

设定地震影响场的 GIS 模拟^{*}

左惠强¹⁾ 谢礼立²⁾ R. D. Borcherdt³⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

3) U.S. Geological Survey, CA94025 Menlo Park

摘要 简要介绍了 R. D. Borcherdt 提出的考虑场地条件对地震动影响的方法；并利用该方法和美国旧金山湾区(San Francisco Bay Area)详细的地质及场地分类资料，采用 GIS 技术对设定地震的影响场进行模拟，编制了模拟软件。本研究是与美国地质调查局(U. S. Geological Survey)合作研究的部分成果。

关键词 场地分类 场地效应 影响场模拟 GIS

引言

近年来的一些地震，如墨西哥(1985 年)、中国澜沧-耿马(1988 年)、美国 Loma Prieta(1989 年)和 Northridge(1994 年)等，多次表明场地条件对地震动和震害有明显影响。一般而言，震害和损失多集中在软弱场地上。在抗震规范中如何更好地考虑场地因素，一直是地震工程研究的重点之一。

Loma Prieta 和 Northridge 地震时，美国获得了大量的强震记录，为定量地研究局部场地条件对地震动的影响创造了条件。这些数据来自不同场地条件，从非常软的粘土到基岩；强度范围也很大，使得可以将震源特性和地震波传播途径等因素与场地影响分离开来。通过研究，Borcherdt(1994a)建立了地震动与场地条件之间的联系。其结果被用于美国抗震规范中有关场地影响条文的修正。

设定地震影响场是在平均地震动分布的基础上，考虑局部场地条件的放大作用后得到的。设定地震影响场的模拟对于预测场地破坏(如液化、滑坡和震陷等)，分析结构震害和经济损失的分布，以及抗震设防区划均有重要作用。GIS 是进行空间数据管理、操作与分析的有力工具。它将断层、地震、地形、场地分类、地下水位等信息综合在一起，使设定地震影响场的模拟成为可能。通过它可以形象地反应出地震动分布的情况。

1 估计场地相关反应谱的方法

自由地表的、阻尼比 5% 的场地相关反应谱(S_a)由下式定义(Borcherdt, 1994a)：

* 国家科委、国家自然科学基金资助课题。中国地震局地球物理研究所论著 99AC0124。
1998-10-21 收到初稿，1999-03-22 收到修改稿并决定采用。

$$S_a = \text{对每一周期}(T) \text{ 取最小值} \begin{cases} I_a F_a \\ I_v F_v (1/T)^x \end{cases} \quad (1)$$

这里, I_a 和 I_v 是均匀参照场地下, 短周期(加速度)和中等周期(速度)地面运动谱的输入水平; F_a 和 F_v 是相对于均匀场地条件地面运动谱的输入(I_a 和 I_v)而言, 短周期(加速度)和中等周期(速度)地面运动的平均场地放大因子; T 代表地面运动周期(s), x 是中长周期反应谱的衰减指数.

1.1 地面运动谱输入水平 I_a 和 I_v (以美国为例)

(1) 根据有效地震动峰值 A_a 和 A_v 区划图(Algermissen, 1982)确定地面运动谱输入水平 I_a 和 I_v . 这时, $I_a = 2.5 \times A_a$, $I_v = 1.2 \times A_v$, 均匀参照场地条件为基岩(SC-Ib), $x = 2/3$.

(2) 根据加速度反应谱 0.3 s 值($S_{a0.3}$)和 1.0 s 值($S_{a1.0}$)区划图(Algermissen, 1991)确定地面运动谱输入水平 I_a 和 I_v . 这时, $I_a = S_{a0.3}$, $I_v = S_{a1.0}$. 均匀参照场地条件为 S_2 , 相当于 SC-II 和 SC-III 的综合, 即 SC-(II+III), $x = 1$.

(3) 特定的地震危险性分析结果. 确定地面运动谱输入水平 I_a 和 I_v , 意味着选择了一种均匀参照场地条件. 场地放大因子 F_a 和 F_v , 即相对于此类参照场地条件而言. 采用不同的参照场地条件, F_a 和 F_v 也应相应变化.

1.2 局部场地条件特性

局部场地条件特性由地表 30 m 覆盖层的平均剪切波速描述.

(1) 根据地表的地质条件描述对场地分类, 然后, 根据分类情况大概估计平均剪切波速.

(2) 通过覆盖土层的物理性质描述和波速随埋深的变化规律(从类似资料中得到), 推算每个覆盖层的平均剪切波速, 最后得到 30 m 覆盖层的平均剪切波速.

(3) 通过波速测量直接得到 30 m 覆盖层的平均剪切波速.

第 1 种方法是一种粗略的估计方法. 由于覆盖层的放大作用通常会随深度而减小, 所以仅凭地表的定性描述而确定的场地放大因子有可能会偏于保守. 如果有关于场地特性随深度变化的资料(如柱状图), 则会对场地分类的精度有所改善. 如果场地描述有很大的不确定性, 可采用较保守的场地分类. 第 2 和第 3 种方法利用推算或实测的 30 m 覆盖层的平均剪切波速, 可对场地进行更为详细的分类, 同时也使场地放大因子成为剪切波速的连续函数.

1.3 场地相关放大因子 F_a 和 F_v

场地相关放大因子 F_a 和 F_v 是平均剪切波速 v 和地面运动输入水平 I 的函数. 对于 1.1 中的第 1 种情况, $I = A_a$; 对于 1.1 的第 2 种情况, $I = S_{a0.3}/F_a(v_{SC-(II+III)}, S_{a0.3})$.

$$F_a(v, I) = (v_0/v)^{m_a} \quad F_v(v, I) = (v_0/v)^{m_v} \quad (2)$$

这里 $\begin{cases} m_a = \lg[F_a(v_{SC-IV}, I)] / \lg[v_0/v_{SC-IV}] \\ m_v = \lg[F_v(v_{SC-IV}, I)] / \lg[v_0/v_{SC-IV}] \end{cases} \quad (3)$

式中, v_0 是设定地面运动谱输入水平 I_a 和 I_v 参照场地条件的平均剪切波速, v_{SC-IV} 是软弱场地(第 4 类, SC-IV)的平均剪切波速. $F_a(v_{SC-IV}, I)$ 和 $F_v(v_{SC-IV}, I)$ 是相对于“软弱土 SC-IV”和地面运动输入水平 I 情况下, 短周期和中等周期的放大因子.

针对“坚实基岩 SC-Ib”的场地相关放大因子 F_a 和 F_v , 可利用表 1 和式(2)确定.

表 1 参照场地条件为“坚实基岩 SC-Ib”的放大因子

地面运动输入水平	场地分类(平均剪切波速 $v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)					
	SC-Ia(A_0)	SC-Ib(A)	SC-II(B)	SC-(II+III)(B/C)	SC-III(C)	SC-IV(D)
	1620	1050	540	450	290	150
I/g	m_a			短周期放大因子 F_a		
≤ 0.1	0.35	0.86	1.00	1.26	1.35	1.57
0.2	0.25	0.90	1.00	1.18	1.24	1.38
0.3	0.10	0.96	1.00	1.07	1.09	1.14
≥ 0.4	-0.05	1.02	1.00	0.97	0.96	0.94
I/g	m_v			中等周期放大因子 F_v		
≤ 0.1	0.65	0.75	1.00	1.54	1.73	2.31
0.2	0.60	0.77	1.00	1.49	1.66	2.16
0.3	0.53	0.79	1.00	1.42	1.57	1.98
≥ 0.4	0.45	0.82	1.00	1.35	1.46	1.78

2 地震动衰减规律

地震动衰减规律提供了均匀场地的地震动分布。本研究采用 PGA 和 8 个周期的加速度反应谱(S_a)为参数, 即 0.1, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 和 4.0 s 的加速度反应谱值。在考虑了场地放大效应后, 将这些值连续在一起即可构成场地相关加速度反应谱的形状。本研究采用的地震动衰减规律(针对美国西部)有以下几种:

(1) Boore 等 (1997).

$$\ln Y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_5 \ln r + b_6 \ln \frac{v_s}{v_A} \quad (4)$$

式中, $r = (r_{jb}^2 + h^2)^{1/2}$, 对走滑断层地震, $b_1 = b_{1SS}$; 对逆冲断层地震, $b_1 = b_{1RS}$; 对机制不明地震, $b_1 = b_{1ALL}$. Y 为 PGA 或 S_a , 单位 g; M 为矩震级, r_{jb} 为断层距离, v_s 为场地的平均剪切波速。其它均为统计参数。

(2) Sadigh 等(1986).

$$\ln(SD) = a + bM_w + c_1(8.5 - M_w)^{c_2} + d \ln[r + h_1 \exp(h_2 M_w)] + \epsilon \quad (5)$$

式中, SD 为 PGA 或 S_a , 单位 g; M_w 为矩震级, r 为断层距离; a, b, c, d, h 均为统计参数。

(3) Campbell 和 Bozorgnia (1994).

$$\ln(SD) = -3.512 + 0.904M_w - 1.328 \ln \sqrt{r^2 + [0.149 \exp(0.64M_w)]^2} + \epsilon \quad (6)$$

式中, SD 为 PGA, 单位 g; M_w 为矩震级, r 为断层距离。

(4) Crouse (1991).

$$\ln(SD) = c_1 + c_2 M + c_3 \ln[D + c_4 \exp(c_5 M)] + c_6 + \epsilon \quad (7)$$

式中, SD 为 PGA, 单位 cm/s^2 ; M_w 为矩震级, r 为震源距离, h 为震源深度。其它均为统计参数。

3 用 GIS 模拟设定地震影响场

场地分类数据和计算场地放大因子的方法是设定地震影响场模拟的前提。对于美国旧金山湾区(San Francisco Bay Area), 这两个前提都已经具备。Borcherdt(1994a)提出的计算

场地放大因子的方法主要是依据 Loma Prieta 的强震记录数据, 所得到的结果适用于旧金山湾区。另外, Wentworth(1993)、Borcherdt 和 Wentworth(1991)曾对该地区的地质情况进行过详细研究, 结合其它各种数据(如钻孔、波速等)进行了场地分类。GIS 是进行空间数据管理、操作与分析的有力工具。它将断层、地震、地形、场地分类、地下水位等信息综合在一起, 为设定地震影响场的模拟提供了技术支持。本研究采用的 GIS 工具是 MAPINFO。

3.1 旧金山湾区的场地分类

旧金山湾区的场地分类采用 Borcherdt(1994a)提出的方法(如表 2 所示)。由于场地分类单元比较大, 为了精确地计算每个单元到发震断层的距离, 需要将场地单元划小。通过 GIS 的空间操作, 可以实现这一过程。先将研究范围划分成 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的网格, 再将其与场地分类图层迭合(Overlay)。这样既可以将单元划小, 又可以保持原来场地分类的边界。

旧金山湾区的场地分类比较复杂, 包括了从基岩到软弱土的各种情况。围绕湾区的软弱土强度很差, 被称作“湾区泥”(bay mud)。Loma Prieta 地震中, 距离震中 100 多千米的旧金山市北部遭受严重破坏, 主要是因为湾区泥的放大作用引起的。

表 2 R. D. Borcherdt 场地分类表

名称	简要描述	剪切波速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		
		下限	均值	上限
A ₀	硬基岩(hard rock)	1 400	1 620	
A	坚实基岩(firm to hard rock)	700	1 050	1 400
B	软基岩(gravely soils and firm to soft rock)	375	540	700
C	粘土和沙土(stiff clay and sandy soils)	200	290	375
D	软土(soft soils)	100	150	200

3.2 设定地震

USGS 对美国加州的地震构造和地震活动性进行了大量研究, 拥有丰富的资料, 可根据活断层的性质给出设定地震。地震动衰减规律采用 Boore 等(1997)的公式。地震危险性分析采用断层破裂模型。地震震级与断层破裂长度的关系(Bonilla, 1984)如下:

$$\lg l = -2.27 + 0.539M_w \quad (8)$$

这里, l 为断层破裂长度(km), M_w 为矩震级。假设断层破裂面为垂直, 地震在震源两侧沿断层等长破裂。

确定设定地震时, 首先选定发震断层的分段(fault segments), 将分段的断层联接在一起, 认为设定地震可以破裂到不同的分段上, 但不超出各分段的总和。然后确定设定地震在断层上的震中位置, 假定震级的大小, 根据式(8)得到断层的破裂长度, 模拟地震在断层上的破裂情况。如果断层破裂长度超过了选定的几个分段的总长度(l_0), 则认为断层破裂长度为 l_0 ; 如果一端的破裂长度超过设定范围, 则破裂从该端开始, 相当于将破裂向另一端适当移动。

3.3 用 GIS 模拟设定地震影响场

本研究中, 破裂可以沿断层的实际迹线进行。模拟的地震动参数为 PGA 和加速度反应谱(S_a)8 个周期(0.1, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 和 4.0 s)的值。

假设在加州圣安德烈斯断层(San Andres fault)上发生矩震级为 7.7 的地震。分别计算

每个场地单元到断层迹线的最短距离,根据地震动衰减规律可以计算出平均场地条件下的地震动分布。利用该结果,结合场地分类信息和场地放大因子 F_a 和 F_v (表1),计算出各场地单元的地震动值,用GIS形象地反应出地震动分布的情况。

图1表示了地震动参数为加速度反应谱0.3 s值的模拟结果。图2表示了地震动参数为加速度反应谱1.0 s值的模拟结果。对于反应谱1.0 s值的分布,场地分类起到了相当重要的作用,在Bay Mud地区有很明显的放大作用。在旧金山市北部,也可以看到有异常的区域出现,这可与该地区在Loma Prieta地震时的烈度异常相对应。

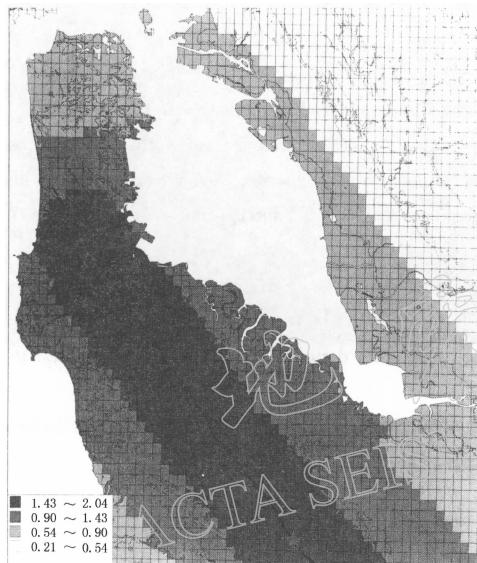


图1 设定地震($M_w=7.7$)加速度
反应谱0.3 s值分布图

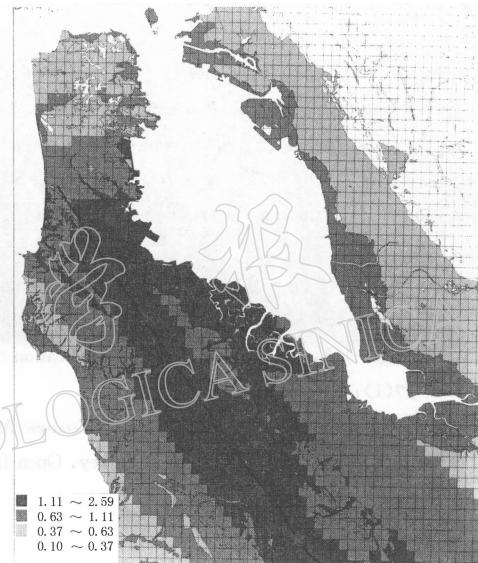


图2 设定地震($M_w=7.7$)加速度
反应谱1.0 s值分布图

3.4 设定地震影响场 GIS 模拟软件

为了可以模拟旧金山湾区任何一次设定地震的影响场,本研究编制了GIS模拟软件DSHAMAINT(digital seismic hazard analysis main)。软件以MAPBASIC语言编写,在MAPINFO环境下运行。

4 结语

设定地震影响场的模拟,对于预测场地破坏(如液化、滑坡和震陷等),分析结构震害和经济损失的分布,以及抗震设防区划均有重要作用。GIS技术和大量的数据使得这种模拟成为可能。本文介绍了模拟的方法和技术。下一步的计划是用1994年美国Northridge地震的数据修正场地放大因子 F_a 和 F_v ,并将设定地震影响场的模拟技术应用于实际工程中。

参 考 文 献

Algermissen S T. 1982. *Probabilistic Estimates of Maximum Acceleration and Velocity in Rock in the Contiguous United States*. U S Geological Survey Open-File Report, 82-1 033

- Algermissen S T. 1991. Probabilistic ground-motion hazard maps of response spectral ordinates for the United States. *Fourth International Conference on Seismic Zonation, Proc.*, Vol. II. Stanford, California, 687~694
- Bonilla M G. 1984. Statistical relations among earthquake magnitude, surface length, and surface fault displacement. *Bull Seism Soc Amer*, **74**(6):2 379~2 412
- Boore D M, Joyner W B, Fumal T E. 1997. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes a summary of recent work. *Seismological Research Letters*, **68**(1): 128~153
- Borcherdt R D. 1994a. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra*, **10**(4): 617~653
- Borcherdt R D. 1994b. New developments in estimating site effects on ground motion. *Proceeding of Seminar on New Development in Earthquake Ground Motion Estimation and Implications for Engineering Design Practice ATC 35-1, Applied Technology Council*. Redwood City, California. ppl0, 1~44
- Borcherdt R D, Wentworth C M. 1991. On the observation and predictive GIS Mapping of Ground Response in the San Francisco Bay Region, California. *Proceedings of Fourth International Conference on Seismic Zonation*, **111**, 545~552
- Campbell K W, Bozorgnia Y. 1994. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration from worldwide accelerograms records from 1957 to 1993. *Proceedings of Fifth US National Conference on Earthquake Engineering*. Chicago, Illinois.
- Crouse. 1991. Ground motions attenuation equation for earthquake on the Cascadia Subduction zone. *Earthquake Spectra*, **7**(2): 201~236
- Building Seismic Safety Council for Federal Emergency Management Agency. 1994. *NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings*. Vol. I
- Sadigh K E, Egan J A, Youngs R R. 1986. Specification of ground motion for design of long period structures. *Earthquake Notes*, **57**(1): 13~18
- Wentworth C M. 1993. *General Distribution of Geologic Material in the Southern San Francisco Bay Region, California: a Digital Map Database*. U S Geological Survey, Open-file Report, 93~693