



## 水电建设中的一些岩石力学问题

张 镜 剑

(华北水利水电学院 河北 邯郸 056021)

### 一、前 言

世界可能开发的水电装机总容量为 22.61 亿 kW, 到 1986 年世界水力发电总装机容量已达 56682 万 kW, 已开发利用 25%。一些工业发达国家, 其水电资源开发利用程度很高, 例如瑞士已开发 98%, 法国已开发 95%, 英国、意大利已开发 90%, 西德已开发 85%, 瑞典已开发 80%, 日本已开发 68%, 美国已开发 45%, 苏联较少, 仅已开发 22%, 而印度、巴西分别仅已开发 19% 和 15%。世界水电资源开发越高, 剩下的优良坝址就越少, 因而在水电建设中遇到的岩石力学问题也就越多和越复杂。

我国水力资源理论蕴藏量为 6.76 亿 kW, 其中可开发装机容量 3.78 亿 kW, 居世界第一位。到 2000 年我国水电总装机要求达到 8000 万 kW, 到 1989 年底全国水电总装机 3458 万 kW, 占全国电力装机 27.3%, 仅占可开发水电总装机的 9%。因此, 今后十年水电建设要求增加水电装机 4500 万 kW, 比建国 40 年翻一番还要多, 任务是十分巨大的。为了实现 2000 年的水电建设目标, 需要建设一批大型水电站。目前, 正在设计的装机容量在 300 万 kW 以上或坝高在 200—300m 的水电站是: 三峡、溪落渡、向家坝、龙滩、拉西瓦、瀑布沟, 糯扎渡、小湾、锦屏一级和锦屏二级。这些大型水电站的特点是: 工程规模巨大, 技术复杂, 难度高, 坝高或装机容量均达到或超过目前世界水平, 它们在建设中都涉及许多岩石力学问题。例如高 200—300m 混凝土坝坝基和坝肩的稳定性、深埋大直径长隧洞和大跨度高边坡地下厂房的围岩稳定、水库诱发地震的预测、岩坡稳定以及岩溶地区筑坝建库等等。现就水电建设中的这些岩石力学问题作一些介绍。

## 二、坝基与坝肩的稳定问题

根据世界统计分析,地基丧失稳定性导致大坝失事,其中重力坝、拱坝和支墩坝分别占其各自失事总数的百分比为20%、23%和24%。1959年12月2日法国Malpasset坝的失事,主要是大坝上游岩石存在微裂隙,渗入的水压逐步发展而导致的,失事造成400多人死亡。1928年3月12日美国St. Francis坝由于基岩受潜蚀而遭致失事,伤亡达400多人。前者因在施工之前未发现坝基岩石的微裂隙,后者因施工之前未发现基岩是一种遇水会崩解的砾石。岩基上混凝土坝的稳定性主要取决于坝基岩体的地质条件。当存在软弱结构面的不利组合时,岩体稳定性主要受软弱结构面的控制,即坝基岩体在大坝各种荷载作用下,可能使大坝沿软弱结构面转移失稳。据不完全统计,我国已建和在建的近百座大、中型混凝土坝中,由于软弱结构面的存在而修改设计、降低坝高或者增设抗滑加固措施的约占三分之一。

目前,分析高坝和重要的大坝坝基或坝肩稳定问题,主要采用刚体极限平衡法、有限元法和地质力学模型试验法(有人称为岩石力学模型试验法)。用三种方法相互验证,取长补短,最近,散体元法也已被应用来研究坝基的稳定性,并取得了令人满意的成果。

湖北省葛洲坝工程二江泄水闸基有埋藏较浅的202夹层,夹层泥化厚度数毫米,其 $f$ 为0.2,  $c$ 为 $0.05\text{kg}/\text{cm}^2$ ,经数值计算和模型试验,最后采用了阻滑板、上游齿槽、大直径混凝土抗滑桩等综合措施,保证了稳定性,使安全系数满足了设计要求。

湖南省双牌水电站坝基为砂岩与板岩互层,倾向下游,有五层破碎夹层,坝下游冲刷坑切断了可能转移的破坏夹层,又形成一临空面。经用刚体极限平衡法、非线性有限元和大坝抗滑模型试验复核,都表明大坝在加固前是不安全的。最后,采用了加强防渗帷幕、坝基固结灌浆和尾岩抗力体预应力锚固措施,加固后安全系数提高到1.19(不计 $c$ 值)满足了安全要求。

河北省朱庄水库重力坝坝基下有倾向下游的两层泥化夹层, $f$ 值分别为0.29和0.22,坝下游还有斜切河床的断层,其破碎带宽8—10m,动弹模仅 $0.5 \times 10^8\text{kg}/\text{cm}^2$ 。经计算分析和大坝抗滑模型试验后,决定采用了降低坝高、加宽坝体和把加厚了的护坦与大坝连接成整体的措施。

贵州省乌江渡水电站大坝坝址下游近处页岩层中有倾向下游的缓倾裂隙。由于小断层密集带距坝趾太近,承载能力不够,因而选定为整体结构的拱型重力坝,使得抗滑稳定安全系数在计及 $c$ 值时达到4.67,满足了规范要求。

修建在巴西和巴拉圭两国共有的巴拉那河上的伊泰普水电站,其大坝是目前世界上最高的双支墩重力坝,最大坝高196m。河床部分坝基下有剪切带、断层夹泥和节理发育的软弱破碎岩石,为了增强岩石抗剪能力,提高抗滑安全系数,把四个最高坝段下软弱破碎岩石挖除,共设置8个平行于坝轴线的纵向剪力键槽和8个垂直于坝轴线的横向剪力键槽,键槽隧洞宽3.5m,高2.5m,洞内回填混凝土,并对剪力键槽进行灌浆。这种

在破碎带内设置网络状混凝土剪力键槽的方法在印度的 Srisaïlam 坝、美国的 Green Peter 坝和西排牙的 Torrejon 坝都取得成功。

在高混凝土坝基岩稳定分析中,作为坝基的岩体经过地质年代的多次地质构造运动,使岩体形成复杂的结构面。对于宽度较大的断层带,可把断层内的介质作为各向同性均质连续体,用塑性力学处理。对于软弱夹层,可用节理单元模型来处理。对于层理发育的层状岩体,可用层状材料模型处理。对于被众多节理裂隙任意切割的裂隙岩体,可用损伤断裂力学模型处理。这些分析方法均已编制了三维分析程序,并应用于国内重大水电工程的混凝土坝稳定分析。存在的问题是如何根据坝基岩体的实际性状选择正确的分析模型和分析方法以及使计算机精度与所用的岩体物理力学参数的精度相匹配。

此外,由于岩体应力状态与裂隙渗流之间会发生相互影响,因此,在坝基稳定分析中,考虑裂隙渗流压力与岩体应力、应变耦合效应是十分必要的,这也是近年来研究的热点之一。

### 三、岩坡稳定问题

岩坡稳定是高山峡谷中水电建设常遇到重要问题之一,岩坡失稳会造成很大的危害。1963年10月9日夜晚意大利高265m的Vajont拱坝的水库岩坡突然发生了大体积滑落,约2.5亿 $m^3$ 的岩体滑入水库,水位上的浪高达220m,约3千万 $m^3$ 的水越过坝顶,以极大速度流过深为240m、顶部宽105m和底部仅宽20m的Piave河谷,全部毁坏了下游的Longarone镇,2500人死亡,造成了闻名世界的岩坡失稳大事故。

我国柘溪水电站岩坡滑移总体积达165万 $m^3$ ,给工程造成不少的危害。

水电工程的边坡设计时,有时坡度缓与陡仅一度之差,岩石开挖量就可能相差数万立方米。由此可见,为保证岩坡稳定,能准确推断岩坡稳定与否的分析方法,便成为岩石力学中迫切需要研究的课题之一。

目前赤平投影,特别是全空间赤平投影理论与方法已被广泛应用于岩坡稳定分析。此外,灰色聚类分析与模糊聚类分析也已用于岩坡的地震滑坡可能性进行分类和预测。我国成都地质学院采用国内外的数据,用灰色预测模型预测滑坡崩塌的时间,精度很高,误差只有数日或数小时。最近,散体元法(Discrete Element Method)已成功应用于岩坡稳定分析。

用散体元法模拟岩坡失稳的全过程,有着独特的优点。我国清华大学与华北水利水电学院合作用模型试验与散体元法作了岩坡失稳的对比研究,模型用地质力学模型材料压制长方体试块交错排列做成,置于角钢底板上,缓缓抬起角钢,使试块分离、滚动、直到塌落,用高速摄影机拍摄滑动破坏过程,并在完全相同的条件下用散体元法进行计算。通过实验与计算的结果对比分析表明,散体元法可以比较好地模拟岩坡的破坏过程,尤其是最终破坏状态,两者有着良好的符合。华北水利水电学院还对五强溪水电站左岸岩坡的稳定性进行了散体元法的分析,借助CAD技术,显示了岩坡破坏过程、应力场、位移场以及力场的变化,计算值与原型观察值基本一致。

在处理水库岩坡滑坡方面,奥地利的界帕奇水库的经验是成功的。1964年夏水库开始蓄水,不久发现坝上游左岸边坡开始滑动,距坝仅200m,滑坡体约2000万 $m^3$ ,为保证大坝安全蓄水,对滑坡体位移进行监测并补充地质勘探,分析滑坡成因,在理论计算和模型试验基础上,对滑坡体随库水位上升可能滑落量作了预报,最后用分期控制蓄水的措施,终于在1966年9月水库安全地蓄水至设计水位。

我国水库岩坡稳定日益受到重视,坝高175m、库容247亿 $m^3$ 的龙羊峡水库,坝高192—217m、库容161—273亿 $m^3$ 的龙滩水电站和坝高165m、库容23亿 $m^3$ 的乌江渡水电站等都有水库岩坡稳定问题,这些水库岩坡可能失稳的滑坡体体积达数百万立方米至上千万立方米,滑坡体有的位于大坝上游几百米,有的就位于坝址岸边,为了大坝安全,对这些水库岩坡稳定都进行了计算分析,有的还作了模型试验研究,龙羊峡水库通过监测成果资料分析与初期限制水库运行蓄水位迄今已安全运行了三年,乌江渡水电站近坝库岸不稳定岩体通过监测、计算和试验成果分析,发现不稳定岩体已处于渐进破坏状态,岩体下滑时将产生涌浪,危害建筑物安全,及时对不稳定岩体采取了减载、压脚和设置排水洞等综合处理措施,实践表明效果是令人满意的。

从分析国内外资料来看,水库岩坡滑坡通常都是危害很大的,这主要是水库岩坡滑坡量大,落入水库的大量岩土严重减少有效库容,甚至使水库报废,或者滑坡岩体直接毁坏建筑物,或者巨大滑坡岩体高速滑入水库引起巨大涌浪,使大量水体漫过坝顶,对大坝和下游产生严重危害,其中尤以高速滑坡引起巨大涌浪的影响最为普遍和重要,因此,对水库岩坡的稳定分析方法、滑坡时间的预报、滑坡体积以及由此引起的涌浪的估算是研究的主要问题,而研究的目的在于据此采取控制处理减灾措施,这些问题都是十分复杂的,且实测资料很少,理论上还需要进一步深入研究。

#### 四、地下洞室(隧洞或水电站地下厂房) 的围岩稳定及其支护技术问题

通常地下洞室在设计时只能根据由钻孔、竖井和坑道中所获得的资料进行分析研究,在洞室修建前岩体中早就存在着初始应力(或称天然应力、残余应力),大多数洞室都是修建在地下水位以下,岩体温度随埋藏深度而增高,一般岩体埋深每增加100m,岩体温度上升在0.5℃至5℃之间变化,有的深埋岩体中还存在有害气体,因此,在修建埋深很大的地下洞室时,有可能遇到很大的初始应力,大范围的破碎裂隙带,高达摄氏几十度的地下温度,大量地下水或危害施工人员的有害气体,这些都将是给地下洞室的设计与施工带来严重的问题,都会危及地下洞室岩体的稳定安全。

我国已建和在建的水电站地下厂房近40座,水工隧洞总长达400多公里,目前,世界上已建成的大型地下厂房高度最高的达60m,宽度最宽的已达33m,例如,意大利特里奥马乔尔水电站地下厂房的宽和高分别为21m和60m,加拿大拉格朗德四级水电站地下厂房的宽和高分别为33m和46m,水工隧洞的断面尺寸已达直径18.3m以及宽和高为

16m 和 29m, 前者为印度巴克拉水电站的导流洞, 后者为芬兰皮尔齐柯斯基水电站的尾水洞. 我国未来的锦屏二级水电站的隧洞特深特长, 其埋深达 2500m, 长达 18—20km. 大型地下洞室的围岩稳定及其支护技术是设计与施工的重大问题, 直接影响其安全性和经济性.

对大型或重要的地下洞室围岩的稳定分析, 目前主要采用的方法是非线性弹塑性、粘弹性二维、三维有限元法、边界元法, 并且已有可供计算用的程序. 对于节理裂隙发育的地下洞室, 已经采用块体理论法和散体元法来分析. 在地下洞室建设中, “新奥法”得到了推广应用. “新奥法”理论特别强调“适时”和仰拱的结构作用, 并且选择为保持围岩稳定所必需的最小反力值, 以使用最小的代价得到最好的效果. 现在喷锚加固(即用喷射混凝土和锚杆联合加固)已普遍应用于地下洞室作为永久支护, 以保证围岩稳定.

此外, 对于深埋、脆性围岩的地下洞室, 有可能产生岩爆这样一种特殊的岩石力学现象.

在坚硬完整岩体内, 地壳构造运动可能使岩体中的应变能产生大量的聚集, 形成很高的初始应力, 开挖过程中可能出现岩爆现象. 岩体初始应力超过岩体弹性限度, 聚集在岩体中的应变能突然释放, 伴有巨大响声, 多有岩片飞出, 成透镜状. 按材料力学公式, 弹性模量为  $E$  的岩体由初始应力  $\sigma$  聚集的能量  $V$  (单位体积内) 为:

$$V = \sigma^2 / (2E)$$

由上式可知: 岩爆的强度与初始压应力二次方成正比.

坚硬岩体易聚集能量, 软弱岩体不易聚集能量, 因为应力不很大时软弱岩体便会发生流动. 岩爆声如枪声, 跳出的岩片或岩块体积膨胀, 不能再插入原处, 而且往往先从侧壁分离出, 而后发展到顶板, 分离总是平行于揭露的工作面.

在修建阿尔卑斯山区的 Simplon 水工隧洞时, 该处岩体深度在地面以下 2200m, 由于岩体的初始应力所引起的岩爆和塑性流动等现象, 几乎随深度增加而更强烈, 且有规律. 日本在修建清水隧洞中部时, 在深度 1000—1300m 处发生了岩爆. 1966 年在新的清水隧洞开挖时, 在比前者还稍浅的地方发生了岩爆, 飞散的岩片尺寸从几十厘米到一两米, 厚度约 10—30cm.

我国南盘江天生桥二级水电站直径 10m 的引水隧洞围岩在施工过程中发生了多次岩爆, 且时间延续达 2 个月. 我国岷江渔子溪一级水电站压力隧洞也发生过岩爆.

对于脆性岩体的岩爆问题, 可以简化为线弹性问题进行分析, 即可以用线弹性有限元法, 应用 Griffith 破坏准则和 Coulomb—Navier 准则或修正的 Griffith 破坏准则进行破坏范围的估计.

由于岩爆发生之前, 通常总是有微响发生. 所以, 有经验的矿山老工人常常根据这些响声作出判断. 因此, 可以用多种仪器来测听岩体中发生的声响, 寻找岩爆中心, 这样便可以用人工方法消除岩爆现象. 例如, 采用人工爆破来清除危岩, 预防对施工人员的危害.

岩爆机制十分复杂, 是一个有待深入研究的课题.

## 五、水库诱发地震

水库地区在修库前无地震,修库蓄水后引起地震称水库诱发地震。水库诱发地震最早见于1931年希腊 Marathon 水库。1960年以来,高坝大库容的水库大量建筑,强烈的破坏性水库诱发地震相继发生。1962年12月印度的 Koyna 水库发生了目前世界上最大震级(震级为6.4级)的水库诱发地震,给大坝和库区附近建筑物造成不同程度的损坏。至今我国已有13座水库发生水库诱发地震,其中广东省新丰江水库1962年3月19日凌晨发生的震级6.1级水库诱发地震是国内已知的最大震级的水库诱发地震。本世纪三十年代以来,全世界相继发现近百座水库发生了水库诱发地震。

国内外有四座水库发生6级以上诱发地震,见表1所示。

表1 国内外诱发6级以上地震的水库

Tab. 1 Reservoirs with induced earthquakes of  $M > 6$

国 名	水 库 名 称	坝 高 (m)	库 容 (亿立方米)	最 大 震 级
赞比亚	卡里巴	128	1600	6.1
中 国	新 丰 江	105	115	6.1
希 腊	克雷马斯塔	147	47.5	6.2
印 度	柯 依 纳	103	27.8	6.4

我国新丰江水库坝址岩石为花岗岩,坝型为单支墩大头坝,最大坝高105m,坝长440m,库容115亿 $m^3$ 。1959年10月水库开始蓄水,一个月后开始记录到库区地震活动。随着水位急剧升高,地震日益频繁。1962年3月19日在大坝东北约1.1km处发生震级6.1级的强烈地震,震中烈度为八度,震源深度为5km。地震时,库水位接近满库,在右岸坝顶部出现长达82m的水平裂缝,左岸坝段同一高程也有规模较小的不连续裂缝。

我国丹江口水库位于湖北省均县,坝高97m(第一期工程),库容210亿 $m^3$ 。1967年开始蓄水,蓄水后便出现了异常的地震活动,1973年11月在库区宋湾公社发生了最大震级4.7级、震中烈度为七度的震群。

根据国内外对水库诱发地震的研究,归纳起来有以下基本特征:

(一) 水库诱发地震活动与水库蓄水过程有密切关系,地震活动随水位增减而变化,最大地震发生在水荷载急剧增大之后。

(二) 震中局限于库坝区周围,震源深度一般都很浅,震源体积小,活动空间集中,强震出现次数少,但烈度较高。

(三) 地震序列中的最大余震和主震的震级比偏大,一般在0.83—0.98之间,与构造地震相反。

(四) 茂木清夫把前震—余震模式分为三种类型:均匀介质的特点是没有前震;不

均匀介质在主震前有前震；极不均匀介质的特点是出现群震型活动。水库诱发地震多属第二类型或第三类型，属第一类型的极少，而一般构造地震多属第一类型。

(五) 频度与震级关系中的系数  $b$  值大于同一区域构造地震的  $b$  值，而且其前震和余震的  $b$  值相对大小与构造地震相反。

从岩石力学观点来看，水库诱发地震是受岩体产状条件及其力学特征所控制，与一般构造地震是受地壳构造运动所控制有所区别。对美国、日本和中国进行的一些人工注水（向油井或钻井内注水）所引起的地震的分析，较普遍地认为库水渗入断层或岩体破裂面，导致其  $C$ 、 $\phi$  值降低，使抗剪强度降低，同时减少了断层或岩体破裂面上的有效应力，使原已处于应力平衡的状态遭受破坏而滑移，从而发生水库诱发地震。

水库蓄水引起的地震现象，实质上是一种大范围内的岩体稳定问题，其发生和发展都有一定的岩体地质条件。人工注水地震的研究成果对水库诱发地震的预报和控制，具有很好的启示和指导意义。

最近，武汉水利电力学院提出把地质调查与数值分析相结合，进行水—岩相互作用的耦合分析法来预测水库诱发地震，具有较好的发展前景；广西电力勘测设计院采用统计检验手段，分析诱震因素而导出计算方法，其中水库要素综合参数推算诱发震级成功率达 63%，是一种有希望的新的预报方法。

研究水库诱发地震的关键问题是预报可能的最大震级，其目的在于根据监测资料和库区地质条件的分析，预报出可能的最大诱发震级，然后对大坝进行安全复核，按复核结果来考虑应采取的措施。例如，我国湖南省东江水电站混凝土双曲拱坝坝高 157m，库容 81.2 亿  $m^3$ ，水电站于 1986 年 8 月下闸蓄水，1987 年 11 月库水位由 147m 上升到 243m 左右时，开始出现水库诱发地震，最大震级为 3 级，烈度为 5 度。根据在库区设置的地震台的监测，地震频度较高，震级与频度关系中的系数  $b$  值为 1.06—1.78，大于 1，因此，可以认为东江水库地震是水库蓄水引起的水库诱发地震。根据统计和模拟计算研究，东江水库诱发地震的最大震级为 5 级左右，坝址区地震烈度具有 7 度的危险性，据此对大坝按设计烈度 8 度进行分析，结果表明大坝是安全的，因此，可不采取加固大坝的措施，如有必要可以较慢的速度蓄水，特别是洪水期，以避免或减轻水库诱发地震造成的灾害。

## 六、岩溶地区建坝修库问题

通常在石灰岩地区会见到大大小小的、形状各异的岩石洞穴，这便是岩溶（又称喀斯特）现象，这样的地区称岩溶地区。我国西南地区岩溶现象是比较普遍的。

岩溶现象的产生，是因岩石裂隙中水流对以碳酸盐岩（石灰岩等）为主的可溶性岩石的溶蚀作用所造成。西班牙的一个高 30m 的坝，其水库库容为 4800 万  $m^3$ ，但岩溶石灰岩的渗漏严重，水库蓄水位只能达到 12m，相应库容仅 400 万  $m^3$ ，致使水库不能发挥作用。

近百年来，世界各国在岩溶地区修建库坝工程逐年增多，规模也越来越大。法国和

南斯拉夫等国研究岩溶和开发岩溶地区水力资源较早。我国从五十年代开始在岩溶地区修建库坝。最早在西南地区成功地修建了我国第一座地下水库——六朗洞水库。到五十年代末期，进行了岩溶地区河流——猫跳河流域梯级水电站的开发。到1981年，在乌江干流上成功地修建了我国在岩溶地区的第一座高坝——乌江渡拱形重力坝，坝高165m，为我国岩溶地区的水电建设开创了新的纪录。

目前，世界上在岩溶地区最高的坝是苏联的克拉乌卡拱坝，坝高273m；最大的水库是土耳其的凯班水库，库容达305亿立方米；坝型以拱坝和重力坝为主，约占70%；漏水严重的水库是美国的赫尔斯·巴尔坝，漏水量达 $50\text{m}^3/\text{s}$ ，后来不得不放弃。土耳其的凯班坝在补充防渗工程之前，渗流量达 $26\text{m}^3/\text{s}$ 。我国渗流量最大的水库是陕西省的桃曲坡水库，为 $27.8\text{m}^3/\text{s}$ 。我国乌江渡水电站的大坝河床左岸岸边带防渗帷幕最深，达河水面以下200m。

世界各国在岩溶地区修建水利水电工程大多数都是成功的或基本成功的。主要经验是正确选择库坝位置；地质工作要深入；防渗处理要落实。严重渗漏的或不能蓄水的是极少数。库坝地区大量渗漏往往都是由于岩溶强烈发育，而且又未进行或局部进行防渗帷幕处理。由此可知，在岩溶地区建坝修库时进行防渗处理的重要意义。

水库最好修建在周边有隔水层或弱透水层的向斜谷地区，坝址最好选择在隔水层或弱岩溶透水层上。

防渗处理措施要在查清渗漏边界条件的前提下，根据不同渗漏形式和工程对象特点来选择。对集中的管道渗漏应以堵和截为主，对分散的裂隙渗漏应以铺和灌为主，对复杂的渗漏情况，则需采取综合措施。

堵是用防渗材料堵塞垂直溶洞，截是用截水墙截断水平溶洞，铺是用防渗铺盖处理地表呈面状或带状的分散渗漏的方法，灌是用防渗帷幕处理裂隙或渗漏的方法。我国在岩溶地区的水电建设中已积累了许多成功经验。

此外，还需指出要注意研究由建坝而产生新的岩体溶蚀现象的可能性。在本文前面所提到的美国 St. Francis (圣·弗兰西斯) 坝基中，除了有遇水会崩解的粘土质砾岩外，还有可溶蚀的石膏夹层，该坝的失事除了由于水对砾岩作用使之崩解之外，水对石膏夹层的溶解作用也是原因之一。由建坝而产生新的岩体溶蚀现象的可能性实际上是大坝岩基的长期稳定性问题，水对岩体的溶蚀作用是其中一个部分。这个问题目前还研究得不够。

从以上几个方面的问题可以看出：水电建设与岩石力学密切相关。我国水电工作者与岩石力学工作者的密切合作，必将进一步促进我国水电事业的发展和推动岩石力学的进步。



## 参 考 文 献

- (1) C. Jaeger, *Rock Mechanics and Engineering*, Cambridge University Press, 1972
- (2) 徐志英主编, 《岩石力学》, 水利电力出版社, 1986
- (3) 周维垣主编, 《高等岩石力学》, 水利电力出版社, 1990
- (4) 陶振宇主编, 《岩石力学的理论与实践》, 水利出版社, 1981
- (5) 中国岩石力学与工程学会编, 《岩石力学在工程中的应用》(第二次全国岩石力学与工程学会学术会议论文集), 知识出版社, 1989.
- (6) 张镜剑、魏群主编, 《水电科技论文集》, 河北科学技术出版社, 1990.
- (7) 中国科学技术协会学会工作部编, 《中国减轻自然灾害研究》(全国减轻自然灾害研讨会论文集), 中国科学技术出版社, 1990.

## SOME ROCK MECHANICS PROBLEMS IN CONSTRUCTION OF HYDRO-POWER STATION

Zhang Jingjian

(North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectricity, 056021)

### Abstract

Some rock mechanics problems in construction of hydro-power station are described in this paper. The rock stability of dam abutment and foundation, slopes, underground excavations as well as their supporting technique, induced earthquakes in water reservoir, dam and reservoir constructions in karst region are summarized.