

# 长江小南海水利枢纽坝基弱风化岩体 工程力学性质研究及可利用探讨

李维树<sup>1,2</sup>, 谭 新<sup>1,2</sup>, 黄志鹏<sup>1,2</sup>

(1. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 2. 长江科学院 重庆岩基研究中心, 重庆 400014)

**摘要:** 小南海水利枢纽为长江上第三座大 I 型水电工程, 坝基为典型的红层软岩, 岩体风化层次分明。坝基覆盖层及强弱风化带平均厚约 18 m, 其中弱风化带平均厚约 6 m, 若全部挖除, 相当于总开挖深度的 1/3, 开挖工程量巨大。从坝区大范围岩体波速的分布、工程岩体质量分级、岩体变形特性及强度特性等方面对比研究弱风化岩体与微风化岩体的差别, 探讨弱风化岩体作为建基面的可能性。本阶段的试验研究结果说明, 弱风化与微风化岩体均为 IV 级, 弱风化岩体的岩石力学参数与微风化岩体差别不大, 具备作为建基面的工程力学条件。

**关键词:** 岩石力学; 长江小南海水利枢纽; 岩体质量分级; 岩石力学特性; 弱风化岩体利用; 建基面

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)增 2 - 3899 - 06

## DISCUSSION ON MECHANICAL PROPERTY AND UTILITY OF WEAKLY WEATHERED ROCK MASS FOR ON YANGTZE RIVER XIAONANHAI HYDROPOWER PROJECT

LI Weishu<sup>1,2</sup>, TAN Xin<sup>1,2</sup>, HUANG Zhipeng<sup>1,2</sup>

(1. *Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China*; 2. *Chongqing Rock Foundation Research Center, Yangtze River Scientific Research Institute, Chongqing 400014, China*)

**Abstract:** Xiaonanhai Hydropower Project is the third large grade I hydropower project on Yangtze River. Its rock foundation is composed of typical red beds, which have been weathered and demarcated clearly. The average thickness of the overburden and strongly weathered zone is 18 m, and the average thickness of the weakly weathered zone is about 6 m. If all the weakly weathered rock masses are excavated, the excavating depth will be equal to one third of the total one. Obviously, the excavating volume is huge. The wave velocity distribution of rock mass in a large area of dam site, engineering classification of rock mass quality, deformation and strength properties of rock mass are analyzed. The differences between weakly and slightly weathered rock masses are researched, and the probability of using the weakly weathered rock mass as foundation plane is discussed. The experimental results of this stage show that the qualities of weakly and slightly weathered rock mass are grade IV, the mechanical parameters of weakly weathered rock mass approach to those of slightly weathered rock mass, and the weakly weathered rock mass can be used as foundation plane.

**Key words:** rock mechanics; Xiaonanhai Hydropower Project in Yangtze River; classification of rock mass quality; mechanical properties of rock; utilization of weakly weathered rock mass; foundation plane

**收稿日期:** 2008 - 05 - 15; **修回日期:** 2008 - 07 - 20

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50639090); 水利部岩土力学与工程重点实验室开发基金资助项目(G07 - 16)

**作者简介:** 李维树(1963 -), 男, 1992年毕业于武汉水利电力学院自动化专业, 现任高级工程师, 主要从事岩土力学试验方面的研究工作。E-mail: lws\_lwslws@163.com

## 1 引言

长江小南海水利枢纽为长江上第三座大 I 型水电工程,是以发电和通航为主的综合性水利枢纽。预可行性研究阶段对其上、中、下坝址进行了比选工作,初步确定为中坝址。中坝址位于重庆市江津区、巴南区和大渡口区三区交汇处的“大中坝”,距重庆市主城区约 40 km。拟建土石坝与混凝土坝相结合的重力坝,最大坝高 36.5 m,坝轴线长约 1.5 km,厂房为河床式,装机容量  $176 \times 10^4$  kW。

本枢纽工程的大坝及主要建筑物以侏罗系上统遂宁组( $J_{3s}$ )地层为主要建基岩体,岩性以砂岩、粉砂岩和黏土岩(泥岩)为主的红层岩,软硬相间,层理较发育,岩体风化层次较为分明,尽管风化厚度不很大,但覆盖层的厚度较大,微风化带以上厚 5~25 m,平均厚度约为 18 m,其中弱风化带的平均厚度在 6 m 左右,若全部挖除,相当于总开挖深度的 1/3。可见弱风化带厚度虽然不大,但所占的比例较大。微风化岩体作为坝基无疑是理想的选择,但弱风化岩体的力学性质是否满足工程的要求值得深入研究。为了经济合理地选择建基面高程,在预可行性研究阶段同步对弱风化岩体开展了大量的试验研究,这是与其他大型水利枢纽所不同之处。

据不完全统计,我国大中型水电工程的坝基选择在微、新岩体上的比例在 85%左右<sup>[1]</sup>,长江葛洲坝水利枢纽是红层岩体作为大坝基础的成功实例<sup>[2]</sup>。但也有相当部分水电工程的建基面全部或者部分选择在弱风化岩体上,如万安水电站<sup>[1]</sup>、里畈水库<sup>[3]</sup>、福建洪口水电站<sup>[4]</sup>、二滩水电站<sup>[5]</sup>等。建基面的选择直接关系到大坝的稳定性、开挖与回填工程量的大小、投资规模等。在成功利用的实践中,黄场一和王造根<sup>[1]</sup>以万安水电站为例说明弱风化岩体的总体形变受控于未风化岩体变形,而渗流条件仍然受控于风化蚀变带,所以弱风化岩体能否作为坝基,控制条件首先应该是渗流条件而不是变形条件,只要防渗条件得到满足,弱风化岩体是可以利用的。沈光伟和杨国亚<sup>[3]</sup>论述了利用部分弱风化岩体作为重力坝建基面的施工处理方法及在施工期间快速而准确地鉴定建基岩体质量的简易测试方法,并得出对于重力坝而言,控制(里畈水库)大坝坝基的主要地质因素是存在于坝基范围内的断层破碎带而不是岩体风化问题。周维垣和杨若琼<sup>[5]</sup>介绍了二滩水电站高拱坝弱风化岩体的利用及加固措施及效果。卢建

平等<sup>[6]</sup>用有序的质量最优分割法对岩体进行弱风化亚带的定量划分。叶长锋等<sup>[7]</sup>论述了风化岩体参数具有垂直分布的规律,可以用线性相关和二项式相关来模拟,并且二项式拟合结果要好于线性拟合,从而为水电工程准确确定建基面高程提供了较为科学的方法。

## 2 工程地质概况

长江小南海水利枢纽坝址区主要出露地层由新至老分别为第四系侏罗系上统遂宁组( $J_{3s}$ )、中统上沙溪庙组( $J_{2s}$ )。其中,遂宁组为大坝主要建坝地层,岩性为黏土岩、粉砂质黏土岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、砂岩等,岩相变化大,厚度不甚稳定,岩体基本质量级别以 IV 级为主。

坝址区右岸岩层倾角较缓,为  $4^\circ \sim 10^\circ$ ,左岸受到构造影响,岩层倾角普遍较陡,为  $65^\circ \sim 75^\circ$ 。坝址区断层和裂隙不甚发育。

坝区共统计剪切带 56 条,大部分剪切程度不充分,以裂隙型层间剪切为主,即剪切不充分的 II 类剪切带共有 43 条,占总统计数的 76.8%;剪切程度较充分的剪切带较少,且多以层间破碎型为主,即剪切充分的 I 类剪切带共有 13 条,占统计数的 23.2%。

透水试验说明,坝区岩体以微、弱透水岩体为主,且中、强透水岩体在强风化带中,弱风化带主要表现为微、弱透水性。由此也说明弱风化岩体具有较好的抗渗性能。

## 3 岩体风化特征

### 3.1 风化类型

根据地质勘察报告,坝址区岩体主要风化类型为碎裂状风化、夹层状风化和砂糖状风化。风化特征如下:

(1) 碎裂状风化。具有垂直分带的特点,从上至下可分为全、强、弱、微风化带。全风化带多风化成碎屑土状,层面不清楚。强风化带结构大部分破坏,风化裂隙很发育,具网状裂隙结构,岩体破碎,颜色变浅,呈灰黄色、浅紫色。弱风化带结构部分破坏,风化裂隙较为发育,颜色变化。微风化带岩体结构基本保持原岩状态,仅局部微张裂隙有一定风化色变现象。

(2) 夹层状风化。由于地层岩性抗风化能力的差异而形成的一种风化现象,硬岩或软硬相间岩体

中软岩夹层多有此种类型发生。

(3) 砂糖状风化。多发生在中~细结构的岩屑长石砂岩中, 由于长石抗风化能力差, 易于风化蚀变, 而中细粒状的石英抗风化强, 岩体长石风化后石英颗粒呈疏松砂糖状。

影响岩体风化的因素主要为岩性的差别、构造作用、地形地貌不同。

### 3.2 风化特征

#### (1) 河床钻孔揭露岩体的风化特征

坝基河床钻孔揭露的风化带厚度统计见表 1, 可见强风化带平均厚度为 2~5 m, 最深处位于左岸船闸区, 厚度为 10.15 m; 弱风化带厚度一般为 2~5 m, 最大为 8.9 m。

表 1 河床钻孔揭露风化带厚度统计

Table 1 Statistics of weathered zone thickness revealed by borehole in river bed

工程部位	钻孔数量/个	强风化带厚度/m	弱风化带厚度/m
船闸区	8	0.00~10.15	0.00~4.90
左岸溢洪道	6	0.00~7.10	0.50~8.90
左岸厂房	8	0.00~4.10	0.00~5.37
过鱼道	4	1.00~1.80	0.50~2.65
右岸电站厂房	9	0.00~3.15	0.00~5.10
右岸溢洪道	3	0.00~3.25	0.00~4.75

#### (2) 两岸坝肩岩体风化特征

左岸岩层多陡倾, 多见三面浑圆、一面陡峭的山丘, 由于岩层陡倾, 在平面上呈软硬相间分布, 差异风化明显, 全强风化带厚 8~15 m, 弱风化带厚 5~10 m; 右岸岩层缓倾, 多见浑圆状山丘, 岩层在平面上缓倾平卧, 风化带垂直分带比较均匀, 全强风化带厚 0~5 m, 弱风化带厚 3~8 m, 局部地段缺失弱风化带。

由于两岸地层陡缓程度明显不同, 左岸岩层的风化程度比右岸大, 强风化带厚度也较右岸大。

## 4 微新岩石物理力学性质

### 4.1 岩块基本力学性质

本阶段共进行了 78 组岩芯样的室内物理力学试验, 取样深度一般大于 15 m, 少量岩芯取样深度为 8~15 m, 基本上为微新岩石。由于岩性较为复杂, 为了便于表达, 将岩石分为砂岩、粉砂岩和黏土岩三大类, 各类岩块力学性质的试验结果见表 2。

砂岩类岩块的软化系数大于 0.75, 属于不易软化岩石, 粉砂岩类和黏土岩类岩块化系数为 0.65~

表 2 岩块力学性质试验结果

Table 2 Testing results of rock block mechanical properties

岩性	变形模量 /GPa	弹性模量 /GPa	天然单轴抗压强度 /MPa	饱和单轴抗压强度 /MPa	软化系数	抗拉强度 /MPa	三轴压缩强度		泊松比
							f	c/MPa	
砂岩类	8.16	9.18	65.30	54.10	0.83	5.28	1.31	8.97	0.15
粉砂岩类	3.78	4.82	23.30	16.60	0.73	1.42	0.85	2.46	0.21
黏土岩类	2.69	3.31	9.00	6.00	0.65	1.29	0.75	2.24	0.34

0.73, 属于易软化岩石。黏土岩类岩块饱和单轴抗压强度为 6.00 MPa, 属于软岩; 粉砂岩类岩块饱和单轴抗压强度为 16.60 MPa, 属于较软岩; 砂岩类岩块饱和单轴抗压强度为 54.10 MPa, 属于中硬岩石。砂岩类各项力学参数明显优于粉砂岩类和黏土岩类岩块。

岩石物理性质试验成果表明, 三大类岩石的颗粒密度为 2.68~2.76 g/cm<sup>3</sup>, 天然块体密度为 2.55~2.62 g/cm<sup>3</sup>, 天然含水率为 1.90%~3.45%, 饱水率为 2.47%~3.82%, 孔隙率为 6.13%~9.46%, 属于中等孔隙率的岩石(成果表略)。

### 4.2 微新岩体力学性质

本阶段在右岸开挖了一条勘探平洞, 对微风化泥质粉砂岩进行了现场岩石力学试验, 试验结果见表 3。

表 3 现场岩石力学试验结果

Table 3 In-situ testing results on rocks

岩性	变形模量 /GPa	弹性模量 /GPa	岩/岩抗剪强度		混凝土/岩抗剪强度		混凝土/岩抗剪强度 /MPa	承载力 /MPa	
			f'	c'/MPa	f	f'			c'/MPa
粉砂岩类	4.48	6.37	0.72	0.63	0.55	1.10	0.76	0.72	≥8.90

## 5 弱风化岩体工程力学性质

### 5.1 声学特性

对河床 42 个勘探钻孔声波测井资料按不同岩性和不同的风化程度分类整理, 统计结果见表 4。可见, 软岩类弱风化岩体波速为 2 040~3 920 m/s, 平均波速为 2 750~2 960 m/s, 微风化岩体波速为 2 140~4 260 m/s, 平均波速为 3 200~3 380 m/s; 硬岩类弱风化岩体波速为 2 860~4 550 m/s, 平均波速为 3 510~3 570 m/s; 微风化岩体波速为 2 700~4 650 m/s, 平均波速为 3 750~3 800 m/s。

表4 各类岩体不同风化程度波速统计

Table 4 Statistics of wave velocity of rock masses with different weathering degrees

岩石类型	风化程度	纵波速度 $V_p/(m \cdot s^{-1})$		波速比
		范围	平均值	
黏土岩	弱风化	2 083~3 922	2 963	0.92
	微新	2 228~4 167	3 204	
粉砂质黏土岩	弱风化	2 041~3 922	2 852	0.89
	微新	2 135~4 167	3 197	
粉砂岩	弱风化	2 532~3 448	2 927	0.87
	微新	2 228~4 255	3 383	
泥质粉砂岩	弱风化	2 083~3 922	2 747	0.85
	微新	2 135~4 167	3 235	
砂岩、细砂岩	弱风化	2 857~4 545	3 570	0.95
	微新	2 817~4 651	3 750	
长石石英砂岩	弱风化	3 246~3 922	3 515	0.93
	微新	2 704~4 651	3 800	

比较可见，各类弱风化岩体平均波速略低于微风化岩体波速，弱风化岩体的平均波速比为 0.85~0.95，表明整个坝区弱风化岩体具有较好的声学特性。

### 5.2 岩体变形特性

弱风化岩体变形和声波测试结果见表 5。砂岩类岩体变形及波速值明显高于粉砂岩、黏土岩类岩体。

表5 弱风化岩体变形和声波测试

Table 5 Testing results of deformation and wave velocity of weakly weathered rock masses

岩性	变形模量/GPa	弹性模量/GPa	纵波波速 $V_p/(m \cdot s^{-1})$
黏土岩类	2.12	3.84	2 981
粉砂岩类	2.92	5.20	3 039
砂岩类	13.64	18.38	4 238

坝址区粉砂岩类和黏土岩类岩体变形模量  $E_0$  与波速之间具有指数函数经验关系，即

$$E_0 = 0.001 5 e^{0.002 4 V_p} \quad (1)$$

式中： $E_0$  为岩体变形模量(GPa)，两者关系曲线见图 1。

根据初步建立的动静对比经验关系，利用本阶段在坝址区进行的大量的钻孔声波测试结果，以测试值的平均值按上述相关关系式推算整个坝址区岩体变形模量，推算结果见表 6。

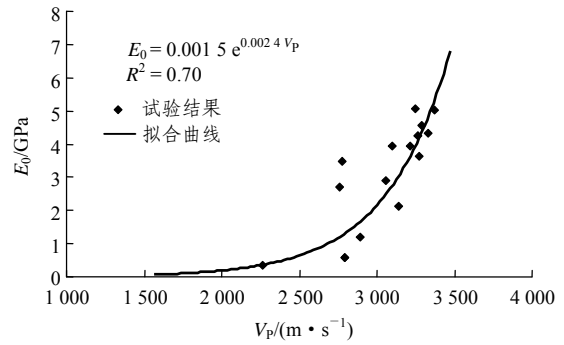


图1 岩体变形模量与波速关系曲线

Fig.1 Relation curve between deformation modulus and wave velocity

表6 坝区岩体变形模量推算值

Table 6 Calculated deformation modulus of rock mass in dam site

岩性	风化程度	波速平均值 $\bar{V}_p/(m \cdot s^{-1})$	计算变形模量/GPa
黏土岩类	弱风化	2 908	1.76
	微风化	3 200	3.57
粉砂岩类	弱风化	2 852	1.53
	微风化	3 309	4.66

可见，黏土类弱风化岩体的计算变形模量为 1.76 GPa，微风化粉砂岩类岩体计算变形模量为 1.53 GPa。与表 5 比较可见，弱风化岩体的计算变形模量低于较完整岩体的变形模量，高于较破碎岩体的变形模量。而微风化岩体计算值与试验值相当，表明初步建立的动静关系基本合理。

比较同类岩体试点波速和钻孔测井波速发现，砂岩类测井波速低于试点波速，表明大范围砂岩的变形参数要低于试验值的平均值，粉砂岩类和黏土类测井波速与较完整试点波速相当，弱风化软岩类大范围的变形参数在试验值附近。因此，弱风化软岩的变形模量取值范围为 1.5~3.0 GPa。

### 5.3 直剪强度参数

#### (1) 岩体本身直剪强度

弱风化黏土岩类和粉砂岩类岩体各进行了 2 组试验，结果见表 7。

试验结果表明，弱风化粉砂岩类岩体本身的抗剪强度参数略低于微风化岩体，弱风化黏土岩类岩体本身的抗剪强度参数略低于弱风化粉砂岩类岩体的抗剪强度参数。虽然黏土岩类未进行对比试验，但从整个坝区岩体的波速可见，其波速范围及平均值与粉砂岩类相近，说明黏土岩类弱风化与微风化岩体抗剪强度参数之间与粉砂岩类岩体具有类似的

表 7 弱风化岩体本身及混凝土与弱风化基岩接触面直剪强度试验成果

Table 7 Direct shear results of weakly weathered rock mass and weakly weathered rock mass-concrete

岩性	完整程度	岩/岩抗剪强度		岩/岩抗剪强度	混凝土/岩抗剪强度		混凝土/岩抗剪强度
		$f'$	$c'$ /MPa		$f'$	$c'$ /MPa	
黏土岩类	较完整	0.65	0.48	0.44	0.64	0.38	0.55
粉砂岩类	较完整	0.70	0.42	0.48	0.94	0.40	0.64
砂岩类	较完整	2.00	2.00	0.85	1.50	1.72	0.69

规律性。

(2) 混凝土与基岩接触面直剪强度

混凝土与弱风化岩体接触面共进行了 5 组原位直剪试验, 结果见表 7。

从混凝土与基岩接触面的破坏形式看, 粉砂岩和黏土岩主要沿接触面以下岩体破坏, 且有一定的起伏差, 表明混凝土与软岩之间主要受岩体的强度控制, 而砂岩主要沿接触面破坏且破坏面平整。

可见, 混凝土与弱风化岩体接触面具有较高的抗剪强度参数。

(3) 剪切带直剪强度特性

在坝区共揭露 56 条剪切带中, 大部分剪切程度不充分, 以裂隙型层间剪切为主。剪切不充分的 II 类剪切带占总统计数的 76.8%, 剪切程度较充分的剪切带较少, 且多以层间破碎型为主, 即剪切充分的 I 类剪切带占总统计数的 23.2%。试验点主要选择在 II 类剪切带上。

在弱风化带选择了 4 条、微风化带选择了 2 条具有代表性的剪切带进行了原位直剪试验, 结果见表 8。

表 8 剪切带直剪强度试验结果

Table 8 Testing results of direct shear strength of shear zone

岩性	风化程度	试验范围值				标准值	
		$f'$	$c'$ /MPa	$f$	$c$ /MPa	$f'$	$c'$ /MPa
岩屑夹泥型	弱风化	0.31~0.44	0.11~0.25	0.31~0.47	0.11~0.13	0.36	0.17
		0.61~0.66	0.17~0.39	0.48~0.56	0.13~0.28		
胶结型	微风化					0.62	0.20

根据剪切带的性质分为岩屑夹泥型和胶结型。其中弱风化带内的 4 组为 II<sub>2</sub> 类岩屑夹泥型,  $f' = 0.31 \sim 0.44$ ,  $c' = 0.11 \sim 0.25$  MPa。微风化带内的 2

组为 II<sub>1</sub> 类胶结型,  $f' = 0.61 \sim 0.66$ ,  $c' = 0.17 \sim 0.39$  MPa。

## 6 弱风化岩体利用初步探讨

本阶段岩石力学试验成果汇总见表 9。研究表明, 坝基主要以黏土岩和粉砂岩及砂岩为主, 其中砂岩占的比例较小, 因此坝基主要以软岩为主。微新岩石具有较好的物理力学性质, 其建坝的基本条件是完全具备的。

该坝址风化层次较为明显, 岩体多为碎裂状风化和夹层状风化特征, 弱风化岩体与微风化岩体的波速差别不大, 其弱风化岩体的波速比为 0.85~0.95, 大于相关规范中关于弱风化带波速比值, 说明弱风化岩体具有较好的性状。

坝区岩体总体质量以 IV 级为主, 少量为 III 和 V 级, 其中较坚硬的砂岩类为 III 级, 软岩(黏土岩类和粉砂岩类)为 IV 级, 破碎岩体为 V 级。对于软岩类, 弱风化岩体的 BQ 值略低于微风化岩体, 并都在同一等级。

根据原位试验结果, 弱风化较完整软岩变形模量试验平均值为 2.9~3.4 GPa, 大范围综合变形模量为 1.5~1.8 GPa。坝基弱风化带以较完整岩体为主, 因此, 弱风化岩体变形模量可以在 1.5~3.0 MPa 范围取值, 这个范围值在微风化岩体建议采用值 2.0~3.0 GPa 范围内。

软岩本身原位直剪试验结果说明, 弱风化和微风化岩体的抗剪强度参数差别不大,  $f' = 0.65 \sim 0.72$ ,  $c' = 0.42 \sim 0.63$ 。混凝土与基岩接触面的抗剪强度参数主要受岩体强度控制, 因此, 岩石强度越低, 抗剪强度越低, 弱风化软岩  $f' > 0.64$ ,  $c' = 0.38$  MPa。

微风化中的 II 类剪切带属于胶结型, 而弱风化中的 II 类剪切带属于岩屑夹泥型, 虽然结构面性状不同, 但弱风化中的 II 类屑夹泥型剪切带的  $f'$  值在 0.36 以上,  $c'$  值在 0.17 MPa 以上。大于国内红层岩体 II 类剪切带抗剪强度参数建议值。

结合室内和现场试验成果、工程岩体质量分级、岩体波速分布及地质代表性, 提出弱风化岩体力学参数建议值见表 10。在考虑岩体的软化系数后, 其各项参数均高于规范中的推荐值<sup>[8, 9]</sup>, 说明弱风化岩体的工程力学性质是可以作为建基面的。

表9 岩石力学试验成果对照表(标准值)  
Table 9 Comparison of rock mechanical test results(standard values)

岩性	风化程度	BQ值	质量等级	岩体波速/(m·s <sup>-1</sup> )	饱和抗压强度/MPa	岩石变形模量/GPa	岩体变形模量/GPa	岩/岩		混凝土/岩		II类剪切带	
								f'	c'/MPa	f'	c'/MPa	f'	c'/MPa
黏土岩类	微风化	31	IV	3 200	5.5	2.18							
	弱风化	290	IV	2 910			3.44	0.65	0.48	0.64	0.38	0.36	0.17
粉砂岩类	微风化	320	IV	3 310	13.9	2.99	4.48	0.72	0.63	1.10	0.76	0.62	0.20
	弱风化	291	IV	2 840			2.92	0.70	0.42	0.94	0.40		
砂岩类	微风化	401	III	3 780	52.5	6.94							
	弱风化	365	III	3 540			13.64	2.00	2.00	1.50	1.72		

表10 弱风化岩体力学参数建议值  
Table 10 Suggested mechanical parameters of weakly weathered rock mass

岩性类别	质量等级	饱和抗压强度/MPa	变形模量/GPa	岩/岩		混凝土/岩		II类剪切带	
				f'	c'/MPa	f'	c'/MPa	f'	c'/MPa
砂岩类	III	30~35	6.0~9.0	1.00~1.20	1.00~1.20	1.00~1.20	1.00~1.20	-	-
粉砂岩类	IV	5~8	1.5~2.5	0.60~0.65	0.25~0.30	0.70~0.80	0.20~0.30	0.30~0.35	0.10~0.15
黏土岩类	IV	3~5	1.5~2.5	0.55~0.60	0.20~0.30	0.60~0.65	0.20~0.30		

## 7 结论与建议

针对长江小南海水利枢纽的工程与地质条件，分析了岩体的风化特征，揭示了弱风化岩体的厚度分布及性状特征，有针对性地对弱风化岩体进行了现场岩石力学试验研究。

弱风化岩体的变形参数仅次于微风化岩体，抗剪强度参数及破坏形式与微风化岩体相当，分布在弱风化带中剪切带也具有较高的抗剪强度参数。因此从变形稳定和抗滑稳定两大方面恒量都能满足本阶段勘探设计对坝基岩石力学参数的要求，说明弱风化岩体作为建基面是可能的。这就为下一步的地质勘探、建基面高程的经济合理选择提供了重要依据。

建议在下一步详细勘探中补充弱风化岩石的物理力学试验及其他相关的试验研究工作。在大量全面的试验研究基础上，进行稳定分析计算与对比，进一步深入论证弱风化岩体的利用问题。

### 参考文献(References):

[1] 黄扬一, 王造根. 关于弱风化岩体利用的认识与实践[J]. 人民长江, 1995, 26(6): 33 - 36.(HUANG Yangyi, WANG Zaogen. The recognizing and practice about weakly weathered rock's use[J]. Yangtze River, 1995, 26(6): 33 - 36.(in Chinese))

[2] 徐瑞春. 红层与大坝[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003.(XU Ruichun. Red beds and dams[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2003.(in Chinese))

[3] 沈光伟, 杨国亚. 弱风化岩体作为重力坝建基面在里畈水库工程中的应用[J]. 浙江水利科技, 1997, (1): 29 - 32.(SHEN Guangwei, YANG Guoya. Application of using weakly weathered rock mass as

foundation plane in Liban Reservoir[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 1997, (1): 29 - 32.(in Chinese))

[4] 孙少锐, 许人平, 叶勇, 等. 风化岩体与混凝土坝建基面选择[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(5): 45 - 47.(SUN Shaorui, XU Renping, YE Yong, et al. Weathered rock and selection of foundation surface of concrete dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(5): 45 - 47.(in Chinese))

[5] 周维垣, 杨若琼. 二滩拱坝坝基弱风化岩体灌浆加固效果研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(2): 138 - 150.(ZHOU Weiyuan, YANG Ruoqiong. Study on the efficacy of grouting reinforcement of slightly weathered rock masses at the Ertan Arch Dam abutments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(2): 138 - 150.(in Chinese))

[6] 卢建平, 陆兆溱, 钟肖青. 水电工程中弱风化岩体可利用性探讨[J]. 岩土力学, 1996, 17(1): 41 - 47.(LU Jianping, LU Zhaozhen, ZHONG Xiaoqing. The utility analysis for weakly weathered rock mass in hydroelectric engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(1): 41 - 47.(in Chinese))

[7] 叶长锋, 吴继敏, 唐新华, 等. 风化岩体参数变化规律研究及工程意义[J]. 西部探矿工程, 2005, (10): 89 - 90.(YE Changfeng, WU Jimin, TANG Xinhua, et al. Study on changing rule of weathered rock mass parameters and its engineering implication[J]. West-China Exploration Engineering, 2005, (10): 89 - 90.(in Chinese))

[8] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50287 - 99 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50287 - 99 Code for water resources and hydropower engineering geological investigation[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.(in Chinese))

[9] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50218 - 94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50218 - 94 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1995.(in Chinese))