

活动断层、地震灾害与减灾对策问题¹

徐锡伟

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要 本文在对活动断层的定义和相关概念的论述基础上, 通过活动断层与地震灾害间空间分布上的相关性分析, 以及海原断裂带松山和阿尔金断裂带阿克塞老城西等地点的探槽地质剖面的介绍等, 揭示出活动断层近地表永久性地质变形的局部化特征, 永久变形带宽度一般小于 30m。文章最后介绍了美国加州地震断层划定法案的主要内容和活动断层填图计划作为积极有效减灾的一项公益性对策, 指出中国大陆地区应有步骤地开展大比例尺活动断层填图来有效地减轻可能遭遇的地震灾害。

关键词: 活动断层 地震灾害 地质变形 减灾对策

1 活动断层相关概念

鉴于活动断层在重大工程场地、核电站选址和城市生命线工程的安全性评估等方面的重要性, 加上与第四纪环境和地震、地质灾害在成因上和空间上的相关性, 中外学者给予了各不相同的定义。考虑到中国大陆地壳的构造变动强烈, 第四纪断层众多, 同时又能满足各级工程地震安全性评价和地震危险性评估的适用性和有效性, “活动断层”指距今 10 万年以来活动过, 现今正在活动, 并在未来一定时期内仍有可能活动的断层(徐煜坚, 1982; 邓起东, 1991; 徐锡伟等, 2002; 中国地震局, 2005)。曾发生和可能再发生中强以上地震的活动断层称为地震活动断层(徐锡伟等, 2002; 中国地震局, 2005)。“与活动断层概念相关的近义词包括地震断层, 发震断层, 新生断层, 能动断层, 全新世断层, 晚更新世断层, 中更新世断层和第四纪断层等。

地震断层 地震时发生破裂或错动形成的断层, 它们是先存断层再次粘滑错动在地表的反映, 或者是在一定的区域应力场作用下伴随着地震的发生而形成的新生断层(丁国瑜, 1982; 邓起东, 1982; 李起彤, 1991; Scholz, 1990; 徐锡伟、何昌荣, 1996; 国家质量技术监督局, 2001)。

发震断层 在空间上控制地震发生的, 或有历史地震地表破裂的, 或存在古地震遗迹的活动断层。一般指能产生震级大于或等于 5 级地震的活动断层(中国地震局, 2005)。

1 国家发改委发改投资城市活断层试验探测项目(2004—1138)资助成果

[收稿日期] 2006-01-09

[作者简介] 徐锡伟, 男, 生于 1962 年。1989 年获国家地震局地质研究所(中国科技大学研究生院)构造地质学博士。中国地震局地质研究所研究员, 博士生导师。主要从事活动构造学、地震地质学和地震灾害学研究工作。

E-Mail: xiweixu@vip.sina.com

新生断层 由于块体的转动或构造应力场的变化，某一地震的震源错动及其地表破裂明显地偏离、甚至切割先存断层，这样的地震地表破裂或地震断层称之为新生断层。其最明显的一个构造特征是震源的错动与先存断层无关，地震的发生对应于岩石力学实验中完整岩石的破裂。新生断层形成的典型例子是 1973 年的辽宁海城地震和 1912 年的南冰岛地震。前者形成了与北北东向主干活动断裂斜交的一条北西向新生断层，长约 5km，最大左旋水平位移仅 55cm，主震前的小震（前震）活动特征类似于完整岩石破裂前的声发射序列特征（徐锡伟、何昌荣，1996）；后者在没有先存断层的现代玄武岩覆盖区形成了长不足 1km、近南北向展布的雁状排列的地裂缝带（Scholz, 1990）。

能动断层 是由美国原子能委员会根据核电站选址的需要而提出来的一个与活动断层相关的概念，即不久的将来可能活动的断层谓之能动断层。

全新世断层 距今 10 000a 以来在地表或近地表发生过位移的活动断层（中国地震局，2005）。

晚更新世断层 距今 10000a—120000a 期间在地表或近地表发生过位移、断错了晚更新世地层或地质、地貌单元的活动断层。

中更新世断层 断错中更新世地层或地质、地貌单元，被全新统至上更新统覆盖的断层。

第四纪断层 距今 2.4Ma 以来活动过的断层。

按力学或运动学性质可把“活动断层”或“地震断层”划分成正断层、走滑断层、逆断层等 3 种基本类型（图 1）。活动断层在某种意义上等于潜在突发性地震灾害源或无震蠕滑地质灾害源。

2 活动断层与地震灾害实例

大量历史震例表明，巨大的地震灾害主要是由地下活动断层突然快速错动导致的直下型地震引起的。活动断层不仅是产生地震的根源，而且地震时沿断层线的破坏最为严重，人员伤亡也明显地大于断层两侧的其他区域；7 级以上地震往往造成地表数米的错动，目前的抗震设防措施还难以阻止数米同震地表错动对地面设施的直接毁坏，沿活动断层形成毁灭性灾害带。例如，1995 年日本阪神地震、1999 年土耳其伊兹米特地震、1999 年台湾集集地震等的重灾带都集中在它们各自的发震断层沿线及其附近地带，而远离发震活断层其灾害损失迅速减轻。以下震例资料直观地反映地震震害与发震活动断层在空间上的密切关系。

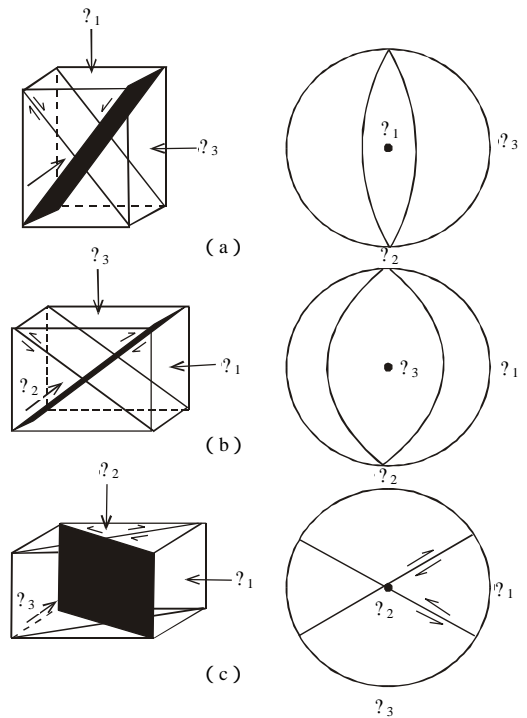


图 1 活动断层类型及其应力—应变状态示意图

(a) 正断层；(b) 逆断层；(c) 走滑断层

Fig. 1 Diagram showing classification of active faults and their associated strained states

(a) Normal fault; (b) Reverse fault; (c) Strike-slip fault

2.1 1995 年日本阪神地震

日本是多地震灾害的国家之一，地面建筑物，特别是高层建筑物大都按较高的抗震设计标准设计，具有相当高的抗震能力。1995 年日本阪神地震仍造成 6418 人死亡，直接经济损失超过 1000 亿美元。据 1995 年 3 月日本朝日新闻社报道，地震重灾带集中在野岛—会下山—西宫断层沿线，90% 以上的震亡人数和木质房屋倒塌率 30% 以上的地段均集中在距断层 2—3km 宽度范围内（翠川三郎，1995）。在野岛小仓村附近现今地震遗迹天然保存馆所在位置，地震地表破裂带（地震活动断层）穿过处围墙、道路等地面建筑设施被撕裂，而附近不在地震活动断层上的建筑物、围墙基本完好（图 2）。震中附近的神户海洋气象台记录到的最大峰值加速度达 0.818gal。

2.2 1999 年土耳其伊兹米特地震

土耳其历史地震灾害频繁，房屋建筑结构按照较高的抗震设防标准进行设计，具有相当高的抗震能力。1999 年土耳其伊兹米特地震死亡人数 18000 余人，直接经济损失 200 亿美元。地震重灾带集中在北安那托里亚断层西段的北分支上，沿这一发震断层形成了长达 180km 的地震地表破裂带，最大水平位移 5m，垂直错动约 1m，最大地表破裂带宽度 57m，跨越发震活动断层的建筑物全部倒塌。例如，位于地震断层上的某一座两层小学教学楼地震期间全部倒塌，而距地震断层几十米的其它建筑遭受破坏程度明显要轻（图 3）。

2.3 1999 年台湾集集地震

台湾地区位于太平洋、菲律宾海和欧亚等板块的交接复合地带，是多地震灾害的地区，其建筑设计规范参照了日本的有关做法，提高了房屋的抗震设防标准。尽管如此，1999 年集集地震仍造成 2375 人死亡，财产损失达 104 亿美元。这次地震重灾带集中在其发震活断层——车笼埔断层带



图 2 1995 年日本阪神地震断层地表破裂带
小仓断错点地面建筑设施破坏实例

Fig. 2 Example for destroyed construction along the
1995 Kobe earthquake surface rupture zone, Japan



图 3 土耳其伊兹米特地震地表破裂带（地震断层）
与地面建筑物破坏实例

（一座位于地震断层上的两层小学教学楼完全倒塌）

Fig. 3 Example for destroyed construction (two-floor building)
along the 1999 Izmit earthquake surface rupture zone, Turkey

上,长 105 余公里。沿车笼埔断层带两侧十几米宽的范围内几乎所有建筑物均夷为平地,水坝坝体开裂,而十几米以外的建筑物破坏明显减轻或基本完好。据台湾强震台网记录到的集集地震大量近断层强地面运动资料,发震断层附近的最大峰值加速度达 $1g$ (相当于 IX 度以上地震烈度),向两侧不对称地迅速衰减,在离开断层约 3km 的台站记录到的峰值加速度已下降到 $0.3g$ (相当于 VII 度略强的地震烈度)(图 4 和 5)。其中,车笼埔断层带东侧(逆断层上盘)量值较西侧下盘要高,且衰减率要慢。因此,车笼埔断层的同震错动控制了地震灾害最严重带的空间分布。

从以上破坏性地震震例可以看出,发震活动断层的地表迹线决定了严重震灾带的空间分布特征。对地面建筑物破坏最严重、且几乎是难以抗拒的因素是活动断层的同震地表错动对建、构筑物的直接毁坏,尤其是位于活动断层上的重要生命线工程、公共建筑、居民住宅区和油气罐站等易产生次生灾害的设施,尽管目前的抗震设防措施可以提高它们的抗震能力,但还无法抵御活动断层错动所产生的直接破坏。在美国、日本等西方发达国家以及我国的台湾地区,由于房屋建筑物和生命线工程等考虑了较高的抗震设计标准,地震时活动断层对重灾带的控制作用十分明显。这些实例还显示出,沿地震断层的这一重灾带不因局部场地条件的差异而发生本质变化,即地震重灾带空间分布在很大程度上取决于发震活动断层本身的几何结构特征(如次级断层的斜列、弯曲、不连续等)(徐锡伟等,2002)。除活动断层同震错动对建、构筑物的直接破坏外,地震断层同震错动产生的近断层强地面运动的影响也是加重震害的一个重要因素,近断层处的强地面运动远远大于远离断层的其它区域。

因此,如果能探明具有发震能力的活动断层的空间位置,并使重大工程、生命线工程、住宅区等重要建筑设施避开活动断层一定距离,不仅可以避免活动断层对地面建构物的直接破坏,而且受近断层强地面运动的影响也会明显降低,积极而有效地减轻地震造成的危害。

3 活动断层永久变形带宽度

活动断层“避让带宽度”问题是一个工程界关注和有效减轻地震灾害的科学问题(徐锡伟等,2002),多年来古地震研究表明,地表破裂型地震可以在活动断层独立破裂段上规则或不规则地不断重复发生(Crone 等,1992;Yeats 等,1996;Xu 和 Deng,1996),因此,活动断层“避让带宽度”问题本质上就是其近地表永久地质变形带的宽度问题。海原断裂带、阿尔金断裂带等是我国青藏高原东缘和北缘两条规模较大且活动性较强的走滑活动断裂带(冉勇康等,1997;徐锡伟等,2003),它们的古地震探槽剖面揭露的近地表永久变形带的宽度应该具有一定的代表性。

海原断裂带位于青藏高原东北缘(邓起东等,2002),由发生过 1920 年海原 8.5 级地震地表破裂的东段(狭义的海原断裂,国家地震局地质研究所等,1990),毛毛山—老虎山段(中段)和冷龙岭段(西段)等组成,全新世左旋走滑速率介于 $6\text{—}12\text{mm/a}$ 。毛毛山—老虎山段中部松山盆地南边界探槽地质剖面表明,经历过 8 次同震地表破裂的主形变带集中在探槽中部宽仅 3m 的范围,向两侧变形强度明显减弱,永久变形带宽约 9m (图 6)。海原断裂带东段发生过 1920 年海原 8.5 级地震地表破裂的高弯子三维探槽开挖也仅揭露出宽约 24m 的近地表永久地质变形带(冉勇康等,1997)。

阿尔金断裂带是青藏高原北缘的一条主干边界断裂带,据断错地貌研究可知,在其东部阿克塞附近的左旋滑动速率可达 $16\text{—}18\text{mm/a}$ (徐锡伟等,2003)。在阿克塞老城西跨一个拉

分盆地开挖的探槽长约 40m ,但有次级断层切割或明显永久地质变形的剖面长仅 13m(图 7) ,略宽于拉分盆地。

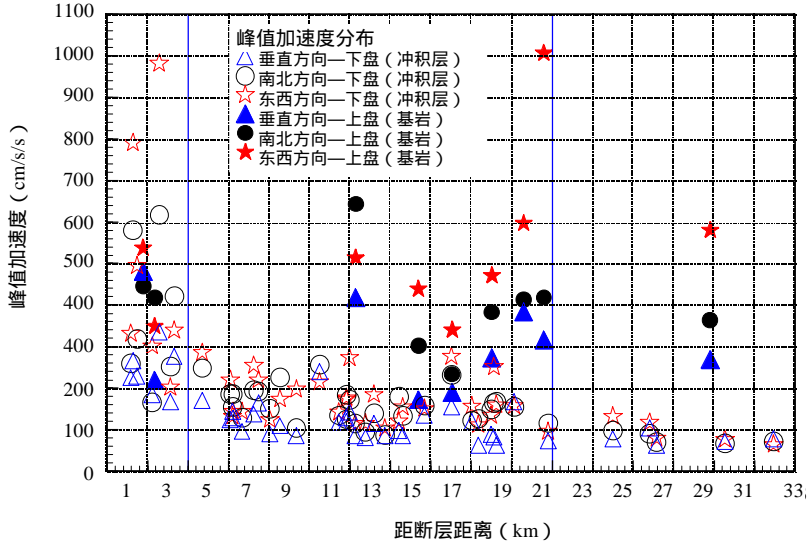


图 4 台湾集集地震近断层强地面运动峰值加速度随断层距离的变化

Fig. 4 PGA value (cm/s/s) vs distance to the fault (km) of the ground motion caused by the 1999 Jiji earthquake, Taiwan, China

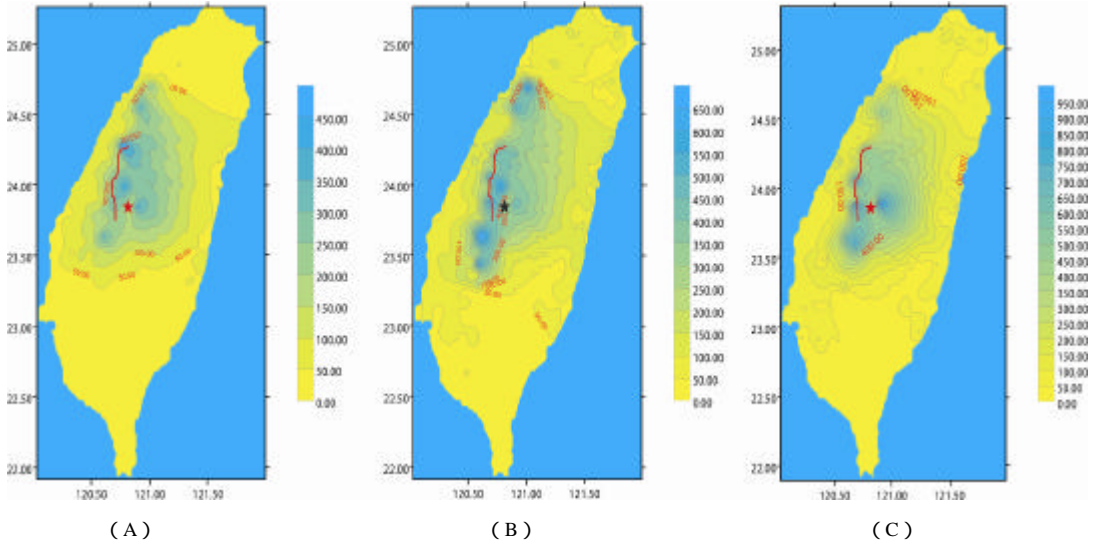


图 5 由 420 条强震记录台湾集集地震近断层峰值加速度等值线分布图

- (A) 垂直方向峰值加速度等值线图 (cm/s/s) ;
- (B) 南北方向峰值加速度等值线图 (cm/s/s) ;
- (C) 东西方向峰值加速度等值线图 (cm/s/s)

Fig. 5 Contour map of PGA near fault by the Jiji earthquake derived from strong ground motion recordings of 420 stations

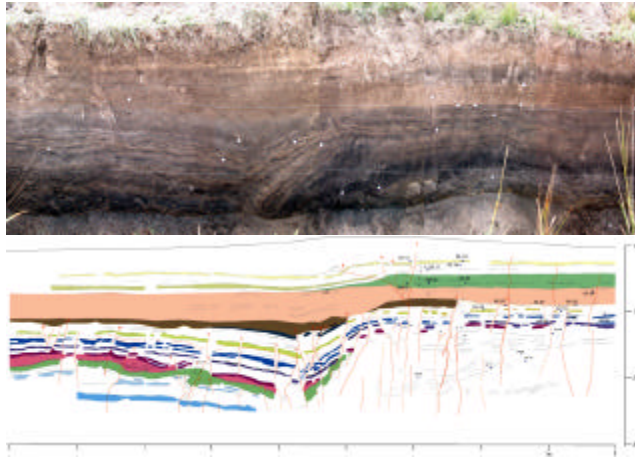


图 6 海原断裂带毛毛山—老虎山段松山拉分盆地南缘断层探槽东壁照片及其地质剖面记录
(不同颜色的层状物代表上第四系松散沉积层, 红色线条代表次级断层)

Fig. 6 Mosaic image showing the eastern wall of the trench crossing the southern fault of the Songshan pull-apart on the Maomaoshan—Laohushan segment of the Haiyuan fault zone (upper part) and its trench log (lower part)

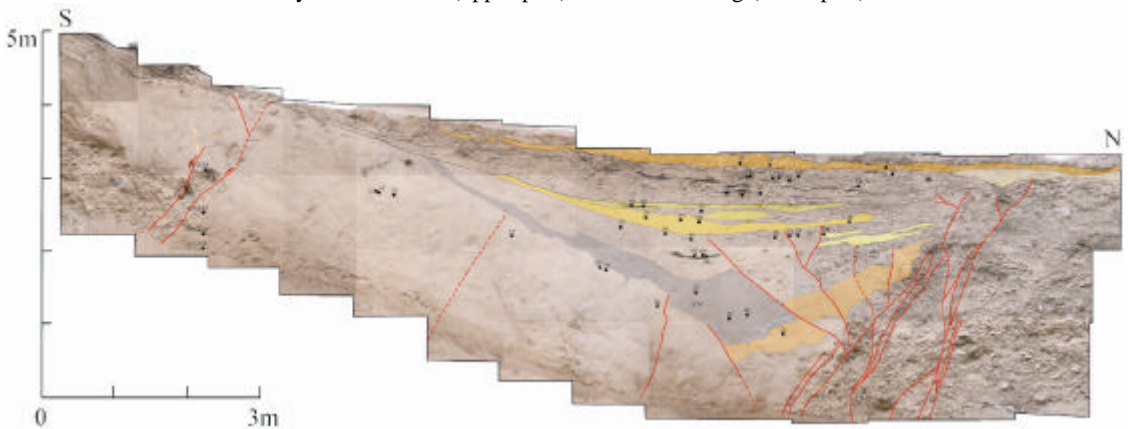


图 7 阿尔金断裂带东部阿克塞老城西跨某一小拉分盆地探槽西壁地质剖面记录
(底图为西壁照片, 不同颜色的层状物代表上第四系松散沉积层, 红色线条代表次级断层)

Fig. 7 Mosaic image showing the western wall of the trench crossing the a pull-apart on the the Altyn Tagh fault and its trench log west of old town of Aksay

因此, 跨海原断裂带和阿尔金断裂带的探槽剖面表明, 活动断层的永久地质变形带的宽度是有限的, 具有变形局部化的基本变形特征。据已有研究可知, 具有统计意义的活动断层永久变形带或避让带宽度为断层迹线两侧各 15m, 合计为 30m (徐锡伟等, 2002)。

4 活动断层防灾对策问题

美国十分重视活动断层相关减灾工作, 不仅建立严格的房屋抗震设计标准, 还建立了活动断层减灾的相关法律法规, 规范工程建设前期活动断层鉴定工作, 使新建地面建、筑作物“避开”活动断层, 免遭活动断层同震地表错动引起的直接破坏。1994 年美国北岭地震后,

加州州政府颁布了“地震断层划定法案”(Earthquake Fault Zoning Act), 主要目的是防止用于人类居住的房屋建筑在活动断层地表迹线之上; 法案的主要内容是: 州政府按一定程序公布已经查清的活动断层位置和数量, 若开发方案涵盖了已知活动断层, 在具体方案核准之前, 须委托地质专业技师进行详细的地质调查和活动性鉴定, 撰写调查技术报告; 若鉴定为活动断层, 则必须在活动断层两侧各避让 15m 才能够建供人居住的建筑物; 但独户木架结构或钢架结构不超过 2 层楼的住宅, 且不属于 4 个单位以上共同开发方案, 不受本法案限制。

除“地震断层划定法案”外, 作为国家或地方政府的减灾行为, 出台了一系列公益性项目, 对加州地区的活动断层进行 1:24000 比例尺分幅填图计划, 作为减轻活动断层相关灾害的一项基本对策, 目前已经完成了 547 条地表有出露的活动断层填图工作。前车之辙, 后车之鉴。根据国家经济建设的战略部署, 对我国大陆地区活动断层的大比例尺填图工作也应该作为政府减轻活动断层相关灾害的一项公益性计划, 按轻重缓急逐步开展。

参考文献

- 翠川三郎, 1995. 连锁灾害的发生机制与实态追踪. 科学朝日, 紧急增刊. 东京: 大和工业株式会社, 15—18.
- 丁国瑜, 1982. 中国内陆活动断裂基本特征的探讨, 《中国活动断裂》. 北京: 地震出版社 1—9.
- 邓起东, 1982. 中国的活动断裂, 《中国活动断裂》. 北京: 地震出版社, 19—27.
- 邓起东, 1991. 活动断裂研究的进展和方向, 《活动断裂研究》. 北京: 地震出版社, 1—6.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康等, 2002. 中国活动构造基本特征. 中国科学, D 辑, 32 (12): 1021-1-30.
- 国家质量技术监督局, 2001. 地震现场工作第三部分: 调查规范, 中华人民共和国国家标准. 北京: 中国标准出版社, 28.
- 李起彤, 1991. 活断层及其工程评价. 北京: 地震出版社, 169.
- 冉勇康, 段瑞涛, 邓起东等, 1997. 海原断裂高弯子地点三维探槽的开挖与古地震研究. 地震地质, 19 (2): 97—107.
- 徐煜坚, 1982. 论活动断裂, 《中国活动断裂》(中国地震学会地震地质专业委员会编). 北京: 地震出版社, 10—13.
- 徐锡伟, 何昌荣, 1996. 新生断层的形成及其前震活动性, 《活动断裂研究》(国家地震局地质研究所编). 北京: 地震出版社, 197—210.
- 徐锡伟, 于贵华, 马文涛等, 2002. 活断层地震地表破裂“避让带”宽度确定依据与方法. 地震地质, 24 (4): 470—483.
- 徐锡伟, P. Tapponnier, J. Van der Woerd 等, 2003. 阿尔金断裂带晚第四纪左旋走滑速率及其构造运动转换模式讨论. 中国科学, D 辑, 33 (10): 967—974.
- 中国地震局, 2005. 活动断层探测方法. 中华人民共和国地震行业标准 (DB/T 15—2005). 北京: 地震出版社, 13.
- Crone A.J., Haller K.M., 1991. Segmentation and seismic behaviour of basin and range normal faults: Examples from east central Idaho and southwestern Montana, USA. J. Struct. Geol., 13(2): 151-164.
- Scholz H.C., 1990. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge: Cambridge University Press, 73-96.
- Xu X. & Deng Q., 1996. Research on nonlinear paleoseismicity in China. J. Geophys. Res., 101(B3), 6209-6231.
- Yeats R.S., K. Sieh and C.R. Allen, 1997. The Geology of Earthquakes. New York: Oxford University Press, 568pp.

Active Faults, Associated Earthquake Disaster Distribution and Policy for Disaster Reduction

Xu Xiwei

(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, 100029)

Abstract Based on the definition of the active fault and its related concepts, we analyzed the spatial correlation between the active fault and its associated earthquake disaster distribution for the 1996 Kobe earthquake, 1999 Izmit earthquake and 1999 Jiji earthquake. Then we checked the permanent geologic deformation belts on the trench walls that cross the Maomaoshan-Laohushan segment of the Haiyuan fault at the Songshan pull-apart and the Altyn Tagh fault. From above discussion it is pointed out that the width of earthquake surface rupturing and the repeatedly faulting along an active fault is limited within 30m in general. After introducing the contents for Earthquake Fault Zoning Act, California, USA and its active fault mapping project as a positive public policy for disaster reduction, we point out that the active fault mapping project of the mainland China is also needed to carry out in order to reduce the earthquake disaster effectively.

Key words: Active fault; Earthquake disaster; Geologic deformation; Policy for disaster reduction