Vol. 30 No. 3 Sept., 2008

# 马衔山北缘断裂西段 6.5 级地震对兰州市 及周边地区的影响

刘海明<sup>1,2</sup>,陶夏新<sup>1</sup>,孙晓丹<sup>1</sup>,李 萍<sup>1</sup>

(1.哈尔滨工业大学土木工程学院,黑龙江哈尔滨 150090;2.重庆交通科研设计院,重庆 400067)

摘 要:位于兰州市南侧NW 走向的马衔山北缘断裂是发生强烈地震最危险的地段。本文采用混合 震源模型和随机合成高频地震动方法,研究了该断裂西段发生 6.5 级地震可能引起的兰州市及周 边地区的地震动分布,给出了 PGA 分布图。

关键词:兰州;盆地地震反应;混和震源模型;随机合成;传递函数;数值格林函数 中图分类号:P315.9 文献标识码:A 文章编号:1000-0844(2008)03-0227-05

## Forecasting of the Strong Ground Motion Field in Lanzhou City and Its Vicinity Caused by M6.5 Earthquake on the Western Segment of Maxianshan North Margin Fault

LIU Hai-ming<sup>1,2</sup>, TAO Xia-xin<sup>1</sup>, SUN Xiao-dan<sup>1</sup>, LI Ping<sup>1</sup>

(1. Harbin Institute of Technology, School of Civil Engineering, Harbin 150090, China;

2. Chongqing Comunications Research & Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: The Maxianshan north margin fault with strike NW crossing through south of Lanzhou city is the most dangerous place for a future strong earthquake to the city. Using the hybrid source model and the method of stochastic synthesizing high-frequency ground motion, the strong ground motion field in Langzhou city and its vicinity from an earthquake with magnitude 6.5 on the western segment of the fault is forecasted in this paper, the spatial characteristics and pattern of the field is summarized.

Key words: Lanzhou; Basin seismic response; Hybrid source model; Stochastic synthesis; Transfer function; Numerical Green function

#### 0 引言

兰州市是我国西部大开发重点城市,在1125年 发生过7级地震。根据我国《地震动参数区划图 (GB 18306-2001)》规定,设防地震基本加速度为 0.2g,是我国设防水平较高的城市。最近开展的兰 州市活断层探测与地震危险性评价,投入了大量的 各种探查工作量,取得了一系列新进展。最重要的 发现是主要活动断裂不在兰州盆地内部,而是在马 衔山北缘。这条北西走向的马衔山北缘断裂斜列在 城市的南侧,西段是发生强烈地震的最危险地段<sup>①</sup>。 本文预测该地段发生 6.5 级地震对兰州市及周边地 区产生的影响,分析地震动场的空间特征和展布模 式。

为了考虑近场地震动主要受震源控制的基本特 点,预测中采用了新近发展的混合有限断层震源。 随机合成高频地震动,采用了动力学拐角频率,有效 防止了地震动计算对子源尺寸的依赖。借助简化的 数值格林函数方法,分两步计算了低频地震动。两 者经滤波在时域叠加合成了地表的地震动时程。分

收稿日期:2008-02-22 基金项目:国家自然科学基金项目(50778058)和(90715038);国家科技支撑计划课题(2006BAC13B02) 作者简介:刘海明(1981 - ),女(汉族),山东青岛人,硕士,研究实习员,现主要从事强地震动预测的研究.

① 甘肃省地震局,兰州市活断层区域探查与断层活动性鉴定工作报告.2007.

第 30 卷

析预测中注意表达近断裂的破裂方向性效应、上盘 效应、地壳波导效应、大型沉积盆地边缘效应等对地 震动的重要影响<sup>[26]</sup>。

### 马衔山北缘断裂西段 6.5 级地震的 有限断层震源模型

有限断层震源模型是当前近场强地震动预测中 广泛应用的一种震源模型。分析远场或中小地震引 起的地震动,将整个震源处理成一个点源是合理的 近似,但对于大地震的近场地震动震源不能简化为 一个点源,需要用一个破裂面来表征,否则地震动就 会被过分高估<sup>[78]</sup>。有限断层模型将震源分布在破 裂面上,有利于描述破裂面上错动的不均匀分布,整 个断裂面被剖分成许多子源,对每一个子源分配一 个错动能量,所有子源能量之和要等于地震的总能 量<sup>[9]</sup>。有限断层模型有利于与活动断层探查的成 果结合,探查中得到断裂产状等是模型的重要参数。

混合有限断层震源模型的参数分成两大类,全局参数和局部参数<sup>[10-11]</sup>。全局震源参数描述发震断裂的宏观特征,包括断层位置、产状和埋藏深度,断层破裂长度、宽度和面积,断裂面上的平均滑动、平均破裂速度等;局部震源参数着重描述断裂面上滑动的不均匀分布,又进一步分为凹凸体模型参数和k平方模型参数两类。

马衔山北缘断裂是在青藏高原东北缘地区向东 北方向推挤、受到相对稳定的鄂尔多斯地块的阻挡 下形成的<sup>①</sup>,全长约115 km,总体走向 NW60°。该断 层早期具挤压逆冲特性,大约自中更新世以来断层 活动为左旋走滑兼具倾滑运动分量。活断层探查与 危险性评价的成果表明,断层西段发生 6.5 级地震 的危险性相当于 500 年一遇。根据统计关系可以得 到四个全局参数的期望值<sup>[12,14]</sup>,破裂面积为 17 × 8 = 136 km<sup>2</sup>,平均错动量为 145.97 cm,长度在 17 km 左右,宽度在 8 km 左右。破裂宽度大体相当于断裂 剖面上 G 界面底界深度至断裂底界的深度。破裂 的长度可以用破裂面积除以宽度推算。本文进一步 考虑数据对统计关系的离散,估计破裂面积、破裂长 度及平均错动量的不确定性,取正态分布,描述了估 计值的随机性<sup>[15]</sup>。

局部震源参数用于表示断层面上错动不均匀性 或粗糙度。凹凸体可简单地定义为破裂面上被卡 住、阻碍断层错动的有限区域,是高频地震波产生的 原因<sup>[16]</sup>。在本文采用的混和模型中,凹凸体被用来 表达破裂面上错动量明显高的那些部分。根据凹凸 体的数量与矩震级之间的经验关系估计<sup>[13-14]</sup>,倾滑 断层上6.5级地震对应的凹凸体一般来说有二个, 分别称为最大凹凸体和其他凹凸体。凹凸体参数主 要根据半经验公式估计<sup>[16]</sup>,参数主要有凹凸体面 积、长度、宽度、沿走向和下倾方向的中心位置、平均 滑动量等的期望值。估计得到的最大凹凸体相应参 数的数值分别为:16.35 km<sup>2</sup>、8.71 km、1.88 km、 3.24 km、4.2 km、358.31 cm;其他凹凸体参数值分 别为:面积 14.10 km<sup>2</sup>、长 3.75 km、平均滑动量 298.03 cm。



图1 混合有限断层震源模型四例

Fig. 1 Four examples of the hybrid finite fault source models for a M6.5 earthquake.

*k* 平方模型参数主要包括沿走向和下倾方向的 拐角波数等<sup>[17]</sup>,估计得到的 6.5 级地震的 *k<sub>a</sub>*和 *k<sub>o</sub>* 期望值分别为 0.043 7 和 0.069 2。

进一步采用正态分布考虑参数的随机性,得到 30 个震源模型的局部参数值。

混和震源模型用凹凸体描述长波长错动的特

征,作为确定性部分;用 k<sup>-2</sup> 描述的短波长错动的特征,作为随机部分,将二者结合起来,用前者约束后者的滑动波数谱模型。限于篇幅,图 1 中展示了本文生成的 30 个震源模型中的 4 个例子。

本文采用了1.0 km×1.0 km的子源。破裂起 始点位置在凹凸体范围以外,由计算机随机生成。 破裂传播速度取震源区剪切波速的0.85倍,向周围 扩展就得出了全部子源破裂的时序。

2 地震动的合成

采用 Atkinson 等发展的随机方法合成高频地震动。有限断层源上的每一个子源都可以视为一个点源。从一个点源产生的地震波加速度傅氏谱为<sup>[17-22]</sup>。

 $FA(M_0, f, R) = C \cdot S(M_0, f) \cdot G(R) \cdot D(R, f) \cdot A(f) \cdot P(f) \cdot I(f)$ (1)

式中  $FA(M_0, f, R)$  为场地地震动的傅氏幅值谱;  $S(M_0, f)$  为震源谱<sup>[23-27]</sup>,其中采用了动力学拐角频 率<sup>[28]</sup>;G(R) 为几何衰减项;D(R, f) 为滞弹性衰减 项;A(f) 为近地表幅值放大因子,可以通过表达区 域地壳速度梯度的传递函数估计;P(f) 为高频截止 滤波器;I(f) 表达加速度谱与位移谱之间的关系。 计算中采用的区域参数<sup>[29,31]</sup>,震源附近介质的剪切 波速度取 3.522 km/s;震源区应力降为 26 bar;品质 因子 Q 值取 52 $f^{1.09}$ 。

每个子源引起场地的地震动时程可根据上式得出的傅氏谱借助傅氏逆变换得到。场地的地震动时程 a(t),可按下式在时域叠加所有子源的贡献得出:

$$a(t) = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} a_{ij}(t - \Delta t_{ij})$$
 (2)

式中 $N_L$ 和 $N_W$ 分别是沿断裂走向、下倾方向的子源 个数, $N_L \times N_W$ 为震源的总个数; $a_{ij}(t)$ 为由第ij个子 源引起的地震动时程; $\Delta t_{ij}$ 为由该子源触发时刻的差 别、子源至场地路径的差别引起的时滞。

在地表 200 m × 200 m 网格的 43 254 个节点上 计算了基岩地表地震动,得到各点加速度峰值的分 布,进一步归纳出兰州盆地周边地区及周边地区的 基岩地表地震动加速度峰值分区图,如图 2 所示。 构造等值线采用了基于统计学的克里格插值,参照 地震区划图的分级标准,分为峰值加速度 100、150、 200、300 和 400 gal 的区,边界经光滑处理。图中线 条表示马衔山北缘断裂西段。

### 3 兰州盆地对地震动场的影响和地震 动峰值加速度分区

兰州市大部分范围位于兰州盆地内,盆地效应 对强地震动有重要影响。兰州盆地第四纪松散沉积 层普遍较薄,一般不超过 50 m,根据已有的钻孔剪 切波速度剖面可知,即便在这么薄的表层土中剪切 波速度也会有很大的变化。若采用三维波动有限元 计算,用一个单元的平均剪切波速来描写有成倍变 化的复杂速度结构,显然难以保证计算的精度;详细 划分则会导致单元数量过大,计算量难以承受。为 此本文采用了一维等效线性化波动分析,详细描述 土层速度结构,同时考虑土的非线性特征,付出了忽 略盆地速度结构三维变化影响的代价,保证了精度。



- 图 2 马衔山北缘断裂西段 6.5 级地震引起的兰州 市及周边地区基岩地表 PGA 分区图
  - Fig. 2 Peak ground acceleration zoning map at rock site in Lanzhou city and its vicinity caused by M6.5 earthquake on the westernt segment of Maxianshan north margin fault.





依据"兰州市地震小区划(2006)"项目的成 果<sup>[30]</sup>,兰州市及周边地区的场地分为基岩区、黄土 区、盆地区,盆地内又分为Ⅰ级阶地、Ⅱ级阶地和Ⅲ 级阶地,如图3所示。从图中可见,黄土区和基岩区 的范围大;盆地内主要是Ⅰ级阶地和Ⅱ级阶地,Ⅲ级 阶地范围很小。

对盆地和黄土覆盖的每一个分区各选取若干代 表性的钻孔,采用等效线性化方法计算该区的平均 传递函数。将地下 50 m 深度处地震动的傅氏谱乘 上各点所在分区的传递函数,经逆变换得到地表的 地震动。经同样的插值、光滑,归纳得到的峰值加速 度(PGA)分布预测图,如图 4 所示。



- 图4 马衔山北缘断裂西段6.5级地震引起的 地震动峰值加速度分区图
- Fig. 4 PGA zoning map of Lanzhou city and its vicinity caused by M6.5 earthquake on the western segment of the fault.

显然,地震动分区不能仅考虑峰值加速度一个 量。兰州盆地 I 级阶地的松散沉积层在周期 0.1 s 左右对地震动放大作用明显, II、III级阶地的沉积土 层在周期 0.3 s 左右有明显的放大作用,与基岩地 表的地震动会有明显的差别。全国地震区划图规定 的设计基本地震加速度值为 0.2 g,100 gal 的区可 能还受到其他潜在震源区的影响,暂不详细考虑。 对 150、200、300 和 400 gal 的分区进一步按场地条 件分区,统计了各分区的平均加速度反应谱的特征, 发现其差别并不显著。据此进一步将黄土区和盆地 合并为一类分区,得到的地震动分区图如图 5 所示。 图中用斜线表示了非基岩的分区。

对每一个分区统计了平均的加速度反应谱,并 进一步标准化提取了与抗震设计规范中规定的地震 影响系数相应的参数,得到的反应谱参数,列于表 1。《建筑物抗震设计规范》(50011-2001)规定,兰 州抗震设防烈度为哑度,设计基本地震加速度值为 0.20g,设计地震分组为第二组,表中也列出了相应 的地震影响系数(与设计反应谱仅单位不同)的参数值。



- 图5 马衔山北缘断裂西段6.5级地震引起的 兰州市及周边地区地震动分区图
- Fig. 5 Seismic zoning map of Lanzhou city and its vicinity caused by M6.5 earthquake at the fault segment.

表1 兰州市及周边地区设计反应谱参数

分区	土类	$\alpha_{\rm max}/{\rm g}$	$T_{g}/s$
1 - 2	基岩/土层	0.300	0.30
3	基岩	0.400	0.25
	土层	0.450	0.30
4	基岩	0.550	0.25
	土层	0.650	0.30
5	基岩	0.700	0.30
5	土层	0.900	0.30
规范	基岩	0.450	0.30
	土层	0.450	0.40

注:表中规范规定的特征周期0.30、0.40 s分别对 应设计地震第二组、场地类别Ⅰ和Ⅱ<sup>[32]</sup>。

从表中的参数值可知,马衔山北缘断裂西段发 生6.5级地震,大体上相当于偶遇地震的作用。由 于断裂倾向南西,兰州市及周边地区的南部、西南部 地震动相对强烈。根据地震构造的研究,地震破裂 从北西向南东扩展,盆地西部的地震动相对东部也 要强烈一些。两项作用可使少数地区的地震影响系 数提高到0.9。北部一些地区的地震动相对弱些, 地震影响系数可能低至0.3。受兰州盆地内松散沉 积土层的影响,盆地内的地震动有增强,且长周期分 量明显增加,特征周期延长到0.4 s。

#### 4 结语

参照475年一遇的建筑物抗震设防标准,本文 预测了设定在马衔山北缘断裂西段上的一次6.5级 地震可能引起的兰州盆地及周边地区的地震动场, 重点考虑了近断层效应和盆地效应。

本文得到的地震动分布图和分区图均表现了断 裂倾向南西对地震动的控制作用,即上盘效应;和地 震破裂向南东扩展的方向性效应。两者共同作用使 近断裂的一些地区的地震影响系数提高到 0.9,相 对地震区划图,有一个明显的提高。主要原因是原 来不清楚或未能考虑得这么细致,假设未来强烈地 震是在相应潜在震源区的范围内随机分布的,各处 发生地震的可能性大体上是相同的。探查工作的成 果将未来强烈地震限定在马銜山北缘断裂西段,明 确了断裂的倾向、倾角和可能的起始破裂部位。可 以说,这是认识深化基础上的提高。

从本文结果看,兰州市及周边大多数地区可以 按地震区划图规定的设计基本地震加速度设防,取 0.2g;本文地震动分区图中300和400gal的区,抗 震验算地震影响系数最大值有待提高;北部一些地 区的地震动相对弱些,地震影响系数可能低至0.22。 是否可以按这个标准设防需要进一步论证,主要取 决于原来的0.2g是完全由兰州潜在震源区影响 的,还是有其他潜在震源区的影响,以及后者的影响 有多大。当然上述改变需要报经主管部门批准。

#### [参考文献]

- [1] 中华人民共和国国家标准.建筑物抗震设计规范(BG50011 2001)[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] 陶夏新,李小军.工程地震基本科学问题[A]//国家自然科学基金委员会工程与材料科学部.学科发展战略研究报告 (2006年-2010年),建筑、环境与土木工程II(土木工程卷) [G].北京:科学出版社,2006:367-381.
- [3] D M Boore. Comparisons of Ground Motions from the 1999 Chi Chi Earthquake with Empirical Predictions Largely Based on Data from California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(5): 1212-1217.
- [4] X X Tao, J G Anderson. Near field strong ground motion simulation[A] // Proceeding of International Conference on Advances and New Challenges in Earthquake Engineering Research [C]. Harbin. 2002.
- [5] T Khosrow, K T Shabestari, F Yamazaki. Near-fault spatial variation in strong ground motion due to rupture directivity and hanging wall effects from the Chi – Chi, Taiwan earthquake [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamic, 2003, 32(14): 2197-2219.
- [6] H Kawase. The cause of the damage belt in Kobe: "the basin edge effect" constructive interference of the direct S wave with the basin induced diffracted/Rayleigh waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 67(1): 25-34.
- [7] I A Beresenv, G Atkinson. Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1994 Northridge, California, earth-

quake, I. Validation on rock sites [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998, 88(6); 1392-1401.

- [8] I A Beresenv, G Atkinson. Generic finite-fault model for ground motion prediction in Eastern North America [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89(3): 608-625.
- [9] X X Tao, G X Wang. Rupture directivity and hanging wall effect in near field strong ground motion simulation [J]. ACTA Seismologica Sinica, 2003, 16(2): 205-212.
- [10] X X Tao, H Y Wang. A random source model for near filed strong ground motion prediction [A] // Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering [C]. Vancouver, Canada, 2004.
- [11] H Y Wang, X X Tao, J Li. Global source parameters of finite fault model for strong ground motion predictions [A] // Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering [C]. Vancouver, Canada, 2004.
- [12] 王海云,陶夏新.近场强地震动预测中浅源地震的 Asperity 模型特征[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(11):1533-1539.
- [13] H Y Wang, X X Tao. Relationships between moment magnitude and fault parameters: theoretical and semi-empirical relations
  [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 2(2): 201-211.
- [14] 孙晓丹. 震源对大跨度空间结构地震动输入的影响[D]. 哈尔滨工业大学,2005.
- [15] H Kanamori, D L Anderson. Theoretical basis of some empirical relations in seismology[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(5): 1073-1095.
- [16] 王海云. 近场强地震动预测的随机震源模型[D]. 中国地震局工程力学研究所,2004.
- [17] T C Hanks, R K McGuire. The character of high-frequency strong ground motion [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, 71(6): 2071-2095.
- [18] G Atkinson, D M Boore. Stochastic point source modeling of ground motion in the Cascadia region [J]. Seismological Research Letter. 1997, 68(1): 74-85.
- [19] G Atkinson, W Silva. An empirical study of earthquake source spectra for California earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(1): 97-113.
- [20] G Atkinson, W Silva. Stochastic Modeling of California ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(2): 255-274.
- [21] I A Beresenv, G Atkinson. Modeling finite-fault radiation from the ω<sup>n</sup> spectrum[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(1): 67-84.
- [22] K Aki. Scaling law of seismic spectrum [J]. Journal of Geophysical Research, 1967, 72: 1212-123. 1

(下转244页)

维普资讯 http://www.cqvip.com

244	*	1L	地	震	学	报 第 30 卷
	力学,2003,20(增刊):435-438.				[6]	黄慧达.古建木结构建筑地基基础力学性能及隔震研究[D].
[3]	方东平,俞茂宏,宫本裕,等.木结构古建筑结	构的词	计算研	究		西安:西安建筑科技大学,2006.
	[J]. 工程力学,2001,18(1):137-144.				[7]	罗勇.古建木结构建筑榫卯及构架力学性能与杭震研究[D].
[4]	徐其文,汤小平,索安勇.中国古典建筑木结构特	性的	分析研	究		西安:西安建筑科技大学,2006.
	[J].淮海工学院学报,1995,11(4):64-67.				[8]	隋龑. 古建筑木结构枓栱的抗震机理及力学分析[D]. 西安:西
[5]	张舵,卢芳云.木结构古塔的动力特性分析.	L 程 ナ	力学[J	].		安建筑科技大学,2006.
	2004, 21(1):81-86.					

西北地

\*\*\*\*\*\* (上接231页)

[23] T C Hanks. b values and  $\omega^2$  seismic source models: implications for tectonic stress variation along active crustal fault zones and the estimation of high-frequency strong ground motion[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(5): 2235-2242.

244

- [24] J G Boatwright, G L Choy. Acceleration source spectra anticipated for large earthquakes in northeastern North America[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(2): 660-
- 682.
- [25] G Atkinson. Earthquake source spectra in the Eastern North America [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1993, 83(6): 1778-1798.
- [26] G Atkinson, D M Boore. Evaluation of models for earthquake source spectra in eastern North America [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998, 88(4): 917-934.
- [27] I A Beresenv, G Atkinson. Source parameters of earthquakes in

eastern and western North America based on finite-fault modeling [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92 (2): 695-710.

- [28] D Motazedian, G M Atkinson. Stochastic Finite-Fault Modeling Based on a Dynamic Corner Frequency[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95(3): 995-1010.
- [29] B Mohammadioum, L Serva. Stress drop, slip type, earthquake magnitude, and seismic hazard [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(4):694-707.
- [30] 孙崇绍. 西北黄土地区河谷城市地震动参数小区划研究----以兰州为例[J]. 西北地震学报,2007,29(1):1-11.
- [31] 尹志文,许健生,李苹. 永登5.8 级地震前后小震的震源参数 和介质 Q 值变化特征研究[J]. 西北地震学报,1999,20(4): 14-20.