

活断层及其工程评价

活断层 及其工程评价

李起彤 编著



地震出版社

地震出版社

583
73

1473
地震科学联合基金资助

活断层及其工程评价

李起彤 编著

地震出版社

1991

ACTIVE FAULT AND ITS ENGINEERING EVALUATION

Li Qitong

Seismological Press

Beijing 1991

内 容 提 要

本书系统地阐述了活断层的基本特征、地质灾害、调查方法及其工程评价的原理、方法和实例。全书共分5章,首先介绍活断层含义和习性;其次叙述活断层可能引起的各种灾害和14种调查方法;最后论述活断层工程评价的主要问题、方法原理和工程实例。评价时强调活断层最新活动年代测定,重视活断层活动度、危险度评定,注意工程活断层划分和活断层工程对策。

本书可供科研、教学、工程设计和生产部门的地震工作者、水文工程地质和环保地质工作者以及其它有关科学技术人员参考,并可作为相应学科的辅助教材。

活断层及其工程评价

李起彤 编著

责任编辑:朱向军

*

地质出版社出版

北京民族学院南路9号

国防大学第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 11.25印张 288千字

1991年4月第一版 1991年4月第一次印刷

印数 0001—2500

ISBN 7-5028-0452-8/P·290

(840) 定价: 8.00元

序

地震预报的大力推进和工程建设的蓬勃发展,有力地推动和促进了对活断层的广泛调查和深入研究。从另一方面看,近20年来、特别是近10年来的活断层研究成果,又使人们对地震发生的构造环境有了更深入的了解和更明确的认识,对工程场地断层活动性评定有了更科学的依据和更有效的方法。

正是在上述背景和基础上编写出来的《活断层及其工程评价》一书,系统地反映了活断层研究的最新成果和发展动向。在活断层工程评价方面作者精选了14种调查方法,列出了活断层工程评价的主要问题,提出了对活断层准确度、活动度和危险度等概念含义的看法及其划分标准。作者还建议区分出工程活断层并制定出相应的工程学对策。在分析方法上,注意引入概率法。为使读者更好地理解 and 运用活断层工程评价的基础和方法,书中最后给出了11个涉及活断层的工程评价实例,它们涉及了核电站、大水库、烈度复核和地震区划。在结语中,作者还提出了活断层及其工程评价需要进一步研究的主要问题。

《活断层及其工程评价》一书的出版,在当前是很有现实意义的。它提供了有关活断层及其工程评价的系统资料和方法,并将促进该项研究的进一步发展。

在活断层理论研究和工程评价相结合上,以专题形式出版,该书尚属首次。希望今后能有更多这方面的论著问世,以促进活断层及其工程评价研究的进一步繁荣和发展。



1990年5月

前 言

近 20 年、特别是近 10 年，因地震预报和工程建设需要，活断层研究受到很大重视，很多方面取得重要进展。地震将在何处发生？最高震级多大？大地震重复间隔多长？重大工程场地断层活动性如何评定？这些问题都涉及到活断层调查和评价。

活断层研究虽已取得重要进展，但在工程上如何实际应用，两者之间还缺少必要的衔接和联系。作者编写本书目的是，想使活断层理论研究成果能在工程实践上得到更多更好的实际应用。

全书共分 5 章，第 1 章介绍活断层表现，其中包括活断层定义、标志和分类、断层几何特征、滑动速率和活动周期等。第 2 章论述活断层可能产生的各种灾害，如火山、海啸、地震、断错、地裂缝、滑坡岩崩和砂土液化。第 3 章介绍 14 种活断层调查方法，如遥感技术、断层开挖和浅层地震勘探等。第 4 章阐述活断层工程评价和对策，强调断层最新活动年代测定，重视断层准确度、活动度、危险度评定，注意工程活断层划分和活断层工程对策。第 5 章介绍了 11 个活断层工程评价实例。在结语部分，讨论了活断层及其工程评价需要进一步深入研究的主要问题。

活断层理论还在不断发展、完善之中，有些问题尚待进一步深入研究。至于活断层理论在工程上的实际应用，即活断层工程评价问题，当前也还在探索之中。断层千变万化，工程各不相同。书中介绍的活断层工程评价原理、方法和实例，仅供读者使用参考。由于经验不多，书中若有疏忽、不当或错误之处，敬请读者批评指正。

作者衷心感谢对本书写作和出版给予各种支持和帮助的专家学者。其中特别要提到的是，作者曾得到中国科学院学部委员丁国瑜的鼓励和指导。徐煜坚、马宗晋、李坪、邓起东、李兴唐、刘行松、李洪训、汪成民、汪一鹏、叶洪、张裕明、高维明、钟以章、赵文峰、王景铎、冯先岳、刘百箴、耿大玉、王庆海、卢寿德、朱世龙、张雪亮、张四维、高中和、陈晓明、张志天等同志给作者提供很多宝贵资料和建议。至于海外学者，首先要提到的是原日本地质调查所垣见俊弘所长和东京大学地震研究所松田时彦教授，其他还有衣笠善博、小出仁、石川有三先生，美国地质调查所金继宇博士，奥地利维也纳大学 H·弗里德曼教授等，他们给作者提供过重要资料，这对提高本书质量十分重要。陈兴东用微型计算机录入全书文稿，季锦玉清绘所有图件，吴迎光协助翻拍照片，何广全、徐秀蕾帮助复印资料。作者谨对他们表示深切谢意。

李起彤

1990 年 6 月于南京

SYNOPSIS

The investigation of earthquake prediction and the development of engineering construction vigorously promote the study on active faults. Moreover the achievements during the last 10–20 years has benefited clearer understanding for tectonic environment of earthquake generation. So, it may provide scientific basis and effective methods for the evaluation of active faults in engineering sites. This monograph systematically deals with the recent achievements and development trends in various aspects of study on active faults.

The main subjects of this book are exposition and discussion about active faults and their engineering evaluation. It includes five chapters. Chapter 1 introduces and discusses the behavior of active faults, definition, marks, classification, geometrical characteristics, slip rate and recurrence interval of active faults. Chapter 2 expounds various hazards caused by active faults, such as volcano, earthquake, fault offset, geofracture, landslide and rockfall. Chapter 3 describes the main methods for the investigation of active faults, which include remote sensing technique, trenching and dating, measurement of fault gas, shallow seismic exploration and study on fault material, etc. Chapter 4 expounds and discusses the evaluation of active faults and countermeasures against active faults. Chapter 5 illustrates 11 case histories of engineering evaluation for active faults, including nuclear power station, large reservoir, intensity reexamination and seismic regionalization. In conclusion, some key problems needed further studying are put forward.

This book may serve as references for the professionals engaged in seismology, seismogeology, engineering seismology, hydrogeology, engineering geology and environmental geology, etc.

目 录

第 1 章 活断层表现	(1)
1.1 活断层定义.....	(1)
1.2 活断层标志.....	(2)
1.3 活断层分类.....	(3)
1.4 活断层几何特征.....	(8)
1.5 活断层滑动速率.....	(12)
1.6 地震断层.....	(15)
1.7 断层活动周期.....	(18)
1.8 断层规模和地震震级.....	(19)
第 2 章 活断层灾害	(22)
2.1 地震.....	(22)
2.2 断错.....	(25)
2.3 地裂缝.....	(29)
2.4 滑坡和岩崩.....	(35)
2.5 砂土液化.....	(37)
2.6 海啸.....	(41)
2.7 火山.....	(44)
第 3 章 活断层调查	(48)
3.1 文献调查.....	(49)
3.2 航卫片判读.....	(50)
3.3 地形地貌调查.....	(51)
3.4 地表地质调查.....	(57)
3.5 开挖和钻探.....	(59)
3.6 年代测定.....	(65)
3.7 α 径迹和 γ 射线测量.....	(68)
3.8 断层气测量.....	(70)
3.9 精密重磁测量.....	(74)
3.10 形变测量.....	(79)
3.11 微震观测.....	(82)
3.12 浅层地震勘探.....	(86)
3.13 水声探测.....	(88)

3.14 断层物质研究	(90)
第4章 活断层工程评价和对策	(94)
4.1 断层查证和准确度划分	(94)
4.2 活断层鉴定及最新活动年代测定	(97)
4.3 断层错动幅度及平均滑动速率计算	(98)
4.4 地震重复间隔和逼近时间计算	(99)
4.5 断层分段和群集	(102)
4.6 断层活动度评定	(106)
4.7 断层危险度评定	(108)
4.8 活断层的工程学意义和划分	(111)
4.9 S1 相当断层和 S2 相当断层	(112)
4.10 活断层工程对策	(113)
第5章 活断层工程评价实例	(116)
5.1 苏南核电站	(116)
5.2 浙江秦山核电站	(119)
5.3 广东大亚湾核电站	(126)
5.4 辽宁核电站	(129)
5.5 上海金山核热电厂	(132)
5.6 南盘江天生桥水电站	(136)
5.7 黄河小浪底水库	(139)
5.8 黄河龙羊峡水库	(142)
5.9 美国加州奥本水库	(145)
5.10 鲁南烈度复核和地震区划	(149)
5.11 江苏油田地震小区划	(153)
结语	(157)
参考文献	(159)

CONTENTS

Chapter 1 Behavior of Active Faults	(1)
1.1 Definition of active faults	(1)
1.2 Mark of active faults	(2)
1.3 Classification of active faults	(3)
1.4 Geometrical characteristics of active faults	(8)
1.5 Slip rate of active faults	(12)
1.6 Earthquake faults	(15)
1.7 Fault recurrence interval	(18)
1.8 Fault size and earthquake magnitude	(19)
 Chapter 2 Harzards of Active Faults	 (22)
2.1 Earthquake	(22)
2.2 Fault offset	(25)
2.3 Geofracture	(29)
2.4 Landslide and rockfall	(35)
2.5 Sand liquefaction	(37)
2.6 Tsunami	(41)
2.7 Volcano	(44)
 Chapter 3 Investigation of Active Faults	 (48)
3.1 Literature study	(49)
3.2 Interpretation of aerial photoes and satellite images	(50)
3.3 Investigation of landform and geomorphic features	(51)
3.4 Geological survey	(57)
3.5 Trenching and drilling	(59)
3.6 Dating	(65)
3.7 Measurement of α track and γ ray	(68)
3.8 Measurement of fault gas	(70)
3.9 Precise gravity and magnetic measurements	(74)
3.10 Geodetic measurement	(79)
3.11 Microearthquake observation	(82)
3.12 Shallow seismic exploration	(86)

3.13 Underwater acoustic exploration	(88)
3.14 Study on fault material	(90)
Chapter 4 Evaluation of and Countermeasure against Active Faults	(94)
4.1 Examination of existence and division of precision for faults	(94)
4.2 Identification of active faults and the dating of their last activity	(97)
4.3 Calculation of offset and average slip rate for faults	(98)
4.4 Calculation of earthquake recurrence interval and spanning time interval before next event	(99)
4.5 Segmentation and grouping of faults	(102)
4.6 Evaluation of degree of fault activity	(106)
4.7 Evaluation of level of fault risk	(108)
4.8 Engineering significance and division of active faults	(111)
4.9 S1 and S2 faults	(112)
4.10 Engineering countermeasure against active fault	(113)
Chapter 5 Case Histories of Engineering Evaluation for Active Faults	(116)
5.1 Sunan nuclear power station in Jiangsu Province	(116)
5.2 Qinshan nuclear power station in Zhejiang Province	(119)
5.3 Daya Bay nuclear power station in Guangdong Province	(126)
5.4 Liaoning nuclear power station in Liaoning Province	(129)
5.5 Jinshan nuclear-thermal power plant in Shanghai	(132)
5.6 Tiansheng Bridge hydropower station on Nanpanjiang River	(136)
5.7 Xiaolangdi reservoir on Yellow River	(139)
5.8 Longyang Gorge reservoir on Yellow River	(142)
5.9 Auburn dam in California	(145)
5.10 Intensity reexamination and seismic regionalization in southern Shandong Province	(149)
5.11 Seismic microzonation in Jiangsu oil field in Jiangsu Province	(153)
Conclusion	(157)
References	(159)

第 1 章 活断层表现

1.1 活断层定义

简单地说,活断层是一种现今仍在活动的断层。断层活动年代向前追溯到什么时候?人们对这一问题的认识至今尚不一致。

R.E.华莱士认为过去 1 万年或晚第四纪发生过位移的断层可称为活断层; C.R.艾伦认为活断层是最近 10 万年或 1 万年有过活动的断层; 松田时彦提出活断层一般指第四纪或晚第四纪还活动的断层, 它们今后仍有可能再活动; 日本活断层研究会把活断层定义为在近代地质时期有过反复活动的, 和将来可能活动的断层; 藤田和夫也给活断层下了类似定义: 新地质年代反复活动过、将来也有可能活动的断层叫活断层。所谓的新地质年代, 现阶段普遍认为是第四纪(最近 200 万年), 因为第四纪时形成了现代地形, 它是判断活断层的重要标志。

由于核电站选址需要, 美国原子能委员会 (USNEC) 于 1973 年提出了能动断层概念, 其定义是: 在不久的将来可能活动的断层谓之能动断层。一般说, 在过去 3.5 万年里该断层曾有过活动。这里可以看出能动断层强调的是断层未来的活动。为了使推断更有根据, 美国核管会 (USNRC) 1975 年给出了能动断层的具体特征, 即: ①在过去的 3.5 万年中至少发生过一次地表或近地表活动, 或在过去的 50 万年中发生过重复性的上述活动; ②有足够精确的仪器观测记录, 证明强震活动与该断层有关; ③与具有上述①或②特征的能动断层存在构造上联系的断层, 有理由推测该断层能伴随其它能动断层的活动而产生活动。

国际原子能机构 (IAEA) 1979 年对能动断层下了类似定义, 只是时间尺度长了一点, 其规定如下: ①在过去 50 万年内, 在地表或近地表有重复活动证据, 就可推断有进一步活动的可能性; ②与已知能动断层有构造联系的断层, 在地表或近地表能动断层的活动, 可以引起该断层的活动。

此外, M.G.博尼拉也强调活断层在未来可能的活动, 并于 1970 年给活断层下了这样的定义: 在最近的过去曾活动过、在不久的将来仍可能活动的断层称为活断层。

丁国瑜在《中国活动断裂》一书代前言曾指出: 严格说来, 活断层一词的含义还有许多不明确和有争议的地方。但一般说来, 把活断层限定为第四纪至今还活动的断层, 即指那些正在活动和断续活动着的断层。丁国瑜给活断层下的定义, 强调断层至今仍在活动。其表现有的正在活动; 有的断续活动, 即现在虽不活动, 但经过一段时间, 将来还可能再活动。

邓起东根据我国地壳动力学过程和当前的研究程度, 并考虑到工程建设的实际需要和尽量使用已有的名词和概念, 他建议应用以下三类概念, 并分别定义如下: ①活动断裂: 指第四纪 (200—300 万年) 至现代活动过及正在活动的断裂。此外, 晚第三纪以来有活动的断裂也可包括在活动断裂之中; ②能动断裂: 指中晚更新世以来 (10—50 万年) 有过活动的断裂。这是考虑工程建设需要而采用的名词, 因为上述活动断裂的概念对工程需要而言, 时间尺度

过长;③发震断裂:是指 1000—2000 年来有过破坏性历史地震记载及被查明全新世 (1.1 万年) 以来有过中强史前古地震活动的断裂。

从活断层本意考虑,我们认为活断层最重要的特点,就是它现在仍在活动。可以合理的推断,现在仍在活动的断层,在不久的将来可能还会再活动。还有活断层的时间上限问题,我们认为也不是什么实质性问题。因为不同地区的活断层,活动起始时间是不一样的,有的始于上新世或更早,有的始于更新世早期,有的始于更新世晚期、甚至全新世。只要这些断层至今仍在活动,就可以叫活断层。所以,人为的硬性规定出一个统一的活断层时间上限,是不必要的。当然,为某些特殊需要,可以对活断层加上一些附加语,如新生代以来的活断层、晚第三纪以来的活断层、第四纪以来的活断层等。此外,为满足工程上的一些特殊需要,对活断层时间上限,亦可做更明确的规定,如 50 万年、3.5 万年或 1.1 万年。

对活断层一词的含义明确了,对它下个确切定义就不难了。综合前人意见,我们认为:现在仍在活动的断层叫活断层。

对我们的活断层定义,有两点需要说明一下。第一是“现在”这个词的含义问题,“现在”或“现今”相当英文的 present 或 presently,其时间含义显然不是普通人想的几分或几年,而是地质学考虑的时间尺度——几千年。第二是断层未来活动不活动问题,这是工程上最关心的问题,也是本书写作的重点和核心。根据目前对活断层的认识水平,若一条断层现在仍在活动,则可推断它在不久的将来还可能再活动,这是符合实际情况的,也是工程上可以接受的。

1.2 活断层标志

活断层标志中最突出的标志是地貌标志,即活断层在地貌上有明显显示。其次是地震活动和地层错断标志。其他还有地球化学、地球物理标志等。

1. 地貌标志

活断层在地貌上的表现大体可分为两类,一类是大地貌或宏观地貌,另一类是微地貌。前者是活断层长期作用的结果,而后者是少数突发事件(如地震)所造成。研究活断层的地貌表现,对了解活断层的存在、性质、活动程度、滑动速率等都是十分重要的,它有助于研究活断层和地震之间的定量关系,为判定某个地区的地震危险性提供科学依据。

现代地形地貌基本上是第四纪时期形成的,如世界屋脊——青藏高原的隆升始于上新世末,但大规模的猛烈抬升主要是更新世以来发生的,在近 200 万年里约上升了 4000 米。最新一期喜马拉雅运动,对整个中国乃至东亚地区的地貌产生了巨大影响,其中包括各种活断层作用。

地形、水系是地球内外动力共同作用的结果,但是在活断层附近,由于沿断层的断错、位移,常常直接控制了地形、水系的成长发育。特别是断层的水平错动,对水系的改造更是迅速而明显。据丁国瑜等研究,在我国许多大的活断层带,常可看到河谷被扭曲牵引和错断的现象。如阿尔金活断层带有一系列河流被左旋扭动和断错,有的河道错距达数十以至上百公里。断错水系沿鲜水河、安宁河、则木河、小江活断层带都有很好反映。至于沿云南红河活断层带,断错水系表现得更为清楚,仅第四纪晚期以来河流就被错断了 4—5 公里以上。大大小小被错断的河流重新配置,在红河断层谷地形成了一系列梳状水系、爪状水系、钩状

水系。在中国东部，沿汾河、渭河谷地（汾渭活断层带）和沂河、沭河谷地（沂沭活断层带），也都发现了断错水系，它们是断层最新活动的真实记录。

活断层的强烈活动，特别是当一次大地震发生时，伴随强烈地震时出现的地震断层，可造成几米至十几米的错动，从而出现一系列地面变形，如断塞塘、断错脊、眉脊、断层陡坎、断层沟槽、断塞坑等。它们是活断层带上广泛发育的断陷塘、棊脊、断层崖、断层三角面、断层悬谷等一系列断层地貌的雏形。

2. 地震活动标志

活断层另一个重要标志就是地震活动。在世界许多地区对活断层的辨认，最初是从地震断层开始的。如日本 1891 年浓尾地震、美国 1906 年旧金山地震、中国 1931 年富蕴地震，都形成了明显的地震断层。目前已基本确认，地震是通过断层活动释放贮存的应变能的一个现象。

随着地震台网的增多和定位精度的提高，发现愈来愈多的地震活动（包括微小地震）不完全是随机的，而是具有一定方向性、条带性，构成所谓的“地震线”或地震条带。在华北和华南 5 和 5 级以上地震震中分布图（图 1-1）上，可以看到许多由震中排列刻划出来的条带，如邵武—河源地震带、汾渭地震带。在华北和华南 1—4.9 级地震震中分布图（图 1-2）上，可以看到更多这样的条带，如丽水—宁波地震带、郟庐地震带。地震条带有时交织成网，为此丁国瑜等提出了地震破裂网络概念。实际的破裂网络是很复杂的，虽然大部分地震条带与地表活断层一致，但也有很多情况明显表现出不一致。

3. 地层错断标志

活断层作用结果，一方面表现在错断岩层形成断层泥上；另一方面表现在控制新地层沉积上。在断层陡坎前的第四纪堆积厚度大，并常见到小褶曲和小断层。此外，活断层附近的洪积锥特别高或特别低，与山体不相称。系统研究活断层的地层错断标志，可以帮助鉴别活断层、确定断层最新活动时代和研究古地震。

4. 地球化学和地球物理标志

在地球化学方面，最突出的是活断层上断层气和放射性异常。活断层在活动过程中，释放出各种气体，如 CO_2 、 H_2 、He、Ne、Ar、Rn、Hg、As、Sb、Bi、B 等。通过断层气测量，可以鉴别活断层。在活断层附近，氦气常表现出高浓度异常，因此可利用 α 径迹法调查活断层。此外，沿活断层还会出现 γ 射线强度异常。因此，可利用 γ 射线测量去调查海底活断层。

活断层的地球物理标志主要是重力、磁力和地温异常。在覆盖层很厚的平原地区和海洋地区，利用重力、磁力和地温异常研究活断层，是行之有效的方法。

1.3 活断层分类

1. 按力学性质分类

根据 E.M. 安德森和茂木清夫研究，断层是一种剪切破裂，断层方向由三个主压力的大小所决定（图 1-3），这已被三轴压力实验证实。断层面通常平行于中等大小的主压力方向。图 1-4 表示断层的类型和主压力的关系。(a) 图表示中间主压力 (σ_2) 垂直，最大主压力 (σ_1) 和最小主压力 (σ_3) 为水平的情况，形成走滑断层；(b) 图表示中间主压力和最大主压力水

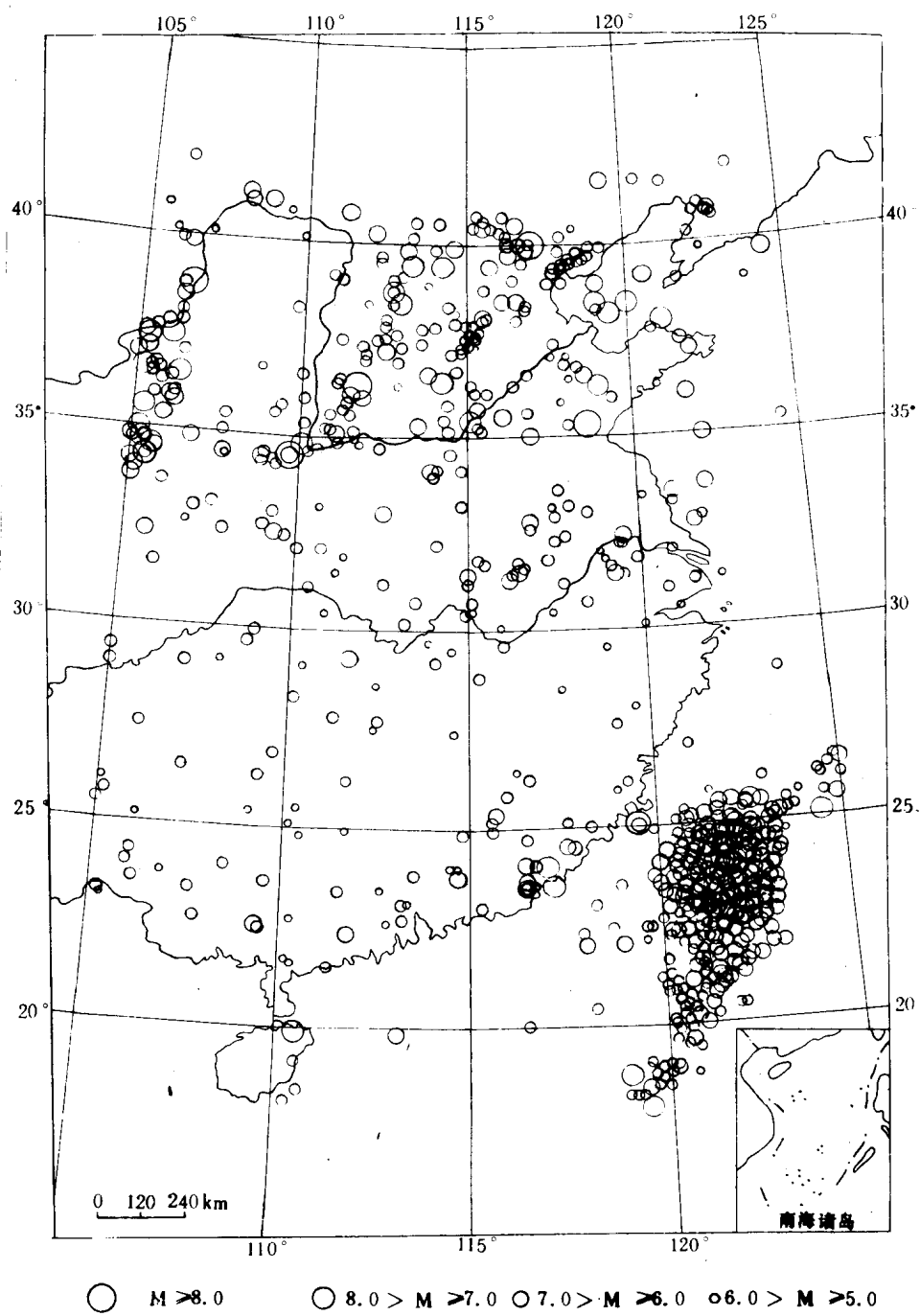


图 1-1 华北和华南地震 ($M \geq 5.0$) 震中分布图 (公元前 1177—公元 1985 年)

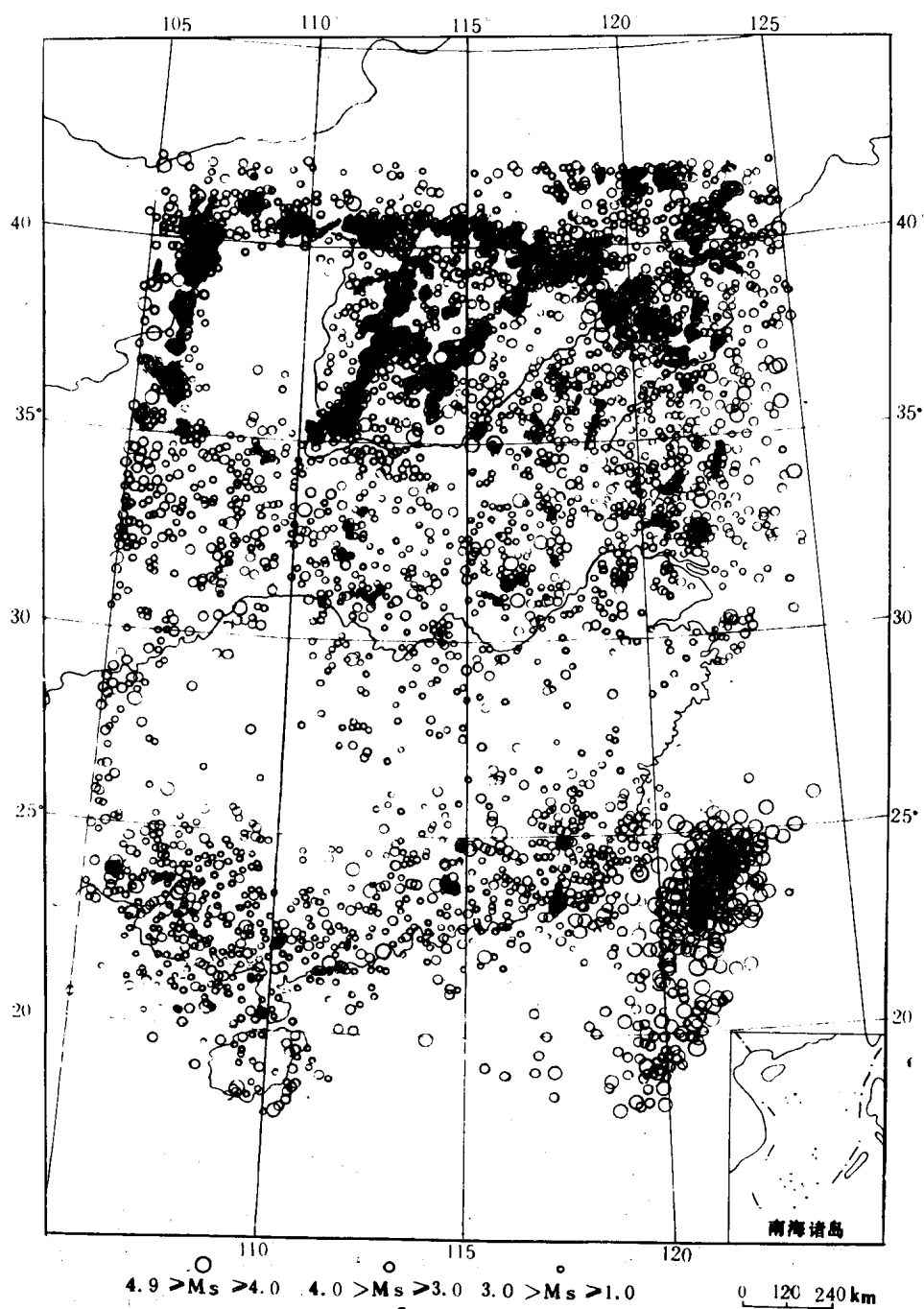


图 1-2 华北和华南地震 ($1.0 \leq M_s \leq 4.9$) 震中分布图 (1970—1985 年)

平，最小主压力垂直的情况，形成逆断层；(c) 图表示中间主压力与最小主压力水平，最大主压力垂直的情况，形成正断层。

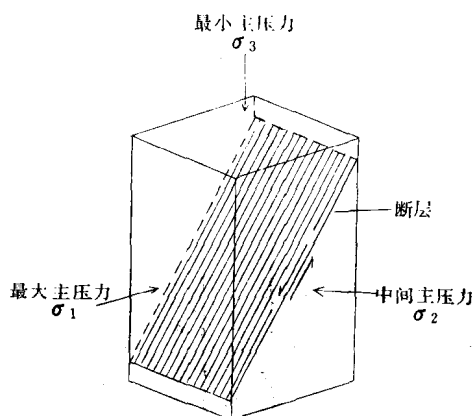


图 1-3 由三轴主压力 σ_1 , σ_2 , σ_3 产生的断层面方向 (据茂木清夫, 1982)

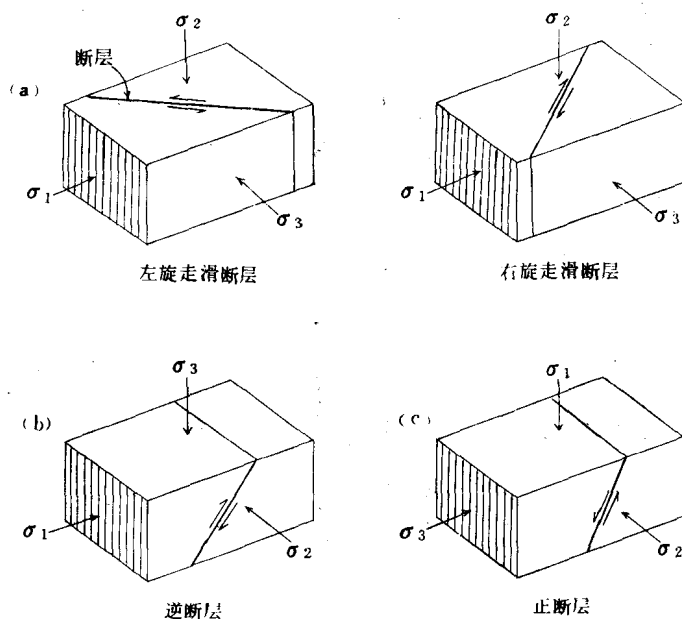


图 1-4 断层的类型和主压力的关系 (据茂木清夫, 1982)

断层运动是用断层面的位移矢量表示的。根据这个矢量的方向与地表面(水平面)的关系，断层可以分为倾滑断层和走滑断层(或平移断层)。前者又可分为正断层和逆断层，后者又可分为左旋走滑断层和右旋走滑断层。和一般断层一样，活断层也可分成上述 3 种基本类型：①正活断层；②逆活断层；③平移或走滑活断层。

2. 按活动时代分类

新西兰地质调查所为编制 1:63360 的地壳变化图，1966 年把活断层划分为 I—IV