

1995 年永登地震黄土震陷变形 特征及其形成机理

陈永明¹, 石玉成², 徐晖平², 刘红玫²

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学系, 安徽 合肥 230026;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过对 1995 年永登地震形成的黄土震陷场地现场考察及震区震陷形成的地震动和黄土厚度条件, 用震区震陷试验曲线计算了震区试验震陷量. 并通过震区震陷黄土和未震陷黄土微结构对比分析, 探讨了黄土震陷形成的机理. 结果表明, 震区试验计算的震陷量略小于实际地震震陷量; 黄土震陷产生的机理为地震力剪切作用下孔隙结构破坏, 在重力和压力作用下振动质密所致.

主题词: 黄土; 震陷; 永登地震; 微结构

中图分类号: P315.9; TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)04-0465-06

0 引言

许多学者^[1, 2, 8]都对黄土震陷进行过试验研究, 取得了较为突出的成就. 但由于近期黄土地区大震较少, 适合震陷研究的实际震例也较少. 所以目前黄土震陷研究主要靠实验室方法, 现场研究开展较少. 对黄土震陷试验研究的内容主要集中在加载方式、加载强度及土试样的物理参数等因素对震陷系数的影响上, 而对土样震陷前后的微结构变化和震陷形成的物理机理研究不够. 本文通过对 1995 年永登地震黄土震陷场地的现场研究, 论述了震区黄土震陷形成的特征, 并逐步探讨了黄土震陷形成的物理机理.

1 永登地震及黄土震陷灾害

1.1 永登地震

1995 年 7 月 22 日 06 时 44 分在甘肃省永登县七山乡发生了一次 $M_s 5.8$ 地震, 微观震中为 103°E , 36.5°N , 震源深度 10 km. 极震区呈椭圆形, 长轴走向 $N70^\circ\text{W}$, 长半轴 6.6 km, 短半轴 2.9 km, 面积 56 km^2 , 烈度为 VIII 度. VII 度区长半轴 12.4 km, 短半轴 7.5 km, 面积 222 km^2 ; VI 度区长半轴 21.8 km, 短半轴 18.4 km, 面积 $1\,300\text{ km}^2$ (图 1).^①

收稿日期: 2000-03-21

基金项目: 地震科学联合基金资助项目(199044); 兰州地震研究所青年基金资助项目(9913)

中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC 2000053

作者简介: 陈永明(1965—), 男(汉族), 甘肃涇川人, 工程师, 主要从事黄土动力学及地震灾害预测研究.

① 1995 年 7 月 22 日永登 5.8 级地震考察报告. 兰州地震研究所. 1995.

1.2 震区地质地貌环境及震陷特征

地震区位于陇中黄土高原和祁连山地的交接地带,属祁连山褶皱系中祁连隆起带东段.震区大部分地方被黄土覆盖,黄土梁、峁上部为上更新统马兰黄土,厚数米到 30 m,下部为中更新统午城黄土,底部基岩为第三系和白垩系的砂岩,沟谷内为 Q₄ 黄土状土,厚 3~10 m.地震区内最高山峰海拔为 2 447 m,最低的沟谷海拔为 1 880 m,相对高差达 567 m.一般山谷相对高差 200~300 m,山坡坡度多为 25°~50°,属于强烈上升剥蚀构造地形,植被条件较差.

在震区的Ⅷ度区内,许多黄土山梁被震酥,地裂缝广泛存在,有的裂缝宽达 15 cm.并普遍存在黄土震陷,震陷量为 20~40 cm,且有地面破坏越严重的地方,震陷量越大的特征.在地面破坏最强的疙瘩沟东南的山梁上震陷量最大,达 40 cm.考察表明,震区发生震陷的山梁均为厚层风成 Q₃ 马兰黄土,但处于沟谷中的薄层 Q₄ 冲洪积次生黄土中未产生黄土震陷.

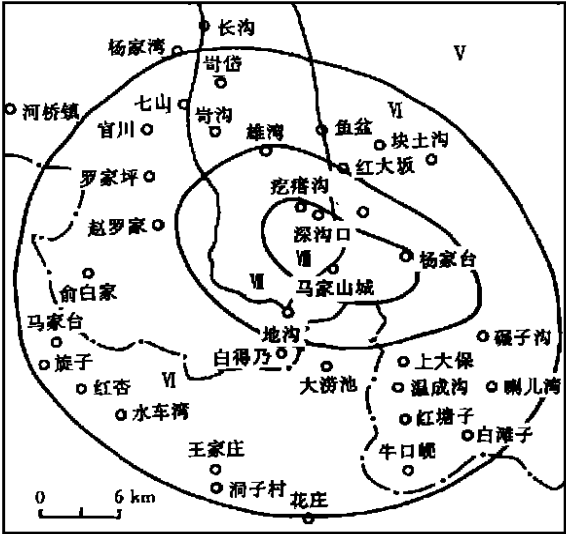


图 1 永登 5.8 级地震烈度分布
Fig. 1 Distribution of intensity of the Yongdeng earthquake.

2 地震震陷量与试验计算震陷量的对比

2.1 震中区地面峰值加速度估算

2.1.1 经验公式估算法

关于烈度和加速度的统计经验公式较多,不同公式所得结果离散性较大,结合本地区的情况,现采用以下公式对峰值加速度进行估算.

$$\lg(a) = 0.330I - 0.500 \text{ (Gutenberg \& Richter)}$$

推算结果: $PGA = 0.138\text{gal}$

$$\lg(a) = 0.301I - 0.187 \text{ (麦德维捷夫 C. B.)}$$

推算结果: $PGA = 0.166\text{gal}$

$$\lg(a) = 3.09 + 0.347M - 2.011\lg(\Delta + 25) \text{ (Esteva)}$$

推算结果: $PGA = 0.103\text{gal}$

2.1.2 根据土墙破坏情况估算

根据陈丙午等人(1987)对甘肃省土墙承重平房抗震试验结果,震中区疙瘩沟村房屋大都属于土坯墙单坡顶平房,该种类型的房屋在遭到 0.118gal 荷载袭击时即倒塌,由于模拟荷载采用的是正弦加载方式,可能会低估房屋的抗震能力^①.估计房屋倒塌所需的地震荷载应该在 0.12~0.14gal 之间.

2.1.3 根据疙瘩沟村滑坡体破坏情况推算

1995 年永登 5.8 级地震曾造成大量滑坡,疙瘩沟村滑坡造成了人员伤亡.该滑坡体规模

① 甘肃省农村民房抗震研究组.甘肃省农村民房抗震研究综合研究报告.1985.

不大, 坡体高 18 m 左右, 根据现场推测滑坡前的坡脚大致在 36° 左右, 滑动以后滑坡面的坡角为 47° . 山体坡脚地带挖过 2 个比较大的洞穴(羊圈), 削弱了土体的支撑力, 地震前当地曾下过暴雨, 这些都对滑坡的稳定性产生了不利影响. 综合考虑各方面的因素, 对滑坡的触发地震荷载进行反演计算, 当输入加速度为 0.12gal 时, 滑坡安全系数 $K=1$. 也就是说, 极震区的地面运动峰值加速度应不低于 0.12gal.

2.1.4 根据贮仓的抗震性能进行估算

疙瘩沟村有一些小型的圆筒形贮囤, 平时用于贮存粮食, 主要以当地黄土加掺合料(麦草)砌筑而成, 高 2.1 m, 外径 1.0~1.15 m, 壁厚 18~20 m, 内衬不到 1.0 cm 厚的薄层水泥. 地震时, 有一个产生了比较大的裂缝, 另外一个完好无损. 对贮囤的抗震性能进行反演计算, 结果表明, 贮囤墙体所能抵御的地震荷载范围大致在 0.15~0.18gal.

根据以上 4 个方面的分析, 认为 1995 年永登 5.8 级地震震中区地面峰值加速度大致为 0.15~0.16gal.

2.2 山体运动最大加速度计算

根据地面峰值加速度(取值 0.155gal)反演基岩面峰值加速度, 本场地黄土覆盖层厚度为 5 m, 反演计算结果为: 基岩面峰值加速度为 0.10gal.

采用二维有限元分析方法对 1995 年永登 5.8 级地震中位于震中附近的一黄土梁山体进行场地地震反应分析(图 2). 首先, 建立二维计算模型, 模型的底部边界取至下卧基岩处, 并假定为刚性边界, 侧向为人工边界. 为了考虑黄土的非线性特征, 采用等效线性化方法, 计算中所需岩土参数, 如密度、剪切波速等均通过现场实测和室内试验获得. 输入地震波采用文县强震记录(基岩)和根据兰州市地震危险性分析结果人工拟合的地震波, 可推算出梁顶震陷处地震加速度分别为 0.254gal 和 0.225gal.

2.3 震区黄土震陷量及其与实验计算结果的对比

文献[9]对震区黄土进行了实验研究. 试验结果表明, 震区黄土的动弹性模量随动应变的增大而减少; 阻尼比随动应变的增大而增大. 震区黄土含水量低, 密度较小, 孔隙比都大于 1; 初始动弹性模量较小, 在 51.33~69.5 MPa 之间, 平均为 62.91 MPa, 即震区黄土的结构疏松, 抗震性能较差.

图 3 是震区及兰州几个土样的震陷曲线^[9], 由图可以看出, 在动应力等于 100 kPa, 震区 3 组土样产生的残余变形在 0.78%~2.75% 之间. 由于震区在地震时正逢雨季, 地震前和地震时均在下雨, 而实验中所用土样是旱季所采. 为了使土样接近当时情况, 由图中可见, 把土样含水量由 4.53% 增到 12.0% 时, 震陷急剧增长. 文献[9]并以增湿后的震陷曲线, VIII 度时取地面峰值加速度为 353 gal, 计算了震区 20 m 厚度黄土的震陷量为 26.8 cm.

由于震区黄土厚度变化较大, 如前所述, 我们推算的疙瘩沟村山梁上震陷发生处的地面峰值加速度为 225~250 gal, 此处山梁上黄土厚度约为 25 m, 实际震陷量为 38 cm. 如用震区未湿化的永₃ 震陷曲线和黄土震陷试验分析计算预测方法^[2,10], 计算得到震陷量为 15.3 cm. 采用湿化后的永₁^井的震陷曲线, 计算得到的震陷量为 29.6 cm. 可见该处地震震陷量和试验计算

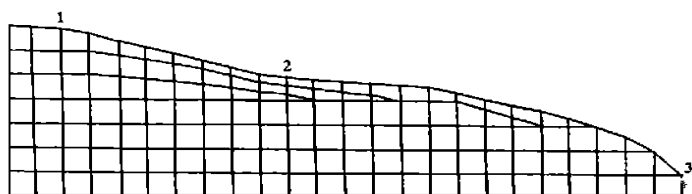


图 2 永登地震震陷黄土山梁黄土二维有限元剖面

Fig. 2 2-D finite element profile of loess ridge of the Yongdeng earthquake.

结果有一定差异.

作者认为产生这个差异的原因主要有:

- (1) 柴沟土样可能与疙瘩沟土样存在震陷差异.
- (2) 黄土山梁在地震作用下, 黄土震陷后, 在重力和动荷载作用下向山梁两侧有扩充作用, 加大了梁顶黄土的沉陷量.
- (3) 实验室和现场的试样边界条件及模拟中存在差异而引起.

3 震陷前后黄土的现场差异

如前所述, 震区震陷黄土主要为 Q_3^2 风成黄土, 为了探讨震陷前后黄土的现场差异, 我们在远离震区约 7 km 的鱼盆村另一与其相似的未震陷 Q_3^2 风成黄土山梁上做了对比研究.

3.1 土样的宏观及微观差异

开挖的探井表明, 震陷黄土在深达 3.0 m 处, 至今仍可以看到差异性震陷形成的裂隙面. 开挖也明显能感觉到黄土的结构性破坏至今还未完全恢复. 而未震陷黄土结构性强, 除直节理外无裂隙面.

但室内微结构分析及照片表明(图 4), 研究区黄土均具架空孔隙结构, 含水量 10% 左右. 震陷后孔隙分布产生了较大的变化(图 5), 中孔隙(半径 0.016 ~ 0.004 mm)含水量明显减少, 小孔隙(半径 0.004 ~ 0.001 mm)和微孔隙(半径 < 0.001 mm)含量明显增加, 大孔隙(半径 > 0.016 mm)含量也明显减少.

3.2 剪切波速的差异

表 1 是永登震区不同场地剪切波速测试结果, 从表中可见, 震陷后同类黄土剪切波速略低于未震陷黄土. 震区内次生黄土剪切波速远高于风成黄土, 可能厚度小, 剪切波速高(强度大)

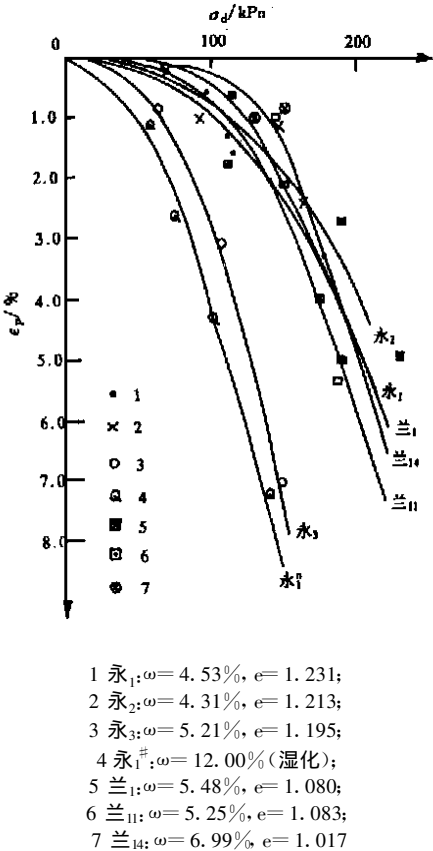


图 3 永登黄土震陷曲线
Fig. 3 Relationship of σ_d versus ϵ_p of Yongdeng.

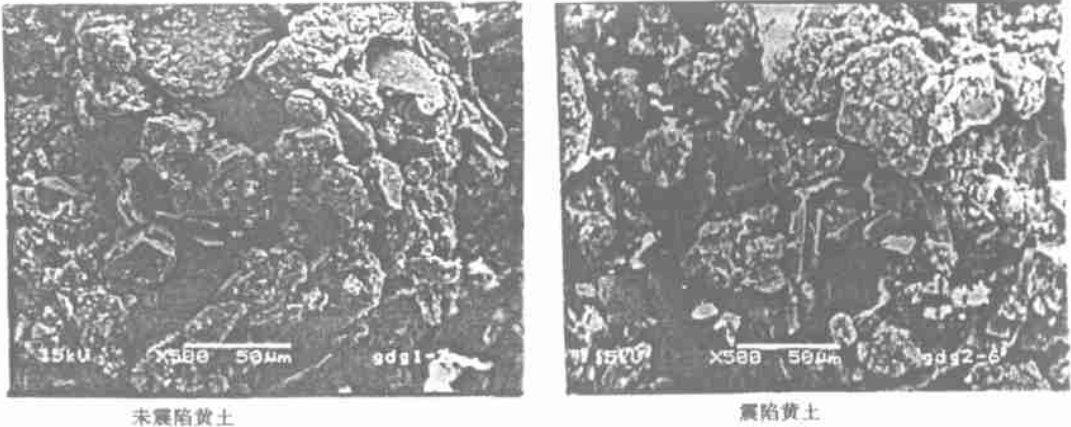


图 4 永登黄土震陷前后微结构
Fig. 4 Microtexture of undisturbed loess and seismic loess.

是次生黄土不发生震陷的原因。

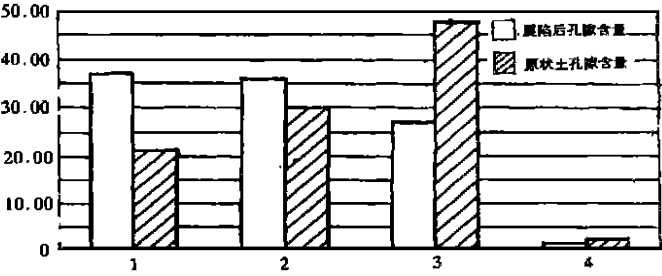
3.3 震陷黄土山梁上的地脉动特征

疙瘩沟震陷山梁上地脉动测试结果表明, 从梁顶向下到山梁鞍部, 再向下到自由地面, 有地脉动主频率逐渐变大, 振幅逐渐变小的特点。梁顶与地面的主频率比为 0.67, 而震幅比达 1.8~1.9。这对一个高仅为 25 m 的小山梁来说, 脉动的变化量是很大的, 除地形及土层影响外, 可能与山梁震陷破碎有关。

由上可见, 永登疙瘩沟震陷黄土在震后 4 年之后仍未恢复强度。文献[8] 指出, 黄土震陷后不等于其强度完全丧失, 震陷后的黄土地基在经过一定时间仍能达到新的稳定, 稳定程度取决于应力状态。可见对于地基土, 由于压力较大, 可能在较短时间就能有新的强度产生。而对于天然黄土场地(特别是干旱、半干旱地区), 震陷后黄土要达到新的稳定还需一个较长的时段。

4 永登地震黄土震陷的物理机理

黄土是由固体颗粒、水、空气组成的三相松散体系, 其中的土颗粒以粉土颗粒为主。黄土的孔隙比为 0.6~1.8, 在西北地区一般为 0.7~1.8, 水和空气存在于空隙中。由于理论等粒径球体堆放的最大孔隙比为 0.91, 最小孔隙比为 0.35。黄土的粒径级配显然大大优于等粒径球体, 因此可以肯定地说, 黄土中存在大量的空隙。研究表明^[3], 黄土中的颗粒以粒径大于 0.01 mm 者居多, 约占 70%~75%; 这部分颗粒起骨架作用, 称为骨架质。粒径小于 0.002 mm 颗粒约占 10~15%, 起胶结作用, 称为粘结质。粒径在 0.002 mm 到 0.001 mm 之间的颗粒填充在大颗粒之间, 称为填充质。骨架质由粘结质粘结在一起, 形成黄土骨架。扫描电子显微镜观察表明^[7], 黄土中的颗粒多呈棱角状, 颗粒间以点式接触为主, 接触面积较小、粒间空隙较大, 呈多孔性的松散结构。黄土中的孔隙大体上有 3 类, 即大孔隙、架空孔隙及粒间孔隙。大孔隙是人眼可见的, 多呈管状, 主要是由土中的生物活动所造成。架空孔隙是由一定数量的骨架颗粒松散堆积而形成的, 孔径远比构成空隙的骨架颗粒的粒径为大(图 6)。粒间孔隙是指颗粒在平面排列成犬牙状交错, 在空间上呈镶嵌排列所构成的粒间缝隙, 这种孔隙比其周围的粒径小。在西北地区, 后 2 种孔隙是土体孔隙的主体部分。



1 微孔隙(半径小于 0.001 mm); 2 小孔隙(半径 0.001~0.004 mm);
3 中孔隙(半径为 0.004~0.006 mm); 4 大孔隙(半径大于 0.016 mm)

图 5 震陷前后黄土孔隙分布直方图

Fig. 1 Voids distribution of undisturbed loess and seismic subsided loess.

表 1 永登震区不同场地剪切波速测试结果

测试地点	黄土类型	测试范围(m)	波速范围(V_s)(m/s)	(V_s)(m/s)	备注
鱼盆村观音社	Q_4 次生黄土	0—2.3	177—191	182	未震陷
疙瘩沟山梁	Q_3^2 风成黄土	0—3.0	143—162	152	震陷
鱼盆村山梁上	Q_3^2 风成黄土	0—3.0	145—170	163	未震陷
		0—5.0	152—176	165	

对于黄土震陷机理, 不少学者^[2,8] 都进行了研究。由于黄土主要由土颗粒和孔隙组成, 而土颗粒本身刚度很大, 相对来说是很难产生变形的, 所以黄土震陷变形主要是黄土中孔隙度的相对变化。由于强震陷性黄土均具架空孔隙结构, 在这种结构中, 土体中以中孔隙占主导地

位.可见黄土震陷的产生是有条件的,即具有粒状架空接触结构的黄土,其内部存在着许多架空孔隙(中孔隙),由于骨架颗粒的传力刚度好,加之颗粒之间以点接触形式为主,连结强度低.这种结构即使土样受到均匀力的作用,土骨架中的应力都非均匀分布.故在静力作用下也会由于土的物理状态的改变而引起部分架空空隙破坏.在动荷载下,黄土的变形方式与静力状态下不同,由于土的物理状态和应力状态的共同改变,震陷变形表现为体积变形和剪切变形两部分.随着动荷载的加大,黄土中的架空孔隙结构在剪应力作用下破坏,土体在重力和压力作用下振动变得致密,使黄土的空隙率变小,体积缩小,而产生残余变形.特别是黄土在增加湿度后,降低了土颗粒之间的胶结作用和摩擦强度,从而在相同动应力作用下,增强土的震陷性.

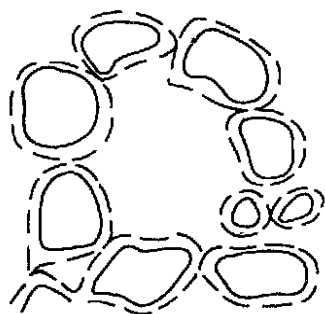


图 6 黄土的架空孔隙

Fig. 6 Formation of void of loess.

如前所述,震区变形及未变形黄土的显微结构分析结果及增湿后黄震陷性增强的实验结果都说明了产生黄土震陷的这一机理是正确的.

5 结论

(1) 在永登地震Ⅷ度区内由厚层风成 Q_3^2 马兰黄土组成的山梁上普遍产生了黄土震陷,而沟谷中的薄层 Q_4 冲洪积黄土由于厚度小,波速大未产生震陷变形.

(2) 推算得出震区最大地面峰值加速度为 $0.15 \sim 0.16g$, 据此推算得到疙瘩沟村山梁上震陷处的地面峰值加速度为 $0.22 \sim 0.25g$, 由此根据试验曲线计算得到的震陷量略小于地震震陷量.

(3) 震陷黄土和非震陷黄土存在较大差异,虽然震陷后黄土孔隙结构发生了变化,架空孔隙减小,但波速降低,脉动主频率较小,振幅大,说明干旱、半干旱天然场地上的黄土震陷后强度也降低,要恢复新的强度仍需一个较长的时段.

(4) 黄土震陷产生的机理为地震力剪切作用下架空孔隙结构破坏,土体在重力和压力作用下,振动变得密而致.

本文是在王兰民研究员指导下完成的,特此致谢.

[参考文献]

- [1] 张振中, 王兰民. 城市黄土场地上的震陷灾害[A]. 见: 第四届全国土动力学学术会议论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 1994, 293—296.
- [2] 王兰民, 张振中. 地震时黄土震陷量的估算方法[J]. 自然灾害学报, 1993, 2(3): 85—94.
- [3] 朗煜华. 兰州市永登 5.8 级地震滑坡及其特征[J]. 甘肃科学, 1996, 8(增刊): 67—73.
- [4] 杨远来. 黄土湿陷机理的研究[J]. 中国科学(B 辑), 1988, 7: 756—766.
- [5] 苗天德, 王正贵. 考虑微结构失稳的湿陷性黄土变形机理[J]. 中国科学(B 辑), 1990, 1: 86—96.
- [6] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学(B 辑), 1980, 12: 1203—1208.
- [7] 何光, 朱鸿博. 黄土震陷研究[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(6): 99—103.
- [8] 王峻. 甘肃省永登地震区黄土的动力特性及其震害分析[J]. 西北地震学报, 1997, 19(增刊): 100—103.
- [9] 王峻, 王兰民, 李兰. 黄土地震震陷量的试验预测[J]. 西北地震学报, 1997, 19(2): 62—66.
- [10] 章在墉. 地震危险性分析及其应用[M]. 同济大学出版社 1996.

- [25] McNamara D E, Walter W R, Owens T J, Ammon C J. Upper mantle velocity Structure beneath the Tibetan Plateau from Pn travel time tomography[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B1): 493—505.
- [26] Sujoy Ghose, Michael W Hamburger. Three-dimensional velocity structure and earthquake locations beneath the northern Tien Shan of Kyrgyzstan, central Asian[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B2): 2725—2748.
- [27] Sri Widiyantoro, Rob van der Hilst. Mantle structure beneath Indonesia inferred from high-resolution tomographic imaging [J]. Geophys. J. Int., 1997, 130: 167—182.
- [28] 郑需要, 张先康. 地壳和上地幔三维速度与界面结构层析成像——理论部分[J]. 地震学报, 1998, 20(5): 473—480.
- [29] 张元生, 李清河, 徐果明. 联合利用走时与波形反演技术研究地壳三维速度结构(Ⅰ)——理论与方法[J]. 西北地震学报, 1998, 20(2): 8—15.
- [30] Hamen Bijwarrd, Wim Spakman, E Robert Engdahl. Closing the gap between regional and global travel time tomography[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 103(B12): 30055—30078.

BRIEF ANALYSIS ON STUDY DEVELOPMENT FOR THE TRAVEL TIME TOMOGRAPHY OF BODY WAVE IN CHINA REGION

LEI Jian-she

(Graduate School at Beijing, University of Science and Technology of China,
CAS, Beijing 100039, China)

Abstract: The author has discussed the present situation of travel time tomography of body wave in China region in details by dividing the region into the east and west parts. Some features of the three-dimension velocity structure in China have been summarized; the velocity image displays clearly the lateral heterogeneity in the crust and upper mantle, which persists down to 1 100 km deep; there is a correlation between the velocity image of the shallow part and the known geological features; there is also a correlation between the velocity image and seismicity; the lithosphere thickness and the crust thickness change, and so on. Finally, the features of tomography in the present researches in China and its possible development tendencies have been analyzed.

Key words: China; Seismic tomography; Body wave; Travel time

(上接 470 页)

DEFORMATION CHARACTERISTIC OF SEISMIC SUBSIDENCE AND ITS FORMATION MECHANISM OF LOESS OF THE YONGDENG EARTHQUAKE IN 1995

CHEN Yong-ming¹, SHI Yu-cheng², XU Hui-ping², LIU Hong-mei²

(1. Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Firstly, the loess site of seismic subsidence of the Yongdeng earthquake in 1995 is investigated, and based on the PGA and the loess's thickness of the site, the value of loess seismic subsidence is calculated by using the relationship of σ_d versus ϵ_p of the earthquake site. Secondly, the formation mechanism of loessial seismic subsidence is studied by comparing the microtexture of undisturbed loess with the seismic subsided one. The result shows that the value of loessial seismic subsidence calculated using the test curve is smaller than the value of seismic subsidence caused by the earthquake. When exposed to dynamic stress, the void structure of loess will be destroyed by shear stress and become denser under the gravity force. This is the mechanism of loessial seismic subsidence.

Key words: Loess; Subsidence; Micro structure; Yongdeng earthquake