



中国城市活动断层探测丛书

主 编 徐锡伟
副主编 方盛明 丁志峰 冉勇康 杜 玮

活动断层地震灾害预测 方法与应用

徐锡伟 赵伯明 马胜利 等 ◆ 著
韩竹军 张黎明 于贵华

国家发展和改革委员会项目“城市活动断层试验探测”(2004-1138)资助出版
“我国地震重点监视防御区活动断层地震危险性评价”项目资助出版
“中国地震活动断层探索”项目资助出版

中国城市活动断层探测丛书

主 编 徐锡伟

副主编 方盛明 丁志峰 冉勇康 杜 玮

活动断层地震灾害预测方法与应用

徐锡伟 赵伯明 马胜利 等 著
韩竹军 张黎明 于贵华

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书汇集了活动断层基本概念,在简明扼要地叙述1995年阪神地震、1999年伊兹米特地震、1999年台湾南投集集地震、2001年昆仑山地震和2008年汶川地震地表破裂带呈带状分布的观测事实基础上,尝试性地利用历史地震地表破裂带宽度统计学方法和古地震探槽开挖获得的活动断层近地表永久性地质变形局部化基本特征等资料,给出了活动断层灾害避让带宽度确定的原则与方法,同时通过隐伏活动断层破裂扩展岩石力学实验和松散沉积物覆盖条件下地表强变形带宽度数值模拟方法对活动断层变形局部化特征进行了进一步验证,针对不同类型活动断层建立了震源物理模型的近断层强地面运动场计算理论体系与地震灾害预测方法,并给出了相应的应用实例示范。

本书可供地震地质、工程地震和地震工程有关大专院校师生、国土规划和防灾减灾等部门参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

活动断层地震灾害预测方法与应用/徐锡伟,赵伯明,马胜利,韩竹军,张黎明,于贵华等著. —北京:科学出版社,2011

(中国城市活动断层探测丛书/徐锡伟 主编)

ISBN 978-7-03-032515-0

I. 活… II. ①徐…②赵…③马…④韩…⑤张…⑥于… III. ①活动断层-地震灾害-地震预测-研究-中国 IV. ①P548.2②P315.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第205976号

责任编辑:谢洪源 沈晓晶/责任校对:张凤琴

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2011年10月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年10月第一次印刷 印张:20 1/4

印数:1—1 400 字数:452 000

定价:150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《中国城市活动断层探测丛书》编委会

主 编 徐锡伟

副主编 方盛明 丁志峰 冉勇康 杜 玮

编委会 (按汉语拼音排序)

包东健 柴炽章 陈宇坤

冯希杰 郭跃宏 郭玉贵

郭文生 韩竹军 火恩杰

胡 平 李炳乾 李自红

梁 干 马贵仁 闵 伟

沈 军 宋 权 苏 旭

田勤俭 王 彬 吴业彪

吴卫民 杨晓平 于贵华

袁道阳 张建国 张黎明

张新基 章振铨 赵国敏

本书主要作者

徐锡伟 赵伯明

马胜利 韩竹军

张黎明 于贵华

李永林 陈桂华

总 序

大地震是对城市破坏性最大、危害最严重的突发性自然灾害。如美国旧金山(1906)、哈萨克斯坦阿拉木图(1911)、日本东京(1923)、危地马拉南谟昆特拉(1976)和河北唐山(1976)均遭到过大地震的毁灭性破坏,这些城市在地震时顷刻间被夷为平地。1976年唐山地震死亡人数达24.2万人,成为20世纪地震人员伤亡之最。20世纪90年代以来,随着经济的高速发展、社会财富的迅猛增长和人口的高度集中,城市地震不但造成了大量的人员伤亡,而且经济损失也呈直线上升趋势,如美国洛杉矶北岭地震(1994)造成的直接经济损失达350亿美元;日本阪神地震(1995)使大阪和神户地区的地面建筑、公共交通设施等遭到了致命性的创伤,造成6400多人死亡,直接经济损失高达1000亿美元;土耳其伊兹米特地震(1999)造成18000多人死亡,直接经济损失达200亿美元;台湾集集地震(1999)造成2400多人死亡,直接经济损失达92亿美元。

巨大的城市地震灾害主要是由位于城市之下的活动断层突然快速错动所导致的直下型地震引起的。此外,城市附近活动断层导致的地震也可诱发城区活动断层的活动,加重断层线上建筑物的破坏和地面灾害。

大量的震例表明,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这样大的错动对人工地面设施的直接毁坏。例如1976年唐山地震震中区破坏殆尽的严重震灾带沿唐山5号断层这一发震断层分布;1995年日本阪神地震的重灾带集中在野岛—会下山—西宫断层沿线,据1995年3月日本朝日新闻报道,90%以上的震亡人数集中在沿断层2~3km的宽度范围内;1999年土耳其伊兹米特地震的重灾带集中在北安纳托利亚断层西段的北分支上,建在该断层上的建筑物基本上全部倒塌,而在两侧距断层仅几十米的建筑物主体结构的破坏则轻得多;1999年台湾集集地震也将建在车笼埔断层上及其两侧十几米范围内几乎所有建筑物夷为平地,包括一个坚固的地下军火库,而十几米以外的建筑物则基本完好;同样,汶川地震的重灾区带也主要沿龙门山推覆构造带中段的北川—映秀断裂和彭县—灌县断裂线状分布。

我国是一个活动断层广泛分布的国家,也是一个多地震的国家,地震活动频度高、震级大,地震灾害严重,20世纪我国因地震造成的死亡人数占全世界地震死亡人数的55%。在我国由各种自然灾害引起的死亡人数中,因地震造成的死亡人数亦占55%左右。历史上有许多大中城市,如北京、天津、西安、银川、唐山等均遭遇过强烈地震袭击。1900年以来,死亡人数在20万以上的城市地震就发生在我国(1976年唐山)。

我国有近二分之一的城市、近三分之二百万以上人口的大城市,包括22个省会城市均位于地震基本烈度Ⅶ度或Ⅶ度以上的高烈度区。更为严重的是,北京、上海、天

津、西安、深圳等数十个大中城市的城区范围内都已发现活动断层存在的迹象。

许多城市位于第四纪松散沉积物覆盖区，城市建筑环境复杂，断层在地表出露不明显。由于过去对活动断层的危害缺乏充分的认识，并受各种条件的限制，至今为止尚未能对城市活动断层的展布位置及其地震危险性做出清楚的了解，给城市的安全留下了严重的隐患。例如，在北京地区的一些活动断层上曾发生过 1679 年三河—平谷 8 级地震、1730 年颐和园 $6\frac{1}{2}$ 级地震、1057 年大兴 $6\frac{3}{4}$ 级地震等，它们都对北京城区造成了严重的破坏。20 世纪六七十年代的石油物探资料表明，北京市城区还存在良乡—前门—顺义断层、莲花池—西四断层和车公庄—德胜门断层等，1976 年唐山地震时，这些断层沿线的震害都明显加重，但这些断层的活动性尚不清楚，一旦活动引发直下型地震，其造成的人员伤亡和经济损失将不堪设想。

21 世纪是我国经济腾飞和西部大开发战略实施的重要时期。随着我国国民经济的快速增长，都市化进程的加快，人口和物质财富向城市的高度集中，许多大城市将面临着旧城改造，一批新城区将迅速崛起。城市中高层建筑、高架工程和生命线工程越来越多和越来越复杂，地震产生的破坏将愈加严重。通过开展活动断层的探测和评价，准确了解活动断层的分布和危害性，并采取有效措施，可以大大减轻地震灾害。

目前我国地震形势依然严峻，地震对城市的威胁不容忽视，开展大城市活动断层探测与地震危险性评价是减轻城市地震灾害的当务之急。通过开展大城市活动断层探测与地震危险性评价，使城市新建的重要设施、生命线工程、居民小区等尽可能地避开活动断层，对已建在活动断层上的重要建筑设施尽早采取防范措施，能有效地减轻城市地震损失，保障人民生命财产安全，保持社会稳定和经济建设可持续发展，实现国务院 1994 年提出的我国未来十年防震减灾目标。

受国家发展和改革委员会资助和地方政府的大力支持，中国地震局牵头组织实施了“城市活动断层探测与地震危险性评价”科学工程，计划用 10 年左右的时间分阶段对人口在 100 万以上、存在活动断层且地震危险性高的重要大城市进行活动断层探测。2004~2008 年期间已对包括北京、上海、天津等在内的 20 个大城市开展了活动断层探测，鉴定出了 26 条具有发震能力的地震活动断层，查明了这些活动断层准确的空间位置、规模、活动性和地震危险性，针对性地提出了活动断层危害的防范对策和工程措施。

该丛书是对上述探测成果的一个阶段总结，包括城市活动断层试验探测期间获得的活动断层鉴定、地震危险性评价和危害性分析等理论方法的重要进展和部分城市活动断层探测、鉴定及其地震危险性和危害性评价等方面的主要成果，可为相关城市在进行土地利用、地震应急预案和抗震设防标准制定等工作时参考，提高我国大城市抗御地震灾害的能力，提高我国地震预测预报和震害预防的科学技术水平，有效减轻地震灾害及其对社会经济的冲击和影响，保障社会稳定与人民生命财产安全，显著提高社会经济可持续发展能力；也可对相关城市的重要建筑设施、生命线工程合理地避让活动断层及其危害影响带提供科学依据，对于必须通过危害影响带的建筑设施采取针对性的防灾措施，降低地震造成的经济损失，对于已停止活动的断层的甄别，可合理地节省与其相关的大量建设资金；还可为目前正在开展的地市级城市活动断层探测提供借鉴、技术储备和实践经验。

本科学工程实施过程中得到了中国地震局局长陈建民、前局长宋瑞祥、副局长刘玉辰、赵和平、修济刚、阴朝民等，中国地震局发展与财务司司长牛之俊，震害防御司前司长卢寿德、前副司长任利生、副司长韦开波、处长李永林等的关心和支持；丁国瑜、马宗晋、滕吉文、石耀霖、邓起东、谢礼立等院士在项目实施和研究过程中给予了技术指导和帮助，在此一并表示衷心感谢。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '韦开波' (Wei Kai Bo), the Vice Director of the Development and Finance Division of the China Earthquake Administration.

2011年3月6日

前 言

地震是破坏力大、危害严重的突发性自然灾害，威胁着城市、乡镇、重大生命线工程的安全、人类社会的安定和经济社会的可持续发展。美国旧金山（1906）、哈萨克斯坦阿拉木图（1911）、日本东京（1923）、危地马拉南埃昆特拉（1976）和我国河北唐山（1976）均遭到过大地震的毁灭性破坏，这些城市在地震时顷刻间被夷为平地。自 20 世纪 90 年代以来，随着经济的高速发展、社会财富的迅猛增长和人口的高度集中，每一次破坏性地震均造成了大量的人员伤亡，经济损失也直线上升。例如，美国洛杉矶北岭地震（1994）造成的直接经济损失达 350 亿美元；日本阪神地震（1995）使大阪和神户地区的地面建筑、公共交通设施等遭到了致命性的创伤，直接经济损失高达 1000 亿美元；土耳其伊兹米特地震（1999）造成的直接经济损失达 200 亿美元；我国台湾南投集集地震（1999）造成的直接经济损失近百亿美元（徐锡伟等，1996b）；2008 年四川 5·12 汶川地震是新中国成立以来破坏性最强、影响范围最广、救灾难度最大的一次地震，据中国地震台网报道，5·12 汶川地震矩震级 $M_w=7.9$ ，面波震级 $M_s=8.0$ ，震源深度 14km，发生在青藏高原东南缘、南北地震带中南部龙门山推覆构造带中段的北川—映秀断裂和前山彭县—灌县断裂上，四川省汶川、北川和青川等县受到毁灭性打击，波及四川、甘肃、陕西、重庆等 10 个省区市 417 个县（市、区）、4667 个乡（镇）、48 810 个村庄，灾区总面积约 50 万 km^2 ，受灾群众 4625 万余人。截至 2008 年 9 月 28 日，因地震死亡 69 227 人，受伤 374 643 人，失踪 17 823 人，需要紧急转移安置受灾群众 1510 万人，房屋大量倒塌损坏，基础设施大面积损毁，工农业生产遭受重大损失，生态环境遭到严重破坏，直接经济损失超过 8451 亿元，由地震引发的崩塌、滑坡、泥石流、堰塞湖等次生灾害举世罕见（于贵华等，2009）。

大量的震例观测表明，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。沿活动断层的同震地表错动，以及地震波引起的振动效应是造成严重地震破坏的主要因素。野外考察表明（翠川三郎，1995；李自强等，2008；徐锡伟等，1996，2002，2008a，2008b；中国地震局赴土耳其地震现场考察专家组，2000；周庆等，2008；Xu et al.，2009a，2009b；Yeats et al.，1997），地震灾害具有沿发震断层呈狭窄的带状分布特征，宽度范围一般为 30 m；5·12 汶川地震同时使龙门山推覆构造带中央北川—映秀断裂和前山灌县—江油断裂等两条倾向北西的叠瓦状逆断层发生地表破裂。其中，北川—映秀断裂沿线映秀镇、龙门山镇、岳家山、高川乡、茶坪乡、曲山镇、南坝镇等地地震烈度达到 XI 度，

地震地表破裂带长约 240km, 以兼有右旋走滑分量的逆断层型破裂为主, 北川以北的最大垂直位移 (6.5 ± 0.5) m, 最大右旋走滑位移 4.9m; 北川以南以逆冲为主, 最大垂直位移 (6.2 ± 0.5) m。灌县—江油断裂沿线白鹿、金花、汉旺等地地震烈度达 X 度, 地震地表破裂带长约 72km, 为典型的逆断层型地表破裂, 最大垂直位移 3.5m。另外, 在上述两条地表破裂带西部还发育着一条北西向带有逆冲垂直分量的左旋走滑地表破裂带, 长约 6km (Xu et al., 2009a, 2009b; 徐锡伟等, 2010)。5·12 汶川地震不仅在地表产生了结构复杂的地表破裂带, 而且还引起了巨大的地震灾害 (李自强等, 2008; 徐锡伟, 2009): 极震区烈度达 XI 度, 包括以汶川县映秀镇和北川县曲山镇为中心, 沿地震地表破裂带展布的两条长条状条带, 长度分别为 97km 和 71km, 面积合计达 2580km²; 两个 XI 度条带内的地面建、构筑物遭到毁灭性破坏。X 度区面积略大于 XI 度区, 为 3650km², 短轴直径约为 23km, 长轴直径 224km (含 XI 度区), 震害严重, 但可见基本完好的建、构筑物, 一般在离地表破裂带出露处 1km 以外的区域震害明显减轻。此外, 由于汶川地震的发震断层为龙门山推覆构造带中央北川—映秀断裂和前山灌县—江油断裂, 它们均为兼有右旋走滑分量的逆断层, 发震断层上、下盘地表破裂或强变形存在着明显的差异, 地震灾害的上盘效应显著: 逆断层下盘变形量和次生破裂/裂缝较少, 偶见次级逆断层或挤压鼓包; 逆断层上盘近断层附近则发育大量张开状裂缝, 且大部分高烈度区位于地表破裂带上盘。野外测量表明, 包括主破裂和次生张裂缝在内, 汶川地震地表破裂带宽度较窄, 为 21~45m, 个别地段, 如白鹿中心学校园内仅 13m, 汶川地震地表破裂带具有变形局部化的基本特征 (徐锡伟等, 2008b; 周庆等, 2008; 于贵华等, 2009)。与此相对应, 地震断层同震错动对地面建、构筑物的毁坏带宽度也是有限的, 主要局限在地震地表破裂带宽度范围内, 横跨陡坎的建、构筑物几乎全部坍塌或遭到结构性损坏。在地震陡坎附近野外测量到的地面建、构筑物毁坏带宽度主要为 13~36m, 表现出地震地表破裂带的同震错动是无坚不摧的。其他地段的房屋破坏或者是由于地震动引起的, 或者是滑坡、泥石流、崩塌等次生灾害或房屋建设没有按照抗震设防标准、施工质量差等原因造成的 (徐锡伟, 2009)。因此, 在查明活动断层准确位置的基础上, 确定地表活动断层“避让带”, 是有效减轻地震灾害的重要手段 (徐锡伟等, 2002a)。

随着 20 世纪 90 年代后期一系列大地震的发生, 世界各国政府清楚地认识到活动断层在减轻地震灾害方面的重要性, 相继实施了与活动断层相关的减灾项目, 试图通过对有潜在发震危险的活动断层进行探测与调查, 进行地震危害性评价, 更科学合理地进行城乡国土规划和抗震设防, 减轻可能遭遇的地震灾害损失。加利福尼亚州 (简称加州) 是美国地震灾害最严重的州, 也是全世界地震灾害严重的地区之一, 更是以立法的形式落实减轻与活动断层相关地震灾害的典范。早在 1971 年 San Fernando 地震期间, 美国科学家与政府官员就注意到了活动断层地表同震错动产生的地震灾害呈带状分布的现象, 1972 年加州政府通过了针对地震断层的“特别调查带” (Special Studies Zones); 1994 年加州洛杉矶北岭地震后, 美国加州政府将“特别调查带”修订为“地震断层划定法案” (Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act), 旨在通过避让“具有发震能力

的活动断层”达到减轻地震灾害的目的。作为这一法案的配套措施，在加州分区、分阶段地开展活动断层大比例尺填图计划，目前已经完成了 547 条活动断层的 1:25 000 比例尺条带状填图工作，涉及 36 个县和 104 个市，防止用于人类居住的房屋建筑在活动断层之上；1999 年 10 月加州赫克托迈发生 7.1 级地震后，为了更准确地勾绘出洛杉矶地区的活动断层分布图，又在 93 个不同地点实施了人工地震探测，以确定未来可能威胁到洛杉矶市直下型地震的震源位置，实施 LARSE 计划，并通过开展“千个古地震探槽开挖计划”，结合活动断层填图获得的各种定量参数、跨断层形变监测数据和现今地震活性等资料，美国加州地震概率工作组建立了可实时更新的加州大地震发生概率综合预测模型，对加州地区不同活动断层进行破坏性地震发震概率预测。同时，于 1997 年正式颁布了基于活动断层分布基础上的“地震灾害制图法案”（Seismic Hazards Mapping Act），通过模型计算科学地确定不同地区工程地震动设计参数，预测砂土液化、滑坡、泥石流等次生地质灾害来合理地减轻建、构筑物可能遭遇的地震动破坏。

我国是一个多地震的国家，活动断层广泛分布，地震活动频度高、震级大，地震灾害严重。20 世纪全世界 1/3 大陆地震发生在我国，20 世纪我国因地震死亡人数占全世界地震死亡人数的 55%。历史上有许多大中城市，如北京、天津、西安、银川、唐山，以及许多乡镇均遭遇过强烈地震袭击。1976 年唐山地震是 20 世纪全球死亡人数在 20 万以上的城市地震实例。21 世纪是我国经济腾飞的重要时期。随着我国国民经济的快速增长，都市化进程的加快，人口和物质财富向城市的高度集中，许多城市将面临着旧城改造，新城区迅速崛起的局面。城乡高层建筑、高架工程和生命线工程越来越多也越来越复杂，一旦发生地震，其破坏也愈加严重。因此，应用先进有效的地质与地球物理等探测技术，准确地探明活动断层分布，确定直下型地震的震源和发震危险性是我国实现 2006~2020 年国家防震减灾目标——“我国基本具备综合抗御 6 级左右，相当于各地区地震基本烈度的地震能力，大中城市、经济发达地区的防震减灾能力达到中等发达国家水平”的重要举措之一，也是我国防震减灾工作面临的一个非常急迫的实际问题。时任国务院副总理温家宝同志在 2000 年 1 月视察中国地震局时曾指出：“从土耳其、台湾地震造成的损失分析来看，科学规划城市建设、保证城市安全、抗御地震灾害迫在眉睫，首先要加强探明城市地下活动断层的分布及其危害性评估工作。”可见，活动断层探测、调查与大比例尺填图工作及其危害性预测是国土规划、经济建设和社会可持续发展的需要。

我国政府历来重视防震减灾工作。自 2008 年 5·12 汶川地震后，政府相关部门面对严重地震灾害，特别是针对Ⅱ和Ⅲ度极震区沿龙门山推覆构造带北川—映秀断裂（中央断裂）和灌县—江油断裂（前山断裂）呈狭长的条带状分布，且具有上盘效应等特征，实施了我国大陆地震重点监视防御区和主要地震带（区）活动断层填图计划（喜马拉雅计划），按轻重缓急、分期分批地对具有发震能力的活动断层进行 1:50 000 条带状地质地貌填图，避免在我国经济又好又快高速发展时期民生工程、生命线工程、核设施等国家重大工程场址跨活动断层建设，积极、主动、有效地减轻活动断层同震地表错动对地面建、构筑物的直接破坏。

减轻活动断层相关地震灾害的关键科学技术问题是已知活动断层空间展布，各类工

程场址需要避让活动断层的宽度为多大?如何科学合理地确定避让宽度?避让宽度与活动断层本身几何结构关系如何?美国加利福尼亚州1994年颁布的“地震断层划定法案”所规定的活动断层两侧各约15m(50ft)是否适用中国大陆的活动断层?除减轻活动断层同震地表错动对地面建、构筑物直接毁坏引起的灾害损失外,如何有效地减轻由近断层强地震动(PGA、PGV)引起的地面建、构筑物的振动破坏?能否按距发震活动断层的距离进行分级抗震设防?这些问题的逐步解决将能有效减轻活动断层相关地震灾害,为经济社会的可持续发展保驾护航。

本专著是国家发展和改革委员会“十五”期间资助的“中国数字地震观测网络工程”之分项目“中国地震活动断层探测技术系统——20座大中城市活动断层探测与地震危险性评价”(2004-1138)下属“城市活动断层试验探测”的成果之一,汇集了活动断层基本概念,活动断层同震地表破裂呈带状分布的观测事实,活动断层近地表永久性地质变形局部化基本特征和活动断层灾害避让带宽度确定的原则与方法,隐伏活动断层破裂扩展岩石力学实验和松散沉积物覆盖条件下地表强变形带宽度数值模拟方法,以及针对不同类型活动断层建立震源物理模型的近断层强地面运动场计算理论体系与地震灾害预测方法,并给出了相应的应用实例示范。这些理论方法的推广和应用将有助于深化对活动断层地震破裂局部化特征和地震灾害呈狭窄条带状沿活动断层分布现象的认识,采取避让或其他必要的工程措施等,可有效地减轻活动断层相关灾害引起的损失,保障工程的安全。本专著涉及地震地质学、地震学、构造物理学、工程地震学、地震工程学和地震灾害预测等学科的前沿性科学问题,试图利用活动断层地质调查、大比例尺综合制(填)图、地球物理勘探、跨断层钻孔联合剖面探测、探槽开挖等技术获得的活动断层最新基础资料,给出减轻活动断层相关地震灾害的方法、途径。作者们力求充分体现本专著的创新性、综合性和实用性,但受时间、篇幅和水平的限制,缺点、错误和不足之处在所难免,敬请读者批评指正。如果本书所取得的任何学术进步能对读者未来的科研工作有一些启发和帮助,或者能对减轻活动断层相关地震灾害发挥一定的作用,我们将感到极大的欣慰和满足。

负责和参加2001年昆仑山8.1级地震和2008年汶川8.0级地震等地表破裂带考察、青藏高原大型走滑断层永久性地质变形带宽度研究和活动断层相关概念调查研究的主要有中国地震局地质研究所徐锡伟、于贵华、冉勇康、马文涛、陈桂华、周庆、陈立春、郑荣章、李陈侠、安颜芬,四川省地震局闻学泽,上海市地震局朱艾澜等;负责和参加隐伏活动断层破裂扩展岩石力学实验的主要有中国地震局地质研究所马胜利、何永年、扈小燕、刘力强、刘培洵,辽宁工程技术大学代树红、潘一山,北京市地震局罗华春等;负责和参加松散沉积物覆盖条件下地表强变形带宽度数值模拟方法分析的主要有中国地震局地质研究所韩竹军、周庆、刘辉、安艳芬等;负责和参加建立不同类型活动断层震源物理模型的近断层强地面运动场计算理论体系与地震灾害预测方法研究、应用实例示范的主要有北京交通大学赵伯明、解廷伟、李彩霞,铁道科学研究院陈靖和中国地震局地质研究所徐锡伟。参加本专著各章节编写的主要人员有:徐锡伟、赵伯明、马胜利、韩竹军、张黎明、李永林、于贵华、陈桂华等。全书由徐锡伟负责修改、补充、统撰和最终定稿。

项目实施过程中，中国地震局局长陈建民，副局长刘玉辰、修济刚、阴朝民等，中国地震局震害防御司前司长卢寿德研究员、司长杜玮、前副司长任利生、副司长韦开波，发展与财务司司长牛之俊等给予了关心和支持，保证了项目的顺利完成。丁国瑜、马宗晋、滕吉文、石耀霖、邓起东、谢礼立等院士和中国科学技术大学陈晓非教授、辽宁省地震局卢造勋和中国地震局地质研究所汪一鹏、杨主恩等研究员在项目实施和研究过程中给予了技术指导和帮助，在此一并表示衷心感谢。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '杜玮' (Du Wei), the Director of the Institute of Earthquake Engineering and Engineering Geophysics, Chinese Academy of Sciences.

2011年3月6日

目 录

总序

前言

第一章 活动断层内涵与外延	1
第一节 活动断层相关基本概念	1
第二节 岩石圈构造变形的物理基础	13
第三节 板缘构造运动及其变形特征	19
第四节 板内构造运动及其变形特征	25
第五节 中国大陆现今地壳运动特征	42
第二章 活动断层相关地震灾害特征	46
第一节 地震灾害实例	46
第二节 昆仑山地震($M_w=7.8$)地表破裂带局部化特征	51
第三节 汶川地震($M_w=7.9$)地表破裂带局部化特征	62
第四节 活动断层永久地质变形带宽度分析	85
第五节 活动断层防灾对策问题	105
第三章 隐伏活动断层地表强形变带规模预测	109
第一节 隐伏活动断层破裂扩展实验结果	109
第二节 隐伏活动断层地表强变形带预测	132
第三节 初步结论与应用前景	169
第四章 活动断层近场强地面运动预测	175
第一节 研究的理论方法体系	179
第二节 强地震动预测实例:昆明试验区	185
第三节 强地震动预测实例:银川与乌鲁木齐试验区	218
第四节 结论与讨论	260
第五章 活动断层相关减灾法律法规	266
主要参考文献	294

第一章 活动断层内涵与外延

本章着重讨论、描述与突发性地震灾害密切相关的活动断层和现今地壳运动的基本概念，现今正进行着的板块运动格局、大陆（板内）构造变形的基本类型，包括标志地壳伸展或开裂的正断层和大陆裂谷系，代表地壳缩短或汇聚的（盲）逆断层、皱褶和前陆盆地系，内含地壳块体运动的走滑断裂系，以及大陆岩石圈结构、地壳的隆起和沉降等新构造环境，特别强调了地表破裂型地震的复发行为、地质表现、活动断层的分段习性及其构造物理学基础，讨论了中国大陆（板内）第四纪构造运动的基本特征及其动力学问题。

第一节 活动断层相关基本概念

一、活动断层定义

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。鉴于活动断层在地震动参数图编制、重大工程场地、核电站选址和城市生命线工程的安全性评价等方面的重要性，加上与第四纪环境和地震、地质灾害在成因上和空间上的关联性，中外学者给予了各不相同的定义。中国大陆地处印度板块、欧亚板块、太平洋板块和菲律宾板块相互碰撞作用的交接地带，地壳构造变动强烈，第四纪活动断层众多，破坏性地震以震级大、频度高、灾害严重为基本特征。为进一步认识活动断层长期滑动习性、发震行为、相关灾害分布特征，并满足工程场址地震安全性评价的需求，本书定义的“活动断层”是指晚第四纪以来有活动的断层，其中晚第四纪指距今 10 万~12 万年以来的时段（中国地震局，2009）。也有学者把“活动断层”定义为“现今正在活动的，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）。按力学或运动学性质可把活动断层划分为正断层、走滑断层、逆断层三种基本类型（图 1-1）。其中，正断层形成于最大主压应力轴（ σ_1 ）垂直、最小主压应力轴（ σ_3 ）和中间主压应力轴（ σ_2 ）近于水平的应力-应变条件，反映出地壳伸展状态；逆断层形成于最小主压应力轴（ σ_3 ）垂直、最大主压应力轴（ σ_1 ）和中间主压应力轴（ σ_2 ）近于水平的应力-应变条件，反映出地壳挤压缩短状态；走滑断层形成于中间主压应力轴（ σ_2 ）垂直、最小主压应力轴（ σ_3 ）和最大主压应力轴（ σ_1 ）近于水平的应力-应变条件，反映出地壳剪切应变状态。

按地表是否出露或存在可见迹线，活动断层可划分为裸露活动断层和隐伏活动断层两类。裸露活动断层是切割地表面的断层，在地表表现为断层陡坎、断层三角面、跌水或瀑布等构造地貌现象（图 1-2）。隐伏活动断层是被第四纪松散沉积物覆盖，地表没有明显迹线的活动断层。多数平原区或城市地区的活动断层属隐伏活动断层（图 1-3）。

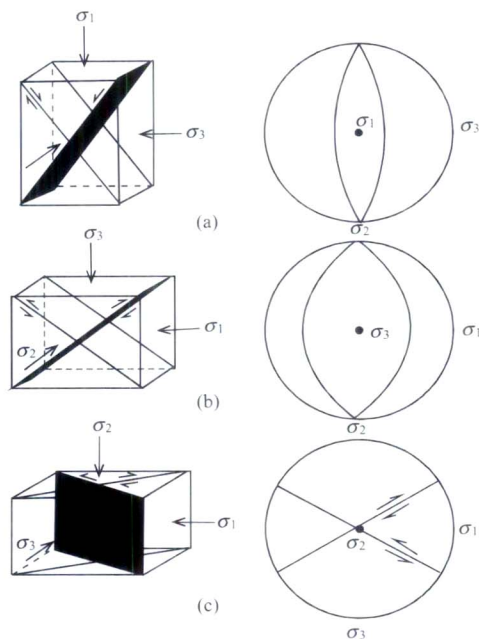


图 1-1 应力-应变状态与断层类型示意图
(a) 正断层；(b) 逆断层；(c) 走滑断层

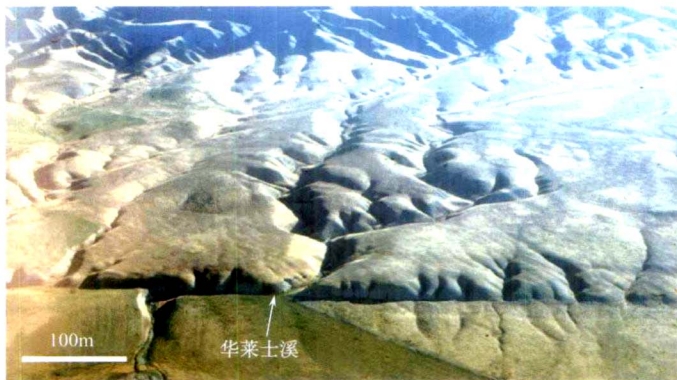


图 1-2 美国加利福尼亚州圣安德烈斯断层地表迹线和水系断错地貌图

由于活动断层在重大工程场址、核电站选址和城市生命线工程的安全性评价等方面的重要性，加上活动断层与第四纪环境、地震与地质灾害在成因上的直接和间接关联性，中外学者给予了各不相同的名词，其近义词包括地震断层、能动断层、新生断层、全新世断层、晚更新世断层、早中更新世断层、第四纪断层、前第四纪断层、地震活动断层、地震地表破裂带等。

(1) 地震断层 震源断层在地表的直接延伸，是地震期间震源错动在地表形成的地表破裂带（丁国瑜，1982；邓起东，1982；李起彤，1991），也是地壳先存断层摩擦

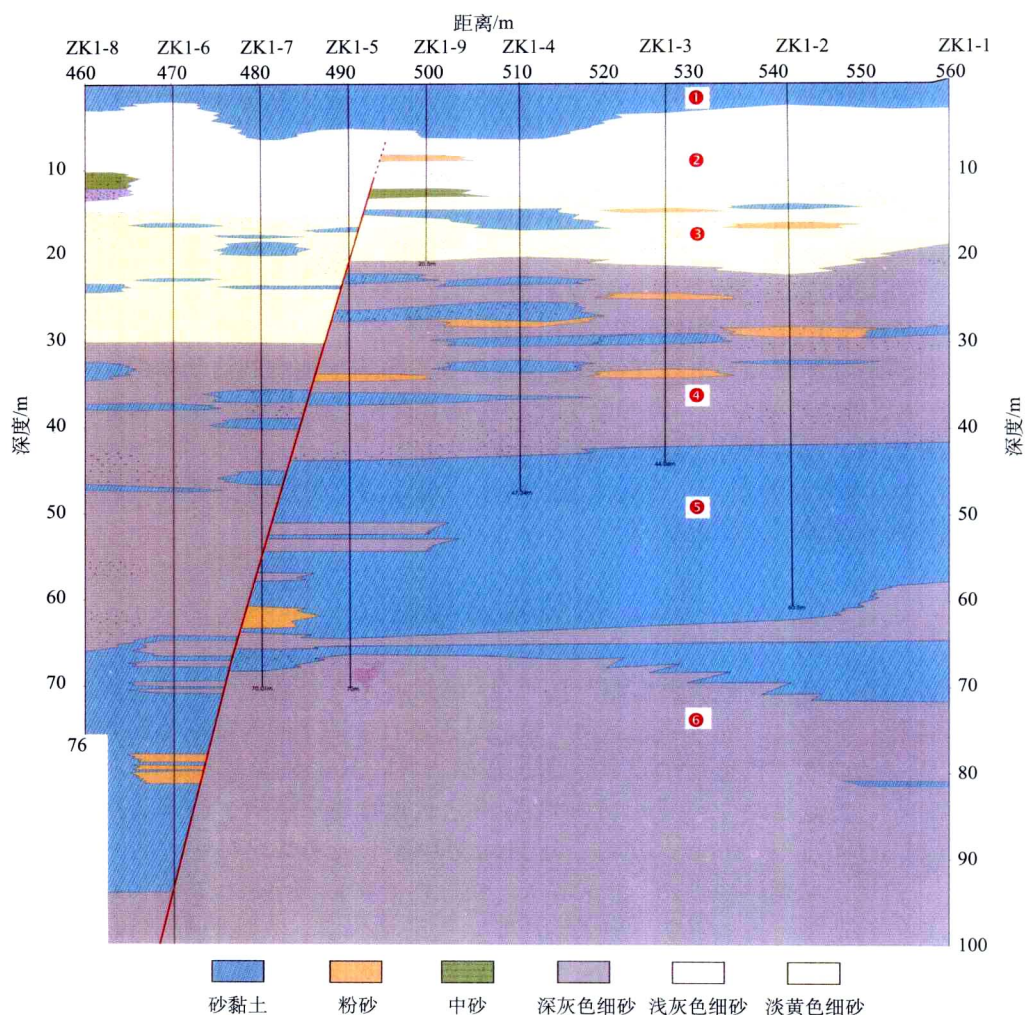


图 1-3 银川隐伏活动断层联合钻孔地质剖面图 (柴炽章等, 2011)

红线代表断层, 断面倾角 $71^{\circ} \pm 3^{\circ}$; ①砂黏土及黏砂土; ②粗砂; ③细砂;
④粗砂; ⑤砂黏土及黏砂土; ⑥粗砂

黏滑错动在地表的反映 (Scholz, 1990; 徐锡伟和何昌荣, 1996a)。

(2) 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。

(3) 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 (徐锡伟和何昌荣, 1996a); 后者在没有先存断层的现