

地震科技前沿快报

2024 年第 7 期（月刊总第 66 期）

中国地震局科学技术委员会
中国地震局科技与国际合作司

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、粘弹性人工边界和地震动输入方法在三维不连续变形分析中的实现

地震中岩体的动力响应是岩石动力学的关键问题。原始的应用三维不连续变形分析（3D-DDA）方法不足以模拟地震中岩体的动力响应。本研究引入粘弹性人工边界和地震动输入方法对 3D-DDA 进行改进。认为，引入的粘弹性人工边界和地震动输入方法提高了 3D-DDA 方法的适用性，可以进一步应用于实际工程案例的模拟。

2、地震发生模型的参数不确定性对城市建筑组合损失估计的影响

对建筑物组合进行损失估计分析对灾害风险减轻至关重要。正确理解模型参数值中不确定性的影响是实现模型准备阶段所需有限资源最佳分配的关键。本研究对伊朗伊斯法罕省的城市地震风险评估结果进行了敏感性分析，研究发现，古腾堡-里克特关系中的 a 值和 b 值、最大震级和阈值震级是重要风险指标变化的主要贡献者，其结果可支持风险管理者和从业人员构建地震危险和风险模型。

3、使用可解释的机器学习和视频数据对地震中的保护行动决策进行建模

了解人们在地震期间如何应对快速变化的环境对于降低风险和挽救生命至关重要。通过使用完全注释的视频数据，研究人员应用机器学习方法 **XGBoost** 来建模和预测人们在地震期间的保护行动。建模结果证实，社会和环境信号在影响不同保护行动的选择概率方面起着关键作用，某些因素与选择撤离的概率显示出明显的非线性关系。

粘弹性人工边界和地震动输入方法在三维不连续变形分析中的实现

应用三维不连续变形分析（3D-DDA）方法模拟地震中岩体的动力响应时，应考虑适当的人工边界和输入方法。本研究对 3D-DDA 方法进行了改进，引入粘弹性人工边界和地震动输入方法（基于波场分解方法，并考虑了横向自由场波）。随后，通过数值算例验证了边界和输入方法的正确性，数值算例的结果与理论解几乎一致。研究认为，引入的粘弹性人工边界和地震动输入方法提高了 3D-DDA 方法的适用性，可以进一步应用于实际工程案例的模拟。相关研究成果发表在 2024 年 3 月的 *Rock Mechanics and Rock Engineering*。

地震中岩体的动力响应是岩石动力学的关键问题。不连续变形分析（DDA）方法属于离散介质策略，它采用无条件稳定 Newmark 恒加速积分法，拥有严格的接触判断算法，可以模拟系统的不连续位移，准确计算不连续岩体的动、静力学问题。在采用 DDA 方法研究岩体动力响应时，需要考虑有限计算域的边界条件和边界处的输入方法，传统方法无法模拟无限域对有限域的影响，并满足现有的计算要求。因此，众多学者对 DDA 方法中的人工边界和输入方法进行了研究。

目前，3D-DDA 中人工边界的研究主要集中在粘性边界。然而，粘性边界不能模拟岩石的弹性恢复能力。同时，现有的输入方法忽略了无限远的横向场地在地震作用下对有限计算区域的影响，即横向自由场波的影响。这些问题使得不能正确模拟地震作用下岩体的动力响应。

本研究引入了粘弹性人工边界和地震动输入方法。输入方法基于波场分解法，并考虑了横向自由场波。首先，分析了 3D-DDA 方法的基本原理，介绍了粘弹性人工边界和输入方法的具体实施步骤。然后，进行一维岩坝

和三维岩体中波传播的模拟，验证了粘弹性人工边界和输入方法的正确性。

1. 粘弹性人工边界条件

原始的 3D-DDA 方法不足以模拟地震中岩体的动力响应。因此，本研究对 3D-DDA 方法中的边界条件和地震动输入方法进行了探讨，在 3D-DDA 中实现了粘弹性边界和考虑自由场波的地震动输入方法。

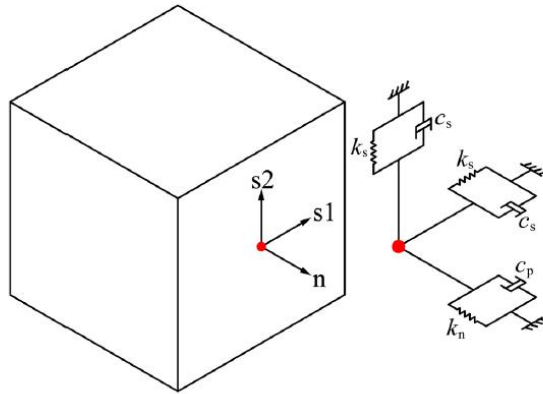


图 1 粘弹性边界（弹簧阻尼器）模型的物理意义

与粘性边界不同，粘弹性边界考虑的是无限域的弹性恢复能力。为了实现 3D-DDA，在边界表面的每个点的所有方向上应用弹性元件（弹簧）和粘性元件（阻尼器或缓冲器）。具体而言，研究人员通过在边界块的边界表面上应用弹簧阻尼器单元来施加粘弹性边界。弹簧作用于边界块 i 的边界面上的弹力 $[f_{nk} f_{s1k} f_{s2k}]^T$ 可表示为：

$$\begin{pmatrix} f_{nk} \\ f_{s1k} \\ f_{s2k} \end{pmatrix} = - \iint_A \begin{bmatrix} k_n & 0 & 0 \\ 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_n \\ u_{s1} \\ u_{s2} \end{pmatrix} dA$$

其中 A 是边界面积。通过位移得到势能增量。根据势能最小原理求解势能增量，得到与弹簧相关的矩阵，并将它们叠加到控制方程组中边界块 i 的子矩阵中。阻尼器在边界上产生的粘性力可表示为：

$$\begin{pmatrix} f_{nv} \\ f_{s1v} \\ f_{s2v} \end{pmatrix} = - \iint_A \rho \begin{bmatrix} c_p & 0 & 0 \\ 0 & c_s & 0 \\ 0 & 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v_n \\ v_{s1} \\ v_{s2} \end{pmatrix} dA = - \iint_A \rho \begin{bmatrix} c_p & 0 & 0 \\ 0 & c_s & 0 \\ 0 & 0 & c_s \end{bmatrix} \mathbf{L} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} dA$$

在得到相应的势能后，根据 Newmark 恒加速积分，结合总势能最小原理，将粘性部分叠加到控制方程组中边界块 i 的子矩阵中。

2. 地震动输入方法

地震波输入问题属于外源输入问题，波源一般位于无穷远处。因此，需要考虑人工边界处的外部源输入方法。本研究采用波场分解方法来解决地震动输入问题。

当输入地震波时，在有限计算域的输入边界处会产生两种类型的波。第一种是内部行波，指从外部进入有限计算域的波，即底部入射波和横向自由场波。另一种是外部行波，指从计算域到无限域的波，即散射波。波场分解法分别考虑内部行波和外部行波。外部行波需要通过设置人工边界来吸收，内部行波在设置的人工边界处输入。在本研究中，力输入法被应用于内部行波，并根据波动理论和胡克定律最后得到内部行波的应力场。

研究假设模型由均质岩体组成，通过延迟入射波即可得到侧边界的自由场波。计算模型的高度为 H ，对于 S 波和 P 波从底部垂直入射的情况，以下式子分别表示距模型底部高度 h ($h>0$) 处横向边界自由场波的位移和速度时程：

$$u(h, t) = u\left(t - \frac{h}{c_s}\right) + u\left(t - \frac{2H - h}{c_s}\right)$$

$$\dot{u}(h, t) = \dot{u}\left(t - \frac{h}{c_s}\right) + \dot{u}\left(t - \frac{2H - h}{c_s}\right)$$

$$u(h, t) = u\left(t - \frac{h}{c_p}\right) + u\left(t - \frac{2H - h}{c_p}\right)$$

$$\dot{u}(h, t) = \dot{u}\left(t - \frac{h}{c_p}\right) + \dot{u}\left(t - \frac{2H - h}{c_p}\right)$$

3. 算例

本研究首先利用包含粘弹性边界子程序的3D-DDA程序研究了不同边界对岩石中波传播特性的影响(1D)，验证了程序和边界理论的正确性，其中包括全周期正弦应力波输入和半周期正弦应力波输入。最后，通过3D算例验证了粘弹性边界和地震动输入方法的正确性。

3D算例设置如下：模型总体尺寸为50×50×50 m。虚拟节点强度设置为20 MPa。时间步长选择为 $\Delta t=5\times 10^{-4}$ s。粘弹性边界设置在模型的底部和侧向边界，输入采用基于波场分解法的地震波输入方法。地震波属于瞬态波，所有瞬态波都可以通过傅里叶变换转化为具有一系列不同频率分量的简谐波。因此，入射波是频率为4 Hz的简谐正弦P波(z方向)和频率为8 Hz的S波(x方向)。它们的峰值速度为0.5 m/s，入射波在底部边界输入。

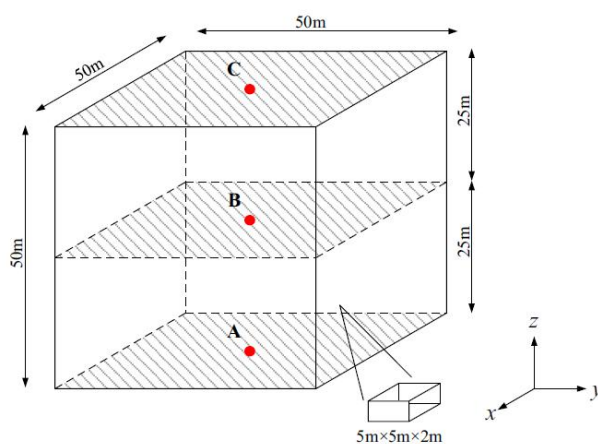


图2 3D岩体计算模型

4. 主要结论

(1) 在无限域情况下，3D-DDA可以有效模拟纵波和横波在岩体中的传播，模拟结果与理论解基本一致。然而，在有限计算域中考虑截断边界的影响时，有必要应用特定的人工边界。

(2) 通过在3D-DDA方法中引入粘性边界和粘弹性边界，发现粘性

边界和粘弹性边界都可以有效地吸收反射波。而且，粘弹性边界不仅消除了边界反射波，还反映了边界外无限岩石介质的弹性恢复特性。同时，它表现出良好的鲁棒性，并且易于应用。

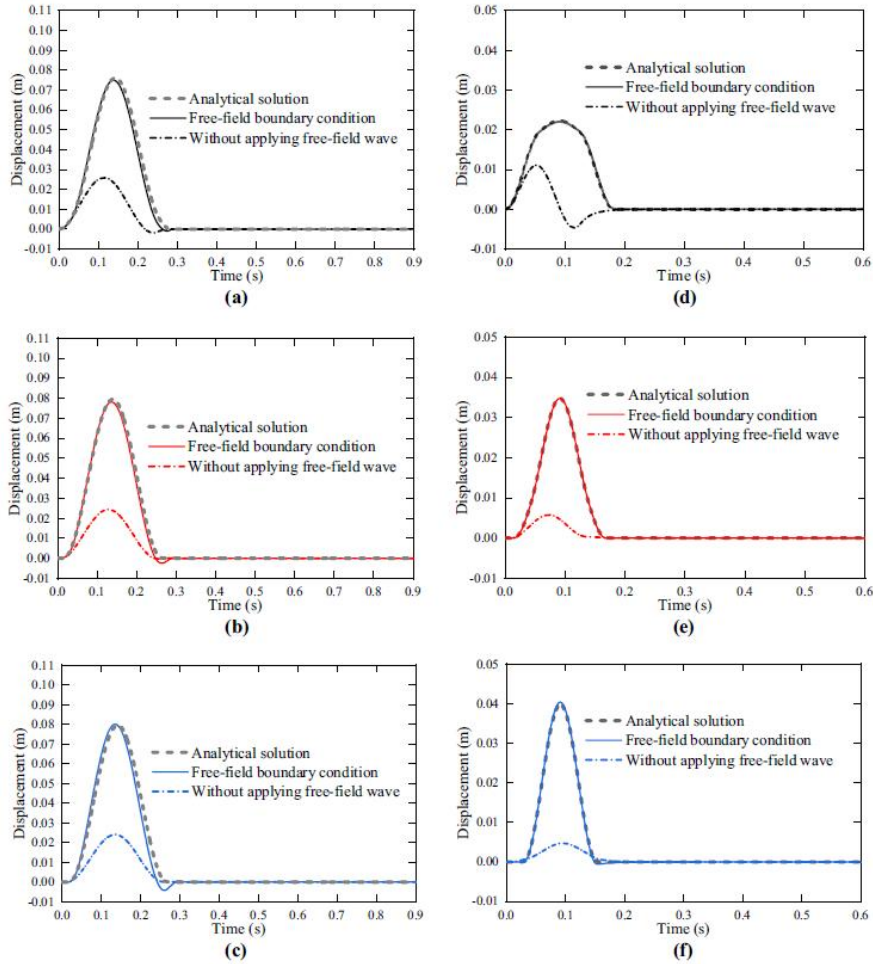


图3 三维岩体模型中监测点的位移时程。(a) A点z方向位移时程图；(b) B点z方向位移时程图；(c) C点z方向位移时程图；(d) A点x方向位移时程图；(e) B点x方向位移时程图；(f) C点x方向位移时程

(3) 3D-DDA方法中引入的适应粘弹性边界的力输入方法正确输入了入射波。与位移输入法相比，该方法消除了反射波的影响，更好地模拟了地震波运动。

(4) 波在节理岩体中的传播是一个复杂的过程，包括反射、透射和折射。采用改进的3D-DDA模拟单节理和双节理岩体中的波传播问题，结

果与理论解基本一致，说明改进的 3D-DDA 方法可以模拟波在节理岩体中的传播。

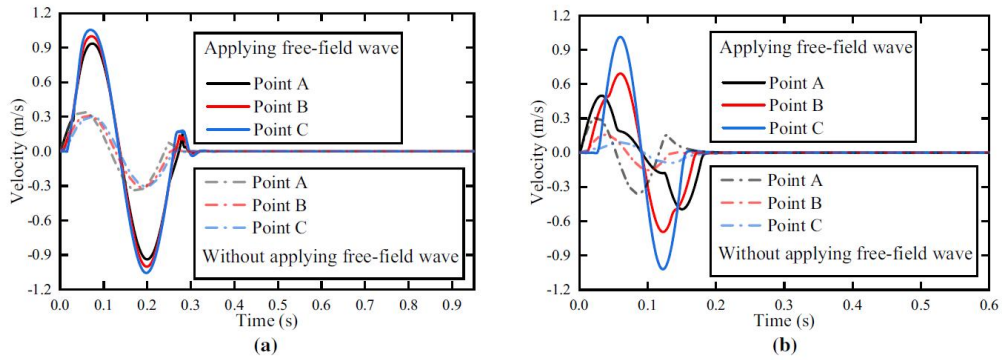


图 4 三维岩体模型中监测点的速度时程。(a) z 方向；(b) x 方向

(5) 基于波场分解法并考虑横向自由场波的地震动输入方法被引入 3D-DDA。假设 P/S 波从底部垂直入射，则可以使用改进的 3D-DDA 来模拟地震作用下岩体的动力响应。三维算例的计算结果与理论解吻合较好。地震作用下岩质边坡的动力响应进一步验证了利用改进的 3D-DDA 模拟地震动的可行性。本研究中的地震动输入方法提高了 3D-DDA 方法的适用性，可以进一步应用于实际工程案例的模拟。

由于模型尺寸较大，场地条件复杂，地震动的空间效应影响较大，非均匀地震因素的影响也不容忽视。因此，非均匀地震动输入，如斜入射输入，将应在 3D-DDA 中实现，未来将结合三维并行不连续变形分析来计算更复杂的算例。

来源：Lin S, Deng T, Zheng L, *et al.* Implementation of viscoelastic artificial boundary and seismic motion input method in three-dimensional discontinuous deformation analysis method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024: 1-21.

地震发生模型的参数不确定性对城市建筑组合 损失估计的影响

在灾害风险管理领域，了解地震等自然灾害可能造成的社会经济损失至关重要。概率地震风险模型的构建非常复杂，需要调整多个参数，这些参数对于表示该地区的地震危险性、暴露资产特征的定义及其对地面运动的易损性至关重要。由于每个模型组件都可能存在很大的不确定性，因此损失估计通常非常不稳定。然而，为了降低概念复杂性和计算负担，在许多实际应用中，这些不确定性要么没有得到充分处理，要么完全被忽略。随后，损失估计的虚假高保真度可能会误导决策策略。因此，评估模型输入参数估计值的变异性对最终风险结果及其相关贡献的影响是很有益的。为此，本研究对伊朗伊斯法罕省的城市地震风险评估结果进行了敏感性分析。系统变异（**systematic variation**）被应用于概率地震危险模型中控制地震发生的参数值的分析，同时，针对不同的风险指标构建了输入输出相对变化曲线，目的是确定对输入不确定性最敏感的参数。本研究的结果可支持风险管理者和从业人员构建地震危险和风险模型。研究发现，古腾堡-里克特关系中的 **a** 值和 **b** 值、最大震级和阈值震级是重要风险指标（例如 475 年损失和年均损失）变化的主要贡献者，其中更频繁的损失通常更为敏感。相关研究成果发表在 2024 年 1 月的 *Seismological Research Letters*。

对建筑物组合进行损失估计分析对于灾害风险减轻至关重要。目前，大多数损失评估研究都使用巨灾风险模型。正确理解模型参数值中不确定性的影响是实现模型准备阶段所需有限资源最佳分配的关键。目前，标准实践中使用的大多数风险评估方法均基于康奈尔大学的开创性工作，该工作引入了概率地震危险性评估（PSHA）的概念，将其作为一种估计重现期的方法。针对单个建筑，人们已经探索了用于分析地震风险模型中不确

定性的替代方法，同时，很多研究分析了输入变化的不同方面。

尽管已经有了一些案例研究，但是，目前对不确定性影响的评估通常仅针对单个模型组件进行，而忽略了它们的传播，缺乏一种全面而系统的方法来分析不确定性的来源，以及它们如何沿着整个风险计算链传播。

在这项工作中，研究人员将为伊朗伊斯法罕市区开发的概率地震风险评估模型作为案例进行了研究。首先，介绍了 PSHA 模型、易损性模型和暴露模型。然后，对风险模型灾害组件的地震发生部分进行了敏感性分析，重点关注截断 MFD (magnitude–frequency distribution, 震级-频率分布) 的参数。主要目的有两个：①了解风险模型中地震发生部分主要输入参数的不确定性如何影响损失评估；②定量化确定它们对损失变化的相对贡献。

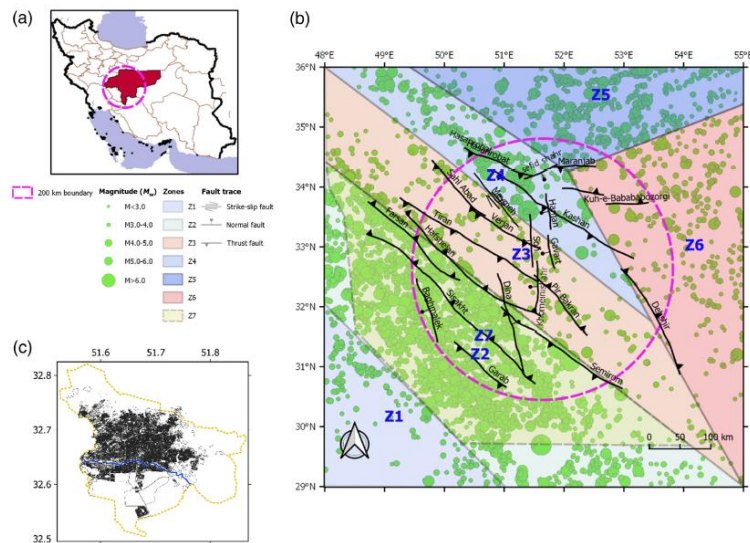


图 1 (a)伊朗地图和伊斯法罕省边界（红色阴影区域）；(b)历史地震的空间分布图、震源区(SSZ)和断层面投影；(c)伊斯法罕市区的范围和生活区的位置

本研究分析了输入参数（控制未来地震的概率建模）的不确定性对伊朗伊斯法罕市城市环境中建筑组合的损失估计的影响，但未考虑地震动预测模型不确定性对损失的影响，因为该主题已在文献中得到广泛讨论。研究人员通过敏感性分析，定量和系统地评估了损失影响，计算了由于输入

参数的修改而导致的不同损失指标的变化，例如，年均损失（AAL）和 100 年、475 年和 1000 年重现期的损失。除少数情况外，研究分析了一个参数的变化对损失估计的影响，没有组合相互作用。



图 2 概率地震危险评估(PSHA)模型中使用的源模型参数的逻辑树结构。需要注意的是，分布式（缓冲区）模型的上限震级对应于断层模型的下限震级

伊斯法罕建筑组合的损失估计是使用可能的未来地震事件的随机目录进行概率计算的，该目录包括附近地区一年内 200 000 次的地震活动。这个次数确保了在 99% 的置信度下，组合估计可在 10% 的精度内保持稳定。敏感性分析确定了组合损失最敏感的危险参数，并定量评估了它们对损失估计的贡献。敏感性分析的参数包括：

(1) a^{GR} 、 b^{GR} ：指数 MFD 的参数。 a^{GR} 是地震活动率，代表给定源（例如区域源或断层系统）的总地震产生力（seismic productivity），表示为大于指定下限震级的事件数的对数。 b^{GR} 是复发曲线的斜率，指示小震级和大震级的相对比率。

(2) M_{max} ：一个关键参数，体现了地震震级的上限。

(3) M_{min} ：指能够对受影响地区造成破坏的最低震级。

(4) M_{thre} : 表示分布式地震事件的最大震级和在断层上建模的地震的最小震级。

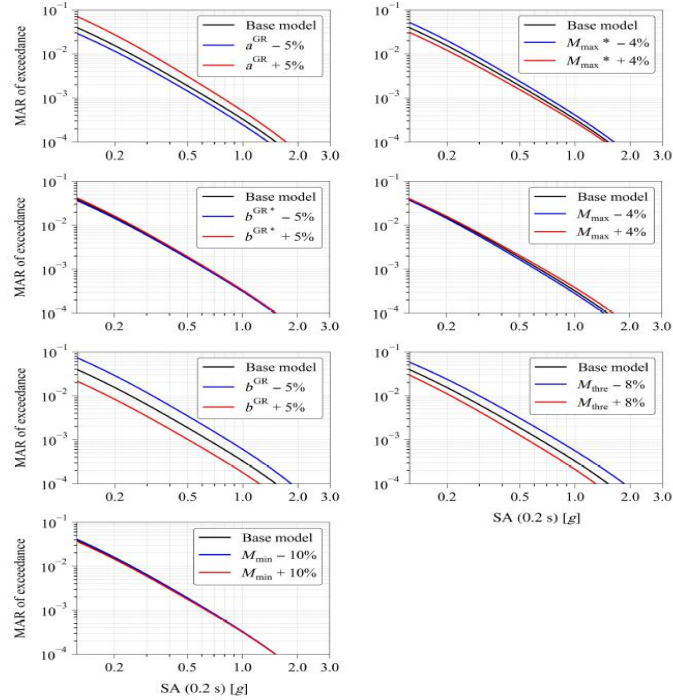


图3 输入参数变化对谱加速度危险曲线的影响

除基本模型已选择的最小震级相当低（即 $M_{\text{min}}=4$ ）之外，结果表明， a^{GR} 、 b^{GR} 、 M_{max} 和 M_{thre} 等发生参数的不确定性会显著影响损失估计。对于 MFD 的 a^{GR} 和 M_{thre} 来说，情况总是如此：高于该值的地震被分配给局部断层，低于该值的地震则被建模为分布式地震活动。对于这些参数，AAL 是最敏感的风险度量，5% 的输入变化会产生高达 50%（对于 a^{GR} 输入而言）和 30%（对于 M_{thre} 输入而言）的输出变化。它们对罕见损失（例如 475 年重现期）的影响较低，但仍然不容忽视（约为 20% 和 10%）。 b^{GR} 和 M_{max} 变化的影响和相对重要性取决于模型中总地震矩率（TMR）是否平衡（应该如此）或不平衡（通常如此）。具体而言，如果平衡， b^{GR} 似乎对所有损失指标的影响很小，而 5% 的 M_{max} 输入变化可能导致 AAL 增加高达 40%。如果没有平衡，情况正好相反，所有风险指标都对 b^{GR} 的改变极为敏感。

当 TMR 不平衡时, 5% 的输入减少可能使 AAL 的变化高达 85%, 对于 475 年的损失约为 40%。

考虑到这项研究的结果, AAL 作为风险指标的实用性意义重大。AAL 是一种流行的风险指标 (例如在保险领域), 其是量化地震事件可能造成的年度财务损失的重要工具。但是, 显著的变异性的存在带来了挑战, 因为它会影响决策信心、风险缓解策略、风险沟通、保险和财务规划以及适当法规的执行。因此, 与其忽视这一指标, 不如提高其可靠性, 鼓励使用先进的建模技术 (即能够考虑和传播整个计算链中不确定性的概率方法)、开展敏感性分析 (如本研究中进行的分析)、或使损失指标的多样化。

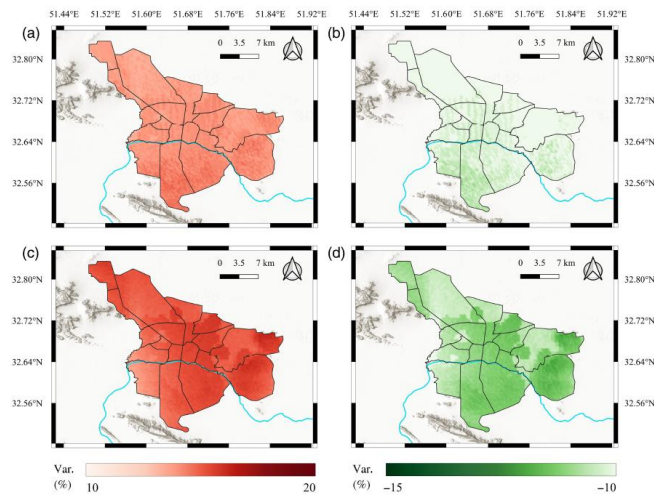


图 4 相对变化危险图, (a) M_{thre} 减少 5%, 重现期 100 年; (b) M_{thre} 增加 5%, 重现期 100 年; (c) M_{thre} 减少 5%, 重现期 475 年; (d) M_{thre} 增加 5%, 重现期 475 年

总体而言, 这项研究的结果强调了建模不确定性如何影响地理密集建筑物组合的地震风险, 并确定了导致地震损失估计不确定性的主要参数。因此, 这些结果可以指导未来 PSHA 的建模工作, 支持以减轻地震风险为目标的风险评估研究。此外, 研究还强调了沟通透明度的重要性, 以更好地理解 and 协调风险管理工作。虽然结果是针对伊斯法罕的研究区域获得的, 但已通过基础模型进行了标准化。因此, 总体而言, 研究结果适用于其他

城市的建筑组合。更明确地说，对于每个输入参数，组合损失的影响（相对于基本模型预测的平均损失百分比变化）在本案例研究之外也具有有效性。但是，具有不同地理扩展的不同资产组合（例如尺寸、暴露特性和易损性曲线）的损失，如那些在区域研究中发现的，将以同样的方式定性地受到本研究中考虑的危险输入参数变化的影响，但每个危险参数的相对影响可能在量上有所不同。

来源：Damiani A, Poggi V, Scaini C, *et al.* Impact of the uncertainty in the parameters of the earthquake occurrence model on loss estimates of urban building portfolios. *Seismological Research Letters*, 2024, 95(1): 135-149.

使用可解释的机器学习和视频数据对地震中的保护行动 决策进行建模

地震对世界各地的社区构成了重大威胁。了解人们在地震期间如何应对快速变化的环境对于降低风险和挽救生命至关重要。本研究旨在利用可解释的机器学习和视频数据研究人们在地震中的保护行动决策。研究人员首先收集了现实世界的闭路电视录像和社交媒体平台上的视频帖子，然后识别并注释了 **2018 年美国阿拉斯加州安克雷奇（Anchorage）7.1 级地震** 期间的环境和人们行为反应的变化。通过使用完全注释的视频数据，研究人员应用了一种广泛使用的机器学习方法 **XGBoost** 来建模和预测人们在地震期间的保护行动（例如蹲下、掩护、抓牢和撤离）。然后，用可解释的机器学习技术揭示不同因素与人们保护行动选择之间复杂的非线性关系。建模结果证实，社会和环境信号在影响不同保护行动的选择概率方面起着关键作用，某些因素（例如地震震动强度和环境中的人数）与选择撤离的概率显示出明显的非线性关系。这些发现可以帮助应急管理者和决策者在地震期间设计更有效的保护行动建议。相关研究成果发表在 **2024 年 3 月的 *Scientific Reports***。

最近，灾害专家提出了几种理论框架来研究人类在地震和野火等紧急威胁下的行为，并提供指导方针来了解人们在不同情况下何时以及为何采取行动。应用最广泛的一个框架是保护行动决策模型（**Protective Action Decision Model, PADM**）。PADM 是一个多阶段概念模型，强调人们在应对环境危害和灾难时的思考和决策过程。影响保护行动决策的因素主要包括：社会信号（包括社交互动、与他人的亲密关系和家庭关切）、环境信号、地震强度和时间特征。其他因素，包括准备程度、先前的地震经历、风险认知和预警信息来源，也被证明在确定保护措施方面很重要。

建模方法主要有两类：统计模型和机器学习。统计模型的准确性较低，灵活性较差。由于机器学习具有灵活的模型结构和较高的预测精度，其在探索复杂（例如非线性）关系和探索性变量之间的相互作用方面显示出巨大的潜力。使用机器学习来模拟地震期间的保护行动的研究仍然很少，然而，这种方法很有价值，因为它可以揭示各种因素之间复杂、不明显的联系，以及它们如何影响个人在此类事件中的选择。

研究人员先从多个来源收集了闭路电视录像数据和社交媒体上发布的个人视频，通过 ELAN（欧洲分布式语料库项目的语言注释器）手动注释数据，使用 Python 将注释转换为数值变量。然后，将数据输入 XGBoost 模型，并使用几个指标评估预测性能。之后，通过计算变量重要性并生成部分依赖图来解释该模型。最后，综合分析建模结果，以了解不同因素对保护行动决策的影响。

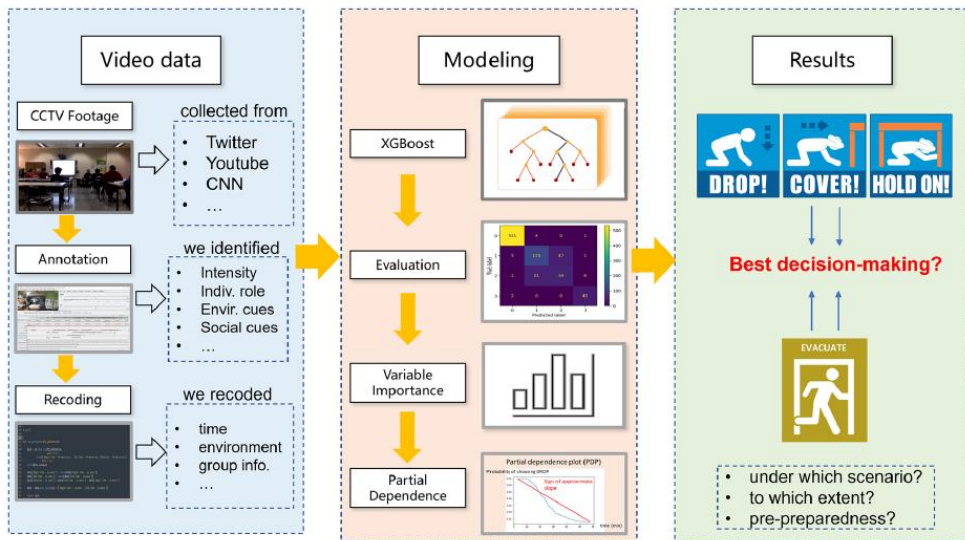


图1 方法论框架

1. 采用可解释的机器学习对保护行动决策进行建模和解释的优势

首先，准确性。机器学习模型在预测准确性方面可以胜过传统统计模型。具体而言，机器学习模型不需要预先指定的模型结构，因此它可以有

效地捕获变量之间的相互作用。本研究中，机器学习模型在预测疏散撤离时表现出最高的预测准确率，其次是蹲下、掩护和抓牢。撤离预测的高性能可能是因为疏散通常具有独特的特征，例如决策者靠近出口。

其次，非线性关系。使用机器学习模型的另一个重要优势是机器学习可以自动捕获解释变量和目标变量之间的非线性关系。这一优点使研究人员能够识别每个特征与保护行为之间更详细的非线性关系。而传统的统计模型通常只提供关联的方向，即负向或正向。同时，被调查行为之间的关系可能表现出更大的系统多样性，而这些多样性是传统模型无法捕捉到的。

2. 主要发现

在所有预测因素中，“决策者是否是领导者”显示出最高的预测重要性（15.65%）。这一发现强调了社交互动在确定保护行动方面的关键作用。当关注领导者/追随者变量与每种行为的关联时，研究发现决策者是领导者时不太可能采取任何保护行动。一个可能的原因是，观察到的领导者大多是家长、教师，他们倾向于立即提供指导，并向可能需要帮助的个人（如儿童或学生）伸出援手，而不是自己立即采取保护行动。

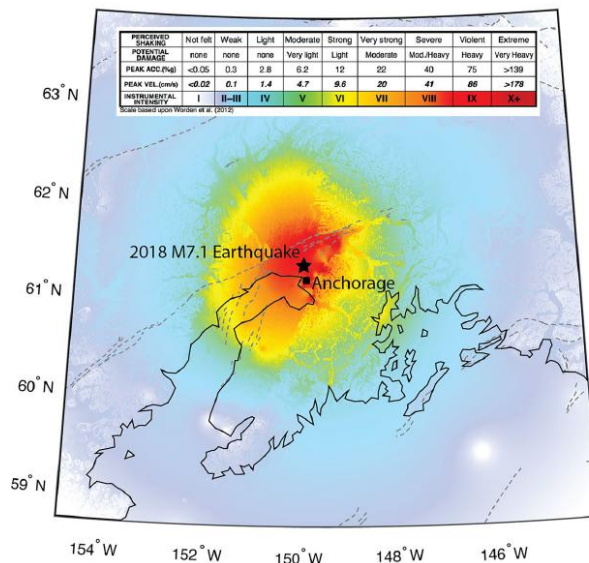


图2 美国地质调查局报告的2018年7.1级安克雷奇地震附近的震动强度分布。震中（黑星）位于安克雷奇市人口中心（黑色方块）的正北方向，黑线表示海岸线，灰色虚线表示主要断层

研究发现，到出口的距离对保护行动的选择具有预测意义。即靠近出口的决策者更有可能撤离，而距离出口较远的其他人可能会选择蹲下并寻找掩护。然而，距离出口的阈值，或者更根本的是，对出口距离的感知，是否可以决定一个人是更有可能选择撤离，还是选择蹲下、掩护、抓牢，仍然未知。

环境中的人数是保护行动的有力预测因素。然而，人数与响应概率之间的具体关系很复杂。一方面，群体规模与紧急情况（例如火灾警报）的响应概率之间的关系并不是单调的。同时，群体中响应的个体越多，其他人也选择响应的机会就越大。当人数达到五人时，选择撤离的概率突然下降，然后几乎保持稳定。研究还发现，在人数达到五人之前，选择撤离和掩护的概率显著增加，但随着人数的增加，这一概率逐渐下降。人数越少，找到掩护的机会可能就越多。然而，对于更多的人而言，找到有用掩护可能会变得更加困难。

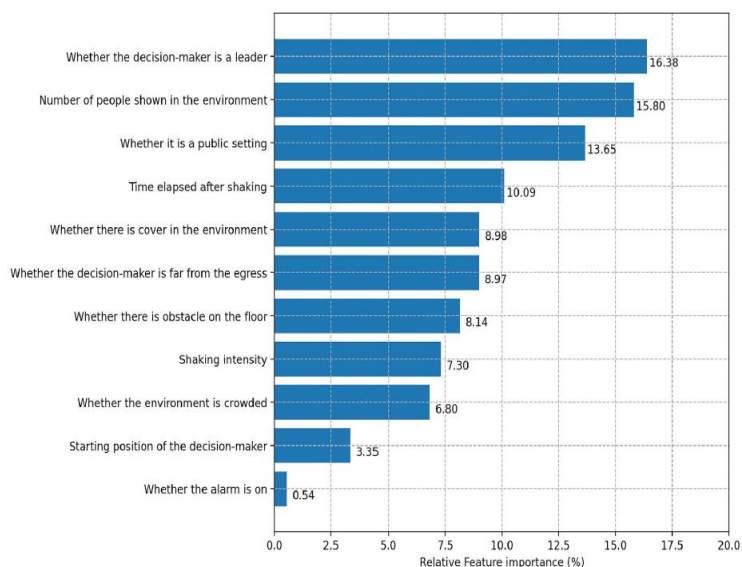


图3 各个变量的重要性

另一个有趣的变量是震动强度。实证结果表明，震动强度也会影响有关保护行动的决策。当震动强度较弱时，人们可能能够四处走动并寻找出

口进行撤离。当震动强度增大时，震动的强烈性质可能会阻碍个人的行动，并降低撤离的可能性。

值得注意的是，先前的研究发现，个人经验和风险认知在人们的保护行动决策中也发挥着重要作用。然而，无法通过视频数据从每个人身上捕捉到这些因素。本研究中基于机器学习的方法，即使排除个人经验和心理因素，在预测决策者的保护行动方面也显示出不错的效果，为地震期间的响应行为提供了新的见解。

3. 小结

本研究利用从 2018 年安克雷奇地震中收集的闭路电视录像和视频，研究了机器学习在保护行动决策建模中的应用。整体而言，本研究的贡献有两方面。首先，研究表明，机器学习方法具有强大的地震期间保护行动决策建模能力。具体而言，它们不仅可以提供比常用的传统统计模型更好的预测精度，而且还可以提供更广泛的行为解释。特别是，机器学习模型可以自动捕捉各种因素（例如社会和环境信号）与保护行动选择（即蹲下、掩护、抓牢、撤离）之间复杂的非线性关系。其次，本研究是首批使用现实世界的闭路电视录像和视频来研究地震期间保护行动的研究之一。结果表明，此类视听数据在增进对紧急情况下人类行为的理解方面具有巨大潜力。此外，这些结果和见解可进一步用于改进地震预警系统的设计。

但是，这项研究也存在局限性。这项工作可以概念化为一项试点研究，原因有几个。首先，这项研究只采用了 17 个视频（尽管有 1593 个独特的行为状态）进行建模。未来的研究可以通过整合来自多个地震事件的经验数据来扩大视频样本量，这不仅可以增强结果的稳健性，还可以更全面地了解不同背景下的保护行动决策过程。其次，虽然利用闭路电视录像和视频数据显示出巨大的潜力，但这些来源未能准确捕捉某些关键方面，例如

社会人口因素、先前经验和个人对风险的感知。事实上，先前的研究表明，这些因素也会影响紧急情况下的决策。未来的研究可能需要考虑整合多源数据，例如将调查与闭路电视录像和视频相结合，以更好地了解各种因素如何与人们对时间等问题的认知相互作用，最终影响保护行动决策。

来源：Zhang X, Zhao X, Baldwin D, *et al.* Modeling protective action decision-making in earthquakes by using explainable machine learning and video data. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 5480.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所