

团 体 标 准

T/SSC XXXXX—XXXX

场址最大可信地震动评估导则 ——随机有限断层法

Guidelines for site maximum credible ground motion assessment

——Stochastic finite fault method

（征求意见稿）

（本稿完成日期：2021 年 5 月 15 日）

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

1 范围..... 4

2 规范性引用文件..... 4

3 术语、定义、符号和缩略语..... 4

4 基本规定..... 6

5 工作内容..... 6

6 主要模型参数确定原则..... 7

7 设计地震动模拟方案..... 9

8 地震动模拟及统计分析..... 11

9 场址地震动参数综合评价..... 12

附 录 A （资料性附录） 随机有限断层法..... 13

附 录 B （资料性附录） 断层破裂尺度与震级之间的经验关系..... 15

附 录 C （资料性附录） 凹凸体设置方法..... 16

附 录 D （资料性附录） 品质因子估计方法..... 17

参考文献..... 18

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009《标准化工作导则第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准由中国地震局地球物理研究所提出。

本标准由中国地震学会归口。

本标准起草单位：中国地震局地球物理研究所、中国水利水电科学研究院。

本标准主要起草人：俞瑞芳，张翠然，陈厚群，俞言祥，李德玉，付长华，宋毅盛，周红，吕红山，孙吉泽，李敏，傅磊。

引 言

地震动参数的合理评估是结构抗震安全评价的基础。在近场大震情况下，近断层场地的地震动不仅受到断层面上邻近的、局部的有限部分的影响，还受到断层滑动方向、上下盘效应等因素影响，地震动模拟中若将破裂面视作点源模型，则无法体现出大震的近场特征。因此，对于地震地质环境较为复杂的重大工程场址，当受到近场一条或多条大震发震构造影响时，确定场址地震动参数需要建立一种能够考虑实际震源破裂过程、传播路径及场地条件等因素的、且适合于工程应用的地震动参数评价方法。随机有限断层法是目前相对成熟、且操作性较强的近场地震动模拟方法。

2018年颁布的《水工建筑物抗震设计标准》（GB51247-2018）明确规定“当发震断层距离场址小于10km、震级大于7.0级时，宜研究近场大震中发震断层作为面源破裂的过程”，并且需要考虑“最大可信地震”对场址设计参数产生的影响，其中最大可信地震是指目前已知或假定的地壳构造框架下，有理由相信的、已确定的断层或在地理上界定的地震构造区内发生的最大地震。依据《中华人民共和国防震减灾法》，为贯彻预防为主方针，当重要建筑场址遭受最大可信地震时，不致倒塌或发生危及生命的严重灾变。

场址最大可信地震动是指根据工程场地地震地质条件评估得到的最大可能地震对场址产生的地震动参数。在实际工程应用中，如何评估场址最大可信地震动参数缺乏可操作性的规定。

为了规范随机有限断层法确定场址最大可信地震动的方法、步骤和技术要求，特制定本标准。

场址最大可信地震动评估导则—随机有限断层法

1 范围

本标准规定了采用随机有限断层法评估场址最大可信地震动的方法、步骤及技术要求。

本标准适用于受近场大震影响的水利水电重大工程场址确定最大可信地震动参数，其他建设工程场址可参考本标准。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 17740 地震震级的规定

GB 17741—2005 工程场地地震安全性评价

GB 18306—2015 中国地震动参数区划图

GB 51247—2018 水工建筑物抗震设计标准

3 术语、定义、符号和缩略语

3.1 术语和定义

3.1.1 下列术语和定义适用于本文件。

随机有限断层法 stochastic finite fault method

基于随机理论发展起来的、适合于近场大震的半经验半理论的地震动模拟方法。

3.1.2

凹凸体 asperity

地震破裂面上滑动量明显高于其他部分的破裂范围。

3.1.3

应力降 stress drop

地震前后断层面上应力的下降值。

3.1.4

破裂传播速度 rupture speed

破裂过程传播的波阵面，沿断层面在各个方向上传播速度的最大值。

3.1.5

脉冲面积百分比 pulsing area percentage

表示一次地震发生时，活动子断层所占的比例。

3.1.6

品质因子 Q factor, quality factor

描述介质非弹性吸收特性强弱的一个无量纲因子。

3.1.7

Kappa值

表征傅里叶振幅谱高频衰减特性的参数。

3.1.8

断层上端埋深 depth to top of rupture

断层面的上端距地面的距离。

3.1.9

地震动参数 ground motion parameters

表征地震引起的地面运动的物理参数，包括地震加速度时程、峰值加速度、加速度反应谱、地震动持续时间等。

3.1.10

地震动峰值加速度 seismic peak ground acceleration

地震引起地面震动过程中，地表质点运动加速度的最大绝对值。

3.1.11

发震构造 seismogenic structure

曾发生和可能发生破坏性地震的地质构造。

[GB 17741—2005，定义3.11]

3.1.12

最大潜在地震 maximum potential earthquake

未来可能发生的最大地震。

[GB 17741—2005，定义3.12]

3.1.13

最大可信地震 maximum credible earthquake

根据工程场址地震地质条件评估的场址可能发生最大地震动的地震。

[GB 51247—2018，定义2.1.5]

3.1.14

震级上限 upper limit magnitude

概率地震危险性分析中，地震统计区或潜在震源区内可能发生的地震的震级上限值。

[GB 17741—2005，定义3.17]

3.1.15

地震矩 seismic moment

断层位错等效的点源力矩，是标志地震大小的物理量。

3.2 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件：

PGA——Peak Ground Acceleration，峰值加速度

$Sa(T)$ ——加速度反应谱

Mw——Moment magnitude，矩震级

$\Delta\sigma$ ——Stress drop，应力降

Q——Quality factor，品质因子

4 基本规定

4.1 场址最大可信地震动评估应在工程场址地震安全性评价的基础上进行。

4.2 震源模型宜采用“动拐角频率”模型。随机有限断层法见附录 A。

5 工作内容

确定场址最大可信地震动包括震源、路径及场地条件参数设置、地震动模拟方案设计、地震动模拟及统计分析、场址地震动参数综合评价。其基本工作内容应包括：

(1) 震源、路径及场地条件参数设置，包括表 1 所示的参数。

表 1 主要参数

序号	名称	序号	名称	序号	名称	序号	名称
1	断层位置	5	断层倾角	9	初始破裂位置	13	剪切波速
2	断层尺度	6	震级上限	10	破裂方向	14	应力降
3	断层走向	7	运动性质	11	破裂传播速度	15	品质因子
4	断层倾向	8	密度	12	子源错动方式	16	Kappa 值

(2) 地震动模拟方案设计，包括设置参数的取值、不同取值权重系数的计算原则与方法。

(3) 地震动模拟及统计分析。包括 A.完成对全部方案的地震动模拟，获得全部方案的模拟结果，包括加速度时程、PGA 及 $Sa(T)$ ；B.计算 PGA 和 $Sa(T)$ 的统计值，包括最小值、50%分位数、均值、85%分位数、95%分位数及最大值。

(4) **地震动参数综合评价**，包括设置地震动参数综合评价原则，确定场址地震动参数。

6 主要模型参数确定原则

6.1 影响场址的主要发震构造

6.1.1 对场址有主要影响的发震构造，一般应在场址地震安全性评价的基础上确定，具体步骤如下：

- (1) 对场址 100 年超越概率 1% 的地震危险性分析结果进行分解，以 PGA 为控制目标确定对场址贡献最大的一个或多个潜在震源区；
- (2) 以潜在震源区的地震、地质条件为依据，并考虑其与发震构造或主干断裂位置的相关性，初步厘定对场址有影响的发震构造；
- (3) 采用随机有限断层法计算每条发震构造对场址产生的地震动参数，以 PGA 取值最大为原则，最终厘定对场址有影响的发震构造。

6.1.2 确定发震构造的位置，应遵循以下原则：

- (1) 当地表断裂可以作为独立发震构造时，直接采用地表断裂的位置作为发震构造的位置；
- (2) 当单一地表断裂不足以作为最大潜在地震的独立发震构造时，采用多条地表断裂组合模式作为其发震构造；
- (3) 对于认识不明确的断裂，可以考虑两个位置方案，即最可能的断层位置和对场址产生较大影响的可能位置。

6.2 发震断层几何参数

(1) 断层破裂面长度和宽度可按照断层性质及震级，采用经验公式进行估计。断层破裂面尺度与地震震级之间的经验关系可参考附录 B。

(2) 断层走向、倾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、小震精定位等手段来确定；倾角不明确的断层，可在合理的范围内设置多个取值。

6.3 最大可信地震震级

宜按照发震构造所在潜在震源区的震级上限进行取值。

6.4 子源网格划分

子源的长、宽可设定为 2~3km，可根据实际断层尺度进行调整。

6.5 子断层位错分布

每个子断层的位错分布应考虑以凹凸体区域与背景区域的形式表现断层面上应力或滑动的不规则空间分布。

6.5.1 有震源反演结果的断裂，断层面上位错分布方式应作为一种位错分布模型。

6.5.2 对于子断层位错分布不明确的断裂，可基于已有的统计结果（附录 C）设置子断层位错分布模型。发震断层面上设置凹凸体的个数不应少于 2 个，且最大的凹凸体位置可分别设置在距场址最近位置和相对较远的位置。

6.6 初始破裂点位置

6.6.1 有震源反演结果的断裂，断层面上初始破裂点位置应作为一种位置方案。

6.6.2 当断层面上初始破裂点不明确时，沿走向方向的位置，将断层长度划分为4等分，分别取两侧和中央三个位置坐标作为两侧破裂和中央破裂起始点，如图2所示；沿下倾方向的坐标按照震中深度来设置。

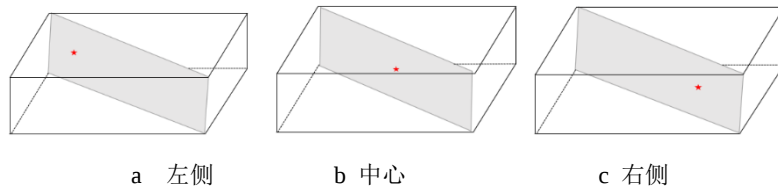


图2 初始破裂点布置

6.7 断层上端埋深

可取为0-2km。

6.8 应力降

6.8.1 有研究结果的区域，应力降应按照已有的研究结果取值。

6.8.2 没有研究结果的区域，平均应力降可在(30-40) bar之间取值。

6.8.3 在应力降合理的取值范围内，应设置多个应力降取值，并采用不同的权重系数考虑应力降变化对模拟结果的影响。

6.9 破裂传播速度

破裂传播速度可取为剪切波速的0.8倍。

6.10 地壳剪切波速

剪切波速应根据场址所在区域的研究结果确定，可在3.5km/s-3.8km/s之间取值。

6.11 脉冲面积百分比

脉冲百分比可取50%。

6.12 传播路径衰减

传播路径衰减包含几何衰减和介质非弹性衰减。

6.12.1 几何衰减可按照距离断层面的最近距离 R 的倒数 $1/R$ 确定。

6.12.2 介质非弹性衰减中品质因子(Q 值)的取值益参考以下原则：

- (1) 有研究结果的区域， Q 值应按照已有的研究结果取值。
- (2) 没有研究结果的区域， Q 值可参考附录D取值。
- (3) 在进行近场地震动模拟时，可不考虑 Q 值的变化对模拟结果的影响，采用单一取值的方案。

6.13 场地效应

场地效应影响包含场地放大因子和低频滤波衰减影响。

6.13.1 场地放大因子取值可参考以下原则：

- (1) 有研究结果的区域，可采用研究区域已有的研究成果。
- (2) I0 场地，场地放大因子可取为 1。

6.13.2 高频滤波衰减模型中 κ 值的取值应遵循以下原则：

- (1) 有研究结果的区域，可采用研究区域已有的研究成果。
- (2) 没有研究结果的区域，基岩场址 κ 的均值可在 0.02s~0.04s 之间取值，相应的方差可取为均值的 15%。
- (3) 应按照均值、加减一倍方差三个水平设置 κ 值，并采用不同的权重系数考虑 κ 值变化对模拟结果的影响。

6.14 地震动模拟样本数量

基于一组参数进行地震动模拟时，样本数量不应小于 30。

7 设计地震动模拟方案

7.1 对影响场址的每条断裂，按照子源位错模型按照凹凸体模型设计地震动模拟方案。

7.2 应在合理的取值范围内，考虑各参数不同取值对地震动模拟结果的影响，并设置不同取值的权重系数。

7.3 按照图 3 所示设计地震动模拟方案。

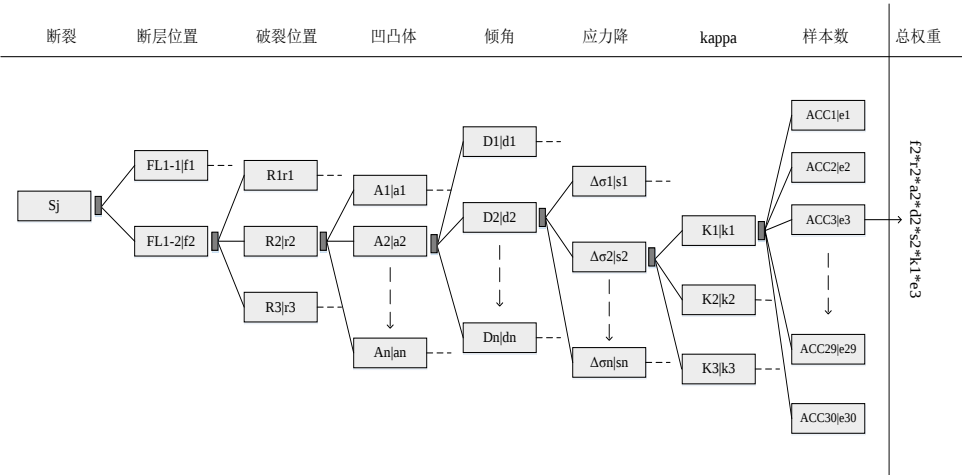


图 3 地震动模拟多方案设计（凹凸体模型）

图中

- Sj：表示影响场址的第 j 个震源；
- FLj-i：第 j 个断层的第 i 个位置方案， f_i 为相应的权重系数；
- Ri：第 i 个初始破裂点位置方案， r_i 为相应的权重系数；
- Ai：第 i 个凹凸体设置方案， a_i 为相应的权重系数；
- Di：倾角的第 i 个取值， d_i 为相应的权重系数；

$\Delta\sigma_i$ ：应力降的第*i*个取值， s_i 为相应的权重系数；
 K_i ：kappa 的第*i*个取值， k_i 为相应的权重系数；
 ACC_i ：表示地震动的第*i*个样本， e_i 为相应的权重系数。

7.4 权重系数设置原则

7.4.1 断层位置

若断层位置按照 6.1.2 节第（3）条原则进行设置，按照对场址地震动参数产生较大影响为原则，宜将靠近场址的位置方案的权重系数设为 0.6，较远位置的权重系数设为 0.4。

7.4.2 凹凸体模型

按照对场址地震动参数产生较大的影响为原则，凹凸体模型的权重系数按表 2 进行设置。

表 2 凹凸体模型权重系数

工况	有反演结果		没有反演结果	
	凹凸体位置	权重系数	凹凸体位置	权重系数
按照 6.5.1 设置	反演结果	0.40	\	\
按照 6.5.2 设置	最近位置	0.40	最近的位置	0.60
	其他位置	0.20	其他位置	0.40

7.4.3 初始破裂点位置

按照对场址地震动参数产生较大的影响为原则，不同初始破裂点位置的权重系数按表 3 设置。

表 3 初始破裂点位置权重系数

工况	有反演结果		没有反演结果	
	初始破裂点位置	权重系数	初始破裂点位置	权重系数
按照 6.6.1 设置	反演结果	0.40	\	\
按照 6.6.2 设置	最近位置	0.30	最近位置	0.5
	其他两个位置	0.15,0.15	其他两个位置	0.25,0.25

7.4.4 倾角

若倾角按照 6.2 节第（2）条原则设置多个取值时，按照对场址地震动参数产生较大影响为原则进行权重系数的分配。

- （1）当场址位于断裂带上盘时，倾角越小，断层越靠近场址，则较小的倾角应设置较大的权重系数。
- （2）当场址位于断层下盘时，倾角越小，对模拟结果的影响也越小，则较小的倾角应设置较小的权重系数。

7.4.5 应力降

根据每个应力降取值与研究区域平均应力降的偏离程度来计算不同取值的权重系数。如果设应力

降值为 x_i ，研究区域平均应力降为 $\bar{x}$ ，则相应于每个应力降值的权重系数 s_i 为：

$$y_i = 1/e^{[(x_i - \bar{x})/\bar{x}]} \quad (7.4-1a)$$

$$s_i = y_i / \sum_{i=1}^n y_i \quad (7.4-1b)$$

式中： n 为应力降取值的个数。

7.4.6 Kappa 值

如果设研究区域的平均值及方差分别为 k 和 σ ，则 kappa 取值分别为 $(k - \sigma, k, k + \sigma)$ 。三个 kappa 值可以按照 0.3: 0.4: 0.3 进行权重系数分配。

7.4.7 样本数

每条样本按照等概率考虑，则权重系数为 $e_i = 1/n$ (n 为样本个数)。

8 地震动模拟及统计分析

8.1 反应谱阻尼比

地震动加速度反应谱的阻尼比设置为 5%。

8.2 反应谱频率范围

地震动加速度反应谱应包含工程所需的频率范围。

8.3 计算权重系数

8.3.1 按照 7.4 节的原则，设置每个参数的权重系数。

8.3.2 对于如图 3 所示的地震动模拟方案，第 j 个震源第 i 个方案的总权重系数 Wa_{ji} 表示为各参数权重系数的乘积，即

$$Wa_{ji} = f_i \cdot r_i \cdot a_i \cdot d_i \cdot s_i \cdot k_i \cdot e_i \quad (8.3-1)$$

8.4 地震动参数计算

按照 7.3 节所示的地震动模拟方案，计算全部方案的地震动参数，包括：

- (1) 加速度时程 $A_i(t)$ ；
- (2) 相应于 $A_i(t)$ 的峰值加速度 $A_{\max,i}$ ；
- (3) 关注频段内加速度反应谱 $Sa_i(T_n)$ (T_n 为离散的周期)。

8.5 地震动参数统计分析

(1) 将 $A_{\max,i}$ (带权重系数) 从小到大进行排列，即

$$[A_{\max,1}, A_{\max,2}, \dots, A_{\max,i}, A_{\max,i+1}, \dots], \text{ 其中 } A_{\max,i} < A_{\max,i+1}。$$

(2) 将离散的每个周期 T_n 的谱加速度值 $Sa_i(T_n)$ (带权重系数) 从小到大进行排列，即

$[Sa_1(T_n), Sa_2(T_n), \dots, Sa_i(T_n), Sa_{i+1}(T_n), \dots]$ ，其中 $Sa_i(T_n) < Sa_{i+1}(T_n)$ 。

(3) 按照表 3 所示，累加权重 w_i 的数值获得峰值加速度 $A_{\max,i}$ 和离散周期 T_n 的谱加速度 $Sa_i(T_n)$ 的统计值，包括最小值、50%分位数值、均值、85%分位数值、95%分位数值及最大值。

表 3 模拟结果参数的排列和统计（凹凸体模型）		
参数	权重	累加权重
$A_{\max,1} / Sa_1(T_n)$	Wa_1	$W_1 = Wa_1$
$A_{\max,2} / Sa_2(T_n)$	Wa_2	$W_2 = Wa_1 + Wa_2$
.....		
$A_{\max,i} / Sa_i(T_n)$	Wa_i	$W_i = Wa_1 + Wa_2 + \dots + Wa_i$
.....		

9 场址地震动参数综合评价

9.1 综合评价得到的场址地震动参数应包括地震加速度时程、峰值加速度和地震加速度反应谱。

9.2 通过比较与每个震源相关的反应谱，按照实际工程结构关注的频率范围，可取任一震源的地震动参数的综合评价结果作为场址设计地震动；当震源的影响在所关注频率范围的一部分占主导地位时，保守估计，可取不同震源地震动参数的外包线作为场址设计地震动参数。

9.3 根据实际工程需要，可取不同分位数的统计值作为场址地震动参数评价结果；最大可信地震动参数取值不应小于 85%分位数的统计值。

附录 A

(资料性附录)

随机有限断层法

随机有限断层法是基于随机理论发展起来的地震动模拟方法，主要思想是将一个发震规模较大的断层划分为一系列子断层，然后将每一个子断层视为点源，得到每个子源在场址产生的地震动，最终累加所有子源对场址的贡献即可得到整个断层破裂在场址产生的地震动。

A1 计算采用的基本步骤

(1) 在频域上综合考虑震源、传播路径以及场地效应的影响，拟合出每个子源产生的傅立叶谱 $F_A(M_0, f, R)$ ，即

$$F_A(M_0, f, R) = S(M_0, f) \cdot P(R, f) \cdot G(f) \cdot I(f) \quad (\text{A1-1})$$

式中： M_0 为子源的地震矩； $S(M_0, f)$ 表示震源谱； $P(R, f)$ 为传播路径衰减模型； $G(f)$ 表示场地效应影响； $I(f) = (2\pi f t)^n$ 为地震动类型因子，当输出为位移、速度和加速度时， n 的取值分别为 0、1 和 2； f 为频率； R 表示距离。

(2) 采用 $[0, 2\pi]$ 均匀分布的相位谱，将地震动傅立叶谱转换为时程；

(3) 根据断层与场址的几何关系以及地震波的传播过程，考虑每个子源破裂传播到达场址的延时，对地震动时程进行叠加，即

$$a(t) = \sum_{i=1}^{N_l} \sum_{j=1}^{N_w} a_{ij}(t + \Delta t_{ij}) \quad (\text{A1-2})$$

式中， N_l 和 N_w 分别为沿着断层走向和倾向的子断层的数目， a_{ij} 为第 i 行第 j 列的子源所引起地震动， Δt_{ij} 为相应的地震波传播的滞后时间。

A2 震源谱模型

本规范建议震源模型采用动力学拐角频率模型，即：

$$S_{ij}(M_0, f) = \frac{CM_{0ij}H_{ij}(2\pi f)^2}{1 + (f/f_{cij})^2} \quad (\text{A2-1})$$

式中， $S_{ij}(M_0, f)$ 和 M_{0ij} 分别表示第 (i, j) 个子源的震源谱和地震矩； f 为频率； C 为表达辐射方向性差异的常数； H_{ij} 为标度因子； f_{cij} 为动力学拐角频率，可以定义为：

$$f_{cij} = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta\sigma / M_{0ave})^{\frac{1}{3}} N_R^{-\frac{1}{3}}, \quad M_{0ave} = M_0 / N \quad (\text{A.2-2})$$

其中： $\Delta\sigma$ 为应力降； β 剪切波速； M_0 为总地震矩； M_{0ave} 为子源的平均地震矩； N 为子断层总数。

A3 传播路径衰减

传播路径衰减可以表示为：

$$P(R, f) = Z(R) \cdot D(R, f) \quad (\text{A3-1})$$

其中： $Z(R)$ 表示随距离 R 的增加使振幅减小的几何衰减，可写为 $Z(R) = R^{-n}$ ； $D(R, f)$ 表示由于地球介质对波能的吸收及耗散产生的非弹性衰减，可以写为：

$$D(R, f) = \exp\{-\pi fR/[Q(f)\beta]\} \quad (\text{A3-2})$$

式中： β 为剪切波速； $Q(f)$ 称为品质因子，用来描述地球介质对地震波能量耗散，在地震工程中所关心的频率范围内，品质因子可以表示为随频率变化的指数形式：

$$Q(f) = Q_0 f^n \quad (\text{A3-3})$$

A4 场地效应

场地效应影响项可以表示为

$$G(f) = A(f) \cdot K(f) \quad (\text{A4-1})$$

(1) $A(f)$ 是近地表幅值放大因子，表示研究区域场地对地震谱的放大系数随频率的变化关系，可以表示为：

$$A(f) = \sqrt{Z_s / \bar{Z}(f)} \quad (\text{A4-2})$$

式中， Z_s 为震源处的波阻抗， $Z_s = \beta_s \rho_s$ ， ρ_s 和 β_s 分别为震源处的密度和剪切波速； $\bar{Z}(f)$ 为地表处的波阻抗。它表示的是近地表波阻抗的平均值，是频率的函数，反映的是从表面到相当于四分之一波长的深度的时间加权平均值，即：

$$\bar{Z}(f) = \frac{\int_0^{t(z(f))} \rho(z) \beta(z) dt}{\int_0^{t(z(f))} dt} \quad (\text{A4-3})$$

式中，积分上限为剪切波速从深度 $Z(f)$ 到达自由表面的时间，深度是一个与频率有关的函数。地震动模拟时，需要充分收集场地研究结果或对场地放大特征做深入研究，来建立合适的模型。

(2) $K(f)$ 代表与路径无关的高频衰减项，可用 κ 滤波器来表示，即

$$K(f) = \exp(-\pi f k) \quad (\text{A4-4})$$

式中： f 为频率； k 为 κ 因子，表示的是与路径无关的高频衰减项。

附 录 B
(资料性附录)

断层破裂尺度与震级之间的经验关系

断层类型	关系式
走滑断层	$\lg S = 0.87M_w - 3.22$ $\lg L = 0.60M_w - 2.48$
倾滑断层	$\lg S = 0.9M_w - 3.41$ $\lg L = 0.53M_w - 2.10$
所有断层类型	$\lg S = 0.88M_w - 3.29$ $\lg L = 0.57M_w - 2.29$

注：S-断层破裂面积；L-断层破裂长度；Mw-矩震级

附 录 C
(资料性附录)
凹凸体设置方法

凹凸体在断层面上主要体现出滑动量大、地震矩释放大等特点。

C1 凹凸体设置的原则

- (1) 每个地震包含的凹凸体的数量通常为 1—3 个，平均为 2.6 个；
- (2) 凹凸体的面积与断层破裂面积比大约为 22%，与地震矩没有明显相关性；
- (3) 最大的凹凸体的面积大约是断层总破裂面积的 16%；
- (4) 凹凸体上的滑动量约为整个断层平均滑动的 2.01 倍；
- (5) 背景区域（凹凸体以外）的滑动量约为整个断层平均滑动的 0.71。

C2 凹凸体设置计算方法

若将发震断层设定为含有两个凹凸体，则震源模型分为含凹凸体区域和背景区域（凹凸体以外的区域），设凹凸体区域位错为 D_{as} ，背景区域的位错为 D_{bk} ，断层面平均位错为 D_{all} 。

总的凹凸体面积 A_a 为：

$$A_a = 0.22 \times L \times W \quad (C2-1)$$

式中： L 和 W 分别为断裂的长度和宽度。其中最大凹凸体的面积 A_{a1} 为：

$$A_{a1} = 0.16 \times L \times W \quad (C2-2)$$

第二个凹凸体的面积 A_{a2} 为：

$$A_{a2} = 0.06 \times L \times W \quad (C2-3)$$

背景区域面积 A_{bk} 为：

$$A_{bk} = A_{all} - A_{an} = 0.78 \times L \times W \quad (C2-4)$$

凹凸体区域位错 D_{as} 为：

$$D_{as} = 2.01 \times D_{all} \quad (C2-5)$$

背景区域位错 D_{bk} 为

$$D_{bk} = 0.71 \times D_{all} \quad (C2-6)$$

以上计算中，断层面平均位错 D_{all} 可以写为：

$$D_{all} = M_0 / \mu A \quad (C2-7)$$

式中： M_0 是地震矩， μ 是地壳剪切模量， A 是断层面面积。

附录 D
(资料性附录)
品质因子估计方法

地震工程所关心的频率范围内，品质因子可以表示为随频率变化的指数形式，即

$$Q(f)=Q_0f^n$$

其中：Q₀为 1Hz 处品质因子的取值；f 为频率；n 为地区的地震活动性因子，随地域不同而不同。

对于我国地震频繁活动的区域，Q₀与 n 值均有相应的研究成果，如表 G-1 和表 G-2 所示。

表 G-1 中国大陆 Q 值的取值范围

区域	Q ₀ 值	n 值	区域	Q ₀ 值	n 值
青藏高原褶皱区	200-250	0.5-0.7	扬子块体	325-400	0.45-0.55
松潘甘孜褶皱区	250-300		中朝块体	325-400	0.3-0.5
滨太平洋褶皱区	275-300	0.5-0.7	华南褶皱系（西高东低）	275-400	0.45-0.55
昆仑-秦岭褶皱区	275-325		天山-兴安褶皱区	300-425	0.3-0.5
塔里木地台	350-425	0.3-0.5	西伯利亚地台南端	450-500	0.45-0.7

注：青藏高原褶皱区包括冈底斯念-青唐古拉褶皱系、喀拉昆仑-唐古拉褶皱系和三江褶皱系。滨太平洋褶皱区包括东南沿海褶皱区、延边褶皱区和那丹哈达优地槽褶皱带。昆仑-秦岭褶皱区包括东昆仑褶皱系、秦岭褶皱系以及祁连褶皱系。

表 G-2 云南地区 Q 值的取值

区域	Q 值	区域	Q 值
云南地区	$Q = 238f^{0.338}$	滇西地区	$Q = 102.6f^{0.687}$
云南东部地区	$Q = 199.6f^{0.434}$	滇中地区	$Q = 92.7f^{0.553}$
云南西部地区	$Q = 281f^{0.349}$		

参考文献

- [1] Anderson J. G., Hough S. E., 1984. A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74 (5): 1969-1993.
- [2] Anderson J. G., 1991. A preliminary descriptive model for the distance dependence of the spectral decay parameter in southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(6): 2186-2193.
- [3] Atkinson G. M., 1996. The high-frequency shape of the source spectrum for earthquakes in eastern and western Canada. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86 (1A): 106-112.
- [4] Atkinson G. M., Assatourians K., Boore D. M., et al., 2009. A guide to differences between stochastic point-source and stochastic finite-fault simulations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99 (6): 3192—3201.
- [5] Beresnev I. A., Atkinson G. M., 1997. Modeling finite-fault radiation from the ω spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87 (1): 67-84.
- [6] Beresnev I. A., Atkinson G. M., 1998. Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1994 Northridge, California, earthquake. I. Validation on rock sites. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88 (6):1392-1401.
- [7] Beresnev I. A., Atkinson G. M., 1998. FINSIM - a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. *Seismological Research Letters*, 69 (1): 27-32.
- [8] Boore D. M., 2009. Comparing stochastic point-source and finite-source ground-motion simulations: SMSIM and EXSIM. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99 (6): 3202-3216.
- [9] Brune. J.N., 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. 75 (26):4997-5009.
- [10] Chandler A. M., Lam N. T. K., Tsang H. H., 2006. Near-surface attenuation modelling based on rock shear-wave velocity profile. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26 (11): 1004-1014.
- [11] Chen S. Z., Atkinson G. M., 2002. Global comparisons of earthquake source spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92 (92): 885—895.
- [12] Cotton F., Scherbaum F., Bommer J. J., et al., 2006. Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: application to central Europe and rock sites. *Journal of Seismology*, 10 (2): 137-156.

- [13] Edwards B., Fäh D., Giardini D., 2011. Attenuation of seismic shear wave energy in Switzerland. *Geophysical Journal International*, 185 (2): 967-984.
- [14] Hanks T. C., McGuire R. K., 1981. The character of high-frequency strong ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71 (6): 2071-2095.
- [15] Housner G. W., 1947. Characteristics of strong-motion earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 37 (1): 19-31.
- [16] Jin A. S., Aki K., 1988. Spatial and temporal correlation between coda Q and seismicity in China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78 (2): 741-769.
- [17] Kilb D., Biasi G., Anderson J., et al., 2012. A Comparison of Spectral Parameter Kappa from Small and Moderate Earthquakes Using Southern California ANZA Seismic Network Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102 (1): 284-300.
- [18] McGuire, R.K., Hanks, T.C., 1980. RMS accelerations and spectral amplitudes of strong ground motion during the San Fernando, California earthquake. *Bull. Seism Soc. Amer*, 70 :1907-1919.
- [19] Motazedian D., Atkinson G. M., 2005. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95 (3): 995-1010.
- [20] Nuttli, O. W., 1988. Lg magnitudes and yield estimates for underground Novaya Zemlya nuclear explosions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78 (2):, 873-884.
- [21] Papageorgiou A. S., Aki K., 1983. A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. Part II. Applications of the model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73 (4): 953-978.
- [22] Shih X. R., Chun K. Y., Zhu T., 1994. Attenuation of 1–6s Lg waves in Eurasia. *Journal of Geophysical Research*, 99(B12): 23859-23874.
- [23] Somerville P G., Irikura K, Graves R W, et al. 1999. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. *Seism. Res. Lett.*, 70(1):59-80.
- [24] Sun X. D., Tao X. X., Duan S. S., et al., 2013. Kappa (k) derived from accelerograms recorded in the 2008 Wenchuan mainshock, Sichuan, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73: 306-316.

- [25] Tsai C. C. P., Chen K. C., 2000. A model for the high-cut process of strong-motion accelerations in terms of distance, magnitude, and site condition: an example from the SMART 1 Array, Lotung, Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90 (6): 1535-1542.
- [26] Van Houtte C., Drouet S., Cotton F., 2011. Analysis of the origins of k (Kappa) to compute hard rock to rock adjustment factors for GMPEs. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(6): 2926-2941.
- [27] Wang G. Q., 2001. Comparisons of ground motions from five aftershocks of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake with empirical predictions largely based on data from California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91 (5): 1212-1217.
- [28] 丛连理, 胡家富, 傅竹武等, 2002. 中国大陆及邻近地区Lg尾波的Q值分布. *中国科学 (D 辑)*, 32(8): 617-624.
- [29] 胡家富, 丛连理, 苏有锦等, 2003. 云南及周边地区Lg尾波Q值的分布特征. *地球物理学报*, 46(6): 809-813.
- [30] 梁俊伟, 2015. 基于能量的随机有限断层法研究. 南昌: 南昌航空大学.
- [31] 刘建华, 刘福田, 阎晓蔚等, 2004. 华北地区Lg尾波衰减研究——Lg尾波 Q_0 地震成像. *地球物理学报*, 47(6): 1044-1052.
- [32] 马宏生, 刘杰, 张国民等, 2006. 云南地区尾波 Q_c 值的分布特征及其初步解释. *地震*, 26(3): 37-43.
- [33] 毛燕, 徐彦, 王彬等, 2005. 四川及邻区Lg 尾波的Q值分布特征. *地震研究*, 28(1): 38-42.
- [34] 秦嘉政, 阚荣举, 1986. 用近震尾波估算昆明及其周围地区的Q值和地震矩. *地球物理学报*, 29(2): 145-156.
- [35] 秦建增, 刘昌铨, 嘉世旭等, 1997. 唐山地震区地壳Q值结构的研究. 见: 1997 年中国地球物理学会第十三届学术年会论文集. 上海: 中国地球物理学会.
- [36] 师海阔, 朱新运, 贺永忠等, 2011. 利用Sato模型对宁夏及邻区尾波Q值的研究. *地震*, 31(1): 118-126.
- [37] 苏有锦, 2009. 云南地区地震波衰减 (Q值) 结构反演成像研究. 合肥: 中国科学技术大学.
- [38] 苏伟, 吴建平, 明跃红等, 2006. Lg 尾波 Q_0 值与中国大陆及邻区的地质构造关系. *地震学报*, 28(2): 132-140.
- [39] 王海云, 2004. 近场强地震动预测的有限断层震源模型. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.

- [40] 王振宇, 2017. 高频地震动随机模拟方法研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- [41] 姚虹, 冯锐, 1988. 中国东西剖面的地壳Q结构研究. 地震研究, 11(6): 539-550.
- [42] 朱百慧, 2016. 强震数据Kappa 值影响因素的讨论. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- [43] Fu L., Li X. J., 2016. Bulletin of Seismological Society of America, 106 (5): 1979-1990.

条文说明

1 范围

本标准采用随机有限断层法确定受近场大震影响的水利水电工程场址的最大可信地震动参数。本标准中的条文适用于距发震断层10km以内、影响地震震级大于7.0级的工程场地，对于其他工程场址也可以参考本标准。

4 基本规定

4.1 确定场址最大可信地震动所需要的地震、地质等基础资料应和工程场址地震安全性评价的资料保持一致。判断对场址有影响的发展构造可基于场址地震安全性评价工作中潜在震源区的贡献分解进行初步判断；发震断裂的尺度、走向、倾向和倾角等参数的取值，可参考地震安全性评价的结果。

4.2 采用随机有限断层法进行地震动模拟时，现有的震源模型有“静拐角频率模型”和“动拐角频率模型”。静力学拐角频率与子源尺寸有关，所以傅氏谱的谱值和子源尺寸的划分相关，结果对子源尺寸有显著的敏感性；再者，该方法中为了保证总的地震矩的守恒，常需要某一子源多次触发地震，这违背了地震发生的实际情况，显然是不合理的。而“动拐角频率模型”能够解决这些问题，能更好地用于大震近场地震动模拟。

5 工作内容

本标准采用随机有限断层法进行场址最大可信地震动综合评价。随机有限断层法不仅可以描述断层破裂源，考虑地震波路径、场地衰减等因素，而且计算效率高，能够解决地震动模拟中复杂震源设置与计算效率的问题，采用多方案和多重权重系数的设计来解决认知的不确定性和模拟参数的不确定性等问题，从而建立了一种适合于工程应用的最大可信地震动参数综合评价方法。地震动参数的综合评价包括设置震源、路径及场地条件参数的取值范围及水平、设计多方案（多权重）地震动模拟方案、各参数取值的权重系数计算原则与方法；最后综合评价能够表征不同地震危险性的参数。

6.主要模型参数确定原则

6.1 影响场址的主要发震构造

6.1.1 在场址地震安全性评价的基础上，确定对场址地震动参数有主要影响的发展构造。

6.1.2 说明确定发震构造位置的原则，发震构造位置不明确时，可以考虑采用两个位置方案。

6.2 发震构造的几何参数包括断层走向、倾向、倾角、断层上端埋深及断层破裂面尺度，定义如图 1 所示。

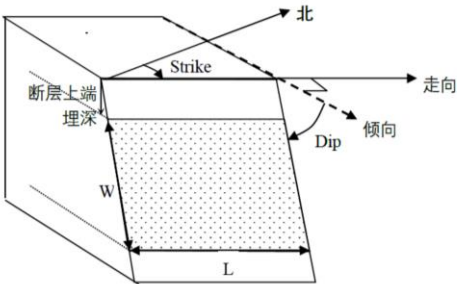


图 1 断层模型几何参数示意图

(1) 断层走向：断层面与地面交线的方向，该交线有两个方向，相差 180° ；并参照以下规定：

A. 规定站在上盘向右看的方向为断层走向。

B. 当断层倾角等于 90° 时，两盘均可视作上盘，定义好上盘后按 A 的原则定走向。

C. 走向用从正北顺时针量至走向方向的角度来表示，如图 1 所示角度（Strike），有 $0^\circ \leq \text{Strike} \leq 360^\circ$ 。

(2) 断层倾向：断面向上的法线之水平投影的方向。倾向恒等于走向加 90° 。

(3) 断层倾角：断层倾向与断层面之间的夹角，如图 1 所示角度（Dip）。

(4) 断层上端埋深：断层破裂面的上端至地面的距离。

(5) 断层破裂面尺度：包括断层破裂面的长度（L）、宽度（W）和面积（S）。

6.3 最大可信地震震级宜按照发震构造所在潜在震源区的震级上限进行取值。潜在震源区的震级上限可按以下方法确定：

(1) 对于地表出漏迹线的活动断层，应根据活动断层地震破裂段的长度、同震位移等参数与震级的经验统计关系，给出各地震破裂段潜在最大可能地震或特征地震的震级。[GB/T36072-2018，第 5.6.1.2 条]

(2) 对于隐伏活动断层，可根据活动断层几何结构、历史地震破坏区展布、现今地震震中分布、地球物理场、深浅构造关系等，划分出有发生中等以上地震危险的断层破裂段，综合评估最大可能地震的震级。[GB/T36072-2018，第 5.6.2.1 条]

(3) 对于已有历史地震记载的区域，若历史地震记载时间悠久、资料充分，可将历史上发生的最大地震的震级作为震级上限。

(4) 在资料不完整的地区，则根据历史地震记载及该地区地震构造分析的结果，将历史地震的最大震级加半级作为震级上限。

6.4 随机有限断层法采用“动态拐角频率”震源模型进行地震动模拟时，远场高频成分大体不受子源尺寸影响，但从对模拟结果的影响来看，子源尺寸太大会导致近场地震动异常高值，因此子源网格的长、宽在 2-3km 之间取值比较合适。

6.5 子断层位错分布

通过长周期地震动反演给出的断层面子断层位错分布表明，地震断层的破裂和滑动过程是及其不均匀的，断面上不同点的位错大小都不相同，所以在地震动模拟时，应当考虑以凹凸体区域与背景区域的形式表现断层面上应力或滑动的不规则空间分布。

6.5.1 按照多方案设计地震动模拟方案时，有震源反演结果的断层位错分布应该作为一种位错分布模型。

6.5.2 对于没有震源反演结果的断层，子断层位错分布可基于已有的统计结果（附录 C）进行设置。本标准考虑震级大于 7.0 的大震情况，因此发震断层面上设置凹凸体的个数不应少于 2 个，且考虑将最大的凹凸体设置在不同的位置。

6.6 初始破裂点位置

初始破裂点即断层上最先发生破裂的地点，也叫成核点。该参数不确定性很大，一般只能经验估计，历史地震则可以参考震源反演结果。在采用多方案设置地震动模拟方案时，有震源反演结果的断层面初

始破裂点位置应该作为一种位置方案，对于没有反演结果的断层，按照条文 6.6.2 的规定进行设置。需要说明的是，对于有反演结果的断裂，设置地震动模拟方案时，应同时考虑反演得到的断层初始破裂点位置，以及按照条文 6.2.2 规定的初始破裂点位置。

6.7 断层上端埋深是指断层破裂面的上端至地面的距离(如图 1 所示)，地震动模拟中可取为 0-2km。计算中可参照 NGA 衰减关系统计的 Z_{top} 模型，当震级大于 7 时， $Z_{top}=0$ 。

6.8 应力降是指在断层面上震源破裂前后应力的差值。

6.8.1 估计的应力降的方法较多，但不同方法获得的值有较大的随机性。对于有研究成果的地区，应力降应按照已有的研究结果取值；对于地震记录丰富的地震区，应力降可以通过对地震记录的反演得到，即根据 Brune 的假设，假设断层破裂模型为圆盘模型，岩石介质为 Hooke 介质，则震源半径可以表示为：

$$r = \frac{2.34V_s}{2\pi f_c} \quad (1)$$

式中， V_s 为剪切波速， f_c 为拐角频率。

根据 Brune 的震源谱模型，地震矩可以表示为：

$$M_0 = \frac{4\pi\rho RV_s^3\Omega_0}{R_{\theta\phi}} \quad (2)$$

式中， Ω_0 为震源位移谱的低频水平，可根据震源谱读出， $R_{\theta\phi}$ 为辐射因子，一般不考虑方位取平均值 0.63。

于是可得应力降为：

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3} \quad (3)$$

计算过程中，首先利用 Atkinson 方法求得非弹性衰减系数；然后可运用 Moya 方法反演震源参数。

6.8.2 研究表明，对于较大的地震，地震应力降估计的范围从 3 到 500bar，均值约为 40bar，且不会随地震矩变化，且 $M_w=5.2-8.3$ 范围内的地震具有自相似性（如图 2 所示，图中白色方块显示应力降的均值，误差短线表示标准误差）。本标准考虑震级大于 7.0 的大震情况，因此对于没有研究结果的区域，平均应力降可在（30-40）bar 之间取值。

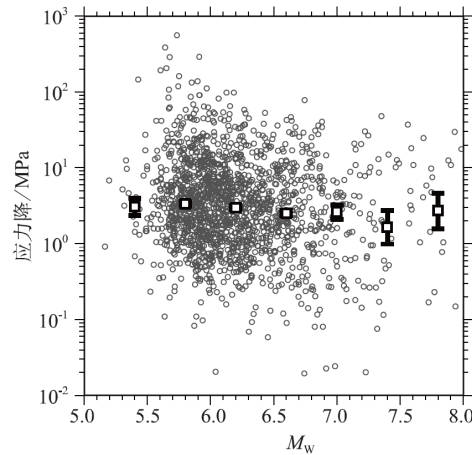


图 2 应力降与矩震级的关系

6.8.3 不同的取值对地震动模拟结果有较大的影响。图3给出了矩震级分别为6.0，6.5，7.0和7.5时，模拟得到的地震峰值加速度（PGA）及周期 $T=0.2s$ ，2s和5s时加速度反应谱值随应力降取值的变化，可

可以看出, PGA及各周期反应谱值随应力降的增加逐渐增大, 近似呈线性正比例关系(如图2中拟合虚线所示); 震级越大, 其变化率(拟合直线斜率)越大。相比较而言, 当 $M_w=6.0$ 时, PGA及各周期反应谱值随应力降的变化较小, 此时可以取应力降均值得到的模拟结果近似代表不同应力降取值的结果; 当 $M_w=7.5$ 时, 应力降的取值对PGA及不同周期的反应谱值的结果影响很大。本标准考虑震级大于7.0的大震情况, 因此在应力降合理的取值范围内, 需要考虑多个应力降取值, 并采用不同的权重系数考虑应力降变化对模拟结果的影响。

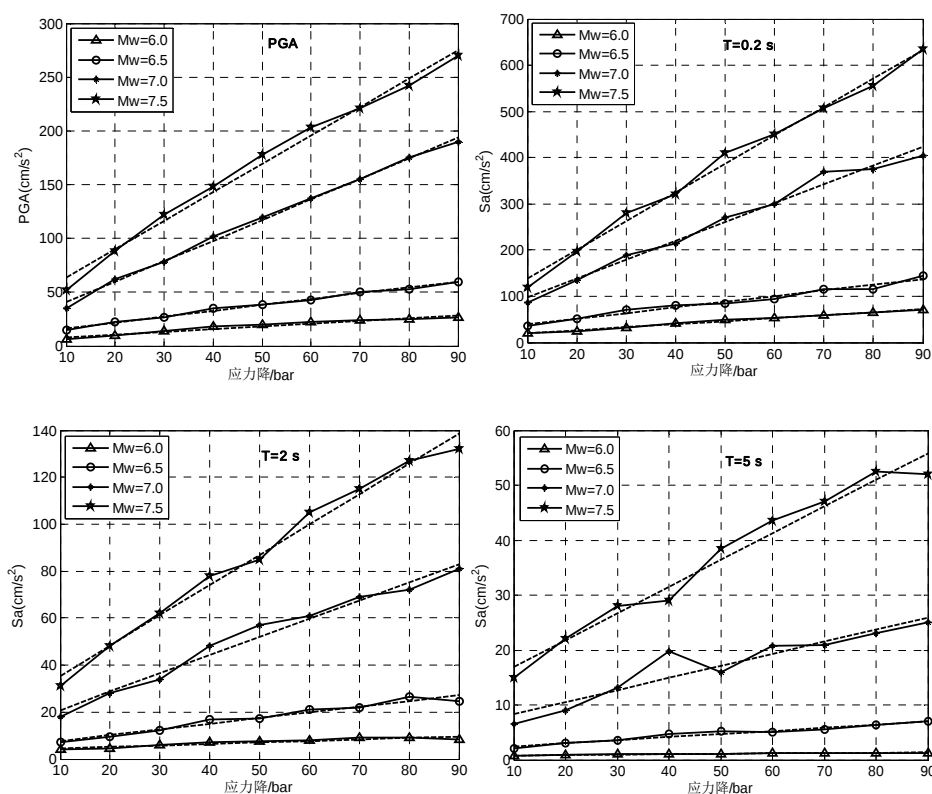


图3 相应于不同震级的PGA和反应谱值随应力降的变化

6.11 脉冲面积百分比

从最初破裂开始, 某一时刻断层面上正发生破裂的面积会逐渐增大, 随着破裂的继续进行, 该面积会达到饱和值并维持一段时间, 此后又逐渐减小直至整个断层破裂结束。这个饱和值被称为脉冲面积百分比, 其大小影响地震动长周期成分的振幅和能量, 主要控制了反应谱的低频部分, 随着脉冲面积百分比的减小, 反应谱在低频部分的幅值也会逐渐减小。该参数值一般介于25-75%, 地震动模拟中通常取为50%。

6.12 传播路径衰减包含几何衰减和介质非弹性衰减。

6.12.1 几何衰减通常采用三段式几何衰减模型, 即

$$Z(R) = \begin{cases} 1/R & R \leq 70\text{km} \\ 1/70 & 70\text{km} \leq R \leq 130\text{km} \\ \vdots & \\ 1/70 \cdot \sqrt{130/R} & 130\text{km} \leq R \end{cases}$$

式中：距离 R 通常为距离断层面的最近距离，而不是震源距。由于本标准主要考虑近场地震的影响，因此几何衰减可按照 $1/R$ 确定。

6.12.2 Q 值用来描述介质非弹性吸收特性强弱的一个无量纲因子。一般对 Q 值的估计可以采用地震波中的体波、尾波、面波、 Lg 波资料。对于我国地震频繁活动的区域，都有相应的研究成果，附录 D 中列出的值采用了丛连理等（2002）和苏有锦（2009）的研究成果。已有研究表明，在进行近场地震动参数预测时，可不考虑 Q 值的变化对模拟结果的影响，如图 4 所示采用三个不同品质因子（ $290.5f^{0.35}$ 、 $415f^{0.5}$ 和 $539.5f^{0.65}$ ）时模拟得到的地震加速度反应谱，可以看出 Q 值的变化对近场地震动模拟结果的影响较小。因此，在条文 6.12.2 的第 3 条中规定，在进行近场地震动模拟时，可不考虑 Q 值的变化对模拟结果的影响，采用单一取值的方案。

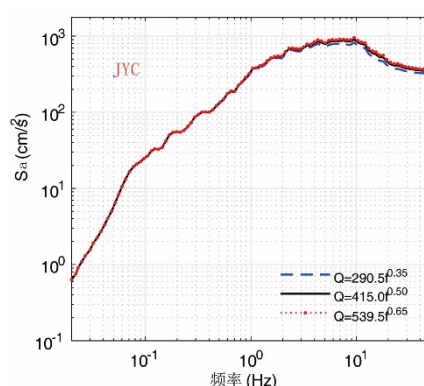


图 4 不同 Q 值对近场地震动模拟结果的影响

6.13 场地效应影响包含场地放大因子和高频滤波衰减影响。

6.13.1 场地放大因子表示场地对地震谱的放大系数随频率的变化关系。对于有研究结果的区域，可采用研究区域已有的研究成果。由于本标准主要考虑的是基岩场址，因此 6.13.1 的第（2）规定，对于 I0 场地，场地放大因子可以按照 1 取值。

6.13.2 κ 值表征傅里叶振幅谱高频衰减特性的参数，其取值越大，高频衰减越多，高频处的能量越小。对有足够的强震动记录的工程场址，可采用记录到的地震动直接进行计算或采用已有的研究成果。为了便于实际工程应用，图 5 统计了不同学者计算给出的 κ 值与剪切波速 V_{s30} 之间的关系（包含了从 21 篇文献研究中得到的 579 个数据点）。通过分析 V_{s30} 大于 500m/s 的数据，本标准对基岩场址给出了 6.13.2 中的第（2）条的规定。

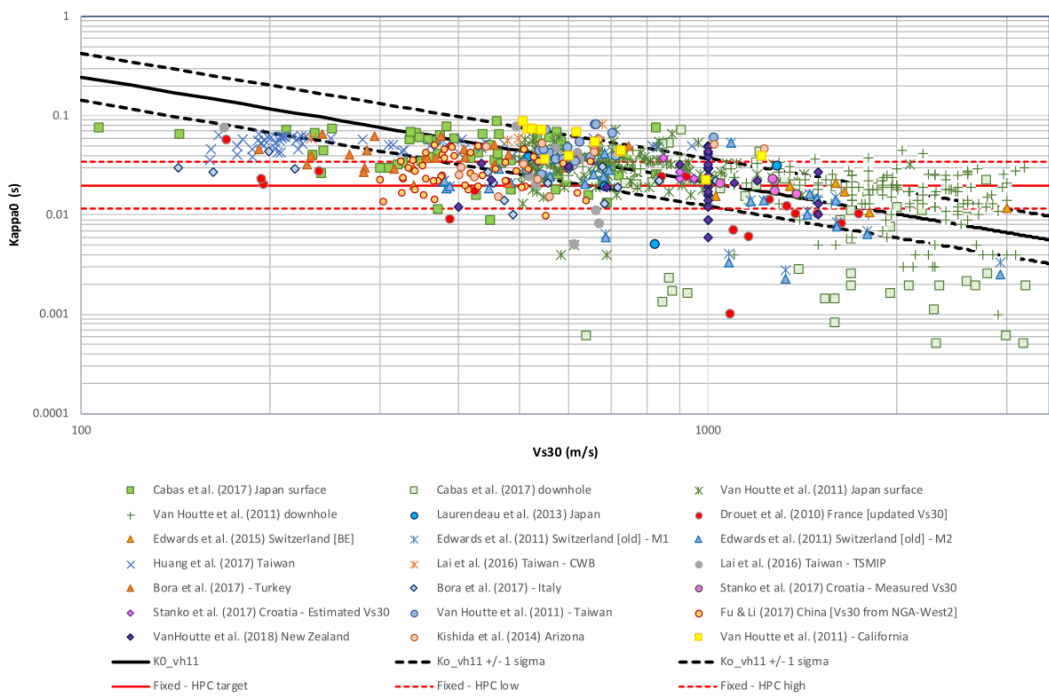
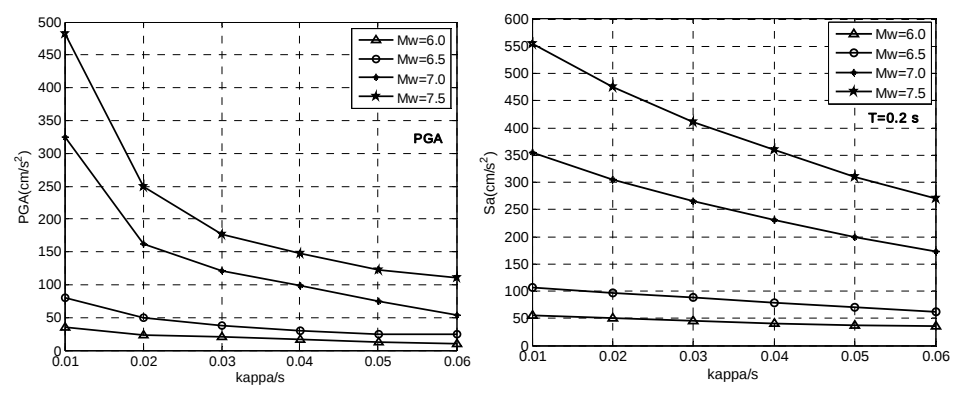


图 5 kappa 值随剪切波速 Vs30 的变化分析

kappa 值的变化对地震动模拟结果影响较大，且影响程度和震级及场地条件有关。图 6 给出了矩震级分别为 6.0、6.5、7.0 和 7.5 时，取 kappa 值分别为 0.01s、0.02s、0.03s、0.04s、0.05s 和 0.06s 计算得到的地震峰值加速度（PGA）及周期 T=0.2s、2s 和 5s 时加速度反应谱值随 kappa 值的变化。可以看出，对于震级较大的地震，在较硬的场地条件时，kappa 的变化对 PGA 值的影响很大。由于本标准主要考虑大震的情况，且对 kappa 的取值按照均值进行估计，因此需要考虑 kappa 取值变化对模拟结果的影响，6.13.2 中第（3）规定按照均值、加减一倍方差三个水平设置 kappa 值，并采用不同的权重系数考虑 kappa 值变化对模拟结果的影响。



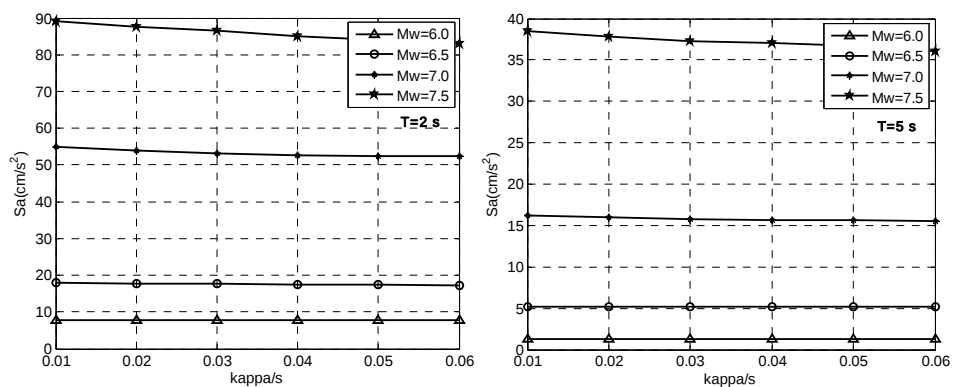


图 6 相应于不同震级的 PGA 和反应谱值随 kappa 的变化

6.14 随机有限断层法基于随机振动的思想模拟地震动加速度时程，每次实验结果都具有一定随机性，因此，单次实验结果不足以保证其准确性。研究表明，随机实验次数的增加，峰值地震动加速度（PGA）均值越趋于稳定。当实验次数达到一定数量后，PGA 均值变化很小。图 7 给出了当样本数量分别设置为 10、20、30、40、50 和 60，模拟不同地震得到的加速度时程的标准差和变异系数随样本数量的变化，讨论的参数包括地震动峰值加速度（PGA）、峰值速度（PGV）、峰值位移（PGD）以及反应谱在 0.02s、0.1s、1s、2s 和 5s 的谱值。从不同震源模型的模拟结果分析来看，各个参数的均值、标准差和变异系数的变化和震源参数设置没有明确的相关性。考虑实验次数结果满足稳定性和准确性的要求，以及计算工作量的合理性，采用随机有限断层法进行地震动模拟时，相应于一组参数最合适的样本数量不应低于 30 条，并且在模拟方案中按照相等的权重来考虑。

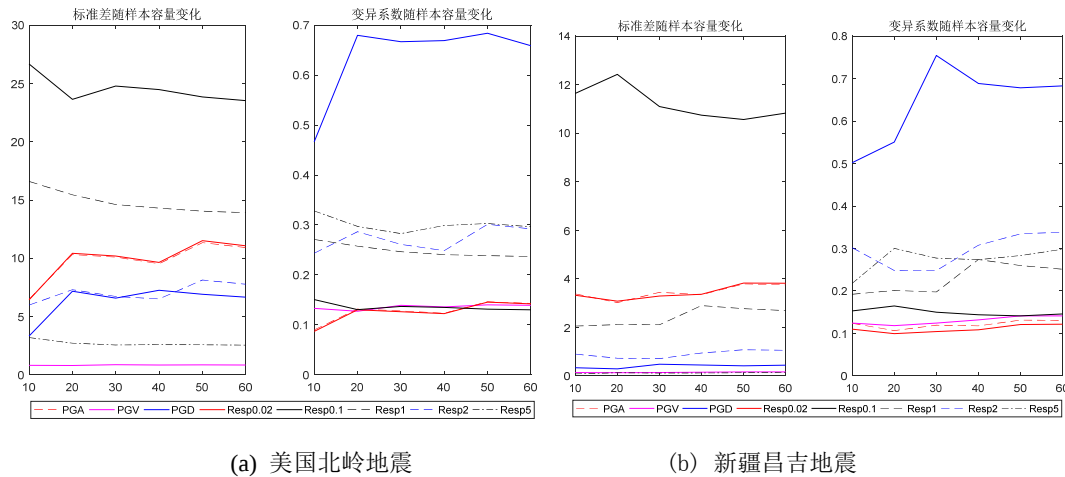


图 7 模拟结果统计值随样本数量的变化

7. 设计地震动模拟方案

7.1 对于影响场址地震动参数综合评价的每条断裂，都需要按照条文 7.3 中图 3 所示进行模拟方案设计。由于本标准考虑大震近场对场址地震动参数的影响，因此对于子断层的位错分布按照凹凸体模型进行设计。

7.2 本标准建立的场址地震动参数综合评价体系中，采用多方案来考虑未知地震发生过程中的随机

不确定性，以及在发震过程中对某些参数的认知不确定性，因此本标准规定各参数应在合理的取值范围内取不同的值，并通过设置不同的权重系数来考虑不同取值对地震动模拟结果的影响。

7.3 图 3 给出的设计地震动模拟方案中，需要考虑多方案的参数如表 1 所示，并需要按照 7.4 给出原则，设置每个参数不同取值的权重系数。其他不需要考虑多个取值的参数，没有在图 3 中列出。

表 1 需要考虑多个取值的参数

序号	参数名称	参数取值	权重系数	序号	参数名称	参数取值	权重系数
1	断层位置	多方案	是	5	初始破裂位置	多方案	是
2	倾角	多方案	是	6	应力降	多方案	是
3	子源错动	多方案	是	7	Kappa 值	多方案	是
4	样本数量	多方案	是				

7.4 本节主要说明7个参数多方案设计时权重系数的取值原则。在设置各参数权重系数时的总原则为（1）当参数有相应的统计值时，其均值设置较大的权重系数；（2）当参数没有相应的统计关系时，对场址地震动参数产生较大影响的取值设置相对较大的权重系数；（3）对有实际研究结果的参数取值，可设置相对较大的权重系数。

7.4.1 当考虑断层位置的不确定性时，按照对场址地震动参数产生较大影响为原则，对靠近场址的位置方案设置较大的权重系数。

7.4.2 凹凸体模型方案的权重系数按照两个原则进行设置。当子断层位错有反演结果时，此凹凸体模型方案设置相对较大的权重系数；此外按照对场址地震动参数产生较大影响为原则，最大凹凸体位于场址最近的位置时，设置相对较大的权重系数。

7.4.3 初始破裂点位置的权重系数按照两个原则进行设置。当断层破裂点位置有反演结果时，此初始破裂点位置方案设置相对较大的权重系数；此外按照对场址地震动参数产生较大影响为原则，初始破裂点位置距离场址最近时，设置相对较大的权重系数。

7.4.4 当考虑断层倾角取值的不确定性时，按照对场址地震动参数产生较大影响为原则分配不同倾角取值的权重系数。

7.4.5 当考虑应力降参数的不确定性时，按照应力降取值与研究区域平均应力降的偏离程度来计算不同取值的权重系数。

7.4.6 参数kappa的按照均值、加減一倍方差进行设置，权重系数设置时考虑参数的均值设置较大的权重系数。

7.4.7 一组参数模拟得到的加速度时程的样本按照等概率设置每条加速度时程的权重系数。

8. 地震动模拟及统计分析

主要说明在地震动方案设计完成以后，采用随机有限断层法进行地震动模拟时，对反应谱阻尼比和频率范围的规定，并详细给出了总权重系数的计算方法，以及对地震动参数及其统计值的要求。

9. 场址地震动参数综合评价

说明场址地震动参数综合评价的原则。