

[文章编号] 1005-9539(2001)01-0093-05

# 锦屏水电站坝区绿片岩结构及力学特性研究

邓荣贵<sup>1</sup> 张倬元<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031; 2. 成都理工学院)

[摘要] 根据室内外测试资料,对锦屏水电站坝区绿片岩的分布、微观结构和物理力学特征,以及坝区高陡斜坡变形破坏及稳定性的影响进行了分析,获得的认识为该水电站工程可行性论证提供了必要资料。

[关键词] 绿片岩;力学特征;结构;高陡坡

[分类号] TU452 [文献标识码] A

拟建的锦屏水电站,位于西雅砻江大河湾解放沟至普斯罗沟峡谷河段,河流总体流向N28°E。该水电站为雅砻江下游五级开发方案的龙头梯级,初步设计为混凝土拱坝,坝高325 m,总库容和有效库容分别为 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $60 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,总装机容量 $300 \times 10^5 \text{ MW}$ 。该水电站不仅本身的水能经济指标十分优越,它的建成还可大大增加雅砻江下游梯级及金沙江、长江各梯级水电站的保证。坝区岩体因所处的特殊地形及构造环境,在经受多期多方位的强烈构造作用的同时,还经受了区域动力变质作用,其中石灰岩中的炭质、泥质灰岩夹层或透镜体变质为绿片岩。据初步勘测结果发现,绿片岩对斜坡的变形破裂、坡体的稳定性及该河段建坝适宜性起着一定的控制作用,其发育已成为该水电站重大的工程地质问题之一。因此,对坝区绿片岩的空间分布特征、结构特征和物理力学特性进行研究是该水电站可行性论证的重要内容之一。

## 1 坝区地层岩性及构造基本特征

坝区地层以三叠系中、下统的杂谷脑组的中、下段( $T_{2-3z}$ )地层为主,岩性主要为绿片岩、大理岩和砂板岩。按沉积时代将绿片岩、大理岩、砂板岩定名第一层( $T_{2-3z}^1$ )、第二层( $T_{2-3z}^2$ )和第三层( $T_{2-3z}^3$ ),其中第一层分布于河床50 m以下,对坝段高陡斜坡影响不大。据第二、第三大层的颜色、结构及工程地质特征的差异性,又将大理岩分为8个小层( $T_{2-3z}^{2(1)} - T_{2-3z}^{2(8)}$ ),砂板岩分为6个小层( $T_{2-3z}^{3(1)} - T_{2-3z}^{3(6)}$ )。大

理岩中的第一小层和第二小层是钙质绿片岩夹大理岩,埋深大于20 m,对斜坡稳定性没有直接影响。位于斜坡中、下部的第三、第五及第七小层岩性较纯,为中厚—厚层状大理岩及条纹状大理岩,岩石坚硬而隐微裂隙发育,其单轴抗压和抗拉强度并不高(23.5~45.0 MPa和3.69~5.48 MPa);第四、第六及第八小层以灰白色大理岩为主,内含灰黑色薄层—中厚层状炭质大理岩和透镜状或薄层状绿片岩。对坝区斜坡变形及稳定性起一定控制作用的断层主要有N44°E/SE∠72°和N48°E/SE∠78°的 $F_5$ 和 $F_8$ ;裂隙主要有N51°E/SE∠68°,N45°E/SE∠44°和N85°W/SW∠84°的优势面组。炭质大理岩及绿片岩透镜体或夹层,构成了右岸顺倾斜坡的相对软弱层和左岸反倾斜坡的软弱基座,与断层及裂隙共同作用决定了斜坡的稳定性及建高拱坝的适宜性。因此,本文对第四、第六及第八小层中的绿片岩分布及工程地质特征进行研究。

## 2 绿片岩分布及其特征

### 2.1 绿片岩在斜坡中的分布特征

据实测资料分析,绿片岩具有如下分布特征:(1)透镜体或夹层状绿片岩沿岩层面分布。(2)各平洞中绿片岩透镜体或夹层有相对集中的分布趋势,集中分布带间距3.5~23.5 m。绿片岩透镜体随洞深出现的频度大小次序为 $T_{2-3z}^{2(4)} > T_{2-3z}^{2(8)} > T_{2-3z}^{2(6)}$ 。(3)总体来看,以普斯罗沟PI勘探线为中心, $T_{2-3z}^{2(4)}$ 中绿片岩透镜体相对集中分布带平均间距自上游至

[收稿日期] 2000-11-19

[作者简介] 邓荣贵(1961—),男,博士,副教授,地质工程专业。(E-mail:fxm@cdit.edu.cn)

下游有由小变大的趋势,面积密度则有由大变小的趋势,其他层位的绿片岩分布没有明显的规律性。(4)绿片岩出露的面积率和体积率的大小均为  $T_{2-3}^{2(4)}z > T_{2-3}^{2(6)}z > T_{2-3}^{2(8)}z$ , 这表明  $T_{2-3}^{2(4)}z$  层中虽然从底部到顶部都不同程度地分布有绿片岩透镜体,但其截面积和体积所占的比例较小,即分布没有其他层位集中。

2.2 绿片岩透镜体的形态特征

据测绘资料整理所得结果可知,绿片岩透镜体具有如下特征:(1)绿片岩透镜体厚度一般小于 20 cm,而  $T_{2-3}^{2(4)}z$  中绿片岩夹层的厚度多为 50~70 cm。(2)各层绿片岩的分维值  $D_f$  的大小为: $T_{2-3}^{2(4)}z > T_{2-3}^{2(6)}z > T_{2-3}^{2(8)}z$ , 这表明  $T_{2-3}^{2(4)}z$  层中绿片岩形状更趋规则(方形  $D=1.0$ ,圆形  $D=1.16$ ),而  $T_{2-3}^{2(6)}z$  层中

绿片岩形状较不规则(见表 1)。(3)绿片岩的起伏性表明,以平直和较平直为主,两者之和占总数的 50% 以上。

由此可知,绿片岩在各层位的分布不均,形状各异,并随层位和构造部位而变,这与原始沉积环境不稳定、变质过程中物质迁移的差异性等因素有关。

3 绿片岩矿物成分及结构特征

据偏光镜和扫描电镜观测,绿片岩有两种类型,分别为绢云母-绿泥石千枚岩型和石英-方解石-绿泥石片岩型,其矿物成分及结构特征如表 2 所列及如图 1 和图 2 所示。

表 1 地层中绿片岩分布特征

Table 1 Distribution of greenschist lens in different strata

编号及层段/m	平均厚度 /m	平均间距/m	连通率	平均连通率	分维数	面积率	体积率	层位及颜色
PD <sub>1</sub> 0~185	14.4	1.35	0.44		0.76	0.11	0.048	
PD <sub>3</sub> 103~197	5.29	1.36	0.27		0.58	0.10	0.034	
JD <sub>1</sub> 30~111.4	1.33	4.28	0.46	0.41	0.76	0.03	0.010	(4)纯绿色
JD <sub>5</sub> 26~87.2	1.08	3.39	0.46		0.90	0.03	0.004	
JD <sub>3</sub> ~53.9	3.42	1.64	0.33		0.96	0.12	0.024	
PD <sub>7</sub> 16~162.1	4.05	8.6	0.42	0.39	0.88	0.07	0.02	(6)浅绿色
JD <sub>3</sub> 44~181.3	3.88	2.55	0.36		0.63	0.16	0.066	
PD <sub>14</sub> 125~177	30.6	1.22	1.0	1.0	0.95	0.9	0.80	(8)灰绿色

2 绿片岩矿物成分及结构构造特征

Table 2 Mineral composition and structure of greenschist

名称	肉眼观察结果	薄片镜下观察结果
绢云母-绿泥石千枚岩	主要矿物为绢云母、绿泥石;鳞片状变晶结构;片理构造	主要矿物:绿泥石、绢云母占 70%;次要矿物:石英、方解石、黄铁矿占 29%。粒状,矿物定向排列不明显
石英-方解石-绿泥石片岩	主要矿物为黑云母、方解石;鳞片粒状变晶结构;片理构造	主要矿物:绿泥石、方解石、石英、黑云母占 90%;次要矿物:绿帘石、斜长石占 1%;副矿物:黄铁矿占 1%。矿物定向排列明显,呈条带状分布

由此可见,绢云母-绿泥石千枚岩型绿片岩含绿泥石较多且片理特别发育,吸水后的膨胀变形性质强及泥化性质明显。而石英-方解石-绿泥石片岩型绿片岩所含矿物呈粒状,且有微裂隙发育。

石英-方解石-绿泥石型绿片岩主要分布在第四和第六小层中,绢云母绿泥石型绿片岩主要分布在第八小层中,左岸第 IV 勘探线下游的第八小层中特别发育。这也是岸坡深部裂缝最发育的部位。



图 1 绢云母绿泥石型绿片岩微观结构特征  
Fig. 1 Microstructure of greenschist

4 绿片岩力学特性

4.1 绿片岩单轴和三轴压缩下的力学特性

绿片岩单轴和常规三轴压缩下的全过程变形曲线如图 3 及图 4 所示。显然,绿片岩具有下列特征:(1)绿片岩在单轴压缩下的变形呈似线弹性,并呈脆性破坏。(2)绿片岩三轴压缩下的变形具有明显的应

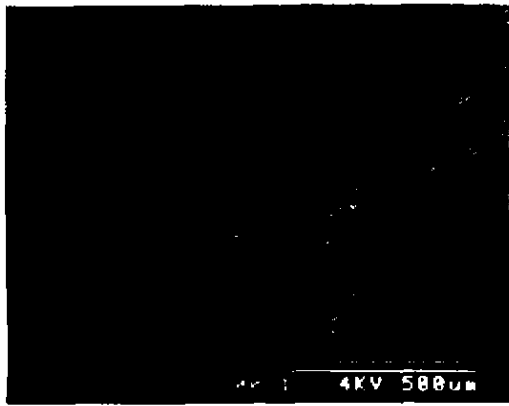


图 2 石英方解石绿泥石型绿片岩微观结构  
Fig. 2 Microstructure of greenschist

变强化和应变软化特征。围压较小时,应力降低值较大,随着围压的增加应力降低值变小,并趋于理想弹塑性变形形态。位于斜坡内的绿片岩当河谷下切侧向卸载后,其受力为单向或双向状态,强度很低,容易破裂。

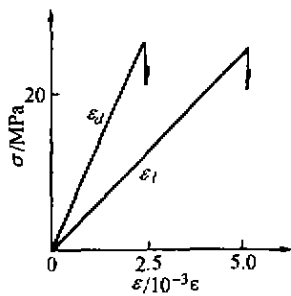


图 3 绿片岩单轴压缩变形曲线  
Fig. 3 Deformation curve under uniaxial compress

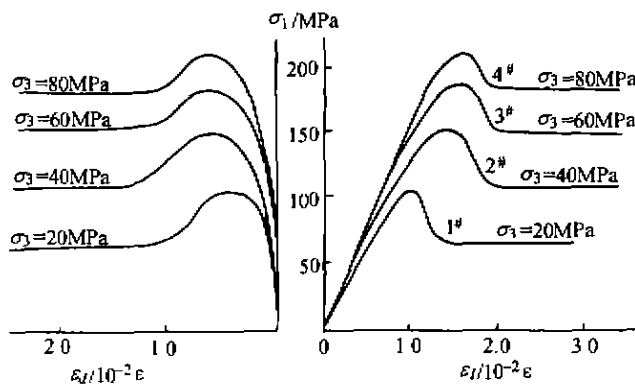


图 4 绿片岩三轴全过程变形曲线  
Fig. 4 Deformation curve under triaxial load

4.2 围压效应及加载路径的影响

绿片岩力学特性对围压特别敏感。根据室内试验资料整理结果表明,保持围压  $\sigma_3$  不变,加轴压  $\sigma_1$  的加载路径下,绿片岩压缩峰值强度  $\sigma_c$  及残余强度  $\sigma_r$  和变形模量  $E_{50}$  与围压具有下列关系:

$$\begin{aligned} \sigma_c/\text{MPa} &= 82.8 + 1.638\sigma_3 & (r = 0.99) \\ \sigma_r/\text{MPa} &= 34.4 + 1.8586\sigma_3 & (r = 0.996) \\ E_{50}/\text{MPa} &= 21.6 + 0.0096\sigma_3 & (r = 0.93) \\ \tau/\text{MPa} &= 0.357 + \tan 87.7^\circ \sigma & (r = 0.968) \end{aligned}$$

保持轴压  $\sigma_1$  不变,卸围压  $\sigma_3$  的加载路径下,绿片岩压缩峰值强度  $\sigma_c$  及残余强度  $\sigma_r$  和变形模量  $E_{50}$  与围压  $\sigma_3$  具有下列关系:

$$\begin{aligned} \sigma_c/\text{MPa} &= 36.6 + 2.09\sigma_3 & (r = 0.964) \\ \sigma_r/\text{MPa} &= 13.5 + 1.974\sigma_3 & (r = 0.957) \\ E_{50}/\text{MPa} &= 10.76 + 0.047\sigma_3 & (r = 0.99) \\ \tau/\text{MPa} &= 14.24 + \tan 20.6^\circ \sigma & (r = 0.963) \end{aligned}$$

由此可见,绿片岩具有下列力学特征:(1)不论在保持围压加轴压,还是保持轴压卸围压的加载路径下,其压缩强度和变形模量均随围压增加,并有较好的相关性。(2)当围压接近零时,保持围压加轴压下的压缩强度和变形模量均比和保持轴压卸围压下的压缩强度和变形模量大近 1 倍,但压缩强度和变形模量随围压增加的速度后者比前者大。(3)两种加载条件下,内摩擦角相差约 4 倍,而内聚力相差近 40 倍。(4)变形模量总体上较低,并且保持轴压卸围压下的变形模量为保持围压加轴压下的变形模量的 50% 左右。河流下切或坝基、地下洞室开挖时,斜坡岩体受到的应力状态与保持轴压卸围压的试验加载应力状态接近,因此选用绿片岩力学参数时应参考保持轴压卸围压的试验资料。

4.3 绿片岩的时效变形特征

对绿片岩进行单轴压缩和直剪的蠕变试验,其中压缩蠕变试样尺寸为  $\varnothing 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ,剪切蠕变试样尺寸为  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。其压缩蠕变叠加曲线如图 5 所示。

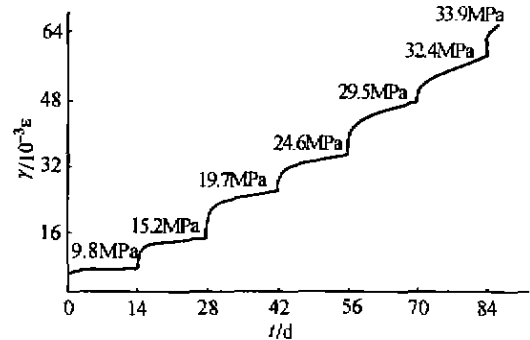


图 5 绿片岩压缩蠕变叠加曲线  
Fig. 5 Compressive creep superposition curve

显然,绿片岩除有瞬时变形外,还有明显的减速蠕变和等速蠕变特性。利用拟合分析得到绿片岩的压缩蠕变方程为:

$$\epsilon(t) = \sigma \cdot (8.237 \cdot 10^{-5} + 1.154 \cdot 10^{-6}t - 3.053 \cdot 10^{-5} \times [1 - \exp(1.636t)]) \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为压应力(MPa),  $t$  为时间(天),  $\epsilon(t)$  为应变( $\epsilon$ )。利用蠕变曲线作出其等时应力应变曲线, 由此确定的极限长期单轴抗压强度为 1.92 MPa。绿片岩的剪切蠕变叠加曲线如图 6 所示。显然, 绿泥石的剪切蠕变主要表现为减速蠕变和等速蠕变。利用拟合分析得到绿片岩的剪切蠕变方程为:

$$\gamma(t) = \tau \left\{ \frac{1}{4498.2 - 708.2t} + \frac{1}{7659.4 - 1067.8t} \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{766 - 1068t}{2006 - 224t}\right) \right] \right\} \quad (2)$$

式中:  $\gamma(t)$  为剪应变( $\epsilon$ ),  $\tau$  为剪应力(MPa),  $t$  为时间(天)。利用等时应力应变曲线得到的抗剪强度与时间的关系为:

$$\tau(t) = 3.6 + 9.27 \exp(-0.0732t) \quad (3)$$

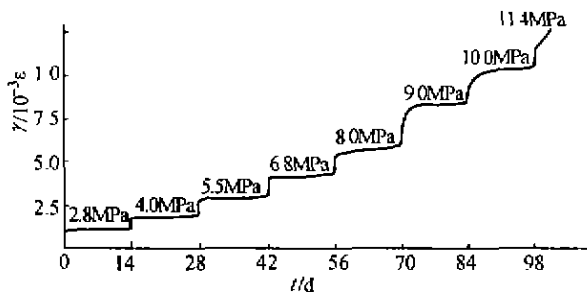


图 6 绿片岩剪切蠕变叠加曲线  
Fig. 6 Shear creep superposition curve

因此, 绿片岩的极限长期强度为 3.6 MPa; 显然, 与相同正应力下的瞬时强度相差 3.5~6.5 倍。坝区岸坡岩体常沿绿片岩夹层滑动失稳, 就是因为绿片岩在上覆岩层重力荷载作用下随时效变形的积累, 抗剪强度降低的缘故。

#### 4.4 不同结构绿片岩力学特性的差异

以上为绢云母绿泥石型绿片岩的力学特性。石英方解石绿泥石型绿片岩的单轴、常规三轴和蠕变试验结果表明, 在相同受力条件下石英方解石绿泥石型绿片岩的力学特性与绢云母绿泥石型绿片岩的力学特性在变化趋势上近似, 但也存在下列差异: (1) 前者在单轴压缩下的变形参数略比后者大, 其破坏时的脆性更明显。(2) 前者的强度参数和变形参数对围压更敏感, 但相关性略差。(3) 前者的时效变形不如后者明显, 即流变参数较大。(4) 饱水试验结果显示前者的软化特性不如后者明显。由于上述差异, 河流急剧下切时斜坡法向应力降低切向应力升高, 作为夹层或透镜体状的绿片岩容易变形和破裂, 其两侧相对坚硬岩层内出现局部拉应力而使斜坡岩体产生渐进性或者叫累进性破裂, 逐渐形成目前斜坡

中揭露的宏观拉张性裂缝和剪张性裂缝。

## 5 结 论

a. 绿片岩夹层或透镜体沿层分布, 且有相对集中分布的趋势, 其中  $T_{2-3}^{2(4)}$  层中的绿片岩透镜体或夹层最发育,  $T_{2-3}^{2(8)}$  次之,  $T_{2-3}^{2(6)}$  最不发育。

b.  $T_{2-3}^{2(4)}$  和  $T_{2-3}^{2(6)}$  层中的绿片岩多为透镜体, 而  $T_{2-3}^{2(8)}$  层中的绿片岩多呈夹层形式赋存于大理岩中。绿片岩透镜体或夹层的单层厚度多数小于 20 cm, 少数 50~70 cm。

c. 镜下鉴定结果表明, 坝区绿片岩有两类, 即绢云母-绿泥石千枚岩和石英-方解石-绿泥石片岩, 其结构具有明显的各向异性。

d. 绿片岩的力学特性具有明显的围压效应, 极限长期抗剪强度较低, 这是斜坡沿绿片岩透镜体或夹层蠕滑失稳的岩体力学条件。绿片岩变形模量较低, 作为坝区反倾斜坡基座的一部分, 其较大的变形是坝区左岸斜坡中部产生深部剪张裂隙形成剪张裂缝的重要原因之一。

e. 相同受力条件下石英方解石绿泥石型绿片岩的力学特性与绢云母绿泥石型绿片岩的力学特性在变化趋势上近似, 但前者在单轴压缩下的变形参数略比后者大, 其破坏时的脆性更明显, 强度参数和变形参数对围压更敏感, 时效变形性也稍差, 软化特性也不如后者明显, 这是岸坡深部裂隙分布不均的重要原因之一。

### [参 考 文 献]

- [1] 李先炜. 岩体力学性质[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
- [2] 邓荣贵. 锦屏高边坡稳定性及高拱坝适宜性研究[D]. 成都: 成都理工学院档案馆, 1994.
- [3] 王士天, 黄润秋, 李渝生, 等. 雅砻江锦屏水电站重大工程地质问题[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1998.
- [4] Paterson M S. Experimental Rock Deformation - The Brittle Field[M]. Berlin: Springer-Verlag. New York: Heidelberg, 1978.
- [5] 丁多文. 岩体结构分形及应用研究[J]. 岩土力学, 1993, 14(3): 67-71.
- [6] 金济山, 石泽全, 方华, 等. 循环加卸载对岩样失稳破裂的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(4): 384-389.
- [7] Sangha C M, Dhir R K. Influence of time on the strength, deformation and fracture properties of the Lower Devonian sandstone [J]. Int Journal of Rock Mech and Min Sci, 1972, 9(3): 343-354.

- [8] Rutter E H. On the creep testing of rocks at constant stress and constant force[J]. *Int Journal of Rock Mech and Min Sci*. 1972, 9(2): 191—196.
- [9] Miller T W, Cheatham J B. A new yield condition and hardening rule for rocks[J]. *Int Journal of Rock Mech And Min Sci*. 1972, 9(4): 453—474.
- [10] Pratt H R, Black A D, Brown B W S, *et al.* The effect of specimen size on the mechanical properties of unjointed diorite[J]. *Int Journal of Rock Mech And Min Sci*, 1972, 9(4): 513—530.
- [11] Demo T M, Zhang W H, Valliappan S. Analysis of random anisotropic damage mechanics problems of rock mass, Part I [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1990, 23(2): 91—112.
- [12] Demo T M, Zhang W H, Valliappan S. Analysis of random anisotropic damage mechanics problems of rock mass, Part II [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1990, 23(4): 241—259.

## ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF GREENSCHIST IN THE DAM SITE OF THE JINPING POWER STATION

DENG Rong-gui<sup>1</sup>, ZHANG Zhuo-yuan<sup>2</sup>

(1. *Southwest Jiaotong University, China*; 2. *Chengdu University of Technology*)

**Abstract:** The distribution, minuteness structure and mechanical properties of greenschist in the dam site slope of the Jinping power station are analyzed based on the test and investigation in fields in this paper. Their influence on the deformation, fracture and stability of the high-steep slope are analyzed. Greenschist is distribute in marble rock with the shape of interlayer or lens. There are two types of greenschist in minuteness structure, that is, sericite-chlorite-phyllite and quartz-calcite-chlorite schist. Their deformation and strength property are related to confining pressure and time. Their existence in the dam site slope is one of the important factors of fracture of the rockmass in the slope. The conclusions got in this paper are needed for the feasibility study of the power station.

**Key words:** greenschist; mechanic property; structure; high-steep slope; stability