

# 设计地震动参数概率分布研究<sup>\*</sup>

程绍革, 孙 魁

(中国建筑科学研究院工程抗震研究所, 北京 100013)

**摘要:** 基于地震危险性理论分析框架, 分析各类震源对地震动参数分布的影响, 建立地震动参数分布函数, 并采用芦山地震动传播规律验证其工程通用性。基于等超越概率原则, 提出不同后续使用年限设计地震动参数计算方法。结果表明: 地震动参数分布函数服从极值Ⅱ型分布; 地震动参数累计分布函数可以用于不同后续使用年限设计地震动参数取值, 满足现行规范要求。

**关键词:** 震源; 地震动参数; 极值Ⅱ型分布; 后续使用年限; 超越概率

**中图分类号:** P315.91

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2019)04-0579-05

## 0 引言

我国是一个地震灾害严重的国家, 近年来先后遭遇了汶川 8.0 级地震、玉树 7.1 级地震、盈江 5.8 级地震、雅安 7.0 级地震 (温瑞智等, 2017)。2019 年 6 月 17 日, 四川长宁发生 6.0 级地震 (震源深度 16 km); 6 月 18 日, 日本新泻发生 6.7 级地震 (震源深度 10 km)。按照传统评估经验, 日本新泻地震灾情应比我国地震灾情严重, 但实际震害调查情况显示四川长宁地震震害更为严重。陆新征课题组 (2019) 分析认为震害灾情受震级、地震动强度和地面建筑抗震性能等诸多因素影响, 因此仅仅依靠震级、震源深度和设防烈度难以进行准确的震害评估。地上建筑结构损害主要受地面运动影响, 因此研究分析场地地震动参数受震级和震源距影响的概率分布, 对于工程设计地震动参数的取值具有重要参考价值。

当前通用的烈度标准是通过以往震害调查研究而形成的震害度量标准 (胡聿贤, 2016; 中国地震烈度表, GB/T 17742—2008; 明小娜等, 2017), 是基于人体感觉或建构筑物的宏观反映, 并非可量化的指标 (非仪器烈度)。随着社会生产生活对于建筑抗震性能需求的提高, 结构抗震性能不断提升, 不同时期烈度表对应的地面运动参数也随之发生明显变化。各时期建筑作为时代文化的载体以多元化的形式并存, 不同时期结构出

现设防烈度损伤对应的地震动参数存在明显差异。而目前通用的设计地震动参数取值方法是根据设防烈度确定的, 难以确保抗震设防“三水准”目标的实现, 尤其是使用年限非 50 年的建筑, 如既有建筑等 (周锡元等, 2002; 马玉宏, 谢礼立, 2002; 白雪霜, 程绍革, 2014)。为切实有效地对不同时期、不同类型结构进行抗震性能化加固改造, 将基于设防烈度的地震动参数取值转化为直接基于设防地震动参数的抗震设计更为合理, 也更容易实现不同后续使用年限的性能化设计地震动参数量化取值 (高小旺, 鲍霭斌, 1985; 雷拓等, 2009; 刘如山等, 2009; 马玉宏, 赵桂峰, 2009; Zhou, Li, 2011; 张超, 翁大根, 2013)。

本文以地震危险性理论分析框架为基础 (Cornell, 1968), 假定地震发生服从泊松分布, 根据通用的震源距、震级以及重现周期与地震动参数的统计回归关系, 建立基于重现期的设防地震动参数取值计算公式, 为不同后续使用年限设计地震动参数取值提供参考。

## 1 震源对地震动参数的影响

地震动参数能够反映地面运动的强弱程度, 主要包括地震动峰值加速度 ( $PGA$ )、地面峰值速度 ( $PGV$ )、持时 ( $D_{SR}$ ) 和谱速度 ( $S_a$ ), 其中  $PGA$  和  $PGV$  是衡量设计地震动强度的重要指标, 本文主要对这 2 个参数进行研究分析, 下文中的地

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-06-29.

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2016YFC0700700) 资助。

震动参数均指  $PGA$  和  $PGV$ 。震源主要有、点、线、面 3 种, 建筑场地周围可能存在一种或多种类型的震源, 为确定周围震源发震引起的场地最大地震动参数概率分布, 首先对每种类型震源引起的场地最大地震动参数概率分布进行分析。

### 1.1 点震源

由点震源发震引起的场地最大地震动参数  $A$  与震级  $M$ 、震源距  $R$  有关 (Esteve, 1964):

$$A = b_1 e^{b_2 M} R^{-b_3} \quad (1)$$

式中:  $b_1, b_2, b_3$  为拟合常数。

因此对于指定场地 (即  $R=r$ ), 点震源发震引起的场地地震动参数  $A$  大于设防地震动参数  $\tilde{A}$  的概率  $P$  为:

$$\begin{aligned} P(A \geq \tilde{A} | R=r) &= P(b_1 e^{b_2 M} R^{-b_3} \geq \tilde{A} | R=r) \\ &= 1 - F_M \left[ \frac{\ln(\tilde{A}/b_1 r^{-b_3})}{b_2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $F_M$  为震级累积分布函数。

Richter (1959) 给出震级大于  $m$  的地震发生次数  $n_m$  与震级  $m$  的关系:

$$\ln n_m = a - bm \quad (3)$$

式中:  $a, b$  为待定系数。由此可得:

$$1 - F_M(m) = e^{-\beta(m-m_0)} \quad (4)$$

式中:  $m \geq m_0$ ,  $m_0$  是一个极小震级 (对于建筑抗震设防可以忽略的震级);  $\beta = b \ln 10$ 。

将式 (4) 代入式 (2), 即为地震动参数  $A$  的超越概率分布函数:

$$1 - F_A(\tilde{A}) = P(A \geq \tilde{A}) = CG_p \tilde{A}^{-\beta/b_2} \quad (5)$$

式中:  $C = \exp[\beta(\ln b_1)/b_2 + m_0]$ , 为与震级相关项;  $G_p = r^{-\beta b_3/b_2}$ , 为场地位置项,  $p$  代表点震源;  $\tilde{A}$  为  $m_0$  对应的地震动参数,  $\tilde{A} = b_1 e^{b_2 m_0} r^{-b_3}$  为设防地震动参数下限。

以泊松计数过程作为地震发生概率模型已经广泛应用于地震工程科学研究中。研究表明 (高小旺, 鲍霭斌, 1985; 张超, 翁大根, 2013): 沿地震带上地震的发生服从泊松分布, 年平均发生率为  $v$ , 在时间  $t$  内发生地震次数为  $\tilde{N}$  的概率为:

$$P_{\tilde{N}}(n) = P(\tilde{N} = n) = \frac{e^{-vt} (vt)^n}{n!} \quad (6)$$

在时间  $t$  内, 地震动参数  $A$  超过设防地震动参数下限  $\tilde{A}$  的次数为  $N$  的概率为:

$$P_N(n) = P(N = n) = \frac{e^{-P_A vt} (P_A vt)^n}{n!} \quad (7)$$

式中:  $P_A = P(A \geq \tilde{A}) = CG_p \tilde{A}^{-\beta/b_2}$ , 为地震动参数  $A$  超过设防地震动参数下限  $\tilde{A}$  的概率; 在时间  $t$  内, 地震动参数  $A_{\max}^t$  小于设防地震动参数下限  $\tilde{A}$  的概率等同于在时间  $t$  内不发生大于设防等级的地震 ( $N=0$ ), 即:

$$P_A(A_{\max}^t \leq \tilde{A}) = P(N=0) = e^{-P_A vt} \quad (8)$$

将式 (5) 代入式 (8) 可得地震动参数  $A$  的累积分布函数:

$$F_{A_{\max}^{(A)}} = e^{-P_A vt} = \exp(-vt CG_p \tilde{A}^{-\beta/b_2}) \quad (9)$$

式中:  $A \geq b_1 e^{b_2 m_0} r^{-b_3}$ 。

假设点震源年发生震级大于 4 的地震概率为 0.09, 震源距为 216 km。对于加速度, Esteve (1964) 建议  $b_1, b_2, b_3$  取值分别为 2000, 0.8, 2; 胡聿贤 (2016) 建议  $a, b$  分别取值 5.87, 0.696。代入式 (5) 可得  $C = 2.4 \times 10^9$ ,  $G_p = 4.7 \times 10^{-10}$ 。将  $C, G_p, b_2, \beta = b \ln 10 = 1.6$  带入式 (9) 可得场地的加速度超越概率函数和重现周期为:

$$1 - F_{A_{\max}^{(A)}} = 1 - \exp(-0.102tA^{-2}) \quad (10)$$

$$T_{A_{\max}^{(A)}} = \frac{1}{1 - \exp(-0.102A^{-2})} \approx 9.85A^2 \quad (11)$$

例如加速度 2.25 gal 的 50 年超越概率为 63%, 其重现周期为 50 年。当然场地周围潜在震源复杂, 不可能只有一个。

### 1.2 线震源

当建筑场地周围存在线性震源时, 如图 1 所示,  $L$  为断裂带长度,  $d$  为断裂带中点发生点源地震时的震源距,  $R$  为场地至断裂带端点距离,  $r$  为场地至断裂带上任意点距离。线震源可以看作是长度为  $L$  的连续点震源, 断裂带上每一点发生震动的概率均相等。因此由线震源发震引起的场地地震动参数概率分布等于点源地震概率分布沿断裂带全长的累积, 即:

$$1 - F_A(\tilde{A}) = P(A \geq \tilde{A}) = \int_d^R P(A \geq \tilde{A} | R = r) f_R(r) dr \quad (12)$$

式中:  $f_R(r)$  为震源距概率密度分布函数, 可由震源距累积分布函数  $F_R(r)$  求得:

$$f_R(r) = \frac{\sqrt{r^2 - d^2}}{L/2} \quad (13)$$

式中:  $d \leq r \leq R$ 。对  $r$  求导即为震源距概率密度分布函数:

$$f_R(r) = \frac{dF_R(r)}{dr} = \frac{2r}{L\sqrt{r^2 - d^2}} \quad (14)$$

式中:  $d \leq r \leq R$ 。将式 (14) 代入式 (12), 则地震动参数  $A$  的超越概率分布为:

$$1 - F_A(\tilde{A}) = P(A \geq \tilde{A}) = \frac{1}{L} CG_l \tilde{A}^{-\beta/b_2} \quad (15)$$

$$G_l = \frac{2\pi}{(2R)^\gamma} \frac{\Gamma(\gamma)}{\left[\Gamma\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)\right]^2} \quad (16)$$

式中:  $G_l$  为场地位置项;  $l$  代表线震源;  $\gamma = \beta b_3/b_2 - 1$ ;  $\tilde{A} \geq b_1 e^{b_2 m_0} d^{-b_3}$ ;  $C$  为震级相关项, 见式 (5)。

将式 (15) 代入式 (8) 可得地震动参数  $A$  的累积分布函数:

$$F_{A_{\max}^{(A)}} = e^{-P_A v} = \exp(-\hat{v} CGA^{-\beta/b_2}) \quad (17)$$

式中:  $\hat{v} = \nu/L$ , 为地震带每延米每年平均发震概率。

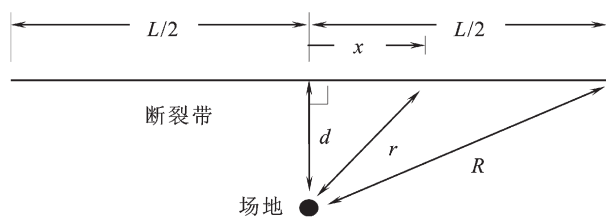


图1 线震源

Fig. 1 Linear seismic source

### 1.3 面震源

当建筑场地周围存在圆环状面震源时, 如图2所示,  $L$  为外环半径,  $l$  为内环半径,  $h$  为场地至环状中心深度,  $d$  为场地至内环任意距离,  $R$  为场

地至外环任意点距离。面震源可以看作是点震源在环带面积内的均布, 面震源内每一点发生震动的概率均相等。因此由面震源发震引起的场地地震动参数概率分布等于点源地震概率分布在圆环震源区域内的累积:

$$1 - F_A(\tilde{A}) = P(A \geq \tilde{A}) = \int_d^R P(A \geq \tilde{A} | R = r) f_R(2\pi r) dr = \frac{1}{\pi(L^2 - l^2)} CG_a \tilde{A}^{-\beta/b_2} \quad (18)$$

$$G_a = \frac{2\pi}{(\gamma - 1)d^{\gamma-1}} \left[ 1 - \left( \frac{R}{d} \right)^{1-\gamma} \right] \quad (19)$$

式中:  $G_a$  为场地位置项, 下标  $a$  代表面震源;  $\gamma = \beta b_3/b_2 - 1$ ;  $\tilde{A} \geq b_1 e^{b_2 m_0} d^{-b_3}$ ;  $C$  为震级相关项, 见式 (5)。

将式 (18) 代入式 (8) 可得地震动参数  $A$  的累积分布函数:

$$F_{A_{\max}^{(A)}} = e^{-P_A v} = \exp(-\hat{v} CG_a A^{-\beta/b_2}) \quad (20)$$

式中:  $\hat{v} = \nu/[\pi(L^2 - l^2)]$ , 为面震源每平方米年平均发震概率。

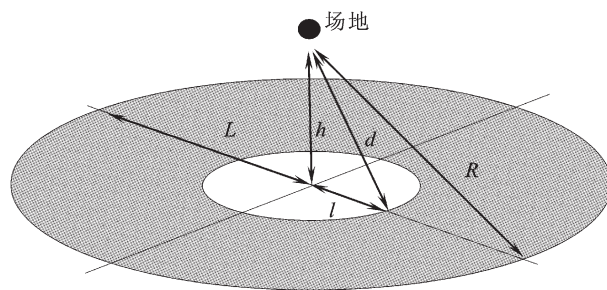


图2 面震源

Fig. 2 Planar seismic source

### 1.4 复合震源

由于地壳构造复杂, 建筑场地周围可能同时存在类型不同且数量不唯一震源。复合震源的地震动参数累计概率分布函数  $F_{A_{\max}^{(A)}}$  则为各震源发震引起的场地地震动参数的最大值均不大于设防地震动参数  $A$ , 即:

$$F_{A_{\max}^{(A)}} = F_{A_{\max,1}^{(A)}} F_{A_{\max,2}^{(A)}} \cdots F_{A_{\max,n}^{(A)}} = \prod_{i=1}^n F_{A_{\max,i}^{(A)}} \quad (21)$$

式中:  $F_{A_{\max,i}^{(A)}}$  为第  $i$  个震源引起场地地震动参数最大值为  $A$  的累计概率分布函数。按照这种组合方式

可以计算出类型、数量、深度随机组合的符合震源影响下场地地震动参数概率分布函数。上述震源相对于建筑场地均属于对称震源,对于非对称震源可以采用同种类型反对称震源进行组合并计算。

## 2 地震动参数概率分布

### 2.1 定性分析

真实的建筑场地通常位于复合震源影响范围内,其场地地震动参数累计分布函数  $F_{A_{\max}^{(A)}}$  指数函数可以转化为:

$$F_{A_{\max}^{(A)}} = \exp \left[ - \sum_{i=1}^n \hat{v}_i C_i G_i A^{-\beta/b_2} \right] \quad (22)$$

式中:地震动参数  $A$  的指数  $(-\beta/b_2)$  为负数,其中  $\beta$ ,  $b_2$  反映地震动参数与震级和震源距,均为正数。可见,在复杂震源影响下,场地地震动参数累计分布函数式(20)属于极值Ⅱ型分布,极值Ⅱ型分布适用于具有下限、而无上限的分布,这与地震动参数实际情况相符合。现有研究表明地震烈度属于极值Ⅲ型分布,极值Ⅲ型分布适用于有上限的分布,这种分布符合地震烈度实际情况(人为规定烈度是有上限)。因此,直接根据场地地震动参数概率分布函数和设防水准计算设计地震动参数更为准确合理。

### 2.2 参数影响分析

在第一节各类型震源对场地地震动参数分布影响分析中,假定了最大地震动参数  $A$  与震级  $M$  和震源距  $R$  的关系,即式(1),这一假定可以根据研究进展合理调整,例如温瑞智等(2017)分析芦山地震动使用的传播衰减关系,即:

$$\ln(A) = a_0 + a_1 \ln(R + a_2) + a_3 \ln(V_{s30}) + a_4 R + \varepsilon \quad (23)$$

式中:  $A$  为地震动参数;  $a_1$ ,  $a_4$  为衰减项系数;  $a_2$  为拟合系数;  $a_3$  为场地放大系数;  $\varepsilon$  为残差;  $V_{s30}$  为 30 m 覆盖层平均剪切波速。假设  $a_1$  是震级  $M$  的直接关系项,将式(23)带入点震源式(5),可得:

$$1 - F_i(\tilde{A}) = P[A \geq \tilde{A}] = CG\tilde{A}^{-\beta} \quad (24)$$

式中:  $\ln(\tilde{A}) \geq a_0(m_0) + a_1 \ln(R + a_2) + a_3 \ln(V_{s30}) + a_4 R + \varepsilon$ , 震级关系项  $C = \exp \{ \beta [a_3 \ln(V_{s30}) + \varepsilon + m_0] \}$ , 场地位置项  $G = \exp \{ \beta [a_1 \ln(R + a_2) + a_4 R] \}$ 。

式(24)中设防地震动参数  $\tilde{A}$  的指数为负数,因此其场地地震动参数累计分布函数仍属于极值Ⅱ型分布,对于其他传播衰减规律或复合震源同理可得相同结果。并且在第一节地震参数概率分布分析中所有参数均采用符号代替,没有采用具体数值,避免了数值化差异,式(22)中地震动参数  $A$  的指数为负数是定性结果,说明第一节的分析结果具有较好的工程通用性。

## 3 地震动参数概率分布应用

对于使用年限小于 50 年的建筑,通常采用先折减烈度再确定设计地震动参数的方法,这就难以从概率的角度保证三水准设防目标的实现,因为烈度和地震动参数的概率分布具有明显差异。因此,首先根据设防水准和后续使用年限确定 50 年等效超越概率,再利用等效超越概率计算地震动参数取值才是较为合理的计算方法。第一节分析结论显示地震动参数分布属于极值Ⅱ型,即:

$$F(A) = \exp \left[ - \left( \frac{A}{\sigma} \right)^K \right] \quad (25)$$

式中:  $\sigma$  为超越概率为 63.2% 对应的地震动参数取值;  $K$  为形状参数。

按照等超越概率原则,即结构在后续使用年限内与新建建筑保持相同的设防水准超越概率,则其 50 年等效超越概率为:

$$\hat{p}_{i/50} = 1 - (1 - p_{i/50})^{50/T} \quad (26)$$

式中:  $p_{i/T}$  为抗震设防水准  $i$  在  $T$  年内的超越概率;  $i$  分别对应小震、中震和大震,相应的超越概率为 63.2%, 10% 和 2% ~ 3%; 将式(26)带入(25)则可计算对应的地震动参数:

$$A_{i/T} = \sigma [ - \ln(1 - \hat{p}_{i/50}) ]^{1/K} \quad (27)$$

式中:形状参数  $K$  可以根据规范取值(抗震规范 GB 50010—2010 中小震和中震形状参数为 -2.14)。通过地震动参数区划图确定  $\sigma$  取值,采用式(27)建立场地地震动参数概率分布函数;以新建建筑为基准,后续使用年限为 30, 40, 50 年的地震作用折减系数分别为 0.79, 0.9 和 1.0。也可以根据场地地质构造和周围潜在震源分布情况建立合理的衰减关系并确定形状参数  $K$ , 采用式(21)建立场地地震动参数概率分布函数。



## 4 结论

本文根据地震危险性理论分析框架,分析了复合震源影响下场地地震动参数概率分布,并对分析参数的适用性进行阐述,采用芦山地震动传播衰减关系验证了分析结果的通用性。基于等超越概率原则,给出了场地设计地震动参数的计算方法,得到以下结论:

(1) 单种或复合震源影响下,场地地震动参数服从极值Ⅱ型分布,与烈度分布具有较大差别。

(2) 场地地震动参数累计分布函数可根据地震动参数区划图采用式(27)建立,该方法计算简单、概念清晰,其可靠度满足现行规范要求;对于具有长期观测统计资料的场地,也可以采用式(21)计算。

(3) 地震动参数累计分布函数可以用于不同后续使用年限设计地震动参数取值;基于等超越概率原则,以新建建筑为基准,后续使用年限为30, 40, 50年的设防地震动参数折减系数分别为0.79, 0.9和1.0。

### 参考文献:

- 白雪霜,程绍革. 2014. 现有建筑抗震鉴定地震动参数取值研究[J]. 建筑科学,30(5):1-5.
- 高小旺,鲍霭斌. 1985. 地震作用的概率模型及其统计参数[J]. 地震工程与工程振动,5(1):15-24.
- 胡聿贤. 2016. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社.

- 雷拓,钱江,苏晓燕. 2009. 现役结构抗震评估地震作用确定方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),25(4):620-624.
- 刘如山,胡少卿,邹玉斌,等. 2009. 基于地震动参数的结构易损性表达方法研究[J]. 地震工程与工程振动,29(6):102-107.
- 陆新征课题组. 连续反转三次!我该怎么办?从617宜宾6.0级地震和618日本6.8级地震谈起[EB/OL]. (2019-06-20). [2019-06-29]. <https://mp.weixin.qq.com/s/OPNfHJzHs-VYpEQwI0R0bA>
- 马玉宏,谢礼立. 2002. 考虑地震环境的设计常遇地震和罕遇地震的确定[J]. 建筑结构学报,23(1):43-47.
- 马玉宏,赵桂峰. 2009. 确定现役结构抗震加固设计地震动参数的简化方法研究[J]. 工程抗震与加固改造,31(3):78-83.
- 明小娜,周洋,钟玉盛,等. 2017. 2017年云南鲁甸 $M_s 4.9$ 地震房屋震害特征与烈度评定[J]. 地震研究,40(2):295-302.
- 温瑞智,任叶飞,王宏伟,等. 2017. 强震动记录分析与应用—芦山 $M_s 7.0$ 地震为例[M]. 北京:地震出版社.
- 张超,翁大根. 2013. 震损建筑抗震鉴定加固中地震作用取值研究[J]. 建筑结构学报,34(2):61-68.
- 周锡元,曾德民,高晓安. 2002. 估计不同服役期结构的抗震设防水准的简单方法[J]. 建筑结构,32(1):37-40.
- Cornell C A. 1968. Engineering seismic risk analysis[J]. BSSA,58(5):1583-1606.
- Esteva L. 1964. Spectra of earthquakes at moderate and large distances[J]. Soc Mex de Ing Sismica,2:1-18.
- Richter C. 1959. Seismic regionalization[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,49(2):123-162.
- Zhou X L, Li Y M. 2011. Study on Ground Motion Parameters of Seismic Appraisal for Existing Structures Based on Residual Service Life[J]. Advanced Materials Research,368-373:2303-2308.
- GB/T 17742—2008,中国地震烈度表[S].

## Discussion on the Probability Distribution of Design Ground Motion Parameters

CHENG Shaoge, SUN Kui

(China Academy of Building Research, Institute of Earthquake Engineering, Beijing 100013, China)

### Abstract

Based on theoretical analysis framework of seismic risk, the probability distribution of ground motion parameters was analyzed incorporating the influence of all potential seismic sources. And Lushan motion was used to verify the generality of the analysis results. Based on the equal exceeding probability principle, an available approach was proposed to determine the design parameters of ground motion for different continuous seismic service life, and its probabilistic reliability was content with the current code. The results show that the probability distribution of ground motion parameters was embodied by Extreme Value Type II. The method for determining design ground motion parameters has the characteristics of simple calculation and clear concept.

**Keywords:** seismic source; ground motion parameters; Extreme Value Type II; continuous seismic service life; equal exceeding probability