

# 岩体力学测试及高坝坝基原位 监测技术研究

东北勘测设计院科学研究所

赵长海

《岩体力学测试及高坝坝基原位监测技术研究》是国家“七五”重点科技攻关项目《水电工程筑坝技术》中《高坝坝基技术研究》课题的第二个专题。这个专题由东北勘测设计院科研所负责,参加攻关工作的单位有水利水电科学研究院、西北勘测设计院、长江科学院、黄河水利委员会勘测规划设计院科研所、成都勘测设计院科研所、昆明勘测设计院科研所、华东勘测设计院科研所、中南勘测设计院科研所、水电十四局科研所、武汉水利电力学院科研所、中国科学院地质研究所、中国科学院武汉岩土力学研究所、中国科学院成都地理研究所、天津大学与兰州大学等。

该专题共设了29个子题,从岩体力学测试及原位监测新仪器的研制、岩体力学参数测定及资料分析方法的改进、高坝坝基原位监测资料分析软件和原位监测资料分析方法及安全预报等四个方面进行了系统、全面的研究,共提出各种测试和监测新仪器24台件,各种研究成果58份。这些研究成果,不仅提高了我国岩体力学的测试水平和各种力学参数的综合分析能力,也极大地提高了我国高坝坝基原位监测和安全预报的水平。经过20余座大、中型工程应用证明,有显著的技术、经济效益,经鉴定认为:“该成果在总体上已达到国际先进水平,其中部分成果居国际领先地位。”为了进一步推广应用这些成果,以发挥其更大的社会、经济效益,现对该专题所取得的各项成果作如下简要介绍。

## 一、岩体力学测试及原位监测的新仪器

为了改变我国岩体力学测试及原位监测仪器的落后状况,填补某些测试仪器的空白,提高测试仪器的精度,并实现数据的自动采集和处理,本着标准化、系列化的要求,研制了软弱夹层的慢剪试验设备、轻便的岩体力学参数试验的加载系统、稳压装置及数据采集系统、软弱岩体及裂隙岩体地应力测定设备、预应力锚索(杆)的有关监测设备,以及岩体、边坡稳定性监测的各种新仪器、共24台(件),其中有7台(件)填补了国内空白,7台(件)的技术指标达到了国际先进水平。

### (一) 软弱夹层慢剪试验设备

这套软弱夹层慢剪试验设备是由黄河水利委员会

勘测规划设计院科研等单位研制的,它由加压系统、泵站、控制柜、数据采集、磁带记录和微机处理等部分构成,加压系统采用伺服控制。采用这套系统可以进行在孔隙水压力完全消散情况下的剪切试验,剪切速率可以控制在 $0.005\text{mm/h}$ 。试件尺寸可达 $100\times 100\times 70\text{cm}$ 。这套试验设备已用于小浪底右岸T<sub>1</sub>号夹层的剪切试验,其强度比常规的固结快剪试验提高了8.7%,节省压坡方量达70万 $\text{m}^3$ 。

### (二) 岩体抗剪试验大位移稳压装置

在现场岩体抗剪试验中,保持法向荷载和剪切荷载的相对稳定是相当重要的,为此研制了两种类型的稳压装置。一种是采用斜盘式定量柱塞泵通过节流阀、调节阀和增压器组成的稳压装置,其最大输出压力为60MPa,稳压精度为 $\pm 2\%$ 。这种稳压装置不仅可以实现各剪切阶段的自动补压,而且在试件破坏后发生2~3cm位移情况下,施加的荷载始终为常数。这一装置是由成都勘测设计院科研所研制的。另一种稳压装置,是根据液体压力与柱塞直径平方成反比的原理,对柱塞泵实行技术改造而实现稳压的,其最高输出压力为63MPa,精度为 $\pm 2\%$ 。这种稳压装置是由华东勘测设计院科研所和柳州建筑机械总厂共同研制的。

### (三) 岩体力学试验加载系统及其辅助设备

以往的现场岩体试验设备笨重,设备不配套,规格也不一致,安装费时、费力,影响了试验的精度。为此,本着标准化、系列化、轻型化和配套成龙的要求,由华东勘测设计院科研所研制了该套设备。其中,2000kN级加载千斤顶重量与出力的比值仅为 $0.18\text{kg}/10\text{kN}$ ,加载设备中设置了稳压装置,进行斜推法剪力试验时压力可自动调整平衡、剪力试验的滚轴摩擦阻系数仅为0.05,并有防尘装置。该套装置中还配备了标准化的试件制作模具,可实现定位组合安装,从而提高了安装精度,减轻了劳动强度,提高了试验质量。

### (四) 智能多点压力与位移遥测仪

在现场岩体力学参数试验中,变形与压力的同步测定至关重要。由东北勘测设计院科研所研制的ZWY-1型多点压力与位移遥测仪,具有13个通道,适应现场抗剪强度及变形试验的需要,采用FX-702P

袖珍机接收数据,实现了数据的自动采集和记录,解决了压力与位移的同步测量,并可测定变形的全过程。该仪器可在95%的湿度下正常工作。

#### (五) 钻孔渗压计

渗透水压力在坝基、边坡稳定监测中具有重要作用,而我国以往的监测方法仍然是采用量测钻孔水位的方法解决。长江勘测技术研究所研制的ZSY-1型钻孔渗压计是采用电动测量和气压栓塞分离技术实现渗透压力的自动量测。该仪器坚固耐用,胶囊的膨胀性、传感元件的稳定性良好。在安装方便、操作简便、坚固耐用等方面优于国外产品。

#### (六) 三向应力状态下岩石抗拉强度测定装置

岩石在三向应力状态下的抗拉强度,对于研究岩石的抗拉特性和采用水压致裂法求取岩体地应力具有重要意义。武汉水利电力学院科研所,采用普通压力机,配备压力室,采用中心孔施加径向压力的方法求取其三向应力下的岩石抗拉强度,其压力达30MPa,中心孔压力达60MPa。

#### (七) 裂隙岩体地应力测定仪器

完整岩体地应力测定,在我国已广为应用,然而在裂隙岩体中,由于岩石破碎、岩心短,则比较困难。为了解决这一难题,昆明勘测设计院科研所,研制了HEB-87型半球形孔底应变计,通过对计算程序和测量元件的优化,使三孔交会变为单孔测定空间应力场,此外还对灌浆工艺进行了改进,通过小湾和会东铅锌矿的工程实践证明,成果可靠。该项技术的研究成功,将我国地应力的测试提高到了一个新的水平。

#### (八) 软弱岩体的地应力测定方法

与裂隙岩体地应力测定一样,软弱岩体的地应力测定也是十分困难的。中国科学院武汉岩土力学研究所通过室内模拟试验,采用独特的裸体液压应力计组成三向应力计组,直接埋入岩体获得了成功,同时还解决了与软弱岩体相匹配的材料。这一成果获得了国外专家的注意。

#### (九) 高吨位预应力锚索测力计

“七五”期间,我国的预应力锚索吨位已发展到6000kN级,为了评价高吨位预应力锚索的加固效果,急待解决高吨位预应力锚索的测力设备。高吨位预应力锚索测力设备包括两个系列:一种为东北勘测设计院科研所研制的LC系列轮辐式测力计,包括1000kN、2000kN、3000kN和6000kN四个级别。轮辐式测力计结构简单、设计新颖、传力均匀,测值稳定,在偏载和爆破震动条件下能够正常工作。该测力计安装在丰满大坝加固的6000kN级预应力锚索中,通过478天的观测,正确评价了加固效果。其它级别的测力计也分别用于丰满、桦树川等工程。另一种为长江科学院研制的Y2C系列圆筒式测力计,它包括2000

kN、3000kN、4000kN和6000kN四个级别。圆筒式测力计结构简单、使用方便、价格便宜,适应偏载条件。该系列测力计已用于葛洲坝、隔河岩、龙羊峡、铜街子等工程,并已形成生产能力。

#### (十) 预应力锚索受力状态测定装置

目前我国采用的预应力锚索大多数由多根钢绞线组成;一个6000kN级锚索的钢绞线多达41根,因此每根钢绞线受力是否均匀,将直接关系到锚固效果,这一问题一直被工程界所关注。但是,每根钢绞线的受力状态却是很难测到的。针对这一问题,中国科学院武汉岩土力学研究所研制成了电感片式锚索应力盒。这种传感元件抗干扰性强、线性关系好,防潮耐用,适用于现场测试。

#### (十一) 锚杆密实度检测仪

锚杆的注浆效果直接影响工程质量和安全运行,目前我国尚无检测手段。东北勘测设计院科研所根据声波在不同介质和边界条件的传播规律,采用超声探测,微机采集数据,通过模拟试验,对锚杆注浆密实度在0.5m以内作出准确的判定。

#### (十二) 钻孔三向变位计

在边坡稳定和坝基原位监测工作中,最突出的问题是解决空间位移的测定,但我国尚无此种仪器。水利水电科学研究院研制了GCS-88型固定式测斜仪,用以测定水平面上两个方向的位移;增量式位移计,用以测定垂直方向的位移;导管测扭仪,用以校正测斜管扭曲带来的误差。这三种仪器还可联合使用,即称为钻孔三向变位计。这套仪器精度高,重复性好,测值稳定,结构简单,安装方便,价格便宜。其技术指标与美国SINCO公司和意大利ESMES公司产品的技术指标基本相同,达到了国际先进水平。

#### (十三) 多点位移计

成都勘测设计院科研所、东北勘测设计院科研所、昆明勘测设计院科研所、长江科学院和水电十四局科研所等单位,在广泛收集国内外已有多点位移计的优缺点及其使用方面经验的基础上,做了独特的改进。即采用液压式锚头,其抗震性能好、安装方便,并由于考虑了系列化和标准化的要求,测量元件可按不同量程和精度进行更换。

#### (十四) 收敛计

同多点位移计一样,也是由成都勘测设计院等四个单位联合研制的。这种收敛计采用液压装置施加拉力,采用位移传感器控制标准拉力值和量测收敛值,在结构上采用压缩式弹簧代替了拉伸式弹簧,从而减少了测量误差,也减轻了劳动强度。

#### (十五) 多点数据采集和处理系统

为了改变坝基、边坡监测的人工操作与读数的状况,由东北勘测设计院科研所和水利水电科学研究院,根据坝基与边坡监测所采用的传感元件的类型,

研制了适用于差动电阻式、差动变压器式和振弦式传感器元件的数据采集和处理系统。YW-240型差动电阻式传感器的数据采集和处理系统,设有240个通道,该机采用五芯法、数字滤波、自校正等措施,消除了导线电阻的影响,具有数据储存、转储等功能;YW-30型直流差动变压器式数据采集和处理系统,有30个通道,该机采用Basic程序,可人机对话,简单易懂,并可校正传感器的非线性,还可定时巡检;YSC-1型振弦式传感器数据采集和处理系统有16个通道,有定时巡检、显示、打印、通讯功能,传输距离可达6km;YSC-II型差动变压器式数据采集和处理系统,设有8个通道,该机有定时巡检、测值显示、打印、报警功能,传输距离可达1500m以上。

#### (十六) 原位监测无线遥测仪

在高山峡谷地区,边坡监测工作由于交通不便,工作人员难以到达,再加上险工险段,监测工作又十分危险。为此,西北勘测设计院和成都环境与灾害研究所,共同研制了WT-1型原位监测遥测仪。该仪器可采集电感、频率、脉冲输出等不同类型23个传感器的数据,具有打印、绘图、存储、转储、报警功能,遥测距离可达10km。

## 二、岩体力学参数测定方法与分析技术

岩体力学参数的测定仪器决定了参数的合理性和准确程度,而揭示各种参数的内在联系,以及工程的采用程度,将主要取决于分析方法和各种综合手段的应用。为此,对岩体强度的预测、复合结构面的综合抗剪强度指标的选取、层状岩层的综合变形模量计算等都进行了深入地研究。此外,还就声发射技术及岩石频谱特性在岩石和岩体测试中的应用技术做了进一步探讨,都取得了有突破性的成果。

### (一) 声发射技术在岩石和岩体测试工作中的应用

这项工作由长江科学院、黄河水利委员会勘测规划设计院科研所、武汉水利电力学院科研所、中南勘测设计院科研所和水利水电科学研究院共同完成。其内容包括:(1)通过对三峡、龙羊峡、天生桥、鲁布革等工程的花岗岩、灰岩、粘土岩共29个样品的典型荷载-应变-AE关系测试,揭示了岩石破坏过程的不同阶段的声发射特性,从而为岩体破坏预报打下了基础;(2)应用岩石对所受过的应力具有记忆性的“凯塞”(Kaiser)效应,研究了简易的地应力测定方法;(3)提出了应用声发射信息,推断岩体内部性态变化的基本方法,从而实现了岩体稳定的安全预报。

### (二) 岩石频谱分析技术的应用

由于岩石频谱比声波灵敏,如果将岩石频谱特性与岩体参数建立一定的相关关系,便可对岩体参数做

综合分析,从而可以提高参数选择的合理性。这项工作由华东勘测设计院科研所完成,其主要内容是:

(1)通过对砂岩、灰岩、花岗岩、片岩、页岩、石灰岩、大理岩、流纹岩、辉绿玢岩、砾岩、石英片岩等14种岩性、71个样品的谱测定,揭示了完整岩石、裂隙岩石、不同风化程度岩石的频谱特性。(2)提出了各种岩石频谱特性 $FO$ 、 $DF$ 与岩石抗压强度 $R$ 及岩石弹性模量 $E$ 的相关关系,为岩石力学参数的确定提供了一种新的表达方式。(3)利用岩石频谱特性与岩石性质的相关特性给出了21种岩石可钻性定级。

### (三) 岩体综合变形试验的分层弹模计算

目前,在层状岩体变形试验中,已采用多点位移计测定中心孔的不同深度的变形,以研究基础以下层状岩层(夹泥层)对坝基变形模量的影响。虽然可以测得基础以下不同层位的位移,但不同层次的变形模量却无法求取。长江科学院利用广义柔度矩阵,求出了水平成层地基空间轴对称问题的解答,从而实现了利用中心孔测得的位移,反求各层的弹性模量。

### (四) 岩体综合抗剪强度的分析方法

在基础抗滑稳定分析中,经常遇到由多种介质或有软弱结构面构成的复合滑动面,各种复合滑动面的综合抗剪强度指标,直接影响设计质量和坝体稳定。黄河水利委员会勘测规划设计院科研所和长江科学院分别进行了有限元计算分析和模型试验,得出如下结果:(1)由坚硬介质和无充填结构面组成的复合滑动面,可以采用面积加权平均法求取综合抗剪强度指标;(2)对于有软弱结构面组成的复合滑动面,其综合抗剪强度指标应考虑法向应力大小、软弱结构面所占比例不同而采用面积加权平均法还是有限元计算方法求取;(3)由于软弱结构面位置不同,进入塑性区时间也不同,对其综合抗剪强度值也有影响,在设计取值时应充分考虑这一影响。

### (五) 岩体强度的预测方法

岩体强度对工程有重要价值,一直是水利水电建设人员所关注的重要问题。中国科学院地质研究所,通过由1382个不同结构体粘贴而成的 $48 \times 48 \times 48\text{cm}$ 的56个试件的试验结果,并以地质为基础,以岩体结构的力学效应为中心,赋以环境因素的影响,找出了各种因素的影响关系,提出了完整岩体、裂隙岩体、板裂岩体、碎裂岩体强度的预测方法。

### (六) 应用反分析方法求取岩体综合变形模量

应用承压板法测定的岩体变形模量有一定的局限性,不能充分反映岩体中各种复杂因素的综合效应。昆明勘测设计院科研所,广泛收集了国内外洞室位移反分析的成果,结合天生桥、鲁布革、漫湾三个工程,考虑了线弹性、粘弹性和弹塑性等围岩条件,进行了 $E$ 、 $\{\sigma_0\}$ 、 $C$ 、 $\phi$ 等各种参数的反分析,其结果更为符合实际。

### 三、高坝坝基原位监测技术

高坝坝基的监测对大坝的安全运行、论证各种参数的选取和设计方法的合理性都有重要的作用,并已成为坝工建设的一项重要内容。这项技术包括,坝基原位监测仪器的布置原则、仪器的选型、埋设技术的观测方法。然而,我国目前尚无符合标准化、规范化要求的准则加以遵循,因此迫切需要解决这一问题。

#### (一) 原位监测网的布置

西北勘测设计院正确总结了龙羊峡、凤滩、紧水滩、东江四座大型水电站原位监测布置的经验,并结合龙羊峡水电站复杂坝基的原位监测布置,重点抓住了最直观、最可靠的变形与渗流观测项目,并针对具体的工程地质条件、基础处理规模、枢纽布置形式,以及坝基的主要问题,确定变形、应力、应变、温度、渗流、渗压、地震等观测项目。在布置中特别强调要高度重视下闸蓄水和初期运行的需要,因而提出:(1)应以正、倒垂为主骨架的变形观测系统,要配合多点位移、岩基变形及其它观测项目,要注意宏观、微观相互照应;(2)利用有利条件,结合工程布置组成三维控制网络;(3)根据两岸坝肩岩体的具体情况,采用棋盘格式布置绕坝渗流观测系统。

#### (二) 原位监测仪器的选型

水利水电科学院针对我国坝基原位监测的需要,在广泛收集国内外各种监测仪器的技术特性、适用条件、仪器质量、长期稳定性、埋设条件、读数方式、经济指标等资料基础上,选出了127种可供坝基原位监测选用的仪器。同时对这127种仪器做了全面的评价,这对原位监测设计具有重要的指导意义。

#### (三) 原位监测仪器的埋设与观测技术

东北勘测设计院科研所、水利水电科学研究院、长江科学院和中国科学院武汉岩土力学研究所等单位,根据国内外的经验,针对坝基原位监测经常采用的15种仪器,就其使用条件与环境影响和长期使用要求,提出了详细的埋设方法,而且埋设中均考虑了规范化、程序化、安装调试快的要求,并提出了抗磨蚀、抗干扰的更换措施,还建立了一整套的质量保证体系,使其埋设成功率达95%以上。

### 四、原位监测资料分析方法及安全预报

为了提高原位监测技术水平以及适时进行资料整理分析,从而提高原位监测资料的应用价值,研究了先进的软件,建立了资料整理分析的基本方法,提出了高坝大库近坝库岸和坝基断裂带的破坏准则及安全预报方法。

#### (一) 原位监测资料分析软件

水利水电科学研究院和长江科学院研制开发了一套坝基原位监测资料的管理、预处理和统计分析软件包——DSMIS,该软件系统与同类软件相比,增加了快速评审、检验程序,可以实现中英文人机对话,功能齐全,使用方便;还完善了适用于复杂坝基位移和渗流场计算的非线性有限元正算程序;研制了三维位移场和渗流场的原位监测资料与有限元拟合软件,这种软件具有收敛速度快的特点;此外还研制了一套可以绘制网络图、剖面图、位移、渗流、应力等物理量的矢量图和等值线图。这套软件已用于龙羊峡和鲁布革的原位监测资料分析。

#### (二) 原位监测资料的分析方法

这项工作是由西北勘测设计院、天津大学和东北勘测设计院科研所共同完成,其内容包括:坝基物性参数反分析和分析模型与方法两个方面。主要开发研制了具有收敛性好、计算量简化的新型常刚度迭代位移场和渗流场监测资料拟合方法;坝基分区弹模的敏度分析方法;在分析模型与方法研究中,开发了统计和确定分析相结合的回归位移反分析方法,并采用反馈检验后的参数,再做正分析,以实现其安全预报。

#### (三) 近坝库岸高速滑坡的破坏准则和安全预报

西北勘测设计院在多年来大量的勘测、试验、观测和计算分析所获得的资料基础上,研究了高速滑坡的形成机制和规律,研究了水库蓄水后地下水的转移特性,得出了边坡再造的规律,提出了半岩性土高速滑坡及涌浪的判别准则。利用这一准则,进行了水库蓄水预报,其结论是龙羊峡初期限制水位可提高20m,仅1989年则多蓄水16亿 $m^3$ ,此时限制水位抬高5m。

#### (四) 坝基断裂带的破坏准则和安全预报

西北勘测设计院结合龙羊峡坝基断裂带本身特性、地应力场和渗流场三者相互作用的动态观点,研究了施工期和蓄水后的环境及断层自身的演变发展趋势,分析了深部和浅部环境、拉剪和压剪区等不同环境条件对断裂带稳定性的影响,以及可能破坏的形式,由此提出了不同破坏机制和断裂带的破坏准则和预报方法。采用这种方法对龙羊峡坝基断裂带的破坏进行了预测,得出了不会发生破坏的结论,从而从另一方面论证了提高初期运行水位的可能性。

\*\*\* \*\*

以上各项研究成果,内容丰富,系统、完整地提高了我国岩体力学的试验研究水平,这无论从理论上,还是从实践上对我国岩体力学的发展和岩体力学在工程中的运用都有重要的社会和经济效益。