

# 第一章

## 概 论

### 第一节 工程地质在水力发电工程中的位置和作用

#### 一、世界著名坝库失事实例的启示

马尔帕塞坝失事后，研究工作持续了 20 多年。1985 年，美国土木工程师学会、国际土力学和地基工程学会、Purdue 大学和美国大坝委员会还组织召开了国际大坝失事专题讨论会，就世界四个知名的库坝的失事原因进行了探讨。这说明总结库坝失事教训，提高坝工设计水平是国际上共同关心的问题。但就工程地质专业来说，马尔帕塞坝事先没有进行充分的地质勘察工作是一个教训，在设计和施工阶段并未探明位于坝基开挖面以下 15~40m 的断层和坝后 20m 以外的断层露头。设计者根本不知道坝基下有断层存在，只是在失事后才认识到这一点。几乎所有的人都同意马尔帕塞坝失事的根本机制是坝基岩体沿下游的断层产生了滑动。因此，从广义上来说，对一个坝址首要的问题是勘察，首先要查明坝址的地质条件和岩体物理力学特性，也就是要弄清设计工作的基础，使设计建立在一个可靠的基础上是非常重要的。马尔帕塞坝失事以后，我国组织出版了《世界大坝失事原因分析》一书，并在组织总结国内工程的基础上编写出版了《水利水电工程地质》一书。在工程地质勘察方面给予了足够的重视，虽然这需要花费一定的资金和时间，但对于我们必须面对的问题，应该说是值得的。正在兴建中的三峡大坝河床坝基开挖后验证，大小断层与勘察预测的吻合率达到 90% 以上。最近建成的二滩高拱坝在地基开挖后，基坑地质情况与招标文件预测的基本一致；施工过程中，边坡和地下工程开挖未出现大的失稳，施工比较顺利，施工重视和加强了监测是一个方面，此外可能也与前期勘察工作做得深入细致有一定关系。其次，查明地质条件并不是最终目的，工程地质人员还必须结合建筑物的工作条件深入分析所研究的建筑物的稳定条件。最后，工程地质人员还需要多参与监测设计和监测资料的分析。完善的监测网、性能可靠和安装质量良好的监测仪器以及对地基和建筑物的系统监测，是保证大坝和其他水工建筑物施工和运行安全最主要的手段。工程地质人员应当在这一领域发挥自己的优势，做出应有的贡献。

## 二、中国水电开发的地质条件

中国水能可开发资源总量按 1977~1980 年全国水能资源普查约 3.78 亿 kW，但分布很不平衡。中西部（中南、西南、西北）资源集中，约 3.41 亿 kW，占总量的 90%。其中西南占约 2.32 亿 kW，占中西部的 68%，占全国可开发总量的 75%。可见中西部是全国水电开发的重点地区，而西南地区又是重点中的重点。我国西南地区是欧亚板块与印度板块的接壤地带，构造复杂，断层和地震活动性强。除中、新生代褶皱带构造活动与地震活动强烈外，古生代褶皱带如天山、昆仑山、祁连山和阿尔泰山褶皱带也都是构造活动和地震相对强烈地带，这些褶皱带内部，尤其是它们的边缘地带常发育有规模较大的活断层，在第四纪晚期仍有强烈的活动性，甚至在一般应属第四纪构造相对稳定的地台区，如华北地台内部（一些断陷带）及其边缘在 15~17 世纪还发生 5 次里氏 8 级特大地震。我国境内各个地质时期的地层出露较全，岩相岩性种类多变化大。在岩性分布上，花岗岩、片麻岩等块状结构岩石所占比例较小，变质的片状岩（板岩、千枚岩、片岩）、沉积的砂岩、页岩及其互层所占比例相对较大，且构造复杂，软弱夹层多；古生代、中生代砂页岩煤系地层岩性多变，并存在煤窑采空区等问题；中生代红色岩层（红层）强度低，工程性质差，软弱夹层多，还有易溶矿物；全国石灰岩出露面积约 91 万 km<sup>2</sup>，主要是在中部和西南部，其中强岩溶区也基本集中于西南部。水能资源最集中的西南地区水电开发中常见的工程地质问题粗略归纳有以下几个方面：

(1) 深厚覆盖层：河床覆盖层不仅厚度大，结构变化也大，成因和组成成分复杂。一般厚达 30~50m，最厚时可达 100m 以上。如大渡河瀑布沟工程河床覆盖层厚约 80m，南桎河冶勒工程更是厚达 200m。岷江的河床覆盖层向上游增厚，如都江堰为 20m—紫坪铺 30m—映秀湾 50~60m—兴文坪 90m—福堂坝约 100m—汶川 > 100m。河床覆盖层深厚制约了坝型，增加枢纽布置的复杂程度，也增大地基处理的难度。

(2) 活断层和高地震烈度：活断层多，规模大，活动强度高，大部分地区地震基本烈度在 VIII 度或 VIII 度以上，局部地区强震周期短。里氏 7 级强震的周期有的不足百年。

(3) 高边坡、大滑坡：河谷深切，临河自然岸坡高达 500m 以上，工程开挖边坡高度一般达到 100~200m 或更高。滑坡数量多，规模大，常可见数千万至上亿立方米的大滑坡。

(4) 大跨度地下洞室：河流流量大，导流、泄洪洞的规模相应增大，如二滩工程导流洞断面高 23m，宽 17.5m，泄洪洞断面高 13.5m，宽 13m。河谷谷窄坡陡，大容量装机地面厂房布置困难，迫使开挖大型地下厂房，如二滩地下厂房为 25.5m（宽）× 65.38m（高）× 280.29m（长）。

(5) 泥石流：暴雨多，地质条件差，较易发生大型泥石流产生堵江和抬高尾水位，以及对建筑物造成危害。大朝山工程为避免泥石流堵尾水，改变布置延长引水洞至泥石流沟下游；太平驿工程在厂址选择上放弃了泥石流沟沟口的地面厂房，改选靠上游的地下厂房，尾水洞洞口相应上移避开泥石流影响区。

从上可以看到水电开发所面临的地质条件是复杂的，有时可对选址选厂和建筑物的安全、稳定产生较大的影响，甚至重大影响。因此，在前期的各设计阶段中和施工过程中，重视和做好相应的工程地质勘察是十分必要的。

## 第二节 中国水力发电工程地质勘察的要求

### 一、基本要求

按照国家有关规定，工程设计文件必须附有相应的工程地质勘察报告。各阶段工程地质勘察的深度应符合各设计阶段的要求。工程地质勘察分为规划、可行性研究、初步设计和技施设计四个阶段。需要说明的是 1993 年原电力部调整水电工程设计阶段，在流域规划和河流（或河段）水电规划之后的设计阶段改为预可行性研究、可行性研究、招标设计和施工详图四个阶段。其中除预可研及可研已重新订有编制规程外，其余两个阶段还需制订编制规程。因此，以下暂仍按设计阶段调整前的原勘察阶段加以介绍。

### 二、各阶段工程地质勘察的一般规定

#### （一）规划勘察

- （1）了解规划河流或河段的区域地质和地震概况。
- （2）了解各梯级水库区的地质条件和主要工程地质问题，分析建库的可能性。
- （3）了解各梯级坝址的工程地质条件，分析建坝的可能性。
- （4）了解各梯级坝址附近天然建筑材料的赋存情况。

#### （二）可行性研究勘察

- （1）进行区域构造稳定性研究，并对工程场地的区域构造稳定性和地震危险性作出评价。
- （2）调查水库区的主要工程地质问题，并作出初步评价。
- （3）调查坝址、引水线路、厂址和溢洪道等建筑物场地的工程地质条件，并对有关的主要工程地质问题作出初步评价。
- （4）进行各种天然建筑材料的初查。

#### （三）初步设计勘察

- （1）查明水库区水文地质、工程地质条件，分析工程地质问题，预测蓄水后的变化。
- （2）查明建筑物地区的工程地质条件并进行评价，为选定各建筑物的轴线和地基处理方案提供地质资料和建议。
- （3）查明导流工程的工程地质条件，根据需要进行施工附属建筑物场地的工程地质勘察和施工与生活用水水源初步调查。
- （4）进行天然建筑材料的详查。
- （5）进行地下水动态观测和岩土体变形监测。

#### (四) 技施设计勘察

(1) 进行初步设计审批中, 要求补充论证和施工开挖中发现的专门性工程地质问题的勘察。

(2) 提出对不良工程地质问题处理措施的建议。

(3) 进行施工地质工作。

(4) 提出施工期和运行期工程地质监测内容、布置方案和技术要求的建议。分析施工期工程地质监测资料。

### 第三节 中国水电工程地质概况

水电工程规模巨大, 涉及面广, 建筑物种类多, 在工程地质勘察中遇到的问题相应也是最多的。本节内只能择要对常见的主要工程地质问题概略作一些提示, 尽可能反映目前的现状。详细情况请参阅以后的专门问题章节。

#### 一、区域构造稳定性

区域构造稳定性具体指活动断层和地震对工程的影响。由于这—问题是自然存在的, 而且活断层一般不是工程结构所能抗拒的, 为此, 有时在规划阶段就需要开始进行活断层的判定和研究, 以至地震危险性的分析工作。

##### (一) 工程实例

地震时断层发生错动或断层蠕变破坏水工建筑物的实例是很少的。世界上已知的有1906年美国加州旧金山地震时圣·安德列斯坝(San Andreats)和水晶泉(Cryrtal Spring)水库两个坝都错动了2.5m。这些坝都是早年建成, 当时人们对地震和断层活动还了解得比较少。目前这方面的认识已有所提高, 但对于坝基内断层的活动也还没有实际经验, 主要仍依靠判断。鉴于这一问题的严重性, 在地震区坝址有活断层的情况下, 往往采取偏于安全的措施, 这应该说是合理的, 也是可以理解的。例如美国奥本坝, 由于坝基发现活断层, 在基坑挖出后又做了大量论证, 至今仍未兴建。我国新疆克孜尔水库大坝是跨越活断层的典型实例。大坝和副坝为黏土心墙砂砾坝, 大坝最大坝高44m, 库容6.4亿 $m^3$ , 主坝长960余m, 左岸副坝长1288m, 副坝右坝肩跨越规模较大的缓倾角活断层 $F_2$ , 中新统地层( $N_2$ )逆掩至IV级阶地砾石层和砂壤土上, 断层产状 $NE65^\circ SE \angle 20^\circ$ 左右, 破碎带宽1~5m, 总断距44m, 垂直断距17m。在坝址比较中选用了上坝址, 避开活断层通过主坝。1972年元月起进行跨断层短水准和基线测量, 至1988年共16年的观测资料表明, 平均每年水平向缩短0.48mm, 垂直向位移0.307mm, 水平左旋扭动量0.19mm。设计上采用增大超高; 副坝增厚心墙, 上游增加一道反滤; 副坝改为上下游两道, 其间回填砂砾料; 心墙下游的反滤层、过渡层加厚, 并插入坝基以下基岩内; 下游坝体底部选用透水性较大的土料等结构措施, 并设置较完善的观测系统。该坝1994年完工, 已运行至今。

## (二) 活断层

### 1. 活断层的标准

关于活断层的标准各国和各行业间根据研究目的不同，地区区域构造背景的差异，建筑物使用年限和要求不一，建筑物失事后次生灾害的程度不同，存在较大差异。如核电站的标准较高，工业与民用建筑物的要求较低（1万年）。根据我国具体情况，水电工程地质把晚更新世（10~15万年）以来活动过的断层定为活断层。主要是根据我国在中更新世与晚更新世间构造活动在性质上有明显变化，这一事件据大量测年资料距今约10~15万年。这一构造应力场从晚更新世形成后延续至今基本无大变化，在此构造应力场内已活动过的断层可以看作是今后可能活动的断层，据此，活断层的时间下限可定为约10万年。

### 2. 活断层的识别标志

(1) 识别标志可分为直接标志和间接标志两种，可参阅 GB50287—99 《水利水电工程地质勘察规范》。

(2) 活断层最后一次活动的年龄可按下列鉴定成果综合判定：

- 1) 活断层上覆未受错动地层的年龄。
- 2) 断层最新构造岩的年龄。
- 3) 被错动的最新地层和地貌单元的年龄。

需要说明的是鉴于测年方法在应用上还没有地层研究更成熟，因此习惯上在判定活断层年龄时，往往对地层年龄考虑得更多一些。

## (三) 地震

### 1. 中国地震烈度表 (1980)

我国采用的地震烈度系 1980 年制订，划分为 12 度，见表 1-1。此表与美国 1931 年的 MM 烈度表和 1964 年国际地震与地震工程会议推荐的 MSK 烈度表基本相同。

表 1-1 中国地震烈度表

烈度	人的感觉	一般房屋		其他现象	参考物理指标	
		大多数房屋震害程度	平均震害指数		加速度 (水平向) ( $\text{cm/s}^2$ )	速度 (水平向) ( $\text{cm/s}$ )
I	无感					
II	室内个别静止中的人感觉					
III	室内多数静止中的人感觉	门、窗轻微作响		悬挂物微动		
IV	室内多数人感觉；室外少数人感觉；少数人梦中惊醒	门、窗作响		悬挂物明显摇动，器皿作响		

续表 1-1

烈度	人的感觉	一般房屋		其他现象	参考物理指标	
		大多数房屋震害程度	平均震害指数		加速度 (水平向) ( $\text{cm/s}^2$ )	速度 (水平向) ( $\text{cm/s}$ )
V	室内普遍感觉; 室外多数人感觉; 多数人梦中惊醒	门、窗、屋顶、屋架颤动作响, 灰土掉落, 抹灰出现细微裂缝		不稳定器物翻动	31 (22~44)	
VI	惊慌失措, 仓皇逃出	损坏——个别砖瓦掉落, 墙体微细裂缝	0~0.1	河岸和松软土上出现裂缝, 饱和砂层出现喷砂冒水; 地面上有的砖烟囱轻度裂缝、掉头	63 (44~89)	6 (5~9)
VII	大多数人仓皇逃出	轻度破坏——局部破坏, 开裂, 但不妨碍使用	0.11~0.30	河岸出现塌方, 饱和砂常见喷砂冒水, 松软土地裂缝较多; 大多数烟囱中等破坏	125 (90~177)	13 (10~18)
VIII	摇晃颠簸, 行走困难	中等破坏——结构受损, 需要修理	0.31~0.50	干硬土上亦有裂缝, 大多数砖烟囱严重破坏	250 (178~353)	25 (19~35)
IX	坐立不稳, 行动的人可能摔跤	严重破坏——墙体龟裂, 局部倒塌, 修复困难	0.51~0.70	干硬土上有许多地方出现裂缝, 基岩上可能出现裂缝, 滑坡塌方常见; 砖烟囱出现倒塌	500 (354~707)	50 (36~71)
X	骑自行车的人会摔倒, 处不稳定状态的人摔出几尺远, 有抛感	倒塌——大部分倒塌, 不堪修复	0.71~0.90	山崩和地震断裂出现, 基岩上拱桥破坏, 大多数砖烟囱从根部破坏或倒毁	1000 (708~1414)	100 (72~141)
XI		毁灭	0.91~1.00	地震断裂延续很长; 山崩常见, 基岩上拱桥毁坏		
XII				地面剧烈变化, 山河改观		

注: 1. I~V度以地面上人的感觉为主; VI~X度以房屋震害为主, 人的感觉仅供参考; XI~XII度以地表现象为主。XI~XII度的评定, 需要专门研究。

2. 一般房屋包括木构架和土、石、砖墙构造的旧式房屋和单层或数层的, 以及未经抗震设计的新式砖房。对于质量特别好的房屋可根据具体情况, 对表 1-1 列各烈度的震害程度和震害指数予以提高或降低。

3. 震害指数以房屋“完好”为 0, “毁灭”为 1, 中间按表列震害程度分级。平均震害指数指所有房屋的震害指数的总平均值而言, 可用普查或抽查的方法确定之。

4. 使用本表时可根据地区具体情况作出临时的补充规定。

5. 在农村可以自然村为单位, 在城镇可分区进行烈度评定, 但面积应以  $1\text{km}^2$  左右为宜。

6. 烟囱指工业或取暖用的锅炉房烟囱。

7. 表中数量词的说明: 10% 以下; 少数, 10%~50%; 多数, 50%~70%; 大多数, 70%~90%; 普遍, 90% 以上。

## 2. 中国地震烈度区划图 (1990)

该图是国家地震局 1990 年颁布, 采用地震危险性概率方法按使用基准期 50 年, 一般场地条件下可能遭遇超过概率为 10% 的烈度值所编制的烈度区划图。该烈度值也称为基本烈度, 适用一般工业与民用建筑的地震设防标准。

水工建筑物工程场地地震烈度或基岩峰值加速度, 根据工程规模和区域地震地质条件一般采用《中国地震烈度区划图》(1990) 确定的基本烈度。但基本烈度为 VI 度或 VI 度以上地区的坝高超过 200m 或库容大于 100 亿  $m^3$  的大型工程, 以及基本烈度为 VII 度和 VII 度以上地区坝高超过 150m 的大 (I) 型工程, 设防依据应根据专门的地震危险性分析提供的基岩峰值加速度成果评定。

### (四) 基本研究方法

区域构造稳定性的研究一般分三个层次进行。

#### 1. 区域构造背景分析

通常包括坝址周围半径 300km 或 150km 的范围, 或坝址所在的二、三级大地构造单元及相邻构造单元的部分地区。工作以搜集分析区域地质地震资料为主, 一般可沿用《中国地震烈度区划图》(1990) 所划定的潜在震源区, 必要时进行必要的复核。如三峡工程还通过区域重力场、航磁异常场和人工地震测深, 对地壳结构的研究作了进一步的论证。

#### 2. 坝区构造稳定性评价

研究范围包括坝区所在的大地构造单元 (一般指三级或四级构造单元) 和坝区周围半径 20~40km 范围的地区。一般进行 1:100000 专门性构造测绘, 详细研究距坝址较近断层的活动性和地震情况, 以及距坝 8km 范围内活断层的判定, 核定距坝较近的潜在震源区及其参数。

#### 3. 大坝勘察

主要是工程场地地质条件的详细勘察。对水电站的大坝及其他主要建筑物, 原则上要求避免跨越活断层以及与其构造活动有联系的分支断层, 避免活断层对大坝及主要建筑物的直接破坏。坝址也不宜选在震级为里氏 6.5 级及以上的震中区或地震基本烈度 IX 度及以上的强震区。

## 二、水库区工程地质

### (一) 库岸稳定

随着水电开发向中西部发展, 水库库岸稳定问题在水库区工程地质中愈来愈显得突出。深切峡谷中岸坡的重力地质作用增强, 物理地质现象发育, 卸荷深度大; 变形体数量多, 规模大。如雅砻江锦屏一级水文站坝址位于顺向谷, 岩层近直立, 两岸页岩层向河床倾倒, 范围可达 400m 以上, 易误认为背斜构造。锦屏一级普斯罗沟坝址左岸反向坡深部卸荷裂隙达岸坡以内 200m 左右; 二滩水电站库区中段滑坡成群发育, 其中大坪子滑坡体总量 2 亿  $m^3$ 。库岸不稳定体失稳引起的涌浪可能影响工程和居民点的安全,

是水库工程地质勘察的重点之一。

目前大型水电站的水库一般是先用陆地卫星图像（MSS 和 TM）或自行拍摄的各种航片（如彩红外），经过图像解译、图像复判和现场复查编制出 1:200000 和 1:50000 遥感解译地质图，然后进行库岸稳定性分段。分段的基本因素有 地形地貌：包括岸坡坡度、沟谷切割密度等； 地层岩性：坚硬岩、可溶岩、软岩，特别是易溶岩、易崩解岩石等； 地质构造：断层发育密度、破碎带规模、断层与岩层的产状和河谷的关系等；

物理地质现象：变形体、滑坡、崩坍以及泥石流等的发育特征、规模、密度等。其中工程地质性质差的岩层的分布和岩层、断层与河谷的关系（顺向谷、横向谷、斜向谷）常是较主要的因素。有时也根据当地具体条件用以上某一、二因素作为主要条件进行分段。

遥感解译研究这种方法可以较快发现问题，有利于下步详细勘测的布置和深入，但需要注意的是由于遥感资料的多解性，必须十分重视现场复查，以免误判造成失误。

## （二）水库坍岸

坍岸指发生在第四纪松散堆积物库岸的坍落和岸线后退现象。我国主要发生在华北、西北地区，尤以黄土及黄土类土的坍岸最为严重，典型的有官厅水库和三门峡水库。三门峡水库蓄水最初一年内，所有黄土类土组成的库岸，坍岸宽达 50~290m；官厅水库黄土类土库岸在蓄水最初两年内，库岸因坍岸平均后退 34m。

坍岸的研究主要以图解法为主，该方法较直观，简单易行。从近期国外资料看，亦与此类似。值得提出的是根据官厅水库的经验，在预测中要充分考虑坍岸物质中粗颗粒的含量及其在坍落后在岸坡再沉积的影响。官厅水库由于坍落物质的再沉积对岸坡的保护作用，实际坍岸宽度远小于原预计宽度，这一经验在坍岸研究中应加以重视。

## （三）浸没

浸没是水库蓄水或渠道充水后，使水库周边或渠道两侧，潜水位壅高到接近或达到地表造成各种灾害的现象。其中常见的有土壤次生盐渍化和沼泽化。

我国建库后发生的典型实例是官厅和三门峡两个工程。官厅水库两岸发生浸没后，采用排水沟降低地下水位，减轻了灾害。排水沟所挖出的土均堆于两排水沟之间的田地，增高了地面，当地农民称之为“台田”。三门峡水库蓄水后，渭河库段自潼关以上至西安间的渭南、华县一带出现大面积浸没。加之三门峡水库低水位运行，渭河河段淤积严重，河床抬高，两岸地下水排泄不畅，治理难度较大。

浸没研究的基本方法是在了解水文地质和工程设计资料的基础上，进行潜水回水预测计算和作出评价。其中需要注意的是： 潜水回水计算时需考虑因库尾淤积产生的水位翘高； 选取的潜水回水计算公式，需尽可能符合当地地质及水文地质条件。

浸没研究一般分初判和复判两步进行。请参见 GB50287-99 《水利水电工程地质勘察》附录。

浸没问题原先在北方较为突出，后改为采用南方的办法在浸没区改种水稻，使得问题的解决大为简化。

#### (四) 喀斯特渗漏

##### 1. 工程实例

(1) 水槽子水库。为云南以礼河二级电站的水库。水库以西 12km 有邻谷小江和金沙江，低于以礼河 1300m。水库西南 2~3km 还有低于以礼河 145m 的那姑盆地。

库区的主要断层有北北东和北西西两组，其中茨坪子大逆断层横切下游向斜，从那姑盆地一直延至蒙姑边缘。

库区各时代的石灰岩均有不同程度的岩溶发育，石炭二叠系灰岩地下岩溶发育，可达河谷以下 70~100m，但地表多被覆盖。库区地下水总的流向为自河谷向那姑盆地和小江及金沙江方向运动。两岸灰岩中的地下水均低于河水位，最低可低于河水位 22~25m。

1958 年 6 月 7 日蓄水，76 天后库外那姑盆地白雾三村一带地下水涌出地表，不久库水又漏至 13km 以外的蒙姑。通过 4 年的长期观测，石炭二叠系灰岩区，漏水点逐年增加，至 1962 年 5 月共有出水点 70 余个，漏水量也有增大趋势。水库漏水的通道主要是石炭二叠系灰岩内的溶洞和溶蚀裂隙。经过处理及水库淤积后向金沙江和那姑盆地的漏水量从  $1.8\text{m}^3/\text{s}$  减少至  $0.3\text{m}^3/\text{s}$ 。

(2) 东风水电站。坝址上游有鱼洞暗河系统，下游库外发育有凉风洞暗河系统。鱼洞—凉风洞沿河道距离长 3km，两者尾部相距约 200m，其间的地下水分水岭及鱼洞尾部均低于设计蓄水位。水库蓄水后，库水将由鱼洞管道倒灌，越过两暗河尾部的分水岭，通过凉风洞暗河向库外渗漏。在查明上述情况后，比较了 I——上游鱼洞堵洞，II——下游凉风洞暗河系统堵洞“关门”，III——帷幕接 970 地下水位，IV——沿地下水分水岭建帷幕等 4 个防渗方案，最终选定第 IV 方案，采用灌浆帷幕与以混凝土堵洞或修建混凝土防渗墙过暗河相结合的防渗体。1994 年 8 月发电，至今运行正常，无渗漏迹象。详见第六章。

##### 2. 研究方法

喀斯特渗漏勘察已发展到多种手段综合探测，除通常采用的遥感技术喀斯特地质调查、钻探和水文地质试验外，物探的地质雷达、地震和电磁波 CT 也普遍应用。喀斯特工程地质分析研究方法也有发展，比较主要的如表 1-2 所列。

##### 3. 喀斯特渗漏勘察的主要经验

我国自 1955 年以后在岩溶地区陆续修建了猫跳河一、二、四、六级水电站，乌江渡、大化、普定、岩滩、鲁布革、隔河岩、观音阁、天生桥二级、东风等十余个大型水电工程都取得成功。还有一批工程如江垭、天生桥一级、万家寨、构皮滩、彭水、思林、洪家渡等已完成勘测设计工作，有的也已开工兴建，可以说我国在喀斯特渗漏的基本理论和实践上，包括喀斯特渗漏的勘察研究、渗漏评价和防渗处理等已达到较高的水平。喀斯特渗漏勘察的主要经验概括有以下三条。

表 1-2

常用的喀斯特工程地质分析研究方法

序号	工程地质分析研究方法	主要研究目的	运用程度及主要工程实例
1	地貌及水文网分析法	通过喀斯特形态、地貌及地表—地下网发育展布现状和演化过程的分析,研究喀斯特发育分布规律、水动力类型及特点、喀斯特地下通道位置,判断地下水系的补给,径流、排泄范围和地下水分水岭位置,评价地区(段)渗漏条件	广泛运用,猫跳河、东风、天生桥二级
2	喀斯特地下水示踪试验分析法	研究喀斯特地下水的补给,径流、排泄条件,计算地下水渗流速度,根据示踪过程分析判定喀斯特含水介质类型、通道性质、规模及地下水量等	广泛运用,猫跳河四级、阿岗、岩滩、大化、隔河岩、万家寨、水槽子、江垭、乌江渡
3	喀斯特地下水同位素分析法	运用地下水中存在多种放射性同位素测定计算地下水的年龄,运移途程和时间分析寻找喀斯特渗漏通道(带)。常用的同位素有氡、氩、碳 14 等	猫跳河四级、乌江渡、江垭
4	喀斯特地下水动态研究及水均衡分析法	通过地下水动态长期观测及水均衡计算研究喀斯特水流性质,特点、含水介质类型水动力区域范围及喀斯特水量等,为渗漏评价提供依据。	广西各工程,洛塔喀斯特水开发利用,金觉峰
5	喀斯特水化学场分析法	根据喀斯特水化学成分和水文地球化学环境等密切相关的特点,分析研究含水介质类型,通道性质及补给,径流、排泄区范围,判断地下水分水岭位置,热水成因补给条件,预测溶蚀空洞体积等	江垭、彭水、万家寨、猫跳河四级
6	喀斯特地温场分析法	利用喀斯特地质体及地下水的对流、辐射、传导所形成的地温场研究喀斯特水介质类型、性质、分析渗漏带及通道的位置,热水成因及分布规律	猫跳河四级、江垭、东风、彭水
7	喀斯特渗流场分析法	利用地下水在喀斯特含水层中渗流的不同特点来研究喀斯特发育程度及岩体透水性,为制定防渗处理方案,选择帷幕线路及接头方式等提供依据。常用的有平面渗流场,剖面渗流场,电阻网络模型试验等	猫跳河四级、江垭热水成因、隔河岩罗家坳河间地块
8	喀斯特洞穴堆积物分析法	通过洞穴充填程度及充填成分、颜色、颗粒级配,包含物(化石、孢粉等)、固结程度及物理力学性质等研究喀斯特发育平面和垂向分布规律,分析喀斯特和新构造运动、古地理气候环境及洞穴形成水动力条件等的关系,为防渗方案的选择,利用和改造溶洞堆积物提供依据	乌江渡、三江口、江垭
9	喀斯特堵洞抬水试验分析法	利用人工堵塞暗河、溶洞抬高水位试验,观测地下水渗流场,为兴建溶注水库,溶洞水库,为论证某些专门喀斯特地质问题提供依据	湖南,广西溶注水库中广泛运用,彭水坝址右岸野猫洞堵洞试验论证页岩“构造”窗渗漏问题
10	喀斯特渗漏逻辑信息分析法	通过对研究程度较高的喀斯特水库的分析,筛选出对渗漏有影响的各项地质标志,建立水库渗漏的逻辑信息模型、渗漏量和标志有效度的关系,渗漏估算经验公式,据以预测喀斯特水库可能发生的渗漏量及其严重程度	贵州省内各梯级

(1) 水库坝址的选择是决定工程成败和防渗工程的数量和难易的关键。一般说, 水库要特别注意低邻谷。坝址应尽可能选在深切河谷地段, 注意避开地貌裂点部位、低邻谷、河弯和干支流交汇的三角地带、溶余残丘等容易出现渗漏的地段。峡谷内有隔水层(或相对隔水层)分布的横向谷常常是最有利的建坝地段, 我国在喀斯特区的高坝大库基本都选在这类地段。

在补排型、排泄型和悬挂型河谷一般存在分水岭渗漏、绕坝渗漏或坝基渗漏, 需要注意查明后避开或处理。

(2) 用一定的勘察工作量及在此基础上的综合分析, 对查明库坝址喀斯特地质条件是十分必要的。如东风水电站, 仔细分析了坝址和右岸地下厂房区正处于鱼洞暗河和凉风洞暗河两大喀斯特系统围限的河弯段, 地下水在排向河流时被两条暗河拦截和排泄, 坝址和地下厂房地段喀斯特不发育。施工结果证实上述分析正确。东风水电站厂坝位置的选择是一个充分利用有利地质条件的成功典型。

(3) 需要重视防渗处理方案和帷幕线路的比较选择, 认真查明帷幕线的地质和喀斯特发育情况。如前所述, 东风水电站在查明基本地质和水文地质条件后, 在防渗处理上利用了地下水分水岭处喀斯特相对较弱的有利条件, 施工后取得了较好效果。又如隔河岩水电站罗家坳分水岭虽然地下水分水岭低于库水位, 但查明了喀斯特发育情况, 不存在喀斯特管道, 岩体渗透性小, 节省了该处的防渗帷幕, 运行后情况良好。

### 三、建筑物区工程地质

#### (一) 地应力

地应力问题在 20 世纪 50 年代末期在水利水电工程(青石岭水电站)已有发现, 但并未引起足够重视和开展系统的研究。70 年代映秀湾和渔子溪一级的引水隧洞、地下厂房, 以及葛洲坝大坝基坑发生变形以后, 各有关单位进行了一系列工作。以后 20 多年来, 对地应力的认识不断加深, 也积累了不少经验。

##### 1. 性质

地应力亦称“岩体初始应力”。从西南地区深切河谷谷坡附近所测资料和计算常可得到如下概念: 最大主应力基本垂直河流, 两岸主应力倾向河床, 倾角小于谷坡坡角; 水平应力大于垂直应力, 垂直应力大于自重应力; 明显是山体地形与构造应力复合的应力场。有些工程如小湾、溪洛度、映秀湾等谷坡实测最大主应力大体平行河谷, 需注意附近构造情况作具体分析。从河谷横断面上看应力分布可分三带, 即应力释放区、应力集中区和应力平稳区。以二滩为例, 谷坡地应力的最大主应力  $\sigma_1$  的方向为  $N10^\circ \sim 30^\circ E$ , 基本垂直河流, 倾向河床, 倾角小于  $30^\circ$ , 与谷坡面近平行。应力释放区为两岸卸荷带,  $\sigma_1$  一般小于  $5MPa$ ; 应力集中区分布在河谷底局部,  $\sigma_1$  为  $40 \sim 80MPa$ , 局部达  $102MPa$ , 钻探时出现较多的饼状岩心带; 应力平稳区为新鲜→弱风化下段岩体, 一般较完好,  $\sigma_1$  在  $20 \sim 40MPa$  岩块间嵌合紧密 河谷周边浅部的应力过渡区  $\sigma_1$  在  $5 \sim 20MPa$ 。

目前一般是在建筑物区实测一定数量的测点后进行回归分析, 得出该区的地应力场

供实际应用，以避免个别测点受周围局部地质条件的影响导致成果的代表性不够。对于厂房上游侧的高压岔管等的特定地段，更要注意测试点的代表性和保证测试工作无误。

## 2. 地应力对坝基的影响

(1) 基坑变形、地基回弹。青石岭水电站大坝坝基开挖中，在清除约 17m 厚的河床冲积层后，左河床较完整的花岗片麻岩暴露后不久，表部突然水平成层开裂并伴随有震耳的爆裂声，爆裂岩片厚约 25~40cm，清除裂开层后，下部又继续平行开裂。据了解，美国大古力坝坝基开挖过程中也发生过类似情况。葛洲坝在清基浇筑坝体后，基坑上游侧边坡岩层沿层面有向下游的变位。以上为坚硬岩与软岩两种不同岩石的两种不同类型的变形。

二滩工程中，在研究了河床下部应力集中区后，将坝基建基面适当提高，只清除了岩面以上冲积层，不再向下开挖，避免了挖入应力集中区后地基产生卸荷回弹和变形破坏。

(2) 对坝基和拱座抗滑稳定的作用。二滩工程中，采用弹塑性三维有限元子结构凝聚法论证了地应力对拱座抗滑稳定的作用，计算结果表明：不计入地应力时单元的总破坏率大于计入地应力时单元的总破坏率；单元破坏率变化度（最大/最小）前者是后者的 2.5 倍。采用残余强度值计算时，在正常荷载下考虑地应力时结构面处于弹性工作状态。但由刚体极限平衡法（不考虑地应力）计算所得安全系数仅为 0.85。③考虑地应力时，按超载安全储备  $K_p = 6$ ，强度安全储备  $K_s = 4$  为设计准则，坝肩岩体是稳定的。可以看出地应力对坝基或拱座稳定的作用是不容忽视的。

(3) 对岩体及结构面参数的影响。岩体围压状态是制约岩体力学特性、本构关系及其强度的重要因素。据聂德新等对龙羊峡、安康、铜街子等水电站的研究，结构面充填物在围压状态下与在洞室暴露后（解除围压）的物理状态有很大差别（见表 1-3）。在暴露减压后，特别是有地下水的洞段变化迅速，很密实的夹泥在很短时间内夹泥强度亦有很大变化（表 1-4）。

表 1-3 围压下及在洞室中暴露后夹泥的物理状态

工程名称	夹层编号	围压下物理状态指标								洞中暴露浸水后物理状态指标			
		相对密度	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水量 (%)	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	孔隙比	塑限 (%)	液限 (%)	状态特征	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水量 (%)	状态特征	解除
龙羊峡水电站	F <sub>18</sub>	2.72	2.27	9.86	2.03	0.34	16.1	28.8	固态	1.48	24.7	塑态	5d
	T <sub>66</sub>	2.80	2.08	14.8	1.812	0.545	32.0	76.3	固态	1.16	46.9	塑态	3d
安康水电站	f <sub>1B</sub>	2.83	2.27	9.17	2.08	0.47	20.5	31.2	固态	1.63	20.72	塑态	1.5d
铜子街水电站	C <sub>5</sub>	2.91	2.32	13.39	2.04	0.426	14.8	28.9	固态	1.67	21.96	塑态	1.5h

表 1-4

断层夹泥中剪样与未松动样物理力学指标

试样类型	相对密度	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水量 (%)	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	孔隙比	液限 (%)	塑限 (%)	稠度	抗剪强度	
									tgφ	c (MPa)
中剪样	2.78	2.01	19.97	1.675	0.659	30.9	18.9	塑态	0.22	0.013
未松动试样	2.84	2.16	11.85	1.93	1.93	31.2	20.25	固态	0.44	0.017

(4) 对地下洞室的影响。20 世纪 60 年代末 70 年代初映秀湾和渔子溪一级两水电站施工过程中出现岩爆、地下厂房与尾调间岩柱变形导致母线洞混凝土衬砌严重开裂之后，陆续在天生桥二级工程引水隧洞、太平驿工程引水隧洞和地下厂房、二滩工程地下厂房和锦屏二级长勘探平洞等出现岩体变形和岩爆，但总的说岩爆还是局限于蒜皮状剥落和小块岩片弹射，还未达到影响正常施工的程度。

渔子溪一级工程地下厂房施工中为保护厂房高边坡，在开挖厂房前先将 4 条母线洞全洞及 4 条尾水管进口段提前挖出并完成了永久性混凝土衬砌。厂房及尾水调压室向下开挖过程中，上述已做的混凝土衬砌大量开裂，裂缝发展过程与开挖明显相关。经在母线洞进口附近沿混凝土裂缝开凿至基岩面，证实基岩内不存在相同的裂缝。混凝土顶拱的钢筋应力（压应力）量测成果表明：拱冠处内层钢筋应力大于外层钢筋应力，顶拱变形不符合坍塌拱压力理论，顶拱不是受压下沉，而是两侧岩体在开挖后回弹变形，使顶拱两端受挤，拱顶上抬。混凝土顶拱浇筑后不久，拱冠附近出现过一条纵向缝，开始渗水，以后渗白浆。厂房、尾调挖至底部时，该缝已闭合成发丝状，无水或浆渗出，最后已很难发觉该缝，同样说明顶拱发生两侧受挤的变形，对顶拱的稳定是有利的。

经分析后，对母线洞混凝土衬砌的裂缝仅沿缝凿宽，填环氧砂浆后抹平，顶拱未作处理，安全运行至 1999 年已 26 年，裂缝也未再有发展。

地应力对地下工程的影响，我们认为需要注意的有：

1) 关于地下厂房轴线的选择。从开展地应力的研究以后，普遍重视了轴线方向与最大主应力方向的关系，这在原则上是合理的，特别在高地应力条件应该加以重视。但在实际工作中轴线选择需要结合具体地质条件，包括岩石（体）强度与地应力的量级，兼顾结构面产状和地应力两方面因素，综合权衡利弊后决定，不顾其他条件过份强调地应力有时并不适当。

2) 关于施工程序。在高地应力条件下，施工要专门注意开挖和衬砌的合理安排，避免开挖造成衬砌人为的开裂。在开挖与衬砌交错工作的地段，开挖后必须支护的部位，应将衬砌设计为两次，一次为临时支护，周围开挖结束岩体变形基本稳定再作二次支护（永久衬砌）。

(5) 对边坡的影响。在高地应力环境下，河谷下切或人工开挖边坡，岩体变形强烈，松弛严重，边坡稳定条件差。如雅砻江锦屏一级水文站坝址为陡立岩层的顺向谷，两岸页岩向河谷倾倒，谷坡变形范围深达 400m 以上，不作详细地质工作时易误认为背斜构造。又例如天生桥二级厂房南坡为一砂页岩反向坡，削坡开挖后未及时支护，在不

足 3 个月的时间内发生 3 次严重的倾倒破坏，总方量达  $800\text{m}^3$ ，表层层面拉开 2~40cm。重新削坡时采用预置锚杆的方法先锚后挖，经检测倾倒变形被局限在坡体表面不超过 4m 的范围内。

## （二）软弱夹层

软弱夹层在水利水电工程中一般指遇水易软化、力学强度低的薄层。这类夹层由于强度低，往往是荷载作用下的薄弱环节，无论在边坡工程、坝基（肩）抗滑和变形方面，常是研究的重点。

### 1. 分类

一般按成因分为三类：原生型、次生型和构造型（亦称综合型或复合型）；按颗粒组成为四类：岩块岩屑型、岩屑夹泥型、夹泥岩屑型和全泥型。

### 2. 软弱夹层的勘察研究

（1）地质调查。编制详细的综合地层柱状图或按岩组编制岩组工程地质柱状图，后者在构造错动涉及的地层较多时采用。调查的内容包括软弱夹层分布的层位、连续性、厚度、性状、起伏差，夹层的分带、夹层上下侧岩石的岩性、完整程度等，作为抗滑稳定分析和研究处理方案的基础资料。

（2）勘探。根据现场条件，可根据岩层的露头和产状条件，选择探槽、平洞、钻孔、竖井或大口径孔等不同的方法。

以往钻探采取软弱夹层岩芯效果不佳。近 10 多年来成都勘测设计研究院研制了 SM 无固相冲洗液和 MY-1 型冲洗液的金刚石钻进取样新技术，不仅能取得原状的夹层岩芯，还可用于松散的砂卵石地层钻进，可取出完整岩芯，包括近似原状的砂层。还有绳索取芯报警钻具取芯方法，也可提高软弱夹层的取芯质量。

在钻孔中配合使用小口径钻孔彩色电视系统（如三峡），可帮助发现和核定夹层位置、产状和充填情况。

### 3. 试验研究

（1）颗粒级配。根据夹层胶粒（小于  $0.002\text{mm}$ ）、黏粒（小于  $0.005\text{mm}$ ）、粉粒（ $0.05\sim 0.005\text{mm}$ ）、砂粒（大于  $0.05\text{mm}$ ）含量百分比来确定软弱夹层的颗粒分类。

（2）物理性质试验。通常采用亲水性 [液限含水量（%）/小于  $0.005\text{mm}$  含量（%）] 和活性指数 [塑性指数 / 小于  $0.002\text{mm}$  含量（%）] 判别夹层性质的好坏。黏粒含量也是判别夹层性质的重要指标之一。

（3）力学性质试验。室内试验宜采用未扰动的原状土样。控制坝基稳定的重要软弱夹层一般进行现场大型试验；构造型软弱夹层由于分带复杂，有时还需对其泥化带、劈理带等分别进行试验。不同地质单元的试件和成果均应分别试验和整理。

葛洲坝工程在二江泄水闸部位对软弱岩层和软弱夹层曾专门做过两块试件尺寸（长×宽×高）为  $11.65\text{m}\times 1.70\text{m}\times 2.35\text{m}$  和  $9.45\text{m}\times 1.70\text{m}\times 2.30\text{m}$  的大型岩体试验（抗力体试验）。大型岩体试验最终可整理出抗剪、变模、压缩等多项参数和取得岩体破坏环型的资料，但由于试验规模大，需要专门设备和较多费用。

夹层的力学特性与夹层的矿物成分有明显的相关关系，因此软弱夹层的研究通常包括黏土矿物成分和夹层细微结构的研究。

(4) 化学分析。主要目的是了解夹层黏土矿物的种类、生成环境和发展趋向。研究内容除常规的化学成分外，主要有 pH、可溶盐、有机质、离子交换量和比表面积、 $\text{SiO}_2$  与  $\text{R}_2\text{O}_3$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 的比值等。

(5) 渗透试验。包括渗透性试验和管涌试验。

水库蓄水后在渗压水长期作用下，黏土岩泥化夹层的变化趋势是渗透试验研究的重要内容之一。葛洲坝工程的试验成果表明，节理带黏土岩及未受过构造作用的黏土夹层，在保持天然埋藏状态或保持天然结构的情况下，有渗压水长期作用也不存在泥化和恶化问题。劈理带中的黏土夹层，在缺少防渗措施或防渗措施失效时，随着夹层中渗透压力和含水量的增高，强度将明显降低；已处于软化状态的夹层，将趋向泥化并逐渐扩大泥化范围。

为保护夹层在人工排水条件下免遭破坏，排水孔作反滤很为费事，据葛洲坝工程在排水孔试用土工织物作反滤，效果可满足要求，维修亦较方便。

#### 4. 软弱夹层抗剪强度的选取

以葛洲坝工程为例，考虑到水工建筑物运用时间长，地基分布有软弱（泥化）夹层，存在时间效应问题，长江水利委员会根据试验对比，提出选用流变强度作为计算值，具体做法是：

(1) 室内试验或中型剪试验，摩擦系数选取可按下列的任一种办法：

1) 以抗剪试验峰值乘 0.85(屈服值折减系数)再乘 0.93 (屈服值流变折减系数)。

2) 以抗剪试验峰值乘 0.80(峰值流变折减系数)。

3) 直接采用流变试验值。

(2) 现场大型试验摩擦系数选取可按下列的任一种办法：

1) 以快剪试验屈服值乘 1.09(固结校正系数)再乘 0.93 (屈服值流变折减系数)。

2) 以快剪峰值乘 1.09(固结校正系数)再乘 0.80(峰值流变折减系数)。

3) 直接采用流变试验值。

根据研究结果，构造型软弱夹层结构上存在定向排列，不同剪切方向上的抗剪强度不同，因此试件剪切方向应注意尽量与建筑物滑移方向一致，使试验值尽量符合实际工作条件。

#### (三) 岩质边坡

岩质边坡的稳定性是水电工程中经常和大量遇到的课题，也是比较复杂和困难的课题。岩体是一个多结构面切割的地质体，目前还不能完全依靠理论分析来解决岩质高边坡稳定问题，需要从经验和理论两个方面作出评价。在处理实际的边坡工程时，应十分重视影响边坡失稳的地质条件的分析，运用以往工程中积累的成功和失败的经验再用

于工程实际。

### 1. 工程实例

(1) 天生桥二级水电站厂房后边坡自调压井平台边坡坡顶（高程 790m）至地面厂房基坑底（高程 420m），其间下山包顶（高程 600m 左右）为一大平台，总坡高 370m。调压井平台以上边坡岩层近水平，稳定条件较好，处理原则是充分利用岩层平缓的有利条件保持边坡稳定。按岩体风化程度确定马道间开挖坡度（自  $65^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ），并加系统锚杆和喷混凝土。下山包与调压井平台间大体为陡倾岩层的顺向坡，也作了喷锚。下山包山顶为古滑坡堆积物，堆积物以下至厂房基坑又为平缓砂页岩互层。边坡开挖过程中触发了沿层间软弱面的滑动。通过近两年的综合治理（详见第四章），滑坡被控制住。开挖期间最大总位移量近 400mm 最大位移速率达  $8 \sim 9\text{mm/d}$ ，综合治理后降至  $0.1\text{mm/d}$  以下，最后进入了完全稳定状态。竣工后至今电站正常运行，未见异常。

(2) 陕西省西安附近的韩城发电厂位于居水河的 II 级阶地上，是与象山煤矿相邻的一座坑口电站，1979 年全部建成投产。厂区距东侧横山自然边坡坡脚 100~200m，厂区及横山地表以下 180~280m 有三层可采煤层，其中 5 号煤层 1979 年开始采掘，1995 年 3 月停产，采空区边缘距主厂房约 500m。1982 年厂房地基及构筑物发现变形，1985 年变形日趋严重，主厂房框架多处裂缝，烟囱倾斜，当时认为系厂东侧横山滑坡所引起。1985~1989 年采取的主要措施为：①滑体上部减载约 90 万  $\text{m}^3$ ；②沿横山坡脚修筑抗滑桩 73 根（断面多为  $3\text{m} \times 5\text{m}$ ，深 30 余米）1994 年 5 月后变形速率突然增大，1995 年 3 月，原电力工业部西北勘测设计研究院承担治理任务，通过补充勘测和坡体变形机制的研究，认为变形是地下采煤直接引起，地面入渗和红旗渠漏水是变形速率加大的主要因素，厂区东侧山坡尚未形成有明确界面的滑坡，应属“塑流型蠕变变形”山坡。据此，采取应急治理措施主要为：停采横山、北山下的 5 号煤层；红旗渠堵漏；堵塞山坡坡体表面张开裂缝，完善坡面排水措施，减少降水入渗；在抗滑桩东侧设纵向排水幕，降低坡体及厂区地下水位。实施上述措施后，坡体及厂区的变形得到有效控制，达到了应急治理的预期目标。这是最近针对变形机制成功治理边坡的又一典型实例。

### 2. 滑坡和边坡登录

为了积累经验，开发边坡工程的知识库，提高对滑坡和边坡失稳机理的认识，为正确设计边坡工程提供基础资料，在中国水利水电科学研究院组织下，由原电力工业部中南勘测设计研究院牵头，西北、成都、贵阳、昆明勘测设计研究院和中国水利水电科学研究院为骨干，在全国范围总共完成了 21 个省（自治区）水利水电项目有关的 117 个典型滑坡和边坡工程登录的征集，建立了滑坡和边坡工程数据库。在统计上将边坡分为开挖边坡、水库边坡和河岸边坡。从不同坡高边坡失稳统计可以看出，水利水电工程中失稳边坡以坡高 100m 以上者居多。同时还反映了不同岩体结构边坡的各种变形破坏类型及其比例，并作了边坡变形、破坏因素的统计分析，详见第四章。

### 3. 勘测新技术

- (1) 库岸稳定性的遥感调查（主要为航空遥感）技术。
- (2) 快速摄像微机地质素描成图。
- (3) 地震浅层反射法和层析技术（包括电磁波和地震）。
- (4) 无磨损钻探取芯技术（滑面和软弱夹层等）。
- (5) 小口径钻孔彩色电视孔壁成像系统。

(6) 节理网络模拟技术等在生产中较为普遍取代人工统计连通率，并且注意到在确定最短途径时引进了动态规划中的逆序搜索方法以保证精度；通过验证明确了在剪切带宽度大于 2~2.5 倍节理间距后，连通率将趋于定值；在连通率随正应力水平变化的关系上，明确了在边坡稳定分析所涉及的应力水平变化范围内，连通率随正应力水平变化的最大幅度不超过 5%。

采用无磨损钻探技术和孔内电视相结合实际调查岩体结构面的分布及其连通率是最新发展起来的。长江水利委员会在三峡工程左、右岸厂房为落实缓倾角结构面的连通率，均曾在有关坝段布置了孔距 15~20m 的勘探剖面，全部采用无磨损钻探技术，保证了每一个缓倾角结构面及其充填物的取样供地质鉴定。同时在每一个钻孔中使用自行研制的以 CCD 光电耦合摄像器为主体的  $\phi 50\text{mm}$  钻孔彩色电视，测量每一个缓倾角结构面的位置、产状和充填物情况。在以上两种成果（钻孔岩芯和井下电视测量资料）互相校验的基础上绘制出各坝段的特殊勘察工程地质剖面图。制图过程中由有经验的地质工程师根据各孔中结构面的具体情况确定每一结构面的性质、延伸范围和各孔间结构面的连接，最终提出可能滑移的确定性概化模型供设计使用。这一方法较节理网络模拟更加结合当地的地质条件，所获成果经开挖验证具有很高的吻合度；问题是耗资大，勘测要求高，因此仅在特别重要建筑物部位才进行。

#### 4. 边坡失稳类型

岩石边坡的稳定性在很大程度上是受结构面控制的，因此合理地 对岩体结构进行分类，可以定性认识边坡的稳定性。国内首先由谷德振先生提出将岩体结构划分为整体块状结构、层状结构、碎裂结构和散体结构等四个基本类型及若干亚类，之后各系统根据各自的需要有一些发展。水利水电工程边坡登录工作小组在以往分类基础上提出了边坡岩体结构分类表和边坡变形破坏分类表（参见第四章）。对层状岩体根据其层面产状与边坡坡向的关系不同，失稳模式也明显不同分出了层状同向、层状反向和层状斜向三类边坡。以上分类可帮助初步分析边坡变形破坏的基本类型。

#### 5. 边坡稳定分析方法

(1) CSMR 中国水利水电科学研究院陈祖煜等对 Romana (1985) 的 SMR 体系作了一些修正，主要是增加了坡高因素的修正和在增加了结构面方位的修正时，根据结构面性质的不同提出了结构面条件参数。另外对各类岩体分类指标的分档作了调整，以便与我国有关规范或习惯作法协调。对 CSMR 分类表（详见第四章）需要指出的是，这一分类较 SMR 有所改进，但仍然主要是定性的。另外，提出的时间较短，试用的工程还不是很多，将在今后的使用中继续验证和完善。