复杂地形地质条件岩土工程勘察实践与探索

陶忠平

（云南省水利水电勘测设计研究院，云南 昆明 650021）

摘　要：就复杂的地形地质环境中水利水电工程地质勘察方法、分析与评价或探索性的思路作一简要的描述。

关键词：地形地质环境；工程勘察；实践与探索

作者简介：陶忠平(1950－)，男，云南墨江人，高级工程师，主要从事水利水电工程地质工作。

1　复杂的地形地质环境

1.1　地形

云南是我国西南部的高原山地省份，处在较低纬度区和新构造运动较活跃的部位，地形条件复杂。全省总面积的94%为高原山地区，6%为盆地、台地区。总体地势是西北高，东南低，最高山峰是滇藏交界处的梅里雪山主峰，海拔6740 m，海拔大于5000 m的极高山主要分布在丽江以北至梅里雪山一带。向南、向东分布有海拔3500～5000 m高山，包括高黎贡山、怒山、云岭、点苍山、白草岭等主要山岭，伸展到永平—下关—大姚以北地带，并包括滇东北的五莲峰山岭。3500～1000 m的中山，主要分布于滇西、滇中、滇南较广泛的区域，在滇东北和滇东南也有小范围中山地形区。海拔1000 m以下的低山、丘陵区主要分布于滇东和滇东南地区，其次是滇西南的一些边缘地区。省内最低处在滇东南河口县红河出口处，海拔76.4 m。高原主要分布在滇中、滇东及滇西南的部分地区。少有的盆地则镶嵌于山地丘陵之中，规模大小差别较大，多数为构造成因所形成。

云南地形起伏程度在不同区域有较大差别，全省地貌，以构造成因类型为主，其次是侵蚀、剥蚀、溶蚀、堆积等多种成因，形成十分丰富的地貌景观。在地域分布上，可分为东西两个大地貌区，其间以元江河谷和云岭山脉为界，以西为滇西山地峡谷区，平均海拔3500 m左右，高山峡谷相对高差3000～4000 m，有省内最高的山脉和山峰。世界著名的"三江并流区"即在其间。成为独特的深切割极高山—高山—中山—湖盆地貌景观。

元江河谷和云岭山脉以东为滇中、滇东高原盆地区，属云贵高原的组成部分，大部分地区平均海拔2000 m左右，相对高差500～1000 m，区内有较多中小型盆地，一般都是人口稠密和经济发达区。在较广泛的区域内，河流切割不强烈，早期的高原面得以保存，地势平缓，形成中山—高原—湖盆地貌景观区。在邻近金沙江、元江和南盘江河谷区，则形成边缘地带深切割的中山—高山—山原地貌景观。在高原的东部、东南部碳酸盐岩类广泛分布区，为大面积的岩溶地貌区，发育有各类地表、地下岩溶形态，如峰丛、峰林、溶丘、石林、溶蚀洼地、漏斗落水洞、暗河、溶洞、盲谷等，形成众多有地区特色的岩溶地貌景观。

1.2　地层岩性

省内各时代地层均有分布，在形成全部地层的地质历史时期中，由于地质构造运动和沉积环境的变迁，也形成多个构造单元和地层区，不同地层区在沉积建造，岩浆活动和变质作用方面都有较大差异。全省地层和地质构造，总体上以金沙江—哀牢山断裂带为界，分为东西两大区。

西部区地壳活动强烈，地质构造复杂，地层以地槽型沉积为主，区内二条深大的怒江断裂和澜沧江断裂，将西部地层区分成3个褶皱系和次级地层区，即波密—腾冲褶皱系与左贡—耿马褶皱系、三江褶皱系。在这3个褶皱系地层中，分布有较大的花岗岩体和变质岩带。花岗岩体主要分布在波密—褶皱系的怒江州独龙江流域和怒江流域；腾冲县、龙陵县怒江以西大部分地区；左贡—耿马褶皱系的凤庆县往南经临沧县至勐海县的大面积宽带状区域。变质岩带主要分布在波密—腾冲褶皱系怒江河谷和高黎贡山地带；德宏州大部分地区；左贡—耿马褶皱系昌宁以南花岗岩体西侧地带和西盟以南地带。玄武岩类等喷出岩体的分布，除腾冲地区新生代玄武岩之外，多呈南北向条带状分布，主要有维西县以东云岭山一带；云县以南澜沧江河谷至小黑江入口段；景洪至大勐龙段。碳酸盐岩类的沉积主要形成于泥盆纪至下二叠世，其次是中上三叠世。各时代碳酸盐岩多呈带状分布于左贡—耿马褶皱系中，北自泸水县起，往南直至国境线止，形成逐渐放宽的带状碳酸盐岩类地层区，即泸水、保山、施甸、永德、镇沅、耿马、沧源、孟连等。其余广大区域主要为中生代碎屑岩和新生代盆地松散堆积层。大面积的中生代碎屑岩地层基本上都分布在三江褶皱系地层区，北部由德钦县起，南至勐腊县、江城县、绿春县一带国境线。

新生代盆地堆积层在波密—腾冲褶皱系内主要有瑞丽、陇川、盈江、梁河、潞西、遮放、腾冲、固东街、营盘街等盆地。在左贡—耿马褶皱系中有耿马、双江、勐定街等盆地区。在三江褶皱系内有景东、景谷、思茅、普文、景洪、橄览坝、大勐龙、勐海等盆地地区。

东部区地壳活动程度较弱，地质构造较为简单，地层以地台型沉积为主，根据地质历史的发展和地质环境的变化状况，将东部区又分为3个区，即松潘甘孜褶皱系、杨子准地台、华南褶皱系。

松潘甘孜褶皱系主体在北侧的四川省境内，云南境内主要地层以碎屑岩类和碳酸盐岩为主，其次是玄武岩。该褶皱系西界为金沙江断裂，东界为三江口—剑川断裂，两断裂相交于乔后镇，构成该褶皱系的楔形体。最老地层为元古界石鼓片岩，其上无下古生代地层，上古生代泥盆系底部为砾岩、砂砾岩，上部为大理岩。石炭系以碳盐岩

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

为主，二叠系为玄武岩及碎屑岩。三叠系地层在本区变化较大，主要岩性为页岩、铝土质页岩、泥质灰岩、板岩、砂岩、凝灰岩、安山岩等。

东部区的杨子准地台区，以哀牢山大断裂与三江口—剑川断裂为西部边界，以弥勒—富源断裂为东南部边界。该区以前震旦系昆阳群及龙川群变质岩为基底，其上覆盖着震旦纪以后地台型沉积为主的地层，也有部分侵入和喷出岩体，各类地层的出露情况，在不同次级构造单元和地层区仍有很大差别。

在程海断裂以西的丽江—盐源台缘褶皱带，沉积环境属地槽与地台的过渡区，出露最老地层为震旦系灯影组白云质灰岩、硅质白云岩。下古生代地层以碎屑岩类为主，只在丽江—泸沽湖以西地带出露完整（厚达4000 m以上）其余地区均出露不全。上古生代泥盆系为碎屑岩夹碳酸盐岩地层（厚1700 m以上），广泛分布在丽江、宁蒗地区及洱海以东地区。石炭系及下二叠统均为碳酸盐，呈西厚东薄趋势。上二叠统下部为玄武岩，上部为含煤地层，在程海断裂以西有大面积分布，最大厚度在2000 m以上。中生代三叠系为海陆交互相的碎屑岩，一般南部厚度小，北部厚度大，变化范围2100～10000 m。该褶皱带新生代有较多近南北向构造盆地，较大的有鹤庆、大理、弥渡、宾川、祥云、丽江、剑川、洱源等地，这些盆地通常有数十米至数百米第四系松散层或第三系半胶结至全胶结的粘土岩、砂岩、砾岩。

程海断裂以东，绿汁江断裂以西地区，属滇中台拗地层区，为中生代地层广泛分布区，侏罗、白垩系的陆相红层砂岩、泥岩成为台拗地层区的主体，处在古老康滇地轴部位，其下古生代地层缺失直至中三叠世止，由上三叠世开始堆积了含煤地层泥岩、砂岩及板岩。侏罗、白垩系为多旋回的河湖相砂泥岩层，并含膏盐。全部中生代地层厚度达万米以上。至新生代在永仁、元谋、姚安、牟定、楚雄等地发育了一系列构造盆地，堆积物为砂岩、砾岩、泥岩及松散砂砾石层、粘土层，厚数米至百余米。

元谋断裂（绿汁江断裂）以东到师宗—弥勒断裂以西的广阔区域，均属滇东台褶带，该带小江断裂以西是一古老地层出露区，从昆阳群至震旦系各组（统），均有广泛的出露。该区域呈南北向延伸的绿汁江、普渡河、小江三条大断裂，促成了基性岩的侵入与喷发活动，形成该区广泛分布的上二叠统玄武岩，并扩展到滇东北地区。

小江断裂以东地带古生代地层较齐全，并与震旦系成连续沉积。最下部为陡山沱组碎屑岩夹少许灰岩，并含磷，厚40～100 m。其上灯影组以白云岩为主，夹硅质岩、磷块岩、硅质白云岩等总厚700～1000 m（含下寒武统梅树村组）。中寒武统至泥盆系以碎屑岩地层为主。也有碳酸盐岩，岩性及厚度均不稳定。石炭系至下二叠统以碳酸盐岩地层为主，上二叠统以煤系地层为主，分布于滇东师宗、弥勒和昭通—宣威—富源等地，为环康滇古陆边缘的沼泽相砂岩、页岩夹煤层沉积物。侏罗、白垩系零星分布。古近世伴随褶皱和断块活动，形成滇东一系列构造盆地，主要有昆明、玉溪、通海、江川、建水、石屏、嵩明、寻甸、会泽、昭通、宣威、曲靖、陆良、师宗、罗平、泸西、弥勒等，这些盆地是云南省内经济发达和人口稠密区。

在哀牢山构造带北东（哀牢山深大断裂北东）师宗——弥勒深大断裂东南区，属华南褶皱系的滇东南褶皱带。该褶皱带基底大体与杨子准地台区相同，为屏边变质岩，其上沉积震旦系及下古生代地层厚达万米以上，属地槽型沉积，以砂岩、泥质粉砂岩、泥岩为主，夹有灰岩及白云岩薄层，分布于南部屏边至文山之间地带，并组成弧形褶曲带和隆起区。

1.3 构造

云南地质构造复杂，在漫长的地质历史时期中，经历了东川运动（元古代上下昆阳群之间的一次运动）、晋宁—澄江运动（中元古代与晚元古代之间的运动）、加里东运动（寒武纪至早泥盆世前的运动）、华力西运动（泥盆纪至早三叠世前的运动）、印支运动（早三叠世至侏罗纪前的一次运动）、燕山运动（侏罗纪至始新世前的运动）、喜马拉雅运动（始新世末后的造山运动）、新构造运动（自上新世末开始的以间歇式掀升运动和断裂运动为主的多种类型构造运动）等。多旋回的构造运动才形成现今的构造格局，地质构造复杂，地震活动频繁。

2 工程实践

2.1 山间盆地松软地基筑坝工程地质实践

正在建设中的麻栗坝水库，位于陇川县城北5 km的瑞丽江一级支流南宛河上，水库地理位置东经97° 58′，北纬24° 24′30″，水库是以灌溉、防洪为主，结合养殖、发电等综合效益的大(二)型工程。最大坝高35.6 m，坝顶长1083 m，正常蓄水位994.7 m，总库容10665×10^4 m^3，水库径流面积294 km^2。3条干渠总长112.66 km，灌溉面积22.68×10^4亩。

2.1.1 基本地质条件

(1) 地层岩性

水库区最大径流面积294 km^2，分布地层有寒武系变质岩(∈)，燕山期花岗岩(γ_5)，上第三系(N)弱成岩含砾砂土夹粘土地层，主要分布在河谷地带，厚度大于500 m。第四系(Q)，以冲洪积砂卵砾石层及阶地堆积壤土、砂壤土层为主，其次为残坡积砂壤土及碎石土层，另有零星沼泽堆积及地滑堆积层。

(2)区域稳定性

工程区北东向区域断裂第四系有过活动，但晚更新世或全新世活动不明显。第四系晚期，陇川盆地以侵蚀堆积为主。地震基本烈度,2002年5月，云南省地震局对库坝工程场地地震安全性评价。结论是50年超越概率10%的地震动峰值加速度为0.15g，特征周期为0.4 s。工程区场地地震烈度为Ⅶ度。

2.1.2 坝址工程地质条件

水库枢纽区位于陇川断陷盆地内，主要分布地层为上第三系砂土夹粘土层及第四系堆积层。上第三系(N)为洪水湖相沉积，总厚度大于500 m。根据枢纽区勘探资料，上第三系(N)基岩从老到新共分为15层，砂性土层及粘性土互层，粘土地层成岩度较差，强度较低，一般为中压缩性土，含砾砂性土层由于成岩时间短，胶结程度较差，呈砂土层状构造，结构较紧密，一般为中低压缩性土，未能形成整体岩块或岩体。承载能力低（与一般已完全成岩岩体相比），压缩性中等，抗剪强度较高。砂性土在自然和人工开挖边坡坡高小于5 m，且边坡为陡坡情况下具有较好的稳定性；在地下水以下取出的试样在自重条件下能够保持自身的形状。地层胶结或成岩程度逐渐变差，压缩

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

系数和渗透系数逐渐变大，标准贯入击数逐渐变小，承载力逐渐变小，总体上坝基上第三系砂性土层及粘土层属极软弱岩层。

地质构造：枢纽区地层岩性单一，上第三系地层为向南东缓倾斜的单斜状地层，走向大致平行河床，无褶皱断裂发育，岩层总体产状N10° E，SE∠10～15° 。岩层稳定。

2.1.3 主要工程地质问题

(1) 存在坝基渗漏问题

上第三系砂性土坝基渗漏量234.1×10^4 m^3/a，绕坝渗漏量左岸为6.9×10^4 m^3/a，右岸为2.9×10^4 m^3/a。总渗漏量为243.9×10^4 m^3/a，占总库容的3.1%，占来水量的0.7%。

(2) 存在坝基渗流稳定问题

根据麻栗坝水库坝基大量现场管涌试验及室内管涌试验,对各岩组进行了综合分析评价，分别确定了各岩组渗透变形形式及允许比降值。其中上第三系粘性土渗透变形为流土，破坏比降大于1.0，大于坝基出逸比降，一般不会产生流土破坏。坝基砂性土层渗透变形为管涌，分段分析表象如下部位：

a) Ⅱ级阶地下部砂卵砾石层：厚度3～5 m，渗透变形为管涌，建议允许比降为0.17，小于出逸比降0.303，容易产生管涌。0+700～0+800 m 坝基段出逸比降为0.23～0.45，大于允许比降0.23～0.25，容易产生管涌。 上第三系 N^{15}～N^{9} 层砂性土层：岩性为卵砾质土、含砾砂土，渗透变形形式为管涌，建议允许比降为0.23～0.25。

b) 河床段渗流不稳定区段(0+800～0+940 m)。

河床上部粗、中、细砂层：厚约1 m，渗透变形为流土，流土比降为1.0。但与下部砂卵砾石层接触带，渗流仍不稳定，表层砂容易产生接触冲刷。

河床下部砂卵砾石层：厚3～4 m，渗透变形为管涌，建议允许比降为0.1，小于出逸比降0.12～0.45，容易产生管涌。

河床上第三系 N^{3}～N^{7} 层砂性土层：渗透变形为管涌，允许比降0.28，小于或大于出逸比降0.12～0.415，部分土层会产生管涌。

c) 右岸(0+940～1+100m)区段：Ⅱ级阶地，下部砂卵砾石层，厚3～5 m，渗透变形为管涌，建议允许比降值为0.17，小于出逸比降值0.303～0.2，容易产生管涌。

坝右岸斜坡渗流基本稳定区段：此区段覆盖较薄，部分上第三系砂性土层出露。除Ⅱ级阶地砂卵砾石允许比降小于出逸比降，会产生管涌外，上第三系砂性土层一般不会产生管涌。

(3)存在地基土液化问题

麻栗坝水库地基土为第四系和上第三系地层。根据GB 50287－99《水利水电工程地质勘察规范》附录N 土的液化判别标准，首先对地基土按时代进行初判。其中，一级阶地及河床砂卵砾石为全新世(Q_4)地层，根据地层时代初判可能会发生液化， 河床砂土层，标贯试验 $N_{63.5}$ 为2～3击，其结构松散，可能产生液化。

(4)存在坝基不均匀沉陷问题

坝基沉陷量主要与坝高、建筑物荷载及地形条件有关。坝址坝基出露地层中，第四系与上第三系土层一般均为中压缩性土，仅有Ⅱ级阶地红土属高压缩性土。

坝基第四系与上第三系土层均为中压缩性土，仅有Ⅱ级阶地表层的红壤土层属高压缩性土层。对坝基各典型断面进行初步沉陷计算， 左岸Ⅱ级阶地平台沉陷量小，河床沉陷量相对较大，右岸Ⅱ级阶地平台沉陷量较小。因此，在河床与两岸阶地陡坎结合部位产生的不均匀沉陷大，从而引起坝体的不均匀沉陷。因此，由于不均匀沉陷，会造成河床与岸坡、坝基与涵洞之间坝体产生拉裂破坏。需采取措施处理。

a) 建议分区坝坝轴线河床心墙位置开挖深度深入上第三系土层1～2 m，对坝基 N^{6} 粘土层透镜体尽量截穿，河床开挖深度5～8 m，基坑开挖涌水量50～60 l/s。两岸心墙位置必须截穿Ⅰ、Ⅱ级阶地砂壤土、壤土及砂卵砾石，深入上第三系地层1～2 m，开挖深度5～8 m，基坑开挖一般无水。心墙以外坝基：河床段全部清除第四系砂和砂卵砾石。右岸 HP_1、HP_2 两个浅层滑坡位于坝体内的部分及一、二级阶地表层腐质土等需全部清除。

b) 防渗处理方案：0+630 m 前、1+096 m 后水头较低，采用混凝土薄墙方案处理，处理深度一般15～18 m。0+630～1+096 m 河床段及二级阶地前缘，水头较大，防渗处理采用混凝土墙方案，最大处理深度22 m。绕坝渗漏处理的边界为正常高水位线与地下水位交点为界。主要进行削坡处理。坝基河床两岸陡坡地段，高差10～14 m，为防止坝基、坝体不均匀沉陷造成坝体开裂破坏。建议两岸进行削坡处理，河床段筑坝先施工预压、沉陷，再施工两岸坝体，与河床段坝体。

(5)存在西低导流、输水、发电隧洞洞身软弱层极不稳定问体

西低隧洞位于右坝肩山体上，轴线绕过坝体后进入下游南宛河河床。全长680.14 m，其中洞身段长268.5 m。导流进口底板高程973.8 m，发电洞取水口高程971.366 m。

洞身极不稳定段(Ⅴ类)(0+000～0+268.5 m)，该段隧洞洞身断面4.5×5.0 m，一般埋深6～18 m，最大埋深26 m，地形坡度25～30° 。表层为残坡积层(Q^{edl})砂壤土夹碎、块石，冲洪积层(Q^{apl})砂质粘土、砂壤土及砂卵砾石结构松散，洞身围岩为 N^{3} 层含砾粗中细砂土夹粘土透镜体，层面倾向山外，倾角较缓。地下水高于洞身约12 m。闸门井位于0+022.5，井深15 m，地下水埋深4 m，0～4 m为冲洪积层，由砂质粘土、砂壤土及砂卵砾石组成，结构松散，4～15 m为上第三系（N）含砾砂土夹粘土层。地下水位高于隧洞洞身约12 m。围岩为上第三系(N)地层砂土，成岩度差，强度低。透水性中等，开挖中位于地下水位之下，岩层自稳能力极差，成洞条件差，洞身极不稳定，局部洞段可能产生冒顶，属Ⅴ类围岩。闸门井井壁开挖中自稳能力差，特别在地下水位以下，自稳能力更差。

建议隧洞和闸门井开挖后及时进行支护处理，采用注浆管棚施工工艺、采取降水措施。需注意闸门井和洞身结合部位产生不均匀沉陷问题，隧洞进出口边坡采取措施支护或永久处理，防止边坡及进出口洞身产生坍塌或滑动。洞内需排水。

麻栗坝水库是云南山间盆地松软地基中建造的大（Ⅱ）型水利工程，工程地质条件复杂，建筑物基础软弱，只能建柔性坝，采用薄防渗墙防渗（目前防渗墙已实施完成）。工程正在紧张的施工建设中。

2.2　头水电站要害建筑物部位工程地质评价方法

云南的高水头电站多兴建于深大断裂河谷的支流，在滇西三江

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

地区,滇东北、滇西南、滇东南山区以及滇中哀牢山区等均有分布。这些电站从一条或相邻多条溪流引水，前池（或调压井）、钢管道、厂房多布置于溪流之间的山脊。地形条件往往具备高差达500～1000 m 以上的阶梯形陡峭山坡。处于不同地区的工程其地层岩性差别很大，有的工程地层岩性相对单一，有的工程则三大类地层（沉积岩、变质岩、火成岩）齐全，岩性复杂。构造上，以青、藏、滇、缅、印尼巨型“歹”字型构造、云南“山”字型构造以及经向构造的断裂褶皱对工程影响最为显著，如怒江大断裂、澜沧江大断裂、红河大断裂、小江断裂等。同时,规模巨大的山坡重力地质现象（滑坡、崩塌、山体变形）对工程构成直接影响。总体上看，高水头电站由于建筑物分散、线路长、高差大，所牵涉的地质体范围宽，地质条件变化大，工程地质问题往往较多。

位于澜沧江峡谷兰坪县境内的大华电站的基本地质条件就是如此，分别有两条河引水，渠长6.6、6.02 km，取水口高程2229.94、2228.8 m，前池水面高程2217.5 m，管道布置在极狭窄的山嵴上，利用水头770 m，引用流量2.35 m^3/s，装机14 MW，1999年开工建设，2001年建成投入运行发电。由于在勘测过程中对高陡边坡等复杂工程地质问题作了充分研究，处理措施得当，运行多年正常，未出现大的工程地质问题。

要在这种复杂的地质环境建造水利水电工程必须对如下工程地质问题有足够的研究和认识。

（1）活动断裂问题

云南属多方向构造交织区，活动断裂发育，长度超过100 km 的活动断裂有30余条，比较著名的包括小江断裂、程海断裂、红河断裂、腾冲火山断裂带、南汀河断裂等。这些断裂可分两类：①无震蠕滑断裂；②地震断裂。第①类只具蠕滑位移，不发生地震；第②类发生地震，亦存在蠕滑位移。

活动断裂的地震错动和无震蠕滑可以直接造成建筑物错断破坏、或基岩错断失稳；地震发生时的动荷载亦可造成建筑物破坏、使松散层地基发生不均匀沉降、砂基液化、地裂缝和山体失稳等。

当高水头电站遭遇活动断裂时，宜逐步提出如下工程措施：①在梯级电站规划工作中应考虑以梯级电站衔接来避免断裂活动对工程的影响；②在电站布局时应避免重要建筑物直接布置或跨越断裂带；③在次要建筑物必须穿过断裂带时，应根据断裂活动特征、速率等提出适应变形位移的措施建议。

（2）河床深厚松散层问题

因泥石流、历史冰川携带堆积等原因，有的溪流冲洪积层厚度达10～25 m，物质成分以砂卵砾石夹孤石为主，一般无软弱夹层，结构通常密实，但大块体密集时有架空。该类物质的强度指标（允许承载力、变形模量）一般可满足建低等级闸坝要求，坝基开挖时无全部清除必要。但松散层渗透性指标偏大，需设截水槽解决坝基渗漏和渗透变形问题。此外，古滑坡堰塞河段河床松散层厚度可达20～40 m，多有淤泥、粉砂夹层分布，作为中小工程，最好的解决办法是在坝址选择中避开堰塞河段。

（3）山体稳定问题

兴建高水头电站的地形一般为陡峻高大的阶梯形山坡，山体稳定问题对于工程是否成立、如何布局妥当至为关键。高陡山坡的失稳破坏类型繁多，其特征、规模各异（见插表），规模大型或巨型的变形失稳破坏多发育于山脊两侧的山坡，尤以凹坡为甚。如云南兰坪县境内澜沧江边岸的拉古滑坡、大华滑坡，二者皆发育于侏罗系泥板岩地层，规模均超过10^3万m^3，规模数十万m^3～数百万m^3滑坡更呈星罗棋布之势。

对中小电站工程而言，针对山体稳定问题的传统地勘工作方法简单，手段单一，工作量亦有限，一般以地质测绘辅以少量钻探、山地工程勘探为主。对山体稳定问题的分析评价也较笼统，多根据地质条件按规范查表作定性评价。随着国内外对边坡变形破坏机制认识的统一，边坡岩体CSMR分类体系趋于成熟，在云南一些高水头电站的山体稳定问题分析中得以运用，经工程建设检验效果良好。CSMR分类体系属半定量的分析评价理论，可辅以赤平投影分析，使成果更加完善可靠。在CSMR分类和赤平投影分析基础上，可针对山坡体不同变形破坏机制，对重要边坡的稳定性作进一步定量评价，即稳定分析计算。分析方法包括：极限平衡分析、溃屈破坏分析、应力应变分析、模型试验分析等。

（4）厂房软基问题

高水头电站的厂房、升压站等建筑物多布置于干流河滩或阶地，往往松散层厚度大并且有淤泥、砂层分布，其允许承载力、变形不能满足建筑要求，且可能兼存地震液化问题。对此须通过勘探手段查明松散层物质组成、结构及其力学特性，以提出具针对性的工程措施建议。

2.3 长引输水隧洞在勘探工作不能满足精度要求时的围岩分类探索

2.31 工程概况

高桥水电站地处滇东北高原昭通地区的昭阳、大关、永善三县区结合部，位于金沙江一级支流横江上游的洒渔河上，距昭通市48 km，是一座具备可与渔洞水库实现联合调度运行的中型骨干水电站工程。工程由拦河坝、引水隧洞、调压井、压力管道、厂房（装机90 MW）组成，1993年进行预可研阶段的地质勘察工作，1997年12月动工兴建，于2004年6月投产发电。

引水隧洞设计开挖洞径4 m，隧洞进口底板高程为1804.00 m，出口高程为1770.38 m，隧洞总长8863 m，底板坡降为3.0‰和4.2%，为圆形有压洞室，隧洞埋深为49～350 m，设计引水流量18.9 m^3/s。

（2）勘察方法及围岩分类

高桥电站隧洞勘察以地表地质测绘为主，辅以少量勘探，在地质测绘基础上，分析了左、右岸地质条件：①洒渔河右岸区域性断裂发育，规模较大的有F_{45}断层（泥古寨断层），其走向与洞线交角小，右岸冲沟比左岸切割深且宽，右岸洞身避不开岩溶地层，右岸洞线比左岸长；②左岸仅发育三条小规模断层，除F_5断层走向与洞线交角较小外，其余两条断层走向与洞线交角均大于60°；左岸冲沟虽然发育，但切割深度及宽度相对右岸要浅而窄；左岸洞线在玄武岩中通过，利于布置，洞线左岸较短。

根据左、右岸隧洞工程地质条件利弊分析，左岸洞线优于右岸洞线方案，隧洞线沿左岸布置。在左岸共选3条洞线，#1线靠河岸近，洞线穿越冲沟时为明管，而岸边岩体卸荷裂隙发育，岩体风化较强，

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对围岩稳定影响较大。#2 线虽然避开了#1 线的不利因素，但过冲沟时需曲线布置洞线，施工难度较大。#3 线靠山内布置，避开了卸荷岩体、风化岩体及冲沟，使洞身沿弱—微风化玄武岩岩体布置，利于洞室围岩稳定。

对#3 线进行工程地质剖面测绘，在隧洞进出口及支洞进行少量的平硐勘探，在隧洞进口布置平硐一条（长 50 m）、4 号支洞进口布置平硐一条（长 50 m）。在洞线重点部位布置四个钻孔，进尺 451.08 m。由于隧洞长，埋深大，地形陡 70～75°，几乎是悬崖峭壁，交通极为不方便，勘探工作非常困难，使勘探成本成倍增加，因此采用少量勘探结合地面工程地质测绘及区域地质构造特征进行隧洞围岩分类，由此地面工程地质测绘的重要性，特别是对各岩组节理裂隙的统计，岩石结构、构造特征的分析，地表水的分布，地下水的可能性分布、埋深排泄、径流规律性分析等，其隧洞围岩分类采用《水利水电工程地质勘察规范》的规定，岩石强度、岩体完整程度、结构面状态、地下水和主要结构面产状 5 项因素之和的总评分为基本判据，围岩强度应力比为限定判据，进行隧洞围岩分类，勘察阶段分类结果：Ⅱ、Ⅲ类围岩长 8426 m，占总长的 95.1%；Ⅳ、Ⅴ类围岩长 437 m，占总长的 4.9%；施工开挖后兑现：Ⅱ、Ⅲ类围岩长 8214 m，占总长的 92.7%；Ⅳ、Ⅴ类围岩长 649 m，占总长的 7.3%；对比勘察结果与开挖情况，证明了勘察阶段围岩分类的方法、手段的可靠性。

（3）施工地质

加强施工地质工作，是对此类探索性工程勘察的弥补，施工阶段施工地质工作显得尤为重要，在隧洞施工开挖期间必须随时根据开挖出来的断面不断修正勘察围岩类别，并预测、指导下段的施工工作。

a) 及时进行施工地质编录，采用巴顿“Q”系统及《水利水电工程地质勘察规范》两种方法进行围岩分类，使分类更准确，并同时对未开挖的隧洞围岩稳定进行超前预报，在施工中取得了良好效果。

b) 在隧洞围岩分类中针对Ⅲ类围岩的稳定条件再进行三分，即将Ⅲ类围岩划为Ⅲ-a、Ⅲ-b、Ⅲ-c 三个亚类，根据不同的围岩类别提出了不同的永久支护型式，节省工程投资 1000 万元，节省控制性工期 5 个月，为工程提前半年发电创造了条件，在文献资料中未见，在岩土工程及水利水电工程实践中尚属首次。

这是云南省水利水电勘测设计院地质工作者在复杂地形地质条件下，深部勘探工作难度大的情况下，在长引输水隧洞中根据地表工程地质测绘进行探索性围岩分类的尝试并获得成功的一例。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net