

团体标准

T/SSC XXX-20XX

川滇藏东地区重大工程场址

强地震动参数评估

Evaluation of strong ground motion parameters for major engineering sites in
Sichuan, Yunnan and eastern Tibet

（征求意见稿）

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国地震学会 发布

目 次

目次 I

前言 II

引 言 III

川滇藏东地区重大工程场址强地震动参数评估 1

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号和缩略语 2

5 基本规定 2

6 工作内容 2

7 设定地震主要参数确定 3

8 设定地震情景库生成 4

9 场址地震动模拟 4

10 场址地震危险性评估 4

附 录 A（规范性附录）有限厚度震源模型 5

附 录 B（资料性附录）发震断层参数经验关系 8

附 录 C（规范性附录）伴随模拟方法 9

附 录 D（规范性附录）子断层格林函数计算 11

参考文献 12

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020 《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和编写起草规则》给出的规则起草。

本文件由清华大学提出。

本文件由中国地震学会归口。

本文件起草单位：清华大学、北京工业大学、水电水利规划设计总院、中国地震局地球物理研究所、中国地震局工程力学研究所、中国地震局地质研究所、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司、中国中铁二院工程集团有限责任公司、成都理工大学

本文件主要起草人：王进廷、王向超、任翔、江汇、许成顺、杜修力、李小军、何万通、张世殊、张楚汉、陈克坚、武明鑫、范宣梅、周本刚、赵密、俞言祥、贺春晖、谢志南

引 言

川滇藏东地区是我国的资源能源基地与战略要地，已建、在建和拟建多项国家重大工程。由于位于印度板块与亚欧板块碰撞交界线附近，川滇藏东地区内部构造运动剧烈，强地震频发。合理评估这些重大工程场址的强地震动参数，提高工程抗震减灾能力，避免发生严重地震破坏与灾变，是国家重大需求。

川滇藏东地区重大工程强地震参数评估具有特殊性：1) 多个工程场址邻近活断层；2) 高山峡谷地质地形变化剧烈；3) 历史强震记录资料缺乏。现有基于经验统计的地震动参数评估方法难以预测该地区近断层强地震动参数。场址强地震动参数确定是制约川滇藏东地区重大工程建设的关键问题之一。

近年来，基于物理机制的地震动直接数值模拟方法得到了快速发展，可以根据场址区域实际断层构造，考虑设定地震，模拟断层破裂过程与地震波传播过程，生成场址宽频带地震动。直接数值模拟方法，不依赖历史强震记录资料，并且考虑了震源、传播介质、局部场地效应三大关键因素，预测地震动参数符合特定的断层构造、区域岩体特性和局部场址地质地形条件，为川滇藏东地区重大工程场址地震动参数评估提供了新的分析手段。

为了规范采用基于物理机制的直接数值模拟法确定重大场址地震动参数的方法、步骤和技术要求，特制定本文件。

川滇藏东地区重大工程场址强地震动参数评估

1 范围

本文件规定了采用基于物理机制的直接数值模拟法，针对设定地震，确定重大工程场址地震动参数的方法、步骤和技术要求。

本文件适用于川滇藏东高山峡谷地区高坝水电站、地下洞室、桥梁、隧道等重大工程场址的地震动参数评估。其它地区工程场址的地震动参数评估可参考使用。

2 规范性引用文件

《工程场地地震安全性评价》（GB17741-2005）。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

设定地震 Scenario earthquake

当前构造格架下，沿已知断层或特定震源区可能发生的具有特定震级且对工程场址造成威胁的地震情景，其中可能发生的最大震级地震，称为最大可信地震

3.2

设定地震危险性 Seismic hazard of scenario earthquake

设定地震在目标场址可能产生地震动工程参数值的概率分布。

3.3

设定地震工程地震动参数 Engineering seismic parameters of scenario earthquake

依据设定地震确定的具有某一超越概率水平的场址地震动参数。

3.4

宽频带地震动 Broadband ground motions

满足工程抗震分析需求的具有宽频带成分（一般大于10 Hz）的地震动时程。

3.5

有限厚度震源模型 Finite thickness source model

考虑断层复杂破裂过程，将断层沿厚度方向划分为若干个层面，再将每个层面进一步细分为子源以描述复杂的断层破裂过程。

3.6

地震矩 Seismic moment

地震断层的面积、断层的平均位错和断层面附近介质的剪切模量三者的乘积定义的衡量地震大小的物理量，量纲为力矩，单位为牛顿·米（N·m）。在各向同性弹性体内与断层滑动等效的双力偶的每一个力偶的强度(矩)，等于介质的刚性系数乘断层滑动量对断层面的积分。

3.7

破裂起始点 Rupture initiation point

地震断层破裂开始发生的地点。

3.8

破裂速度 Rupture speed

地震发生时，破裂前锋沿断层面传播的速度。

3.9

上升时间 Rise time

地震发生时，断层某一位置滑动破裂的持续时间

3.10

滑移量 Slip amount

地震发生时，断层某一位置滑动的距离

3.11

滑动角 Slip angle

地震发生时，断层某一位置滑动的方向

3.12

模拟区域 Simulation area

包含场址和周边重要断层构造的场地区域

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件：

IM—Intensity Measure，地震强度指标

PGA—Peak Ground Acceleration，地震动峰值加速度

Sa(Ti)—Spectral acceleration，谱加速度

潜源—依据断层构造和地震活动性划分的潜在震源区

5 基本规定

5.1 场址强地震动参数评估工作应在工程场址地震安全性评价工作的基础上进行。

5.2 震源断层破裂宜采用有限厚度震源模型。有限厚度震源模型原理见附录 A。

6 工作内容

评估重大工程场址强地震动参数时，研究内容包括设定地震模拟模型建立、设定地震情景库构建、场址宽频带地震动生成及参数统计分析，场址地震危险性评估，基本工作内容如下：

(1) **设定地震模拟模型建立。**依据场址周边断层构造勘探结果和历史地震资料，确定对场址存在重要影响的活动断层构造；根据确定的活动断层构造，建立有限厚度震源模型；采用高精度数字高程数据重建区域地形；将区域波速结构模型与场址局部地质勘探信息融合构建区域三维波速结构模型。

(2) **设定地震情景库构建。**根据确定的场址周边活动断层构造，确定设定地震发震断层及震级；考虑震源破裂过程的随机性与不确定性，生成设定地震情景库。

(3) **场址宽频带地震动生成。**根据建立的三维区域场地模型，采用伴随模拟方法计算场址到震源区应变格林张量；根据有限厚度震源模型的自相似性，划分为子断层，采用应变格林张量计算子断层格林函数；采用有限厚度震源模型子断层格林函数直接合成所有地震情景在场址地震动。

(4) **场址地震危险性评估。**选用合适的IM，对设定地震可能情景在场址生成的地震动进行统计分析，根据采用的地震安全性评估准则，确定场址工程地震动参数；根据确定的工程地震动参数，得到对应设定地震情景；通过子断层格林函数得到场址三维宽频带地震动时程；需要考虑空间不均匀地震动时，可以根据确定的设定地震情景，通过正演模拟得到场址空间地震动场。

7 设定地震模拟模型建立

7.1 近场区域主要发震断层

对场址有主要影响的发震断层，一般应在场址地震安全性评价或场址范围内活动断层勘察的基础上确定，按顺序开展下列工作：

7.1.1 根据场址地震安全性评价报告确定场址周边邻近潜源，一般考虑场址所在潜源及震级较高的邻近潜源；

7.1.2 根据潜源信息，包括断层构造勘探结果和历史地震资料，确定对场址有重要影响的可能发震构造，发震构造断层位置的确定宜符合以下原则：

- a) 当地表断裂明确，且可以独立作为最大可信地震发震断层时，可直接作为最大可信地震发震断层；
- b) 当断裂构造认识不明确或地表断裂不足以作为设定地震发震断层时，宜在可能范围内设置多个发震断层进行地震危险性分析。

7.2 断层构造地震情景震级

7.2.1 场址周边断层构造的地震情景震级应根据工程设防水准要求采用设定地震震级或最大可信地震震级。

7.2.2 设定地震震级应按照最大发生概率原则由下列方法确定：

- a) 根据确定的发震断层构造，由地震统计区内地震活动的截断 Gutenberg-Richter 震级分布规律，得到任一震级档的震级概率分布；
- b) 由地震活动性在不同潜源间不均匀分布，而在潜源内地震活动均匀分布的假定，确定潜源中某一震级档的空间概率分布；
- c) 将上述两种概率相乘得到潜源内发生该震级档的地震在场点产生大于给定峰值加速度的地震动的概率；
- d) 取对场址地震危险性贡献最大的地震震级作为设定地震震级。

7.2.3 最大可信地震震级应根据《工程场地地震安全性评价》（GB17741-2005）相关条文确定。

7.3 发震断层参数

7.3.1 断层破裂尺度应综合地表断裂长度和确定的设定地震震级，结合地震发震断层尺度的经验关系确定，地震发震断层尺度的经验关系参考附录B。

7.3.2 发震断层的走向和倾角应在充分分析地质资料的基础上，通过宏观震害调查、地质探槽、钻探、深部探测、小地震精确定位等手段确定。倾角不明确的断层，可在合理的范围内设置多个取值。

7.4 震源层面及子源

7.4.1 断层沿厚度方向划分为 m 个层面，层面数量 m 根据需要考虑的频率范围按照附录A中方法确定，地震矩按照规定比例分配到每个层面（附录A），断层各区域所有层面地震矩之和等于断层该区域总地震矩。

7.4.2 发震断层每一个层面应划分为若干个子源，每一层的子源尺寸递减，可为上一层面一半。

7.5 模拟区域波速结构

应收集场址区域波速资料，重点与场址局部区域的详细地质勘探资料融合，建立区域三维波速结构模型。

7.6 模拟区域地形参数

根据模拟精度需求，分辨率30m以上地形数据可直接由公开数据源获得；更高分辨率地形数据可通过商业数据源购买或采用倾斜摄影技术获取。

8 设定地震情景库生成

8.1 考虑地震情景变量

宜采用蒙特卡洛方法对每个发震构造生成设定地震情景库。生成发震构造对应地震情景时，考虑的变量应包括断层位置、震中、断层破裂时间分布、断层滑移量分布、断层上升时间分布和断层滑动方向分布。

8.2 地震情景数量

每个发震断层构造宜生成不少于一百万场地震情景进行地震风险评估。

9 场址地震动模拟

9.1 震源区应变格林张量

按照附录C采用伴随模拟方法，在目标场址设置单向脉冲力点源，通过三次完整的数值模拟计算得到目标场址到断层区域所有位置的应变格林张量。

9.2 有限厚度震源子断层格林函数

应对于每一个发震断层构造，将建立的有限厚度震源模型划分为子断层。根据实际断层尺度子断层尺寸，可设定为2-5km。按照附录D将计算好的应变格林张量与子断层上不同层面子源震源时间函数卷积，得到子断层格林函数。

9.3 地震情景对应场址地震动

对于每个发震构造地震情景库，应采用预先计算的子断层格林函数，根据相应断层破裂过程参数，直接合成所有地震情景在目标场址地震动时程。

10 场址地震危险性评估

10.1 地震强度指标

对川滇藏东地区的重大工程，应采用PGA和工程关注周期范围的 $S_a(T_i)$ 作为目标参数，用于评估场址地震危险性。可根据工程结构特性，选取其它合适的IM用于工程场地地震危险性评估。

10.2 地震危险性曲线

对每个发震构造，应基于选用的地震强度参数计算所有地震情景在场址生成地震动的IM，并进行汇总统计，得到场址地震危险性曲线。

10.3 最大可信地震动参数

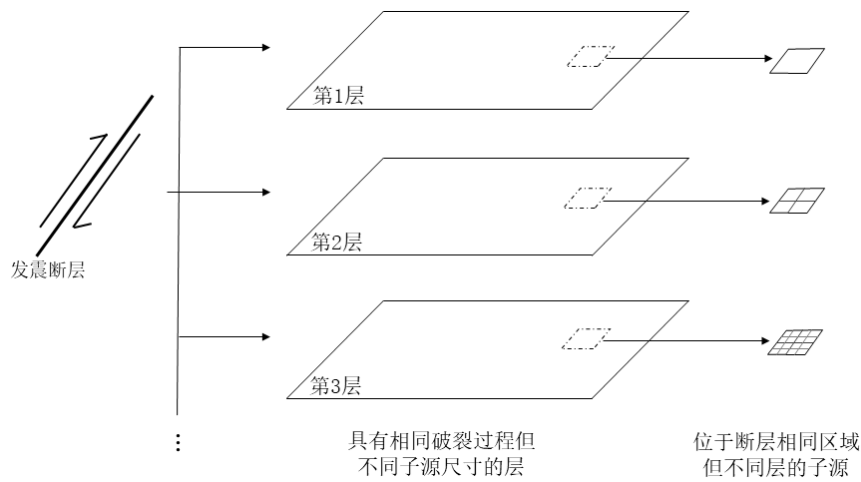
对每个发震构造的场址地震危险性曲线，应将15%超越概率对应的地震动参数作为该发震构造在场址的最大可信地震动参数。可根据工程设防要求，选用不同超越概率的IM作为最大可信地震动参数。

10.4 最大可信地震动时程

对每个发震构造的最大可信地震动参数，应选取3-5场对应的地震情景在场址生成的宽频带地震动时程作为该发震构造在场址的最大可信地震动时程。

附录 A (规范性附录) 有限厚度震源模型

在有限厚度震源模型中，震源由多个叠加层组成，每层的破裂过程与断层给定破裂过程一致，总地震矩按不同比例分配给这些层。每一层都与发震断层重合，并被均匀地划分为子源，其尺寸逐渐减小，以反映不同层次的破裂细节。提出的有限厚度震源模型可以考虑真实的地震破裂过程，即震源参数的空间和时间异质性，并产生与实测结果相符的宽频带地震动。在有限厚度震源模型中，总地震矩按不同比例分配给震源的不同层。其中第一层具有最大的子源尺寸和最长的上升时间，并占据了总地震矩的最大比例，主要产生地震动的低频成分。对于其它层，分配的地震矩、上升时间和子源尺寸逐渐减少，以产生频率较高的地震动。因此，具有宽频带成分的地震动可以由这些层共同产生，并最终生成预期的宽频带地震动。



图A1 有限厚度震源模型的示意图。震源模型被分为数个叠加层，每层又被均匀地划分为尺寸逐渐减小的子源

有限厚度震源模型的构建流程如图A1所示。首先根据需要模拟的地震动频率上限，确定有限厚度震源模型的层数，并按照给定的子源尺寸缩减比例，确定各层子源的尺寸。然后确定震源断层的基本参数，如断层构造、地震矩总量和破裂过程，用于构建有限厚度震源模型。对于历史地震，优先使用反演的震源破裂过程来构建有限厚度震源模型，而对于情景地震，可以用随机方法生成合适的震源破裂过程，例如k-square模型(Herrero and Bernard, 1994)、空间随机场模型(Mai and Beroza, 2002)和随机分布模型(Graves and Pitarka, 2010, 2015)。在确定了震源断层基本参数后，将震源的总地震矩按照适当比例分配到震源各层。基于给定的震源破裂过程，进一步确定各层子源的破裂参数，包括滑移量、破裂时间、上升时间和滑动角。

基于给定的发震断层破裂过程，本附录给出了确定有限厚度震源模型参数的方法，包括层数、子源尺寸、地震矩分配准则和子源破裂参数等。

(1) 子源破裂参数

在有限厚度震源模型中，每一层上尺寸为 R_i 的子源可以完全覆盖整个断层。由于地震的发震断层通常是矩形，为了简单起见，假设子源为矩形或方形。对于运动学震源模型，子源具有4个破裂参数，包括滑移量、破裂时间、上升时间和滑动角。有限厚度震源模型第 i 层子源的滑移量 u_{ij} 、破裂时间 t_{ij} 和滑动角 λ_{ij} 由给定破裂过程的滑移量、破裂时间和滑动角分布在子源位置的插值结果决定。为了保持给定的震源破裂过程的基本特征，第一层上子源的上升时间与给定的上升时间分布一致。根据Brune (1970)，尺寸为 R_i 的子源的拐角频率 f_c^i 为

$$f_c^i = \frac{2.34\beta}{2\pi R_i} \quad (\text{A-1})$$

其中 β 是剪切速度。考虑到拐角频率为上升时间的倒数，尺寸为 R_i 的子源的上升时间 T_i 为

$$T_i = \frac{2\pi R_i}{2.34\beta} \quad (\text{A-2})$$

根据式 (A-2)，子源的上升时间与尺寸成正比。因此，不同层上子源的上升时间通过式 (A-3) 计算

$$T_{ij} = \frac{R_i}{R_1} T_j^{pre} \quad (\text{A-3})$$

其中， T_{ij} 是第 i 层上的子源的上升时间， T_j^{pre} 表示在断层同一位置给定破裂过程的上升时间。

(2) 子源尺寸

为了确保有限厚度震源模型产生的地震动的频率成分也是连续的，每层子源的最大上升时间应大于上一层子源的最小上升时间，即 $T_{j+1}^{max} > T_j^{min}$ ，结合式 (A-3)，不同层的子源尺寸 R_i 应该满足以下条件

$$\frac{R_{i+1}}{R_i} = C > \frac{T_{min}^{pre}}{T_{max}^{pre}} \quad (\text{A-4})$$

其中 C 是一个常数，以保证所有层上的子源上升时间从第一层的最大值到最后一层的最小值是连续的。

(3) 层数

地震动模拟的频率上限 (f_{up}) 是构建有限厚度震源模型的另一个重要参数。 f_{up} 与地震危险性分析的需求、数值模型的精细度以及可用的计算能力有关。在给出 f_{up} 后，相应地就可以确定震源的层数。层数应满足最后一层子源的最大拐角频率等于或高于 f_{up} 这个条件，以保证可以生成预期的频率成分。因此，层数 m 可以通过式 (A-5) 确定。

$$m = \lceil \log_c(f_{up} T_{min}^{pre}) \rceil \quad (\text{A-5})$$

其中 T_{min}^{pre} 是断层上给定破裂过程的最小上升时间。

(4) 地震矩分配

在确定了不同层破裂过程的参数后，还应确定如何将总地震矩分配给不同层。根据Kanamori and Anderson (1975)，尺寸为 R 的震源的地震矩为

$$M(R) = \frac{16}{7} R^3 \Delta\sigma \quad (\text{A-6})$$

其中 $\Delta\sigma$ 为应力降。每层的子源数量为

$$n_i = \frac{S}{R_i^2} \quad (\text{A-7})$$

其中 S 是地震断层的面积。为了计算各层子源的总地震矩，假定 $\Delta\sigma$ 是常数。因此，各层的总地震矩为

$$M_i = n_i M(R_i) \quad (\text{A-8})$$

进而

$$M_i = \frac{16}{7} S \Delta\sigma R_i \quad (\text{A-9})$$

由于所有层的地震矩之和等于震源的总地震矩，

$$M_0 = \sum_{i=1}^m M_i \quad (\text{A-10})$$

根据式 (A-9) 和式 (A-10)，各层的地震矩为

$$M_i = M_0 \frac{R_i}{\sum_{k=1}^m R_k} \quad (\text{A-11})$$

式 (A-11) 是将总地震矩分配给有限厚度震源模型的不同层的准则。

不同层上的子源的破裂时间、滑移量和滑动方向都与给定的震源过程一致，其中各层子源的滑移量用于确定子源的地震矩。将地震矩分配到各层后，进一步将各层地震矩按照式 (A-12) 分配到各层子源，

$$M_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sum_{k=1}^{n_i} u_{ik}} \cdot M_i \quad (\text{A-12})$$

其中 n_i 是第 i 层的子源数量， u_{ij} 或 u_{ik} 表示第 i 层的子源的滑移量。第 i 层的总地震矩按其滑移量的比例分配给子源，以反映该层上地震矩的空间变化。

附 录 B（资料性附录）发震断层参数经验关系

断层机制	断层尺寸（L:断层长度；W:断层宽度； M_w :矩震级）
正断层	$\log_{10} L = -1.722 + 0.485M_w$ $\log_{10} W = -0.829 + 0.323M_w$
逆断层	$\log_{10} L = -2.693 + 0.614M_w$ $\log_{10} W = -1.669 + 0.435M_w$
走滑断层	$\log_{10} L = -2.943 + 0.681M_w$ $\log_{10} W = -0.543 + 0.261M_w$

表B-1 发震断层参数经验关系(Thingbaijam et al., 2017)

附录 C (规范性附录) 伴随模拟方法

本文件通过考虑海量地震情景得到工程场址地震危险性结果,采用数值模拟方法直接生成所有情景地震的宽频带地震动所需的计算量显然是不可能接受的。为了解决这个问题,这里采用应变格林张量法,也叫伴随源法,生成情景地震在场址的宽频带地震动(Eisner, 2001; Tromp et al., 2004; Zhao et al., 2006)。该方法说明如下。

对于一个单向力点源,其在场址生成的地震动可以表示为,

$$u_j(x, x'; t - t') = f_i(x; t') * G_{ij}(x, x'; t - t') \quad (C-1)$$

其中 $u_j(x, x'; t - t')$ 为 x 处点源在场址 x' 处生成的 j 方向地震动位移, t 为场址地震动时间, t' 为发震时间, $f_i(x; t')$ 为 x 处 i 方向的单向力点源, $G_{ij}(x, x'; t - t')$ 为从点源 x 处到场址 x' 处的格林函数, $*$ 表示时域的卷积。当单向力点源的持续时间接近于零,即为脉冲力时,场址 x' 处 j 方向地震动位移就等价于点源 x 处到场址 x' 处的格林函数

$$u_j(x, x'; t - t') \equiv G_{ij}(x, x'; t - t') \quad (C-2)$$

根据连续介质中格林函数的空间互易性(Aki and Richards, 2002; Dahlen and Tromp, 2021),

$$G_{ij}(x, x'; t - t') = \bar{G}_{ji}(x', x; t - t') \quad (C-3)$$

其中 $\bar{G}_{ji}(x', x; t - t')$ 为从原场址 x' 处到原点源 x 处的格林函数,同样可以用原场址处单向脉冲力在原点源位置生成的地震动位移表示,即

$$u_i(x', x; t - t') \equiv \bar{G}_{ji}(x', x; t - t') \quad (C-4)$$

根据式(C-2), (C-3), 和(C-4), 可得

$$u_i(x', x; t - t') = u_j(x, x'; t - t') \quad (C-5)$$

对于地震模拟采用的双力偶点源,其在场址的地震动位移需要采用上述格林函数的空间导数即应变格林张量,来描述,

$$u_i(x, x'; t - t') = \frac{dG_{ij}(x, x'; t - t')}{dx_k} * M_{jk}(x, t') \quad (C-6)$$

根据式(C-3), 可得

$$\frac{dG_{ij}(x, x'; t - t')}{dx_k} = \frac{d\bar{G}_{ji}(x', x; t - t')}{dx'_k} \quad (C-7)$$

根据式(C-6)和(C-7), 场址地震动可表示为

$$u_i(x, x'; t - t') = \frac{d\bar{G}_{ji}(x', x; t - t')}{dx'_k} * M_{jk}(x', t') \quad (C-8)$$

对于由 n 个子源组成的复杂震源,其在场址生成的地震动可用式(C-9)计算,

$$u_i(x, x'; t - t') = \sum_{i=1}^n \frac{d\bar{G}_{ji}(x', x_i; t - t')}{dx'_k} * M_{jk}(x', t') \quad (C-9)$$

其中 x_i 为第 i 个子源的位置。

根据上述推导,为了计算发生在同一断层位置的不同情景地震在场址生成的地震动,利用波场传播中应变格林张量的互易性,首先在场址分别设置三个互相垂直的单向力点源,通过三次独立的数值模拟计算从场址到所有可能震源位置的应变格林张量并存储下来。对任意一场情景地震,只需要将情景地震

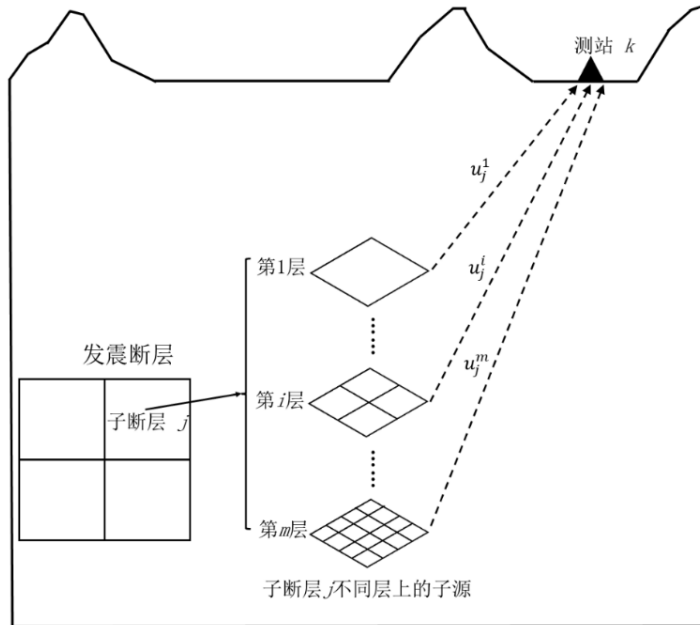
点源的震源时间函数与预先得到的应变格林张量进行卷积即可得到每个点源在场址生成的地震动,然后将所有点源在目标场址的地震动贡献汇总就可以得到最终的场址地震动。

附录 D (规范性附录) 子断层格林函数计算

由于场址地震危险性分析需要考虑尽可能多的情景地震,如果需要考虑的变量数目多达数十万,很难在有限的工况下充分考虑场址可能遭遇的情景地震工况。为了解决这个问题,利用有限厚度震源模型不同层面破裂过程的自相似性,对震源的变量空间进行降维。如图D-1所示,首先将有限厚度震源模型划分为若干子断层,然后采用预先计算的所有子源位置的应变格林张量与子断层上子源的震源时间函数卷积并汇总得到每个子断层在场址对应的地震动,这里称为每个子断层的格林函数,用式(D-1)表示。

$$u_j(T_j, \lambda_j, D_j, t_j) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{n_i} G_{jk}^i * S_{jk}^i(T_{jk}^i, \lambda_{jk}^i, D_{jk}^i, t_{jk}^i) \quad (\text{D-1})$$

其中 $T_{ijk}, \lambda_{ijk}, D_{ijk}, t_{ijk}$ 分别为第 i 层第 j 子断层上第 k 个子源的破裂时间,上升时间,滑动角,滑移量和破裂时间, m 为震源包含的层数, n_i 为每个子断层第 i 层的子源数目。利用有限厚度震源模型的自相似性,在生成场址可能遭遇情景地震的震源时,只需要考虑有限厚度震源模型中子断层参数的不同组合。与直接考虑有限厚度震源模型的子源参数相比,采用子断层格林函数用于场址地震危险性分析可以将变量数目降低为原来的 $\frac{3}{4^{m-1}}$,例如当有限厚度震源模型包含5层时,采用子断层格林函数用于场址地震危险性分析可以将变量数目降低为子源对应变量数目的 $\frac{1}{341}$ 。



图D-1 有限厚度震源模型子断层格林函数

参考文献

- Aki, K., and P. G. Richards, 2002, Quantitative seismology.
- Dahlen, Fa., and J. Tromp, 2021, Theoretical global seismology, in *Theoretical Global Seismology*, Princeton university press.
- Eisner, L., 2001, A Reciprocity Method for Multiple-Source Simulations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, no. 3, 553–560, doi: 10.1785/0120000222.
- Graves, R. W., and A. Pitarka, 2010, Broadband Ground-Motion Simulation Using a Hybrid Approach, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, no. 5A, 2095–2123, doi: 10.1785/0120100057.
- Graves, R., and A. Pitarka, 2015, Refinements to the Graves and Pitarka (2010) Broadband Ground-Motion Simulation Method, *Seismological Research Letters*, 86, no. 1, 75–80, doi: 10.1785/0220140101.
- Herrero, A., and P. Bernard, 1994, A kinematic self-similar rupture process for earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, no. 4, 1216–1228, doi: 10.1785/BSSA0840041216.
- Mai, P. M., 2005, Hypocenter Locations in Finite-Source Rupture Models, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, no. 3, 965–980, doi: 10.1785/0120040111.
- Mai, P. M., and G. C. Beroza, 2002, A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip: RANDOM FIELD MODEL FOR EARTHQUAKE SLIP, *J. Geophys. Res.*, 107, no. B11, ESE 10-1-ESE 10-21, doi: 10.1029/2001JB000588.
- Thingbaijam, K. K. S., P. Martin Mai, and K. Goda, 2017, New Empirical Earthquake Source-Scaling Laws, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107, no. 5, 2225–2246, doi: 10.1785/0120170017.
- Tromp, J., C. Tape, and Q. Liu, 2004, Seismic tomography, adjoint methods, time reversal and banana-doughnut kernels: Seismic tomography, adjoint methods, time reversal and banana-doughnut kernels, *Geophysical Journal International*, 160, no. 1, 195–216, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02453.x.
- Wang, X., J. Wang, and C. Zhang, 2022, A Broadband Kinematic Source Inversion Method Considering Realistic Earth Models and Its Application to the 1992 Landers Earthquake, *JGR Solid Earth*, 127, no. 3, doi: 10.1029/2021JB023216.
- Wang, X.-C., J.-T. Wang, L. Zhang, S. Li, and C.-H. Zhang, 2021, A Multidimension Source Model for Generating Broadband Ground Motions with Deterministic 3D Numerical Simulations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111, no. 2, 989–1013, doi: 10.1785/0120200221.
- Zhao, L., P. Chen, and T. H. Jordan, 2006, Strain Green's Tensors, Reciprocity, and Their Applications to Seismic Source and Structure Studies, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, no. 5, 1753–1763, doi: 10.1785/0120050253.