中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 7 期: 1642 ~ 1655
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 复杂恶劣条件下水电开发基础科学问题专刊

论坝址地震动参数评估方法

王进廷[1*], 王向超[2], 任翔[1], 黄荣杰[1], 张楚汉[1]

1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084
2. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124
* E-mail: wangjt@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2025-12-17; 接受日期: 2026-04-16; 网络版发表日期: 2026-07-10
国家自然科学基金(批准号: 52494971, 52339007, 52409159)和水电水利规划设计总院项目(编号: ZY-KJSD-20240009)资助

摘要 高坝大库工程通常选址于地形陡峭, 地质条件复杂的高山峡谷地区, 这些区域大多处于地震构造活跃带, 强震作用成为威胁工程长期安全的最主要因素之一, 如何科学合理评估坝址地震动参数成为高坝抗震设计与安全评价的关键问题. 本文针对高坝工程抗震需求, 从震源模拟、地震动预测、地震危险性分析三方面, 评述了当今常用的坝址地震动参数评估方法, 提出了用于高坝抗震设防的坝址最大可信地震动参数确定方法, 以期为重大水利水电工程的抗震安全评估提供技术参考.

关键词 地震动参数, 震源, 地震动预测, 地震危险性, 最大可信地震

1 引言

我国水能资源丰富的西部地区强地震活动频繁, 高坝大库一旦发生地震溃决, 将对下游地区人民的生命财产安全造成巨大损失. 因此, 确保高坝工程的抗震安全性具有极其重要的现实意义. 在高坝抗震设计中, 坝址地震动参数的合理评估, 是后续大坝动力分析以及安全评价的前提条件[1].

工程场址地震动受震源断层的破裂机制、传播路径的波速结构、局部场地的地质地形条件三大因素的显著影响[2~5]. 这些因素差异, 导致不同的地震在同一场址或同一地震在不同的场址均可能产生显著不同的地震动[6~10], 这种复杂的地震动特性会直接影响工程结构的动力响应特性和破坏模式[11~13], 使其成为当前工程抗震领域一个多学科交叉研究的热点与难点问题.

为科学合理评估工程场址地震动参数, 研究人员围绕震源模拟、地震动预测及地震危险性分析等关键问题开展了大量研究[14~21]. 由于地震活动具有高度复杂性和不确定性, 场址地震危险性分析通常采用基于经验统计的地震动预测方程(即衰减关系)[14]. 现有基于衰减关系的地震动预测方法在工程实践中已形成较为成熟的应用体系, 积累了丰富的工程经验[18,22~25]. 然而, 衰减关系忽略或简化震源断层破裂的时空演化过程, 地震波传播的物理机制以及坝址局部地质地形条件的影响, 导致结果存在一定局限性[26]. 此外, 由于近断层强震观测数据的严重匮乏, 衰减关系对于临近工程场址的强震动参数的预测也面临挑战.

引用格式: 王进廷, 王向超, 任翔, 等. 论坝址地震动参数评估方法. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 1642–1655
Wang J T, Wang X C, Ren X, et al. On the evaluation methods of ground motion parameters at dam sites (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 1642–1655, doi: 10.1360/SST-2025-0416

© 2026 《中国科学》杂志社

近年来, 随着计算技术的发展, 基于物理机制的地震动模拟方法取得了显著进展[27~29]. 该方法能够综合考虑断层破裂特征, 地震波传播规律和局部场地效应等关键因素, 从而更合理地预测工程场址地震动特性. 正因如此, 将物理模拟方法引入工程场址地震危险性分析已成为研究热点, 并逐渐发展为该领域的重要趋势, 为提升高坝等重大工程的抗震安全评估提供了新的技术途径[30].

综上所述, 坝址地震动参数评估是一个典型的多学科交叉研究领域, 涉及水利工程、地震工程、地质学等多个学科的理论与方法. 由于专业背景的差异, 高坝工程设计与研究人员对其中的某些概念和方法可能存在理解不足或混淆的情况. 为此, 本文聚焦震源模拟、地震动预测和地震危险性分析三个关键环节, 系统阐述当今常用的坝址地震动参数评估方法, 特别针对高坝工程实践中常见的概念混淆问题进行解析, 以期为相关研究和工程实践提供参考.

2 震源模拟方法

震源是地震动的激励源. 根据弹性回跳理论, 地壳应变能持续累积导致断层失稳破裂, 从而激发地震波传播. 断层滑动发生在具有一定长度和宽度的离散断层面上, 地震学中将断层两侧相对滑动平均位移, 断层面积和岩石平均剪切模量的乘积定义为地震矩M_0, 由此可计算常用的矩震级M_{w}, 描述地震强弱.

断层位错前缘的时空扩展特征, 破裂传播过程以及滑动持续时间等因素, 对地震震源具有重要影响. 为了合理描述地震震源, 需要对断层面上滑动时间、滑动速度、滑移量和滑动角的时空分布进行建模, 即认为断层的滑动从断层面上某一个点开始, 经一定的破裂速度传播到整个断层面上, 其上每一个点都具有不同的滑移量、滑动速度和滑动角. 按照是否考虑地震发震断层的破裂尺度, 常用的震源模型可分为点源和面源两种.

2.1 点源模型

小震的发震断层尺度往往不到数公里. 按照断层尺度经验关系[31], 矩震级5级地震的发震断层长度不到3 km, 对于模拟数十公里(震源距)外的场址地震动, 震源断层几何尺寸一般可以忽略. 这种情况下, 可以假设震源为一个点, 即点源模型. 因此, 点源模型只考虑该点滑移量的时间分布, 而不具有空间分布. 对于小震来说, 采用点源模型, 模拟地震动就可以在宽频带范围内与实测记录达到较好的吻合度[32].

在进行地震动数值模拟时, 通常将断层滑动等效为可以产生相同地震辐射的双力偶, 用双力偶矩张量表示一个点源, 矩张量各个分量的大小代表了该点源在不同方向滑移量的大小[33]. 除了滑移量的绝对值外, 断层的破裂从滑动开始到滑动停止并非一个瞬时过程, 位错从初始时刻到最终时刻的整个时间过程由震源时间函数(source time function)表征[34], 如图1所示, 滑动开始的时间称为成核时间或破裂时间(nucleation time), 到滑动结束经历的总时间称为上升时间(rise time), 其中滑动速度过程一般定义为单个三角形函数或者组合型三角函数[35,36], 以及形状接近三角形的光滑函数[37,38].

除了时域上的震源时间函数, 也常在频域上使用震源谱描述震源辐射特征, 其一般形式可表示为[39]

$$A(\omega) = CM_0S(\omega), \tag{1}$$

其中, C是比例因子, $S(\omega)$描述了震源谱的形状. Brune[40]将地震过程视为在弹性介质中圆盘断层面上剪切应力的突然释放, 由此推导出远场地震横波的频谱, 即目前最常用的ω^2模型:

$$S(\omega) = \frac{1}{1+\left(\frac{\omega}{\omega_{\mathrm{c}}}\right)^2}, \tag{2}$$

其中, ω_{c}为拐角圆频率. 许多研究者对式(2)进行了修

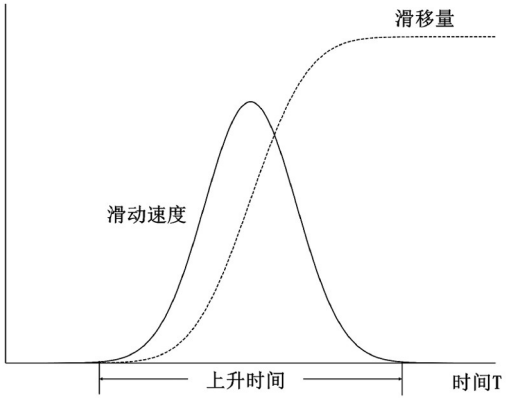


图 1　震源时间函数示意图

Figure 1　Schematic diagram of the source time function.

正，在此基础上发展出了其他频率模型[41~44]．除此之外，还在静拐角频率模型的基础上发展了动拐角频率模型[45,46]．

2.2 面源模型

对于大地震而言，由于其发震断层尺度可能达到数十乃至数百公里，如2008年汶川地震的发震断层破裂长度超过300 km[47]．对于邻近发震断层的工程场址，断层几何形状、断层面上滑动的不均匀性和方向性等效应，都会显著影响地震动的振幅、频率成分和持续时间等特性．因此对于大震，特别是考虑近断层效应，点源的假设不再适用，需要采用考虑发震断层尺度，滑动时空不均匀性的面源模型进行模拟．

在地震动数值模拟中，根据对面源的滑动过程模拟方式又可细分为两种类型：运动学模型和动力学模型[36]．运动学模型假定断层破裂部分的滑动作为断层平面坐标和时间的已知或先验函数，而与发震应力无关．断层面上的最终滑动分布以及断层面上滑动的位置和时间变化，可以根据地震记录数据进行反演分析获得，也可以通过经验方法确定[3,36,48]．为准确描述震源特征并实现地震动模拟，需要考虑断层的走向、倾向、滑动角、长度、宽度等全局震源参数以及地震矩、应力降、破裂传播速度和滑动时间函数等局部震源参数．运动学震源模型将整个破裂断层面划分成若干矩形子断层，该模型中的每个子断层都假定为一个点源[49]，定量描述断层上滑动的空间分布和方向，破裂在断层表面上的扩展速度以及断层上每个点滑动的时间，又称有限断层模型[49,50]，如图2所示．

动力学模型断层破裂部分的滑动是区域地质构造应力的函数，滑移量、方向性及破裂传播特征(包括速度和路径)受区域应力场分布、断层带岩体本构关系和破裂前沿应力重分布过程的共同控制[51,52]．在动力学震源模型中，首先需要确定发震前断层的初始应力分布，使得断层在应力场下遵循给定的摩擦准则自发破裂．但由于无法观测到发震断层的真实破裂过程，目前对断层破裂时的摩擦规律以及断层震前应力分布情况的认识还比较缺乏．相比之下，运动学震源模型仅需输入地震矩、断层滑移量分布和震源时间函数等基本参数即可实现模拟[53]．因此，在现阶段的工程应用中，多采用运动学震源模型，特别在高坝等重大基础设施的抗震安全评估中发挥着关键作用[54~56]．而在研究断层破裂前兆特征，破裂传播动力学机制等基础科学问题时，动力学震源模型仍保持着独特的理论优势和研究价值[57]．

3 地震动预测方法

地震动预测是指在确定震级与断层位置的前提下，预测地震发生时工程场址的地震动强度．下面介绍三种常用的地震动预测方法：基于统计衰减关系的地

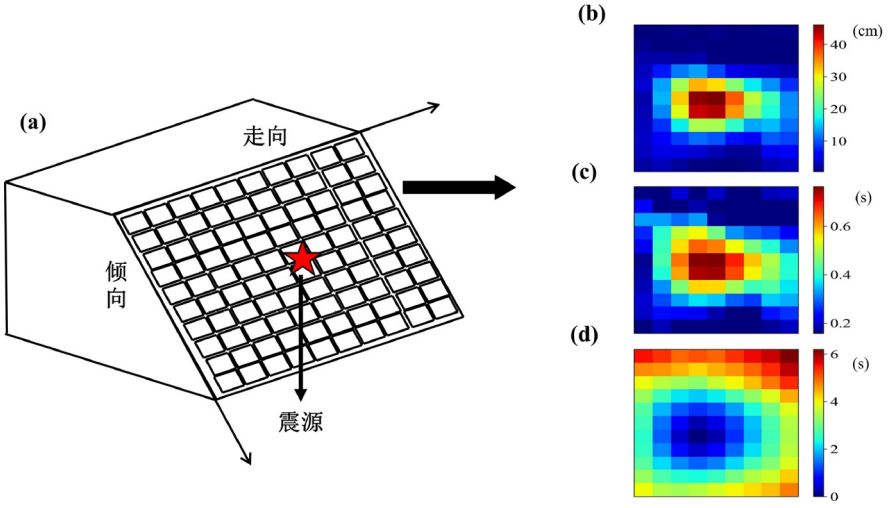


图 2 (网络版彩图)有限断层模型示意图. (a) 断层面; (b) 滑移量分布; (c) 上升时间分布; (d) 破裂时间分布

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of the finite fault model. (a) Fault plane; (b) slip distribution; (c) rise time distribution; (d) rupture time distribution.

震动预测方法, 基于半经验半理论的随机有限断层法, 以及基于物理机制的直接数值模拟法. 三种方法主要特点如表1所示.

3.1　基于统计衰减关系的地震动预测方法

地震动预测方程(ground motion prediction equations, GMPEs), 也称为衰减关系(attenuation relation), 是以震级、震中距等参数计算地震动强度的方程[58,59]. 地震动预测方程不考虑地震波激发与传播的物理机制, 完全基于历史地震记录回归统计. 从2008年开始, 美国太平洋地震工程研究中心联合多家研究机构陆续发布了新一代的美国地震动衰减关系NGA-West[23], NGA-West2[24], NGA-East[25]. 如Abrahamson等人[60]2014年提出的地震动中值预测公式(称为ASK14模型)如下:

$$\begin{aligned}\ln Sa(g) = {} & f_1(M, R_{\rm rup}) + F_{\rm RV} f_7(M) \\ & + F_{\rm N} f_8(M) + F_{\rm AS} f_{11}(CR_{\rm jb}) + f_5(\hat{Sa}_{1100}, V_{\rm s30}) \\ & + F_{\rm HW} f_4(R_{\rm jb}, R_{\rm rup}, R_x, R_{y0}, W, dip, Z_{\rm TOR}, M) \\ & + f_6(Z_{\rm TOR}) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{\rm s30}) \\ & + Regional(V_{\rm s30}, R_{\rm rup}),\end{aligned} \tag{3}$$

式中, M为地震震级, $CR_{\rm jb}$为形心Joyner-Boore距离(km), $Z_{\rm TOR}$为断层顶部的深度(km), $F_{\rm RV}$为逆断层型地震标志, $F_{\rm N}$为正断层型地震破裂标志, $F_{\rm AS}$为余震标志, $R_{\rm rup}$为断层距离(km), $V_{\rm s30}$为地表30 m深平均剪切波速(m/s), $Z_{1.0}$为场址剪切波速1.0 km/s处的深度(m), $\hat{Sa}_{1100}$为$V_{\rm s30}$ = 1100 m/s峰值谱加速度中值(g), $F_{\rm HW}$为上盘标志, $R_{\rm jb}$为Joyner-Boore距离(km), R_x为垂直于断层走向距离断层顶部边缘的水平距离(km), R_{y0}为平行于走向距断层端部的水平距离(km), dip为断层倾角(度), W为断层沿倾向宽度(km), f和$Regional$为函数, 具体定义请参见文献[60].

由于地震过程的复杂性和随机性, 对于地震动频谱特征的理论模型研究长期滞后于实践. 基于实测记录统计回归分析的衰减关系目前仍然是工程抗震最重要的地震动参数预测方法. 胡聿贤和张敏政[61]提出根据我国烈度衰减关系由美国西部数据转换得到地震动参数衰减方程, 俞言祥等人[62]给出了新一代的衰减关系, 用于制定第五代《中国地震动参数区划图》(GB 18306-2015).

然而, 由于大地震复发周期长, 发生概率低, 全球范围内普遍存在大震级地震强震记录不足的问题, 特别是我国现代地震观测工作起步较晚, 本土地震记录数据尤为缺乏. 这一数据缺陷在近断层区域表现得更加突出, 导致现有地震动预测方程难以准确刻画近断层区域复杂的地震动特性, 包括方向性效应、滑冲脉冲等典型近断层地震动特征. 这种数据局限性使得基于统计方法的地震动预测在近断层区域存在明显的不确定性, 亟需通过物理模拟等方法加以补充和完善[30,63,64].

3.2　基于半经验半理论的随机有限断层模拟法

随机有限断层法(stochastic finite-fault simulation)将整个断层划分为若干个子断层, 每个子断层都被视为一个点源, 采用随机点源法计算地面运动, 然后在时域中考虑时间滞后进行叠加, 获得整个断层在场址生成的地震动加速度[65]:

$$a(t) = \sum_{i=1}^{nl} \sum_{j=1}^{nw} a_{ij}(t + \Delta t_{ij}), \tag{4}$$

其中, nl和nw分别是沿主断层长度和宽度的子断层数量($nl \times nw = N$), Δt_{ij}是第ij个子断层辐射波到达观测

表 1　地震动预测方法

Table 1　Ground motion prediction methods

方法	震源模型及参数	地震波传播过程	场地效应	输出结果
基于统计衰减关系的地震动预测方法	点源模型 (震级、倾角、断层宽度等参数)	地震记录回归统计公式	无	峰值地面加速度(peak ground acceleration, PGA)与反应谱
基于半经验半理论的随机有限断层法	有限断层模型 (震级、断层长度、断层宽度、震源谱、应力降、滑移量等参数)	假设均匀地壳, 采用简化公式近似表征	假设平坦地形, 采用简化公式近似表征	傅里叶谱以及随机合成地震动时程
基于物理机制的直接数值模拟法	有限断层模型 (震级、断层长度、断层宽度、滑移量、上升时间、破裂方向、破裂时间等参数)	考虑真实区域岩体特性, 求解波动方程	实际地质地形条件	符合实际地震物理机制的空间地震动场(包含所有地震动强度指标参数)

点的相对延迟时间. $a_{ij}(t)$采用随机子源方法计算, 通过生成一个具有随机特性的瞬态时间序列, 其频谱与期望的傅里叶振幅谱相匹配.

对于断层上每个子断层, 地震动水平加速度分量均值傅里叶谱$A(f)$由震源项、传播项、场地项共同确定:

$$A(f) = [C_0 M_0 S(f)] \cdot [G(R)D(f)] \cdot [P(f)Z(f)], \quad (5)$$

式中, C_0为与频率无关的比例因子, $S(f)$为"ω平方"型震源谱[39,40,66], $G(R)$为几何衰减因子, $D(f)$为阻尼衰减因子, $P(f)$为高频衰减因子, $Z(f)$为局部场地效应因子. 关于这些参数的具体定义, 可参考相关文献[39,45]. 随机有限断层法可使得一组零均值的高斯白噪声傅里叶谱在平均意义上接近式(5)所表示的目标谱, 从而将这组高斯白噪声的平均谱作为地面运动参数的模拟结果, 随机时程则根据工程需要选取. 较早的随机模拟程序包括基于点源模型的SISIM[67]和基于有限断层的FINSIM[41,68]等. Motazedian和Atkinson[45]在有限断层基础上引进了动拐角频率, 相应的改进程序为EXSIM. Boore详细地对基于点源的SMSIM和基于有限断层的EXSIM这两个程序进行了比较[69], 讨论了某些参数在二者之间的转换关系. 最近, Yu等人[70]建立了能够合理估计地震动低频分量的宽频带随机有限断层方法.

随机有限断层法具有计算效率快, 可以直接合成地震动时程等优点. 在地震过程细节未知的情况下, 随机模拟法能较好地描述地震动高频随机性, 且计算过程简单易行. 如前文所述, 该方法通过定义具有一定形式的比例因子来考虑震源、介质传播、场地效应三大要素, 这些比例因子通常基于理想假设或经验关系. 如几何衰减因子$G(R)$中常用的三段式几何衰减模型[42]是基于地壳均质、厚度50 km等假设得到的; 高频衰减因子$P(f)$通常使用κ滤波器[71]或高频滤波器[39]来解释加速度傅里叶谱中频率高于一定值时谱值快速下降的现象. 因此, 随机有限断层法是一种半经验半理论的方法, 无法直接得到场址三向地震动时程, 难以考虑复杂地形下对大跨度结构动力响应有重要影响的场址地震动场空间非均匀性.

3.3 基于物理机制的地震动直接数值模拟法

基于物理机制的地震动直接数值模拟(physics-based direct numerical simulation of ground motion), 指通过数值方法预测地震产生的地面运动, 显式地考虑震源的物理特性和地震波的传播机制[65]. 与随机有限断层模拟法和基于统计衰减关系的方法不同, 基于物理机制的地震动直接数值模拟法是基于弹性动力学原理, 采用确定的震源和路径模型, 将地震动表达为震源时间函数和格林函数的卷积[72], 通过在时域内逐步求解波动方程, 模拟地震波从震源经由复杂的介质最终到达局部场地的整个传播过程. 常用的地震动数值方法包括有限差分[73]、有限元法[74]、谱元法[75]等. 有限差分处理复杂介质和起伏剧烈的地形比较困难, 传统有限元法则在计算中易出现伪波和频散. 谱元法是一种结合了有限元法和伪谱方法的高阶有限元方法, 它先对求解域按照有限元网格划分单元, 然后在每一个单元上进行全域谱展开求解, 既具备有限元法处理边界和介质的灵活性也具有谱方法的求解精度[76]. 由于一个谱单元内, 插值点位置与积分点位置重合, 使得质量阵为完全对角阵, 提高了计算效率, 适用于大规模并行计算.

在以往的地震动数值模拟中, 由于震源模型局限性以及计算资源的制约, 有效模拟频带通常被限制在1 Hz以下的低频范围. 为此, 国内外大量研究人员围绕宽频带震源模型开展了大量研究[3,36,77]. 对于工程抗震关注的0~10 Hz宽频带地震动, 基于物理机制的直接数值模拟面临三方面关键挑战: 其一, 震源高频辐射与断层非平稳破裂过程强相关, 传统点源和简化有限断层模型难以同时刻画低频与高频能量在断层面上及时空演化中的复杂分布; 其二, 10 Hz 量级的有效频带对传播介质与地形模型的空间分辨率提出了很高要求, 在三维强非均匀介质与复杂地形条件下计算量急剧增加; 其三, 最大可信地震危险性评估往往需要数十万至数百万次情景地震的统计, 单纯依赖逐场三维正演难以满足工程效率需求.

针对上述瓶颈, 在震源建模方面, 本文作者提出了多层震源模型[78], 利用断层破裂的自相似性将震源划分为多层, 并允许滑移量、上升时间与破裂时间等参数在断层面上独立变化, 从而能够更合理描述高、低频能量在不同破裂阶段与不同空间位置的复杂分布. 在场地模型方面, 宽频带数值模拟对三维速度结构与地形精度高度敏感. 针对重大工程场址, 通常可利用工程地质勘探成果提供的精细局部波速信息, 与可获得的区域三维速度模型进行多源数据融合, 以构建兼

顾区域路径效应与局部场址精细结构的三维波速模型. 在计算效率方面, 面向地震危险性评估所需的海量情景地震, 本文作者提出采用伴随模拟获得场址到潜在震源区的应变格林张量, 再结合多层震源模型计算子断层格林函数, 从而在无需逐场正演的情况下快速合成大量情景地震在场址的宽频带地震动, 并开展统计分析确定工程所需分位值及代表性情景[79]. 基于上述关键技术链条, 建立的宽频带地震动模拟方法已通过典型地震实测记录的模拟对比应用得到验证[78], 为近断层高坝工程0~10 Hz宽频带地震动评估提供了新的技术途径.

4　场址多震源环境下的地震危险性分析方法

地震危险性分析(seismic hazard analysis)是评估工程场址可能遭受的地震影响, 其核心在于量化未来一定时期内工程场址可能遭遇的地震动强度及其发生概率. 地震危险性分析主要有两种方法: 概率地震危险性分析(probabilistic seismic hazard analysis, PSHA)和确定性地震危险性分析(deterministic seismic hazard analysis, DSHA). DSHA根据地震构造或者历史地震确定一组或几组震级M和震中距R的M-R组合来考虑最不利的地震情景(critical scenario). 因此, DSHA通常会给出场址地震危险性的上限值. PSHA考虑地震发震震级概率、震源空间分布概率以及衰减关系的不确定性, 计算给定场地的地震危险性[80]. 因此, 它为不同重现期的地震危险性提供了不同的地震动参数值. 近年来, 本文作者提出了最大可信地震危险性分析方法(maximum credible earthquake analysis, MCEA)[79,81], 针对最大可信地震, 该评估体系采用基于物理机制的宽频带地震动直接数值模拟方法, 考虑坝址周边区域特定断层, 传播路径以及工程场址地质地形条件等关键因素, 生成海量最大可信地震情景, 统计坝址地震动参数概率分布, 确定工程设防参数. 几种方法的比较如表2所示.

4.1　概率性地震危险性分析法

PSHA是美国学者Cornell[82]于1968年提出的一种分析方法, 至今仍广泛用于重大工程场地的地震安全性评估[83,84]. 该方法认为某一特定区域内未来将要发生的地震活动的时空分布, 强度满足一定的概率分布. 其基本分析包括四个步骤.

(1) 识别和表征对场址存在威胁的潜在震源区, 并根据空间几何关系计算震中距概率分布. 震源区形状一般为多边形平面状, 震源按照一定概率出现在各个潜在震源区的不同位置, 通过简单的几何计算便可得到每个震源区内震源点对应的震中距R的概率密度函数$f_{Ri}(R)$.

(2) 基于Gutenberg-Richter复发关系计算震级-频度曲线, 确定发震震级概率分布. Gutenberg-Richter复发关系可以表示为[85]

$$\log\lambda_m = a - bM, \tag{6}$$

式中, λ_m表示某区域在一定时间段内发生震级超过M的地震事件的频率; a和b为常数, 由一段时间该区域的统计资料回归得到.

式(6)未对震级M的范围进行限制. 事实上在工程实践中, 震级低于某个值$M_{\min}$的小震或微震并不能对工程场地造成影响, 不需考虑; 另外, 由于发震断层尺度限制性, 该区域必然存在一个最大震级$M_{\max}$. 因此在工程感兴趣的震级区间($M_{\min}$, $M_{\max}$)内, 某一震级M的概率密度函数写成

表 2　地震危险性分析方法

Table 2　Seismic hazard analysis methods

方法	震源模型			地震动预测方法	地震动强度	评价依据
	震源位置	震级	破裂过程			
概率性地震危险性分析(PSHA)	均匀概率分布	震级-频度关系	无	GMPEs	概率分布	设定超越概率
确定性地震危险性分析(DSHA)	确定	确定	无	GMPEs	确定	确定值
最大可信地震危险性分析(MCEA)	确定	确定	时空不确定	基于物理机制的地震动模拟	概率分布	设定分位数

$$f_M(M)=\frac{\beta\exp[-\beta(M-M_{\min})]}{1-\exp[-\beta(M_{\max}-M_{\min})]},\tag{7}$$

其中, $\beta=b\ln 10$.

(3) 根据地震动参数随距离和震级的衰减关系, 计算给定震级和震中距时地震动参数的超越概率. 对于某一震中距R和某一震级M, 由地震动预测方程可以直接估计出相应的地震动参数.

(4) 综合考虑地震震级, 位置和地震动强度的不确定性, 基于全概率理论计算场址地震动超越某一强度的年出现率:

$$P(IM\geqslant x)=\sum_{i=1}^{N_{\text{sources}}}\lambda_i(M>M_{\min})\times\int_{M_{\min}}^{M_{\max}}\int_0^{R_{\max}}P(IM\geqslant x\mid M,R)f_{Mi}(M)f_{Ri}(R)\mathrm{d}R\mathrm{d}M,\tag{8}$$

式中, $P(IM\geqslant x)$表示某一场址的地震动参数超越给定值x的年出现率; λ_i表示震源i每年发生震级大于$M_{\min}$的地震频率; $f_{Mi}(M)$和$f_{Ri}(R)$分别表示震源i的震级和距离概率密度函数; $P(IM\geqslant x\mid M,R)$表示对于给定的震级M和震中距R, 地震动参数指标$IM\geqslant x$的条件概率; N_{sources}表示所考虑的潜在震源数.

在确定年超越率$P(IM\geqslant x)$以后, 假定地震事件的发生在时间上符合泊松模型, 可以得到一定时间段t内地震动参数的超越概率

$$P_t(IM\geqslant x)=1-\exp[-t*P(IM\geqslant x)].\tag{9}$$

由此, 概率方法可以给出场址不同年限内不同超越概率的基岩峰值加速度和场地反应谱等地震动参数. 若研究的参数为PGA, 则通过该曲线和假定地震事件发生在时间域内的模型为泊松过程, 就可以得到一定年限内某一个指定概率基准(抗震设防标准)的PGA值, 如一般民用建筑为50年超越概率10%[86], 大(1)型水利水电工程壅水建筑为100年超越概率2%[87]. 若研究的参数为反应谱, 则需要给出各个周期所对应的谱加速度(spectral acceleration, SA)[22], 对于某一个周期T, 其对应的SA是各个震源区的综合贡献. 此时给出的某一超越概率下的谱称为一致概率谱(uniform hazard spectrum, UHS), 是不同地震的包络[88]. 如需进一步由此合成地震动时程, 则还要需要根据白噪声合成或根据已有时程进行调整, 使其满足时域, 频域非平稳性[89,90].

一致概率谱可认为是多种类型地震的包络, 谱形偏于保守. 将一致概率谱用于特定工程结构的地震响应计算, 则表示该结构同时受到不同的地震作用影响, 然而这在实际情况下几乎是不可能出现的, 因此一致概率谱在水工建筑物抗震设计中应用并不广泛, PSHA的主要作用是确定场地的设计PGA.

4.2 确定性地震危险性分析法

DSHA是在概率分析出现之前被普遍采用的一种地震危险性分析方法, 不考虑地震的复发周期. 在工程应用上, 专门针对某一场或几场特定地震, 研究特定场地的地震动参数. 由于采用了全球强震记录的震级和距离衰减关系的统计规律, 其内涵反映了震源和介质参数的随机性, 得到的地震动参数取其均值+一倍方差. 确定性方法基本分析步骤如下.

(1) 识别和表征能够在场址产生强地震动的所有震源. 震源特征包括定义每个震源的几何形状和震级上限. 每个震源的几何形状可以是点、线、区域或体积.

(2) 为每个震源区选择震源到场址的距离参数. 在大多数DSHA中, 选择震源和场址之间的最短距离, 该距离可以是震中距或震源距.

(3) 选择控制性地震. 将各震源的震级上限和距离代入衰减关系, 选择在场址产生最强地震动的地震为控制性地震.

(4) 定义地震危险性. 场址的地震危险性通常使用控制性地震在现场产生的地震动来定义, 包括峰值加速度、峰值速度、反应谱等.

确定性分析方法没有地震发生概率的概念, 而是针对最不利的情况进行设计, 符合地震灾害是由某一个具有明确物理特性参数的地震事件所引发的事实. 对于一些重大工程, 不仅关心在其使用年限内遭遇某一地震烈度的超越概率, 同时也需要考虑最极端情况的地震, 应对任何可能的不测事件, 因此确定性分析方法对于大型关键工程地震风险评估同样重要[1].

4.3 最大可信地震危险性分析法

最大可信地震指的是根据地震学和地质学证据, 坝址区域某一断层可能发生的最大震级的地震. 在最大可信地震实际发生之前, 其断层破裂的时空过程是未知的、不确定的, 存在数以万计震源参数的变化组合, 由此对应数百万、数千万种可能地震情景. 本文

中的MCEA定义为: 考虑最大可信地震发生时的断层破裂过程不确定性, 采用直接数值方法, 遍历模拟数以万计震源参数变化组合形成的海量地震情景, 得到目标场址地震动工程参数值的概率分布. 与PSHA方法相比, MCEA考虑确定的发震断层及其最大可能发震震级. 与DSHA方法相比, MCEA考虑最大可信地震的断层破裂过程的时空不确定性. MCEA已应用于我国多项近断层水电工程的最大可信地震危险性评估, 为工程抗震提供依据[80,81]. MCEA具体步骤如下.

(1) 确定对坝址有主要影响的发震断层. 根据坝址场地地震安全性评价, 确定对场址有重要影响的可能发震构造. 当地表断裂明确时, 可直接作为最大可信地震发震断层; 当断裂构造认识不明确时, 可以在可能范围内设置多个发震断层进行地震危险性分析.

(2) 生成最大可信地震断层破裂情景库. 根据坝址周边活动断层构造, 确定最大可信地震震级、发震断层尺寸; 考虑震源破裂过程的不确定性, 生成最大可信地震震源情景库.

(3) 建立最大可信地震模拟模型. 根据坝址区域断层构造建立多层震源模型; 采用高精度的数字高程数据重构区域地形; 将区域波速结构模型与坝址局部地质勘探信息融合构建区域三维波速结构模型.

(4) 模拟最大可信地震的场址宽频带地震动. 根据建立的三维区域场地模型, 计算多层震源子断层广义格林函数; 模拟数以万计震源参数变化组合的断层破裂模式, 确定最大可信地震情景在坝址产生的地震动.

(5) 评估场址最大可信地震危险性. 选用合适的地震动强度指标, 对所有最大可信地震情景在场址生成的地震动进行统计分析, 确定工程场址地震动参数(MCEA选取均值+一倍标准差); 根据确定的工程地震动参数, 选取相应代表性最大可信地震情景, 通过正演模拟得到场址空间地震动场.

需要强调的是, 基于物理机制的直接数值模拟虽能显式刻画断层破裂-传播-场址全过程, 但结果仍受震源参数取值范围, 三维介质与近地表结构刻画精度等不确定性影响. 针对该问题, 本文作者建立了MCEA方法[79,81], 通过实际地震模拟对模型与数值设置进行校核, 并对震源参数进行敏感性分析, 通过在合理参数范围内采用蒙特卡罗方法生成海量情景, 统计得到场址工程参数的概率分布, 进而确定设防参数并筛选代表性情景用于后续动力分析. 这也体现了MCEA与传统DSHA的本质差别. DSHA通常是选取一个“最不利”的*M*-*R*组合, 通过经验性的衰减关系给出一个确定性的地震动参数值, 其过程是单一且静态的. 而MCEA虽然也聚焦具有确定震级和断层构造的最大可信地震, 但它通过模拟成千上万种该事件下断层破裂过程的可能性, 最终得到的是一个关于该事件的地震动参数概率分布, 从而为工程提供了更全面的风险认知和更可靠的底线评估. MCEA方法的内涵反映了震源的随机性和介质特性的确定性, 特别适用于确定性工程场址的最大可信地震动参数分析.

5 设防地震水准及其参数评估方法

高坝大库作为关键基础设施, 其失事后果远超一般工程, 可能引发流域性灾难和社会危机, 因此必须遵循更为严苛的抗震设防标准, 确保“中震不坏, 大震可修, 极震不倒”的设防目标[91]. 依据《水电工程防震抗震设计规范NB/T 35057-2024》[92], 甲类壅水建筑物采用设计和校核两级设防水准. 第一级为设计地震, 容许有轻微损坏, 经修复后仍可正常运行; 第二级为校核地震, 要求不发生溃坝导致库水失控下泄的灾变. 具体而言, 第一级设防采用PSHA, 取100年超越概率为2%的地震动参数; 第二级设防按100年超越概率1%的概率法结果或最大可信地震.

DSHA采用基于点源假设的衰减关系, 仅依据确定的震级和场址-断层最近距离计算地震动参数, 完全忽略了断层几何尺度, 破裂过程及近断层方向性效应等关键因素的影响, 在近断层场址的应用中存在明显局限性. 因此, 本文建议对于第二级设防的校核地震, 同时采用PSHA和MCEA确定, 如表3所示. 为了比较PSHA和MCEA对于近断层场址最大可信地震评估的应用, 表4给出了我国西部强震区四座典型近断层水电工程分别采用PSHA和MCEA得到的最大可信地震动参数(PGA)评估结果. 可以看出, 坝址到断层距离和地震震级是决定坝址地震危险性的关键因素, 高震级与近距离的叠加效应会导致极其严峻的地震风险.

通过两种方法的比较, 可以发现, PSHA由于潜源区内震源均匀分布的假设, 当备选坝址位于同一潜源区且均处于近断层距离量级时, 坝址间距离差异可能在距离分布的积分过程中被平均化, 从而导致两点的地震动参数估计差别不显著. 此外, PSHA依赖的经验

表 3 甲类设防建筑物地震动参数

Table 3 Ground motion parameters of class A fortified buildings

设防水准	设防目标	地震动参数评价方法
设计地震	建筑物结构整体性完好, 容许局部屈服或损坏, 经抢修或适当维修后, 可继续正常运用	PSHA, P_{100} = 0.02
校核地震	大坝能够满足整体稳定要求, 不致发生库水失控下泄, 不发生危及社会公共安全的重大次生灾害	PSHA, P_{100} = 0.01 MCEA, 最大可信地震危险性分析

表 4 典型近断层水电工程地震动参数

Table 4 Ground motion parameters of typical near-fault hydropower projects

工程名称	断层构造震级上限	坝址-断层最近距离 (km)	评价方法	最大可信地震PGA (gal)
A坝	7.5	4.1	PSHA	530
			MCEA	527
B坝(比选坝址1)	7.5	5	PSHA	640
			MCEA	432
B坝(比选坝址2)	7.5	1.5	PSHA	650
			MCEA	772
C坝	8.0	1	PSHA	882
			MCEA	915
D坝	7.5	19	PSHA	423
			MCEA	349

地震动预测方程主要由强震记录统计回归得到, 在大震级样本不足时不可避免存在外推不确定性, 且难以充分表达断层有限尺寸与非平稳破裂过程引起的近断层方向性效应, 滑冲脉冲特征以及上盘效应等对坝址间差异的放大作用. 因此, PSHA对活动断层与场址的距离不够敏感, 可能弱化近断层情况下极端地震工况的影响.

相比之下, 考虑活动断层最大震级地震的MCEA方法, 以明确的控制性发震断层及其最大震级为约束, 通过三维介质模型, 地形与场址条件开展物理机制约束的地震动模拟. 因此, MCEA对坝址相对于断层走向、倾向及破裂方向的相对位置更为敏感, 能够显式反映近断层方向性效应和三维场地效应的耦合影响, 能更准确捕捉近断层地震危险性. 当备选坝址分别处于潜在前向破裂方向与背向区域, 或分别处于上盘与下盘, 或受河谷地形及浅部结构差异影响时, 即便不同场址到断层的最近距离相近, MCEA结果仍可能出现显著差别, 这也是表4中部分工程在不同坝址上表现出PSHA与MCEA结果差异的主要原因.

综合来看, PSHA和MCEA两种方法各有侧重, 并行不悖: PSHA为工程提供了基于风险和概率的设计依据, 给出了综合性的风险考量; 而MCEA则为工程安全提供了一个确定性的“底线校核”, 确保结构能够抵御临近工程场址活动断层的极端地震荷载, 这对于大坝这类不容许溃坝的重大基础设施尤为重要. 因此, 工程选址应尽量远离活动断层, 并同时采用MCEA与PSHA进行双重校核, 以确保重大水利水电工程的地震安全裕度.

6 结论

本文综述了坝址地震动参数评估中涉及的震源模型, 地震动预测方法和地震危险性分析方法, 主要结论如下.

(1) 高坝工程抗震设防主要关注强震影响, 其断层尺寸大, 破裂时空过程复杂, 断层表面位错前缘的发展和传播以及滑动完成的时间, 显著影响地震动的振幅、频率成分和持续时间等, 因此坝址地震危险性评

估需要考虑地震断层破裂过程影响.

(2) 坝址地震动特性受到断层破裂过程, 传播介质特性和坝址地质地形条件等多个因素的影响. 半经验半理论的随机地震动模拟, 基于统计衰减关系的地震动预测等方法, 通过间接、近似或统计方式考虑震源、方向性、路径、衰减、散射、盆地和场地效应的物理和特定特征. 基于物理机制的地震动直接数值模拟方法, 显式地模拟震源断层破裂过程和地震波的传播过程, 可以考虑全部或大部分关键影响因素.

(3) 地震的发生具有很大不确定性, 坝址可能遭遇极端大地震事件, 因此高坝抗震设防应考虑最大可信地震作用. 最大可信地震发生概率低, 相应的地震记录数据极为缺乏, 传统的概率性危险性分析方法和确定性分析方法均难以对其进行合理评估. 因此在目前概率性分析基础上, 建议同时采用最大可信地震危险性分析方法, 综合考虑地震断层破裂过程、地震波传播过程与坝址场地条件影响, 确定坝址最大可信地震动参数.

参考文献

1 Zhang C H, Jin F, Wang J T, et al. Key issues and developments on seismic safety evaluation of high concrete dams (in Chinese). J Hydraul Eng, 2016, 47: 253–264 [张楚汉, 金峰, 王进廷, 等. 高混凝土坝抗震安全评价的关键问题与研究进展. 水利学报, 2016, 47: 253–264]

2 Mai P M. Ground motion: Complexity and scaling in the near field of earthquake ruptures. In: Meyers R, ed. Encyclopedia of Complexity and Systems Science. New York: Springer, 2009

3 Zeng Y, Anderson J G, Yu G. A composite source model for computing realistic synthetic strong ground motions. Geophys Res Lett, 1994, 21: 725–728

4 Boore D M, Joyner W B. Site amplifications for generic rock sites. Bull Seismological Soc Am, 1997, 87: 327–341

5 Graizer V. Low-velocity zone and topography as a source of site amplification effect on Tarzana hill, California. Soil Dyn Earthquake Eng, 2009, 29: 324–332

6 Field E H, Johnson P A, Beresnev I A, et al. Nonlinear ground-motion amplification by sediments during the 1994 Northridge earthquake. Nature, 1997, 390: 599–602

7 Trifunac M D. The nature of site response during earthquakes. In: Schanz T, Iankov R, eds. Coupled Site and Soil-Structure Interaction Effects with Application to Seismic Risk Mitigation. Dordrecht: Springer, 2009

8 Rodgers A J, Pitarka A, McCallen D B. The effect of fault geometry and minimum shear wavespeed on 3D ground-motion simulations for an Mw 6.5 hayward fault scenario earthquake, San Francisco Bay Area, Northern California. Bull Seismological Soc Am, 2019, 109: 1265–1281

9 Lee S J, Chen H W, Liu Q, et al. Three-dimensional simulations of seismic-wave propagation in the Taipei Basin with realistic topography based upon the spectral-element method. Bull Seismological Soc Am, 2008, 98: 253–264

10 Imperatori W, Mai P M. Sensitivity of broad-band ground-motion simulations to earthquake source and Earth structure variations: An application to the Messina Straits (Italy). Geophys J Int, 2012, 188: 1103–1116

11 Zhao F X, Wei T, Zhang Y S. Influence of near-fault velocity pulse on the seismic response of reinforced concrete frame (in Chinese). Eng Mech, 2008, 25: 180–186, 193 [赵凤新, 韦韬, 张郁山. 近断层速度脉冲对钢筋混凝土框架结构地震反应的影响. 工程力学, 2008, 25: 180–186, 193]

12 Zhang S, Wang G. Effects of near-fault and far-fault ground motions on nonlinear dynamic response and seismic damage of concrete gravity dams. Soil Dyn Earthquake Eng, 2013, 53: 217–229

13 Akköse M, Şimşek E. Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam-water-sediment-foundation interaction. Appl Math Model, 2010, 34: 3685–3700

14 Douglas J, Edwards B. Recent and future developments in earthquake ground motion estimation. Earth-Sci Rev, 2016, 160: 203–219

15 Douglas J, Aochi H. A survey of techniques for predicting earthquake ground motions for engineering purposes. Surv Geophys, 2008, 29: 187–220

16 Wang H Y, Xie L L. A review on near-fault ground motion simulation (in Chinese). Adv Earth Sci, 2008, 23: 1043–1049 [王海云, 谢礼立. 近断层地震动模拟现状. 地球科学进展, 2008, 23: 1043–1049]

17 Li X J. Evaluation of seismic safety for engineering sites and relevant technical problems (in Chinese). Technol Earthq Disaster Prev, 2006, 1: 15–

24 [李小军. 工程场地地震安全性评价工作及相关技术问题. 震灾防御技术, 2006, 1: 15–24]
18 Campbell K. Engineering models of strong ground motion. In: Chen W F, Scawthorn C, eds. Earthquake Engineering Handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002
19 Durukal E, Erdik M. Simulation modeling of strong ground motion. In: Chen W F, Scawthorn C, eds. Earthquake Engineering Handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002
20 Abrahamson N A. Seismic hazard assessment: Problems with current practice and future developments. In: Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Red Hook: Curran Associates, 2006
21 Chen H Q, Li M, Shi Y C. Determination of design response spectrum for important structures based on scenario earthquake (in Chinese). J Hydraul Eng, 2005, 36: 1399–1404 [陈厚群, 李敏, 石玉成. 基于设定地震的重大工程场地设计反应谱的确定方法. 水利学报, 2005, 36: 1399–1404]
22 Yu Y X, Wang S Y. Attenuation relations of horizontal bedrock acceleration response spectra for eastern and western China (in Chinese). Technol Earthq Disaster Prev, 2006, 1: 206–217 [俞言祥, 汪素云. 中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系. 震灾防御技术, 2006, 1: 206–217]
23 Power M, Chiou B, Abrahamson N, et al. An overview of the NGA project. Earthquake Spectra, 2008, 24: 3–21
24 Bozorgnia Y, Abrahamson N A, Atik L A, et al. NGA-West2 research project. Earthquake Spectra, 2014, 30: 973–987
25 Goulet C A, Bozorgnia Y, Kuehn N, et al. NGA-east ground-motion characterization model part I: Summary of products and model development. Earthquake Spectra, 2021, 37: 1231–1282
26 Bielak J. Regional seismic ground-motion simulation and observation with engineering applications. Earthq Engng Struct Dyn, 2021, 50: 4–5
27 Bouchon M. A review of the discrete wavenumber method. Pure appl geophys, 2003, 160: 445–465
28 Hafeez M B, Krawczuk M. A review: Applications of the spectral finite element method. Arch Computat Methods Eng, 2023, 30: 3453–3465
29 Yuan Y O, Lacasse M D, Liu F. Full-wavefield, full-domain deterministic modeling of shallow low-magnitude events for improving regional ground-motion predictions. Bull Seismological Soc Am, 2021, 111: 2617–2634
30 Graves R, Jordan T H, Callaghan S, et al. CyberShake: A physics-based seismic hazard model for southern California. Pure Appl Geophys, 2011, 168: 367–381
31 Thingbaijam K K S, Martin Mai P, Goda K. New empirical earthquake source-scaling laws. Bull Seismological Soc Am, 2017, 107: 2225–2246
32 He C H, Wang J T, Zhang C H, et al. Simulation of broadband seismic ground motions at dam canyons by using a deterministic numerical approach. Soil Dyn Earthquake Eng, 2015, 76: 136–144
33 Chen Y T, Gu H D. Fundamentals of Seismic Source Theory (in Chinese). Beijing: Science Press, 2023 [陈运泰, 顾浩鼎. 震源理论基础. 北京: 科学出版社, 2023]
34 Vallée M. Source time function properties indicate a strain drop independent of earthquake depth and magnitude. Nat Commun, 2013, 4: 2606
35 Graves R, Pitarka A. Broadband time history simulation using a hybrid approach. In: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: Canadian Association for Earthquake Engineering, 2004
36 Graves R W, Pitarka A. Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach. Bull Seismological Soc Am, 2010, 100: 2095–2123
37 Tinti E. A kinematic source-time function compatible with earthquake dynamics. Bull Seismological Soc Am, 2005, 95: 1211–1223
38 Liu P, Archuleta R J, Hartzell S H. Prediction of broadband ground-motion time histories: Hybrid low/high- frequency method with correlated random source parameters. Bull Seismological Soc Am, 2006, 96: 2118–2130
39 Boore D M. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. Bull Seismol Soc Am, 1983, 73: 1865–1894
40 Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. J Geophys Res, 1970, 75: 4997–5009
41 Beresnev I A, Atkinson G M. Modeling finite-fault radiation from the ωn spectrum. Bull Seismological Soc Am, 1997, 87: 67–84
42 Atkinson G M, Boore D M. Ground-motion relations for eastern North America. Bull Seismological Soc Am, 1995, 85: 17–30
43 Atkinson G M. Earthquake source spectra in eastern North America. Bull Seismol Soc Am, 1993, 83: 1778–1798
44 Boore D M. Simulation of ground motion using the stochastic method. Pure appl geophys, 2003, 160: 635–676
45 Motazedian D, Atkinson G M. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency. Bull Seismological Soc Am, 2005, 95: 995–1010
46 Dang P F, Liu Q F, Wang C, et al. Review on the stochastic finite-fault ground motion simulation method (in Chinese). Earthq Eng Eng Vib, 2020,

40: 131–139 [党鹏飞, 刘启方, 王冲, 等. 地震动随机有限断层模拟方法综述. 地震工程与工程振动, 2020, 40: 131–139]
47 Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The Ms 8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure (in Chinese). Seismol Geol, 2008, 30: 597–629 [徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川MS8.0地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 2008, 30: 597–629]
48 Schmedes J, Archuleta R J, Lavallée D. A kinematic rupture model generator incorporating spatial interdependency of earthquake source parameters. Geophys J Int, 2013, 192: 1116–1131
49 Hartzell S H. Earthquake aftershocks as Green's functions. Geophys Res Lett, 1978, 5: 1–4
50 Hartzell S. Comparison of seismic waveform inversion results for the rupture history of a finite fault: Application to the 1986 North Palm Springs, California, earthquake. J Geophys Res, 1989, 94: 7515–7534
51 Wu Y Q, Zhang H M. Effects of fault geometry and dynamic parameters of spontaneous rupture on seismic wavefield (in Chinese). Chin J Geophys, 2022, 65: 965–977 [吴永祺, 张海明. 断层几何形态和自发破裂的动力学参数对地震波场的影响. 地球物理学报, 2022, 65: 965–977]
52 Xing H L, Guo Z W, Wang J C, et al. Finite element simulation and analysis of frictional dynamic behavior of fault system (in Chinese). Chin J Geophys, 2022, 65: 37–50 [邢会林, 郭志伟, 王建超, 等. 断层系统摩擦动力学行为的有限元模拟分析. 地球物理学报, 2022, 65: 37–50]
53 Hartzell S, Harmsen S, Frankel A, et al. Calculation of broadband time histories of ground motion: Comparison of methods and validation using strong-ground motion from the 1994 Northridge earthquake. Bull Seismological Soc Am, 1999, 89: 1484–1504
54 Zhang M-Z, Zhang L, Wang X-C, et al. A framework for seismic response analysis of dams using numerical source-to-structure simulation. Earthq Engng Struct Dyn, 2023, 52: 593–608
55 Ba Z, Zhao J, Zhu Z, et al. 3D physics-based ground motion simulation and topography effects of the 05 September 2022 MW6.6 Luding earthquake, China. Soil Dyn Earthquake Eng, 2023, 172: 108048
56 Li Y, Yu H, Wang M, et al. The physics-based deterministic scenarios for earthquake hazards and losses of the Zhujiangkou fault in southern China. npj Nat Hazards, 2025, 2: 6
57 Ramos M D, Thakur P, Huang Y, et al. Working with dynamic earthquake rupture models: A practical guide. Seismological Res Lett, 2022, 93: 2096–2110
58 Cornell C A, Banon H, Shakal A F. Seismic motion and response prediction alternatives. Earthq Engng Struct Dyn, 1979, 7: 295–315
59 Sadigh K, Chang C Y, Egan J A, et al. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on california strong motion data. Seismological Res Lett, 1997, 68: 180–189
60 Abrahamson N A, Silva W J, Kamai R. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. Earthquake Spectra, 2014, 30: 1025–1055
61 Hu Y X, Zhang M Z. A method of predicting ground motion parameters for regions with poor ground motion data (in Chinese). Earthq Eng Eng Vib, 1984, 4: 1–11 [胡聿贤, 张敏政. 缺乏强震观测资料地区地震动参数的估算方法. 地震工程与工程振动, 1984, 4: 1–11]
62 Yu Y X, Li S Y, Xiao L. Development of ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of China (in Chinese). Technol Earthq Disaster Prev, 2013, 8: 24–33 [俞言祥, 李山有, 肖亮. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系. 震灾防御技术, 2013, 8: 24–33]
63 Abrahamson N, Kuehn N, Walling M, et al. Probabilistic seismic hazard analysis in california using nonergodic ground motion models. Bull Seismological Soc Am, 2019, 109: 1235–1249
64 Li B, Palgunadi K H, Wu B, et al. Rupture dynamics and velocity structure effects on ground motion during the 2023 Türkiye earthquake doublet. Commun Earth Environ, 2025, 6: 228
65 Beer M, Kougioumtzoglou I A, Patelli E, et al. Encyclopedia of Earthquake Engineering. Berlin: Springer, 2015
66 Aki K. Scaling law of seismic spectrum. J Geophys Res, 1967, 72: 1217–1231
67 Boore D M. SMSIM—Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes. USGS Technical Report OFR 96-80-A (Version 2.0), 2000
68 Beresnev I A, Atkinson G M. FINSIM—A FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. Seismological Res Lett, 1998, 69: 27–32
69 Boore D M. Comparing stochastic point-source and finite-source ground-motion simulations: SMSIM and EXSIM. Bull Seismological Soc Am, 2009, 99: 3202–3216
70 Yu R, Yang Q, Xu J, et al. Maximum credible ground motion evaluation based on broadband stochastic finite-fault method: A case study for Baihetan dam in China. Soil Dyn Earthquake Eng, 2025, 190: 109168

71 Anderson J G, Hough S E. A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. Bull Seismol Soc Am, 1984, 74: 1969–1993

72 Aki K, Richards P G. Quantitative Seismology. Sausalito: University Science Books, 2009

73 Graves R W. Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences. Bull Seismological Soc Am, 1996, 86: 1091–1106

74 Taborda R, Bielak J. Large-scale earthquake simulation: Computational seismology and complex engineering systems. Comput Sci Eng, 2011, 13: 14–27

75 Komatitsch D, Vilotte J P. The spectral element method: An efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures. Bull Seismological Soc Am, 1998, 88: 368–392

76 Komatitsch D, Ritsema J, Tromp J. The spectral-element method, beowulf computing, and global seismology. Science, 2002, 298: 1737–1742

77 Mai P M, Beroza G C. A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip. J Geophys Res, 2002, 107: 2308

78 Wang X C, Wang J T, Zhang L, et al. A multidimension source model for generating broadband ground motions with deterministic 3D numerical simulations. Bull Seismological Soc Am, 2021, 111: 989–1013

79 Wang X C, Wang J T, Zhang C H. Deterministic full-scenario analysis for maximum credible earthquake hazards. Nat Commun, 2023, 14: 6600

80 Kramer S L. Geotechnical Earthquake Engineering. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996

81 Wang J T, Wang X C, Zhang C H, et al. Assessment framework for maximum credible earthquake hazards at dam sites based on direct numerical simulation method (in Chinese). J Hydraul Eng, 2025, 56: 1109–1118 [王进廷, 王向超, 张楚汉, 等. 基于直接数值模拟方法的坝址最大可信地震危险性评估体系. 水利学报, 2025, 56: 1109–1118]

82 Cornell C A. Engineering seismic risk analysis. Bull Seismological Soc Am, 1968, 58: 1583–1606

83 McGuire R K. Probabilistic seismic hazard analysis: Early history. Earthq Engng Struct Dyn, 2008, 37: 329–338

84 Gerstenberger M C, Marzocchi W, Allen T, et al. Probabilistic seismic hazard analysis at regional and national scales: State of the art and future challenges. Rev Geophys, 2020, 58: e2019RG000653

85 Gutenberg B, Richter C F. Magnitude and energy of earthquakes. Nature, 1955, 176: 795

86 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings (2024 edition): GB/T 50011-2010 (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2024 [中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范(2024年版): GB/T 50011-2010. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024]

87 National Energy Administration. Code for seismic design of hydraulic structures of hydropower project: NB 35047-2015 (in Chinese). Beijing: China Electric Power Press, 2015 [国家能源局. 水电工程水工建筑物抗震设计规范: NB 35047-2015. 北京: 中国电力出版社, 2015]

88 Li S Y, Liao Z P. Study on design earthquakes for major engineering structures based on probabilistic seismic hazard analysis (in Chinese). Earthq Resist Eng, 1999: 18–21 [李山有, 廖振鹏. 基于概率地震危险性分析的重大工程结构设计地震的研究. 工程抗震, 1999: 18–21]

89 Yang L, Fu Z, Wang D. Ground motion time history simulation for seismic response history analysis. Front Earth Sci, 2022, 10: 908498

90 Zhao F X, Zhang Y S. Artificial ground motion compatible with specified peak velocity and target spectrum (in Chinese). Acta Seismol Sin, 2006, 28: 429–437 [赵凤新, 张郁山. 拟合峰值速度与目标反应谱的人造地震动. 地震学报, 2006, 28: 429–437]

91 Zhang C H, Jin F, Pan J W, et al. On seismic fortification criteria after Wenchuan earthquake for high dam in China (in Chinese). Water Resour Hydropower Eng, 2009, 40: 74–79 [张楚汉, 金峰, 潘坚文, 等. 论汶川地震后我国高坝抗震标准问题. 水利水电技术, 2009, 40: 74–79]

92 National Energy Administration. Code for seismic design of hydropower projects: NB/T 35057-2024 (in Chinese). Beijing: China Water & Power Press, 2025 [国家能源局. 水电工程防震抗震设计规范: NB/T 35057-2024. 北京: 中国水利水电出版社, 2025]

On the evaluation methods of ground motion parameters at dam sites

WANG JinTing[1], WANG XiangChao[2], REN Xiang[1], HUANG RongJie[1] & ZHANG ChuHan[1]

[1] *Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*
[2] *College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

High dams are typically constructed in steep mountainous areas with complex geological conditions, most of which are in seismically active zones. Therefore, strong earthquakes pose one of the most significant threats to the long-term safety of such structures. Therefore, the evaluation of ground motion parameters at dam sites has emerged as a pivotal issue in seismic design and safety assessment of high dams. In response to the seismic requirements of high dam engineering, this paper reviews current methods for assessing ground motion parameters at dam sites, focusing on three perspectives: seismic source modeling, ground motion prediction, and seismic hazard analysis. Furthermore, a methodology for determining the maximum credible earthquake (MCE) ground motion parameters at dam sites is proposed to enhance seismic fortification measures, which may serve as technical references for seismic safety evaluations of major hydropower and water conservancy projects.

ground motion parameter, seismic source, ground motion prediction, seismic hazard, maximum credible earthquake

doi: 10.1360/SST-2025-0416