

岩体工程地质力学问题

(十)

中国科学院地质研究所 编

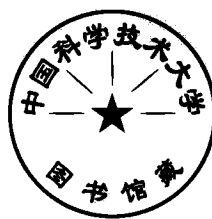
083

科学出版社

岩体工程地质力学问题

(十)

中国科学院地质研究所 编



科学出版社

1991

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本文集共收集论文 14 篇,系中国科学院地质研究所工程地质力学开放研究实验室 1986—1988 年的部分研究成果,内容广泛,涉及活动断裂评价、岩石力学试验研究、工程地质信息管理系统和变形观测仪器等多个方面。最后附有《岩体工程地质力学问题》(一)—(九)集的总目录。

本文集可供工程地质人员,水电、交通、矿山工程勘测设计施工人员及有关院校师生参考。

岩体工程地质力学问题 (十)

中国科学院地质研究所 编

责任编辑 蒋发二

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

北京丰台洛平印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1991 年 8 月深圳第一版 开本: 787×1092 1/16

1991 年 8 月第一次印刷 印张: 9 3/4

印数: 1-1 000 字数: 230 000

ISBN 7-03-002590-3/P·517

定价: 9.80 元

目 录

重大工程区活动断裂评价	李兴唐	(1)
活动断裂特征与标志	许学汉	(15)
核电厂选址与勘察中的断层问题	古 迅	(22)
论岩体结构参数及其应用	张佳川	(29)
等距性断裂形成条件和机理的研究	徐嘉谟	(41)
泥化夹层微观结构模式的模糊判别及应用		
..... 肖树芳 程祖峰 仵 磊 刘占方 丁铭勋 K·安基诺夫		(52)
低频循环荷载作用下大理岩的强度特性研究		
..... 程鸿鑫 陆海平 郭 志		(72)
低频循环荷载作用下大理岩的变形特性研究		
..... 程鸿鑫 陆海平 郭 志		(80)
三向不等压力下的岩体变形特性研究	王效宁 蒋爵光 李秉生	(88)
似岩石材料声发射凯萨尔效应的初步实验研究		
..... 姚宝魁 刘竹华 董万里 张承娟 孙晓利 李淑贤		(98)
板裂结构岩体顺层边坡的实验研究	孙广忠 张文彬 潘瑞林	(108)
钻孔维护地下洞室的研究	孙广忠 黄运飞 陈德玖	(116)
工程地质环境信息管理及分析评价系统	王思敬 戴 桦 赵作权	(128)
QXY-1 型 T 形倾斜仪的研制及其在土木工程监测上的应用		
孙广忠 杨志法 孙立刚 张连弟 董万里 黄天华 陈瑞云 戴仁慈 李生强		(137)
《岩体工程地质力学问题》(一) — (九) 总目录		(148)

PROBLEMS OF ENGINEERING GEOMECHANICS OF ROCK MASS (Vol.X)

CONTENTS

Evaluation of Active Fault in Major Project Areas	Li Xingtang	(1)
Characteristics and Signs of Active Fault	Xu Xuehan	(15)
Problems of Fault in the Siting and Prospecting of Nuclear Power Plant	Gu Xun	(22)
On Structure Parameters of Rock Mass and Its Application	Zhang Jiachuan	(29)
A Study on the Generation and Mechanics of Eguidis tant Faults	Xu Jiamo	(41)
Fuzzy Differentiation of Micro-structure Model of Clay Parting and Its Application	Xiao Shufang	
Cheng Zufong Nie Lei Liu Zhanfang Ding Mingxum K.Anjinove		(52)
Strenght Behaviour of Marble in Low Cyclic Loading	Cheng Hongxin Lu Haiping Guo Zhi	(72)
Deformation Behaviour of Marble in Low Cyclic Loading	Cheng Hongxin Lu Hai ping Guo Zhi	(80)
About Deformation of Rock Mass under Three-axial Unequal Pressure	Wang Xiaoning Jiang Jueguang Li Binsheng	(88)
Preliminary Experiment for the Kaiser Effect of Like-rock Material	Yao Baokui	
Liu Zhuhua Dong Wanli Zhang Chenjuan	Sun Xiaoli Li Shuxian	(98)
An Experiment of the Same-Tendency Rocklamine Structure Slope	Sun Guangzhong Zhang Wenbing Pan Leilin	(108)
A Study for the Holing Maintenance of Underground Opening	Sun Guangzhong Huang Yunfei	(116)
The System of the Management and Analysis for the Engineering Geology Environment Informations		
.....	Wang Sijing Dai Hua Zhao Zuoquan	(128)
QXY-1 T-form Levelmeter and Its Application	Sun Guangzhong Yang Zhifa Sun Ligang Zhang Liandi	
Dong Wanli Huang TianhuaChen RuiYun Dai Renci Li Shengqiag		(137)
Total Contents of <i>Problems of Engineering Geomeochanics of Rock Mass (I-IX)</i>		(148)

重大工程区活动断裂评价

李兴唐

(中国科学院地质研究所)

活动断裂是影响工程稳定的重要地质环境因素,近 20 年来,引起国内外的关注。近些年来,作者研究和调查了一些大型水电站区的活动断裂,测定了一部分工程的断层活动年龄。本文提出活动断裂的评价原则、判定标准。

一、大型工程区活动断裂研究实例

(一) 研究成果

1. 龙羊峡水电站

龙羊峡水电站大坝建在印度期花岗岩上,断裂发育。大坝下游 200m 处,花岗岩内发育断层 F_7 , 产状 $N 15^\circ W, NE \angle 80^\circ$ 。断层长 12km, 据地震法勘探,切割深度为 7km, 其分布见图 1。该断层的新活动错断了上覆的中晚更新世湖相砂岩,水平错距 25.52 m,

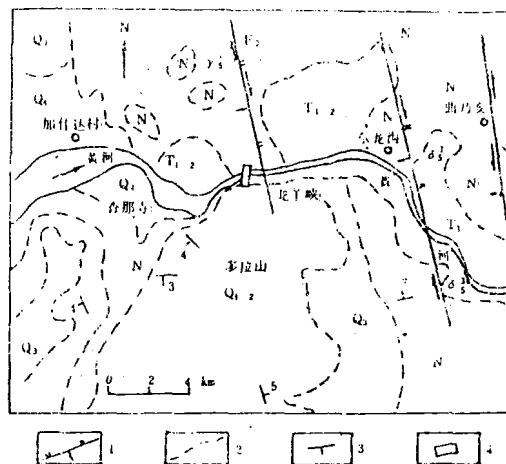


图1 龙羊峡地区断裂分布略图

1. 断层 2. 地(岩)层界线 3. 岩层产状 4. 坝址

垂直断距约 2.7m^①。最上部的湖相地层错距仅 0.18m，没错断黄河第八级阶地冲积层。

从湖相地层上部取样，热发光法测得其年龄为 $(11.5 \pm 0.57) \times 10^4$ 至 $(23 \pm 1.15) \times 10^4$ a，平均年龄值为 17×10^4 a。断层带取样用热发光法测得其年龄为 $(11.5 \pm 0.57) \times 10^4$ a。据上述资料，可以认为断层 F₇ 最后一次强烈活动年龄为 $(17-12) \times 10^4$ a。

距龙羊峡坝址 50km 内，历史上未发生过 $M > 5$ 的地震，历史地震对坝区影响烈度为六度(地震部门鉴定坝区基本烈度为八度)。1981 年施工导流期间，坝区发生 $M < 3$ 地震数十次。它们属于水库诱发地震，近数年来没有再发生。水库现已蓄水，没有发现 F₇ 断层有活动迹象，坝体安全。

2.二滩水电站

二滩水电站位于雅砻江下游，坝基为晚二叠世玄武岩和印支期正长岩。坝址距冕宁—鱼鲊地震带 20km，据我们分析，坝区最高地震影响烈度为七度，地震部门鉴定的基本烈度亦为七度。坝址区断裂不发育，在右坝肩玄武岩内有一长约 300m 的小断层 F₂₀，断层带宽 0.1—0.4m，充填方解石脉(图 2)。野外未发现断层有明显的位错，但在室内偏光显微镜下观察到方解石有双晶弯曲、波状消光等现象，用热发光法测得其同位素年龄为 $(136 \pm 9.2) \times 10^4$ — $(112 \pm 5.6) \times 10^4$ a(裴静娴等，1985)。这种现象可能是高地应力作用或断层活动引起的,即在该年龄区段,断层活动过或有高地应

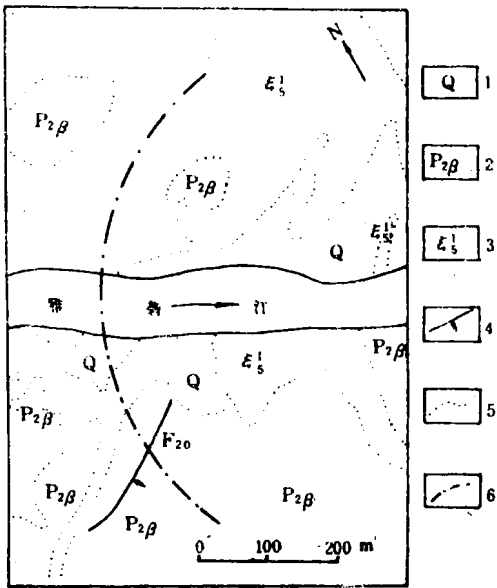


图2 二滩坝址地质简图

1. 晚第四纪坡积和冲积层 2. 晚二叠世玄武岩 3. 印支期正长岩 4. 断层
5. 岩石或地层界线 6. 坝轴线

①据水利电力部西北勘测设计院资料，1985。

力作用, 在此年龄之后断层没有活动过。据此认为断层 F_{20} 对大坝稳定不存在影响。坝区 10km 范围内不存在第四纪活动断裂, 从活动断裂和地震分析, 属基本稳定区, 宜建高坝。本工程现已进入施工准备阶段。

3. 三峡水利枢纽

三峡水电站三斗坪坝址位于晚元古代末的黄陵花岗岩上, 水库区为震旦系、古生界和中生界沉积岩区。库坝区构造变动轻微, 断裂中等发育。水库区断层有仙女山断层、九湾溪断层, 均属中等规模的盖层断层。三斗坪坝区花岗岩内的 F_7 、 F_{23} 和 F_{54} 等属小型断层, 长度仅数公里。这些断层主要形成于燕山期, 它们的分布如图 3 所示。

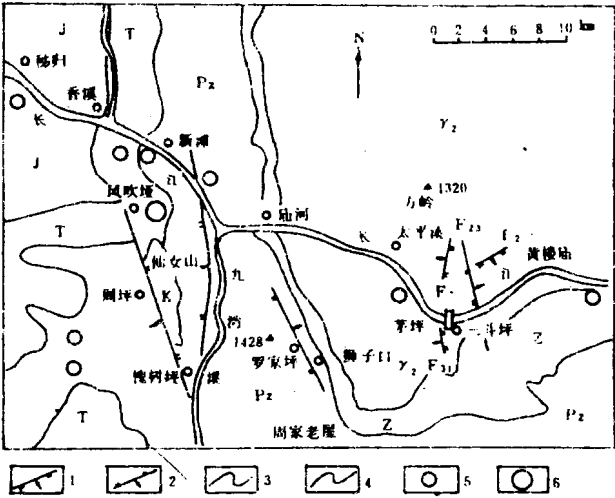


图3 三峡水库与坝址地质构造简图

1. 正断层 2. 逆断层 3. 地层界线 4. 不整合 5. $2.0 < M \leq 3$ 地震震中 6. $M \geq 3$ 地震震中

库坝区为弱震区, 经 30 多年观测, 距坝址 10km 范围内没有发生过 $M > 3$ 的地震, 但有一个微震 ($M_s = 1$)。水库区仙女山附近发生过 $M < 3$ 的弱震。坝区受外围地震影响的烈度不超过五度。国家地震部门鉴定坝区基本烈度为六度。坝址区 30km 范围内, 没有能发生 $M > 5$ 的地震的发震构造, 坝址稳定条件良好。

1986 年以来, 作者调查了仙女山、九湾溪等断层及坝区主要断层, 并采集样品用热发光 (TL)、电子自旋共振 (ESR) 和 U 系法测定了断层活动年龄, 成果如表 1 所示。

表 1 的年龄数据, 有的是用断层充填物 (钙质透镜体、方解石) 测定的, 一部分是用断层带本身物质 (断层破碎物、断层泥、风化断层充填泥土) 测定的。根据表 1 数据和断层特征, 对本区断层的最新活动年龄做如下分析。

仙女山断层高值年龄为 $199 \times 10^4 a$, 低值年龄为 $80 \times 10^4 a$, 因 ESR 法的 $88 \times 10^4 a$ 为钙结核 (透镜体), 所以其最大可能的最新活动年龄当为 $199 \times 10^4 a$ 。九湾溪断层样

表1 三峡工程主要断层最新活动年龄

年龄(×10 ⁴ a) 断层 \ 方法	热发光 (TL)	电子自旋共振 (ESR)	铀系 (U系)
仙女山	77.58 ± 3.8— 199.0 ± 20.0	88.0 ± 26— > 150	> 60
九湾溪(南段)	155.72 ± 15.6	114.42 ± 22.88	
坝区 F ₇	50.84 ± 2.54— 131.58 ± 11.84	20.11 ± 0.06— 44.88 ± 8.98	
坝区 F ₂₃	105.7 ± 8.46— 126.5 ± 12.6	75.26 ± 15.05	
坝区 f ₂	125.1 ± 10.0	> 150	> 60
坝区 f ₅₄	54.2 ± 2.71		

品均为断层泥, TL、ESR 测定结果近于一致,选其低值 $114 \times 10^4 \text{a}$ 为其最新活动年龄。因此,可能第四纪以来两断层都没有活动过。

坝区断层 F₇, 因断层泥风化和地下水作用测得数据较不一致,但 ESR 高值和 TL 低值相近。因此,其最大可能活动年龄为 $50 \times 10^4 \text{a}$ 或 $131 \times 10^4 \text{a}$ 。断层 F₂₃ 最新活动年龄应为 $105 \times 10^4 \text{a}$ 以上。据野外观察,地面下 20—30m, F₇、F₂₃ 胶结良好,所取样品均系人工刻凿的岩粉,为微风化岩石。所以,可以认为两断层 $130 \times 10^4 \text{a}$ 以来没有活动过。断层 F₂ 可能 125×10^4 — $150 \times 10^4 \text{a}$ 活动过。F₅₄ 的年龄数据因样品风化而偏低。

综上所述,坝区的几条主要断层,最大可能是 $110 \times 10^4 \text{a}$ 以来没有活动过,可以建大坝。

4. 乌江长溪水电站

乌江下游长溪拟建混凝土高坝,正在勘测中。坝址区不存在大、中型断层,亦无地震发生。受彭水县城北 $M=5$ 历史地震影响,坝区烈度不足五度。1979 年四川省地震局确定坝区基本烈度为六度。坝区分布上寒武统至下奥陶统石灰岩、白云质灰岩和白云岩,岩层倾角 62° — 70° ,发育一些小型断层,长度大于 0.5km 者有 F₁、F₇ 和 F₃₆,但长度都不超过 3km。

断层带构造岩多被胶结,只有 F₁ 断层风化带有风化断层泥和风化断层角砾。F₁ 断层方解石脉年龄大于 $150 \times 10^4 \text{a}$,风化断层泥年龄为 $(35.73 \pm 7.14) \times 10^4 \text{a}$ 。F₇ 和 F₃₆ 断层带内方解石年龄都大于 $150 \times 10^4 \text{a}$ 。经野外观察和室内鉴定,方解石脉没有受过明显的构造变动。因此可以认为,这些大于 $150 \times 10^4 \text{a}$ 以来没有活动过,或第四纪 ($240 \times 10^4 \text{a}$) 以来没有活动过。F₁ 断层泥因受风化作用影响,所测年龄不代表断层最新活动年龄。坝区不存在 $M>1$ 微震,野外观察(地面下 30m 或更深)断层胶结良好。据此得出结论,长溪坝址断层对大坝稳定没有影响。

(二) 工程实践

我国有许多工程建在地震区,迄今尚没有因断层活动而遭到破坏的,只有个别城市受强震破坏(例如唐山)。至 1974 年,全世界已建成大中型水坝约 25 000 座,还没

表 2 第四纪活动断层区工程实践实例

工程名称	前第四纪地质	活动断裂特征	断裂类型	地震活动	工程实践	资料来源
刘家峡水电站	晚元古代花岗岩片麻岩,断裂发育	坝基顺河断层 F_{60} , 错断晚更新世(Q_3)地层, 未错断全新世(Q_4)地层	燕山期盖层断裂	兰州中强地震区内, 水库及坝址无 $M > 5$ 地震	蓄水 25 年无水库地震和断层位错	水利电力部西北勘测设计院
册田土坝	泥河湾期黄土、亚粘土夹玄武岩	坝区发育中更新世(Q_2)晚期断层, 长 1—5km, 断距 25m, 右坝肩在断层面上	燕山—喜山期盖层断裂	距坝址 1.4km 大同县发生过 $M = 4.5$ 地震, 库坝区有个别微震	1960 年蓄水, 无水库地震或断层位错	水利电力部山西省设计院
龙背峡水电站	印支期花岗岩、断层发育、岩体破碎	大坝下游 200m 断层 F_7 , 长 12km, 活动年龄 (17—21) $\times 10^4$ a, 垂直断距 2.7m 水平断距 25m	印支期盖层断裂, F_7 深 7km	距电站 100km 内未发生过 $M > 4$ 地震; 水库区有 $M < 3$ 微震, 沿 F_7 无微震	1981 年施工围岩竣工后库坝区有 $M < 3$ 微震 1986 年蓄水, 没有大量微震发生	水利电力部西北勘测设计院
深圳核电站	燕山期花岗岩, 断裂不发育	预选厂址有四条基岩断裂, 单条长 7—9km, 1.5×10^4 a 以来没有活动过	燕山期盖层断裂	厂址附近有少数 $M < 3$ 微震, 厂区和沿断层无微震	已施工	王金铎, 1981
渡口市(城建、铁路)	攀西裂谷带内, 安宁河岩石圈断裂以西 20km, 晚元古代片麻岩, 断裂发育	康果活动断裂长 20km, 垂直断距 3m, 最新地质年龄约 1.9×10^4 a	印支期盖层断裂	它以东 20km 为冕宁—鱼鲊地震带, 沿保果断裂有 $M < 3$ 微震线性分布	历史上没有 $M > 5$ 地震, 渡口市、成昆铁路支线穿越断裂, 20 年来没有发现位错	作者调查 1982
大连市开发区	震旦系石英岩、板岩, 断裂不很发育	大楼地基内有基岩断层, 沿断层未错断 8230a 和 (4.76 ± 0.24) $\times 10^4$ a 地层, 断层带石英英热发光年龄 (48.8—21) $\times 10^4$ a	燕山期盖层断裂	沿断裂无弱震	在该断层面上修建的楼房 50 年来未受破坏	尚士房, 1987
可可托海水电站	古生界变质岩, 断裂发育	全新世以来 (6285 年) 活动断裂	海西期岩石圈断裂	强地震带, 1931 年发生 $M = 8$ 地震	1958 年施工, 迄今无中强以上地震发生	水利电力部西北勘测设计院

有因坝基下断层位错而损坏的。

表 2 列举了我国在第四纪活动断层区和强震影响带建设的水电站和城镇的实例。这是成功的实例，值得借鉴。

二、活动断裂工程评价标准与对策

(一)概 述

活动断裂的概念是由地质学家提出的，其定义是：在地质历史时期形成的、在新的地质时期活动过、将来仍有可能活动的断裂。对于新的地质时期，即断裂活动年龄下限，存在着不同的理解和认识。Slemmons (1977)列举过欧美诸国关于活动断层的定义和分类三十余个，还不包括苏联、日本和中国地质学家的概念。关于活动断层的判定，主要是根据断层活动年龄。表 3 列举了近 20 年来各国机构、地质学家判定活断层的年龄标志。

判定活动断裂年龄下限标志差异如此之大，其原因有三：1)学科差别；2)断层年龄测试技术和地震研究的进展；3)地区或区域地质构造演化历史及现代地球动力学条

表 3 活动断裂年龄下限

序号	作者或机构	地质时代	年龄($\times 10^3a$)
1	Allen C. R. 等(美国,1965) 美国垦务局(1976)	晚更新世早期	10
2	Clough S. 和 Blot B. A. (1969)	全新世	最近一几千年
3	美国核管理委员会(1971,1973)(能动断层)	中更新世—晚更新世	50(多次活动)3.5(一次活动)
4	Wesson R. L. 等(1972,1975)	早更新世—全新世	300—1
5	Bonilla M. G. (1970)	全新世	1
6	日本建设规划咨询会(1973)	全新世	1
7	Grant—Taylor T. L. 等(1974)	晚更新世—全新世	5(多次活动)
8	Nichols D. R. 等引用,提出(新西兰城镇和国家计划委员会工作服务部 1965 年规定)(1974)	晚更新世—全新世	2(引用)1(提出)
9	Lenson G. J. (新西兰,1976)	中更新世—晚更新世	50(多次活动)5(一次活动)
10	Gy6nn H. E. (苏联,1974,1976)	晚更新世—全新世	13—11
11	美国加利福尼亚州地矿部(1976)	全新世	1.1
12	日本活动断层研究组,藤田和大(1980),Illist(德国,1980),丁国瑜(1982)	早更新世	约 200
13	林正夫(日本,1981)	工程学活断层,晚更新世—全新世	3—0.5
14	邓起东(1982)	早第三纪	7000
15	李坪(1983)	中更新世	约 100
16	李兴唐(1987)	晚更新世晚期—全新世	5—1

件差异。

近十余年来,世界各国工程地质学界大多数采用全新世 ($1.1 \times 10^4 \text{a}$) 作为活动断层的年龄下限标准。在我国,工程地质学家和部分地震地质学家,也主张定为全新世,但未见论文刊载。

(二)工程活动断裂判定标准

工程活动断裂判定标准有三: 1) 年龄标准, 2) 地震标准, 3) 断裂活动速率。以 1)、2) 为主, 3) 作参考。

1. 年龄标准

以断裂活动年龄判定工程活动断裂有三点根据: 1) 工程实践; 2) 发震断裂(近代活动断裂) 最新地质年代; 3) 大地震 ($M > 7$) 重复周期。

地震区及一些存在活动断裂地区的工程实践表明, 晚更新世晚期或全新世以前活动过的断裂对工程安全不存在影响。

表 4 为中国部分强震带 ($M > 6$), 发震断裂活动的最新地质年代(据文献资料综合)。需要说明的是, Q 和 Q_2 时代的断裂, 大多数是根据出露的最新地层时代推测的, 时代很可能偏老。从表 4 可以看出, Q_3 — Q_4 活动过的断裂占总数的 58%。所以, 可以认为, 晚更新世 (Q_3) 和全新世 (Q_4) 活动过的断裂, 可能产生地震 ($M > 6$) 或蠕动运动。

表 4 中国部分强震带($M > 6$)断裂活动最新地质时代

活动时代	断 裂 实 例
早更新世 Q_1	库孜耳、塔拉期—费耳干、阿图什、柯坪
中更新世 Q_2	皮羌、卡兹克阿尔特、祁连山北缘、阿尔金山、桑干河、海城营口、河源(新丰江)
晚更新世 Q_3	祁连山北缘(部分)、贺兰山、海源(南西华山)、安阳—邢台、鲜水河、安宁河、红河、郯庐断裂中段、夏垫(三河)
全新世 Q_4	阿尔帕勒克、天山南麓、汾河、唐山、喜马拉雅、可可托海—二台

近 10 年来的研究表明, 大地震 ($M > 7$) 的重复发生周期是很长的(表 5, 表 6, 表 7)。除现代板块边界带外, 大陆板块内大震周期 $R > 1500 \text{a}$ (小江断裂除外)。工程使用年限仅 100 年, 比大震周期小 1—2 个数量级, 甚至 3 个数量级。因此, 可以将工程活动断裂年龄下限提高, 既符合自然规律, 也可以保证工程安全。

综上所述, 作者提出工程活动断裂判定的年龄标准为全新世或晚更新世晚期活动过一次的断裂, 即 $((4 \pm 1) - 1.1) \times 10^4 \text{a}$, 以 $1.1 \times 10^4 \text{a}$ 为主。在缺乏全新世地层第四纪期地壳活动微弱或断层年龄难于测定时, 如中国东部或平原区, 工程活动断裂年龄下限可推延至 $(3-5) \times 10^4 \text{a}$ 。这与美国核电站规程中的能动断裂标准之一—— $3.5 \times 10^4 \text{a}$ 活动过一次相近似。因此, 作者提出的标准是安全的。表 8 提出的活动断裂地质年代分类及其工程意义, 在工程实践中可以利用。

表 5 中国部分大地震周期

地点 (地震带)	古地震年龄间 段(a)	古地震及分析的大地震, 周期 $T(a)$	作者
大理 (下关—剑川)	6 880—1 200	古地震, $M =$ (历史地震) $T = 1^*500$	李祥根 1986
海源 (南西华山)	26 900—1 015	古地震, $M = 8.5$ (历史地震) $T = 1\ 600$	程绍平 1984
	6 000—3 680	古地震, $M = 8.5$ $T = 2\ 325$	刘百簾 1985
洪洞 (汾河)	6 265—2 000	古地震, $M = 8$ (历史地震) $T = 5\ 000$	孟宪梁等 1985
富蕴(可可 托海—二台)	6 285—1 780	古地震, $M = 8$ (历史地震) $T = 3\ 150$	戈澍谟等 1986
贺兰山前 (银川平原)	6 355—245	古地震, $M = 6—8$ (历史地震) $T = 555—1\ 066$ (平均 800)	杨景春等 1985
喀什 (喀什—柯坪)	2 930—175	古地震, $M = 8$ (历史地震) $T = 2\ 000—2\ 500$	冯先岳 1987
唐山 (三河—滦县)	14 865—7 665	古地震, $M = 7.8$ $T = 7\ 500$	王挺梅 1984
平谷 (夏垫)	15 000—308	古地震($M = 8$), $M = 7.5$ $T = 4\ 000$; $M = 7.0$, $T = 1\ 600$	向宏发等 1987
郯庐 (沂沭)	7 000—3 100	古地震 $M = 8$, $T = 3\ 000$	林伟凡等 1987
小江 (西支)	38 260—155	古地震($M = 8$), $M_1 = 7—8$ $T = 900$	陈沅等 1988

表 6 国外一些大地震周期

地点 断裂带	古地震年龄间 段(a)	古地震及分析的大地震*, 周期 $T(a)$	作者
圣安德烈斯断 裂(华莱士河段)	3 400	$M_s = 8\ 1/4$, $T = 255$, $T = 250—450$	Kerry E. Sieh, 1978, 1984
中美加勒比—北 美板块边界断裂	40 000—10 000	$M_s = 7.5$ $T = 180—730$	David, Schwartz 等, 1979
太平洋板块西 边界断裂	有史以来	$M_s > 6$, $T = 140 \pm 60$	米仓伸之, 1982
新墨西哥州奥德 兰裂谷中部断裂	33 000—3 000	$M_s = 7$ $T = 6\ 000—7\ 500$	Michal N.M.
日本浮桥中央 断层	4 600—2 900	$M_s = 7$ $T = 3\ 000—4\ 000$	Eikichi Tsukuda 等, 1984
日本阿寺断层	12 000—5 500	大地震** $T = 2\ 000—3\ 000$	Eikichi Tsukuda, 1984
美国特通—黄 石断裂	14 000—11 000	$M_L = 7.5$ $T = 3\ 500$	Doser I. 等, 1983

*大地震震级 M 根据当地历史最高震级确定;

**缺乏历史大地震记录。

表 7 日本活动断裂大地震重复周期

断裂活动 速率分类 (地质时期)		活动断层平均位移速率(mm/a)				
		AA级	A级	B级	C级	D级
		$s=10$		$s=1$	$s=0.1$	$s=0.01$
地震 规模	$M=8$	$6.3 \times 10^2 \text{a}$	$6.3 \times 10^3 \text{a}$	$6.3 \times 10^4 \text{a}$	$6.3 \times 10^5 \text{a}$	
	$M=7$	$1.6 \times 10^2 \text{a}$	$1.6 \times 10^3 \text{a}$	$1.6 \times 10^4 \text{a}$	$1.6 \times 10^5 \text{a}$	

表 8 活动断裂地质年代分类及工程意义

年代分类(代号)		年龄间段($\times 10^4 \text{a}$)	工程意义(评价)
全新世 (Q_4)	晚期(Q_4^3)	0.25—现代	工程活动断裂,工程使用期可能活动(若断层未错断该年龄地层则更安全)
	中期(Q_4^2)	0.80—0.25	
	早期(Q_4^1)	1.1—0.80	
晚更新世(Q_3)		4 ± 1 13—1.1	若仅活动过一次工程不考虑,多次活动核电站要考虑
中更新世(Q_2)		73—13(50 $\pm$)	
早更新世(Q_1)		240—73	非工程活动断裂,工程不考虑
前第四纪		大于 240	死断层,对工程无影响

2.地震标准

从地震学观点看,凡是能引起地震的断裂都属近代或现代活动断裂,也是发震断裂。在强震区, $M < 3$ 的微震是很多的,非地震区或弱震缺少微震或极少。在浅源地震(深 10—45km)区, $3 < M < 5$ 的地震的震中烈度小于六度,水平加速度 $H_a < 0.063g$,对工程安全不产生影响。各种工程都规定水平加速度 $H_a > 0.125g$ (烈度七度)时需进行抗震设计,但在 $H_a = 0.063g$ (烈度六度)时建筑物也能产生轻微损坏。因此,能产生 $M > 5$ 地震的断裂,都可称为工程活动(发震)断裂。在震源深度小于 10km 的情况下, $5 > M > 3$ 的地震也能破坏建筑物。因此,凡是在连续或时间间隔较小的条件下,发生过 3 个以上呈线性分布的 $M = 1—3$ 微震,若地面有可见断层,此断层亦为工程活动断裂。

3.活动速率

活动断层的活动速率分为地质的(第四纪期间)、历史的和现代的。其中前两者是比较可靠的,但只能测算出平均速率,难于确定某一时间段的活动量,对工程的影响难以评价。由于测量技术和大陆内部断层活动量级低,断裂现代活动的信息尚值得探讨,工程难于应用,并且大部分断层缺乏这一数据。所以现代测量的断层活动速率,对工程评价意义不大。表 9 是作者综合提出的断裂活动速率分级和工程意义,可作为参考,只有横跨断层由精密仪器测得可靠的活动量时,才可作为判定标准。

综上所述,工程活动断裂的判定标准是断裂活动年龄下限和地震两项标准。断层活动速率,只能作为预报地震发生时间长短的条件,不能作为判定的依据。也就是说,

表 9 断裂活动速率分级及其工程意义

地质的和 历史的	级 别 (活动程度)	I (强活动的)	II (中强活动的)	III (弱活动的)	IV (微活动的)
	活动速率 s (mm/a)	$20 > s > 10$	$10 > s > 1$	$1 > s > 0.1$	$0.1 > s > 0.01$
工程意义		工程活动断裂, 影响工程稳定		年龄值为 $(4 \pm 1) - 1.1 \times 10^4 a$ 时需考虑, 一般工程不考虑	
现代的	级 别 (活动程度)	I (强活动的)	II (中强活动的)	III (微活动的)	IV (不活动的)
	活动速率 s (mm/a)	$20 > s > 10$	$10 > s > 1$	$1 > s > 0.1$	$s < 0.1$

具有下列特征之一者为工程活动断裂, 应考虑一定的工程措施:

- 1) 断裂活动年龄下限为 $(4 \pm 1 - 1.1) \times 10^4 a$, 以 $1.1 \times 10^4 a$ 为主;
- 2) 产生过 $M > 5$ 地震;
- 3) $1 < M < 3$ 的地震频繁发生, 有 3 个以上震中呈直线分布, 而且地面有相应的断层。

(三) 工程对策

根据活动断裂的运动特征或发震条件, 活动断裂分两大类:

- 1) 蠕动的非发震断裂, 它长期缓慢地运动, 不产生地震;
- 2) 地震运动的发震断裂, 它具有快速运动的发震时期和缓慢的蠕动时期, 前者是瞬间的, 后者是长时间的。

迄今为止, 我国还没有因断裂活动使建筑物破坏的, 但对活动断裂灾害人们采取极审慎的态度, 工程上采取了一定的对策。提出工程活动断裂标准后, 既可得证工程安全, 又可以增加可利用的土地和建筑面积。

在工程勘察、设计中, 对活动断裂采取以下的对策:

- 1) 对最新活动年龄大于 $(4 \pm 1) - 1.1 \times 10^4 a$ 的非工程活动断裂, 不考虑它对建筑物安全的影响, 按死断层对待。
- 2) 建筑场地存在非发震的工程活动断裂时, 一般工程 (除大坝、火力发电厂等外) 的主要建筑物应离开断层线 50—100m, 一般建筑物采取地基加固措施。重大工程应避开断层 1 000m 以上。
- 3) 蠕动阶段的发震断裂 ($M > 3$), 各种工程应避开断层线 1 000m 以上。因为人们还不能准确地确定地震发生的时间和地点, 为安全起见采用较大的避让距离。

上述的对策是目前我国水利电力和工业民用工程实践所采用的工程措施, 在工程实践中可根据具体情况予以处理。

三、断裂活动年龄的鉴定和分析

(一) 活动断裂年龄的确定

1. 测试手段

60 年代以前, 断裂活动年龄只能依靠断层错断的地层年龄进行分析, 测龄方法只有 ^{14}C 方法一种, 最大可测年龄为 42 000a (现在可达 60 000a)。70 年代以后发展了热发光 (TL) 法、铀系 (U 系) 法和电子自旋共振 (ESR) 法等。还有一些方法, 如裂变径迹、K-Ar 法、快中子活化法等, 由于要求样品必须是火成岩矿物, 而不便应用。各种方法的特性见表 10。

表 10 常用的年轻地(断)层年龄测试手段和特性

特 性 手 段	测定对象(矿物、岩石)	可测年限(a)	地质条件	成果分析和应用
放 射 性 碳 (^{14}C)	含碳淤泥、方解石、骨 髓、碳化木、贝壳等	$0-6 \times 10^4$	地层、断层带充填物、 崩积物	给出断层活动年龄区间
热发光(TL)	石英、方解石、碳酸钙 沉淀物、烘烤层、陶瓷	$1000-300 \times 10^4$	地层、断层充填物、断 层破碎物	断层活动年龄区间、断 层最晚一次强烈活动近 似年龄
铀系法(U系)	方解石、火山岩碳酸钙 沉淀物	$(0.5-100) \times 10^4$ 最优 $(5-6) \times 10^4$	地层、断层带充填物	断层活动年龄区间、样 品形成年龄
电子自旋共 振(ESR)	碳酸钙、石英、火山 灰、石膏	$1000-150 \times 10^4$	地层、断层充填物、断 层破碎物	断层活动年龄区间、最 晚一次强烈活动近似年 龄、生成年龄
石英表面显 微结构	石英颗粒	中新世—全新世	地层、断层带破碎物	断层最晚一次强烈活动 近似年代

2. 断层年龄分析原则

断层年龄测试和分析有两大类: 1) 地层法, 即根据断层所错断的地层年龄, 间接地确定断层形成年龄区间; 2) 直接法, 测定断层带破碎物及断层期后充填物年龄。

间接法或地层法 如图 4a 所示, 断层错断了早期第四系 A 地层 (其年龄值为 a), 未错断上覆的晚第四系 B 地层 (其年龄值为 b), 则断层形成于 a 年龄之后, b 年龄之前, 即 b 年龄之后断层没有活动过。如图 4b 所示, 断层位于前第四纪基岩内, 没有错断上覆的第四系地层 (其年龄值为 c), 则可判断层在 c 年龄以后没有活动过。如图 4b 所示断层位于前第四纪基岩内, 没有错断上覆的第四纪地层 (其年龄值为 c), 则可判断层在 c 年龄之后没有活动过。

直接法 所谓直接法即从断层带内采取断层破碎物或断层期后充填物作为测年年龄样品，并从其中选取测年龄所需的矿物。由于矿物受机械、物理化学作用和围岩放射性元素作用，会产生物理化学性质的变化，测试时用人工放射性照射，即可测出其发生这些变化的年龄。直接法可用于断层缺乏上覆可测年龄的新地层的情况（图4c）。

断层充填物包括断层形成后在断层带内充填的岩浆热液或残余岩浆产物，如方解石脉、火山玻璃、火山岩等，以及由淋滤作用形成的方解石脉、钙质透镜体和在地面附近沉积形成的断层楔（塞）等。若测定断层充填物的年龄为 d ，野外观察表明充填物没有受到错动，偏光显微镜下观察亦无明显的位错，则表明充填物形成后没有受到断层活动影响，即断层没有活动。

断层破碎物来源于母岩，在断层错动的机械作用、热作用和围岩放射性作用下，发生物理、化学特性的变化，用 TL、ESR 方法可测出其年龄。此年龄即为断层最晚一次强烈活动的年龄。根据断层带内石英颗粒的表面结构，也可确定断层形成的地质年代。

在既有上覆第四纪地层，断层带物质也可测定年龄的情况下，兼用间接法和直接法求取断层的最新活动年龄，则更为可靠和准确。

四、发震断裂分析与工程评价

（一）断裂深度类型与地震震级

近 20 年来，地质学家和地震学家已认识到深断裂的近代活动是高震级地震产生的根源。作者参考了张文佑教授的深断裂分类进行了补充，提出深断裂分类与地震震级的关系（表 11）。

中国大陆地区以浅源地震为主，大多数在 10km 以下，并以 20—30km 为最多。据地球物理探测和地质研究，华南和华北地区沉积盖层厚度为 3—5km，最大达 10km，相当于表层地壳和上地壳。由断裂切割深度与历史地震的对比分析得出，盖层断裂的最大震级 $M < 3$ ，即微震，一般情况下，我国西部地区的基底断裂不发生 $M > 5$ 的地震，东部地区的基底断裂可发生 $5 < M < 6$ 的地震。作者分析了我国大部分强震（ $M > 6$ ），发现它们都与地壳断裂或岩石圈断裂有关，历史最高震级 $M > 7$ 。所以发震断裂的鉴定和分析必须首先确定它们的深度类型。断裂深度类型的鉴定可以根据表 11 所列特征进行初步分析，进一步结合地质的和地球物理的或深部构造探测的资料确定。当然也可以利用历史地震震级来反推断裂深度。

（二）发震断裂鉴定要点

根据震源体在一次地震中释放的能量级，地震分为：1) 微震， $M = 1—3$ ；2) 弱震， $3 < M < 4$ ；3) 中强震， $4 < M < 6$ ；4) 强震， $M > 6$ ；5) 大震， $M > 7$ 。从工程安全出发， $M > 5$ 的浅源地震可造成建筑物破坏，因此要强调 $M > 5$ 的发