

# 某水库工程岩土试验及工程地质特性研究

向英

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i5.7014

**[摘要]** 为查明某水库坝址区岩土体的物理力学性质,本文依据现场勘探与室内试验成果,对水库坝址区基础粗颗粒土、钻孔岩芯、坡积物进行了系统的试验分析。结果表明:坝址区基础粗颗粒土为卵石混合土,处于密实状态,具中等~强透水性;钻孔岩芯为中硬~坚硬岩,力学强度较高;坡积物以粉土质砾、含细粒土砾及低液限黏土为主,工程性质一般。研究成果为水库工程设计与施工提供了可靠的地质依据。

**[关键词]** 水库工程;粗颗粒土;岩石力学;坡积物;水质腐蚀性;工程评价  
**中图分类号:** TV62 **文献标识码:** A

## Analysis on Geotechnical Engineering Characteristics of Dam Site Area of a Reservoir

Ying Xiang

Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd.

**[Abstract]** To clarify the physical and mechanical properties of rock and soil masses in the dam site area of a reservoir, this paper systematically conducts experimental analysis on coarse-grained foundation soil, borehole rock cores and slope deposits in the reservoir dam site area based on field exploration and indoor test results. The results show that the coarse-grained foundation soil in the dam site area is pebble mixed soil in dense state with medium to strong water permeability. The borehole rock cores belong to medium-hard to hard rocks with high mechanical strength. Slope deposits are mainly composed of silty gravel, fine-grained soil-bearing gravel and low liquid limit clay with ordinary engineering properties. The research results provide reliable geological basis for the design and construction of reservoir projects.

**[Key words]** reservoir engineering; coarse-grained soil; rock mechanics; slope deposit; water quality corrosivity; engineering evaluation

## 引言

在水利水电工程建设中,坝址区岩土体的工程特性直接决定了大坝及其他水工建筑物的安全、经济和长期稳定性。粗颗粒土作为常见的地基材料和天然建筑材料,其密实程度、渗透性与抗剪强度是坝基渗流控制和抗滑稳定分析的关键参数。而坝基岩体的强度、软化特性和变形模量则影响高坝的应力分布与不均匀沉降。此外,分布于坝肩、坝坡的坡积物往往结构松散、性质不均,若处理不当易引发局部失稳。本案例水库工程位于吾尔喀什尔山西北坡,塔城地区境内,是一座以灌溉、供水为主的小(1)型水库。工程区地质条件较为复杂,覆盖层与基岩交互分布,坡积物广泛发育。为查明坝址区岩土工程条件,勘察单位依据国家及行业规范,进行了系统的现场取样与室内试验,涵盖粗颗粒土、岩芯、细粒土分析。

## 1 工程概况

新疆某水库工程主要由大坝、放水隧洞、溢洪道、导流兼

放空洞组成。水库总库容 $981 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,根据《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL252-2000),工程规模为小(1)型,等别为IV等,拦河大坝为3级建筑物,放水隧洞、溢洪道为4级建筑物。工程区地处吾尔喀什尔山西北坡,属中低山侵蚀堆积地貌,河谷呈不对称“U”形。左岸较陡,右岸相对平缓,两岸坡积物厚度不一。出露基岩主要为凝灰岩、砂岩,局部夹泥质软弱薄层。覆盖层包括第四系全新统冲洪积层(卵石混合土)和更新统坡积层(粉土质砾、含细粒土砾及低液限黏土)。

## 2 试验依据与方法

本次试验严格遵循下列规范:《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001,2009年版)、《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487-2008)、《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)、《土的工程分类标准》(GB/T 50145-2007)。试验方法如下:

(1)粗颗粒土试验。采用探坑挖掘机开挖,坑壁完整,取样采用刻槽法,即在有代表性的坑壁上用挖掘机挖斗从坑底至无用

层底部刻取一斗进行现场筛分,并留取其他试验备用。室内进行颗粒分析(筛分法)、天然密度、含水率、比重、相对密度(等量替代法制样)、大型直剪及渗透试验。

(2) 钻孔岩芯试验。在坝址区左右坝肩钻孔内不同深度采取岩芯样,进行颗粒密度、块体密度(天然、烘干、饱和)、含水率、吸水率、孔隙率、单轴抗压强度(烘干、饱和)、直剪(烘干、饱和)及单轴压缩变形试验。

(3) 细粒土试验。采用刻槽法取样,进行颗粒分析(筛分+密度计法)、液限、塑限、天然密度、含水率、比重试验。

### 3 坝址区基础粗颗粒土特性分析

#### 3.1 颗粒级配特征

坝址区基础覆盖层以粗颗粒土为主,在代表性探坑TK30(深度0~4.5m)和TK31(深度0~3.5m)中取样试验。颗粒分析显示,两试样的粒径分布范围极宽,从大于200mm的漂石到小于0.075mm的粉粒均有分布。其中TK30试样中大于200mm的漂石含量为5.9%,200~60mm卵石含量为18.5%,60~20mm粗砾为17.7%,20~5mm中砾为18.8%,5~2mm细砾为6.6%,2~0.5mm粗砂为13.9%,0.5~0.25mm中砂为5.9%,0.25~0.075mm细砂为6.7%,而小于0.075mm的粉粒含量为6.1%。TK31试样中,大于200mm的漂石含量合计约14.0%(包括200~300mm、300~400mm及大于400mm),卵石含量26.1%,粗砾15.0%,中砾17.8%,细砾7.3%,粗砂8.6%,中砂2.9%,细砂4.0%,粉粒含量为4.2%。两组试样的不均匀系数分别高达127.5和160.1,远远大于5,表明级配良好。

曲率系数分别为0.4和1.6(见图1),其中TK30略小于1,属级配不连续,但总体上仍可视为良好级配的混合土。按照《土的工程分类标准》,定名为卵石混合土(SICb)。

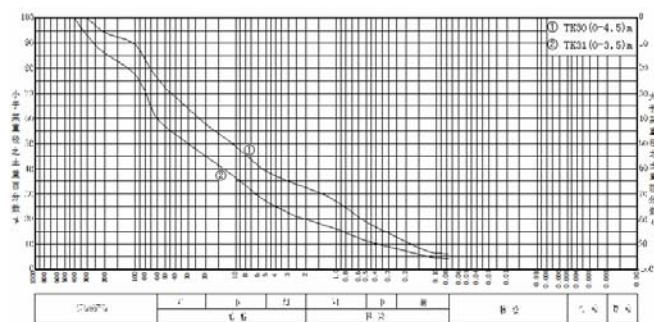


图1 坝址区基础粗颗粒土颗粒大小分布曲线

#### 3.2 湿度、密度、抗剪强度、渗透系数

从物理性质来看,两试样的天然湿密度分别为 $2.25\text{g}/\text{cm}^3$ 和 $2.22\text{g}/\text{cm}^3$ ,天然含水率分别为3.6%和2.8%,对应的天然干密度为 $2.17\text{g}/\text{cm}^3$ 和 $2.16\text{g}/\text{cm}^3$ 。综合比重(加权平均值)为2.74~2.75。这些指标反映出坝址区基础粗颗粒土天然状态下较为密实,含水率低,这与当地干旱气候和地下水位较深有关。

相对密度试验采用等量替代法制备试样,测得最大干密度为 $2.27\sim 2.29\text{g}/\text{cm}^3$ ,最小干密度为 $1.84\sim 1.87\text{g}/\text{cm}^3$ ,由此计算出的相对密度 $D_r$ 分别为0.81和0.73。根据规范,当相对密度大于0.67时为密实状态。因此,该层粗颗粒土处于密实状态,作为坝

基持力层具有较高的抗变形能力和承载力,不易发生震陷或过大沉降。

抗剪强度方面,通过大型直剪试验(饱和状态)得到两组试样的黏聚力分别为 $16.22\text{kPa}$ 和 $14.74\text{kPa}$ ,内摩擦角分别为 $36.0^\circ$ 和 $37.5^\circ$ 。内摩擦角较大,主要归因于粗颗粒间的咬合摩擦和粒间嵌锁作用;黏聚力虽不高,但来源于少量细粒的胶结作用,对局部边坡稳定有一定贡献。

渗透系数分别为 $8.8\times 10^{-3}\text{cm}/\text{s}$ 和 $1.2\times 10^{-2}\text{cm}/\text{s}$ ,属于中等至强透水范围。这意味着如果不采取防渗措施,水库蓄水后可能产生显著的坝基渗漏,甚至引发渗透变形(如管涌、流土)。因此,设计中必须设置垂直防渗体(混凝土防渗墙或帷幕灌浆)结合上游水平铺盖,形成有效的防渗体系。

### 4 坝基岩芯物理力学特性

#### 4.1 密度

在坝址区左右坝肩钻孔ZK43和ZK44中,于不同深度共取4组岩芯试样,分别代表浅层和中深层基岩。试验结果表明,岩芯的颗粒密度介于 $2.63\sim 2.65\text{g}/\text{cm}^3$ 之间,天然块体密度为 $2.59\sim 2.62\text{g}/\text{cm}^3$ ,烘干密度为 $2.58\sim 2.62\text{g}/\text{cm}^3$ ,饱和密度为 $2.60\sim 2.63\text{g}/\text{cm}^3$ 。天然含水率极低,仅为0.30%~0.58%;自然吸水率和饱和吸水率分别为0.38%~0.84%和0.40%~0.93%;孔隙率在1.13%~2.64%之间。这些数据说明该区基岩致密、裂隙不发育,吸水能力弱,抗风化能力强。

#### 4.2 单轴抗压强度

单轴抗压强度是评价岩石坚硬程度的核心指标。在烘干状态下,四组试样的强度分别为 $95.4\text{MPa}$ 、 $104\text{MPa}$ 、 $58.2\text{MPa}$ 和 $63.3\text{MPa}$ ;在饱和状态下,相应强度为 $79.8\text{MPa}$ 、 $82.4\text{MPa}$ 、 $45.4\text{MPa}$ 和 $47.9\text{MPa}$ 。饱和与烘干强度的比值(软化系数)分别为0.84、0.79、0.78和0.76,均大于0.75,属于不易软化的岩石。根据规范划分标准(饱和抗压强度 $>60\text{MPa}$ 为坚硬岩,30~60MPa为中硬岩),ZK43两段岩芯为坚硬岩,ZK44两段为中硬岩。因此,坝基岩体总体属于中硬至坚硬岩,强度满足3级坝的要求。

#### 4.3 抗滑性能

直剪试验进一步揭示了岩体的抗滑性能。烘干状态下黏聚力为 $2.58\sim 4.40\text{MPa}$ ,内摩擦角为 $47.5^\circ\sim 51.5^\circ$ ;饱和状态下黏聚力为 $1.43\sim 3.41\text{MPa}$ ,内摩擦角为 $45.5^\circ\sim 49.5^\circ$ 。虽然饱水后黏聚力有一定程度的降低(降幅约20%~40%),但内摩擦角变化不大,且绝对值依然很高。这表明即使在库水浸润条件下,坝基岩体仍具备优良的抗剪强度,沿建基面发生深层滑动的风险较低。

#### 4.4 变形特性

单轴压缩变形试验测得烘干状态下变形模量为 $24.9\times 10^3\sim 57.5\times 10^3\text{MPa}$ ,弹性模量为 $28.1\times 10^3\sim 62.9\times 10^3\text{MPa}$ ;饱和状态下变形模量为 $24.8\times 10^3\sim 54.0\times 10^3\text{MPa}$ ,弹性模量为 $27.4\times 10^3\sim 55.9\times 10^3\text{MPa}$ 。泊松比为0.20~0.23。可见岩石的变形模量较高,且饱和与烘干状态差异不大,说明遇水软化变形不显著,坝基不会因浸水而产生过大不均匀沉降。综合上述力学指标,该水库的坝基岩体是理想的高坝地基材料。

### 5 坝址区坡积物工程特性

坝址区两岸坡积物广泛分布,是坝肩、溢洪道等附属建筑物的主要地基持力层。本次勘察在坡积物中共布置了5组粗颗粒土试验(TK33~TK37)和1组细粒土试验(TK32)。这些试样的粒径组成与坝址区基础粗颗粒土有显著差异。

#### 5.1 粗颗粒土

粗颗粒土方面,卵石含量(200~60mm)很低,仅为0.1%~10.2%,而中砾(20~5mm)和粗砾(60~20mm)含量相对较高,分别为22.1%~42.3%和9.4%~26.7%。细粒含量(<0.075mm)变化较大,TK33试样高达42.3%,主要为粉粒和黏粒;而TK34~TK37试样的细粒含量为6.2%~10.7%。不均匀系数Cu在20.5至1938.5之间,曲率系数Cc为0.01~3.6。根据分类标准,TK33定名为粉土质砾(GM),其余为含细粒土砾(GF)。物理性质试验显示,天然干密度仅为1.73~1.82g/cm<sup>3</sup>,显著低于坝基基础粗颗粒土(2.16~2.17g/cm<sup>3</sup>);天然含水率为1.6%~2.4%,比重2.64~2.70,见图2。这表明坡积物结构疏松,压缩性较大,承载能力较低。

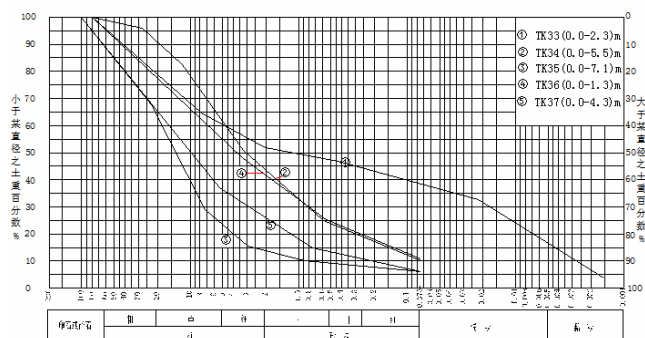


图2 坝址区坡积物粗颗粒土颗粒大小分布曲线

#### 5.2 细颗粒土

细粒土试样TK32的颗粒分析结果为:细砾含量8.8%,粗砂6.4%,中砂2.5%,细砂4.5%,粉粒(0.075~0.005mm)51.0%,黏粒(<0.005mm)26.8%,胶粒(<0.002mm)14.1%。不均匀系数22.6,曲率系数0.7,级配良好但细粒占绝对优势。液限为28.4%,塑限18.5%,塑性指数9.9,定名为低液限黏土(CL),见图3。天然干密度仅1.51g/cm<sup>3</sup>,含水率3.5%,处于稍湿状态,结构松散,遇水易软化,抗剪强度低。基于以上特性,坡积物作为坝肩或溢洪道地基存在以下工程问题:一是承载力不足,可能导致不均匀沉降;二是渗透稳定性差,尤其是粉土质砾在渗流作用下易发生管涌;三是低液限黏土在雨季吸水后强度骤降,可能引发局部滑坡。因此,建议对坡积物分布区进行清基处理,清除表层松散层,换填级配良好

的碎石土并分层压实。对于厚度较大的坡积物区域,可采用强夯或振冲法加固,并设置完善的地表排水和盲沟系统,防止积水入渗。

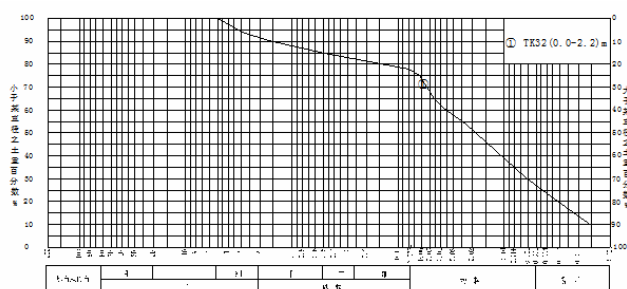


图3 坡积物细粒土颗粒大小分布曲线

### 6 结论

通过对新疆某水库工程坝址区系统的岩土试验研究,得出以下主要结论:

第一,坝址区基础粗颗粒土为卵石混合土,级配良好,天然干密度2.16~2.17g/cm<sup>3</sup>,相对密度0.73~0.81,处于密实状态。其饱和黏聚力14.74~16.22kPa,内摩擦角36.0°~37.5°,抗剪强度较高,但渗透系数达8.8×10<sup>-3</sup>~1.2×10<sup>-2</sup>cm/s,属中等至强透水,必须设置防渗系统。

第二,坝基岩芯为中硬至坚硬岩,饱和单轴抗压强度45.4~82.4MPa,软化系数0.76~0.84,饱和抗剪强度高(c=1.43~3.41MPa, φ=45.5°~49.5°),变形模量24.8×10<sup>3</sup>~54.0×10<sup>3</sup>MPa,是优良的坝基持力层,满足高坝稳定与变形要求。

第三,坝址区坡积物粗颗粒土以粉土质砾和含细粒土砾为主,天然干密度仅1.73~1.82g/cm<sup>3</sup>,结构疏松;细粒土为低液限黏土,干密度1.51g/cm<sup>3</sup>,工程性质差,需进行换填或加固处理。

#### [参考文献]

- [1]GB/T50123-2019土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [2]NB/T35052-2015水电工程地质勘察水质分析规程[S].北京:中国电力出版社,2015.
- [3]SL251-2015水利水电工程天然建筑材料勘察规程[S].北京:中国水利水电出版社,2015.

#### 作者简介:

向英(1985-),男,汉族,四川苍溪人,本科,工程师,研究方向为水利工程质量检测。