

竖向地震动强度包络函数的空间变化规律

钟菊芳, 胡 晓², 屈铁军³, 吴胜兴¹

(1. 河海大学, 江苏 南京 210098; 2. 中国水利水电科学研究院,
北京 100044; 3. 北方工业大学, 北京 100041)

摘 要: 利用 SMART-1 台阵三次地震记录拟合了各个测点在地震中的竖向地震动强度包络曲线及 Amin 和 Ang 的强度包络函数中各模型参数值, 分析了各模型参数的空间变化规律, 建立了各模型参数随二维空间坐标及土层厚度变化的随机模型, 为多点地震动合成中竖向强度包络函数的计算提供了理论依据。

关键词: 竖向地震动; 强度包络函数; 空间变化规律; 随机模型

中图分类号: P315.73

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2005)01-0042-05

Study on Spatial Variabilities of Envelope Function of Vertical Ground Motion

ZHONG Ju-fang¹, HU Xiao², QU Tie-jun³, WU Sheng-xing¹

(1. Hohai university, Nanjing 210098, China; 2. China Institute of water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 3. North China university of technology, Beijing 100041, China)

Abstract: Based on three large earthquake acceleration records collected in SMART 1 array in Taiwan, the values of envelope function of vertical ground motion and parameters in the function are calculated. The spatial variabilities of each parameters of the function are analyzed, and the experiential prediction formulas are suggested.

Key words: Vertical ground motion; Envelope function; Spatial variabilities; Experiential prediction formulas

0 前言

由于目前得到的真实场地的地震记录数量很有限, 找到一条满足设计要求的地震加速度时程是很困难的。为了满足结构抗震动力分析中时程输入的需求, 常常需要合成符合某些统计特征的地震动时程。目前地震动时程的合成主要采用 Scalan 和 Sachs 方法, 即用三角级数和来构造平稳高斯过程, 然后乘以确定性强度包络函数得到强度非平稳的地面运动加速度时程:

$$a(t) = f(t) \sum_{k=0}^n A_k \cos(\omega_k t + \Psi_k) \quad (1)$$

式中 $f(t)$ 为强度包络函数。在人工合成地震波中, 包络函数对合理模拟地震动的非平稳性具有重要的工程意义, 它描述了地震动振幅随时间从弱到强再

到弱的变化特性, 同时对地震动的强震持续时间和总持时起着控制作用。

地震工程界对地震动强度包络函数的研究十分重视, 得到了许多有价值的经验统计规律, 但在局部场地条件下强度包络函数的空间变化规律等方面研究的并不多。而在多点地震动时程的合成中, 通常需根据强度包络函数的空间变化特性, 由已知点的强度包络函数值推求场地上其它各点的包络函数值。屈铁军^[1]分析了两水平地震动强度包络函数随波传播方向距离(一维空间坐标)及土层厚度的变化规律, 认为: 水平地震动强度包络函数模型中四参数随波传播方向距离的变化而变化, 除 t_1 外其余 3 参数还受土层厚度的影响, 同时给出了模型中各参数随一维

收稿日期: 2004-08-13

基金项目: 科学技术部资助项目(2002DIA10002); 北京市自然科学基金项目(8022008); 北京市教委科技发展计划项目(2002KJ029)。

作者简介: 钟菊芳(1972—), 女(汉族), 江西龙南人, 博士研究生, 从事重大水电工程地震动输入机制研究。

空间坐标及土层厚度变化的随机模型。由于在以往的研究中,认为地震作用以水平剪切为主,在屈铁军的研究中只考虑了两水平地震动强度包络函数的空间变化规律,没考虑竖向强度包络函数的空间变化性,且只考虑了沿波传播方向上的一维空间坐标的变化对各参数的影响,并没考虑垂直于波传播方向的空间距离对各模型参数的影响。从日本阪神等地的震害来看,竖向地震作用是不容忽视的。程岩^[2]通过对震害总结分析也认为:对烟囱等重心较高的高柔构筑物和大跨度结构对竖向地震作用十分敏感,应考虑竖向地震作用。目前关于竖向强度包络函数的空间变化规律未见相关文献报道。

本文利用 SMART-1 密集台阵的三次地震(E-45、E-39 和 E-05)记录,分析了竖向强度包络函数随局部场地条件下二维空间坐标(沿波传播方向和垂直于传播方向距离)及各测点所在土层的厚度变化的规律。

1 资料选取

SMART-1 台阵是一个坐落在十分平坦的冲积谷上的二维密集台阵,专门为研究局部场地范围内的地震动的空间变化特性而布设的。该台阵布设了 39 个测点,中心为 C-00 测点,36 个测点(I-01~I-12、M-01~M-12、O-01~O-12)分别布设在三个半径为 200 m、1 000 m、2 000 m 的三个同心圆周上,另 E-01 和 E-02 则分别位于 C-00 南端距离为 2.8 km 和 4.8 km 处;除 E-02 布置在裸露的基岩上外,其余 38 个测点均布设在地表土层上。本文使用的三次地震的主要特征见表 1。

表 1 本文使用的三次地震的主要特征表

地震 编号	发震时间	震级 M_L	震源深 度/km	震中 距/km	方位角
E-45	1986-11-14	7.0	7	79	175°
E-39	1986-01-16	6.5	10	22	64°
E-05	1981-01-29	6.3	25	30	154°

2 强度包络函数模型参数的确定

2.1 强度包络曲线和强度包络函数模型

地震动强度包络曲线(简称强度包线)是指地震动时程中各峰值点(或谷点)依时间顺序的连线。为了避免因时间轴的上、下两侧的包线不同而出现一个记录有两个包线的现象,这里取加速度记录绝对值的峰点连线作为记录的强度包线^[1]。由于地震动时程中各峰值点起伏较大,依时间顺序直接相连得到的强度包络曲线很不规则,选用数字滤波器中的

汉宁窗^[3]进行多次平滑。汉宁窗是以 $f'(t_j)=0.5f(t_j)+0.25[f(t_{j-1})+f(t_{j+1})]$ 为平滑基础,即把某点的峰值 $f(t_j)$ 及其两侧相邻的值 $f(t_{j-1})$ 和 $f(t_{j+1})$ 按 0.50、0.25、0.25 进行加权,取其加权平均结果 $f'(t_j)$ 作为该点的值,同时通过增加平滑次数(相当于增加窗的宽度)来达到提高平滑化程度的目的。

各国学者先后提出了不少强度包络函数模型,目前工程中应用较多的是 Amin 和 Ang^[4] 的多峰值强度包络函数模型。该模型将地震动加速度时程明确地分为上升、强震平稳和衰减三个时段,基本反映了地震动加速度幅值的时变特征:

$$f(t) = \begin{cases} I_0(t/t_1)^2 & t \leq t_1 \\ I_0 & t_1 < t \leq t_2 \\ I_0 e^{-c(t-t_2)} & t_2 < t \end{cases} \quad (2)$$

式中 I_0 为强度峰值因子; c 为衰减系数; t_1 为上升段和强震平稳段的时间分界点; t_2 为平稳段和衰减段的时间分界点。

2.2 强度包络模型中各参数值的计算

为了得到 Amin 和 Ang 模型中四参数(I_0 、 c 、 t_1 和 t_2)在各次地震各个记录中的取值,利用非线性最小二乘法对各个记录的强度包线进行拟合。在拟合过程中发现,由于 Amin 和 Ang 模型中的四个参数不是相互独立的,拟合结果的收敛性和稳定性较差。因此利用强度包络函数对地震动持时的决定作用这一特性,通过地震动三阶段的能量占总能量的比重来划分时段控制点 t_1 、 t_2 ,使四个参数中的三个 I_0 、 c 、 t_1 或 t_2 相互独立。参照 Takizawa 和 Jennings 等^[5]对强震持时的定义,即以 70% 的能量持时作为强震持时,以及谢礼立等的记录持时定义,强震平稳段的能量占总地震动能量的 68%,接近 70%^[1]。本文在拟合过程中取 $\int_{t_1}^{t_2} a^2(t) dt = 0.7E$,即强震平稳段($t_s=t_2-t_1$)的能量占总地震动能量的 70%。为了便于比较和分析,对上升、平稳、衰减三段(即 I、II、III 段)的比例分三种条件进行回归拟合:

条件 A: II 段的能量占总能量的 70%, I、III 段所占能量的比例不加限制,在所有满足要求的(t_1 、 t_2)组合中,取回归残差平方和最小的组合;

条件 B: I 段占 10%, II 段占 70%, III 段占 20%;

条件 C: I 段占 20%, II 段占 70%, III 段占 10%。

拟合结果见表 2(由于受篇幅的限制,只列出 E

-45的结果)。

2.3 结果分析

从拟合结果来看,拟合条件B的收敛性最好,条件A次之,而条件C的收敛性则稍差。不同地震或同一次地震不同测点四模型参数的取值各不相同;在同一次地震的同一个记录中,随拟合条件的不同参数值也不完全相同。条件A、B在同一记录中对应的结果很接近。表2显示条件A和B中34个测点记录(该次地震的有效记录数)都收敛,而条件C中有一个测点记录不收敛;条件A、B中参数值完全相同的测点(记录)数有24个,另有4个参数值很接近。由于拟合条件A中 (t_1, t_2) 组合为回归残差平方和最小的组合,因此认为:拟合条件A、B对应结果的相同或相近,说明地震动时程中三阶段能量在总能量中所占的比重与拟合条件B中的假定相同或很接近,即地震动时程的上升段(I段)的能量占总能量的10%,平稳段(II段)占70%,衰减段(III段)占20%。

由于拟合条件B的收敛性最好,且拟合结果与对应的回归残差平方和最接近,本文选取拟合条件B的结果为竖向地震动强度包络函数中各模型参数的取值。

3 强度包络模型参数的空间变化规律

3.1 回归模型的建立

由于计算中用到的36个测点均布设在半径为2 km的范围之内的同一地表土层上,台阵的平面尺寸与震中距相比要小的多,且对于同一次地震,各测点记录具有相同的震源机理、相同的震级和震源深度,因而认为各测点接受到的地震波受传播路径的影响不会太大,这里仅考虑场地所在局部条件对地震波的影响。SMART-1台阵所在地为一地表平坦的冲积谷,各测点除 x 和 y 向坐标(沿波的传播方向为 x 轴,垂直于波传播方向为 y 轴)不同外,从地质剖面图上看,各测点所在的土层厚度(从基岩到地表土层的深度)有较大的差异,最薄处 $h=170$ m,最厚处 $h=610$ m。

从各模型参数拟合结果来看,即使 x 或 y 或 h 相同的测点对应的参数值也不一定相同;从各参数值随坐标 x 、 y 和土层厚度 h 变化的散点图来看,离散性较大,不存在明显的线性关系,说明四参数并不由 x 、 y 、 h 中任一量所控制,而是还与其它的量有关。为了进一步弄清 x 、 y 、 h 对各模型参数的影响,建立以下6种可能的随机模型进行回归分析:

$$\text{方程 1: } g=a \cdot x+b \cdot y+c \cdot h^m+d \quad (m=1.0)$$

$$\text{方程 2: } g=a \cdot x+b \cdot y+c \cdot h^m+d \quad (m=1.5)$$

$$\text{方程 3: } g=a \cdot x+b \cdot y+c \cdot h^m+d \quad (m=2.0)$$

$$\text{方程 4: } g=a \cdot x+c \cdot h+d$$

$$\text{方程 5: } g=b \cdot y+c \cdot h+d$$

$$\text{方程 6: } g=a \cdot x^2+b \cdot y^2+c \cdot h^2+d$$

各方程中 g 代表强度包络模型参数,分别为: I_0 、 c 、 t_1 和 t_2 ; a 、 b 、 c 、 d 为拟合系数。

3.2 回归模型的显著性分析

为了检验上述6个随机模型的回归拟合效果,采用回归效果显著性检验法中的 F 检验法^[6],四参数在各次地震中与各回归方程对应的 F 值见表3。回归方程中各个自变量对因变量的影响程度的大小,则采用偏回归平方和比较法中的 T 值法^[6]来检验。各方程的回归显著性通过 F 值的置信水平 $1-\alpha$ 的大小来体现,同样回归方程中各自变量对因变量的影响程度的大小也可通过 T 值的置信水平 $1-\alpha$ 的大小来体现。表4中列出了最显著回归方程对应的回归系数、 F 值、 T 值及相应的置信水平 $1-\alpha$ 。

由表3可知,三次地震中各模型参数对各回归方程的显著程度不一样。在E-45地震中,四个模型参数在6个回归方程的显著性均很高,置信水平均在0.75以上。从三次地震回归拟合的总体显著水平来看,强度峰值因子 I_0 在方程1、2、3、5和6的 F 值均较大,回归方程的显著性都很强,置信水平均在0.75以上,其中方程2最为显著,在三次地震中置信水平均在0.99以上。衰减系数 c 在E-45和E-05中6个方程的置信水平均在0.75以上,在E-39则只有方程5中置信水平达到了0.75,但在方程1、2、3中的 F 值也都大于1,回归方程的显著性较好。强震平稳段的起始点 t_1 和强震平稳段长度 t_2 在三次地震中各回归方程的显著程度不一致, t_1 在方程1、2、3和6中的 F 值大于1, t_2 在方程1、2、6中的 F 值大于1,回归方程的显著性较好。

从回归方程中各自变量的 T 值来看,回归方程 $I_0=a \cdot x+b \cdot y+c \cdot h^{1.5}+d$ 在三次地震中的 T_x 、 T_y 和 T_h 置信水平均在0.99以上;方程 $c=a \cdot x+b \cdot y+c \cdot h^{1.5}+d$ 因除在E-39中 T_x 略小外,其余 T_x 、 T_y 和 T_h 置信水平均在0.75以上;方程 $t_2=a \cdot x+b \cdot y+c \cdot h+d$ 中的 T_x 、 T_y 和 T_h 置信水平也均在0.75以上;强震平稳段的起始点 t_1 的回归效果的一致性较差。

表 2 E-45 竖向强度包络模型参数回归结果表

测点	条件 A(I、Ⅲ不限)				条件 B(I=10%)				条件 C(I=20%)			
	I_0/Gal	c	t_1/s	t_s/s	I_0/Gal	c	t_1/s	t_s/s	I_0/Gal	c	t_1/s	t_s/s
c-00	32.06	0.18	6.89	9.39	32.04	0.18	6.86	9.41	28.92	0.26	7.89	12.44
I-01	29.78	0.18	6.84	9.52	29.78	0.18	6.84	9.52	28.93	0.46	7.74	12.19
I-02	26.60	0.12	6.06	10.96	26.60	0.12	6.06	10.96	26.33	0.23	7.99	12.54
I-03	30.65	0.13	6.36	8.22	30.65	0.13	6.36	8.22	27.84	0.20	7.39	11.13
I-04	30.67	0.15	5.57	9.98	30.67	0.15	5.57	9.98	30.12	0.24	7.01	12.27
I-05	25.97	0.15	5.51	9.27	25.91	0.16	5.67	9.40	25.08	0.33	7.07	11.64
I-06	27.90	0.11	5.25	9.75	28.28	0.13	6.24	10.09	27.62	0.19	7.75	12.43
I-07	32.06	0.15	8.18	9.73	32.06	0.15	8.18	9.73	31.0	0.21	9.37	11.17
I-08	38.46	0.17	6.96	9.71	38.46	0.17	6.96	9.71	36.10	0.28	8.03	12.46
I-09	34.65	0.14	8.05	10.95	34.65	0.14	8.05	10.95	33.28	0.19	9.07	13.64
I-11	31.97	0.17	7.68	10.60	31.97	0.17	7.68	10.60				
I-12	36.32	0.14	8.10	10.36	36.32	0.14	8.10	10.36	35.64	0.24	9.20	12.23
M-01	19.60	0.13	5.56	10.85	19.60	0.13	5.56	10.85	19.42	0.20	7.19	12.36
M-02	24.76	0.12	4.45	10.96	25.01	0.17	5.69	11.47	23.77	0.38	7.41	13.61
M-03	22.53	0.12	7.14	10.92	22.53	0.12	7.14	10.92	20.26	0.17	9.0	13.83
M-04	24.51	0.09	5.78	10.58	24.81	0.10	6.62	10.75	23.75	0.22	8.53	15.99
M-05	29.69	0.13	6.06	8.88	30.04	0.15	6.79	9.02	27.80	0.22	8.11	12.21
M-06	30.51	0.14	6.13	9.40	30.51	0.14	6.13	9.40	28.82	0.18	7.08	11.83
M-07	38.77	0.20	7.12	9.49	38.77	0.20	7.12	9.49	37.40	0.30	8.29	10.98
M-09	29.99	0.14	8.53	9.97	29.99	0.14	8.53	9.97	29.20	0.24	9.27	12.89
M-10	30.57	0.17	6.34	9.33	30.57	0.17	6.34	9.33	28.50	0.25	7.81	11.49
M-11	22.81	0.13	6.16	10.27	22.80	0.13	6.25	10.33	20.86	0.27	7.41	14.56
M-12	22.63	0.12	6.89	10.90	22.56	0.12	6.78	10.98	21.25	0.17	8.31	15.18
O-01	18.32	0.11	6.92	11.00	18.47	0.12	7.32	11.04	17.29	0.12	8.54	17.31
O-02	18.70	0.12	6.32	11.16	18.70	0.12	6.32	11.16	17.31	0.14	7.38	14.88
O-03	19.54	0.18	5.81	12.07	19.54	0.18	5.81	12.07	17.86	0.32	7.47	16.57
O-04	25.42	0.14	7.43	10.14	25.42	0.14	7.43	10.14	24.33	0.22	8.92	12.82
O-06	29.14	0.18	8.49	8.96	29.14	0.18	8.49	8.96	28.83	0.29	9.86	9.70
O-07	30.03	0.14	7.59	9.00	30.03	0.14	7.59	9.00	31.01	0.27	8.92	9.90
O-08	33.16	0.13	8.78	10.20	32.66	0.13	8.12	10.67	32.67	0.18	9.73	11.49
O-09	15.92	0.14	5.39	10.23	15.92	0.14	5.39	10.23	15.51	0.27	6.07	12.99
O-10	23.57	0.14	8.17	10.38	23.57	0.14	8.17	10.38	23.53	0.30	9.38	12.33
O-11	23.83	0.13	7.18	11.18	23.83	0.13	7.18	11.18	23.68	0.21	8.45	13.67
O-12	19.71	0.13	5.45	10.71	19.71	0.13	5.45	10.71	18.38	0.19	6.69	14.81

表 3 竖向强度包络模型参数的回归 F 值表

	I_0			c			t_1			t_s		
	E45	E39	E05	E45	E39	E05	E45	E39	E05	E45	E39	E05
模型 1	12.46	8.09	3.82	1.53	1.36	3.08	1.81	7.82	1.27	9.04	2.09	1.22
模型 2	13.81	10.73	5.57	1.90	1.25	4.10	1.92	4.55	1.05	8.13	1.16	2.01
模型 3	10.71	5.58	3.79	2.58	1.01	4.28	1.96	2.53	1.10	7.17	0.77	1.87
模型 4	8.71	0.10	0.45	2.19	0.43	3.51	2.73	0.35	1.76	10.20	0.94	0.91
模型 5	10.982	1.90	2.55	1.95	1.88	2.88	2.57	0.31	1.40	11.52	0.21	1.06
模型 6	8.57	3.61	2.07	1.92	0.45	3.46	1.98	2.43	1.01	7.1	1.25	1.28

表 4 各回归模型对应的回归系数和 T、F 值表

		测点数/ n	$a/10^{-3}$	$b/10^{-3}$	$c/10^{-3}$	F	$1-\alpha$	T_x	$1-\alpha$	T_y	$1-\alpha$	T_h	$1-\alpha$
I_0	E-45	34	-2.72	19.13	-7.08	13.81	0.995	2.65	0.990	3.68	0.995	4.40	0.995
	E-39	26	-10.19	-71.33	-22.49	10.73	0.995	4.22	0.995	5.59	0.995	5.67	0.995
	E-05	26	-3.64	27.97	-8.43	5.57	0.990	2.58	0.990	3.94	0.995	3.82	0.995
c	E-45	34	-0.01	0.03	-0.01	1.90	0.750	1.15	0.750	0.93	0.750	1.24	0.750
	E-39	26	-0.01	-0.31	-0.09	1.25		0.24		1.46	0.900	1.35	0.900
	E-05	26	-0.05	0.25	-0.07	4.10	0.975	2.42	0.975	2.22	0.975	1.93	0.950
t_1	E-45	34	0.19	-0.63	2.50	1.81	0.750	0.63		0.34		0.15	
	E-39	34	-0.50	-3.01	-28.48	7.82	0.995	4.37	0.995	4.72	0.995	4.78	0.995
	E-05	26	-0.25	0.88	-10.14	1.27		1.00	0.750	0.62		0.77	0.750
t_s	E-45	34	0.35	-2.72	30.22	9.04	0.995	1.66	0.900	2.11	0.975	2.54	0.990
	E-39	34	0.45	-2.07	19.48	2.09	0.75	2.49	0.990	2.05	0.975	2.06	0.975
	E-05	26	0.76	-4.76	40.26	1.22	1.22		0.750	1.33	0.900	1.21	0.750

注: $1-\alpha$ 列空缺表示对应值的显著性水平小于 0.75。

3.3 随机模型的确定

通过对 6 个回归方程的 F 值和回归变量的 T 值的综合分析比较后认为,四模型参数 I_0 、 c 、 t_1 及 $t_s = t_2 - t_1$ 随 x 向和 y 向测点坐标及土层厚度 h 的变化随机模型为

$$\begin{aligned} I_0 &= a \cdot x + b \cdot y + c \cdot h^{1.5} + d; \\ c &= a \cdot x + b \cdot y + c \cdot h^{1.5} + d; \\ t_1 &= a \cdot x + b \cdot y + c \cdot h + d; \\ t_s &= a \cdot x + b \cdot y + c \cdot h + d. \end{aligned} \quad (2)$$

即四模型参数与随 x 、 y 向测点坐标及土层厚度 h 的变化而变化。

从表 4 中回归系数的正负号来看, I_0 、 c 和 t_1 均随 x 向距离和土层厚度 h 的增大而减小; t_s 则随着随 x 向距离和土层厚度 h 的增大而加长。 y 向距离在各次地震中对各参数的影响不一致,从总体来看, I_0 、 c 随 y 向距离的增加而增加; t_1 和 t_s 随 y 向距离的增加而减小。

3.4 理论预测模型

在多点地震动时程合成中,利用 i 点的参数值 I_{0i} 、 c_i 、 t_{1i} 和 t_{si} , 及 i 、 j 点间的距离 Δx 、 Δy 和土层的厚度差 Δh , 按以下模型来推算 j 点的参数值:

$$\begin{aligned} I_{0j} &= I_{0i} + a \Delta x + b \Delta y + c \Delta h^{1.5}; \\ c_j &= c_i + a \Delta x + b \Delta y + c \Delta h^{1.5}; \\ t_{1j} &= t_{1i} + a \Delta x + b \Delta y + c \Delta h; \\ t_{sj} &= t_{si} + a \Delta x + b \Delta y + c \Delta h. \end{aligned} \quad (4)$$

4 结论

通过对 SMART-1 三次地震各测点竖向地震记录的统计回归分析得出以下结论:

(1) 在三种拟合条件下,拟合条件 B 的收敛性

最好,条件 A 次之,条件 C 则稍差。对于不同地震不同测点,竖向强度包络模型中四模型参数的取值各不相同,即使是同一次地震的同一记录,因拟合条件的不同,参数的取值也不完全相同。

(2) 竖向地震动时程中三阶段——上升段、平稳段和衰减段的能量占总能量的百分比接近于 10%、70%、20%。

(3) 竖向强度包络模型中四模型参数 (I_0 、 c 、 t_1 和 $t_s = t_2 - t_1$) 的大小随二维空间距离和土层厚度的变化而变化,变化规律如公式(2)表示。

从模型的回归系数的正负号来判断, I_0 、 c 、 t_1 随 x 、 h 的增加而减小, t_s 随 x 、 h 的增加而增加; I_0 、 c 随 y 的增加而增加, t_1 、 t_s 随 y 的增加而减小。

(4) 由 i 点参数值推算 j 点参数值的模型如公式(4)所示。

[参考文献]

- [1] 屈铁军. 地面运动的空间变化特性研究及地下管线地震反应分析[D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所, 1995. 16-37.
- [2] 程岩. 竖向地震作用对高柔结构的影响[J]. 西北地震学报, 1999, 21(4): 423-427.
- [3] 大崎顺彦著. 吕敏申, 谢礼力译. 地震动谱分析入门[M]. 北京: 地震出版社, 1980. 168-171.
- [4] Amin M, Ang A H - S. Nonstation Stochastic Model of Earthquake Motion[J]. J. EM. ASCE, 1968, 94(2): 559-583.
- [5] H Takizawa, P C Jennings. Collapse of a Model for Ductile Reinforced Concrete Frames Under Extreme Earthquake Motions[J]. EESD, 1980, 8(2): 117-144.
- [6] 朱勇华, 邵淑彩, 孙福玉. 应用数理统计[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999. 188-194.

(上接 41 页)

[References]

- [1] Zhang Z Z. Prediction of Seismic disaster in Loess area[M]. Beijing: Earthquake Press, 1999.
- [2] Xie D Y, Zhang J M, et al.. Constitutive relation considering the structure of soil[J]. Journal of civil engineering, 2000, 33(4): 36-41.
- [3] Qi J L. Pore distribution curves of loess structure porosity by

quantitative analysis[J]. Northwest Seismological Journal, 1997, 19 (supplement): 83-87.

- [4] Zhang D L, Wang L M. The computer-added analogue and the mechanics analysis about mountain ground deformation induced by Yongdeng earthquake in 1995[J]. Northwest Seismological Journal, 2003, 25 (1): 77-81.