

編 号: (76)009

內 部

出国参观考察报告

第一届国际诱发地震讨论会
概况及加拿大参观纪要

科学技术文献出版社

出国参观考察报告
第一届国际诱发地震讨论会
概况及加拿大参观纪要
(内部发行)

编辑者: 中国科学技术情报研究所
出版者: 科学技术文献出版社
印刷者: 中国科学技术情报研究所印刷厂
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

开本 $787 \times 1092 \cdot \frac{1}{16}$ **2 印张 51千字**

统一书号: 12176.4 **定价:** 0.25元

1976年9月出版

毛主席语录

列宁为什么说对资产阶级专政，这个问题要搞清楚，这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业、干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

第一届国际诱发地震讨论会 概况及加拿大参观纪要

出席会议的中国代表团

前 言

第一届国际诱发地震讨论会于1975年9月15日至19日在加拿大阿尔伯省班佛市召开。中国代表团一行七人，应会议组织委员会的邀请，受中国科学院和水利电力部的委派，参加了这次会议。会后，代表团还在埃德蒙顿参观了阿尔伯达大学的土木系、地质系和物理系，在温哥华参观了不列颠哥伦比亚大学的土木系，在维多利亚参观了地球物理局的地震观测所。

这次会议是在联合国教科文组织、加拿大国家科学研究委员会和加拿大能矿资源部的协助下，由8个国际科学团体（国际大坝会议、国际工程地质协会、国际地震工程协会、国际地震与地球内部物理协会、国际岩石力学学会、国际土力学与地基工程学会、国际地质科学联合会、欧洲地震工程会议）主办的。会议组织委员会的主席是加拿大阿尔伯达大学地球与行星物理研究所所长高夫（D. I. Gough）博士。会议目的是讨论由于兴建水库、地下注水、采矿等工程活动所引起的地震活动和今后诱发地震研究的方向。

在此之前，联合国教科文组织曾于1970年组成一个水库地震现象工作组，于1970、1971、1973年举行过三次会议，发表了各次会议上提出的学术报告，并在第三次会上决定1975年在加拿大召开本次国际讨论会。

参加这次会议的共有101人，代表22个国家。会上宣读了62篇论文，分6个专题：1）诱发地震的机制；2）有关诱发地震的岩石机械性能和水力学性质；3）与采矿联系的地震活动；4）与水库蓄水联系的地震活动；5）与地下注水联系的地震活动；6）诱发地震的仪器观测。其中以水库地震方面的论文最多，约占半数。我国代表团在会上宣读了《新丰江水库地震的震源机制及其成因初步探讨》和《新丰江诱发地震的强震观测》两篇论文。

现将会上反映的诱发地震研究的现状和在加拿大参观访问中所了解的情况汇报后，不当之处，请批评指正。

本报告也提到了我国在会议上提出的论文和报告的内容。

目 录

一、水库地震	(1)
(一) 水库地震的史例	
(二) 水库地震与坝高和库容的关系	
(三) 水库地震与蓄水过程的关系	
(四) 水库地震的某些特点	
(五) 水库地震的地质背景	
(六) 水库地震的诱发机制	
(七) 水库地震的仪器观测	
二、其它诱发地震	(15)
(一) 地下核爆炸诱发的地震	
(二) 采矿活动诱发的地震	
(三) 深井注水和抽水诱发的地震	
(四) 灌溉诱发的地震	
三、本届会议涉及的岩石力学问题	(17)
(一) 裂隙岩体的机械性质	
(二) 岩石裂隙的水力学性质	
(三) 裂隙岩体的数字模拟	
四、在加拿大参观所见	(21)
(一) 加拿大水库地震研究的一些情况	
(二) 加拿大的地震区划	
(三) 强震观测工作	
(四) 不列颠哥伦比亚的抗震研究	
五、结语	(28)

一、水 库 地 震

水库地震是最早发现的一种诱发地震,历史较长,史例较多。同时水库是很重要的工程,而且遍布世界,所以水库地震最受人注意,成为这次会上讨论的重点。

(一) 水 库 地 震 的 史 例

自从发现水库蓄水诱发地震问题以来,已有40多年的历史。早在1931年希腊马拉松 (Marathon) 水库发生过地震,1933年阿尔及利亚的乌德福达(Oued Fodda)水库又发震,但当时尚未引起足够重视。直至1936年,美国库容达400亿立米的胡佛 (Hoover) 大坝蓄水后诱发了地震,才引起人们的重视,并开始进行研究。近十多年来,水库蓄水诱发地震的实例不断增加,截至这次会议期间为止,就已有资料统计,计有20个国家的近50个水库被较广泛地认为属于蓄水诱发地震。其中大部分属于弱震,强度大于5级的不超过10起,最大为6.5级,震中烈度为8度强(表1)。此外,还有不同国家的20余个水库,库区发生的地震可能也属水库地震,正在进一步监视和研究之中。

表1 震 级 $M \geq 5.0$ 的 水 库 地 震

水 库	国 家	坝 高 (米)	库 容 (亿立米)	震 级	震源深度 (公里)	震 中 距	蓄水年代	主震年代
新 丰 江	中 国	105	115	6.1	5	大坝东北1.1公里	1959	1962
柯 依 那 (Koyna)	印 度	103	27.8	6.5	8—10	大坝南3公里	1961	1967
卡 里 巴 (Kariba)	津巴布韦	128	1604	6.1	20	库水最深处附近	1958	1963
克雷玛斯塔 (Kremasta)	希 腊	165	47.5	6.3	20	大坝北25公里	1965	1966
胡 佛 (Hoover)	美 国	221	367	5.0	10	库 底	1935	1939
蒙台纳尔 (Monteynard)	法 国	155	2.4	5.0	>10	大坝附近	1963	1963
班 摩 尔 (Benmore)	新西兰	118	21	5.0	12	离大坝20公里内	1964	1966
黑 部 第 四 (Kuroba)	日 本	186	2.0	5.0	10	库 底	1965	1968
布金那拜斯塔 (Bajina-Basta)	南斯拉夫	89	3.4	4.5—5.0	7	库 底	1967	1967
渥洛维尔 (Oroville)	美 国	236	42	6.1	12		1968	1975

从这次会议提供的情况中,值得注意的是:鉴于水库地震的重要性和复杂性,一些国家已经开始不仅仅是对个别水库的诱发地震进行研究,而是就诱发地震问题对一系列大水库有计划地进行系统的研究和比较。

例如,在罗马尼亚,于1974年11月,已经由水电研究设计院和西德的卡尔斯鲁(Karlsruhe)大学协作,有计划地对各个大水库都进行地震监视,并于1975年4月开始在3个水库设台观测——别卡兹水库(Bicaz,高100米的重力坝),洛脱鲁维特拉(Iotru-Vidra,高约90米的土石坝),及阿尔其斯维特拉鲁(Arges-Vidraru,高166米的拱坝)。

瑞士也有对阿尔卑斯山区所有大坝进行地震监视的计划。1973年2月,首先在埃摩逊(Emosson)湖设台观测,仅1973年夏季就在库区20公里半径范围内记到了 $M=1.0$ 左右的30次微震。

印度近十年来对发生最大水库地震的柯依那(Koyna)坝所在的印度盾地西部边缘地区的9个水库系统地研究了水库地震问题。

美国曾在垦务局和加利福尼亚(California)水利分局的协作下,由国家海洋调查局地震分局搜集了美国各地水坝30多年的地震资料,从中提出了夏斯塔(Shasta)、恩蒂亚(Entiat)和平头(Flat head)等水库的诱发地震问题。这次会上又着重介绍了为查明作为核电站冷却池的安娜(Anna)湖诱发地震问题,对电站所在省区的59个水库研究比较了诱发地震可能性的问题。

看来,不少国家对水库地震问题都很重视。系统地开展对不同水库、蓄水前后进行比较的工作,对进一步搞清水库蓄水诱发地震问题是十分必要的。

这次会议中新提出的水库地震实例不多。日本继黑部第四的水库地震后,又提出了Kamafusa坝蓄水后地震活动性的增加与水位有关;瑞士的埃摩逊(Emosson)湖也发现微震活动与蓄水有关。特别是对于1975年8月1日美国涅洛维尔(Oroville)坝发生的地震,会议组织了专题介绍。内容包括发生强震后两个月即调查库区历史地震,利用临时增设的台阵研究余震机制,应用地球资源卫星照相、日出前红外成像、全息航空照象、雷达扫描等新技术研究库区地质构造和震后地表破坏等方面的情况。该坝高236米,库容42亿立方米。库区原属弱震区,但考虑到水库的重要性的和水库地震的可能性,主要的水工建筑物都进行了抗震设计,并在蓄水前5年就设台进行监视地震活动,坝顶及坝基设置了强震仪。水库蓄水已7年,在某些资料中曾被作为高坝大库蓄水后未发生地震的例子引用。但在蓄水速率达最大值的一个月后就发生了近6级的强震。目前大坝正按此次实测的加速度记录重新校核抗震强度。

认识来源于实践,对水库地震史例的调查,可以提供初步的实践经验。通过对这些史例的分析,不仅提出了进一步研究水库地震的问题和途径,为探索新的理论和假设提供启示,又是对已有的理论和假设的检验。目前,对水库地震的了解和研究都还很不够,史例的调查和分析就显得更为重要。

(二) 水库地震与坝高和库容的关系

法国的罗泰(J. P. Rothe')曾提出水头压力较之库容或水面面积更为重要,但也有认为库容和库区面积更为重要的。

就已有的水库地震史例看,坝高从最低的10米(美国Cabin Creek)到最高的317米(苏联Hypek),库容从最小的40万立方米(瑞士Verzasca)到最大的约1700亿立方米(津巴布韦

Kariba), 都有发生水库地震的史例, 似乎没有规律, 但仔细分析起来, 还是能找出某些趋势。

参照国际大坝会议的统计资料, 截至1973年为止, 各国超过15米的各类水坝共 13000 多座, 而1975年前建成的100米以上的高坝则共406座。目前水库地震的实例总数约70余个。在表 2 和表 3 分别给出了不同坝高和库容的水库中有水库地震的例数。

表 2

坝 高 (米)	> 200	> 150	> 100
水 库 总 数	31	87	406
诱发水库地震实例数	8	14	28
水库地震占 %	26	16	7

表 3

坝 高 (米)	> 200			> 150			> 100		
库容 (亿立米)	>1000	>100	>10	>1000	>100	>10	>1000	>100	>10
水 库 总 数	1	9	19	1	12	40	5	36	119
诱发水库地震实例数	0	3	5	0	3	7	2	7	19
水库地震占 (%)		33	26		25	18	40	20	17

通过这些实例的统计, 可以看到:

1. 发生水库地震的实例占已建水库总数的比例是很微小的, 但在高坝中的比例则显著增高, 而且坝愈高, 比例也愈大。在坝高超过200米的水库中, 发生水库地震的占了1/4强。
2. 从水库库容看, 同样有库容愈大, 水库地震的发生率愈高的趋势, 而且这种趋势随坝高的增加更为明显。对于坝高大于100米, 库容大于1000 亿立米的水库, 比率高达40%。
3. 一般讲, 震级较高的水库地震, 其坝高和库容都比较大, 震级在 6 以上的水库地震都发生在坝高大于100米, 库容大于25亿立米的情形。

因此, 可以认为高坝大库产生较大水库地震的可能性要大, 这个趋势是比较明显的。

在这次会议中, 日本岡本舜三指出, 日本限于地形条件, 其水库库容一般不大, 最大的仅 6 亿立米, 平均只 1.7 亿立米。这或许可以解释为什么日本新构造强烈, 地震频繁, 但只有两个水库地震实例。在另一方面, 也要看到, 在已有的水库地震实例中, 坝高小于100米, 库容小于10亿立米的为数仍然很多, 其中库容小于 2 亿立米的约占 1/3 以上, 而且目前唯一的坝高大于200米, 同时库容超过 1000 亿立米的丹尼台约翰逊水库却并未发生水库地震。可见问题是复杂的。

从库水的诱发机制看, 库水荷重的作用应当主要和库容有关。对一些震级较高的水库地震实例, 曾经进行过计算如表 4 所示。

表4中, 除克雷玛斯塔粗略地考虑了岩体塑性影响外, 其余都是按均质弹性体计算的。这当然与实际情况有相当差异, 但从趋势来看, 库容对库水荷重引起的后果的影响是明显的。

至于库水的渗透作用, 则不仅与水头压力直接有关, 而且与决定岩体渗透范围的库容也有关。

值得注意的是, 根据深井注水诱发地震的经验, 在岩体深部需要100巴左右的压力才能

表 4

水 库 名 称	库容 (亿立方米)	库水荷重引起的库区 最大位移 (厘米)	备 注
卡 里 巴	1600	23.5	D.I.Gough
胡 佛	360	17.5	C.Zachos
新 丰 江	100	10	
克雷玛斯塔	35	2	C.Zachos

触发地震, 而100米深的水库 (在地表的压力仅10巴), 甚至还有10米深的就触发了水库地震。看来, 低坝水库的水库地震的成因更难解释。

(三) 水库地震与蓄水过程的关系

1. 水库水位的影响。多数水库地震的强度和频度与水库水位相关。这种相关性通常被视为水库地震的重要标志, 但这种相关性是十分复杂的。

已有的水库地震可以粗略地分为两类。一类是具有明显的主震的, 目前不超过20例, 但大多数是震级较大的。另一类是蓄水以后微震频度明显增长, 具有微震群的形式, 在现有史例中占大多数。

第一类又大致有两种情况: 一种是蓄水后不久发生微震, 而在库水蓄至高水位后不久就发生主震。例如: 克雷玛斯塔 (Kremasta) 水库在水位快速增长至离最高水位10米时发生了6.3级主震; 蒙台纳尔 (Monteynard) 水库在蓄至130米深的最高水位后10天发生了5.0级主震; 我国新丰江水库在蓄至115米高程的高水位后4个月发生了6.1级主震。另一种情况是蓄水至接近最高水位后, 经过相当长时间, 在水位稍有增加的情况下发生主震。例如, 美国胡佛 (Hoover) 坝蓄水3年多接近最高水位后, 经过一年, 发生了5级主震; 日本黑部第四水库在水位高达150米水头后, 放慢蓄水速度, 在蓄满余下的30米水头的4年过程中的第3年, 发生了3.8级的主震。津巴布韦的卡里巴 (Kariba) 水库是在接近最高水位5年后水位稍有增长时发生主震的。印度柯依那 (Koyna) 水库在高水位后5年多才发生6.5级主震。而美国的渥洛维尔坝在蓄水已7年后才发生约6级的主震。这两种情况, 除了地质背景上的差异外, 其库水诱发机制也应有所不同。对卡里巴水库, 高夫 (D.I.Gough) 根据计算结果认为: 由于水库库容很大 (1600多亿立方米), 蓄水至高水位后, 只要水位稍为增长, 岩体中剪应力增值区的体积变化就很大, 这和地震频度的增加是相应的。

第二类水库地震, 大多在蓄水后不久就发生, 一般其精确时间不易肯定, 因为多数水库是在微震发展到一定程度才设置高灵敏度的观测台站。但是, 也有例外, 如美国卡滨溪 (Cabin Creek) 水库, 于1925年蓄水后, 经42年至1967年, 地震频度突增。平头水库 (Flat head) 1937年蓄水, 经32年于1969年开始出现微震群, 持续至今。意大利派夫狄卡杜尔 (Piave de cardore) 坝于1949年开始蓄水, 1951年后有过微震群, 经过15年, 于1964年又出现微震群, 同年发生了欧洲地震台都记录到的相当强烈地震。希腊马拉松 (Marathon) 水库1929年开始蓄水, 1931年开始感觉地震, 经过9年至1938年, 发生了5级主震, 地震活动持续至今。这些实例若确属水库地震, 则其诱发机制值得深入研究。

地震频度与库水位的对应关系, 在几个震级较大的水库地震实例中已有较多的研究分

析。但不同作者,由于处理方法不同,得到的结果差异很大。例如印度古普塔(H. K. Gupta)等对柯依那、卡里巴和克雷玛斯塔等三个水库(发生了6级以上的地震)的分析结果是:如按每三个月的平均水位和地震总数分析,则3个水库的对应关系都比较好,其相关系数分别为0.93、0.74和0.69。但希腊帕帕扎丘斯(B. C. Papazachos)按每月统计的结果是:在柯依那水库的地震频度与水位之间找不出相关性,卡里巴水库相关性也不强,只是克雷玛斯塔水库前震与水位对应较好。他并认为微震群类型的水库地震,一般在最大地震出现前,频度与水位对应较好。我国新丰江水库也是前震的频度与水位对应较好。密凯(Mickey)对美国胡佛坝从1939至1951年的余震进行了统计,认为地震频度与季节性的水位变化有明显的相关性。也有人认为水库地震的发生主要与水位增长速率有关。在已有的史例中、美国渥洛维尔、希腊马拉松、澳大利亚泰平果(Talbingo)等水库地震都与蓄水速率有关。美国克拉克山水库的地震活动与水位增减的速率有关。奥地利的歇莱基斯(Schlegeis)水库的地震活动都与最低水位和最高水位降低速度相关。可见,地震活动与库水位对应关系是十分复杂的。

2. 水库地震的持续时间。多数水库地震持续很长,十几年至几十年仍不停息,例如新丰江、胡佛等坝。但也有不少例外,例如瑞士的康脱拉(Contra)坝,1965年蓄水后有微震群,至1966年就完全停息;西班牙的卡麦列拉(Camarillas)水库,1960年蓄水,至1961年有震,同年发生3.5级地震,至1962年即平息,法国的伏格朗斯(Vouglans)水库,1960年蓄水,1971年发生4.5级地震,随即平息;阿尔及利亚的乌德福达水库蓄水后不久发生地震,半年即停息,但以后在离坝30公里处又发生了一次7度地震;意大利的皮斯塔拉(Piastra)水库1965年蓄水后不久有震,1966年有6—7度地震,同年10月就停息。

值得注意的是在这些历时不久就停息的水库地震中,康脱拉水库是在1966年放空后再蓄满时地震完全停息;卡麦列拉水库是在1961年蓄水、放空、再蓄满后发生主震,至1962年停息;伏格朗斯水库是在1968年蓄水、1971年放空、同年再蓄水后不久即发生4.5级的主震,在20多个余震后平息。其它由于放空后再蓄水而影响地震活动的实例还有:法国的格兰特凡勒(Grandval)水库,1960年3月有震,1962年水库放空、再蓄、地震活动增长,至1963年有5度地震;1964年放空、1965年再蓄,即未见再有较大的地震活动。南斯拉夫格兰卡勒窝(Grancarevo)水库,1967年蓄水,在1968—1970年内曾三次放空、再蓄、在库区半径5公里范围内微震活动剧增。巴基斯坦塔尔别拉(Talbela)水库,1974年蓄水至100米水深时,因事故快速放空,在库区40公里范围内地震活动有所减少,但变化不大。

上述实例,水库发震后不久就停息。其中多数水库曾放空后又重蓄,但地震活动,有的因而停息,有的却反而加剧,引起主震,有的则变化不大,这些不同情况是很值得研究的。

3. 水库蓄水对地震活动的抑制作用

在已有的水库地震史例中,虽然绝大多数是蓄水导致地震活动加剧的,但值得注意的是,最近也出现了一些蓄水后地震活动减少的实例,例如,美国胡佛坝上游的两个梯级佛来敏谷(Flaming Gorge)和格兰峡(Clan Canyon)蓄水后,连同胡佛坝的地震活动性都见减小(Mickey,见表5)。巴基斯坦曼格拉(Mangla)水库1967年蓄水,蓄水前14个月的地震次数平均每月1.65次在蓄水后的6年中,最后16个月的地震次数平均每月0.63次,说明蓄水5年后地震活动有明显下降(R. L. Brown)。

岩石力学的研究成果表明,在一定的温度和围压条件下,围压有效值的降低,可使岩体从产生地震的粘滑机制(Stick slip)转变为产生蠕变的稳定滑动,从而减少了地震活动性

(W. F. Brace)。

表 5

水 库 名 称	蓄 水 时 间	地 震 频 度					
		1961	1962	1963	1964	1965	1968
佛 莱 敏 谷	1962 年11 月	701	669	665	258	85	251
格 兰 峡	1963 年 5 月	170	149	172	62	50	109

这次会议中,布番 (C. G. Bufe)报告了美国加利福尼亚州的利洛安德逊 (Leray, Anderson) 水库, 1973年10月发生了4.7级地震, 但没有在加州常见的余震现象。水库附近桥梁严重变形, 据推断是附近卡拉范拉 (Calaveras) 断层蠕动结果。从产生蠕动和没有余震这两点推论他认为是孔隙水压作用使断层从粘滑机制转变为稳定滑动。

在研究克雷马斯塔水库地震时, 希腊就有人认为, 该区原属地震区, 1966年6.3级地震的发生, 可能是原有构造应力的释放恰好与蓄水时间吻合; 甚至认为水库触发地震在某种程度上可能是对该区固有构造应力的释放的一个“安全活塞”(J. P. Rothe)。哥古尔 (Goguel) 也曾提出, 库水荷重对库区地震活动如有影响, 则将是减少岩体深部的围岩应力差, 因此可能是增加地区构造稳定性的一个因素 (C. Lomnitz)。

上述情况促使对关于库水对地震活动的影响的理解和思路进一步开拓。目前这类实例不多。可能还有未被发现的类似实例。总之, 可能库水对地震不仅有“诱发”作用, 而且, 在一定条件下, 也具有某些“抑制”作用。这是在水库地震的研究中很值得重视的问题。同时, 也说明了在蓄水前进行观测, 以便取得蓄水前后对比资料的必要性。

(四) 水库地震的某些特征

水库地震的特点是指其与一般构造地震的区别而言的, 是特定的地质背景和库水诱发机制的反映。研究这些特点, 有助于对水库地震的判断和识别, 是研究水库地震的入门。水库地震的史例, 虽然已渐增多, 但其中深入进行了研究的并不很多, 且往往缺乏蓄水前的对比资料和受台网和仪器精度不足的局限。因此, 只能从少数震级较大的水库地震实例中归纳水库地震的特点。

1. 水库地震的时空分布

水库地震发生在蓄水之后和库区范围之内。这是所有史例最普遍的一个特点, 也是鉴别水库地震的最直观和最有说服力的标志。

关于水库地震和蓄水过程的相关性, 如上节所述, 虽然相当复杂, 但总的看来水库地震和蓄水有关这一点是毫无疑问的。

至于水库地震的震中位置就24个有震中数据的实例来看大多在库底和库区边缘。这次会上有人提出库区25公里范围为限 (D. W. Simpson), 也有人从纵、横波到达时差 $S-P=1-2$ 秒为限 (日本 Zird Suzuki)。实际这个范围与水库大小有关。但震中位置的准确性往往取决于台站的数量和仪器的精度。例如, 印度柯依那水库的主震震中位置, 印度气象局和美国测量局两次测量的结果有较大差别, 差距竟达25公里。希腊克雷马斯塔水库地震震中位置

测定误差达5—10公里 (C. Zochos等)。但震中不出库区邻近是可以肯定的。

震源浅也是水库地震的一个特点, 因而波及范围不大, 地震时常可听到类似闷雷的声响。根据15个实例的数据, 震源最浅的是瑞士的康脱拉水库, 仅150—600米; 其它实例中1—3公里的5个, 5—7公里的3个, 10—20公里的6个, 震源深度在3公里以内的多是弱震。震级较大的克雷玛斯塔和卡里巴水库, 震源深度达15—20公里, 涅洛维尔深12公里, 柯依那深8—10公里, 新丰江深五公里。8个实例有地震时发出声响的报导。实际上, 一般破坏性构造地震的震源也不深。历史上不少大震的深度小于10公里, 甚至仅2—5公里。日本1923年关东大地震, 震源深度0—10公里; 1930年北丹俊地震深0—5公里; 1965—1967年松代地震群中震源浅的仅3—6公里, 深的也仅10—13公里, 摩洛哥1960年的阿加迪尔 (Agadir) 地震震源深度仅2—3公里。此外震源深度的测定有一个精度问题。

2. 地震序列型式

通常认为水库地震有明显的前震, 具有前一主一余的序列型式。属于茂木 (Mogi) II型 (J. P. Rothe', H. K Gupta), 从而有别于一般的构造地震。后者大多没有前震或有很少前震, 属茂木 I 型。新丰江、柯依那、卡里巴、胡佛等水库地震确实都具有这一特点。但蒙台纳尔水库主震前只有两次小震, 涅洛维尔水库的前震不明显, 伏尔格朗斯水库没有前震。美国的利洛安德逊水库没有余震, 希腊克雷玛斯塔水库的前震时间不长, 次数也不多。同时, 多数水库地震具有微震群的型式, 没有明显主震。例如瓦昂 (Vojont), 馬拉松, 乌德福达, 努列克, 皮阿斯塔, 康脱拉, 曼格拉, 埃莫逊湖 (Emosson) 等水库。

3. 震级-频度曲线 通常震级M与频度N的关系可表为 $N = \beta e^{-aM}$ 或 $\log N = a - bM$ (Gutenberg, Richter) 水库地震的前震和余震的b值一般高于本地区相同震级的构造地震, 而且前震的b值比余震要大, 这也和一般构造地震的情况相反。

表6、表7列出某些水库地震和一般构造地震的有关参数 (H. K. Gupta, B. C. Papaza Chos)。可见水库地震的b值略高于一般构造地震但相差不多。此外, b值的确定跟台站仪器的灵敏度有很大关系 (C. Zachos)。有人认为b值差异还不足以作为水库地震的判据。

表6 水库地震有关参数

水库名称	主震 M_0	最大余震	M_1/M_0	$M_0 - M_1$	前震b值	余震b值	余震衰减 系数p	震源深度 (公里)
		M_1						
克雷玛斯塔	6.2 _(6.3)	5.5	0.89	0.7	1.41	1.12	0.8 _(0.7)	15—20
柯依那	6.0 _(6.5)	5.2 _(5.4)	0.83 _(0.8)	0.8 _(1.1)	1.87	1.3	1.0 _(0.7)	8—10
卡里巴	6.1	6.0	0.98	0.1	1.13	1.03	1.0	20
新丰江	6.1	5.3	0.87	0.8	1.12	1.04	0.9	5
胡佛	5.0	4.4	0.88	0.6				10
蒙台纳尔	4.9	4.5	0.90	0.4				
曼格拉	3.5	3.3	0.94	0.2				
涅洛维尔	6.1 _(5.7)	2.5						12
黑部第四	3.8							3

表7 若干构造地震有关参数

地 震 名 称	M_0	余震b	p
San Francisco, 1957	5.3	0.7	1.1
Allutian	8.3	1.3	1.0
Alaska, 1964	8.5	1.0	1.1
Parkfield, 1966	5.5	0.9	1.0
Cephalonia, 1953	7.2	0.8	0.8
Sophades, 1954	7.0	0.9	0.9
Amogos, 1956	7.5	0.9	1.9
Magnesia, 1957	6.8	0.9	1.5
印度半岛		0.47	
非洲		0.84	
希腊		0.82	

4. 余震的衰减

余震的频度一般按指数规律震减 $n=bt^{-p}$ 。通常认为一般构造地震的P值都大于1.0,而水库地震的P值一般都小于1.0。从表6、表7的数据看,其差别并不明显。个别水库地震如渥洛维尔的余震P值达1.1,有的构造地震P值也有仅0.8的。此外,余震频度与台站仪器灵敏度有关,而且有时余震也不易判别。例如,对柯依那库区1973年10月17日发生的5.2级地震,就被认为与库水无关,不能作为水库地震的余震。在克雷玛斯塔水库也有类似的情况。

5. 最大余震和主震的差值

表6中几个水库地震的余震b值都大于1.0,但其最大余震 M_1 和主震 M_0 相差甚小,其比值在0.83—0.98之间。麦克埃维里(Mcevilly)等根据美国加州经验导出:对一般构造地震, $b=0.4-0.5$ 时 $M_1/M_0=0.7$; $b=0.6-0.8$ 时, $M_1/M_0=0.6-0.7$ 。巴特(Bath)认为对于一般构造地震, $M_0-M_1=1.2$ ($M_1 \geq 5$);而表5中6个水库地震的(M_0-M_1) 在0.2—0.8间,平均为0.5,较一般构造地震要小很多。这些都说明水库地震的余震能量较大。

6. 纵横波速比的负异常

在地震前岩体裂隙增多,弹性模量降低,纵波速度下降,因而在一段时间内出现纵横波速比负异常现象。根据我国新丰江水库地震的研究,主震前的波速比异常的持续时间比相同震级的一般构造地震为短,其异常区范围较小。这种现象可能是由于库水渗入岩体,导致波速比异常,但影响范围较小。目前这方面资料还很少。

(五) 水库地震的地质背景

这次会议对水库地震的库区地质背景讨论较少,提供的资料也不多。从已有的史例资料分析中,大致可以归纳为以下几点。

1. 库区常有较大规模的断层存在。例如卡里巴(Kariba)、克雷玛斯塔(Kremasta)、蒙台纳尔(Monteynard)和胡佛(Hoover)等坝以及康脱拉坝(Cantra)的伏尔果诺(Vo-

rgonos) 湖等水库诱发的地震, 其库区都有较大的断层存在。这些断层具有下列特殊性:

(1) 不少水库地震是发生在活动断裂的弧形拐点或几组断裂的交叉地段, 特别是在断陷盆地垂直差异运动较大处。例如, 我国新丰江水库就是在“S”形构造转弯部位, 也正是桂山急剧隆起边缘弧形带, 新丰江花岗岩体块断隆起轻度上升区和河源断陷盆地相对下降区三者交汇处。其他一些震级较大的水库地震其库区位于断陷盆地的还有胡佛、克雷玛斯塔、卡里巴等。

(2) 库区断层类型主要是正断层或走向滑动断层, 无论是库区水重量或孔隙水压力都是对最大压应力为竖向的正断层影响大, 而对最大压应力为水平向的冲断层影响少(D. W. Simpson)。根据26个水库地震实例的分析, 其中属于正断层型和走向断层型的占23个, 属冲断层的仅3个(m. m. Clark), 我国新丰江水库地震就是沿北北西较直立的断层面发生左旋走滑型错动。最近在美国发生的渥洛维尔水库地震, 其余震的机制分析也给出右旋平移及正断层运动(W. U. Savage等)。卡里巴、克雷玛斯塔都是左旋正断层, 柯依那(koyna)为左旋平移断层。

(3) 水库地震库区的断层多半是陡倾角的, 而且水库常位于下降一侧。从孔隙水压降低断层面法向有效应力的角度来看, 最不利的情况是当断层为竖立时(D. I. Gough, D. W. Simpson)。根据对24个水库地震的统计, 断层倾角大于 45° 的占23个, 而小于 45° 的有一个(m. m. Clark)。我国新丰江水库的主震就是沿较竖立的断层面发生。

(4) 断层带内透水而断层两盘不透水, 从孔隙水压对断层滑动的影响来看这是最不利的(D. I. Gough)。

(5) 库区断层多是近代有活动的断层, 根据对27个水库地震的统计, 库区断层年代小于200万年的占11个, 而大于6500万年的只有7个(m. m. Clark, H. И. Николаев)。

2. 库区岩体裂隙发育, 岩性不均一, 或有易受水化作用的岩体, 如灰岩、砂岩、红土或其他硅质岩体(H. И. Николаев, Carl Kisslinger, D. W. Simpson, J. P. Rothé)。具有这类地质背景而诱发较大地震的水库有乌德福达、蒙台纳尔、柯伊那、康脱拉、瓦依昂(Vojont)等, 根据对已有水库地震的统计, 库区岩性为灰岩、砂岩、页岩的占一半以上。比较典型的例子是阿尔及利亚的乌德福达水库, 库区为第三纪砂岩, 坝址为早侏罗纪镁质灰岩背斜轴顶部, 估计地震可能与背斜下石膏岩体浸水膨胀有关(A. Božović)。与此类似的是西班牙的卡麦列拉(Camarillas)水库, 河流切割了侏罗纪、白垩纪灰岩溶洞(J. P. Rothé)。这次会议中, 美国基斯林格(Carl Kisslinger)对这类岩体提出了应力腐蚀的概念, 即当岩体处于受力情况下, 浸水可以加速其裂缝的发展。这有助于解释在这类地区易于发生诱发地震的原因。

3. 库区地形陡变, 地貌上差异大(C. Lomnitz)。例如, 印度盾地西海岸到阿拉伯海的地形陡变达2000米, 柯依那水库就位于该地区。印度的古哈(S. K. Guha)等指出, 在这个印度盾地边缘地区的另外一些水库, 如Kinnarsani, Sholayar, Mangatam, Parabikulam, Shararaty, Ghirny及Ukai等, 都有诱发地震的问题。

4. 库区位于地壳的余热区, 稳定地块边缘, 温泉出露或火山活动地段(D. W. Simpson, C. Lomnitz, H. K. Gupta)。例如柯伊那、卡里巴、克雷玛斯塔等水库都有这类特征。

以上是从目前已有的水库地震史例中初步归纳的一些较普遍存在的地质构造条件。一般说, 具有这些条件的地区, 其构造应力应当是很高的。因此, 不少人认为, 库区地应力场

中, 应力差和应变率已接近临界状态是水库蓄水诱发地震的内因 (m. m. Clark, C. Lornnitz, H. И. Николаев, A. Božović)。实际上, 在这些构造条件中, 有不少也是发生一般构造地震的地质条件。所以有人认为, 发生水库地震的库区应当是地震活动性较强的地区 (Carl Kisslinger)。这些事实, 目前常被引用来判断能否发生水库地震, 同时作为库水仅起“触发”作用的依据。苏联的尼古拉耶夫 (H. И. Николаев) 和南斯拉夫的勃查维克 (A. Božović) 进一步推论: 既然库水只起“触发”作用, 它就只能影响到地震的发生时间, 震中位置和频度, 而不能影响到地震的强度。水库地震的强度是由本地区固有的构造应力条件决定的, 水库蓄水不会增加库区原有的地震危险性, 所以水库地震的强度不能超过该地区在建库前所预期的地震强度。对于不少水库蓄水后发生了意外的大地震的事例, 他们则以原来估计的地震危险性不准作解释。按此观点, 则如果库区基本烈度定得较准, 则研究水库地震的现实意义就不大了。显然, 这样是把复杂的问题过于简单化了。

水库地震的史例表明, 水库地震并不限于新生代褶皱带或强地震区。在24个史例中, 发生在新生代褶皱带的仅14个, 而在日本、意大利这些新的构造强烈、地震频繁的地区, 水库地震的史例却很少。再从20个水库地震的统计看, 库区原来就属地震区的仅占8个, 特别是震级 $m \geq 5$ 的水库地震, 大多发生在非震区或弱震区。例如, $m \geq 6$ 的史例中, 我国新丰江库区, 历史地震未超过6度, 印度柯依那水库位于前寒武纪地带, 一直被认为是属于稳定的印度盾地, 历史上仅发生过稀少的弱震 (J. P. Rothé)。卡里巴水库所在的峡谷, 建库前也没有地震的记载。这次会议上也指出, 美国渥洛维尔水库地区原属于非地震区 (C. J. Cortright等)。只有希腊的克雷玛斯塔水库原属地震区, 库区灰岩具有较高的地应力, 并存在北—东、南—西两组断层系 (C. Zachos等)。在 $m = 5$ 的水库地震史例中, 美国的胡佛坝, 在建坝前15年间未曾有过地震, 库区南缘几条主要断层被认为是自上新世以来已进入稳定状态的 (D. S. Gardner)。新西兰的班摩尔 (Benmore) 水库, 建库前从未有过 $m > 4$ 的地震 (G. A. Eiby), 是处于地震活动性较低的地区。法国蒙台纳尔水库, 虽然库区地质构造复杂, 断层、裂隙呈网状发育, 但建库前该地区从未有地震。法国的另一个发生V度地震的格兰特瓦勒 (Grandval) 水库也位于中央地块的赫新尼地台, 属非震区 (J. P. Rothé)。

在这次会议中, 印度的古哈 (S. K. Guha) 认为: 就库水触发地震而言, 位于印度半岛周围的低构造应力区的一些水库更为敏感。美国的克拉克 (M. M. Clark) 等对35个水库地震统计的结果, 库区原属非震区或低震区的占25个。

另一方面, 有不少修建在地震区的高坝, 迄今并未发生水库地震。例如: 印度的拉姆肯达 (Ramganga, 高125米), 加拿大的丹尼尔约翰逊 (Daniel Johnson 高214米) 及买加 (Mica, 高242米), 苏联的勃拉茨克 (Братский, 高125米), 美国的德伏歇克 (Dworshak, 高219米) 等以及日本、意大利、智利的许多大坝。

因此, 建坝前库区的地震活动性尚不足以作为能否发生水库地震的根据。至于地质构造条件更是十分复杂的问题, 不能从较短时期的历史地震活动来判断构造的稳定性。目前所能查明的地质背景, 主要是浅层的构造条件, 而水库地震发生在地下几公里深处。深部构造往往很难完全查清。例如我国新丰江水库。就是经过大量物探工作以后, 才发现了东西向重力异常带, 从而推断存在着东西向的深部断裂。又如印度柯依那水库, 库区地面为构造变动不明显的中生代“高原玄武岩”, 反映了可能隐伏着前寒武纪的基底断裂。在这次会议中, 印度的布拉赫曼 (N. Krishna Brahman) 等报告指出, 最近蒐集的印象德干高原35万平方公里面积的重力资料显示出、通过柯依那地区的低重力异常带。柯依那水库地震的地质背景还

有其他一些解释。印度的古普塔 (H. K. Gupta) 假定存在着顺河断层, 使库水能渗入岩体10—15公里深处, 导致断裂面滑动。墨西哥的洛姆尼兹 (C. Lomnitz) 则提出, 南印度西部山脉边缘的差异应力可达150巴, 以此说明库区存在很高的构造应力。对同一个库区地质背景作了种种不同解释, 可见问题的复杂性。此外, 美国渥洛维尔水库, 库区虽然以前未发现断层系和地表断裂, 但地震发生后, 美国水利部门应用地球资源卫星摄影、彩色红外线成象等一系列新技术进行大面积的勘探, 查清了在大坝以南7哩处有1哩长的地表断裂, 并进一步查明地下有隐伏断层。

所有这些都说明, 对史例提供的地质背景资料, 需要慎重对待, 作由表及里、去伪存真的认真分析。墨西哥的洛姆尼兹就认为: 由于水库地震的史例毕竟还很少, 而可能作为判断诱发地震的地质背景的因素却很多, 因而虽然可以找出若干水库地震的地质构造特征, 但从统计学的观点来看, 意义不大, 需要深入分析研究。

(六) 水库地震的诱发机制

诱发机制是这次讨论会的一个重要议题。会议集中讨论了水库地震可能的诱发因素, 大致可综合为三个方面:

1. 库水荷重引起的库区岩体变形和应力以及沿断层等尖锐的几何界面的应力集中。

主要的工作还是将岩体作为均质弹性体, 按勃希涅斯克 (Boussinesq) 方法计算水体重量的影响。会上高夫 (D. I. Gough) 报告了对赞比亚河莫桑比克 (Mozambique) 水库的计算结果。该水库除了主库以外还有一些峡谷, 因此, 计算时考虑了水库的几何形状。结果表明, 局部峡谷对岩体应力分布有很大影响; 但就应力数值看, 与过去对卡里巴水库计算的结果相近, 最大剪应力增量约2~3巴。世界上其它一些水库的计算结果量级也相似, 因此尽管计算的模式和方法尚有改进余地, 但应力增量的量级似不致有太大变化。对于考虑库底岩体内有大断层的情况, 水体重量在断层面可能引起较高的应力集中, 但目前尚无定量的计算方法和结果。

2. 库水渗透增大岩体孔隙水压力, 导致断层面有效应力的减少及其抗剪强度的降低, 目前, 较普遍地认为, 这是库水诱发地震的主要因素。

通常按照修正的库仑—摩尔剪切破坏理论进行解释, 即断裂面剪切强度

$$\tau = \tau_0 + (\sigma - p) \operatorname{tg} \phi$$

式中: τ_0 是内聚力、 σ 是面上法向应力, p 是孔隙水压力、 $\operatorname{tg} \phi$ 是内摩擦系数。如果断裂面上的剪应力值超过其剪切强度, 就可能产生错动。

豪威尔 (D. A. Howells) 曾将带有断层和不连续面的库底岩体简化为等效的均质连续体, 按一维扩散方程, 求蓄水后不同时刻、不同深度的孔隙压力的分布。如取等效的渗透系数为1.16达西 (darcy)、比容为 10^{-5} 巴 $^{-1}$, 则当水深为100米时, 经过100天以后, 在5公里深度以上的孔隙水压力可大于5巴。

斯诺 (D. T. Snow) 假定岩体内有一组可以变形的垂直裂缝, 裂缝以外岩体的孔隙度较小, 库内各点水深 h 相同, 按二维问题计算了由水重和渗透孔隙水压引起的水平有效应力的变化分别为

$$\Delta\sigma_{ex1} = \frac{E}{cs + 1 - \nu} \gamma h = ah\gamma$$

$$\Delta\sigma_{ex2} = \frac{E}{cs + 1 - \nu} \frac{\nu - 1}{\nu} \gamma h = b\gamma h$$

式中： γ 为水体容重， E 、 ν 分别为岩体弹性模量及泊松比， c 、 s 分别为裂缝的法向刚度及间距。

对于浅部受过风化和破裂间距较小的岩石，参数取值为 $\nu=0.3$ ， $c=45$ 巴/厘米， $s=25$ 厘米， $E/cs=300$ ；对于深部坚硬、新鲜、破裂间距宽的岩体取 $\nu=0.3$ ， $c=10^4-10^5$ 巴/厘米， $s=500$ 厘米， $E/cs=2 \times 10^{-3}-2 \times 10^{-2}$ 。

由此，分别求得浅部的 $a=10^{-3}$ ， $b=-2.3 \times 10^{-3}$ ，而深部的 $a=0.43$ ， $b=-1.0$ 。可见在靠近库底的浅部岩体中，无论是水重或渗压引起的水平有效应力变化都可忽略不计。在深部岩体中，当库水深为100米时，由水重引起的增量为4.3巴，由渗压引起的下降值达10巴。

应当指出，由于目前对库区岩体的应力状况、物理力学性质、水力学条件、特别是构造、裂隙的情况都很难搞清，上述计算的模式和参数取值都有相当的任意性，其结果只能作为参考之用。总的看来，库水渗透作用的影响比水重更显著。

3. 库水对库区岩体的物理和化学作用，即其对断层裂隙面弱化、润滑、腐蚀等作用。

我国在新丰江水库地震的研究中，曾提出软弱结构面的物质泥化影响。这次会议中基斯林格提出了库底岩体的应力腐蚀问题。认为在硅酸盐岩石中端部具有高拉应力的裂隙，库水浸入后，由于裂隙端部硅—氧键的水化作用，导致裂隙的扩展。

对于库水的这些诱发因素需要综合考虑。目前被认为比较合宜的解释是：库水沿岩体裂隙渗透，由于孔隙水压的作用及其对断裂面的润滑、弱化作用，降低了岩石的剪切强度，再加上库水重量产生的剪应力，首先在岩体浅部诱发初始应力的释放，形成一系列小地震，从而在断裂端部引起新的应力集中，使断裂面向深部扩展，库水继续向深部渗透。在一定的地质背景下，这个过程可能不断发展，以致在深部诱发主震。因此，库水并不一定只是“触发”已经处于临界状态的高应力的释放，而是有使岩体破裂体积不断扩大、应变能不断集中，酿成较大地震的可能。我国新丰江水库地震的研究对于库水诱发机制提供了不少有意义的资料和论述。

(七) 水库地震的仪器观测

“诱发地震的观测仪器”是这次会议的六个议题之一。这个议题主要涉及了水库诱发地震的仪器观测，介绍了已经进行地震观测的若干事例，并就大坝及水库地区进行地震活动性的仪器监视计划提出了若干建议。这里主要根据会上卡纳赛维奇 (E.R. Kanasevich) 的评述进行介绍。

1. 在1936—1970年间，只有那些蓄水后很快引起地震活动的大水库用了1—3个地震台进行监视，记录的仪器比较简单。地震仪器的细节在地震研究文献中常常被忽略，这样就很难对报告中的数据进行估价。仪器灵敏度的改变也影响数据的解释。目前为了预报水库蓄水和深井注水的诱发地震，使用的仪器已经有了很大改进。现在在野外使用的大型观测台网增