

《水电地下工程围岩分类》* 在引水隧洞中的应用

——以渔子溪二级水电站为例

关汉英

(水利电力部成都勘测设计院)

提 要

本文以渔子溪二级水电站引水隧洞的对比设计为例,验证《水电地下工程围岩分类》(征求意见稿)在水电地下工程中的实用性;同时亦论证了渔子溪二级水电站引水隧洞设计的合理性。

一、隧洞区工程地质概况

渔子溪二级电站引水隧洞,布置在渔子溪左岸,总长7703.793m,埋深为300~500m,最大埋深830m,洞轴至渔子溪岸边的水平距离为400~800m,隧洞区山体雄厚,岩性为花岗闪长岩,间有闪长岩及长英岩零星分布,普遍具有蚀变现象,并有多期中基性岩脉穿插,岩石风化轻微,岩体完整,构造断裂不甚发育。

隧洞区较大的断层有 f_{b-13} 、 f_{b4-1} 、 f_{b4-9} 及 f_{b4-11} 等,其产状为走向北东 $55^\circ\sim 75^\circ$,倾向北西,倾角 $55^\circ\sim 62^\circ$;其中 f_{b4-9} 及 f_{b4-11} 规模最大,走向与洞轴夹角很小(7° 左右),破碎带与影响带宽度分别为10~15和40~80m,组成物质为断层泥、糜棱岩及角砾岩等。断层带岩石松软,遇水后迅速崩解成0.5~1cm的碎块,对隧洞围岩稳定极为不利(图1、图5)。

隧洞沿线地下水多为裂隙水,流量很小,多为沿断层裂隙成滴、渗或线状水流出,最大出水点流量为14.14 l/s,且有承压性质。

二、引水隧洞围岩工程地质条件分类

引水隧洞围岩工程地质条件分类,是本工程引水隧洞设计及施工的基本依据。

引水隧洞围岩地质条件分类,综合考虑影响围岩稳定的有关因素,如岩石强度、围岩完整性、结构面特性及其组合、地下水及其活动规律,并以围岩的坚固系数 f 为综合指标,将隧洞围岩分为如表1中所描述的五类。

表2中典型洞段的工程地质条件,是典型洞段工程地质条件定性和定量的综合描述是设计与施工的基本依据,与表1对比,判定各洞段的围岩类别,据以确定支护型式。

*水电部昆明勘测设计院:《水电地下工程围岩分类》〈征求意见稿〉1986.6.

表1 围岩工程地质条件分类

类别	坚固系数 f	单位弹抗 k_0 ($10^3 T/m^2$)	岩石波速 $V_{p\gamma}$ (km/s)	单轴抗压强度		完整性 状态	围岩工程地质 特征	主要特征	围岩稳定性评价	
				R_b	MPa				稳定性	支护措施
I	≥ 6	≥ 600	5.2	>60	岩体坚硬完整, 岩石新鲜, 微风化, 受构造变动影响轻微, 裂隙不发育, 岩层呈巨块状整齐结构	地下水活动微弱, 多呈零星裂隙渗水, 洞壁干燥	结构面组合一般不影响围岩稳定	地下水活动微弱, 洞壁干燥, 裂隙水出露明确	稳定	不需支护
II	5~6	450~600	4.5~5.2	60~30	岩体坚硬完整, 岩石新鲜或微风化, 受构造影响较轻, 裂隙不甚发育, 断层破碎带宽度一般均小于0.2米, 岩层呈中巨块状整齐结构	地下水活动微弱, 裂隙水出露明确	结构面组合一般不影响围岩稳定, 断层破碎带走向一般与洞轴线近于正交	地下水活动微弱, 裂隙水出露明确	基本稳定	局部锚杆支护
III	4~5	350~450	4.2~3.4	30~15	岩体完整较好, 岩石新鲜或微风化, 受构造影响较重, 裂隙较发育, 断层破碎带宽度小于0.5米, 主要充填物为糜棱岩或角砾岩, 挤压紧密, 岩层呈大块状整齐结构	地下水活动微弱, 裂隙水出露明确	断层走向与洞轴线斜交或正交, 洞顶有不利结构面组合	地下水活动微弱, 裂隙水出露明确	较稳定	局部喷射支护
IV	2~3	100~250	2~3.4	15~5	岩体稳定性较差, 岩石为弱风化, 受构造变动影响重, 断层破碎带宽度多小于1米, 贯通性裂隙发育, 岩体被切割成块状结构	地下水活动较强, 洞壁潮湿, 局部地下水呈线状分布	结构面组合对围岩稳定有较大影响, 多呈人字形或梯形组合	地下水活动较强, 洞壁潮湿, 局部地下水呈线状分布	稳定性较差	系统锚杆及挂网喷射支护
V	1~2	50~100	< 2	2~5	岩体完整较差, 岩石以弱风化为主, 岩体强度较低, 受构造变动影响较重, 构造面裂隙发育, 断层破碎带大于1米, 以断层泥及糜棱岩为主, 贯穿性裂隙内有	地下水活动强烈, 多呈流水状, 且有承压性质, 洞壁湿润, 裂隙普遍发育	结构面呈不稳定结构	地下水活动强烈, 多呈流水状, 且有承压性质, 洞壁湿润, 裂隙普遍发育	不稳定	刚性支护为主

表2 典型型洞段特征性表

桩号 (米)	新围岩 类型式	围岩 系数 f	单位弹抗		岩石波速 VPY (km/s)	单轴抗压强度 Rb (MPa)		完整性 状态	地质 条件	结构面 组合特征	地下水	支护型式
			k ₀ (10 ³ t/m ³)	V _{PI}		k ₀	R _b					
引11+327.000 引11+358.000	图 2	3	250	3.4	15	岩体完整性较差,以长英岩为主,局部有花岗岩,岩石新鲜,致密坚硬,块状结构。断裂发育,主要断层产状45°~65°NW/67°~85°,断层宽度为0.5~1米,最宽度为2.5米,破碎带中充填物为断层泥,角砾石及糜棱岩。有岩爆发生		沿断层带有少量地下水渗出,顶拱有滴水	主要裂隙有两组: (1) 313°~335°NE/62°~72° (2) 20°~35°NW/52°~67°	丙型喷锚断面,喷层厚10cm,起伏差不大于20cm,φ20mm锚杆,φ10mm@1.5×1.5m钢筋网,底板浇筑素混凝土		
引11+517.000 引11+560.000	图 3	5	450	4.5	60	岩体完整好,以中粒花岗岩为主,岩石新鲜、坚硬,构造不发育。引11-520至引11+525米段有两条规模较小的断层,断层带宽0.5米,充填挤压密实的角砾石及糜棱岩,两盘岩石较完整,裂隙细小,贯穿性不强		沿裂隙局部渗水,顶拱局部有水	裂隙四组: (1) EWS/35°~55° (2) 40°~60°SE/70°~85° (3) 35°~55°NW/40°~56° (4) 340°~345°NE/73° 为闭合裂隙	甲型喷混凝土断面,喷层厚10cm,起伏差不大于20cm,底板浇筑素混凝土		
引12+301.000 引12+510.000	图 4	6	600	5.2	100	以花岗岩为主,岩石坚硬,呈块状结构,裂隙不甚发育,岩体完整性较好,断层规模较小,断层破碎带宽0.4~0.6米,最大2~2.5米。充填物为角砾石,糜棱岩,挤压紧密,成洞条件好		地下水活动弱,洞壁干燥,断层处有少许渗水	裂隙有三组: (1) 40°~60°NW/60°~70° (2) 340°~345°NE/70°~85° (3) 30°~40°SE/32°~45° 为闭合裂隙,无充填物	乙型喷混凝土断面,喷层厚5cm,起伏差不大于25cm,底板浇筑素混凝土		
引13+263.000 引13+462.000	图 5	1~2	50~100	1.8	3	洞体在与洞轴线近于平行的f ₀ -411断层带中通过。断层产状为70°~75°NW/55°~58°,断层带宽度为11米,断层带充填为破裂玻化岩,糜棱岩及角砾石,结构松软,遇水后崩解,洞体稳定性极差		地下水活动强烈,流量大于10L/s	在断层带中通过	双层钢筋厚60cm钢筋混凝土衬砌		
引15+483.000 引15+490.000	图 6	4	350	4.2	30	岩性为中粒花岗岩,块状结构,裂隙发育,有卸荷裂隙,张开度1~2厘米,充填小碎石及黄泥,岩石为弱风化		地下水活动不强,只沿裂隙有渗水或滴水	裂隙组合为人字形,但洞体部位围岩稳定性较好,由于上覆单薄,侧向岩体10~20米厚	双层钢筋厚50cm钢筋混凝土衬砌		

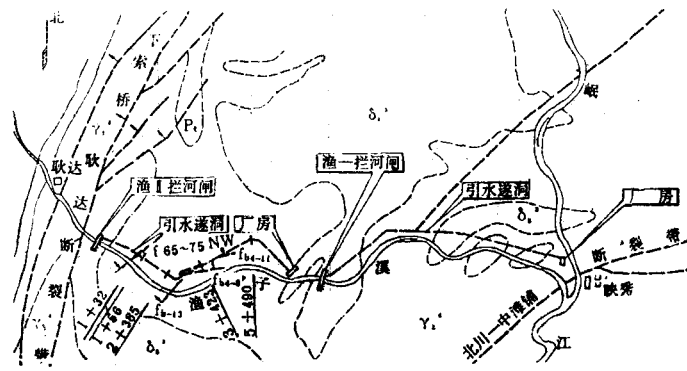


图1 引水隧洞地质构造示意图

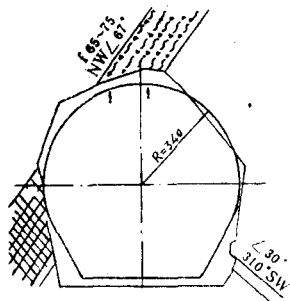


图2 1+352剖面

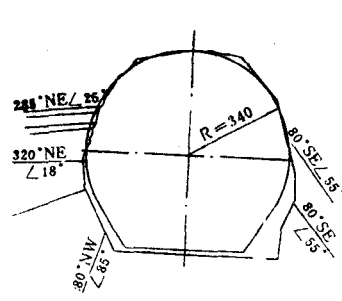


图3 1+560剖面

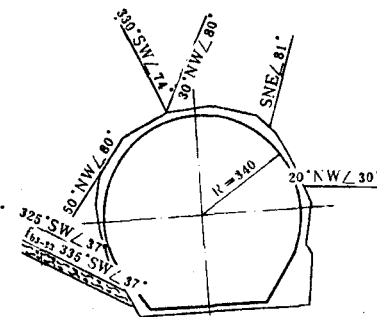


图4 2+385剖面

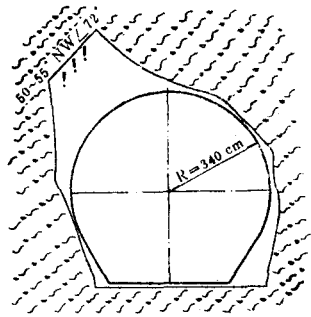


图5 3+423剖面

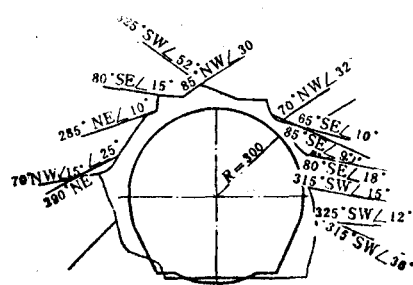


图6 5+490剖面

三、引水隧洞的反馈设计

所谓反馈设计，就是将本工程典型洞段，按“围岩工程地质条件分类”（表1）设计的成果，反馈至《水电地下工程围岩分类》（以下简称《分类》），将其设计成果与原设计成果进行比较，以论证《分类》的实用性。

1. 典型洞段选择

1985年9月本工程引水隧洞开挖全线贯通，从已有资料中选取五个典型剖面，作为反馈设计的典型洞段，其特性见表3。

在典型洞段的反馈设计中，根据8号探洞的声波测试、6号探洞的压水试验，以及

相应的室内岩石力学试验等资料, 施工地质剖面图和洞内地质测量统计资料等, 编制了“典型洞段围岩特性表(表3), 同“水电地下工程详细围岩分类表”(表4)相对应, 从而判定典型洞段的围岩类别, 表3中, 岩体体积节理数 $J_v = J_{v1} + J_{v2} + J_{vn}$, 其中 J_{v1} …… J_{vn} 为每组结构面在单位长度的系数; 结构面强度系数 $K_f = \text{结构面摩擦角}/\text{岩石摩擦角}$, 可由表5确定; 粗糙度 $R = \text{结构面迹线长}/\text{结构面剖面长}$; 围岩强度应力比(围压比) $S = \sigma_1/\gamma H$, σ_1 为最大主应力值, γ 为岩体容重, H 为洞体埋深; 其它参数均为洞内实测值或工程布置特性值。

表3 典型洞段围岩特性表

数值	项 目				
	典 型 洞 段				
典型洞段桩号(m)	1+327~ 1+358	1+517~ 1+560	2+300~ 2+510	3+263~ 3+462	5+483~ 5+490
洞室埋深(m)	300	300	740	830	130
岩石纵向波速 V_{pr} (m/s)	3400	3900	5000	1000	3000
岩体纵向波速 V_{pm} (m/s)	2920	3620	4900	750	2530
完整性系数 $K_v = (V_{pm}/V_{pr})^2$	0.76	0.86	0.96	0.59	0.73
裂 隙 组 数	2	4	3	断层带	3
裂 隙 数(m/m)	8	1.3	2.1	断层带	5
裂隙间距 a (cm)	20	100	200	1000	60
结构面延伸长度(m)	>10	<3	<3	>10	<3
结构面粗糙度 R	1.05	1.04	<1.03	>1.06	1.05
结构面特性	平、光	平、粗	平、粗	平、光	平、粗
裂隙开度(充填物厚)(mm)	0.8	<0.5	<0.5	0.9	<0.5
充 填 物	泥	无	无	岩屑	无
风 化 程 度	微	未	未	微	未
岩体体积节理数 J_v (条/m ³)	30	5	4	>30	15
结构面强度系数 K_f	0.2	0.8	0.8	0.2	0.8
地下水流量 q (l/min)	0.5	0	0	848.4	0
压 力 水 头(m)	0	0	0	60	0
结构面走向与洞轴夹角(度)	63	70	66	70	30
结构面倾角(度)	63	70	72	50	60
主应力与洞轴夹角(度)	60	60	15	15	/
围压比 $S = \sigma_1/\gamma H$	2.6	1.6	1.1	0.95	/
洞室尺寸(m)	6.8	7.4	7.4	6.8	5.8
洞室尺寸与结构面间距比	34	7.4	3.7	113	9.7

2. 典型洞段的反馈设计

(1)方法 典型洞段的反馈设计按《分类》进行, 将表3中的数据填入地下工程围岩判定表中(表6), 根据表4中的各项参数评分标准, 逐项评分并计算出总评分。总评分=地质基础分+地质修正分+工程修正分, 其中后两项均为负值或零。以总评分与各类围岩的评分标准对比, 即可确定各典型洞段的围岩类别。

以1+517~1+560m洞段为例, 作反馈设计, 以说明其方法。

将该段的各项参数(见表3)填入表6;

据表6中各项参数, 于表5对应查出相应的评分值;

根据分项得分计算总评分为: 洞顶78分, 边墙80分。对应表7中围岩类别评分标准, 即可得知该段为Ⅰ类围岩。

表4 水电地下工程详细围岩分类表

地质因素评分	岩石强度	单轴饱和抗压强度 R_b (MPa)	<100	100~60	60~30	30~15	15~5							
		点荷载强度 I (MPa)	<5.5	5.5~3.3	3.5~1.7	不适用	不适用							
	岩体完整性	回弹值 γ	<45	45~35	35~25	25~15	<15							
		岩石纵速度 V_{pr}	<5200	5200~4200	4200~3400	3400~2500	2500~1700							
	完整性	评分	硬岩	30	30~25	25~10	15~10	10~0						
		软岩												
	完整性	完整性系数 K_v	1~0.9	0.9~0.75	0.75~0.45	0.45~0.2	<0.2							
		岩石质量指标 RQD (%)	100~90	90~75	75~50	50~25	<25							
	完整性	体积节理数 J_v (节理条数/ m^3)	<1	1~5	5~15	15~30	>30							
		评分	硬岩	40~36	36~30	30~18	18~8	<8						
完整性	软岩	25~22.5	22.5~19	19~11	11~5	<5								
	延伸长度 (m)	<3		3~10	>10									
结构面状态	评分	硬岩	6	3	0	0								
	软岩			3										
结构面状态	结构面强度系数 K_f (从表5查得)	<0.8	0.8~0.6	0.6~0.4	0.4~0.2	<0.2								
	评分	硬岩	24	24~18	18~12	12~6	0							
结构面状态	软岩	12	12~9	9~6	6~3	0								
	活动状态	干燥	微量渗水	滴水	流水	大量流水和涌水								
地下水	水重 (Ymin/10m洞段)	0	<10	10~25	25~125	<125								
	压力水头 (m)				或10~1000	或<100								
地下水	评分	硬岩	$K_v > 0.75$	0	-0	0	-2	0	-5	0	-10			
			$K_v = 0.45 \sim 0.75$	0	-2	0	-5	-2	-8	-2	-15			
			$K_v = 0.2 \sim 0.45$	0	-5	-2	-6	-4	-15	-6	-18			
			$K_v < 0.2$	0	-8	-4	-10	-6	-10	-8	-20			
地质构造	构造部位或构造背景	构造变动	褶皱				紧密褶皱	断裂						
			翼部	轴部		上构造线	#构造线	临近带	影响带					
地质构造	构造部位或构造背景	构造变动	翼部	背斜	向斜					上构造线	#构造线	临近带	影响带	
				上轴向	#轴向	上轴向	#轴向							
地质构造	构造部位或构造背景	构造变动	翼部	0~4	0~6	4~3	4~8	6~10	4~8	8~12	6~8	8~12		
				评分	0	0~4	0~6	4~3	4~8	6~10	4~8	8~12	6~8	8~12
工程因素修正评分	结构面方位	主要结构面走向与洞室轴线夹角	>60°				30°~60°				<30°			
		主要结构面倾角	>70°	45°~70°	20°~45°	<20°	>70°	45°~70°	20°~45°	<20°	<70°	45°~70°	20°~45°	<20°
	结构面方位	洞顶	0	-2	-5	-10	-2	-5	-10	-12	-5	-10	-12	-12
		侧墙	-2	-5	-2	0	-5	-10	-2	0	-10	-12	-5	0
	地应力方位	最大主应力方向与洞轴线夹角	<30°				30°~60°				>60°			
		围岩强度应力比					>4	2~4	<2					
	地应力方位	评分	0				0	-2	-5	0				
		洞室尺寸与结构面间距比	<2.5		2.5~10		10~50		50~100		>100			
	洞室尺寸	评分	0		-1		-3		-5		-6			
		洞室尺寸	0		-1		-3		-5		-6			

表5 结构面强度系数K_r

结构面性质	粗糙度		明显台阶或起伏粗糙								
	张开度或充填厚(mm)		<0.5				0.5~5				>5
面性	粗糙度		无		岩屑		粘土				
	未	微	未~微	弱	未~微	弱	未~微	弱	未~微	弱	
状	干燥	1	0.9	0.6	0.8	0.5	0.6	0.5	0.35	0.25	0.2
	有硬岩	1	0.9	0.5	0.8	0.4	0.4	0.3	0.25	0.2	0.15
	水软岩	0.9	0.8	0.4	0.7	0.3	0.3	0.2	0.15	0.1	0.1

结构面性质	粗糙度		起伏光滑或平直粗糙						平直稍粗糙			平直光滑								
	张开度或充填厚(mm)		<0.5		0.5~5		>5	<0.5		>0.5		<0.5	>0.5							
面性	粗糙度		无		岩屑		粘土		无		岩屑		粘土							
	未	微	未~微	弱	未~微	弱	未~微	弱	未	微	未~微	弱	未~微	弱						
状	干燥	0.8	0.7	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.25	0.2	0.65	0.6	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.25	0.20	
	有硬岩	0.7	0.6	0.4	0.3	0.3	0.25	0.2	0.15	0.15	0.5	0.4	0.2	0.15	0.2	0.15	0.15	0.20	0.15	0.15
	水软岩	0.6	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.15	0.1	0.10	0.4	0.3	0.15	0.1	0.15	0.1	0.10	0.1	0.10	0.10

表6 地下工程围岩分类判定表

地质基础评分	岩石强度	R _b =60MPa , V _{pr} =3900km/s								25分
	岩体完整性系数	K _v =0.86 , J _v =5								36分
	结构面	组别	条数	间距(cm)	长度(m)	粗糙度	张开度(mm)	充填物	风化	K _r
	主要节理	1	1.3/m	100	<3	1.04	<0.5	无	未	
地质修正分	地下水	活动状态: 水量 0 l/mm(10m段) 压力水头 0 米 K _v =0.86								0分
	地质构造	构造部位 无								
工程修正评分	结构面方位	结构面走向与洞轴夹角 70° 结构面倾角 70°							洞顶 -2分 边墙 -5分	
	洞室尺寸与结构面间距比	洞室尺寸: 7.4m 结构面间距: 1.0m = 7.4							-1分	
	地应力	最大主应力方向与洞轴夹角 60° 围岩强度应力比 1.6							-5分	
综合	总评分	地质基础(91)分+地质修正(0)分+工程修正							洞顶(-13)分 边墙(-11)分	78分 80分

从表7中可以看出,各典型洞段的反馈设计与原设计结果完全吻合。

(2) 反馈设计成果分析 从表7中的对比可看出,《分类》在水工隧洞的设计

与施工中是可以推广应用的,同时亦论证了渔子溪二级水电站引水隧洞设计的合理性。

表7 原设计与反馈设计比较表

围岩类别(类)	I	II	III	IV	V	
评分标准(分)	100~91	90~71	70~51	50~31	<30	
典型洞段	1+327~ 1+358	1+517~ 1+560	2+300~ 2+510	3+263~ 3+462	5+483~ 5+490	
总评分	洞顶	32	78	98	4	52
	边墙	34	80	95	6	57
判定类别(类)	IV	II	I	V	III	
原设计类别(类)	IV	II	I	V	III	

按《分类》进行设计须考虑工程地质条件、工程布置特性参数、地下水活动参数及地应力等综合因素;与原只按单一的工程地质条件定性描述法分类相比有实用性。按《分类》进行设计的可靠性,取决于围岩特性指标的准确性。

在反馈设计中所采用的典型洞段围岩特性指标,除地应力资料外,均为实测。地应力取自渔子溪一级电站实测资料。由于两个电站相距很近(见图1),都在龙门山“华夏系”构造带上,且洞内岩爆发生的部位及形态相似。故采用渔子溪一级地应力资料,这一项引起的围岩类别判定误差为2~5%。

四、结 语

《水电地下工程围岩分类》是我国目前比较完善的围岩分类,其主要特点是:

- 1.简单、明确;既有工程地质条件的定型描述,又有便于区分围岩类别的定量指标,一定程度上消除或减少了“人为”因素,通用性较强。
- 2.各项岩石或岩体的特性指标,可通过简易的测试手段取得。
- 3.按《分类》进行隧洞设计与施工有简易快速的优点。是解决快速施工,降低工程成本的有效手段之一。

二滩水电站已列入“七五”计划

据悉,国家计委已复函四川省计经委、水利电力部。国家计委向国务院报送的《关于四川二滩水电站建设有关问题的请示》,业经国务院同意、国家计委复函主要内容称:(一)同意将四川二滩水电站补充列入“七五”和一九八七年计划,由水电部与四川省合资建设。电站装机容量300万kW,保证出力100万kW,年发电量162亿度。电站建成后就近向渡口、西昌地区及四川电网供电。从施工准备开始至第一台机组发电,工期十年,十二年半全部竣工。(二)二滩水电站计划利用部分世界银行贷款,工程所需国内资金由水电部承担60%,四川省承担40%,水库淹没补偿和移民安置工作,由四川省人民政府负责。该电站“七五”期间所需投资已分别由四川省和水电部按原定数目筹集,一九八七年先列准备项目,进行修路、架桥等施工准备工作,所需投资、材料全部由四川省安排。(三)二滩水电站建设必须认真贯彻改革精神,决定组建二滩水电站开发公司,实行计划单列。由公司负责项目建设、资金筹集和偿还。工程采取公开招标、投标的方式进行。