

# 国家开放大学

## 学士学位论文

题目：河南县尕孔水电站坝址区工程地质分析

分部：青海广播电视大学开放教育学院

学习中心：青海广播电视大学开放教育学院

专业：土木工程

入学时间：2020 年 3 月

学号：2063001200077

姓名：严栋

指导教师：魏群

论文完成日期：2022 年 6 月

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

作者签名：平栋 日期： 2022 年 6 月 10 日

## 学位论文版权使用授权声明

本人完全了解国家开放大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其他手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务，以及出版学位论文；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以营利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

作者签名：平栋 日期： 2022 年 6 月 10 日

# 目 录

摘要 .....	I
一、工程概况 .....	1
(一) 概述 .....	1
(二) 勘察过程、任务及工作量 .....	2
二、区域地质概况 .....	4
(一) 自然地理概况 .....	4
(二) 地形地貌 .....	4
(三) 地层岩性 .....	4
(四) 地质构造 .....	5
(五) 新构造与地震 .....	7
1.新构造运动特征 .....	7
2.地震活动特征及地震动参数 .....	7
(六) 水文地质条件 .....	10
(七) 物理地质现象 .....	10
三、水库区工程地质条件分析 .....	1
(一) 库区基本地质条件分析 .....	1
1.地形地貌 .....	1
2.地层岩性 .....	1
3.地质构造 .....	1
4.水文地质条件 .....	1
5.物理地质现象 .....	2
(二) 库区主要工程地质问题分析 .....	4
1.水库浸没 .....	4
2.水库渗漏 .....	6
3.库岸稳定 .....	9
4.水库淤积 .....	9
四、坝址区工程地质条件分析 .....	10
(一) 坝址区基本地质条件分析 .....	10
1.地形地貌 .....	10
2.地层岩性 .....	10
3.地质构造 .....	11
4.水文地质条件 .....	11
(二) 坝址工程地质条件分析 .....	12
1.左岸段工程地质条件分析 .....	12
2.河床段工程地质条件分析 .....	12
3.右岸段工程地质条件分析 .....	12
(三) 坝址岩(土)体的物理力学性质及参数分析 .....	13
1.土体物理力学性质 .....	13
2.岩石物理力学性质 .....	16
3.岩(土)体物理力学参数建议取值 .....	18
(四) 坝址主要工程地质问题及处理建议 .....	18
1.坝基覆盖层处理 .....	19
2.岩体强风化特性及处理 .....	19

3.软弱夹层特性及处理 .....	19
4.基坑涌水量 .....	19
5.坝基抗滑稳定性 .....	20
6.坝基承载力 .....	23
7.边坡稳定性分析 .....	25
8.坝基渗漏及防渗 .....	30
五、结论与建议 .....	39
结束语 .....	41
参考文献 .....	42
附录 .....	43

## 摘 要

拟建尕孔水电站位于青海省河南蒙古族自治县境内的泽曲河上，是泽曲河最下游的一座梯级电站。

库区主要工程地质问题有：漏水问题、浸没问题、塌岸问题、淤积问题、地震问题。对于中小型水库经常遇到渗漏问题，其次是浸没、塌岸和淤积问题等。坝址区主要工程地质问题有：坝基覆盖层处理、岩体强风化特性及处理、软弱夹层特性及处理、基坑涌水量、坝基抗滑稳定性、坝基承载力、边坡稳定分析、坝基渗漏及防渗，绕坝渗漏问题等。

本文通过地质和水文勘察资料，就库区及坝址区工程地质条件进行分析与研究，提出可能发生的相关工程地质问题及处理意见。根据实验数据和实际工程类比提出岩土体的力学建议参数值，分析存在的工程地质问题，提出合适的处理建议。

**关键词：**重力坝；工程地质问题；水库渗漏；坝基渗漏计算

# 一、工程概况

## （一）概述

泽曲河发源于青海省泽曲县尕干龙那日格沼泽区，从北流入河南蒙古族自治县，经河南县城折向西南方向注入黄河，全长 233km，流域面积 4756km<sup>2</sup>，多年平均流量 23.5m<sup>3</sup>/s，为黄河一级支流。

拟建尕孔水电站位于青海省河南蒙古族自治县境内的泽曲河上，是泽曲河最下游的一座梯级电站。电站引水口及厂房有简易乡村公路与外界相通，坝址距河南县城 50km，距离青海省会西宁市约 358 km，对外交通较为便利（见图 1-1 交通位置图）。

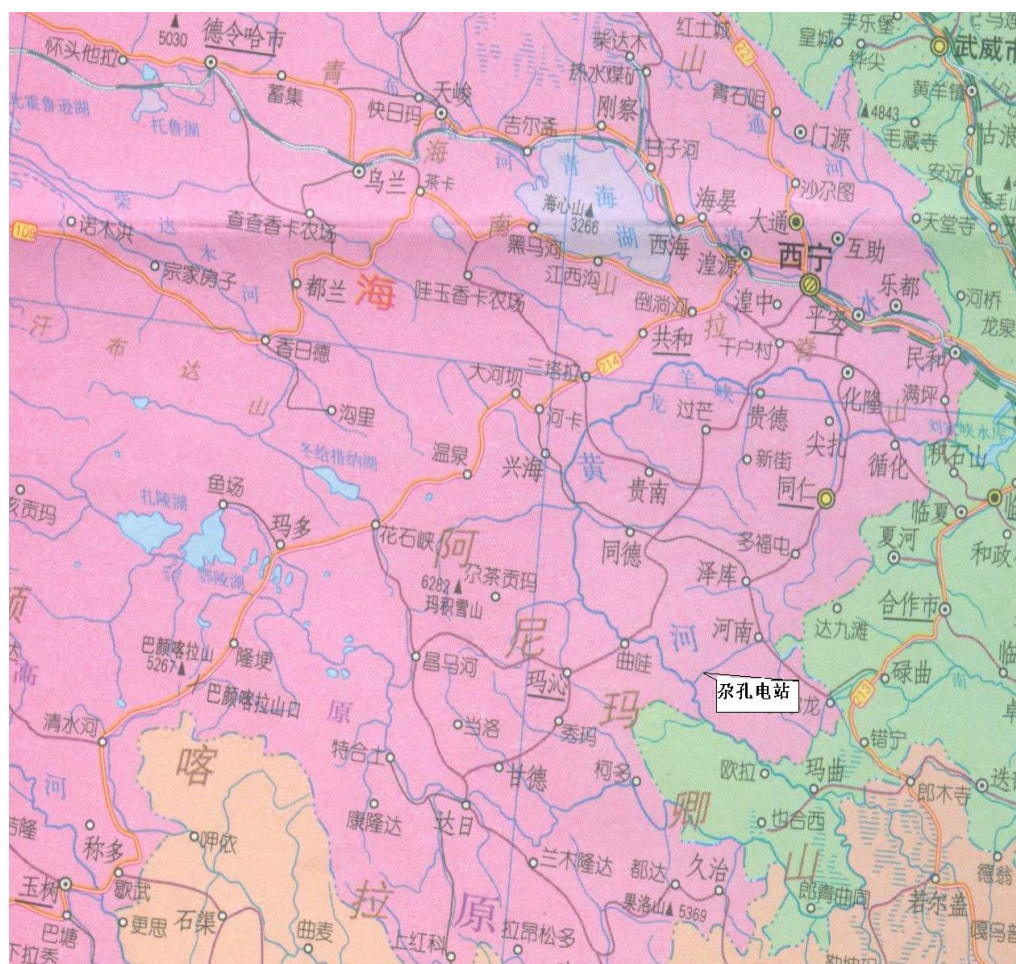


图 1-1 交通位置图

电站建筑物由挡水大坝、引水系统及发电系统三部分组成。其中挡水大坝分溢流坝段和非溢流坝段两部分，设计坝型为浆砌石重力坝，其中溢流坝段净宽 50m，大坝设计坝高 21m、坝顶高程 3399.0m 、设计正常蓄水位 3395.0m，校核洪水位 3398.5m 水库总库容：

329 万  $\text{m}^3$ 。

引水发电系统从泽曲河左岸以隧洞穿越两条大的冲沟后在黄河右岸布置发电厂房（见图 1-2 工程布置示意图），引水隧洞全长约 6.65km，发电引水流量  $33 \text{ m}^3/\text{s}$ ，装机容量 30.0MW。

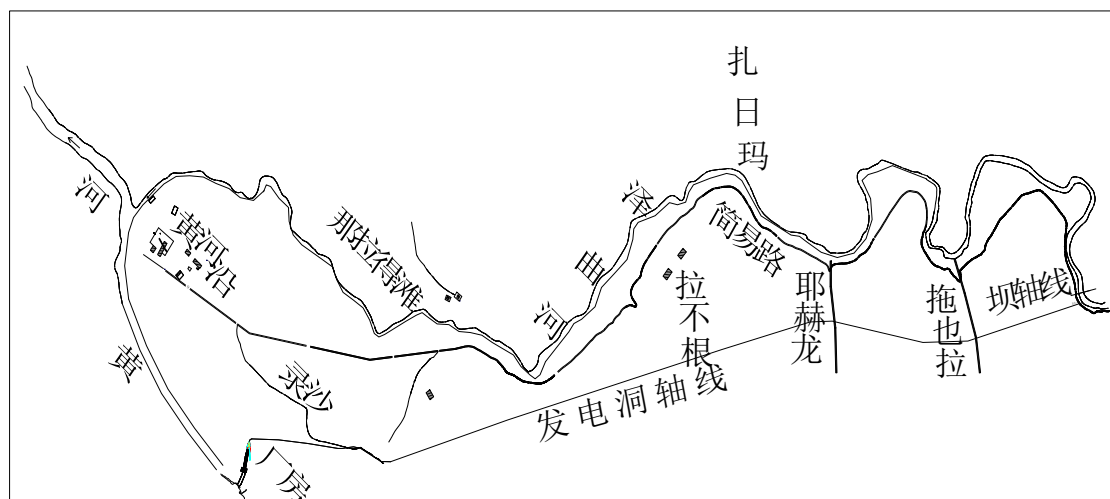


图 1-2 尕孔水电站工程布置示意图

电站为 小(1)型工程，主要建筑物为 4 级。

## （二）勘察过程、任务及工作量

由西北勘察设计院对泽曲河宁木特以下河段进行了规划勘查，并提出了《青海省黄南藏族自治州河南蒙古族自治县泽曲河宁木特以下河段勘查报告》、《青海省黄南藏族自治州河南蒙古族自治县泽曲河宁木特以下河段梯级水电开发规划报告》。

西北勘察设计院编写了《青海省泽曲河尕孔水电站工程可行性研究阶段勘测任务书》，并进行工程地质勘察，设计最大坝高：52.7m，发电引水流量： $23.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，装机容量：18.0MW。

根据泽曲河段地形、地质条件，对坝址位置进行了重新选择，新选择的坝址位于原坝址上游 5km 处，青海省水利水电地质勘探队对新选定的尕孔水电站坝址进行初设阶段工程地质勘察，根据设计要求，本次勘察工作在充分参考、利用前人工作资料的基础上，完成任务主要有：

- （1）调查区域地质构造和地震活动情况，对工程区的区域构造稳定性作出评价。
- （2）查明水库区水文地质、工程地质条件，对水库渗漏、库岸稳定、浸没和固体径流等问题作出评价，预测蓄水后可能引起的地质问题并作出处理建议。
- （3）查明坝址、引水线路、排水线路和其他建筑物区的工程地质条件并进行评价，为选定的坝线、坝型和其他建筑物轴线位置及地基处理方案提供地质资料与建议。

依据上述任务，在充分利用前人资料的基础上，本阶段采用地质测绘、钻探、物探、室内及现场试验等综合手段，对水库、坝址、枢纽建筑物地段进行勘测工作，主要工程地

质问题已经查明，工作精度满足本阶段技术规范要求。

本阶段完成地质工作量汇总见（表 1-1）

表 1-1 完成工作量汇总表

序号	工作内容		单位	工作量	比例尺	备注
地质 测绘	平面	地质测绘	km <sup>2</sup>	1.2	1:2000	库区
				0.15	1:500	坝区
				110	1:10000	发电洞
				0.3	1:500	厂房
	剖面	地质测绘	km	1.06	1:500	坝区
				6.6	1:1000	洞线
				0.4	1:500	厂房
勘探	钻探		m/个	141.3/4		
	坑探		m/个	39.1/9		
	物探	电阻率测试	点	40		
		面波测试	km	0.2		
试验	野外密度试验		组	10		
	野外含水量测试			4		
	混凝土骨料分析			4		
	砂砾石渗水试验			10		
	水质分析			1		
取样	砂砾石		组	7		
	水样		组	1		
其他	地质摄影		组/日	6		
	踏勘		组/日	15		
	野外地质点		点	50		
	资料收集		工日	20		



## 二、区域地质概况

### （一）自然地理概况

工程区为高寒季风型气候区，海拔高、气候寒冷，雨量充沛、草原茂盛。根据河南县气象资料统计，多年平均气温 0.5℃，一月份平均气温-11.2℃，七月份平均气温 10.5℃，绝对最高气温 24.6℃，绝对最低气温-35.3℃，年平均降雨量 604.1mm，蒸发量 1355.6mm，多年平均风速 1.8m/s，最大风速 31m/s。

### （二）地形地貌

泽曲河在工程区蛇曲弯折，深切河谷，区内地势总的特点是两岸山势较为雄伟，河谷下切，形成比高悬殊的强烈剥蚀高山和河流谷地分布的地貌格局，以坝址为界，其上游河谷开阔，下游为不对称的“U”型河谷，河床岸边基岩裸露，两岸Ⅲ级侵蚀堆积阶地发育。

### （三）地层岩性

工程区出露的基岩地层以三迭系为主，晚泥盆系及上第三系地层有少量分布。由老至新简述如下：

#### （1）泥盆系上统铁山组（D3ts）

分布在河南县东南部、电站以东 40km 代桑曲—结更一带，厚度大于 500m。为一套台型海相沉积碎屑岩类。岩性主要为燧石条带灰岩，与下伏地层呈整合接触。

#### （2）三迭系（T）

①下统浩斗杂阔尔群（T1hd）：下部为变质砂岩夹深灰色薄层灰岩和钙质板岩；上部为深灰色薄层灰岩夹钙质板岩和变质砂岩。分布在电站东西两侧 30-40km 处，总厚度 1000m。与下伏地层呈角度不整合接触。

②中统古浪堤组（T2g）：为一套滨海—浅海相沉积碎屑岩类。底部为砾岩、砂砾岩；中上部为砂岩、砂板岩及灰岩。分布在电站东北 20km 处，范围较广，总厚度大于 1200m。

③中上统（T2-3）：原岩属海陆交互相碎屑岩建造，经区域变质作用形成。岩性主要为泥质板岩夹砂质板岩，其间有少量燕山期二长花岗岩侵入体。分布范围广，总厚度 1631m，是构成库盆和厂坝区的主要基岩地层。

#### （3）上第三系（N2）

为一套河湖相沉积碎屑岩类。岩性主要为紫红色或砖红色粉砂质粘土岩、粘土质粉砂岩、砂岩及砂砾岩。分布在电站上游 30km 处，范围较广，总厚度大于 730m。与下伏地层

呈角度不整合接触。

#### (4) 第四系 (Q)

第四系堆积物在本地区成因类型复杂、岩性多变。

①洪冲积块碎石土 (Q4al+pl)：分布在河流阶地、山间谷地及冲沟沟口部位，厚度变化大，一般 5-12m，呈松散状、密实度差；

②残坡积碎石土 (Q4dl)：多分布在山麓缓坡地带，厚度一般 3-7m，呈散体状；

③洪冲积或风积成因的粉土、粉质粘土 (Q4al+pl)：分布在阶地表部，厚度一般 7-13m，呈松散、低密状态。另有少量零星分布的冰水沉积和冰碛物。

### (四) 地质构造

根据青海省区域地质资料，尕斯库勒水电站在区域地质单元上归属秦岭地槽，（见图 2-1 尕斯库勒水电站区域构造略图）。

展布在工程区附近的区域构造主要为南秦岭东西向构造体系；褶皱构造分布有官秀—楠木让褶皱组；断裂构造主体分布方向呈近 EW 向，以中铁断裂带为代表，次级结构面呈 NE 向，代表性断裂为军功断裂带。

官秀—楠木让褶皱组：位于泽库县东侧的官秀—楠木让一带。褶皱组的西段被南北向构造切割，与 EW 向构造呈反接关系，褶皱组宽 37km，轴向近 NWW—EW 向延展，省内长度 50km，向东延出省境。褶皱组由三迭系中统古浪堤组反复揉皱而成，由南而北，即由楠木让下游向斜、楠木让上游背斜、大穷龙哇向斜及官秀背斜组成，以楠木让上游背斜较为典型。

楠木让上游背斜位于泽库县东南的楠木让及河南县东北一带，呈 NWW 向延伸，长度大于 40km，轴部向 NW 方向倾伏，褶皱东段与 SN 向构造带呈反接关系，翼部岩层倾角为 50-60°，次级褶曲北翼较南翼发育，褶曲紧闭，线状特征明显。

中铁断裂带：主断裂西始于下大武，经中铁，东延伸止至泽库县南，长度 160km。由 2-3 条 EW 向断裂组成，西段倾向 NE，倾角 50-70°，东段倾向 SW，倾角 60-70°。此断裂带在华力西末期已具雏形，以压性为主，未发育断裂挤压破碎带，有石英脉及汞矿充填。该断裂切割中铁背斜轴部，使南翼错移而形成次一级褶曲，距电站约 40km。

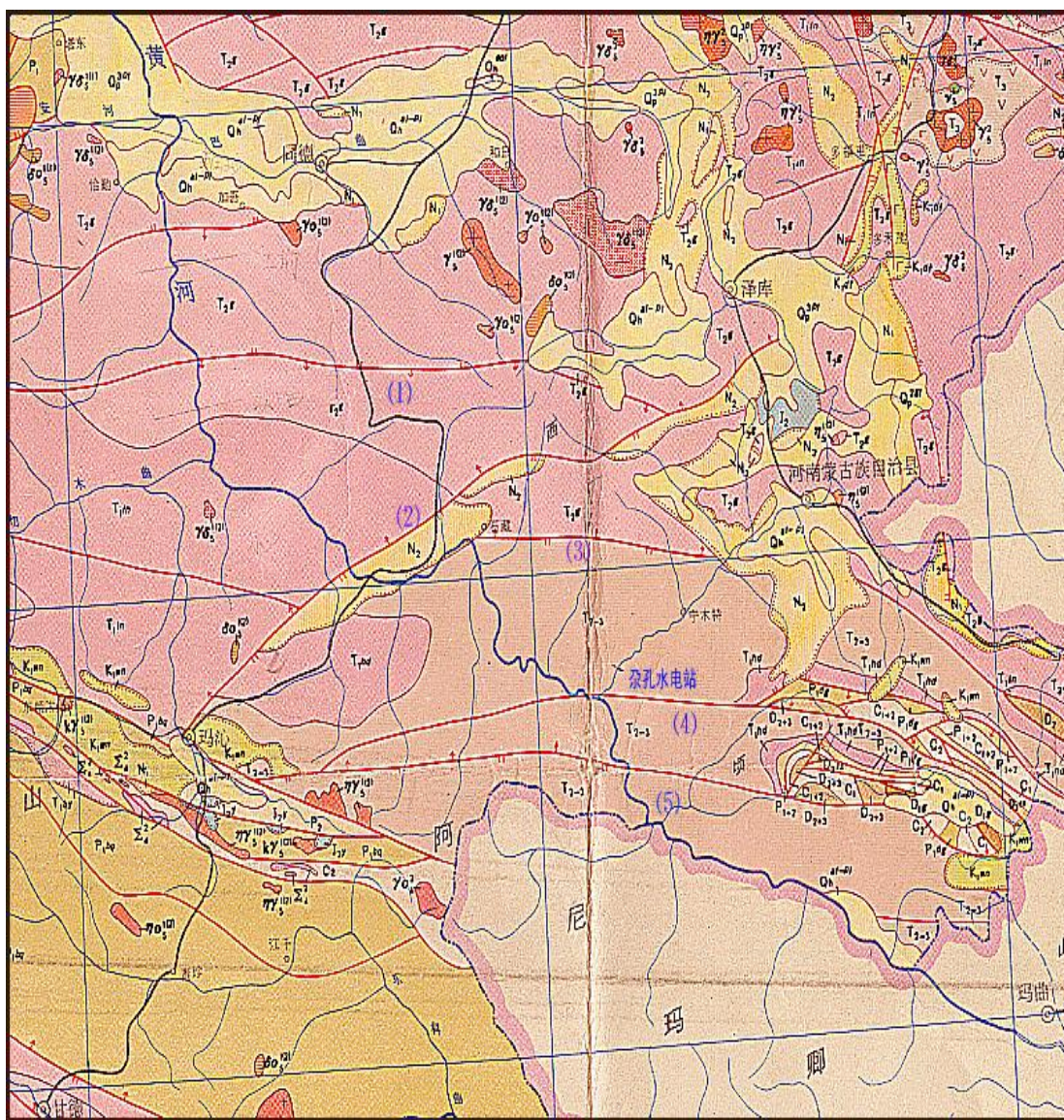


图 2-1 尕孔水电站区域构造略图

- (1) 中铁断裂带 (2) 军功断裂带 (3) 宁木特～迭山压性断裂  
(4) 光盖山～迭山北缘断裂带 (5) 光盖山～迭山南缘断裂带

军功断裂带：为玛沁 NWW 向深断裂的分支断裂带。该断裂西起玛沁，经军功，东延伸止至泽库县南，长度 200km。由多条 NE 向次级断裂组成，倾向 NW，倾角 40-60°，以压性为主，发育有挤压破碎带及宽 5-7km 的片理岩化带。断裂延伸稳定，迹线平直，主要切割了三迭系中下统地层。在军功一带，见三迭系逆冲于白垩系及第三系地层之上。该断裂形成于印支期，燕山期有强烈活动，距电站约 30km。

宁木特～迭山压性断裂、光盖山～迭山北缘断裂带及光盖山～迭山南缘断裂带均为舟曲～迭部断裂带的三个次级断裂带。舟曲～迭部断裂带走向北西西，东起武都西北，向西经舟曲、迭部，穿黄河至玛沁与花石峡断裂斜接，延伸规模 370 多公里。整个断裂带由数条大致平行的断裂组成，每条断裂又由数条规模不等，产状各异的小断裂所组成。断裂带

南北宽约 40 多公里。该断裂形成于加里东末期。

宁木特～迭山压性断裂：产状 NW275° NE∠70°，延伸 50km，距坝址区最近约 15km。属晚近期以来的活断裂；

光盖山～迭山北缘断裂带：该断裂带西至光盖山，向东沿迭山北缘以南东 70 度方向展布。在工程区南侧，从泽曲河入黄河部位切过，距坝址最近约 3km 根据断坎坡角（25°）估算，应在晚更新世结束活动。

光盖山～迭山南缘断裂带：产状 NW280° NE∠70°，延伸长度 87km，距坝址区最近约 15km，全新世黄土、坡积物被错断，断距 10～30cm。

## （五）新构造与地震

### 1. 新构造运动特征

区域内晚近期新构造运动的特征，主要表现为间歇性大面积缓慢上升运动和差异性的断块活动，地貌上反差强烈，呈断陷盆地与高耸隆起的山岳相间分布景观。泽曲河峡谷区河流深切近百米，发育有多级基座阶地，河床基岩裸露；黄河在该段深切河谷，岸坡陡直，两岸未见低阶地出现，河床覆盖层较薄，这些迹象均反映出区域上升运动的特征。距离工程区较近的区域中铁断裂带上更新世有轻微活动，但自更新世晚期以来，处于相对稳定状态；军功断裂带经野外实地调查，断裂带顶部的第四系堆积物层理正常，未发现任何变形迹象，说明晚更新世以来断裂带无明显活动，处于相对稳定的状态。距坝址较近的光盖山～迭山北缘断裂带晚更新世结束活动；宁木特～迭山断裂及光盖山～迭山南缘断裂带虽在晚更新以来有过活动，但活动轻微，量级小且无地震记录。

综上所述，工程位于上述诸断裂所围限的梯形断块内，库坝区处于相对稳定的地块内。

### 2. 地震活动特征及地震动参数

在工程场地百公里范围内，自公元 318 年以来，共记载 4.75 级以上地震 17 次，其中最大震级 5.8 级（1819 年化隆）；距离工程区较近的区域中铁断裂带上更新世有轻微活动，发生过 2-5 级地震。场地外围 1968 年化隆 5.4 级地震，1920 年海源 8.5 级地震，1990 年 4 月 26 日海南塘格木 7.0 级地震。

根据国家质量技术监督局 2001 年 2 月 2 日发布的《中国地震动参数区划图》，工程区地震动峰值加速度为 0.10g，（图 2-2），地震动反应谱特征周期为 0.45s（图 2-3），相应地震基本烈度为Ⅶ度。



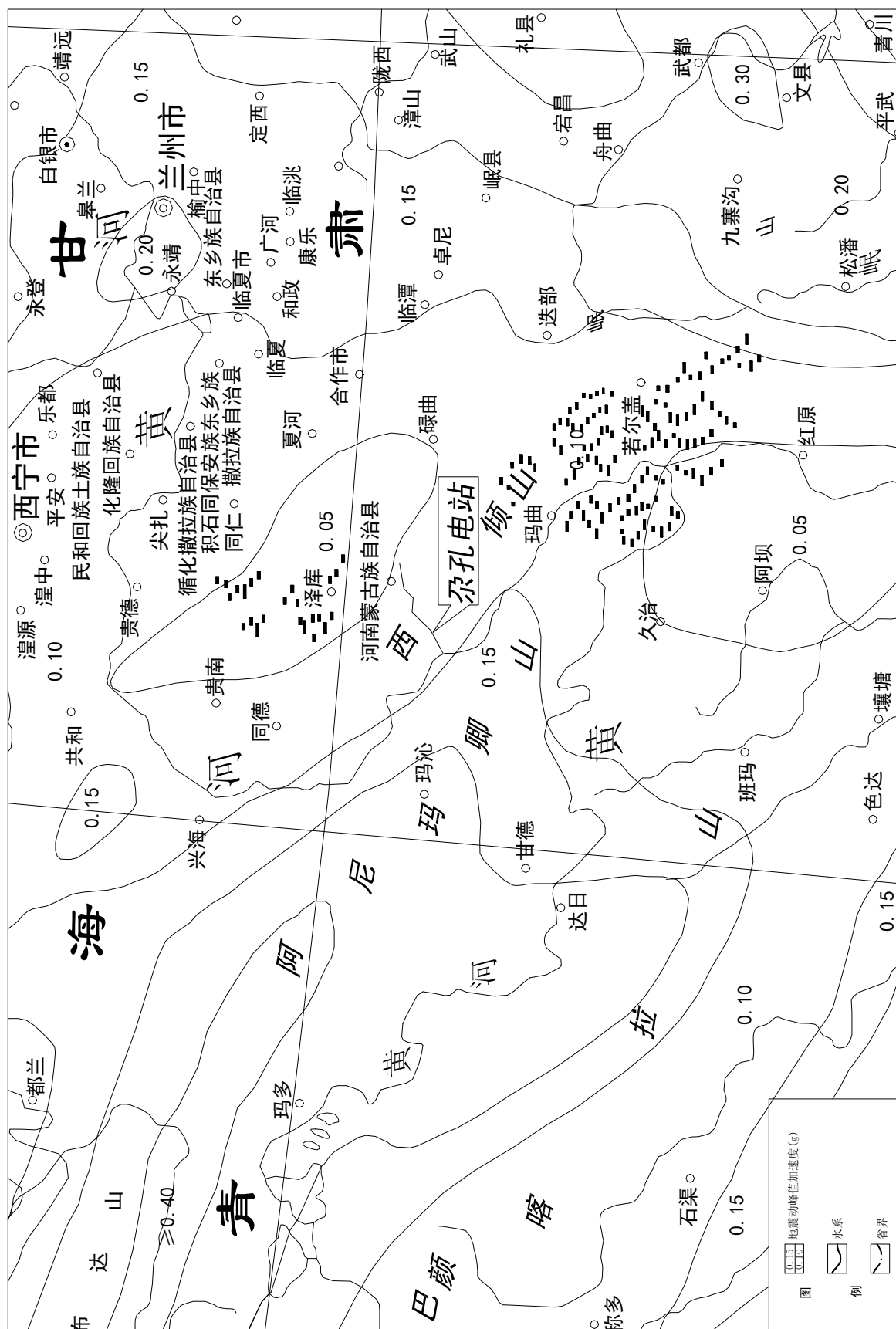


图 2-2 工程区及周边地区地震动峰值加速度区划图

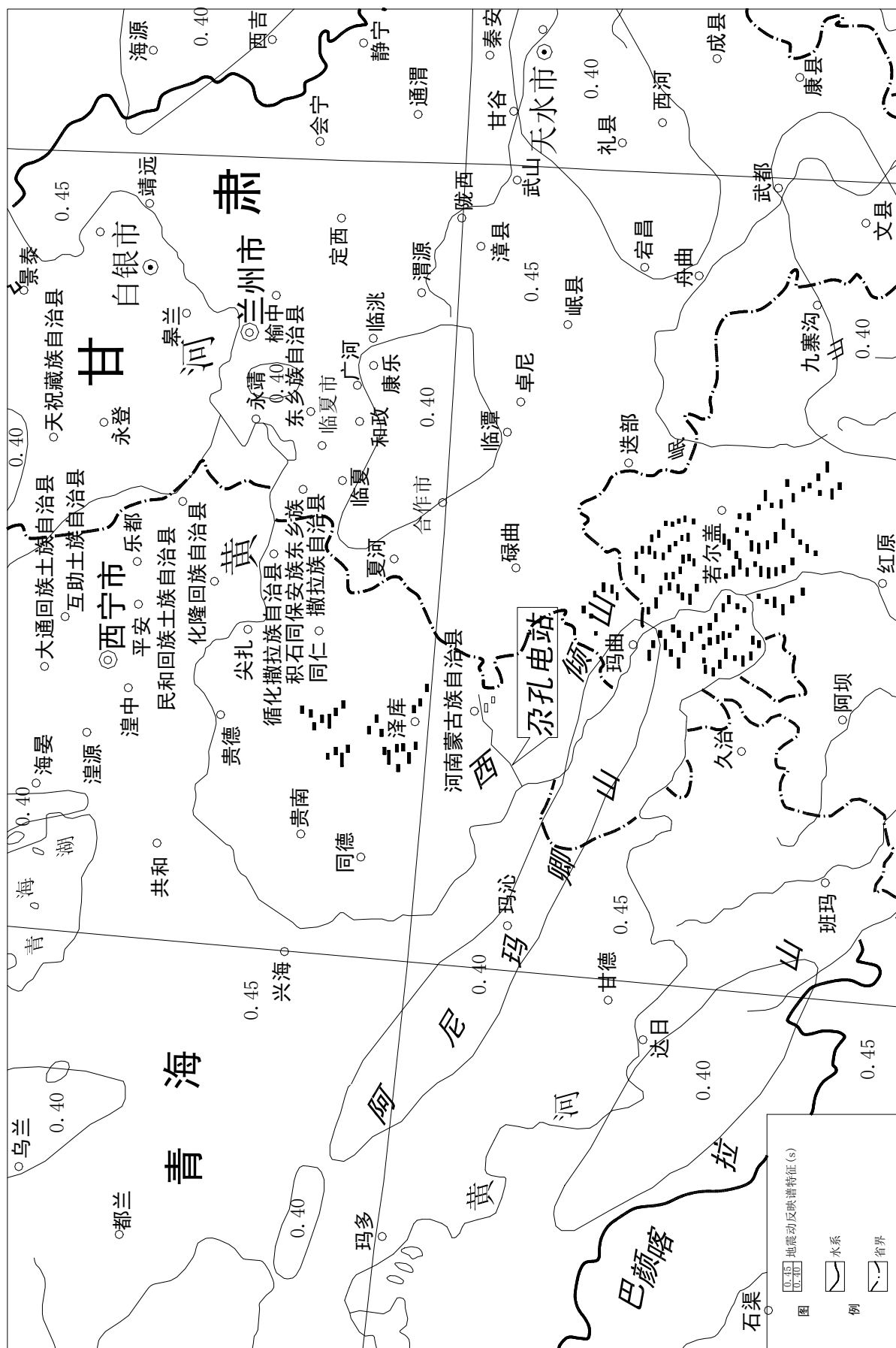


图 2-3 工程区及周边地区地震动反映谱特征周期区划图

## （六）水文地质条件

工程区地表水均属黄河水系，黄河由南向北流经本区，主干道曲折，泽曲河为其一级支流，均是本区地表水和地下水的排泄通道。区内地下水按其赋存空间形态及介质类型可分为基岩裂隙潜水和第四系孔隙潜水两大类。

基岩裂隙潜水，分布在库区上游、坝区两岸及黄河岸边基岩内，它们主要依靠大气降水和季节雪融水的渗入补给，潜水水位略高于河水位，通常情况下与河水具有统一的自由水面。第四系孔隙潜水主要接受大气降水补给，排泄于泽曲河。覆盖层透水性较好，其孔隙性潜水埋藏深度浅，水力坡降小，地下水位平缓，受季节变化影响大。

## （七）物理地质现象

工程区海拔高程 3390-3450m，属高海拔、高寒地区，第四系地层发育，物理地质现象主要有冲沟，泥石流、河流冲刷、岩体卸荷崩塌及岩体风化，季节性冻土等。

(1)冲沟：泽曲河两岸冲沟较为发育，多呈“V”型，处于幼~中年发育期，雨季常形成泥石流，并在沟口堆积形成洪积扇，其中以拖也拉、耶赫龙和阿日扎瓦日玛等冲沟为代表，沟谷长度一般 1-3km，宽度 10~25m，切割深度 15~35m，沟内有常年连续性水流排泄于泽曲河，阿日扎瓦日玛冲沟水量较大，平水期流量大于 50 L/min，水质清澈、无色透明。

(2)泥石流：泥石流的形成与各沟道内地形、松散堆积层的分布及暴雨等不良天气影响有关，由于区内海拔高，部分冲沟植被较差，在较大冲沟内，固体迳流冲出沟口后，堆积形成大小不等的洪积扇。

(3)河流冲刷：主要发育在泽曲河坝址以下部分，由于河流湍急，冲刷强度较高，两岸基岩经冲刷形成直立陡壁，谷底基本无覆盖层。

(4)岩体卸荷崩塌：主要发育在河谷狭谷区，由于部分河谷段地势狭窄，加上岩体近直立，后期修路等人工改造及岩体风化为岩体的卸荷崩塌创造了条件，卸荷裂隙宽度一般 2-10mm，延伸深度通常 5-15m。由于卸荷裂隙的切割，且河谷岸坡陡峻，局部河岸甚至出现倒坡，致使岸坡形成“危岩体”或岩质滑坡。

(5)岩体风化：工程区基岩岩性主要为泥质板岩夹砂质板岩，岩层产状  $NW290^{\circ}-314^{\circ}$   $SW\angle 42^{\circ}-57^{\circ}$ ，极薄层-薄层，表层岩体风化严重，风化深度沿结构面其发育深度不同，一般 3-7m。

(6)季节性冻土：根据中国季节性冻土标准冻深线图，泽库县最大冻土厚度为 2.46m，河南县距泽库县城约 40km，坝址区位于峡谷地段，最大冻土厚度取 2.50m；厂房区位于黄河岸边，冻土厚度取 2.0 m。

### 三、水库区工程地质条件分析

昝孔水电站当水库校核洪水位为 3398.5m 时，水库回水长度约 4.6km，最大宽度 196m，水库总库容约 329 万  $\text{m}^3$ 。

#### （一）库区基本地质条件分析

##### 1. 地形地貌

库区河流蛇曲弯折，总体流向为 SW240°，平水期河流水面宽度一般 12~25m，水深 0.2~0.8m，河流天然比降为 8.7‰。水库两岸边坡平缓，河谷开阔，两岸呈不对称的“U”型宽谷。河床两岸基岩基本裸露，两岸 II-III 级侵蚀堆积阶地不对称发育。水库右岸发育冲沟日扎玛，沟谷长 1-3km，宽度 25-40m，沟内有常年连续性水流排泄于泽曲河，水质清澈、无色透明。

##### 2. 地层岩性

构成库盆周边的基岩地层为三迭系中上统（T2-3）的泥质板岩夹砂质板岩，其间有少量燕山期二长花岗岩侵入体。第四系（Q）主要为：①冲积砂砾石层（Q4a1），分布在现代河床，厚 3-5m，结构松散-中密；②冲洪积砂砾碎石土（Q4a1+p1）：分布在阶地基岩侵蚀面之上，厚度一般 3~5m；③冲洪积粉质粘土、粉砂土（Q4a1+p1）：大面积分布在河谷两岸阶地表面，厚度一般 5~8m，密实度较差；④坡积碎石土（Q4d1）：分布在边坡的坡脚及平缓地带，厚度一般 3~20m。

##### 3. 地质构造

库区基岩地层呈单斜构造形式，岩层总体走向为 NW290-314°，倾向为 SW，倾角为 42-57°，库区内无区域性较大规模的断裂构造穿越。经野外地质调查，仅发现顺层或微切层理发育，破碎带宽度一般 20~40cm，组成物多为块状岩、糜棱岩及断层泥，未胶结，延伸长度一般大于 150m，跨越水库两岸。水库两岸岩体中发育的构造裂隙主要有：（1）NE76° NW  $\angle$  74°，2 条/m 闭合 （2）NW322° SW  $\angle$  82°、面起伏，卸荷形成 （3）NW354° NE  $\angle$  40° 闭合，延伸长、1 条/m （4）NE54° NW  $\angle$  52°，2 条/m，张开 1mm，泥质充填。裂隙规模较小，对岸坡的整体稳定不起控制作用。

##### 4. 水文地质条件

###### （1）地下水类型

水库区两岸地下水以基岩裂隙水和覆盖层孔隙性潜水的形式赋存在岩（土）体中，主要接受大气降水补给，排泄于泽曲河。



覆盖层透水性较好，其孔隙性潜水埋藏深度浅，水力坡降小，地下水位平缓，受季节变化影响大。

构成库盆的基岩地层为相对不透水岩体，其基岩裂隙水以网状或脉状的形式分布在基岩裂隙和断层破碎带中，地下水分水岭远离河谷，高于水库正常蓄水位，地下水沿坡脚附近以下降泉的形式出露。

## (2)水质分析

通过取样进行室内水质分析，泽曲河水中的碱度、硬度及溶解固型物的含量均较低，矿化度为 0.441~0.448g/L，PH 值为 8.08~8.27，水化学类型为：HCO<sub>3</sub>-Ca<sup>++</sup>型水；坝址上游冲沟水中的碱度、硬度及溶解固型物的含量亦较低，矿化度为 0.386~0.481g/L，PH 值为 8.04~8.12，水化学类型为：HCO<sub>3</sub>-Ca<sup>++</sup>·K<sup>++</sup>Na<sup>+</sup>型水。

根据《水利水电工程地质勘察规范》（GB50287-99）附录 G 环境水对混凝土腐蚀性评价标准，河水对混凝土无腐蚀性（表 3-1、表 3-2）。

## 5. 物理地质现象

水库区沟谷开阔，堆积物主要为冲积砂砾石层分布于现代河床，冲洪积沙砾碎石土分布在阶地基岩侵蚀面之上，冲洪积粉质粘土、粉砂土，大面积分布在河谷两岸阶地表面。库区河谷两岸平缓，库区物理地质现象主要有冲沟，泥石流、岩体风化等。

库区右岸上游发育冲沟日扎玛，沟内河水清澈，无固体物带入泽曲河。在雨季常形成泥石流，流入泽曲河，其量不大，不会对水库运行造成大的危害。

岩体风化：库区基岩岩性主要为泥质板岩夹砂质板岩，岩层产状 NW290°-314° SW∠42°-57°，极薄层-薄层，表层岩体风化严重，风化深度沿结构面其发育深度也不同，一般 3-7m。

表 3-1 水质简分析成果表

室内 编号	野外 编号	取样 位置	游离 CO <sub>2</sub>	侵蚀性 CO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CL <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup>	PH	总硬度	总碱度	矿化度
			mg/l	mg/l	mmol/l	mmol/l	mmol/l	mmol/l	mmol/l	mmol/l	mmol/l	—	mmol/l	mmol/l	mg/l
					mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l				
—	样 1 <sup>#</sup>	河水	8.347	102.663	4.667	0.00	0.5	0.813	3.125	1.375	1.48	8.27	4.50	4.67	448.00
					284.75	0.00	24.015	28.837	62.625	16.706	34.039				
			4.77	100.98	4.59	0.00	0.25	0.74	3.00	1.38	1.28	8.08	4.38	4.59	427.00
					280.08	0.00	12.01	26.62	60.12	16.71	29.40				
	平均值		6.56	101.82	4.63	0.00	0.43	0.78	3.05	1.38	1.41	8.16	4.43	4.63	441.00
					282.42	0.00	20.41	27.73	61.12	16.71	32.31				
—	样 2 <sup>#</sup>	冲沟水	11.924	117.81	5.355	0.00	0.375	0.74	3.075	2.125	1.72	8.12	4.75	5.35	481.00
					326.762	0.00	18.011	26.215	61.623	25.819	39.549				
			9.54	86.96	3.95	0.00	0.25	0.74	2.50	0.63	1.37	8.04	3.70	3.95	388.00
					241.18	0.00	12.01	26.22	50.10	7.59	31.44				
	平均值		10.33	107.53	4.89	0.00	0.29	0.74	2.78	1.58	1.56	8.08	4.36	4.89	449.00
					298.24	0.00	14.01	26.22	55.61	19.24	35.88				

注:资料来源《泽曲河尕孔水电站可行性研究报告》国电西北勘测设计研究院工程勘察研究院

表 3-2 环境水腐蚀判定标准与水质分析对比表

腐蚀性类型		腐蚀性特征 判定依据	腐蚀 程度	界限 指标	水样分析 结 果	简 评
分解类	溶出型	$\text{HCO}_3^-$ 含量 (mmol/L)	无腐蚀 弱腐蚀 中等腐蚀 强腐蚀	$\text{HCO}_3^- > 1.07$ $1.07 \geq \text{HCO}_3^- > 0.7$ $\text{HCO}_3^- \leq 0.7$	河水 4.59-4.68 沟水 3.95-5.35	无 腐 蚀
	一般酸性型	PH 值	无腐蚀 弱腐蚀 中等腐蚀 强腐蚀	$\text{PH} > 6.5$ $6.5 \geq \text{PH} > 6.0$ $6.0 \geq \text{PH} > 5.5$ $\text{PH} \leq 5.5$	洒水 7.4-8.0 沟水 8.04-8.12	无 腐 蚀
分解结晶复合 类	硫酸镁型	$\text{Mg}^{2+}$ 含量 (mg/L)	无腐蚀 弱腐蚀 中等腐蚀 强腐蚀	$\text{Mg}^{2+} < 1000$ $1000 \leq \text{Mg}^{2+} < 1500$ $1500 \leq \text{Mg}^{2+} < 2000$ $2000 \leq \text{Mg}^{2+} < 3000$	河水 16.7 沟水 7.5-25.8	无 腐 蚀
结晶类	硫酸盐型	$\text{SO}_4^{2-}$ 含量 (mg/L)	无腐蚀 弱腐蚀 中等腐蚀 强腐蚀	$\text{SO}_4^{2-} < 250$ $250 \leq \text{SO}_4^{2-} < 400$ $400 \leq \text{SO}_4^{2-} < 500$ $500 \leq \text{SO}_4^{2-} < 1000$	河水 12.0-24.0 沟水 12.0-18.0	无 腐 蚀

## (二) 库区主要工程地质问题分析

### 1. 水库浸没

水库蓄水后使库区周围地下水相应壅高而接近或高于地面，导致地面农田盐碱化、沼泽化及建筑物地基条件恶化、矿坑涌水等，叫做浸没。山区水库可能产生矿山和宽阶地浸没以及库水向低邻谷洼地渗漏的浸没。严重的水库浸没问题影响到水库正常蓄水位的选择，甚至影响到坝址的选择。水库周边地区是否产生浸没，应通过地下水回水计算，预测地下水回水水位，再结合水库正常蓄水位上下范围的地形地貌、岩性及水文地质条件进行评价。

(1) 地形地貌条件：库区周边地区的地面高程和起伏变化是决定是否产生浸没及其范围的主要因素。若研究地段与库岸之间有经常性水流冲沟，其水位相当于或高于水库正常蓄水位，则这种地段地下水位不受水库水位抬升的影响，不会产生浸没。

(2) 岩性条件：库岸带为透水岩层，易产生浸没。若库岸带由相对不透水岩层组成，或研究地段与库岸之间有连续完整的相对不透水层阻隔，则不致产生浸没。

(3) 水文地质条件：蓄水前地下水埋藏较深，地下水排泄不畅，蓄水后地下水壅高，地下水补给量大于排泄量的苦岸地段、封闭或不封闭的洼地、沼泽的边缘地带，易产生浸没。若水库蓄水前研究地区的地下水在水库岸边的露头以高于水库正常蓄水位，则不会产生浸没。

水库蓄水引起的浸没范围预测：

(1) 浸没区的预测，根据半无限情况的潜水位公式，计算出同一时刻不同断面处的前水位，将水位连接起来得到该时刻的润曲线。潜水位等于或高于地表的区域就是可能的浸没区。

水库蓄水引起的浸没范围预测：

(1) 浸没区的预测，根据半无限情况的潜水位公式，计算出同一时刻不同断面处的前水位，将水位连接起来得到该时刻的润曲线。潜水位等于或高于地表的区域就是可能的浸没区。

(2) 预测水库对周边的浸没时间：

$$\mu_{(x,t)} = \Delta h \cdot F_{(\lambda)} = h_{x,t} - h_{0,0} \quad (3-1)$$

$$t = \frac{x^2}{4a\lambda^2} = \frac{\mu x^2}{4Kh_m \lambda^2} \quad (3-2)$$

式中：  $\mu_{(x,t)}$ ——为地下水位变幅；

$h_{(x,t)}$ ——为浸没时临界地下水位，m；

$h_{0,0}$ ——为勘察时地下水位，m；

$\Delta h$ ——库水位变化值，m；

$F_{(\lambda)}$ ——为库水位对地下水位的影响系数，由  $\lambda$  查表得出；

$x$ ——为计算点至库水边线的水平距离，m；

$k$ ——为渗透系数，m/d；

$t$ ——为水库渗透历时，d；

$a$ ——为压力传导系数；

$h_m$ ——为透水层厚度，m；

$\mu$ ——为土体的给水度。

由上式可以看出：离库岸距离为  $x$  点开始浸没的时间与距离的平方成正比，且含水层的透水系数越大，给水度越小，开始浸没的时间来的越快。

库区表层多为粉质粘土，毛细水上升高度  $H_k$  取 1.5m，安全超高  $\Delta H$  采用 0.5m，浸没的临界地下水位埋深  $H_{rc} = H_k + \Delta H = 2.0\text{m}$

基本数据及假定：土体的给水度取经验值 0.12，由于库区表层多为粘土，下层为砂砾石层及强风化泥质板岩，透水层厚度取 10m，渗透系数取  $3 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ，假定水库蓄水至正常蓄水位 3395m 高程。

浸没时临界地下水位  $h_{(x,t)} = \text{坝后地面平均高程} - \text{临界埋深} = 3390 - 2 = 3388\text{m}$

库水位变化值  $\Delta h = \text{正常蓄水位} - \text{平均地下水位} = 3395 - 20 = 3375\text{m}$

地下水位变幅  $\mu_{(x,t)} = \text{浸没时临界地下水位} - \text{平均地下水位} = 3388 - 20 = 3368\text{m}$

由式 (3-1) 计算结果查表得  $\lambda^2 = 0.0010$ ，代入式 (3-2) 计算结果为：

$$t = \frac{x^2}{4a\lambda^2} = \frac{\mu x^2}{4Kh_m\lambda^2} = \frac{0.12 \times 100^2}{4 \times 25.92 \times 10 \times 0.0010} = 1157(d)$$

当  $x=100\text{m}$  时，浸没时间  $t=1157\text{d}$ ；

当  $x=200\text{m}$  时，浸没时间  $t=4629\text{d}$ ；

由此，该水库区无矿产资源及文物分布。两岸阶地上部的粉质粘土层分布高程部分低于水库正常蓄水位 3395m，该部分水库蓄水后在阶地前缘产生少量潜水位升高浸没。库区浸没地段野外实地调查毛细水上升高度为 1.2~1.45m 之间，草源植物根系深度在 0.3~0.5m 之间。据此，取土的毛细水上升高度 1.5m，考虑 0.5m 的植物根系深度(安全超高)，确定本区的地下水临界深度为 2.0m。孛孔水库产生浸没宽度一般 4~8m，沿库岸浸没累计长度约 1.05km，浸没总面积约 11.25 亩，离库岸一点的浸没时间较长，浸没范围不大。

## 2. 水库渗漏

(1) 水库渗漏有暂时性渗漏和永久性渗漏：

暂时性渗漏：是水库蓄水初期库水渗入库水位以下未饱和的岩土体中的孔隙、裂隙和洞穴等，使之饱和而产生的渗漏量。基本上每一个水库都有暂时性渗漏，但因没有渗出库外，不构成对水库蓄水的威胁。

永久性渗漏：库水沿某些地下渗漏通道流向库外的邻谷或洼地的现象。这种渗漏是长期的，对水库蓄水效益影响极大，还可能造成浸没、沼泽化、盐渍化等不良现象，只要采取相关防渗措施，使得渗漏量控制在小于该河流多年平均流量的 5% 则是允许的。永久性渗漏大多沿下列部位发生：通过库岸分水岭向邻谷或低地渗漏、坝下游河道是弯道，库水通过库岸向下游河道渗漏、库水通过库底向远处低洼排泄区渗漏。

(2) 产生渗漏的工程地质条件：

①岩性条件：水库通过地下渗漏通道渗向库外的首要条件是库底和水库周边有透水岩层存在。有断层破碎带、各种不整合面喀斯特化碳酸岩、裂隙极发育的砂岩、玄武岩等。或者是隔水岩层遭到破坏，不起隔水作用，这都必将导致水库渗漏。

②地形地貌条件：具备了透水岩层还需要具备有利于库水渗漏的地形地貌条件。水库与相邻河谷间分水岭的宽窄和邻谷的切割深度对水库渗漏影响很大。当地形分水岭很单薄，而邻谷又低于库水位很多时，就具备了水库渗漏的地形条件。

③地质构造条件：透水基岩若要能成为水库的渗漏通道，还需要一定的地质构造条件。当水库位于向斜部位时，因两岸岩层均倾向库内，隔水层将整个水库包围，即使库内为强喀斯特岩层，水库也是不会渗漏的。当库区位于单斜构造时，库水会顺倾向渗向低邻谷。如果库区没有隔水层，或隔水层较薄，隔水性能差，或隔水层被未胶结横向断层切断，则水库仍可能漏水。

④水文地质条件：水库是否漏水将取决于水文地质条件。要具体分析分水岭地区地下水出漏和分布特征，确定有无地下水分水岭，地下水分水岭的高程及其与水库正常蓄水位的关系。

### (3) 库区渗漏估算方法：

分水岭渗漏量可按达西公式估算。

①单层岩土体分水岭，分水岭由单层岩土体组成，透水性均一，隔水层埋藏不深，分无坡积层和有坡积层。

无坡积层时计算式：

$$q = K \cdot \frac{H_1 - H_2}{L} \cdot \frac{H_1 - H_2}{2} \quad (3-3)$$

$$\text{总渗漏量:} \quad Q = qB \quad (3-4)$$

式中：  $q$  ——分水岭单宽剖面的渗漏量，  $m^3/d \cdot m$ ；

$K$  ——分水岭岩土的渗透系数，  $m/d$ ；

$H_1, H_2$  ——水库水位，邻谷水位，  $m$ ；

$L$  ——分水岭过水部分的平均厚度，  $m$ ；

$Q$  ——分水岭总渗漏量，  $m^3/d$ ；

$B$  ——分水岭漏水段总长度，  $m$ 。

有坡积时计算式：

$$q = K_{\text{平均}} \cdot \frac{H_1 - H_2}{l' + l + l''} \cdot \frac{H_1 - H_2}{2} \quad (3-5)$$

$$K_{\text{平均}} = \frac{l' + l + l''}{\frac{l'}{K'} + \frac{l}{K} + \frac{l''}{K''}} \quad (3-6)$$

式中： $l'$ 、 $l''$ ——分别为分水岭水库一侧和邻谷一侧坡积层过水部分厚度， $m$ ；

$K'$ 、 $K''$ ——分别为分水岭水库侧和邻谷侧坡积层的渗透系数  $m/d$ ，其他符号同前。

②两层透水层分水岭，计算式：

$$q = K_{\text{平均}} \frac{H_1 - H_2}{L} (T_1 - T_2) \quad (3-7)$$

$$K_{\text{平均}} = \frac{K_1 T_1 + K_2 T_2}{T_1 + T_2} \quad (3-8)$$

$$T_2 = \frac{H_1 - T_1}{2} + \frac{H_2 - T_1}{2} \quad (3-9)$$

$$\text{总渗漏量：} \quad Q = qB \quad (3-10)$$

式中： $T_1$ ——下层透水层厚度， $m$ ；

$T_2$ ——上层透水层过水部分平均厚度， $m$ ；其他符号同前。

③隔水层是倾斜的

如向水库内倾斜，据卡明斯基近似公式：

$$q_1 = K \frac{h_1 - h_2}{2} \cdot \frac{H_2 - h_1}{l} \quad (3-11)$$

$$q_2 = - \left( K \frac{y_1 + h_2}{2} \cdot \frac{y_1 - H_2}{l} \right) \quad (3-12)$$

$$q_n = q_1 - q_2 \quad (3-13)$$

而  $H_2 = h_2 + T$   $T = il$  代入 (3-11)、(3-13)

$$\text{故} \quad q_n = \frac{K(y_1 - h_1)}{2} \left( \frac{y_1 + h_1}{l} - i \right) \quad (3-14)$$

隔水层向水库外倾斜，计算式为：

$$q_n = \frac{K(y_1 - h_1)}{2} \left( \frac{y_1 + h_1}{l} + i \right) \quad (3-15)$$

式中： $q_n$ ——单位库岸长度渗透损失， $m^3/d$ ，

渗漏段长度为 $L$ ，则总渗漏量； $Q = q_n L$  (3-16)

根据水文地质、工程地质条件和地形地貌等资料，合理的选择计算公式，估算渗漏量，依据渗漏量必要时做防渗处理。

防渗措施主要有：设置防渗帷幕(水泥及化学灌浆)，溶洞的堵、截、围、铺，松散层的人工铺盖、防渗墙及防渗板桩等

尕孔电站库坝两岸山体雄厚，相对高差大，水库蓄水后水位抬升不大，泽曲河为区内最低侵蚀基准面，两岸分水岭远高于水库正常蓄水位，且水库区无大的区域断裂构造带通过，因此，水库不存在向邻谷产生永久渗漏的问题。

### 3. 库岸稳定

对于抗冲刷能力较弱的疏松土石体构成的岸坡，在一个不太长的时期里会以剥落、崩塌、错落、滑坡、滑塌等形式破坏，岸线节节后退，塌方的土石体部分堆积于水下形成浅滩。到一定程度会稳定下来，形成新的稳定岸坡的过程成为水库塌岸。

水库塌岸预测的目的是根据水库区的工程地质条件和水库运用期水位变化的情况等，定量地估计水库蓄水后某一期限内以及最终的塌岸宽度、塌岸速度、形成最终塌岸的可能期限，以便作出库岸农田充分利用的规划和邻近城镇居民、工矿企业、道路等设施迁移计划和防治措施。

尕孔水电站水库两岸基岩岸坡整体稳定较好，不会产生大范围的坍岸问题。两岸阶地部位的第四系土体岸坡受库水影响，会产生少量的库岸再造。总体看，产生坍岸的范围不大，不会影响水库的安全运行。

### 4. 水库淤积

在多泥沙的河流上修筑水库后，由于水流断面加大，坡降和流速大大减小，因此水流所携带的泥沙就沉于库底，造成水库淤积。粗粒的沉积在上游，细粒在下游，随着时间的推移，更细的散布于整个水库中，极细的可以悬浮于水中随流水排泄出去，泥沙沉积的部位从库位逐渐向坝前推进，直至均不分布于库底。当淤积层的渗透系数远小于库盆岩层的渗透系数时，淤积层可以起到天然铺盖防渗层的作用，但却使水库的库容大为减小，降低水库调节径流的能力，严重者缩短水库的使用寿命及蓄水能力。

尕孔水电站库区洪水期泽曲河携带的泥沙质及两岸冲沟泥石流是水库区固体物质的主要来源，另外尚有少量的库岸再造堆积物入库，但其量都不大，不影响水库的正常运行。



## 四、坝址区工程地质条件分析

坝址区引水枢纽分溢流坝段和非溢流坝段两部分，设计坝型为浆砌石重力坝，其中溢流坝段净宽 50m，大坝设计坝高 21m、坝顶高程 3399.0m、设计正常蓄水位 3395.0m，校核洪水位 3398.5m。

### （一）坝址区基本地质条件分析

#### 1. 地形地貌

泽曲河流以近 S180° 进入坝址区后，在平面上呈舒缓的“J”型流线，以 NW310° 流出坝址区。平水期河水位高程 3381.0m，水面宽度一般 15~20m，水深 0.2~0.8m；坝址区左岸边坡平缓，岸坡自然坡度 19°，右岸为泽曲河基座式阶地台地，台地高程 3410m，台地平坦，高出河床 30m，两岸河谷呈不对称敞开的“U”型河谷。

#### 2. 地层岩性

坝址区出露的基岩地层主要为三迭系中上统（T2-3）泥质板岩夹少量砂质板岩；第四系（Q4）堆积物有坡积碎石土、冲积砂砾石、冲洪积砂砾石及粉质粘土。

（1）三迭系中上统（T2-3）泥质板岩夹砂质板岩：

原岩为一套滨海~浅海相的碎屑沉积岩类，经区域浅变质作用岩性主要为泥质板岩夹砂质板岩，其中泥质板岩约占 76%。岩石颜色为灰-青灰色，中细粒碎屑结构，呈薄层状产出，局部为极薄层状结构。岩石中碎屑物成份以长石和石英为主，胶结物为硅钙质。微新鲜岩石较坚硬、完整，力学强度中等，抗风化能力较强。砂质板岩岩石颜色为灰或青灰色，细粒碎屑结构，呈层状产出，局部为薄层状或千枚结构，抗风化能力较差。

（2）第四系松散堆积层：

①坡积碎石土：主要分布在坝址左岸约 3385m 高程以上的坡麓地带，分布范围较广，厚度较大约 5-17m。碎石以板岩为主，粒径一般 5~20 mm，含量 25%-30%，棱角状，粉土充填，呈松散状堆积。

②冲积砂砾石：主要分布在河床及漫滩地段，推测厚度 1-3m，结构松散-稍密，砾石砾径一般 50~120mm，磨圆度较差，多呈浑圆状或次棱角状，粉细砂及泥质充填。颗分试验表明，>60mm 卵石含量均值 24.7%，60-2mm 砾石含量均值 54.5%，砂 18.3%，含泥 2.8%，不均匀系数 97.1，坝址上游有大孤石零星分布。

③冲洪积粉质粘土：分布在坝址右岸Ⅲ级侵蚀堆积阶地台地上，范围较广。纵向分布

长度 260~300m，横向宽度 120~160m，勘探揭示厚度 4-5m，，最大厚度估计达 7m。该土层密实度较差，整体呈散体状。其上部有 0.5~1m 厚的腐植土，底部为冲洪积砂砾石层。

④冲洪积砂砾石层：分布在坝址右岸冲洪积粉质粘土层底部，为粉砂层与砾石层互层，粉砂层单层厚 5-10cm，砂砾石单层厚 1m，具水平层理，该层整体厚 5-6 m，在坝轴线下游一带厚度增大，架空、结构松散。

3. 地质构造

坝址区岩层产状变化不大，呈单斜构造，总体走向为 NW290-314°，倾向为 SW，倾角为 42-57°。岩体受区域变质作用的影响，沿层面方向局部出现磨擦镜面和擦痕，断裂结构面以层间挤压为主，裂隙发育。

根据平面地质测绘和地质调查，坝区没有发现规模较大的断层，断裂结构面以层间挤压带为主，沿层间延伸，延伸长度 100~150m，其中在坝址左岸发育 2 条（J1、J2），右岸发育 3 条（J3、J4、J5）。挤压带宽一般 0.3-0.7m，无明显擦痕，面粗糙起伏不平，挤压带物质组成主要为块状岩、角砾岩、糜棱岩的混杂带，呈青灰色，铁钙质胶结较差，周围岩体呈千枚状，破碎，影响带宽度为 1m。

依据平面地质测绘成果，坝址区共有 30 余条裂隙。其发育具有较明显的规律性，按照裂隙空间产状可以归纳分为三组（见表 4-1）。

表 4-1 坝址区裂隙组特征统计表

组号	产 状			裂隙性质	宽度 (mm)	延伸长度 (m)
	走向 (°)	倾 向	倾角 (°)			
①	NE30-70	SE	40-65	剪切	2.5-5.5	30-50
②	NW285-330	SW	45-65	层面	2.0-4.0	25-40
③	NE75-85	SE/NW	65-85	剪切	1.5-3.5	15-40

其中第①组中高倾角的剪切裂隙最为发育，约占统计裂隙总数的 36%；第②组层面裂隙发育次之，约占统计裂隙总数的 29%；第③组高倾裂隙不太发育，约占统计裂隙总数的 14%。另外，有少量规模较小的缓倾角裂隙零星分布。坝址区出露的裂隙宽度一般为 1.0-4.0mm，充填物均为岩片、岩屑、岩粉，多未胶结，局部弱钙质胶结。裂面稍弯曲、较光滑，延伸长度一般 20~40m。

4. 水文地质条件

(1) 地下水埋藏类型

坝址区地下水按埋藏类型分为第四系松散堆积层孔隙性潜水和基岩裂隙性水。

第四系松散堆积物孔隙性潜水：主要赋存和运移于现代河床、漫滩中，地下水位相对较

平缓，含水层厚度随堆积物的厚度而变化。

基岩裂隙性水:贮存和运移在基岩裂隙和挤压带中，根据钻孔孔内地下水量测，左岸地下水埋深 12.7-20.8m（高程 3384-3390m），右岸地下水埋深 26m(高程 3382m)，略高于河床河水位，埋藏深度较大，水力坡降平缓。两岸地下水接受大气降水、地表径流的补给，排泄于泽曲河。

## (2) 水化学类型

根据坝址区水样水化学试验成果（见表 3-1），泽曲河水中的碱度、硬度及溶解固型物的含量均较低，矿化度 0.441~0.448g/L，PH 值 8.08~8.27，水化学类型：HC03--Ca++ 型水，对混凝土无腐蚀性。

## (二) 坝址工程地质条件分析

现选定坝址设计最大坝高 21m、坝顶高程 3399.0m、坝型为浆砌石重力坝，其中溢流坝段净宽 50m，设计正常蓄水位 3395.0m，校核洪水位 3398.5m，水库总库容：329 万  $m^3$ 。

坝址所在位置处河流流向 NW308°，河谷宽 38m，河床高程 3381.0m，河谷右岸为一基座式阶地，两岸呈不对称敞开的“U”型宽谷，地势平缓。

### 1. 左岸段工程地质条件分析

左岸自然坡度 19°，表部覆盖坡积碎石土层和泽曲河 II-III 级阶地产物，覆盖层厚度 17m，其中坡积碎石土层厚 4-5m，碎石以板岩为主，含量 25%-30%，棱角状，结构松散，潮湿，下部冲洪积砂卵石层，厚 9-10m，灰白色，为泽曲河阶地产物，卵砾岩性以石英岩，变质砂岩，砂岩，板岩为主，磨圆差，呈次棱角状，结构松散，强透水。基岩岩性为三迭系泥质板岩夹钙质板岩，呈极薄层一薄层，夹石英脉，脉宽 3-8mm，强风化垂直厚度 3-5m，呈层状-碎块状结构。

### 2. 河床段工程地质条件分析

河谷两岸坡基岩基本裸露，表部强风化，层间裂隙发育，局部倾倒。河床河水深约 1m 左右，覆盖层为冲积砂砾卵石层，推测其厚度 1-2m，结构松散-稍密，颗分试验表明，卵石（>60）mm 含量均值 24.7%，砾石（60-2mm）含量均值 54.5%，砂 18.3%，含泥 2.8%，不均匀系数 97.1。其天然密度  $2.25 g/cm^3$ ，渗透系数  $3 \times 10^{-2} cm/s$ ，为强透水层。基岩岩性为三迭系泥质板岩夹钙质板岩，基岩面高程 3378-3380m。

### 3. 右岸段工程地质条件分析

右岸为泽曲河基座式阶地，自然坡度 13°，坡高 26m，中高坡，坝顶处地形变缓，根据钻孔及探坑揭露，覆盖层厚 11m，其中表层腐质土厚约 1m，下部为冲洪积粉质壤土和砂砾石层，具水平层理，粉质壤土厚 4-5m，潮湿，结构松散、砂砾石层为粉砂层与砾石层互

层体，粉砂层厚 5-10cm，砂砾石层厚 1m，架空、天然密度  $2.06-2.11 \text{ g/cm}^3$ ，基岩为三迭系泥质板岩夹钙质板岩，强风化厚 5-6m，在钻孔 ZK3 处由于受层间挤压带影响达 11m 深。

### (三) 坝址岩（土）体的物理力学性质及参数分析

#### 1. 土体物理力学性质

坝址区松散土体主要有左岸坡积碎石土层、河床冲积砂砾卵石层及右岸宽缓的Ⅲ级侵蚀堆积阶地上冲洪积粉质粘土层和砂砾石层。

##### (1) 冲洪积粉质粘土层物理力学性质：

根据可研阶段试验（表 4-2），冲洪积粉质粘土天然含水量 10.4~13.7%，平均值 12.0%，为稍湿，天然密度  $1.58-1.62 \text{ g/cm}^3$ ，均值为  $1.60 \text{ g/cm}^3$ ，干密度  $1.39-1.47 \text{ g/cm}^3$ ，平均值为  $1.37 \text{ g/cm}^3$ ，孔隙比 0.860~0.965，平均值为 0.913，为稍密，饱和度 33.0~38.8%，平均 35.7%，液限均值 27.8%，塑限平均为 15.8%，塑性指数 10.6~12.8 之间，平均为 12.0，处于塑性状态~半固体状态，按塑性土定名为粉质粘土和高塑性粘土；不均匀系数和曲率系数显示土体的颗粒含量不均匀，以粉粒和粘粒为主，胶粒含量次之，颗粒级配基本适中；土的压缩系数为  $0.072-0.169 \text{ MPa}^{-1}$ ，平均为  $0.101 \text{ MPa}^{-1}$ ，为中等压缩性土；土的抗剪强度为：凝聚力 17KPa，摩擦角  $33^\circ 17'$ ，渗透系数平均为  $1.7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ，根据《水利水电工程地质勘察规范（GB50287—1999）》附录 J，属于微透水路，允许承载力取 0.15-0.2MPa。附录 J 岩土渗透性分级

渗透性等级	标准		岩体特征	土类
	渗透系数 $K$ ( $\text{cm/s}$ )	透水率 (Lu)		
极微透水	$K < 10^{-6}$	$q < 0.1$	完整岩石，含等价开度 $< 0.025\text{mm}$ 裂隙的岩体	粘土
微透水	$10^{-6} \leq K < 10^{-5}$	$0.1 \leq q < 1$	含等价开度 $0.025-0.05\text{mm}$ 裂隙的岩体	粘土-粉土
弱透水	$10^{-5} \leq K < 10^{-4}$	$1 \leq q < 10$	含等价开度 $0.05-0.1\text{mm}$ 裂隙的岩体	粉土-细粒土质砂
中等透水	$10^{-4} \leq K < 10^{-2}$	$10 \leq q < 100$	含等价开度 $0.1-0.5\text{mm}$ 裂隙的岩体	砂-砂砾
强透水	$10^{-2} \leq K < 10^0$	$q \geq 100$	含等价开度 $0.5-2.5$ 裂隙的岩体	砂砾-砾石、卵石
极强透水	$K \geq 10^0$		含连通孔洞或等价开度 $> 25\text{mm}$ 裂隙的岩体	粒径均匀巨砾

注：Lu——吕荣单位，是 1MPa 压力下，每米试段的平均压入流量，以 L/min 计。

##### (2) 砂砾石层物理力学性质

该层分布在坝址左岸坡积层和右岸冲洪积粉质粘土层的底部，为粉砂层与砾石层互层，粉砂层单层厚 5-10cm，砂砾石单层厚 1m，架空、具水平层理，该层整体厚 5-6 m，在坝线下游一带厚度增大，结构松散。取样进行室内颗分试验，卵石 ( $> 60\text{mm}$ ) 含量平均 2.6%、

砾石(60-2mm)含量平均 68.9%、粉粒(2-0.075mm)含量 23.8%、含泥 4.8%,不均匀系数 28.83、曲率系数 1.91,室内定名为含细粒土砾。

现场密度试验显示,该层由于为粉细砂与砾石层互层,其天然密度在  $1.88-2.34\text{ g/cm}^3$  之间,均值  $2.18\text{ g/cm}^3$ ;天然含水量 3.55%,天然干密度  $2.10\text{ g/cm}^3$ ;渗透系数在  $n \times (10^{-2} - 10^{-3})\text{ cm/s}$ ,属于中等透水层。允许承载力 0.28-0.3MPa。

### (3) 河床冲积砂砾石层物理力学性质

河床冲积砂砾石层分布在现代河床及漫滩部位,宽约 35m,推测厚度 3-5m,青灰色,结构松散-稍密,砾石砾径一般 50~120mm,磨圆度较差,多呈浑圆状或次棱角状,粉细砂及泥质充填。颗分试验表明,卵石(>60mm)卵石含量均值 24.7%,砾石(60-2mm)含量均值 54.5%,砂(2-0.075mm) 18.3%,含泥 2.8%,不均匀系数 97.1,坝址上游有大孤石零星分布。室内定名为卵石混合土。该层天然密度为  $2.25\text{ g/cm}^3$ ,天然含水量 5.2%,天然干密度为 2.14,渗透系数为  $3 \times 10^{-2}\text{ cm/s}$ ,为强透水层,允许承载力 0.32--0.4MPa。

表 4-2 土体物理力学性质试验成果汇总表

土样编号	天然状态					比重	液限	塑限	塑限指数	不均匀系数	曲率系数	土的压缩性		土的抗剪强度		渗透系数	膨胀量	收缩量	土样定名
	含水量	密度	干密度	孔隙比	饱和度							压缩系数	压缩模量	凝聚力	摩擦角	$K_{20}$			
	%	$\text{g/cm}^3$			%		%	%				$\text{MPa}^{-1}$	MPa	kPa	° /	cm/s	%	%	
SJ1	13.7	1.58	1.39	0.965	38.8	2.73	27	16.4	10.6	15.3	3.833	0.091	17.694	10	31 41	$2.47 \times 10^{-6}$	9.2	24.3	低液限粘土
SJ4	11.7	1.61	1.44	0.894	35.7	2.73	27.5	15.5	12	14.3	3.419	0.087	18.074	4	36 07	$2.31 \times 10^{-6}$	10.3	23.1	
SJ6	12.8	1.59	1.41	0.937	37.3	2.73	28.2	16.2	12	19.0	4.75	0.169	9.146	31	33 07	$5.31 \times 10^{-7}$	10.2	24.1	
SJ7	12.2	1.59	1.42	0.926	36	2.73	28	15.2	12.8	21.5	7.267	0.092	17.09	18	32 49	$1.66 \times 10^{-6}$	7.4	24.1	
SJ8	10.4	1.62	1.47	0.86	33	2.73	29	16.2	12.8	14.0	4.198	0.096	16.805	20	34 12	$2.23 \times 10^{-6}$	10.2	23.9	
SJ10	11	1.6	1.44	0.894	33.6	2.73	27	15.3	11.7	20.0	5	0.072	21.755	20	31 47	$9.70 \times 10^{-7}$	7.8	23.3	
最大值	13.7	1.62	1.47	0.965	38.8	2.73	29	16.4	12.8	21.5	7.267	0.169	21.755	31	36 07	$2.47 \times 10^{-6}$	10.3	24.3	
最小值	10.4	1.58	1.39	0.86	33	2.73	27	15.2	10.6	14.0	3.419	0.072	9.146	4	31 41	$5.31 \times 10^{-7}$	7.4	23.1	
平均值	12	1.6	1.43	0.913	35.7	2.73	27.8	15.8	12	17.4	4.745	0.101	16.761	17	33 17	$1.70 \times 10^{-6}$	9.2	23.8	

注:资料来源《泽曲河尕孔水电站可行性研究报告》国电西北勘测设计研究院工程勘察研究

#### (4) 坡积碎石土层物理力学性质

主要分布在河床左岸高程约 3385m 以上，坝址宽缓地带和基岩坡脚处，范围较广，厚度 5-17m，厚度较大。碎石以板岩为主，粒径一般 5~20 mm，含量 25%-30%，棱角状，粉土充填，呈松散状堆积。根据工程经验及参考其他工程实例，该层天然密度  $1.85-2.0 \text{ g/cm}^3$ ，天然含水量 7%，天然干密度  $1.72-1.87 \text{ g/cm}^3$ ，渗透系数  $n \times (10^{-3}-10^{-4}) \text{ cm/s}$ ，为中等透水层，允许承载力 0.28-0.35MPa。

## 2. 岩石物理力学性质

坝址区基岩主要为泥质板岩夹少量砂质板岩，岩体风化以干燥环境及温差变化引起的物理风化为主。根据钻孔揭露，左岸岩体强风化带厚度一般 4-8m，弱风化下限垂直深度 5-10m；推测河床强风化带厚度 2-4m，弱风化下限垂直深度 6-10m；右岸强风化带厚度 5-7m，弱风化下限水平深度 10-15m，钻孔 ZK<sub>3</sub> 处由于受层间挤压带影响，强风化层达 11m。

坝址区出露岩体受裂隙切割、风化及卸荷作用影响，其透水性在岸坡有一定差异。根据坝址区不同部位钻孔的 11 段压水试验成果统计结果表明，坝址区上部岩体的透水率相对较大，吕荣值介于 10~100 之间，为中等透水岩体；其中小于 3Lu 仅有 3 段，占 27%，曲线类型为 E(填充)型，分别位于 ZK1 孔深 17.9~39.7m、ZK2 孔深 12.1-17.5m、22.6-27.80m 段和 ZK3 的弱风化岩体中，为中等透水岩体；其余曲线类型为 B(紊流)型，处在强风化及弱风化岩体中，为中等透水体，少量 D(层流)型，处在微新岩体中，为弱透水下带。坝址左岸岩体相对不透水层（以弱透水体控制）顶板埋深 30~40m，右岸岩体相对不透水层（以弱透水体控制）顶板埋深 35~45m，推测河床为 20~30m。

坝址区第四系冲积砂砾石层及崩坡积碎石土层，密实度较差，呈散体结构，地下水赋存和运移条件良好，为强透水体。

参考可研阶段岩石物理力学性质试验（表 4-3），岩石的比重、密度值较高，孔隙率、吸水率及饱和吸水率值均较小；弱风化~微新上部岩体岩石单轴干抗压强度均值 32.1MPa，饱和抗压强度均值 12.8MPa，微新岩石单轴干抗压强度均值 39.5MPa，饱和抗压强度均值 18.9MPa，岩石按《工程岩体分级标准》（表 4-4）的单轴饱和抗压强度分类属软弱岩类。岩石强度较低，主要受裂隙和加压方向的影响，岩样隐伏裂隙较为发育，坡坏后基本呈碎片状。

表 4-3 岩石室内试验成果汇总表

试样 编号	岩样风 化程度	比重	干密度	饱和密 度	孔隙率	吸水率	饱和和 水率	单轴抗压强度		软化系数	抗剪断强度		弹性模量	泊松比	
									干		饱和	C			Φ
			g/cm <sup>3</sup>		%	%	%	MPa			MPa	° /			10 <sup>4</sup> MPa
ZK <sub>2-1</sub>	弱~微 新	2.8	2.76	2.8	1.43	1.14	1.19	10	4.51	0.45	1.35	51 01	0.17	0.33	
ZK <sub>4-1</sub>		2.75	2.7	2.72	1.82	0.73	0.74	59.3	14.3	0.24	2.85	55 48	0.61	0.14	
ZK <sub>5-1</sub>		2.8	2.7	2.71	3.57	0.56	0.57	28.1	18.4	0.65	3.9	50 19	0.39	0.19	
ZK <sub>7-1</sub>		2.75	2.71	2.73	1.45	1.13	1.16	30.8	14.2	0.46	1.5	49 23	0.35	0.22	
最小值		2.75	2.7	2.71	1.43	0.56	0.57	10	4.51	0.65	1.17	55 48	0.17	0.14	
最大值		2.8	2.76	2.8	3.57	1.14	1.19	59.3	18.4	0.24	1.47	49 23	0.61	0.33	
均 值		2.77	2.73	2.74	2.07	0.89	0.92	32.05	12.85	0.45	1.27	51.25	0.38	0.22	
ZK <sub>3-1</sub>	微新	2.8	2.74	2.79	2.14	0.7	0.71	35	12.6	0.36	2	49 27	0.31	0.26	
ZK <sub>4-2</sub>		2.74	2.7	2.73	1.46	0.44	0.44	40.6	25.1	0.62	3.4	53 07	0.47	0.3	
ZK <sub>4-3</sub>		2.8	2.7	2.71	3.57	0.46	0.47	51	40.4	0.79	2.62	63 48	0.5	0.28	
ZK <sub>5-2</sub>		2.79	2.76	2.78	1.08	0.95	0.98	19.2	15.3	0.8	1.45	42 30	0.2	0.27	
ZK <sub>5-3</sub>		2.77	2.71	2.73	2.17	0.86	0.87	44.8	8.46	0.19	2	51 52	0.64	0.2	
ZK <sub>5-4</sub>		2.8	2.73	2.77	2.5	1.36	1.45	13.3	6.52	0.49	2.3	36 29	0.17	0.32	
ZK <sub>8-1</sub>		2.78	2.73	2.76	1.8	0.51	0.52	72.9	24.1	0.33	3.5	60 38	0.66	0.21	
最小值		2.74	2.7	2.71	1.08	0.44	0.44	13.3	6.52	0.19	1.45	42 30	0.17	0.2	
最大值		2.8	2.76	2.79	3.57	1.36	1.45	72.9	40.4	0.8	3.5	63 48	0.66	0.32	
均 值		2.78	2.72	2.75	2.10	0.75	0.78	39.5	18.9	0.51	2.46	50 42	0.42	0.26	

注:资料来源《泽曲河尕孔水电站可行性研究报告》国电西北勘测设计研究院工程勘察研究



表 4-4 岩石坚硬程度划分表

岩石饱和单轴抗压强度 $R_c / MPa$	>60	60~30	30~15	15~5	<5
坚硬程度	坚硬的	较坚硬的	较软岩	软岩	极软岩

### 3. 岩（土）体物理力学参数建议取值

根据本次试验成果, 结合可研阶段西北院岩土试验成果, 并参考其它工程资料, 本工程岩土体的物理力学指标建议值（见表 4-5-表 4-7）。

表 4-5 土体物理力学参数建议值

土体名称	天 然 含水量%	密度 (g/cm <sup>3</sup> )		孔 隙 比	液 限 (%)	塑 限 (%)	渗透 系数 (cm/s)	抗剪强度		压缩指标 (MPa )	
		干	湿					f	C (MPa)	压缩 模量	允许 承载力
粉质粘土	15	1.45	1.7	0.85	30.0	19.5	$5.5 \times 10^{-5}$	0.35-0.45	0.01	8-10	0.15-0.20
碎石土	2.6	\	\	\	\	\	\	0.4- 0.5	0	30	0.20-0.30

表 4-6 坝址区岩土体开挖边坡建议值

岩性及风化程度	泥质板岩		松散堆积物	
	强风化	弱风化	水 上	水 下
开挖坡比	1:0.5	1:0.3	1:1	1:1-1:2.5

表（4-7）坝址区岩体物理力学参数综合建议值

指 标  风 化 程 度	抗压强 度(MPa)		允 许承载 力(MPa)	软 化系数	（砼/岩体）抗剪强度			模 量(Gpa)	
	单 轴	三 轴			抗剪断		抗剪	弹 模	变 模
					$f'$	$c$ 'MPa	$f$	$E_s$	$E_o$
强 风化	5-10	10-15	5-10	<0.3 -0.4					
弱 风化	10-20	15-25	10-15	0.4 5-0.5	0.7 -0.8	0 .8-1.0	0.65 -0.7	2.5 -3.5	1.5 -2.5
微 新岩体	20-35	25-40	15-20	0.5 -0.6	0.8 -1.0	1 .0-1.5	0.7- 0.8	3.5 -5.0	2.5 -4.0

## （四）坝址主要工程地质问题及处理建议

其主要的工程地质问题有： 坝址两岸第四系坡积、冲洪积松散层，结构松散，深 5-17m，存在开挖边坡稳定问题； 河床砂砾石层为强透水层，存在坝基渗漏问题；强风层岩体呈碎块状，完整性差，不宜做坝基。右岸基岩面平缓，存在绕坝渗漏问题；开挖基坑涌水等。

### 1. 坝基覆盖层处理

坝基左、右岸第四系全新统坡积、冲洪积松散层，结构松散，深 5-17m，且沉积不均一，结构松散、具有低压缩性、强透水、承载能力不强、低强度的特性，属不良坝基土，建议全部清除。

河谷中第四系全新统冲积砾卵石层颗粒级配一般，密实度较差，属强透水层，不宜作为坝基土，建议全部清除。

### 2. 岩体强风化特性及处理

坝基地层岩性主要为泥质板岩夹钙质板岩，岩石属于软岩-中等坚硬岩石，岩层以薄层为主，强风化厚度 3-5m，最大厚度 7m，强风化岩体呈碎块-碎裂状结构，裂隙发育张开，局部夹泥，总体完整性差，允许承载力  $[R] < 1\text{MPa}$ ，强度低，透水性强，不宜作为坝基土，建议：清除坝基范围内的强风化岩体，将坝基基础置于弱风化岩体之上，为了加强坝基岩体的整体稳定性，提高岩体的强度，对上部岩体进行固结灌浆处理，处理深度 5-10m。

### 3. 软弱夹层特性及处理

坝址区基岩岩性为三迭系泥质板岩夹钙质板岩，呈极薄层-薄层，岩体呈互层状碎裂结构，结构面中等发育，岩体完整性较差。其层间夹有不同程度的软弱夹层，主要为薄层软弱岩层因构造挤压、错动而形成，影响带宽 1-2m，软弱夹层引起岩体的深层风化（如钻孔 ZK3 处），破坏了岩体的完整性，岩体的力学强度降低，建议对软弱夹层进行混凝土塞处理，处理深度 1-1.5 倍的宽度，开挖边坡取 1:0.5。

一般的对于坝基存在软弱夹层的重力坝，其处理方法主要有：挖、截、锚和防渗。

### 4. 基坑涌水量

坝址河床地下水埋深 0.3-1.5m，表层全新统冲积砂卵砾石层，厚 3-5m，结构松散，渗透系数  $3 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  (25.9m/d)，属强透水层；基岩强风化层厚 3-5m，透水率  $> 100 \text{ Lu}$ ，受河水补给，基坑开挖受地下水影响大，坝基开挖存在基坑涌水问题。

式中渗透系数平均  $K=27\text{m/d}$ ，含水层平均厚度取  $H=5\text{m}$ ，降水深度取  $S=4\text{m}$ ，降水影响半径取  $R=50\text{m}$ ，基坑按长  $a=40\text{m}$ ，宽  $b=25\text{m}$  考虑， $r_0=0.29(a+b)=18.8\text{m}$ ；

基坑涌水量按下式粗略计算覆盖层和基岩涌水量：

$$Q = 1.366k \frac{(2H-S)S}{Lg\left(1+\frac{R}{r_0}\right)} = 1.366 \times 27 \times \frac{(2 \times 5 - 4) \times 4}{Lg\left(1+\frac{50}{18.8}\right)} = 1571 \text{ m}^3/\text{d} \quad (4-1)$$

式中： $K$ —含水层渗透系数（m/d）；

$H$ —含水层平均厚度 (m) ;

$S$ —降水深度 (m) ;

$R$ —降水影响半径 (m) ;

$r_0$ ——基坑等效半径 $=0.29(a+b)$  (m) ;

计算基坑涌水量由式 (4-1) 计算得  $Q=0.16 \times 10^4 m^3/d$ , 建议坝基开挖时采取排水措施。

## 5. 坝基抗滑稳定性

河谷中第四系全新统冲积砾卵石层颗粒级配一般, 密实度较差, 属强透水层, 不宜作为坝基土, 建议全部清除, 坝基础置于弱风化泥质板岩夹钙质板岩上。

重力坝的作用荷载有: 自重、水压力、扬压力、淤沙压力、浪压力、冰压力及地震荷载等。非溢流坝常取单宽计算, 一般情况下浆砌石  $\gamma_w$  为  $21 \sim 23 KN/m^3$ , 取均值  $22 KN/m^3$ , 坝体断面上游 1: 0, 下游 1:1, 坝顶宽按交通要求取 5m, 计算洪水位情况。

(1) 坝体自重: 
$$G = V\gamma_m = \left(21 \times 5 + \frac{17 \times 17}{2}\right) \times 22 = 5489 KN ; \quad (4-2)$$

(2) 水平水压力: 上游 
$$P_{w1} = \frac{1}{2} \gamma_w H^2 = \frac{1}{2} \times 10 \times 17^2 = 1445 KN ; \quad (4-3)$$

下游 
$$P_{w2} = \frac{1}{2} \gamma_w H^2 = \frac{1}{2} \times 10 \times 1^2 = 5 KN \quad (4-4)$$

(3) 垂直水压力: 下游 
$$W = \frac{1}{2} \times 10 \times 1 \times 1 = 5 KN \quad (4-5)$$

(4) 扬压力: 当坝基内设有防渗帷幕、无排水孔时, 实体重力坝计算式为:

$$U = \gamma_w L H_2 + \frac{1}{2} \gamma_w H (d + \alpha L) = 10 \times 22 \times 1 + \frac{1}{2} \times 10 \times 16 \times (5 + 0.6 \times 22) = 1676 KN \quad (4-6)$$

(5) 淤沙压力: 在多淤沙的河流上筑坝时需计算淤沙压力, 朶孔水库库区淤积物较少, 考虑坝基开挖后回填土的土压力, 开挖 8m, 重度为  $8 \sim 12 KN/m^3$ , 摩擦角  $18^\circ \sim 20^\circ$ 。

上游水平土压力 
$$P_s = \frac{1}{2} \gamma_s h_s^2 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_s}{2}\right) = \frac{1}{2} \times 10 \times 8^2 \times \tan^2 36^\circ = 169 KN \quad (4-7)$$

下游垂直土压力 
$$P_{sv} = \frac{1}{2} \times 10 \times 8^2 \times \tan 45^\circ \times 1 = 320 KN \quad (4-8)$$

(6) 浪压力：我国《混凝土重力坝设计规范》中推荐使用公式为：多年最大风速  $v$  为 31m/s, 吹程  $D$  取 3km,  $v$  值取最大风速的 1.5 倍。

$$2h_1 = 0.0166v^{\frac{5}{4}}D^{\frac{1}{3}} = 0.0166 \times (1.5 \times 31)^{\frac{5}{4}} \times 3^{\frac{1}{3}} = 3m \quad (4-9)$$

$$2l_1 = 10.4(2h_1)^{0.8} = 10.4 \times 2.408 = 25m \quad (4-10)$$

波浪中心线在静水位以上的超高：将式 (4-9) 计算结果代入下式

$$h_0 = 0.6h_1 = 0.6 \times 1.5 = 0.9m \quad (4-11)$$

则水深  $H_1 > l_1$ , 其一米长坝段的浪压力为：将式 (4-9)、(4-10)、(4-11) 结果代入下式 (4-12)

$$P_l = \frac{\gamma_0(2h_1 + h_0)l_1}{2} = \frac{10 \times (3 + 0.9) \times 12.5}{2} = 244KN \quad (4-12)$$

(7) 地震力：在设计烈度为Ⅶ度以上的地区计算水平地震惯性力( $Q_0$ )、地震动水压力( $P$ )。

$$Q_0 = K_H C_Z F W = 0.1 \times 0.25 \times 5489 \times 1.3 = 178.4KN ; \quad (4-13)$$

上游坝面的地震动水压力：上游坝面铅直  $\alpha'$  为 1,  $C$  为 0.82

地震动水压力强度：

$$p_1 = \alpha' K_H C_Z C \gamma_w H_1 = 1.0 \times 0.1 \times 0.25 \times 0.82 \times 10 \times 17 = 3.49KN/m^2 \quad (4-14)$$

总地震动水压力：将上式 (4-14) 计算结果代入下式 (4-15)

$$P_1 = \frac{2}{3} \times p_1 H_1 = \frac{2}{3} \times 3.49 \times 17 = 40KN \quad (4-15)$$

下游坝面的地震动水压力：下游坝面为 1:1,  $\alpha'$  查表得 0.22

地震动水压力强度：

$$p_2 = \alpha' K_H C_Z C \gamma_w H_2 = 0.22 \times 0.1 \times 0.25 \times 0.82 \times 10 \times 1 = 0.045KN/m^2 \quad (4-16)$$

总地震动水压力：将式 (4-16) 结果代入式 (4-17)

$$P_2 = \frac{2}{3} \times p_2 H_2 = \frac{2}{3} \times 0.045 \times 1 = 0.03KN \quad (4-17)$$

抗滑稳定一般计算分为表层滑动和深层滑动；

表层滑动按抗剪断公式：

$$K'_c = \frac{f'(\sum W - u) + C'A}{\sum P} \quad (4-18)$$

深层滑动抗滑稳定计算：

当单滑动面倾向下游，下游有陡立临空面时：

$$K_c = \frac{f[(\sum W + G)\cos\alpha - u - \sum P\sin\alpha]}{\sum P\cos\alpha + (\sum W + G)\sin\alpha} \quad (4-19)$$

单滑动面倾向上游时：

$$K_c = \frac{f[(\sum W + G)\cos\alpha - u + \sum P\sin\alpha]}{\sum P\cos\alpha - (\sum W + G)\sin\alpha} \quad (4-20)$$

由于朶孔水电站坝址覆盖层为冲积砂砾石层，强透水层，承载能力低等，因此清除之后坝基置于弱风化泥质板岩上，基岩裂隙发育，无断层挤压破碎带，坝下游也无陡立临空面，坝基与混凝土接触良好，坝基内不存在可能导致深层滑动的软弱面。按单位宽度计算，微风化泥质板岩抗剪断强度  $f'$  为 0.7~0.8， $c'$  为 0.8~1.0MPa；抗剪强度  $f$  为 0.65~0.7；

基本组合，坝体垂直力：

$$\sum W = G + W + P_{sv} - U = 5489 + 5 + 320 - 1676 = 4183KN$$

总水平力

$$\sum P = P_{w1} + P_s + P_l - P_{w2} = 1445 + 169 + 244 - 5 = 1853KN$$

抗滑稳定计算：

$$K_s = \frac{f\sum W}{\sum P} = \frac{0.65 \times 4183}{1853} = 1.5 > 1.05 \quad (\text{满足要求}) \quad (4-21)$$

特殊组合，坝体垂直力：

$$\sum W = G + W + P_{sv} - U = 5489 + 5 + 320 - 1676 = 4183KN$$

总水平力

$$\begin{aligned} \sum P &= P_{w1} + P_s + P_l + Q_0 + P_1 + P_2 - P_{w2} \\ &= 1445 + 169 + 244 + 178.4 + 40 + 0.03 - 5 = 2071.4KN \end{aligned}$$

抗滑稳定计算：

$$K_s = \frac{f\sum W}{\sum P} = \frac{0.65 \times 4183}{2071.4} = 1.3 > 1.00 \quad (\text{满足要求}) \quad (4-22)$$

由式（4-21）、（4-22）计算结果可知，坝基抗滑稳定处于安全状态，但是坝基抗滑稳定安全系数在基本组合和特殊组合情况下必须满足大于下表（4-8）安全系数的，否则坝基将会发生滑动破坏，要有必要的工程措施处理，使坝体处于稳定状态。

表 4-8 抗滑稳定安全系数

荷载组合		坝的级别			
		1	2	3	4
基本组合		1.10	1.05	1.05	1.05
特殊组合	(1)	1.05	1.00	1.00	1.00
	(2)	1.00	1.00	1.00	1.00

坝基处理：一般工程处理采用清基、岩体加固、防渗和排水和改变建筑物的结构类型，以适应坝基的地质条件。

（1）清基：将坝基表层的松软土层、风化破碎岩体或浅部的软弱夹层等开挖清除掉，使坝体位于比较坚硬的土层或坚硬完整的岩体上。对于不同坝型和不同等级的大坝，需要的清基范围和清基深度都是不同的，需具体工程具体考虑处理。建基面开挖形状以略向上游倾斜或向下游抬高的倒坡有利于抗滑稳定。

（2）岩体加固：有固结灌浆，使水泥浆或其它胶结材料填充岩体裂隙，连成整体，增强岩体的承载能力，也可减少坝基渗漏。锚固是通过钻孔灌浆将存在软弱结构面的岩体连接成整体，增强稳定性。

（3）防渗透排水：在大坝靠上游面的地基中，平行于坝轴线打一排或几排钻孔，在高压下将水泥浆压入基岩中的裂隙或断层破碎带，待凝固后形成一道连续的隔水屏幕。对于不同的坝型，防渗帷幕的透水性控制是不一样的。对于土石坝宜采用防渗墙和粘土层铺盖控制渗流量。坝基排水是为了阻截透过防渗帷幕的渗水，减少坝基扬压力，一般在防渗帷幕下游设置排水孔组成主排水幕。

（4）改变建筑物的结构形式，以适应坝基的地质条件：如果采用以上措施还不能满足要求时，就要适当改变建筑的结构形式。广义的说，这类措施包括有改变坝型、加大坝体断面、扩大基础、设立支撑墙、增加压重、坝肩加设重力墩、加深齿墙、横缝设键槽和灌浆把几个稳定差的坝段连成整体、预留沉陷缝、降低坝高、移动坝轴线、坝轴线拐弯等等。总之，要采取各种切实可行的和有效措施，来提高坝的稳定性。

## 6. 坝基承载力

在水工建筑物设计中，对于裂隙较少的坚硬基岩，一般认为岩基的承载力是不成问题的，不是水工建筑物设计的重点。而对于整体性较差，不够坚硬的基岩特别是坝底宽

度较窄的情况，则需进行承载力的验算。一般确定方法有：现场荷载试验、经验类比和根据岩石单轴饱和抗压强度进行折减三种。

(1) 现场荷载试验：是按岩体实际承受工程作用力的大小和方向进行的原位测试，较符合实际，但试验复杂，费用较高，一般用于较大的工程当中。

(2) 经验类比法：是利用已经建成的工程经验数据、工程特征和地质条件进行比较选取。

(3) 根据规范或经验确定岩基的承载力

《岩石坝基工程地质》介绍了在水利水电工程中常用的、较详细具体的折减系数取值方法，如表

(4-9) 表 4-9 确定坝基容许承载力的经验方法

岩石名称	容许承载力			
	节理不发育 (间距大于 1.0m)	节理较发育 (间距 1.0-0.3m)	节理发育 (间距 0.3-0.1m)	节理极发育 (间距小于 0.1m)
坚硬和半坚硬岩石 ( $R_c > 30MPa$ )	$1/7 R_w$	$(1/7 \sim 1/10) R_w$	$(1/10 \sim 1/16) R_w$	$(1/16 \sim 1/20) R_w$
软弱岩石 ( $R_c < 30MPa$ )	$(1/5) R_w$	$(1/5 \sim 1/7) R_w$	$(1/7 \sim 1/10) R_w$	$(1/10 \sim 1/15) R_w$

根据孔水电站坝址岩体强风化泥质板岩的节理、裂隙发育情况，以及岩石单轴饱和抗压强度等，容许承载力应在  $(1/10 \sim 1/15) R_w$  之间，根据坝址区岩体物理力学参数综合建议值，岩石单轴饱和抗压强度  $10 \sim 15MPa$ ，均值  $12.5MPa$  则坝基容许承载力为  $1.0 \sim 1.5$ ，均值  $1.25MPa$ ，与建议值相符。

(4) 根据岩石单轴饱和抗压强度进行折减，求取承载力，其计算式为：

$$f = \phi R_w \quad (4-23)$$

式中  $\phi$  的取值要根据岩石的坚硬程度、完整程度、风化程度以及基岩形态、产状等因素确定。《建筑地基基础设计规范》规定：

微风化岩石为：0.2~0.33；中等风化岩石为：0.17~0.25；

微风化泥质板岩单轴饱和抗压强度为  $10 \sim 15MPa$ ，均值  $12.5MPa$ ，则代入式 (4-23) 得承载力  $2.5 \sim 4.1MPa$ ，计算值较《岩石坝基工程地质》介绍的折减系数取值方法大。

对于风化的基岩的许可承载力，可按风化程度将上列数值降低 25%~50%。对于不同的方法计算出的承载力变化是比较大的，因此要根据地质资料选择合适的计算方法，必要时进行现场试验，取得承载力。

## 7. 边坡稳定性分析

边坡一般分为土质边坡、岩质边坡和岩土混合边坡，对于不同的边坡其破坏类型也是不一样的。

### (1) 土质边坡分析方法

土质边坡：由砂、卵石、风化砾岩等粗粒料筑成的均质无粘性土土坡，其滑动面常近似为一平面。而对均质粘性土土坡来说，滑动面通常是一光滑的曲面，顶部曲率半径较小，常垂直于坡顶，底部则比较平缓。

无粘性土的均质土坡一般只要位于坡面上的土体单元能够保持稳定，则整个土坡就是稳定的，即：

$$\text{无渗流作用时：} \quad F_s = \frac{T_f}{T} = \frac{W \cos \alpha \tan \varphi}{W \sin \alpha} = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} \quad (4-24)$$

$$\text{有渗流作用时：} \quad F_s = \frac{\gamma' \cos \alpha \tan \varphi}{(\gamma' + \gamma_w) \sin \alpha} = \frac{\gamma' \tan \varphi}{\gamma_{sat} \tan \alpha} \quad (4-25)$$

粘性土土坡破坏机制较复杂一些，一般的计算方法有：瑞典条分法、毕肖普条分法、杨布条分法、其他条分法。

各自的基本假设和计算方法为：

瑞典条分法：假定滑动面为圆弧面，不考虑条间力作用。

$$\text{计算式为：} \quad F_s = \frac{\sum (c_i l_i + W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i)}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (4-26)$$

当存在孔隙水应力  $u_i$  时，有效应力分析：

$$F_s = \frac{\sum [c'_i l_i + (W_i - u_i l_i) \cos \alpha_i \tan \varphi'_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (4-27)$$

毕肖普条分法：假定滑动面为圆弧面，考虑了土条侧面的作用力，并假定土条底部滑动面上的抗滑安全系数均相同。

$$\text{计算式为：} \quad F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_i} [c'_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \varphi'_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (4-28)$$

杨布条分法：滑动面为非圆弧滑动面，为任意已知滑动面。



计算式为：

$$F_s = \frac{\sum [c_i b_i + (W_i + \Delta X_i) \tan \varphi_i] \frac{1}{\cos \alpha_i m_i}}{\sum (W_i + \Delta X_i) \tan \alpha_i} \quad (4-29)$$

当滑动面为折线形时，滑坡稳定性分析，可采用如下方法计算稳定安全系数：

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left( R_i \prod_{j=i}^{n-1} \phi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left( T_i \prod_{j=1}^{n-1} \phi_j \right) + T_n}$$

$$\phi_j = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \varphi_{i+1}$$

$$R_i = N_i \tan \varphi_i + c_i L_i \quad (4-30)$$

式中  $F_s$  —— 稳定系数；

$\theta_i$  —— 第  $i$  块段滑动面与水平面的夹角， $^\circ$ ；

$R_i$  —— 作用于第  $i$  块段的抗滑力， $kN/m$ ；

$N_i$  —— 第  $i$  块段滑动面的法向分力， $kN/m$ ；

$\varphi_i$  —— 第  $i$  块段上的内摩擦角， $^\circ$ ；

$c_i$  —— 第  $i$  块段上的粘聚力， $kPa$ ；

$L_i$  —— 第  $i$  块段滑动面长度， $m$ ；

$T_i$  —— 作用于第  $i$  块段滑动面上的滑动分力， $kN/m$ ；

出现与滑动方向相反的滑动分力时， $T_i$  应取负值；

$\phi_i$  —— 第  $i$  块段的剩余下滑动力传递至  $i+1$  块段的传递系数（ $j=i$ ）

稳定系数  $F_s$  应符合要求： $F_s \geq F_{st}$  式中  $F_{st}$  滑坡稳定安全系数，根据研究程度及其对工程的影响确定。

当滑坡体内地下水已形成统一水面时，应计入浮托力和动水压力。

## （2）岩质边坡分析方法

岩质边坡：破坏类型一般有崩塌、倾倒、蠕动、溃屈、滑坡、松弛张裂。其计算方法有：圆弧法岩坡稳定分析、平面滑动岩坡稳定分析、双平面滑动岩坡稳定分析、力多边形法岩坡稳定分析、力的代数叠加法岩坡稳定分析、楔形滑坡岩坡稳定分析。

圆弧法岩坡稳定分析：假定滑动面为一圆弧，滑动岩体看作刚体，求滑动面上的滑动力及抗滑力。

计算式为：

$$F_s = \frac{M_R}{M_S} = \frac{\sum_1^n c_i l_i + \sum_1^n N_i \operatorname{tg} \varphi_i}{\sum_1^n T_i} \quad (4-31)$$

岩质边坡坡顶张裂缝的最大深度：用下式计算：

$$H_{90} = \frac{2c}{\gamma} \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (4-32)$$

若已知坡角或坡高则按下式可以相互确定：

$$H = H' H_{90} \quad (4-33)$$

式中  $H'$  可由均质岩坡高度与坡角的关系曲线图查得。

平面滑动岩坡稳定分析：岩坡沿着单一的平面发生滑动，一般必须满足下列几何条件：滑动面的走向必须与坡面平行或接近平行；滑动面必须在坡边面露出，即滑动面的倾角  $\beta$  必小于坡面的倾角  $\alpha$ ， $\beta < \alpha$ ；滑动面的倾角  $\beta$  必须大于该平面的摩擦角  $\varphi_j$ ，即  $\beta > \varphi_j$ ；岩体中必须存在对于滑动阻力很小的分离面，以定出滑动面的侧面边界。

计算式为：

$$F_s = \frac{c_j L + (W \cos \beta - U - V \sin \beta) \operatorname{tg} \varphi_j}{W \sin \beta + V \cos \beta} \quad (4-34)$$

双平面滑动岩坡稳定分析：岩体内有两条相交的结构面，形成潜在的滑动面，并假定所有摩擦角是相同的。

计算式为：

$$F_s = \frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{available}}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{required}}} \quad (4-35)$$

一般的加固方法有：用混凝土填塞岩石断裂部分、锚栓或预应力缆索加固、混凝土挡墙和支墩加固、挡墙和锚栓相结合加固、削坡、压底、排水、植被等。

由于影响滑坡稳定的因素十分复杂，计算参数难以选定，故不宜单纯依靠计算，应综合评价。

### (3) 实际工程应用

朶孔水电站坝基边坡稳定包括河床砂砾石层的开挖及左、右岸松散层的开挖引起的边坡稳定问题。其各自的分析及计算如下：

①左岸坡表层为坡积碎石土层 4~5m, 天然密度为  $1.85 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ , 均值  $1.925 \text{ g/cm}^3$ , 根据工程地质类比法, 建议该层摩擦角为  $27^\circ \sim 30^\circ$ , 重度为  $18.9 \text{ KN/m}^3$ , 下层为冲洪积砂砾石层 9~10m, 天然密度为  $1.88 \sim 2.34 \text{ g/cm}^3$ , 均值  $2.18 \text{ g/cm}^3$ , 根据工程地质类比法, 建议该层摩擦角为  $30^\circ \sim 32^\circ$ , 重度  $21.4 \text{ KN/m}^3$ , 根据《中小型水利水电工程地质勘察经验汇编》建议开挖边坡按 1:1, 开挖深度 15m, 地下水埋深 12.7~20.8m, 对边坡开挖基本无影响。左岸属无粘性土土坡, 则计算式为:

无渗流作用时: 由式 (4-24) 计算得

$$F_s = \frac{T_f}{T} = \frac{W \cos \alpha \tan \varphi}{W \sin \alpha} = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} = \frac{\tan 30^\circ}{\tan 45^\circ} = 0.577$$

对于无粘性土土坡, 理论上只要坡脚小于土的内摩擦角, 土体就是稳定的。 $F_s$  等于 1 时, 土坡处于极限平衡状态, 此时突破的坡脚就等于无粘性土的内摩擦角, 也称休止角。由上式计算则  $F_s$  为 0.577, 土坡处于不稳定状态, 要使土坡稳定就需按 1:2 开挖, 这样就增大了工程量。因此, 采用喷锚支护, 土钉支护等措施增强土坡的抗滑力, 使土坡安全系数达到大于等于 1 的稳定状态。

②河床段覆盖层为冲积砂砾石层 5m, 天然密度均值  $2.25 \text{ g/cm}^3$ , 该层凝聚力为零, 摩擦角  $33^\circ \sim 35^\circ$ , 重度为  $22.05 \text{ KN/m}^3$ , 结构松散, 强度低, 下层为强风化泥质板岩夹钙质板岩 3~5m, 裂隙节理较发育, 重度为  $26.7 \text{ KN/m}^3$ , 建议开挖边坡上层按 1:1, 下层按 1:0.5, 开挖深度 10m, 为地下水埋深 0~0.2m, 对边坡开挖有影响, 经过基坑涌水量计算, 需进行排水。其计算方法和结果与左岸边坡相似。

有渗流作用时: 根据工程类比法松散冲积砂砾石层的孔隙比 0.67, 重度  $22.05 \text{ KN/m}^3$ , 天然密度均值  $2.25 \text{ g/cm}^3$ , 天然含水率为 5.2%, 天然干密度为  $2.14 \text{ g/cm}^3$

则:

$$G_s = \frac{\rho_d(1+e)}{\rho_w} = \frac{2.14 \times (1+0.67)}{1} = 3.57$$

浮重度由

$$\gamma' = \frac{(G_s - 1)\gamma}{G_s(1+w)} = \frac{(3.57 - 1) \times 22.05}{3.57 \times (1+0.052)} = 15.09 \text{ KN/m}^3$$

饱和重度由

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \gamma_w = \frac{3.57 + 0.67}{1+0.67} \times 9.8 = 24.88 \text{ KN/m}^3$$

则由式 (4-25) 计算得:

$$F_s = \frac{15.09 \times \tan 33^\circ}{24.88 \times \tan 45^\circ} = 0.39$$

可见  $F_s$  远小于 1，河床开挖时必须先降排水后进行支护。

③右岸坡表层为冲洪积粉质粘土 4~5m(有 1m 左右腐殖土),天然密度均值  $1.60 \text{ g/cm}^3$ , 该层摩擦角为  $33^\circ$ ，凝聚力为 17kPa，重度为  $15.7 \text{ KN/m}^3$ , 下层为冲洪积砂砾石层 5~6m，天然密度为  $1.88 \sim 2.34 \text{ g/cm}^3$ ，均值  $2.18 \text{ g/cm}^3$ , 摩擦角为  $31^\circ$ ，凝聚力为零，重度为  $21.4 \text{ KN/m}^3$ , 建议开挖边坡上层按 1:1，下层按 1:0.5，开挖深度 10m，为地下水埋深 26m，对边坡开挖无影响。计算采用 GeoStudio 2004 软件中的 SLOPE/W 模块。

如图（4-1）所示为 M-P 计算结果和计算模型，以及不同的滑动面，其中的绿色块体为不稳定滑动体，对应的滑动面为不稳定滑动面，安全系数仅为 0.893，明显小于 1，表明右岸边坡开挖为不稳定边坡，开挖时需进行边坡支护。

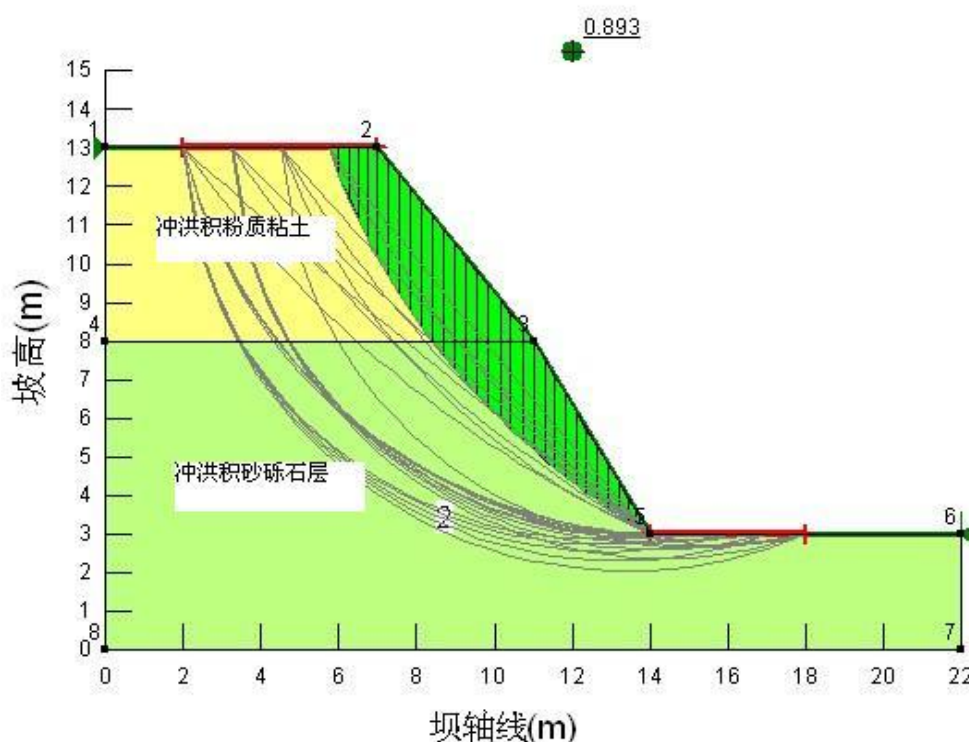


图 4-1 计算模型与计算结果

如图所示（4-2）所示为 SLOPE/W 模块中四种条分法的计算结果，其中 Bishop 条分法计算结果偏小。

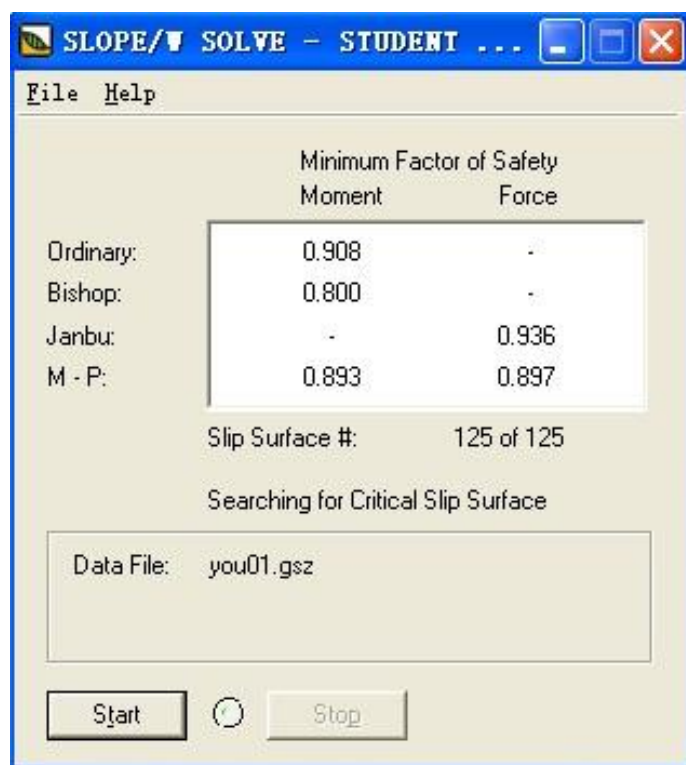


图 4-2 计算结果

## 8. 坝基渗漏及防渗

### 8.1 一般计算方法

土石坝对坝基的要求较低，一般置于土层上，坝基的渗漏及渗透变形问题是主要的工程地质问题。重力坝对坝基的要求较严格，一般要求坝基置于基岩上。

坝基渗漏量的估算方法：

(1) 均质岩层坝基，坝基由单一透水层组成，在厚度等于或小于坝底宽度且坝身不透水。

① 卡明斯基公式计算坝基渗透量：

$$q = KT \frac{H}{2b + T} \quad (4-3)$$

6)

式中： $q$ ——单宽坝基渗透量， $m^3/d \cdot m$ ；

$T$ ——透水岩层厚度， $m$ ；

$H$ ——坝上下游水位差， $m$ ；

$b$ ——坝底宽度的  $1/2$ ， $m$ ；

整个坝基渗透量为： $Q = qB$  (4-37)

② 巴甫洛夫斯基公式计算坝基渗透量：

$$Q = KHq_r B \quad (4-38)$$

式中：  $H$  ——坝上下游水位差， m；

$q_r$  ——单宽引用流量，即当  $K=1$ ，  $H=1$  时的单宽流量

当坝基透水层无限深时，单宽引用流量为：

$$q_r = \frac{1}{\pi} \operatorname{arcsch} \frac{Z}{b} \quad (4-39)$$

式中：  $Z$  ——计算渗透流量的含水层深度， m；

$b$  ——坝底宽度的 1/2；

当坝基透水层有限厚时，单宽引用流量按  $q_r - b/T$  关系曲线确定。

(2) 非均质岩层坝基，坝基由二元结构的双层透水岩层组成，按卡明斯基公式计算单宽坝基渗流量：

$$q = \frac{H}{\frac{2b}{K_2 T_2} + 2\sqrt{\frac{T_1}{K_1 K_2 T_2}}} \quad (4-40)$$

式中：  $T_1$ ，  $T_2$  ——上下层厚度；

$K_1$ ，  $K_2$  ——上下层渗透系数，其余符号同前；

多层透水坝基，求出平均渗透系数  $K$ ，按一层计算；若，上层渗透系数  $K_1$  小于下层渗透系数  $K_2$ ，即  $K_1 < K_2$  时，按一层计算，下层看成隔水层。

$$\text{整个坝基渗漏量为：} \quad Q = qB \quad (4-41)$$

## 8.2 坝基渗流量估算：

朶孔水电站坝址区表层为全新统冲积砂卵砾石层 3~5m，结构松散，渗透系数  $3 \times 10^{-2}$  cm/s (25.9m/d)，属强透水层；基岩强风化层厚 3~5m，透水率  $>100$  Lu，渗透系数在  $10^{-2} \sim 10^0$  cm/s 之间，属强透水层；弱风化层上部透水率  $>10$  Lu，渗透系数  $10^{-4} \leq K < 10^{-2}$ ，属中等透水，厚度 10~15m。上下游水位差为 17m，坝宽按 50m，渗透长度按 140m。估算时坝基未进行开挖。

用卡明斯基公式 (4-36) 计算坝基渗透量：

$$q = KT \frac{H}{2b+T} = 25.9 \times 5 \times \frac{17}{2 \times 25 + 5} = 40.03 m^2/d \quad \text{即: } 204.5 \text{ 万 } m^3/a$$

若看成两层则卡明斯基公式 (4-40) 计算坝基渗流量:

$$q = \frac{17}{\frac{2 \times 25}{0.005 \times 5} + 2 \sqrt{\frac{5}{0.005 \times 0.03 \times 5}}} = 7.86 \times 10^{-3} cm^2/s \quad \text{即: } 42.9 \text{ 万 } m^3/a$$

可知渗流量较大, 而且坝基置于第四系松散层上, 承载能力明显不足, 因此需进行开挖土层, 坝基置于弱风化岩层上。

### 8.3 绕坝渗漏量估算

筑坝蓄水后, 与坝相接的岸边地带处于两种地下水流的作用, 一是岸坡中原来的河谷流动的地下水, 二是库水绕过坝肩向坝下游的地下水流。这两种地下水流的相互作用决定了绕坝渗漏带的宽度  $B = \frac{L}{\pi}$ , 确定 B 之后即可按以下公式计算渗流量:

$$\text{潜水时:} \quad Q = 0.366KH(H_1 + H_2) \lg \frac{B}{r_0} \quad (4-42)$$

$$\text{承压水:} \quad Q = 0.732KHMl_g \frac{B}{r_0} \quad (4-43)$$

L——水库壅水前地下水位相对于水库正常蓄水位的一点距河水边线的距离。

H——坝上下游水位差。

根据钻孔 ZK3 处距河岸边的距离 x 和地下水埋深 y 可以算出 L, 计算式为:

$$\text{潜水时:} \quad L = \frac{H_1^2 - H_2^2}{y^2 - H_2^2} x = \frac{25^2 - 10^2}{25^2 - 10^2} \times 120 = 120m$$

则: L=120m, 绕坝渗漏带的宽度 B=38.2m

绕坝渗流量: 由式 (4-42) 计算得

$$Q = 0.366 \times 5.5 \times 10^{-5} \times 6.5 \times (25 + 10) \times \lg \frac{38.2}{8.8} = 0.29 \times 10^{-2} cm^2/s$$

即 34.9 万  $m^3/a$ , 渗流量较大, 需进行处理, 建议做混凝土齿墙以增长渗径, 以此控制渗流量。

### 8.4 坝基渗透稳定性分析

坝基 (肩) 下的渗透水流, 使岩土体中的某些颗粒移动和颗粒成分、结构发生改变称为渗透变形或渗透破坏。

坝基渗透变形的类型有：管涌、流土、接触冲刷和接触流失。渗流对土体的作用力，其大小决定于地下水的水力坡降或渗透速度，它是引起渗透变形的动力。

(1) 管涌和流土的判别式：北京水利水电科学研究院提出以土体的细粒含量  $P_c$  作为判别依据，对于不均匀系数  $C_u > 5$  的不连续级配土

$$\text{其计算式为: } P_c = \frac{1}{4(1-n)} \times 100 \quad (4-44)$$

$$\text{判别式为: } P_c \geq 35\% \quad \text{流土}$$

$$P_c < 25\% \quad \text{管涌}$$

$$25\% \leq P_c < 35\%, \text{ 过渡型, 取决于土的密度、粒径、形状}$$

$$\text{则: 由式 (4-44) 得 } P_c = \frac{1}{4 \times (1-0.477)} = 47.8\%$$

可知  $P_c \geq 35\%$ , 则可能产生流土渗透变形, 需做必要的工程治理。

(2) 产生渗透变形的动力条件: 对于流土型土体呈悬浮状态时的水力坡降称为临界水力坡降  $i_{cr}$ , 流土型土宜采用下式计算:

$$i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (4-45)$$

式中:  $G_s$  ——土粒比重;

$e$  ——土的孔隙比;

这是一般应用的松散砂质土产生流土的临界水力坡降计算式, 其值有上式 (4-45) 计算为

$$i_{cr} = \frac{2.73 - 1}{1 + 0.913} = 0.904$$

$$\text{容许水力梯度为: } [i] = \frac{i_{cr}}{F_s} \quad (4-46)$$

式中  $F_s$  ——安全系数, 取 2.0~2.5 代入式 (4-46) 则  $[i]$  为 0.362~0.452

一般要求逸出梯度要限制在容许梯度范围以内, 即:  $i_e \leq [i]$ , 对于  $i_e$  求解一般采用流网。



坝址处表层为全新统冲积砂卵砾石层 3~5m，结构松散，渗透系数  $3 \times 10^{-2}$  cm/s，属强透水层；基岩强风化层厚 3~5m，均值 4m，透水率为  $>100$  Lu，渗透系数为  $10^{-2} \sim 10^0$  cm/s 之间，取值  $3 \times 10^{-1}$  cm/s，属强透水层；上游水位 17m，下游水位 0.5m，坝宽 50m，双层结构且透水层厚度稳定，坝前后地层无缺失，

(3) 理论计算实际水力坡降方法为：双层透水结构且透水层稳定，但上部透水层在坝前或坝后缺失，则计算式为：

$$I_{\text{平均}} = \frac{H_1 - H_2}{M_1 + L \sqrt{\frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{M_1}{M_2}}} \quad (4-47)$$

式中： $H_1$ ， $H_2$ ——坝上、下游水位，m；

$M_1$ ， $M_2$ ——上、下土层的厚度，m；

$K_1$ ， $K_2$ ——上、下层的渗透系数，m；

$L$ ——坝基的宽度，m。

双层结构且透水层厚度稳定，则坝下逸出平均水力坡降计算式为：

$$I_{\text{平均}} = \frac{H_1 - H_2}{2M_1 + L \sqrt{\frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{M_1}{M_2}}} \quad (4-48)$$

式中符号与上式 (4-47) 相同。

则实际水力坡降由式 (4-48) 计算得：

$$I_{\text{平均}} = \frac{H_1 - H_2}{2M_1 + L \sqrt{\frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{M_1}{M_2}}} = \frac{17 - 0.5}{2 \times 4 + 50 \times \sqrt{\frac{0.03}{0.3} \times \frac{4}{4}}} = 0.69$$

则计算实际水力坡降为  $I_{\text{平均}} = 0.69$ ， $[i]$  为 0.362~0.452， $I_{\text{平均}}$  明显大于  $[i]$ ，即  $I_{\text{平均}} > [i]$ ，土体处于流土状态，需采取加长渗径和排水减压及设置反滤层等保护措施。

## 8.5 坝基渗漏量数值模拟计算

尕孔水电站坝址区表层为全新统冲积砂卵砾石层 3~5m，渗透系数  $3 \times 10^{-2}$  cm/s，结构松散，属强透水层；基岩强风化层厚 3~5m，透水率  $>100$  Lu，渗透系数  $10^{-2} \leq K < 10^0$  cm/s 之间，属强透水层；弱风化层上部透水率  $>10$  Lu，渗透系数在

$10^{-4} \leq K < 10^{-2} \text{ cm/s}$  之间,属中等透水,存在坝基渗漏。建议:清除表层松散堆积层及岩体强风化层,坝基置于弱风化岩体上,按透水率  $q < 3 \text{ Lu}$  控制进行帷幕灌浆处理,防渗深度至相对不透水层顶部,帷幕灌浆处理渗透系数为  $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。推测河床相对不透水层(以弱透水体控制)埋深 20~30m。

坝顶高程 3399.0m,正常蓄水位 3395.0m,开挖高程 3380.0m,开挖深度 8m,坝底置于弱风化层上,坝底高程 3372.0m,相对不透水层高程 3350.0m,大坝弱透水体厚度 22m,渗透系数取  $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。坝前 1:0.25 放坡,坝后 1:1 放坡。

坝基的渗漏形式主要表现为弱透水岩体中节理裂隙面的一般渗漏,以及沿断层破碎带、裂隙密集带的集中渗漏。为了减少绕坝渗漏量,降低两坝肩孔隙水压力,保证岸边坝段的稳定,需将灌浆帷幕向左右岸延伸至水库正常高水位与水库蓄水前两岸的地下水位线相交处。

#### (1) 幕体厚度和深度估算

①幕厚:依据渗流理论,以坝基渗流量与幕体允许渗流量的连续原理可求得幕厚,而该幕厚还应与坝基其它部位渗透稳定相适应,这就是幕体厚度设计的基本原理。估算式为:

$$\delta \geq \frac{H-h}{J_{\text{允}} \left(1 - \frac{K_{\phi}}{K_0}\right)} = \frac{3395-3372}{0.407 \times \left(1 - \frac{1 \times 10^{-5}}{1 \times 10^{-4}}\right)} = 2.7\text{m} \quad (4-4)$$

式中:  $\delta$  ——防渗体厚度, m;

$H$ 、 $h$  ——防渗体上、下游承受水头, m;

$K_0$  ——坝基地层渗透系数 (m/s);

$J_{\text{允}}$  ——防渗体允许渗流梯度;

$K_{\phi}$  ——防渗体渗透系数 (m/s);

②幕深:依渗流理论,用渗径法则,并假定垂直抗渗性约相当于水平防渗的 2 倍线路则防渗体的深度拟设,可用下式估算:

$$d \geq \frac{1}{4} \left( \frac{H-h}{J_{\text{允}}} - \delta \right) = \frac{1}{4} \times \left( \frac{3395-3372}{0.407} - 2.7 \right) = 13.5\text{m} \quad (4-5)$$

0)

式中符号意义与上式（4-48）相同。

则按理论公式（4-49）估算幕厚为 2.7m, 则按 3m 间距布设两排灌浆孔。幕深估算值按式（4-50）为 13.5m, 则灌浆深度至相对不透水层顶部, 这样隔水效果较好。

## （2）数值模拟法

数值模拟法采用 Geostudio 2004 中的 SEEP/W 模块, 渗流量模型的建立和网格划分如下图所示（图 4-4）

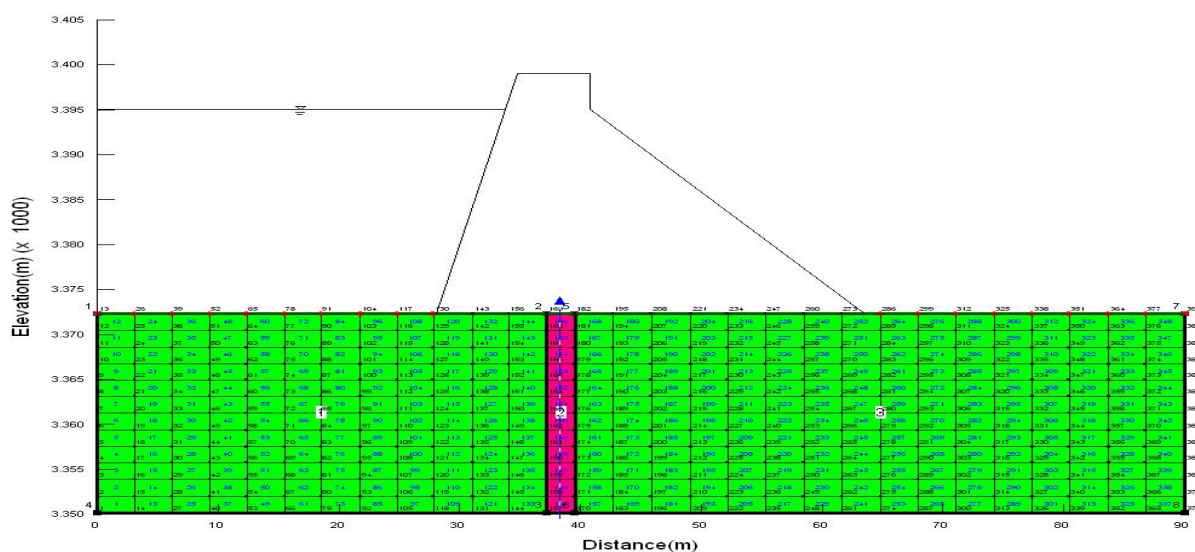


图 4-4 渗流量计算模型

如下图所示为（图 4-5）总水头线及单宽流量  $q_r = 6.5472 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , 则总流量为  $Q = 2.9 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ , 渗漏量为总库容（329 万  $\text{m}^3$ ）的 0.88%, 帷幕灌浆处理效果较好, 坝基渗漏量也较小, 满足要求。

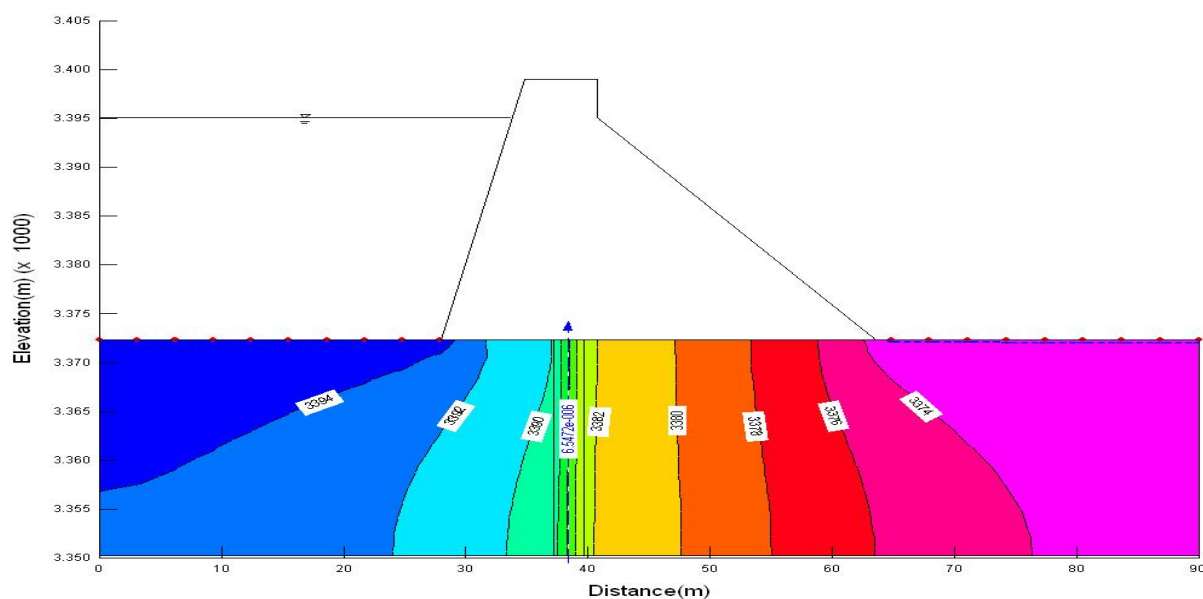


图 4-5 总水头线 (Total Head) 及单宽流量

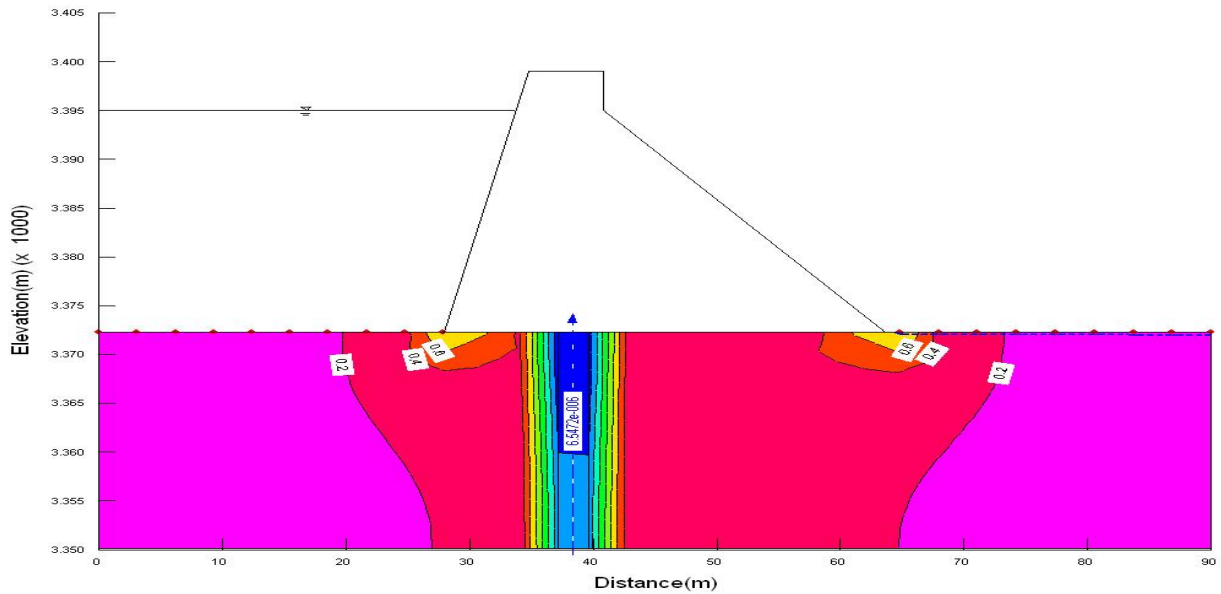


图 4-6 水力坡降图

如上图所示为（图 4-6）水力坡降图，则可知在下游坝址处实际水力梯度为 0.6，考虑到坝基置于弱风化岩层上，则下游坝址处不会发生渗透变形。需要注意的是，基坑开挖以后回填土的实际水力坡降必须小于容许水力坡降，需做必要的工程处理，否则有可能发生渗透变形破坏，影响坝基整体稳定性。

（3）坝基防渗处理主要有：帷幕灌浆、防渗墙、坝基排水、固结灌浆。

①帷幕灌浆：是防止坝基渗漏，降低坝底渗透压力的有效措施，也可防止坝基内产生渗透破坏，使幕厚的坝基面渗透压力降至允许值以内。可用于处理断层破碎带、裂隙发育带或岩溶地基的坝基渗漏问题，以及某些软弱地基的渗漏和渗透稳定问题。一般情况下防渗帷幕能使坝基渗透压力降到  $0.5H$ （ $0.5$  为剩余水头系数， $H$  为水头），如结合有效地排水措施则可降到  $0.2 \sim 0.3H$ ，甚至更小一些。灌浆材料一般采用水泥浆，必要时也可采用化学浆。位置应在靠近上游坝面的坝轴线附近，自河床向两岸延伸。钻孔和灌浆常在基础廊道内，靠近两岸可在坝顶或平洞内进行。帷幕灌浆孔的方向原则上应尽量穿过最多的裂隙和岩层层面，一般向上游倾斜的角度为  $0^\circ \sim 10^\circ$ 。孔距一般在  $1.5 \sim 4\text{m}$ ，排距比孔距略小，一般为  $0.8 \sim 0.9$  倍孔距或  $1.5 \sim 3\text{m}$ 。灌浆压力的大小应通过实验确定，一般帷幕表层段不宜小于  $1 \sim 1.5$  倍坝前水头，底孔段不宜小于  $2 \sim 3$  倍坝前水头。

②排水：中高重力坝或拱坝多采用坝基排水设施减小渗透压力以利稳定，当有防渗帷幕时，排水多设置在帷幕后  $2 \sim 4\text{m}$  范围内，一般设置  $1 \sim 2$  排。排水孔孔深约为帷幕深度的  $0.4 \sim 0.6$  倍，排水孔距一般主排水孔  $2 \sim 3\text{m}$ ，辅助排水孔  $3 \sim 5\text{m}$ ，孔径  $15 \sim 25\text{cm}$ 。排

水管多用无砂混凝土管做成。防渗帷幕和排水的合理采用与布置是很重要的问题，安排恰当可收到预期效果，否则事倍功半。工程实践证明坝基排水效果是较好的。

③防渗墙：在松散透水地基中连续造孔，以泥浆固壁，往孔内灌注混凝土而建成的墙形防渗建筑物。它是对闸坝等水工建筑物在松散透水地基中进行垂直防渗处理的主要措施之一。防渗墙按分段建造，一个圆孔或槽孔浇筑混凝土后构成一个墙段，许多墙段连成一道墙。墙的顶部与闸坝的防渗体连接，两端与岸边的防渗设施连接，底部嵌入基岩或相对不透水地层中一定深度，即可截断或减少地基中的渗透水流，对保证地基的渗透稳定和闸坝安全，充分发挥水库效益有重要作用。它也可作为土石坝中的防渗心墙，还可用以加固渗漏严重的土石坝。

④固结灌浆：为了提高基岩的整体性和基岩的承载能力，减少不均匀沉陷提高地表面层防渗性能，需对坝基进行加固处理。固结灌浆多用于处理断裂发育、风化严重、基岩完整性较差的地带。灌浆孔布置呈梅花形和方格形。灌浆孔的孔深一般为5~8m，必要时适当加深，钻孔方向宜垂直基岩面。灌浆孔的孔距、孔径应根据地质条件并参照灌浆实验确定，一般为3~4m。灌浆压力以不掀动基岩为原则尽量取较大值，一般无混凝土盖重时为0.2~0.4MPa，有混凝土盖重时为4~7MPa(视盖重厚度而定)。

## 五、结论与建议

(1) 朶孔水电站在区域地质单元上归属秦岭地槽带。展布在工程区附近的区域构造主要为秦岭东西向构造体系，EW 向断裂带构成基本格架；根据国家质量技术监督局 2001 年 2 月 2 日发布的《中国地震动参数区划图》，工程区地震动峰值加速度为 0.10g，地震动反应谱特征周期为 0.45s，相当于地震基本烈度Ⅶ度。

(2) 水库正常蓄水位 3395m 时，坝顶高程 3399.0m，水库蓄水后水位抬升不大，泽曲河为区内最低侵蚀基准面，两岸分水岭远高于水库正常蓄水位，且水库区无大的区域断裂构造带通过，因此，水库不存在向邻谷产生永久渗漏、坍岸及固体径流等问题，也不存在产生水库诱发地震的可能性，水库区工程地质条件相对较好。

水库浸没范围沿库岸累计长度约 1.05km，浸没总面积约 11.25 亩，浸没范围不大。库区洪水期泽曲河携带的泥沙质及两岸冲沟泥石流是水库区固体物质的主要来源，另外尚有少量的库岸再造堆积物入库，但其量都不大，不影响水库的正常运行。

(3) 坝址区表部覆盖层为坡积碎石土和泽曲河Ⅱ-Ⅲ级阶地产物，具有强度低、透水性强的特性，不宜作为坝基土，建议：应全部清除。出露的基岩地层为三迭系中上统的泥质板岩夹少量钙质板岩，岩层产状  $NW290-314^{\circ} SW \angle 42-57^{\circ}$ ，层间裂隙及挤压带发育，未发现大的断层，岩体完整性为极差～差，强风化厚度 3-5m，建议：坝基基础置于弱风化岩体上。

(4) 坝址表层覆盖层头透水性强，强度低等，全部清除覆盖层及强风化层将坝基置于弱风化泥质板岩上，风化层裂隙节理发育，但未发现大的断层破碎带通过，不存在导致坝基滑动的深层软弱滑动面，坝基按抗剪断公式计算安全系数为 3.07 符合要求。对坝基进行固结灌浆，帷幕防渗等处理后，坝体不产生滑动破坏。

(5) 基坑涌水计算，涌水量为  $Q=0.16 \times 10^4 m^3/d$ ，涌水量较大，对基坑开挖产生较大影响，建议：基坑开挖时采取降排水措施。

(6) 边坡稳定性，左岸边坡因是无粘性土破，按 1:1 开挖存在滑动破坏问题，建议：开挖时采用支护措施。

河床开挖存在渗流作用，对边坡开挖影响较大，开挖坡为不稳定坡，建议：开挖时采取支护措施。

右岸表层为粘性土（约 1m 左右腐殖土），下层为砂砾石层，经计算开挖同样存在滑动破坏，建议：开挖时采取支护措施。

(7) 坝址处两岸及河床表层为第四系松散堆积层，为中等透水-强透水层，渗透系数在  $n \times (10^{-4} - 10^{-2}) \text{ cm/s}$  之间；强风化泥质板岩岩体呈层状-碎块状，整体完整性差，强度低，透水率在 10-100Lu 之间，为中等透水层，存在坝基渗漏问题，建议：清除表层松散堆积层及岩体强风化层，坝基置于弱风化岩体上，对上部岩体进行固结灌浆处理，处理深度 6-10m；岩体相对不透水层顶板埋深 20~30m，建议进行帷幕灌浆处理，按透水率  $q \leq 3\text{Lu}$  控制，处理深度约 10-15m，以弱透水层为隔水顶板。

右岸覆盖层为冲洪积粉质粘土及砂砾石层，渗透系数在  $n \times (10^{-4} - 10^{-2}) \text{ cm/s}$  之间，为中等透水-强透水层，基岩面平缓，存在绕坝渗漏问题，建议：做混凝土齿墙以增长渗径

坝基渗透变形可能产生流土问题，建议：采取加长渗径和排水减压及设置反滤层等保护措施。

(8) 经坝基抗滑稳定性计算，在基本组合和特殊组合两种情况下坝基的抗滑稳定安全系数分别为  $1.5 > 1.05$  和  $1.3 > 1.00$ ，均满足要求，坝基为稳定状态。为了使坝基防渗效果和抗滑稳定性更好，建议做一些工程处理措施。

(9) 经过帷幕灌浆处理，计算所得总渗流量为  $Q = 2.9 \text{ 万 m}^3/a$ ，为总库容（329 万  $\text{m}^3$ ）的 0.88%，帷幕灌浆处理效果较好，满足要求。考虑到绕坝渗流问题，建议：坝肩应将灌浆帷幕向左右岸延伸至水库正常高水位与水库蓄水前两岸的地下水位线相交处。

## 结束语

水利水电工程地质分析与研究对于查明水工建筑物区域内大坝位置的选择、已选定工程位置地质条件的分析与评价、对存在不良工程地质问题提出处理措施、并对措施的可靠性作出论证等等起到至关重要的指导作用，因此分析和研究这些存在的工程地质问题是每一个工程必不可少的重要部分。

通过本次毕业设计的收集资料、分析和整理、得出最后结论的每一个环节，提高了自己理论知识与实际工程相结合的能力，并应用到实际工程中存在的工程地质问题进行分析，使得自己的专业技能更加充实，为走上工作岗位做了一个好的开端。

在此感谢任课老师对我毕业设计的指导，同时感谢同学们的细心帮助！



## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家标准：岩土工程勘察规范（GB50021-2001）.
- [2] 中华人民共和国国家标准：水利水电工程地质勘察规范（GB 50287-99）
- [3] 中华人民共和国国家标准：中小型水利水电工程地质勘察规范（SL55-2005）
- [4] 中华人民共和国国家标准：工程岩土分级标准（GB50218-94）
- [5] 中华人民共和国国家标准：水利水电工程制图标准（SL 73—95）
- [6] 徐志英主编. 岩石力学（第三版）. 北京：中国水利水电出版社 2007
- [7] 李永乐主编. 岩土工程勘察. 河南：黄河水利出版社 2004. 3
- [8] 陆兆溱主编. 工程地质学（第二版）. 北京：水利水电出版社，2001. 9
- [9] 卢廷浩主编. 土力学（第二版）. 南京：河海大学出版社, 2005. 1。
- [10] 黄润秋主编. 工程地质分析原理. 北京：地质出版社 2009. 6
- [11] 陈南祥. 水文地质学. 北京：中国水利水电出版社 2008. 3
- [12] 郭见扬编著. 中小型水利水电工程地质. 北京：水利电力出版社 1995. 6
- [13] 扬连生主编. 水利水电工程地质. 武汉：武汉大学出版社 2004. 8
- [14] 华东水利学院 四川省水利电力局 广西大学主编. 砌石坝设计. 北京：水利电力出版社 1980. 6

## 附录

- 附录一 01 河南省孔汴水电站库区地质图  
02 河南省孔汴水电站坝址地质图  
03 河南省孔汴水电站坝轴线工程地质剖面图  
04 河南省孔汴水电站顺河向地质剖面图

附件 5

# 国家开放大学学士学位论文评审表

题 目	河南省孔水水电站坝址区		
	工程地质分析		
姓名	严栋	教育层次	本科
学号	2063001200077	分 部	青海广播电视大学开放教育学院
专业	土木工程	学院 (分校)	青海广播电视大学开放教育学院
指导教师	魏群	学习中心	

## 一、学位论文简介

介绍学位论文写作的过程、主要内容和创新点：

主要是针对坝址区主要工程地质问题进行分析，得出相关结论并给予处理建议，其主要的工程地质问题有：坝基覆盖层处理、岩体强风化特性及处理、软弱夹层特性及处理、基坑涌水量、坝基抗滑稳定性、坝基承载力、边坡稳定分析、坝基渗漏及防渗，绕坝渗漏问题等。估算坝基坝体的渗流量，对渗透坡降进行稳定性评价。采用 Geostudio 2004 中的 slope 和 seep 模块进行计算分析，论文中包含必要的计算过程和文字说明。对计算结果和图件进行正确分析，并提出结论和建议。

通过地质和水文勘察资料，就库区及坝址区工程地质条件进行分析与研究，提出可能发生的相关工程地质问题并给出处理意见。根据实验数据和实际工程类比提出岩土体的力学建议参数值，分析存在的工程地质问题，提出更适合的技术方案。不同性质岩土体渗透系数  $k$  的选取、计算软件和计算方法的选取和应用、计算结果的分析。

学生（签名） 平栋

2022 年 11 月 11 日

## 二、论文指导过程

选题指导	<p>指导时间：2022.3</p> <p>指导内容：</p> <p>选题来源于青海省水利水电勘测设计研究院在黄河一级支流泽曲河上开发的梯级电站，泽曲河发源于青海省泽曲县尕干龙那日格沼泽区，从北流入河南蒙古族自治县，经河南县城折向西南方向注入黄河，全长 233km，流域面积 4756km<sup>2</sup>，多年平均流量 23.5m<sup>3</sup>/s。</p> <p>拟建尕孔水电站位于青海省河南蒙古族自治县境内的泽曲河上，是泽曲河最下游的一座梯级电站。电站引水口及厂房有简易乡村公路与外界相通，坝址距河南县城 50km，距离青海省会西宁市约 358 km，对外交通较为便利。</p> <p>电站建筑物由挡水大坝、引水系统及发电系统三部分组成。其中挡水大坝由分溢流坝段和非溢流坝段两部分，设计坝型为浆砌石重力坝，其中溢流坝段净宽 50m，大坝设计坝高 21m、坝顶高程 3399.0m 、设计正常蓄水位 3395.0m，校核洪水位 3398.5m，水库总库容：329 万 m<sup>3</sup>。电站为小(1)型工程，主要建筑物为 4 级。</p> <p>引水发电系统从泽曲河左岸以隧洞穿越两条大的冲沟后在黄河右岸布置发电厂房，引水隧洞全长约 6.65km，发电引水流量 33m<sup>3</sup>/s，装机容量 30.0MW。</p> <p>根据搜集到的相关资料，结合本专业的特点和所学专业选择此课题。</p>
开题指导	<p>指导时间：2022.3</p> <p>指导内容：</p> <p>工程地质勘察是水利电力工程建设的基础工程，其任务是查明建筑区的工程地质条件。充分论证有关的工程地质问题，以便充分利用有利的地质因素，避开或改造不利的地质因素，为工程的规划、设计和施工提供可靠的地质依据。其主要任务是通过工程地质测绘与调查、勘探、室内试验、现场测试等方法，查明场地的工程地质条件，如场地地形地貌特征、地层条件、地质构造，水文地质条件，不良地质现象，岩土物理力学性质指标的测定等。在此基础上，根据场地的工程地质条件并结合工程的具体特点和要求，进行岩土工程分析评价，为基础工程、整治工程、土方工程提出设计方案。</p>

初稿指导	<p>指导时间：2022.4</p> <p>指导内容：</p> <p>本次勘查完成任务主要有：（1）调查区域地质构造和地震活动情况，对工程区的区域构造稳定性作出评价。（2）查明水库区水文地质、工程地质条件，对水库渗漏、库岸稳定、浸没和固体径流等问题作出评价。（3）查明坝（闸）址、引水线路、排水线路和其他建筑物区的工程地质条件并进行评价，为选定的坝线、坝型和其他建筑物轴线位置及地基处理方案提供地质资料与建议。</p>
修改稿指导	<p>指导时间：2022.4</p> <p>指导内容：</p> <p>（1）工程地质学是所学专业的综合性课程，也是岩土工程专业不可缺少的一门主要的专业课，无论是今后从事哪一个行业都将遇到相关的工程地质问题，通过本次接触更深的了解工程地质学在实际工程方面的应用以及解决相关问题的一些方法理论，从而为以后的工作打好基础。</p> <p>（2）考虑到自己即将工作的环境是从事水利水电工程的建设，本次设计我将进一步深入学习和运用自己大学期间所学的专业课知识，这对我以工作会更加熟练，也是一个积累知识的机会。工程地质是一门实践性很强的学科，通过这次毕业设计也是锻炼自己将所学理论知识和实际环境联系起来的好机会，会更加巩固自己的专业技能。</p> <p>（3）通过勘察可以看出，朶孔水电站所在地区地质构造较为复杂，断裂较发育，形成的工程地质问题较多，地层岩性较为松散，可能产生滑坡、卸荷崩塌等工程地质问题。因此，需要通过综合分析和研究进行治理。</p>

终 稿 指 导	<p>指导时间：2022.4</p> <p>指导内容：</p> <p style="text-align: center;"><b>1 工程概况</b></p> <p>简单介绍该工程的地理位置、交通、建设规模、任务完成量等。</p> <p style="text-align: center;"><b>2 区域地质概况</b></p> <p>根据地质勘查报告，具体了解该工程所在地区工程地质条件，分为以下几个部分：</p> <p style="text-align: center;"><b>3 水库区工程地质条件分析</b></p> <p><b>3.1 库区基本地质条件分析</b></p> <p><b>3.2 库区主要工程地质问题分析</b></p> <p style="text-align: center;"><b>4 坝址区工程地质条件分析</b></p> <p><b>4.1 坝址区基本地质条件分析</b></p> <p><b>4.2 坝址工程地质条件分析</b></p> <p><b>4.3 坝址岩（土）体的物理力学性质及参数分析</b></p> <p><b>4.4 坝址主要工程地质问题及处理建议</b></p> <p style="text-align: center;"><b>5 结论与建议</b></p> <p>通过对朶孔水电站工程地质条件的分析与研究，得出相关结论以及建议如何治理。</p>
指 导 教 师 评 语	<p>该生论文写作规范，论证严谨，在写作过程中态度端正，文献材料收集详实，综合运用了所学知识解决问题。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;">初评成绩：86</div> <p style="text-align: right; margin-top: 20px;">指导教师（签名）：魏群</p> <p style="text-align: right; margin-top: 20px;">2022 年 11 月 10 日</p>

### 三、 论文答辩

答 辩 记 录	答辩主持人	田馨文	
	答辩小组成员	晁仕德、吕建杰、桑凤玉	
	秘 书	刘璐	
	答辩日期	2022 年 11 月 13 日	
	答辩教师提问		学生回答情况
	1. 坝基渗透变形可能产生流土问题,采取加长渗径和排水减压及设置反滤层等保护措施,那么什么是反滤层及作用是什么?		答: 反滤层是指颗粒大小不同的砂、碎石或卵石等材料做成的,作用是减少结构变形对防水层的不利影响,防止坝基渗透产生流土。
	2. 在帷幕灌浆处理之前压水实验,单点法压水实验和五点法压水实验的区别是什么?		答: 单点法压水实验和五点法压水实验是了解岩石透水性的一种方法,单点法压水实验指采用单一的压力,五点法压水实验是由五个压力过程计算透水性。
	3. 按照土方的开挖程度,土体的分类包括哪几类?		答: 松软土,普通土,坚土,砾石土,软石,次坚石,坚石,特坚石
	4. 在土的性能指标中,其中土的抗剪强度指标的两个参数是什么?		答: 粘聚力和内聚力



答 辩 记 录	5.	
	6	
	7	
	8.	
答 辩 小 组 意 见	<p>评语：该生论文写作规范，论证严谨，并且能在规定范围内熟练、扼要得陈述论文的主要内容，能恰当回答与论文相关的问题，思路清晰，表达准确。答辩小组经过充分讨论，根据该生的论文质量和答辩中的表现，同意评定论文为 良好 。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p>答辩论文成绩（分数）： 84</p> </div> <p style="text-align: right;">答辩主持人（签名）：田馨文</p> <p style="text-align: right;">22 年 11 月 13 日</p>	

注：需要将每次答辩的记录都包含在内，如果是二次答辩，需单独增加第三部分“论文答辩”的表格。

四、审核意见

学院/ 分校 意见	<div>专业负责人（签名）：</div> <div>负责部门公章</div> <div>年      月      日</div>
分部 复审 意见	<div>专业负责人（签名）：</div> <div>负责部门公章</div> <div>年      月      日</div>
学位 评定 分委 员会 终审 意见	<div>审核意见：</div> <div>终审成绩：</div>



<p>学院（分校）/学习中心意见</p> <p>指导教师（签名）：</p> <p>（公章） 年 月 日</p>	<p>分部意见</p> <p>分部学位审核委员会主席（签名）：</p> <p>（公章） 年 月 日</p>
---	---