

祁连山中东段强震复发概率模型及 未来强震地点预测

郑文俊^{1,2}, 袁道阳^{1,2}, 何文贵^{1,2}

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:本文主要从祁连山中东段主要活动断裂带全新世以来古地震活动以及历史地震和现代地震的复发间隔入手, 通过对强震复发间隔与平均复发间隔的比值(T/T_a)的数学处理, 建立了区域强震复发所遵循的概率模型, 并对未来强震的复发可能性和强震发生地点进行预测。结果表明, 本地区未来最有可能的强震发生地点是老虎山—毛毛山断裂带的毛毛山—金强河段。

关键词:祁连山中东段; 强震; 复发概率; 发震地点; T/T_a 值

中图分类号: P315.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2004)03-0228-06

0 引言

预测某一地区未来是否会有伴随着地表破裂的强震发生, 其基本思路点是: 在已收集到的所在区域的地震目录(包括现代地震、历史地震和古地震)的基础上, 应用现有的有关地震复发规律的理论知识, 对比、分析和研究这些地震在时间、空间以及强度上的分布特征, 从中期望找到该地区强震复发过程中所遵循的某些规律, 并尽可能使用数学语言准确地将这些规律描述和表达出来, 进而定量预测该区域未来的地震危险性^[1]。

地震复发规律包括地震在时间上、空间上以及强度上的分布规律。地震孕育和发生的机制极为复杂, 不同地点、不同时间段以及不同震级大小的地震原地复发规律也不同。而且, 对某一具体的发震地点, 能够获得的其可靠的地震目录(包括现代地震、历史地震和可信的古地震)也仅可能是其整个地震复发过程中一个极为有限的小片段, 所以, 长期以来对地震复发规律的理论认识一直是地震、地质学界探讨和期望解决的一个难点和热点问题。目前国内外学者通过实际震例的研究或者物理实验、数值模拟等, 从不同的角度对地震的复发规律提出了一些理论模型与认识, 如特征地震模式^[2]; 大地震原地复发的分形规律^[3]等。在这些理论模型与认识的基础上, 一些学者还从定量分析的角度、统计学的角度进一步提出了地震原地复发规律的一些概率模型, 如指数分布模型^[4]、NB 模型^[5]以及 Ellsworth 等 1999 年提出的 BPT 模型^[6]等。本文将利用最新的研究资料, 建立适合于祁连山中东段区域强震复发的概率模型, 并对未来的强震地点进行预测。

1 祁连山中东段发震断裂概述

祁连山中东段主要的发震断裂包括皇城—双塔断裂(F_1)、天桥沟—黄羊川断裂(古浪断裂)(F_2)、冷龙岭断裂(F_3)、老虎山—毛毛山断裂(F_4)、中卫—同心断裂(F_5)、海原断裂(F_6)等(图 1), 断裂性质基本上以左旋走滑性质为主并兼具有一定的逆冲性质。这些活动断裂共同构成了青藏高原东北缘的弧形构造

收稿日期: 2003-04-10

基金项目: 中国地震局地震科学联合基金项目(102055、604018、104073)共同资助; 中国地震局地震预测研究所兰州基地论著编号: LC200400069。

作者简介: 郑文俊(1972-), 男(汉族), 甘肃高台人, 助理研究员, 主要从事活动构造及地貌年代学等方面的研究工作。

体系,且在有历史记载以来均发生过强震活动,如:1709年中卫7½级地震的发震断裂为中卫-同心断裂的中段^[7];1540年甘肃中西部的7级地震发震断裂为冷龙岭断裂^[8];1888年景泰7级地震的发震断裂为老虎山-毛毛山断裂的老虎山段^[9];1920年海原大地震的发震断裂为海原断裂^[10];1927年古浪8级地震的发震断裂为皇城-双塔断裂^[11]和天桥沟-黄羊川断裂等两条断裂同时发震^[12]。不仅如此,在这些断裂及附近地区,近年来还发生过多次5~6级左右的中强破坏性地震,如:1986年门源6.4级地震、1990年天祝-景泰6.2级地震、1995年永登5.8级地震、1996年天祝-古浪5.4级地震和2000年景泰5.9级地震等,显然,中小地震活动较为频繁。

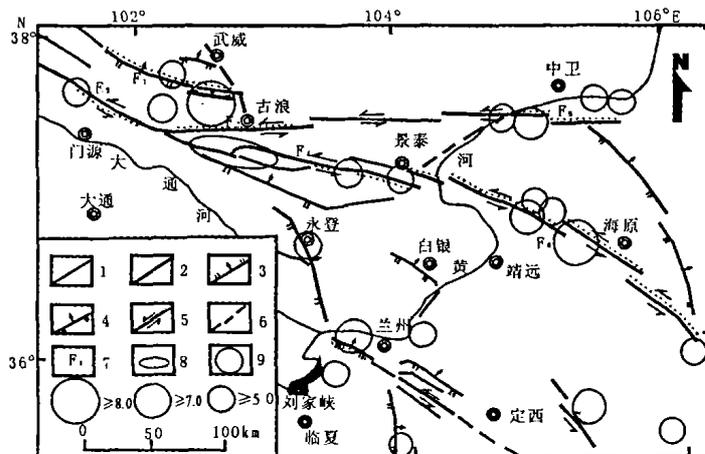
2 强震复发概率模型的建立

对于祁连山东段的大震危险性概率评估,前人曾做过不同方法的尝试^[13,14]。甘卫军^[15]通过特征地震的地震危险性分析方法的研究,提出了祁连山地区特征地震的复发规律,并以此为依据预测了未来一定时段内该地区的地震危险性和发震地点,效果较为明显^[13,14,16]。本文主要从各断裂全新世以来的古地震活动(包括历史地震和现代地震)的复发间隔入手,通过强震复发间隔偏离平均复发间隔的程度(T/T_0)这个有特定意义的特征变量,建立强震复发概率模型。

2.1 建模的思路及数据准备

在建模过程中,主要借鉴NB模型的建模过程^[5],建立强震复发间隔的概率分布模型。在数据准备过程中的长短间隔划分主要依据是冉勇康等^[17]总结的“长间隔,短间隔”(是指大地震在时间分布上不同阶段具有各自的重复间隔时间,其划分的主要依据是重复时间间隔偏离平均复发间隔的程度较大时考虑分出长短间隔)的分布形式特征,并结合本地区各断裂或断裂段地震事件的相对分布规律,划分为相对的短间隔群和长间隔期。

祁连山东段的活动断裂主要以左旋走滑为主,且断层特征基本相似。经过多年的资料积累,目前几条主要断裂均有最新的比较齐全的古地震和历史地震的研究资料^[9-12,18],已具备建模的基本条件。从已获得的部分断裂的资料来看,各断裂的强震复发间隔及复发模式有一定的一致性,因此,我们选择了祁连山东段具代表性的部分活动断裂,包括皇城-双塔断裂(F_1)、天桥沟-黄羊川断裂(古浪断裂)(F_2)、冷龙岭断裂(F_3)、老虎山-毛毛山断裂(F_4)、中卫-同心断裂(F_5)、海原断裂(F_6)等,按长间隔和短间隔对其全新世以来的古地震资料进行数据整理,分别计算各组重复间隔的均一化值(T/T_0)(表1)。可以看出,各活动断裂段落的强震复发间隔偏离平均复发间隔的程度(T/T_0)的分布规律是基本一致的。通过计算,共获得了44个均一化值,将其作为建模的全部基础数据。需要说明的是,只有一个重复间隔值的均一化值没有统计意义,在计算过程中不再考虑。



1. 晚更新世断层; 2. 全新世断层; 3. 正断层; 4. 逆断层;
5. 走滑断层; 6. 隐伏或推测断层; 7. 断层编号;
8. 未来可能发震地点; 9. 历史及现代强震震中位置

图1 祁连山东段主要活动断裂展布图

Fig. 1 Distribution of major active faults in middle-eastern segment of Qilian Mt.

表1 祁连山中东段活动断裂段落古地震事件及均一化值

活动断裂	断层段落	地震事件 序列	事件发生时间 /a B. P.	距离上次事件 时间间隔/年	重复间隔 分组/年	平均重复 间隔/年	均一化值
皇城-双塔断裂	冬青顶段	1	15930 ± 1160				
		2	9460 ± 700	6 470	6 470		1.22
		3	5000 ± 500	4 460	4 460		0.84
		4	1927 A. D.	4 925	4 925	5 285	0.93
天桥沟-黄羊川断裂 (古浪断裂)	天桥沟段	1	10743 ± 343				
		2	9038 ± 39	1 705	4 584	4 584	
		3	7050 ± 577	1 988	1 705		1.12
		4	2224 ± 194	4 584	1 988		1.30
		5	1505 ± 253	971	971		0.64
		6	1927 A. D.	1 430	1 430	1524	0.94
冷龙岭断裂	西段 双龙煤矿-硫磺沟口	1	10743 ± 343				
		2	9038 ± 39	1 705	1 705		0.95
		3	7050 ± 577	1 988	1 988		1.11
		4	4847 ± 185	2 203	2 203		1.23
		5	3562 ± 190	1 285	1 285	1 795	0.72
		6	1927 A. D.	3 487	3 487	3 487	
老虎山-毛毛山断裂	老虎山段	1	5926				
		2	3885	2 041	2 041		0.75
		3	1540 A. D.	3 425	3 425	2 733	1.25
		1	5750 ± 350				
		2	4250 ± 100	1 500	1 500		1.13
		3	3100 ± 150	1 150	1 150		0.86
中卫-同心断裂	毛毛山-金强河段	4	2200 ± 200	900	1 340	1 330	1.01
		5	860 ± 100	1 340	900		1.09
		6	1888 A. D.	750	750	825	0.91
		1	9000 ± 100				
		2	8600 ± 150	400	400	400	
		3	6350 ± 250	2 250	2 250		1.31
中卫-同心断裂	全断裂	4	4650 ± 150	1 700	1 700		0.99
		5	3600 ± 150	1 050	1 050		0.61
		6	1750 ± 100	1 850	1 850	1 713	1.08
		1	13150 ± 763				
		2	8566 ± 512	4 584	4 584	4 854	
		3	6535 ± 199	2 031	2 031		0.97
		4	5450 ± 238	1 085	1 085		0.52
		5	3000 ±	2 450	2 450		1.17
6	1709 A. D.	2 803	2 803	2 092	1.34		
海原断裂	西段	1	13615 ± 1105				
		2	10770 ± 1125	2 845	2 845	4 854	0.99
		3	8848 ± 523	1 922	2 870	2 858	1.00
		4	7546 ± 330	1 302	1 922		1.22
		5	6137 ± 9	1 409	1 302		0.83
		6	3970 ± 170	2 167	1 409		0.89
		7	2895 ± 395	1 075	2 167		1.38
		8	1920 A. D.	2 870	1 075	1575	0.68
海原断裂	中段	1	10770 ± 1125				
		2	6689 ± 169	4 081	4 081	4 081	
		3	6137 ± 9	552	552		0.58
		4	4413 ± 613	1 724	1 724		1.81
		5	3382 ± 589	1 031	1 031		1.08
		6	2793 ± 143	589	589		0.62
		7	2084 ± 208	709	709		0.74
		8	912 ± 149	1 172	1 172		1.23
		9	1920 A. D.	887	887	952	0.93
月亮山东麓段	月亮山东麓段	1	11500 ± 110				
		2	7555 ± 300	3 945	3 945		0.91
		3	5640 ± 450	1 915	4 715	4 330	1.09
		4	925 ± 60	4 715	1 915		1.36
		5	1920 A. D.	900	900	1 408	0.64

2.2 模型的建立

统计处理均一化数据,结果是均值为0.999 3,标准差是0.263 7。直方图直观显示,强震复发间隔的均一化值(T/T_a)似乎服从正态分布(图2)。

对均一化值进一步进行数学处理,按照统计学最大似然估计法,分布函数为 $N(\mu, \sigma^2)$ 的正态总体,参数 μ 和 σ 的最大似然估计为^[19,20]

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad \hat{\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (1)$$

由上式所得的计算结果是: $\mu = 1; \sigma = 0.261 2$ 。也就是说祁连山中东段的各活动断裂段落的强震复发间隔的均一化值(T/T_a)估计服从正态分布 $N(1, 0.2612^2)$, 其概率密度函数为

$$f(T/T_a) = \frac{1}{0.2612 \times \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(T/T_a - 1)^2}{2 \times 0.2612^2}\right] \quad (2)$$

对估计的概率分布进行 χ^2 统计检验,取组数为5(分组见图2),结果 $\chi^2 = 1.80$, 小于临界值5.99(自由度=2,并取 $\alpha = 0.05$),故可以认为祁连山中东段的各活动断裂段落的强震复发间隔的均一化值(T/T_a)服从正态分布 $N(1, 0.2612^2)$ 。

又 $f(T) = \frac{f(T/T_a)}{T_a}$, 因此祁连山中东段的各活动断裂段落的强震复发间隔 T 也服从正态分布,概率密度函数为

$$f(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.2612 \times T_a} \exp\left[-\frac{(T - T_a)^2}{2 \times (0.2612 \times T_a)^2}\right] \quad (3)$$

参数对应为 $\mu = T_a, \sigma = 0.2612T_a$ 。式(3)就是通过统计分析所建立的祁连山中东段强震复发间隔的概率分布模型。

3 未来可能强震发生地点的探讨

3.1 未来可能强震的发震概率

应用本文所建立的模型,对祁连山中东段几条主要的活动断裂未来某个时段内可能强震的发震概率进行评价。计算时主要考虑自最后一次强震事件累积到现在发震概率,也就是计算累积概率。计算公式如下:

$$P(T \leq t) = \int_0^t \frac{1}{0.2612 \times \sqrt{2\pi} T_a} \exp\left[-\frac{(T - T_a)^2}{2 \times (0.2612 T_a)^2}\right] dT \quad (4)$$

式中, t 为最后一次事件的离逝时间; T_a 为平均复发间隔。

为对比参考,同时运用 BPT 模型对各断裂段落自最后一次事件以来的累积发震概率进行计算。参数 α 直接取 Ellsworth 等建议的 $0.5^{[6]}$, 计算公式是

$$P(T \leq t) = \int_0^t \frac{T_a}{\sqrt{2\pi\alpha^2 T^3}} \exp\left[-\frac{(T - T_a)^2}{2\alpha^2 T_a T}\right] dT \quad (5)$$

式中, t 为最后一次事件的离逝时间; T_a 为平均复发间隔。

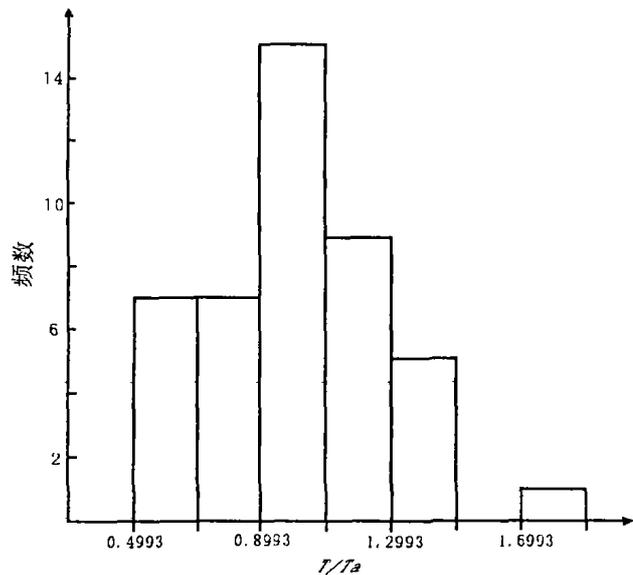


图2 强震复发间隔的均一化值(T/T_a)直方图

Fig. 2 Histogram of standardized value (T/T_a) of the strong earthquake recurrence intervals.

计算结果显示(表2),皇城-双塔断裂冬青顶段、天桥沟-黄羊川断裂全段最后一次事件(1927年古浪8级地震)的离逝时间均为75 a,因此不论处于长间隔期还是短间隔期,其强震复发到现在的累积概率均接近于零,也就是没有发生强震的可能,相邻的冷龙岭断裂中东段、老虎山-毛毛山断裂的老虎山段,离逝时间与平均复发间隔相比均很小,其强震复发到现在的累积概率也接近于零。而老虎山-毛毛山断裂的毛毛山-金强河段,其自最后一次事件(1750a. B. P.)以来,若处于较长间隔期,则强震复发到现在的累积概率为53.3%,有发震的可能;若处于短间隔期,则强震复发到现在的累积概率为100%,发震的可能性较大。冷龙岭断裂西段,由于目前资料较少,但该段一直是目前确定的重点监视区,不排除发生中强地震的可能。对于海原断裂,1920年海原大地震时发生了全断裂破裂,由于各段不论长间隔还是短间隔都远远大于最后一次事件的离逝时间,近期发生强震的可能性不大。

对比本文所建立模型与BPT模型的计算结果,二者相差不大,这也进一步证明了本文所建立的模型有一定的可信度。

表2 祁连山中东段活动断裂最后一次事件以来的累积发震概率及消失率

断裂	段落	离逝时间 /a B. P.	平均复发间隔 /年	消失率* (V)	累积概率/%	
					论文所建模型	BPT模型
皇城-双塔断裂	冬青顶段	75	5285	0.073	0.00	0.00
	天桥沟段	75	4584	0.037	0.00	0.00
天桥沟-黄羊川断裂	黄羊川段	75	1524	0.115	0.00	0.00
			1795	0.097	0.00	0.00
冷龙岭断裂	西段	462	2733	0.206	0.00	0.01
	双龙煤矿-硫磺沟口					
老虎山-毛毛山断裂	老虎山段	114	1330	0.161	0.00	0.00
	毛毛山-金强河段	1750	825	0.259	0.00	0.00
			1713	1.080	53.3	61.1
			400	4.625	100.0	100.0
中卫-同心断裂	全断裂	293	4854	0.081	0.00	0.00
			2092	0.188	0.00	0.00
			2858	0.064	0.00	0.00
	西段	82	1575	0.116	0.00	0.00
海原断裂	中段	82	4081	0.045	0.00	0.00
			952	0.191	0.00	0.00
			4330	0.042	0.00	0.00
	月亮山东麓段	82	1408	0.129	0.00	0.00

* 预测时段为100年。

3.2 可能强震地点的预测

活动断裂段落未来是否有可能性发生强震的确定性分析方法有古地震法和消失率法两种。古地震法就是对离逝时间与地震重复间隔进行比较,如果自最后一次事件的离逝时间与预测时段之和大于、等于或者接近于地震的平均复发间隔,则断裂或者段落未来预测时段内可能发生位错事件;反之不考虑位错事件的可能性^[21]。消失率法是计算离逝时间(T_e)与预测时段(ΔT)之和与大地震的平均重复间隔(T_a)的比值即消失率(V),如果消失率大于0.5,则断裂或者段落未来预测时段内有发生地震的危险^[3]。计算公式是

$$V = \frac{T_e + \Delta T}{T_a} \quad (6)$$

运用上式对祁连山中东段各断裂未来100年的发震可能进行预测(表2)。对于皇城-双塔断裂冬青

顶段、天桥沟-黄羊川断裂、老虎山-毛毛山断裂老虎山段、冷龙岭断裂中东段、海原断裂、中卫-同心断裂,不论处于长间隔期还是短间隔期,其消失率均小于0.5,有些甚至小于0.1,所以不可能有强震发生。对于老虎山-毛毛山断裂的毛毛山-金强河段,若处于短间隔期(400 a),其消失率为4.625,远远大于0.5,发生强震的可能较大;若处于长间隔期(1713 a),未来100年内消失率近似为1,有发生强震的可能。这里仍然需要特别说明的是冷龙岭断裂的西段,由于资料较少,在此仍不排除发生中强地震的可能性。

综合考虑本文所建立的强震复发概率模型及BPT模型计算结果以及用消失率法所预测的结果,同时考虑现代中强地震的震中分布特点,认为,祁连山东中段未来最有可能的强震发生地点是老虎山-毛毛山断裂毛毛山-金强河段(图1)。

4 结论与讨论

祁连山东中段的多条活动断裂有历史记载以来已发生过多破坏性大地震,因此,探求该区域强震发生的规律,是地震中长期预报的一种手段和方式。当然,方法本身的思路和途径有多种,本文从一个无量纲的量(T/T_0)入手,总结出了祁连山东中段强震复发的概率模型,并将其用于该区的各断裂未来发震可能的预测上,其效果与一些经验公式和前人的预测是相同的,这也进一步说明了这种方法的可行性和可信度。对祁连山东中段未来强震发生的预测结果为:未来最有可能的强震发生地点是老虎山-毛毛山断裂毛毛山-金强河段。

当然,方法本身受数据来源的可靠性及精确性、数据量的多少等的限制,许多地方还有待于和大家一起探讨。

[参考文献]

- [1] 陈立春,冉勇康.京西北强震复发概率模型及地震潜势定量评估[J].地震地质,2002,24(1):91-100.
- [2] Schwartz D P, Coppersmith K J. Fault behavior and Characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones[J]. J. Geophys. Res., 1984, 89: 5681-5698.
- [3] 陈立春.河套断陷带的古地震、强震复发规律和未来可能强震地点[D].北京:中国地震局地质研究所硕士学位论文,2002.
- [4] 闻学泽.活动断裂地震潜势的定量评估[M].北京:地震出版社,1995.
- [5] Nishenko S P, Buland R. A general recurrence interval distribution for earthquake forecasting[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1987, 77(4): 1382-1399.
- [6] Ellsworth W L, Matthews M V, Nadeau R M, et al. A physically based earthquake recurrence model for estimation of long-term earthquake probabilities[A]. in: Workshop on Earthquake Recurrence: state of the art and directions for future, Rome[C]. 1999.1-20.
- [7] 闵伟,张培震,邓起东.中卫-同心断裂带全新世古地震研究[J].地震地质,2001,23(3):357-366.
- [8] 何文贵,刘百箴,袁道阳,等.冷龙岭断裂古地震初步研究[A].见:活动断裂研究(8)[C].北京:地震出版社,2001.64-73.
- [9] 袁道阳,刘百箴,吕太乙,等.北祁连山东段活动断裂带古地震特征[J].华南地震,1997,17(2):24-31.
- [10] 国家地震局地质研究所,宁夏回族自治区地震局.海原活动断裂带[M].北京:地震出版社,1990.
- [11] 郑文俊,袁道阳,何文贵.冬青顶北缘断裂的古地震活动习性的初步研究[J].地震研究,2003,27(1):66-73.
- [12] 郑文俊.古浪活动断裂带的古地震活动习性研究[D].兰州:中国地震局兰州地震研究所硕士学位论文,2003.
- [13] 杨明,刘百箴.时间相依的地震危险性概率分析[J].西北地震学报,2000,22(1):10-15.
- [14] 王永成,刘百箴.祁连山东中段地震危险性分析[J].西北地震学报,2001,23(4):330-337.
- [15] 甘卫军.北祁连山活动断裂东段大震危险性概率评估[D].兰州:国家地震局兰州地震研究所硕士学位论文,1995.
- [16] 曹娟娟,刘百箴,闻学泽.西秦岭北缘断裂带特征地震平均复发间隔的确定和地震危险性评价[J].地震研究,2003,26(4):372-381.
- [17] 冉勇康,邓起东.大地震重复特征与平均重复间隔的取值问题[J].地震地质,1999,21(4):316-323.
- [18] 冉勇康,邓起东.海原断裂的古地震及特征地震破裂的分级性讨论[J].第四纪研究,1998,(3):271-278.
- [19] 刘淑琴,张中信主编.概率论与数理统计[M].长春:吉林人民出版社,1997.125-153.
- [20] 数学手册编写组.数学手册[M].北京:人民教育出版社,1979.782-841.
- [21] 邓起东,刘百箴,张培震,等.活动断裂工程安全评价和位错量的定量评估[A].见:活动断裂研究(2)[C].北京:地震出版社,1992.236-246.

(下转第254页)

ANALYSIS ON INFLUENCE OF EARTHQUAKE MOTION TO LOESS SLOPE INSTABILITY

GUO Jun-ying^{1,2}, SHI Yu-cheng^{1,2}

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou, 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: Using the theory of elastic – plastic dynamic FEM and the Drucker – Prager yielding criterion, taking the time history of earthquake motion which fitted by the graphs of standard response spectrum on I & III types of site in the standard of Aseismic Design, as the earthquake input, to a typical loess landslide, in this paper the dynamic analysis and calculate on influence of earthquake motion to loess slope instability are made. The strain characteristics of loess slope in earthquake motion progress in different PGA, T_g and last times are analyzed. The result shows how the earthquake engineering characters influence on the stability of loess slope and displays the dynamic response of soil and change regularity of stress.

Key words: Loess slope; Dynamic analysis; Earthquake motion; Stability

(上接第 233 页)

PROBABILITY MODEL OF STRONG EARTHQUAKE RECURRENCE AND PREDICTION FOR FUTURE EARTHQUAKE SITE IN MIDDLE – EASTERN SEGMENT OF QILIAN MT.

ZHENG Wen-jun^{1,2}, YUAN Dao-yang^{1,2}, HE Wen-gui^{1,2}

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In this paper, starting with palaeoearthquakes and historic and recent earthquakes recurrence intervals for main active fault zones in middle – eastern segment of Qilian Mt. since Holocene, by calculating the ratios of recurrence interval of strong earthquake to that of average (T/T_*), the strong earthquake recurrence probability model is established, and the model has applied to predict possibility and sites of strong earthquake. It reveals that, in this region the possible site where strong earthquake maybe occurs in future is on Maomaoshan – Jinqiang segment of Laohushan – Maomaoshan Fault.

Key words : Qilian Mt. ; Strong earthquake; Recurrence probability; Earthquake site; T/T_* value