兰州盆地最大潜在地震变形数值模拟

王爱国^{1,2},袁道阳^{1,2},梁明剑²

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州基地,甘肃兰州 730000; 2. 甘肃省地震局,甘肃兰州 730000)

摘 要:在分析兰州盆地及周边地震构造环境、深部地球物理特征及盆地结构构造特征的基础上,建 立了马衔山北缘断层西段发震的三维地震构造模型。采用三维有限元方法计算了该断层段未来发 生 M_s7.0 地震在兰州盆地的变形影响。计算结果表明:地震产生的变形及地震应力在兰州盆地区 内已有很大程度的衰减,在量值上从盆地西侧到盆地东侧总位移值从 1.25 m 降至 0.3 m;盆地内 部最大地震应力则基本保持在 0.02 MPa 左右,只在盆地边缘及高阶地前缘局部点达到 0.2 MPa。 地震应变在东、西盆地有明显的分异,但量值总体保持在 10⁻⁵,只在局部异常点达到 10⁻⁴,不会在 盆地区内形成地表裂缝等破坏,对建筑结构的永久变形影响也较小。但应注意盆地边缘地貌单元 分界处与断层附近的局部异常影响及其可能触发的次生灾害。

关键词:地震变形;三维有限元;数值模拟;兰州盆地

中图分类号: P315.915 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2008)03-0232-07

Potential Earthquake Deformation and Stress Simulation of Lanzhou Basin

WANG Ai-guo^{1,2}, YUAN Dao-yang^{1,2}, LIANG Ming-jian²

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

2. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: On the bases of the regional seismic tectonics, deep geophysical characters and the basin structure of Lanzhou area, the 3D seismotectonic model is created for earthquake occurring on west part of north Mahanshan fault, and the earthquake deformation influence to Lanzhou basin is calculated on the case of earthquake $M_s = 7$. The results show that the deformation in Lanzhou basin has certain degree of attenuation and the total displacement of ground surface is from 1.25 m to 0.3 m from west to east of the basin. The maximum earthquake stress is about 0.02 MPa in the basin and only reached to 0.2 MPa on parts of the basin edge and front of high terraces. Although the earthquake strain has differentiation in east basin and west basin, the main strain magnitude is 10^{-5} and only a few abnormal points reachs to 10^{-4} . The deformation would not cause destruction such as ground fracture, and the effect to buildings' permanent deformation is weak also. But we should pay attention to the local abnormal effect near the boundaries of geomorphic elements and faults as well as the secondary hazard may be triggered.

Key words: Earthquake deformation; 3D finite element; Numerical simulation; Lanzhou basin

0 引言

20 世纪90 年代以来国内外多次大地震的灾害 分布特征表明,在建筑物抗震设计和施工质量得到 保证的条件下,振动破坏的比重大大降低,而地震断 层地表错动引起的地基失效在建构筑物破坏中的作 用越来越突出^[1]。兰州位于青藏高原东北缘黄河 河谷盆地,多手段探测与调查^[2]表明兰州盆地内部 及周边存在多条断裂,1125年曾发生7级大震,对 兰州造成极大的破坏。如何认识这些断层未来的发

收稿日期:2007-09-14

基金项目:中国地震局地震预测所基本科研业务专项(2007690);中国地震局兰州地震研究所论文 LC2008010 作者简介:王爱国(1972-),男(汉族),湖北洪湖人,副研究员,主要从事地震地质、工程地震方向的研究.

震能力、可能产生的地表变形带几何结构和运动学 特征及其对兰州盆地的影响,是兰州城市活动断层 地震危害性评价中的重点之一,也是兰州市隐伏活 断层探测与地震危险性评价中的一项重要工作内 容,是活动断层探测研究与社会减灾需求之间的纽 带和桥梁,对城市规划设计具有重要现实意义。

本文在充分吸收兰州市活断层探测与地震危险 性评价研究成果的基础上,采用三维有限元方法对 兰州盆地最大潜在地震地表变形进行了数值模拟预 测,得到兰州盆地最大潜在地震同震地表变形量和 变形分布特征。

兰州盆地及附近地区地震构造特征 与最大潜在地震变形分析

兰州市活断层探测与地震危险性评价项目[2]

通过对目标断层的航卫片解译、控制性地球化学探测、浅层人工地震探测、电成像探测、多道直流电法 探测、钻孔探测与槽探、野外地质综合考察与填图等 综合研究及样品年代测试,获得兰州盆地及周边地 区主要断层有5条(图1),即位于兰州盆地及周边地 区主要断层有5条(图1),即位于兰州盆地北边界 的金城关断层 F_1 、近南北向切割盆地的雷坛河断层 F_2 、盆地西南边界的寺儿沟断层 F_3 、盆地南侧的西 津村断层 F_4 和马衔山北缘断层 F_5 。其中晚更新世 以来活动的只有马衔山北缘断层 F_5 ,其余均为早第 四纪活动断层。马衔山北缘断层 F_5 ,其余均为早第



1.前第三系:2.第三系;3.黄河十6级阶地;4.黄土;5.三级阶地;6. 级阶地;7.金新世断层; 8.晚更新世断层;9.第四纪早期断层;10.隐伏断层;11.推测断层;12.逆断层;13.正断层; 14.走滑断层;15.断层编号;16.城区;17.河流;18.不整合界线;19.岩性界线;20.强震震中

图 1 兰州盆地及附近地区地震构造图(据袁道阳,2006) Fig. 1 The seismotectonic map of Lanzhou Basin (from Yuan Dao-yang,2006).

由上可见,兰州盆地附近全新世活动断层段主 要为马衔山北缘断层中东段和西段,其它断层第四 纪晚期以来基本不活动。因此兰州周边的发震构造 判定为马衔山北缘断层中东段和西段,具备发生7 级左右地震的可能性。考虑到地震断层产生的变形 大小衰减与距发震断层的距离成非线性关系,马衔 山北缘断层中东段全新世活动段与兰州市最近距离 大于 20 km, 地表变形值将衰减到很小, 因此兰州盆 地的最大潜在地震变形将主要产生于马衔山北缘断 层西段发震。本模拟基于此进行计算。

2 最大潜在地震变形数值模拟方法

第30卷

地震变形的计算最早始于 1957 年日本学者笠 原庆一对平推断层在地表引起的位移场计算^[3]。 至80年代初,国内外学者如笠原庆一^[4]、美国学者 诺波夫^[5]、加拿大学者斯梯柯蒂(1958)、软尼莱^[6]、 日本学者丸山卓男^[7]、美国学者普雷斯^[8]、钦尼莱 和彼特拉克^[9]、堪尼特兹等^[10]、陈运泰^[11]、黄立 人^[13]、Okada^[12]等分别从理论和实际计算上对不同 活动方式下断层均匀滑动在地表引起的位移场进行 了研究。1987 年 Harris 和 Segall 提出垂直走滑断层 的非均匀滑动位错模型[14];刘洁(1991)综合了 Okada 及 Harris 和 Segall 的研究结果,给出了走滑、 倾滑、拉张三个分量同时存在的非均匀滑动断层模 型。尽管上述位错模型不同,但它们都是以沃尔特 拉位错理论为基础,由已知地表位移观测资料反演 断层运动学参数,而得不到由位错引起的有效范围 内断层的动力学参数。

宋惠珍等^[15]以位错概念为基础,导出了位错模型的有限单元公式,讨论了位错反演与有限单元正演相结合的方法,计算位错面内外任一点处断层的运动学和动力学参数。这是有限元方法首次引入地震变形计算。国外学者 Paul Segall 等也用这类模型进行了一系列的研究^[16-17]。随后,曾海容、宋惠珍^[18-19]以三维节理单元为基础,讨论了利用三维双节点节理单元模型反演地形变资料的理论基础及方法的应用,推导了具体应用的有限元公式及反演的数学公式,编制了相应的计算程序,并用包括 EDM、CPS、VLBI、Leveling 等在内的震时地形变资料,反演了1989 年 Loma Prieta 地震的震源机制。

王爱国等^[20-21]基于地震的断层弹性位错理论, 采用地震位移水平分布的抛物线模型,提出了活断 层发震产生地震变形的三维有限元方法,并以实例 表明该方法具有简明实用、计算精度高、边界可控、 模型可调的特点,能使模拟更切合实际。本研究采 用这一方法进行模拟计算。

弹性位错理论将断层面变形以反作用力方式加 于断层面上,推算断层周边一定距离范围内的地震 同震变形。计算中主要应用到如下统计公式:

① 地震地表破裂带长度 L 与震级关系^[22]:

$$M = 3.3 + 2.1 * \lg L(km)$$
(1)

② 地表最大错动幅度 U_d 与震级关系^[23]:

$$lg U_d = 0.52M - 1.25$$
 (2)
③ 地震矩 M_0 与震级关系^[22]:

见的,因此,关系式(1)、(2)可用来根据将要计算 的震级确定地震地表破裂带长度及地表最大错动幅 度。

虽然现在关于震源的理论有很多,但关于地下 地震破裂范围及分布的确切证据仍不足。因此现阶 段的模拟仍采用矩形断错面,这对于计算某一场地 的最大潜在地震变形影响不大。但可对断错面上的 地震位移分布做一定改进和简化。这里我们在水平 方向上忽略位移分布的不对称性,采用位移分布的 抛物线模型,即以震中为中心点,取水平方向为 X轴,则有 $U_x = px^2 + U_d$, 当x = L/2 时, $U_x = 0$, 因此

$$p = -\frac{4U_{\rm d}}{L^2} \tag{4}$$

而纵深方向上取一定断错面宽度,位移值简化为在 纵深方向上不变。

断错面宽度的确定理论上可根据式(3)及地震 矩计算公式

$$M_0 = E \iint U_{x,y} \mathrm{d}x \mathrm{d}y \tag{5}$$

共同确定,但可能由于公式间的不协调,计算得出的 断错面宽度往往不切实际。由于只有浅源地震才容 易在地表产生破裂带,才会在地表一定范围产生大 的地震变形,对设施造成破坏,计算中断错面的宽度 可依据区域浅源地震震源深度来确定。纵深方向上 的地震位移分布理论上至少到震源处,因此计算模 型中断层位错面的宽度均以估计的震源深度计算。 这种确定断错面宽度的方法对于地表地震变形的影 响并不明显^[20,11]。

3 马衔山北缘断层三维地震构造模型

(1)断层几何学参数:根据研究,马衔山北缘断 层西段全新世活动段(咸水沟段)长约10km,走向 N50°W,浅地表倾向NE,向下变为南倾,倾角大约 75°。

(2) 地壳结构与波速

通过兰州市活断层探测项目"深部构造环境探测"工作的实施,获得了较高质量的高分辨地震折射和深地震宽角反射/折射资料。用多种不同方法进行计算与处理,得到了基底与盖层的精细速度结构和地壳基本结构与构造图像。由壳内反射波 P_1 、 P_2 、 P_3 和 Pm 所确定的 C_1 、 C_2 、 C_3 和 M 反射界面将该地区地壳分为上地壳、中地壳和下地壳。上地壳的厚度为 13.0~18.0 km,速度变化范围为 6.00~6.10 km/s;中地壳的层厚度为 16.0~20.0 km 左

第3期

235

右,速度在 6.30 km/s 左右;下地壳厚度为 17.0~ 24.0 km,速度在6.35~6.5 km/s 左右。

(3) 介质物理力学参数

计算中需要的介质物理参数包括介质的密度、 泊松比和弹性模量,这些参数的获得主要根据介质 的波速,参考国内外最新研究成果,由经验关系及换 算公式求得。

由于很多固体,特别是近地表岩石的泊松比接 近1/4,这时拉梅常数几乎是相等的,纵波速与横波 速存在如下关系^[24], $V_{p} = \sqrt{3} \cdot V_{s}$, 根据这一关系可 以由纵波速求得横波速。

在理论上可以根据拉梅常数产和横波速等求出 介质密度,但一般都存在很大的误差。Christensen 等[25] 通过对全球范围地壳结构地球物理探测速度 值和室内岩石力学实验结果(>3 000 个样本)对比 分析,给出了地壳不同深度上纵波速与密度之间回 归关系式,可根据纵波谏计算不同深度的介质密度。

依据弹性理论,应用下列各式分别计算小应变 下介质的动力参数:

 $\mu = 0.5 \times (v^2 - 2) / (v^2 - 1)$

 $E = 2 \times \rho \times V_{\rm s}^2 (1 + \mu)$

式中: $v = V_{P}/V_{s}; \rho$ 为密度; μ 为动泊松比; E 为动杨 氏模量。

根据上述的分析和计算,可以获得兰州盆地典 型的介质剖面。兰州及周边地壳模型可取深度45 km,大致分为4层。考虑场地覆盖的影响,盆地内 近地表大致区分了黄河 T₁ 与 T₃ 级阶地,两者厚度 分别取 50 m 和 15 m,介质波速参考工程场地钻孔 平均给出。根据介质参数之间的关系式以及经验回 归关系式,换算出必要的横波速、泊松比、密度和弹

性模量(表1)。其中断层参数参考相关资料给出的 为近似值。

表1 兰州盆地介质分层与物理力学参数一览表

分	层厚	层底深	纵波速	横波速	密度	泊松	弹性模量
层	/km	度/km	$/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$/10^3$ kg \cdot m ⁻³	比	/10 ⁴ MPa
1	1.5	1.5	3	1.73	2.4	0.25	1.8
2	15.5	17	6	3.46	2.727	0.25	8.2
3	16	33	6.3	3.64	2.835	0.25	9.4
4	12	45	6.4	3.7	2.888	0.25	9.9
Тı	0.015		0.800	0.410	2.1	0.3	0.09
T_3	0.050		1.025	0.560	2.0	0.27	0.16
断层	i.				2.2	0.26	1

(4) 断层运动学参数

马衔山北缘断层西段以左旋走滑为主兼具正断 性质。实地测量1125年7级地震地表左旋走滑量 最大值 2.5 m, 垂直断距 0.45~0.92 m。在模拟中 最大潜在地震变形以该断层发生最大潜在地震7.0 级地震为计算模型,断层错动最大幅度参考1125年 地震保守取最大值,即水平错动2.5 m,垂直错动 0.9 m。考虑到兰州盆地位于断层下盘(被动盘), 位移值取半,即水平错动1.25 m,垂直错动0.45 m。

断层地表破裂带的长度根据经验关系为 57.8 km。考虑到该断层段全新世活动的地震危险水平 是均等的,作为最大潜在地震变形模拟预测,在模拟 中将该长约10 km的活动段位移分布以最大值,向 两侧按抛物线衰减,各长28.9 km。相应的水平位 移分布的 p 值为 -1.5×10⁻³, 垂直位移分布的 p 值 为-0.27×10⁻³。

根据研究区地震震源深度分布特征,本区地震 震源深度主要分布于13~17 km,模拟计算时矩形 断错面宽度保守取值 20 km。

(5) 三维模型建立



图 2 兰州盆地三维地质结构模型及单元划分图 Fig. 2 The 3D geostructure model of Lanzhou Basin and finite element division.

根据上述资料建立的兰州盆地区马衔山北缘断 层西段发震构造三维模型(图2)。模型以马衔山北 缘断层为南边界,包括了兰州盆地及盆地内部与周 边发育的金城关断裂、雷坛河断裂、寺儿沟断裂和西 津村断裂,东西长 100 km,南北宽 50 km,厚45 km。 将盆地区分为两级台地,即城市所在盆地 T₁级阶地 面和周边发育的 T₃级台地面。断层发育宽度均取 100 m,为 T₁ 与 T₃级台地所覆盖。

采用 10 节点 4 面体单元 solid92 将模型划分为 286 486 个节点 197 056 个单元(图 2)。单元划分 中重点考虑盆地区及其周边与断层带,在这些地方 进行细化,保证数据输入与计算的精度。

考虑到地震变形的衰减,将模型底边界面限制 为无位移;模型东西边界限制为无东西向运动;模型 北边界限制为无南北向运动。将断层发震潜在最大 位移施加于马衔山北缘断层断面之上。

4 兰州盆地最大潜在地震变形预测

(1) 地震位移分布

图 3 为模拟计算得到的兰州盆地最大潜在地震 位移分布等值线图。从图可以看出,兰州盆地最大 潜在地震位移与距离马衔山北缘断层西段发震构造 的距离相关性很大,总体表现为西盆地位移值大,东 盆地位移值小,盆地北侧位移小,盆地南侧相对较 大。总位移值从盆地西侧 1.25 m 向东逐渐降低至 0.3 m,位移分量以水平方向平行马衔山北缘断层的 X方向最大,其他两个分量则要小得多。

(2) 地震应力分布

图 4 为模拟计算得到的兰州盆地最大潜在地震 应力分布图。可以看出,对于兰州盆地及周边地区, 起主要作用的地震应力为最大主压应力、最大主拉 应力及水平方向上的剪应力,这些应力的高值区分 布于断层、地貌单元边界及地貌单元的拐折处,盆地 中心各种方向的地震应力相对均较低。总体表现西 盆地高于东盆地。地震应力值在盆地边缘集中区最 高值达 0.2 MPa,而盆地中心地震应力值只有 0.01 MPa 左右。

(3) 地震应变分布

图 5 为模拟计算得到的兰州盆地最大潜在地震 应力分布图。可以看出,对于兰州盆地及周边地区, 地震应变相对较大的为最大主压应变、最大主拉应 变及水平方向上的剪应变,这些应变的高值区分布 也明显受控于断层、地貌单元边界及地貌单元的拐 折点,盆地中心各种方向的地震应变相对均较低。

第一主压应变 Strain1 在东盆地北部及西盆地 中心形成两个明显的低值区,应变值在 10⁻⁶量值, 在断层及地貌单元边界处地震应变形成高应变与低 应变的分异,最高达 2.5E - 4;第二主压应变 Strain2 在东盆地与西盆地形成张压的转换,西盆地表现为



Fig. 3 The maximum potential earthquake displacement distribution of Lanzhou basin.

237









图 5 兰州盆地最大潜在地震应变分布图 Fig. 5 The maximum potential earthquake strain distribution of Lanzhou basin.

第30卷

压性,东盆地则为张性,应变值均很低,量值在 10^{-6} ;第三主压应变 Strain3 总体为张性,量值表现为从盆地西侧向东逐渐降低,量值约为 3E - 5。应 变强度与水平方向上的剪应变也表现为从西向东的 衰减,量值均在 10^{-5} 。

5 结论

从以上计算结果可以看出,由于兰州盆地距离 马衔山北缘断层西段发震构造最近也有约3km,地 震产生的变形及地震应力在兰州盆地区内已有一定 程度的衰减。在量值上,从盆地西侧到盆地东侧总 位移值从1.25m降至0.3m,最大地震应力则基本 保持在0.02MPa左右,只在盆地边缘及高阶地前缘 局部点达到0.2MPa。应变值在东盆地与西盆地有 明显的分异,但量值总体保持在10⁻⁵,只在局部异 常点达到10⁻⁴。根据岩石学及深部地球物理研究 成果,兰州盆地最大潜在地震变形不会在盆地区内 形成地表裂缝等破坏,对建筑结构的永久变形影响 也较小。但应注意盆地边缘地貌单元分界处及断层 发育处的局部异常影响及其可能触发的次生灾害。

[参考文献]

- [1] 朱金芳,徐锡伟,黄宗林,等. 福州市活断层探测与地震危险性 评价[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [2] 袁道阳,王兰民,何文贵,等. 兰州市活断层探测新进展[J]. 地震地质,2008,30(1):236-249.
- [3] K Kasahara. The nature of seismic origins as inferred from seismological and geodetic observations (I) [J]. B. E. R. I., 1957, 35 (3): 473-532.
- [4] K Kasahara. Physical conditions of earthquake faults (II), A model of strike slip faults with various dip angles [J]. B. E. R. I. 1959, 37(1): 39-52.
- [5] L Knopoff. Energy release in earthquakes[J]. Geophys., J. R. A. S., 1958,1(1): 44-52.
- [6] M A Chinnery. The deformation of the ground around surface faults
 [J]. B. S. S. A. , 1961, 51(3): 355-372.
- [7] T Marayama. Statical elastic dislocation in an infinite and semi -infinite medium [J]. Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ., 1964, 42(2): 355-372.

- [8] F Press. Displacements, strains and tilts at teleseismic distances
 [J]. J. G. R., 1965, 70(10); 2395-2412.
- [9] M A Chinnery, J A Petrak. The dislocation fault model with a variable discontinuity[J]. Tectonophysics, 1968, 5(6): 513-529.
- [10] N Caritez, M N Tokosoz. Static and dynamic study of earthquake source mechanism: San Fernando earthquake [J]. J. G. R., 1972, 77(14): 2583-2594.
- [11] 陈运泰,林邦慧,林中洋,等. 根据地面形变的观测研究 1966
 年邢台地震的震源过程[J]. 地球物理学报, 1975, 18(3):
 164-182.
- [12] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile fault in a half space[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1985, 75(4): 1135-1145.
- [13] 黄立人,顾国华. 静力位错理论[M]. 北京:地震出版社, 1982.
- Segall P, Harris R. Earthquake deformation cycle on the San Andress fault near Parkfield, California [J]. J. Geophys, Res., 1987, 92(B10): 10511-10525.
- [15] 宋惠珍,刘洁,兰印刚.位错模型的有限单元公式[J].西北 地震学报,1993,15(2):6-12.
- Segall P, Lisowski M. Surface displacements in the 1906 San Francisco and 1989 Loma Prieta earthquakes [J]. Science, 1990, 250(9): 1241-1244.
- Thora A, Segall P. The 1989 Loma Prieta earthquake imaged from inversion of geodetic data[J]. J. Geophys Res., 1994, 99 (B11):21 835-21855.
- [18] 曾海容,宋惠珍. 三维有限单元反演的数学方法[J]. 地质 力学学报,1999,5(1):45-49.
- [19] 曾海容,宋惠珍.利用三维有限单元格林函数反演 1989 年
 Loma Prieta 地震的震源机制[J].地震学报, 1999,21(3):
 225-232.
- [20] 王爱国,石玉成,马 巍. 地震地表变形三维有限元数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(24):4124-4130.
- [21] 王爱国,石玉成,柳煜. 黄河黑山峡大柳树坝址区最大潜在地 震变形及地震应力模拟预测[J]. 西北地震学报,2007,29
 (4): 314-318.
- [22] 郭增建,秦保燕.震源物理[M].北京:地震出版社,1979.
- [23] 李善邦. 中国地震[M]. 北京: 地震出版社, 1981
- [24] 马瑾. 构造物理学概论[M]. 北京:地震出版, 1987.
- [25] Christensen N I, Mooney W D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view [J]. J. G. R., 1995 100(B7): 9761-9788