种相互作用产生的弹性波会穿过土壤，将能量从系统中带走（图 1），这一现象被称为“辐射阻尼”。

目前，模拟土壤对抗震性能的影响有几种方法，但都有不足之处。在传统的建筑模型中，人们基于土壤类型以代码的形式提供响应谱来考虑土壤效应。然而，传统建筑与大坝之间存在结构上的差异，因此套用这些方法并不完全合适。再者，就水坝而言，一种称为“无质量地基”模型（图 2）的技术已经在坝基分析中得到了广泛的应用，这种方法只根据土壤边界的柔度和位移对土壤进行建模。模型中忽略惯性效应，并假设土壤“无质量”，系统中的所有动能都转移到坝基上，这种假设与实际不符，并且会导致地震响应被严重高估。

## ⇨ 利用仿真提高复杂度

借助数值仿真的方法，比萨大学土地和建筑系统能源工程系的 Matteo Mori 能够在他的仿真中探索完整的土壤-结构相互作用。“COMSOL 多物理场仿真所具有的灵活性使其成为我们使用过的最直观易用的软件。该软件中用于研究弹性波或声波的功能丰富，对我们的研究非常有用。” Mori 评论道，“这款综合性软件是我们研究的有力工具。”

在使用任何新技术对混凝土重力坝进行模拟时，都需要结合具体情况考虑方案的可行性。因此 Mori 决定使用三种模型对不同的场景进行模拟。他研究了每个系统在地震激励下的动态响应，并对分析结果进行了比较。这三个模型是刚性地基模型、无质量地基模型和无限地形模型，如图 3 所示，每个模型都比前一个模型更加成熟复杂。

图中，蓝色矩形区域表示水库，三角形区域表示大坝，大矩形区域表示土壤。无质量地基模型中的土壤域就是无质量土壤，其中只有柔度和位移。为了确保不同模型间的一致性，Mori 在坝基上设置了水平谐波加速度边界条件（绿线、红线和蓝线），用来模拟地震激励，使这三个模型具有相同的坝基加速度。其中第三个模型使用了 COMSOL 多物理场仿真软件提供的全局方程功能，可以让弹性波通过边界。

无限地形模型的一个关键是土壤周围的完美匹配层（Perfectly Matched Layer，PML）。这是 COMSOL 多物理场仿真软件中的一个强大功能，PML 可以吸收所有入射波，无论角度和频率如何，都可以防止入射的波在边界反射回介质中。此功能有助于将辐射阻尼和能量耗散结合起来，从而将无界的土壤域设置为一

> “COMSOL 多物理场仿真软件所具有的灵活性使其成为我们使用过的最直观、易用的软件。软件中用于研究弹性波或声波的功能丰富，对我们的研究非常有用。这款综合性软件是我们研究的有力工具。”
>
> —— MATTEO MORI，比萨大学土地和建筑系统能源工程系研究人员

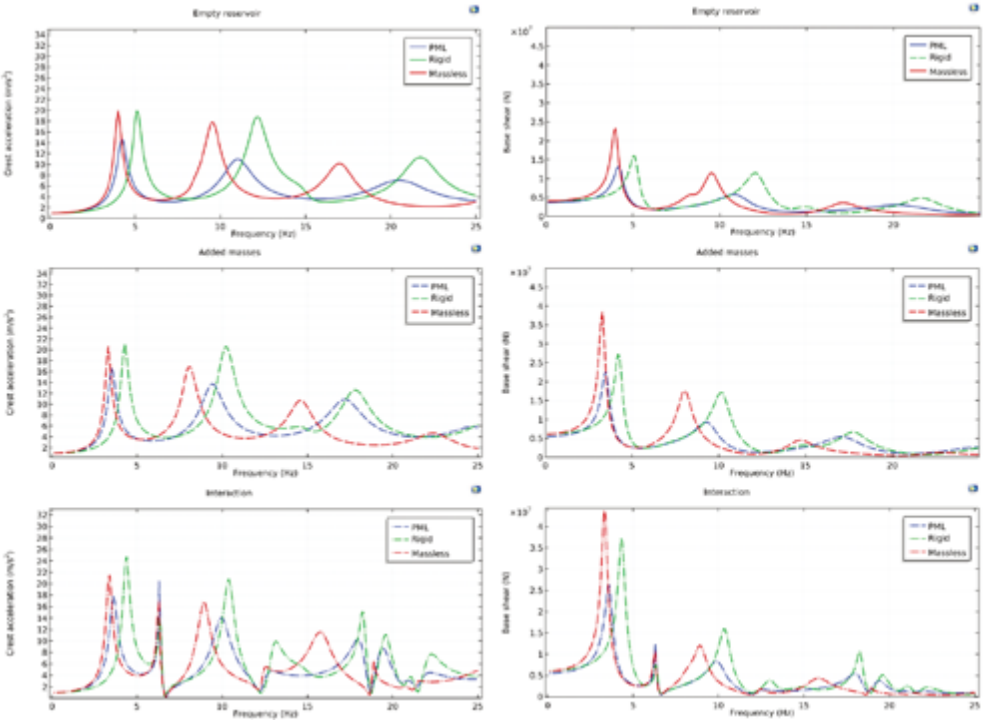


图 4. 空水库的基底剪力和峰值加速度（上），附加质量法（中）以及全弹性波耦合法（下）。

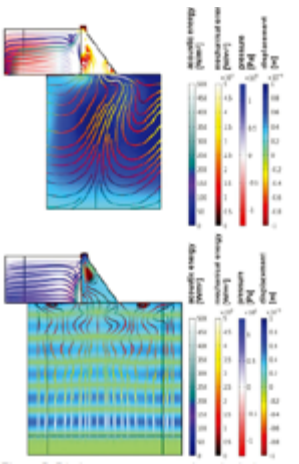

图 5. 无质量地基（上）和无限地形（下）的机械位移、流体压力和机械能通量流线图。

种完美吸收材料，实现在不反射任何能量波的情况下使混凝土板产生衰减振荡。

Mori 解释说："COMSOL 多物理场仿真软件提供了合适的工具来执行准确的多物理场仿真，包括完全耦合的流-固耦合分析和无限域。"基于小振动和忽略黏性这一假设，可以使用亥姆霍兹方程求解流体子系统，用固体力学求解土壤和大坝子系统，并用 PML 功能模拟无界地形。

## ⇨ 具体情况，具体分析

通过对 65 米高的混凝土坝体的不同使用情况（空水库和满水库）的分析，可以评估无限地形模型的可靠性。在此基础上，还可以通过以下两种方式模拟水库满水的情况：全弹性波耦合以及简化的"附加质量"模型。附加质量也称为"虚质量"，是一种模拟库中水动力效应的方法。因为坝体和水不能占据同一空间，所以当混凝土板加速时，它必须移动邻近的水。这样就会增加惯性，也就是说会增加混凝土板的有效质量。

研究人员采用不同技术（刚性地基、无质量地基和无限地形）针对每一种库盆场景（空水库、附加质量和完全相互作用）进行计算。与刚性地基和无质量地基模型相比，无限地形模型（图 4 中的蓝色曲线）在所有三种情况下均显著降低了峰值响应并使其变得平滑。正如预期的那样，这种平滑是新实施的辐射阻尼作用的结果。这是由于系统中的能量被消散到无界土壤地形（通过 PML 模拟）中，因此更小、更符合实际的动能被传递到混凝土板中。而另外两种建模技术无法涵盖这一现象。

不仅如此，机械位移、流体压力和机械能流也存在着明显的差异，如图 5 所示。无质量模型显示的是未定义入射波方向的循环流线（表示声能通量），而无限地形模型的能量通量具有清晰明确的方向。这从趋势上清晰地表明辐射阻尼将能量从系统传递出去，并证实了较少的能量被转移到大坝中。

## ⇨ 现在和未来的工作

"模型是否能够真实地描述实际情况是我们遇到的最大挑战。由于我们的研究并不是一个完美的数学问题，因此很难实现准确预测。无限地形模型可以被认为是一种很好的解决方案，但仍需要进一步完善，这也是我们目前正在进行的工作。混凝土是一种脆性材料，因此我们希望能够诊断出大坝结构中的裂缝。"Mori 解释说。

他们计划通过实验从监测地震活动的加速度图谱数据中提取卷积，以便在模型中设置更准确的边界条件。这一举措将极大地提高模型的准确度，为意大利乃至全世界的大坝仿真做出巨大的贡献。❖