

文章编号: 1000-7598 (2012) 02-0361-07

粤西滨海核电厂址强风化花岗岩 物理力学特性试验研究

马海毅¹, 鲁祖德²

(1.广东省电力设计研究院, 广州 510663; 2.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 以广东阳江和台山两个典型花岗岩核电厂址为例, 定性描述了广东粤西沿海花岗岩的分布及其风化特征, 通过进行波速测试、浅层平板载荷试验、原位剪切试验等原位测试, 以及常规压缩试验、固结试验等室内试验, 系统分析了强风化花岗岩的主要物理与力学性质指标。结果表明: (1) 花岗岩受强烈的物理风化和化学风化作用, 基岩中的不稳定元素被淋溶、流失, 形成了富铝型和富铁型的厚层风化壳, 岩层不均匀性特点突出; (2) 强风化花岗岩岩体天然含水率和孔隙比变化大, 天然重度变化小, 压缩性中等; (3) 粒度成分对岩石物理性质的影响最大。粒度越大, 物性指标越弱。粒度越小, 表明岩样越致密, 其物性指标越强; (4) 波速的大小与岩体风化程度、粒度成分等密切相关; (5) 水对强风化花岗岩抗剪强度参数中的凝聚力影响效应比内摩擦角要大, 对凝聚力的弱化作用更加明显。其研究结果可为核电工程建设和优化设计提供基础参数。

关 键 词: 强风化花岗岩; 原位测试; 室内试验; 物理力学性质

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Investigation of physico-mechanical properties for highly weathered granite of nuclear power station in coastal site of western Guangdong province

MA Hai-yi¹, LU Zu-de²

(1. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510663, China; 2 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The distribution and weathering characteristics of granite in the western coastal site of Guangdong province are described. A series of in-situ tests are conducted, including the velocity tests, load tests and in-situ shear tests, along with laboratory tests involving conventional compression test and consolidation test. Based on test results, the physico-mechanical properties of highly weathered granite are analyzed. It is indicated that: (1) Due to strong physicochemical weathering processes, the unstable elements in bedrock are leached which further result in formation of aluminum-rich and iron-rich types of thick weathering crust. Heterogeneity of rock is obvious. (2) Natural moisture content and void ratio of highly weathered rockmass vary greatly, while natural density and modulus of compression change moderately. (3) Particle sizes have a great impact on the physical characteristics of weathering granite. The physical indexes are stronger as the decrease of particle sizes. (4) Wave velocity is closely related to the weathering degree and particle composition. (5) Water content has more apparent effect on cohesion than friction angle. The attenuated effect on cohesion of highly weathered granite is obvious in particular. The research results can provide basic data for construction of nuclear power station and optimal design.

Key words: highly weathered granite; in-situ test; laboratory test; physico-mechanical properties

1 引 言

强风化花岗岩是在我国沿海大量分布的一种特殊岩土体, 随着大量工程建设的开展, 其物理力学基本参数成为了工程设计和优化的重要指标和参考依据, 因此, 通过岩石物理力学试验研究获取岩石

基本物理力学参数显得极为重要。国内外学者如陈洪江^[1-2]等进行了花岗岩残积土物理力学指标的概型分布检验与概率统计分析研究, 尚彦军等^[3]进行了全风化花岗岩抗剪强度试验结果对比及影响因素分析。从已有研究成果可以看出, 系统进行沿海强风化花岗岩物理力学性质研究的并不多。

收稿日期: 2011-07-20

基金项目: 广东省自然科学基金 (No. S2011040005245); 广东省电力设计研究院 2008 年立项院级科研项目: 第三代核电技术地基适宜性分析及评价。
第一作者简介: 马海毅, 男, 1962 年生, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事核电岩土工程勘测与研究的工作。E-mail: mahaiyi@gedi.com.cn

强风化花岗岩是岩土工程中一种尚未充分研究的特殊性岩土体。本文以广东阳江和台山两个典型花岗岩核电厂址为例,定性描述了广东粤西沿海花岗岩的分布及其风化特征,通过进行载荷试验、原位剪切试验、波速等原位测试,以及常规压缩、固结等室内试验,系统分析了强风化花岗岩的主要物理与力学性质指标。该研究成果不仅可为核电厂址工程建设和优化设计提供基础参数,同时也为强风化花岗岩的相关研究提供理论支撑。

2 粤西沿海花岗岩的分布与风化特征

广东沿海地区大面积的分布着燕山期花岗岩,珠江口以西至雷州半岛以东的这段粤西沿海花岗岩残丘绵延,直抵海岸。沙环和腰古两个核电厂址就位于该花岗岩出露区。下面以粤西沿海这两个典型厂址区为例,在区域地质与场地工程地质条件分析的基础上探讨粤西花岗岩的风化特征及其物理力学性质。

2.1 厂区地质及地形地貌概况

粤西沿海地处低纬度,濒临南海,热量和水分都比较丰富。在炎热多雨的亚热带气候条件下,花岗岩受强烈的物理风化和化学风化作用,基岩中的不稳定元素 Ca、Na、Mg、K 等均被淋溶、流失,富集了 3 价的 Al 和 Fe,形成了富铝型和富铁型的厚层风化壳^[4],风化程度远大于我国东南沿海其他地区 and 内陆地区。

沙环厂址位于阳江市,三面环山,一面邻海,周围由低山丘陵组成,中部沟谷中有一小河,自北向南流入南海。山体和水系大致呈近东西向和北东向延伸,与区内地质构造展布方向基本一致。厂址区为邻海的低山丘陵,中部为一“U”型谷地,沟谷西侧地形起伏,山顶呈浑圆状,岩石主要由中细粒花岗岩组成,地表坡残积土较薄。东侧山坡较陡,岩性主要为斑状花岗岩,地表残坡积层较厚。谷中地形平缓,北部为河流冲积粉质黏土、砂层和淤泥质土;南部为海积砂坝和近代海滩,地面略有起伏。

腰古厂址位于台山市,东临南海,西倚北东向

分布的低山丘陵、剥蚀残丘和滨海平原区。山体大致呈北东-南西向延伸,与区内地质构造展布方向基本一致。连岛沙堤位于腰古湾,呈向西凹的腰鼓型,主要由松散的中-粗砂堆积而成。

2.2 风化特征分析

沙环厂址及附近地区强风化花岗岩广泛分布于场地中部沟谷和两侧山坡,厂址区发育厚度为 0.25~56.25 m 不等,平均厚度为 10.27 m,局部强风化层中有中等风化夹层。岩芯呈散体状,大部分矿物已风化为黏土矿物,岩质软弱,遇水软化,手易捏碎,但原岩结构仍然清晰可见。在厂区东侧山坡下的谷地岩体风化壳特别发育,风化壳底部达到了 -96 m PRD (珠江基准面),形似洼地。

腰古厂址及附近地区强风化花岗岩分布广泛,厚度变化大,厂址区为 4.60~43.70 m,顶板埋深为 0.60~33.00 m。以中粒斑状花岗岩、中粒斑状黑云母二长花岗岩为主,局部为细粒斑状花岗岩,岩芯多呈半岩半土状,常混夹有中等风化和微风化的花岗岩,原岩结构清晰,岩石矿物成分风化强烈,岩质软弱,锤击声哑,遇水易软化崩解。

由于球状风化作用强烈,在两厂址地表广泛分布着孤石与危岩,强风化花岗岩层内则发育着微风化的花岗岩孤石,岩层不均匀性特点突出。

3 物理力学性质测试与分析

在上述厂区地质、地形地貌研究和风化特征分析的基础上,进行了一系列室内试验和原位测试,试验均依据《土工试验方法》^[5]、《岩土工程勘察规范》^[6]等执行。

3.1 基本物理性质指标

按照相关试验规范,对沙环厂址和腰古厂址不同粒度的强风化花岗岩的基本物理性质进行了测试,具体指标见表 1。在取土和制备试样的过程中排除了粗颗粒成分。

从表 1 可以看出,粒度成分对岩石物理性质的影响最大。相同粒度的岩样其物性指标很接近。同时,粒度越大,物性指标越弱。粒度越小,表明岩样越致密,其物性指标越强。

表 1 强风化花岗岩基本物理性质指标
Table 1 Basic indices of physical properties of highly weathered granite

厂址	粒度	天然含水率 ω	天然重度 γ	干重度 γ_d	土粒相对密度	天然孔隙比	液限 ω_L	塑限 ω_p	塑性指数 I_p	液性指数 I_L
		/%	/(kN/m ³)	/(kN/m ³)	G_s	e	/%	/%		
沙环	中粒	18.65	18.60	15.60	2.66	0.714	33.66	21.88	11.36	-0.249
	细粒	13.10	19.60	17.30	2.72	0.580				
腰古	中粒	20.50	18.50	15.20	2.67	0.770				
	细粒	13.10	19.60	17.30	2.72	0.580				

3.2 压缩系数和变形模量测试

固结试验采用标准固结法，施加的各级压力等级为 50、100、200、400、600、800、1 200、1 600、2 000、2 400、2 800、3 200 kPa，试验时，每施加一级压力后，试样高度变化稳定后，再加下一级压力，直至施加最后一级压力的试样高度变化达到稳定标准为止。试验仪器采用 ZQ-1 型全自动高压气压固结仪。

第 1 次在靠近泵房（木船洲）位置取样 10 组。现场采集的试样在常规岛开挖后出露的强风化花岗岩层，分为 3 个亚层：①层风化成土状；②层为半

岩半土状；③层为岩块状，其中①层风化成土状的有 6 组，②层半岩半土状的有 4 组。①层和②层的强风化花岗岩在各级压力段下的典型曲线见图 1、压缩系数和压缩模量见表 2。

第 2 次在 TG 平台取样 11 组。由环刀人工现场直接取样，最大限度地减少了对土样的扰动，土试样质量等级达到 I 级。试样干、致密、坚硬，含多量颗粒，一般为 3~6 mm，石英颗粒占多数，长石风化成白色高岭土，可见清晰花岗岩结构。各级压力段下的典型曲线见图 2、压缩系数和压缩模量见表 3。

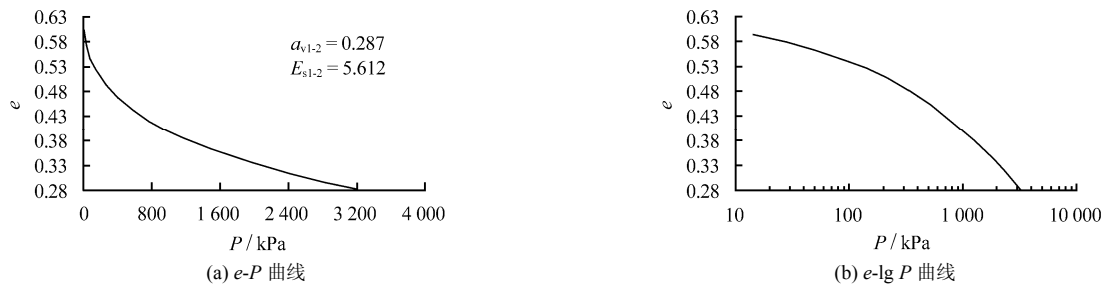


图 1 典型固结试验曲线
Fig.1 Typical curves of consolidation test

表 2 第 1 批试样各级压力段下的压缩系数和压缩模量统计值

Table 2 Statistical data of compressibility factors & compressibility moduli in each pressure stage of the first batch samples

岩土层	压力段 / kPa	压缩系数 $\alpha_v / \text{MPa}^{-1}$		压缩模量 E_s / MPa	
		范围值	平均值	范围值	平均值
①层土状强风化花岗岩	100~200	0.206~0.366	0.266	4.48~8.48	6.71
	200~400	0.163~0.306	0.210	5.35~10.75	8.57
	400~600	0.137~0.209	0.158	7.86~12.73	11.10
	600~800	0.126~0.156	0.137	10.52~13.76	12.64
	800~1 200	0.086	0.138	11.85~19.74	16.94
	1 200~1 600	0.069~0.087	0.076	18.93~25.26	22.77
	1 600~2 400	0.052~0.066	0.060	24.86~31.95	28.93
②层半岩半土状强风化花岗岩	2 400~3 200	0.047~0.054	0.049	32.44~37.83	35.47
	100~200	0.186~0.287	0.281	4.73~8.94	6.21
	200~400	0.125~0.211	0.168	7.62~13.32	10.15
	400~600	0.094~0.141	0.127	11.59~15.84	13.13
	600~800	0.064~0.131	0.104	12.61~23.08	16.74
	800~1 200	0.049~0.082	0.064	19.61~36.82	27.29
	1 200~1 600	0.030~0.080	0.059	20.83~39.27	29.79
1 600~2 400	0.021~0.061	0.041	27.02~85.78	48.40	
2 400~3 200	0.026~0.053	0.037	31.09~69.61	49.12	

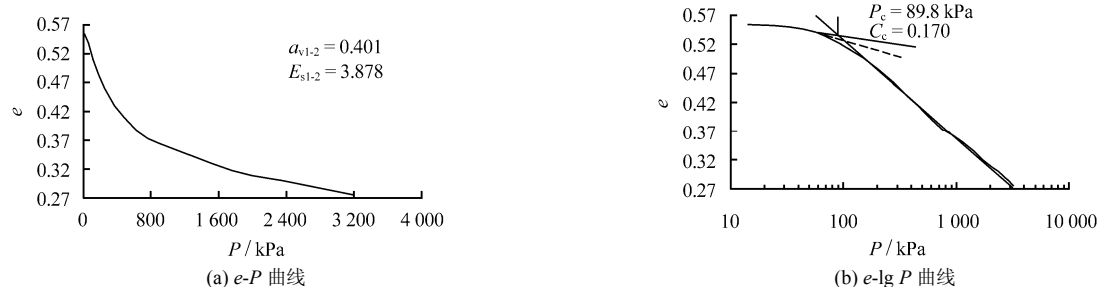


图 2 典型固结试验曲线
Fig.2 Typical curves of consolidation test

表3 第2批试样各级压力段下的压缩系数和压缩模量统计值
Table 3 Statistical data of compressibility factors & compressibility moduli in each pressure stage of the second batch samples

岩土层	压力段 / kPa	压缩系数 a_v / MPa ⁻¹		压缩模量 E_s / MPa	
		范围值	平均值	范围值	平均值
强风化花岗岩	50~100	0.278~0.655	0.429	2.70~5.31	3.82
	100~200	0.194~0.440	0.311	3.88~6.13	4.99
	200~400	0.147~0.267	0.220	5.83~12.13	7.86
	400~800	0.098~0.142	0.119	11.60~15.19	13.33
	800~1 200	0.029~0.076	0.056	21.16~58.19	30.22
	1 200~1 600	0.040~0.067	0.053	26.47~35.65	30.28
	1 600~2 000	0.030~0.048	0.040	34.18~48.25	39.32
	2 000~2 800	0.021~0.034	0.028	49.72~67.76	56.95
	2 800~3 200	0.021~0.032	0.027	51.77~70.15	58.74

从表2、3可以看出，TG平台试样在同一压力变化范围内的压缩性要明显高于常规的试样，同一压力变化范围内试样的压缩性基本近似。压缩系数越大，表明在同一压力变化范围内的孔隙比减小得越多，则压缩性越高。压缩模量越大，表明在同一压力变化范围内的压缩变形越小，则压缩性越低。

3.3 波速测试与分析

针对强风化花岗岩进行的波速测试主要采用声波测井和单孔检层法，波速测试典型曲线见图3、结果见表4。

由于声波测井要求在孔中的裸露段测试，而多数强风化岩体的孔壁不稳定，钻进时需护壁，影响测试，所以表中声波测井测得的压缩波波速偏高，实际代表的岩体接近中等风化，或含大量的中等风化岩块。从测试结果来看，声波测井所测得的压缩波波速要略高于单孔检层法所得的结果。对比两个厂址的测试结果，腰古厂址的压缩波波速和动泊松比均低于沙环厂址的测试结果。其他参数中沙环厂址的结果要明显高于腰古厂址。

在腰古盆地和厂址区横波反射波法时间剖面中，有多个明显的强反射波组。根据分层原则结合处理过程速度分析结果，使用层速度进行时深转换，强风化层的层速度 V_s 为 350 m/s。该速度是以强风化花岗岩层为底面、其上地层的一个综合性平均值，

因此，比单孔检层法测得的强风化花岗岩波速低。

3.4 浅层平板载荷试验

针对沙环厂址联合泵房区的强风化花岗岩进行了3个试验点(J1、J2、J3)的浅层平板载荷试验。试坑深度为0.5~1.0 m，承压板为0.5 m²的圆形钢板、直径为0.8 m。加载过程采用常规慢速加荷法即逐级加荷，沉降趋于稳定再施加下一级荷载，在连续2 h内，每小时沉降量小于或等于0.1 mm则视为沉降稳定。从荷载 P 与沉降量 s 曲线以及对比相关曲线(见图4)，可以看出有明显的直线和转折点，转折点对应的比例界限压力为500 kPa，试验点数据较稳定，数据极差为0，故取地基土承载力特征值

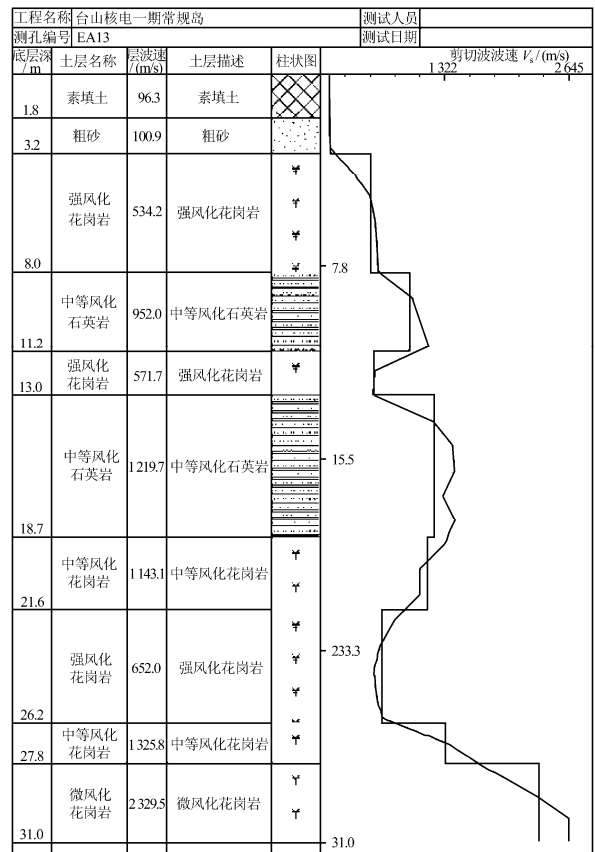


图3 检层法波速测试剪切波典型曲线
Fig.3 Typical curves of shear wave of downhole logging test

表4 强风化花岗岩单孔法波速测试成果
Table 4 Results of wave velocity in single hole test in highly weathered granite

厂址	岩性	声波测井		单孔检层法			
		压缩波波速 V_p / (m/s)	压缩波波速 V_p / (m/s)	剪切波波速 V_s / (m/s)	动弹性模量 E_d / MPa	动剪切模量 G_d / MPa	动泊松比 ν_d
沙环	中细粒花岗岩	2 234	1 372~1 956	632~661	2 348~2 461	858~870	0.349~0.481
			1 957*	700*	3 155*	1 105*	0.43*
腰古	中粒斑状花岗岩	2 182	2 129	478	1 314	446	0.47

注：*为一期泵房推荐值。

$f_{ak} = 500 \text{ kPa}$ 。试验点变形模量亦较稳定，数据极差为 4.19，与平均值之比为 12% ($< 30\%$)，故取 3 个试验点的平均值作为强风化花岗岩的变形模量 $E_0 = 35 \text{ MPa}$ 。

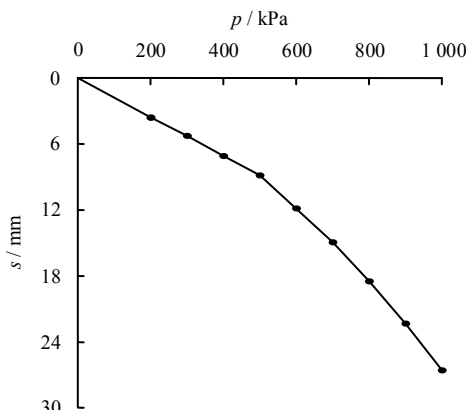


图 4 J1 试验点荷载 P 与沉降量 S 曲线
Fig.4 Curve of load P vs. settlement S in test point J1

3.5 抗剪强度测试

在腰古厂址一期工程 108 m 平台边坡地段的 4 个位置分别开挖 A、B、C、D 4 个试验槽进行原位剪切试验^[7]，其中 A、B、C 3 个槽内各自开挖 2 组试样，D 槽开挖 6 组试样，共 12 组试样，每组有 4 块试样。试样的尺寸为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ ，剪切面积为 0.25 m^2 ，试验过程中用 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 的钢剪切盒进行固定，并采取适当措施保证剪切盒和试样紧密接触。12 组试样中有 4 组进行了饱水试验，饱水方法以中心注水法为主、四周浸水法为辅，每个饱水试验的浸水时间不少于 18 h，在剪切试验过程中视水的情况随时向饱水槽内添加水，以保证试验过程中试样能处于饱和状态。

法向力和剪力的施加设备为相互独立的液压千斤顶，加载的外部反力装置采用沙袋堆载。剪切位移和法向位移的量测设备采用百分表，其中 4 个表量测法向位移，另 4 个表量测剪切位移。抗剪强度是剪切面上法向应力的函数，试验以摩尔-库仑准则为指导。对同一组内的 4 块试样分别法向荷载为 50、100、150、200 kPa，每块试样在相应的法向荷载下进行 2~3 次循环剪切试验。图 5 为试样典型剪力-剪切位移曲线，根据试样单次循环的剪切试验和 2~3 次循环剪切试验的剪力-剪切位移包络线可以将试验曲线分为两类，如图 6 所示。

根据摩尔-库仑准则，应用最小二乘法计算出强风化花岗岩不同试验点的峰值剪切强度和屈服剪切强度参数 (c 、 φ)。图 7、8 为天然与饱水试样抗剪强度选取结果，表 5 为抗剪强度参数成果。

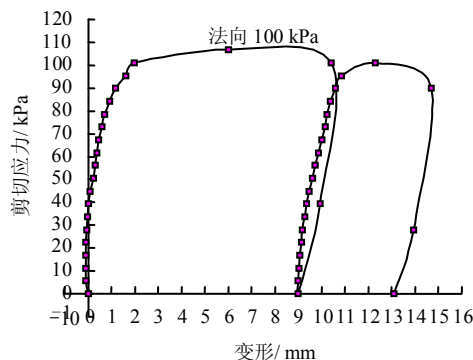


图 5 典型剪切压力-剪切位移曲线
Fig.5 Typical curves of shear pressure-shear displacement

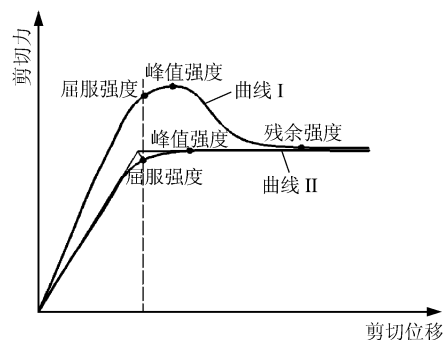


图 6 剪切强度取值示意图
Fig.6 Shear strength value scheme

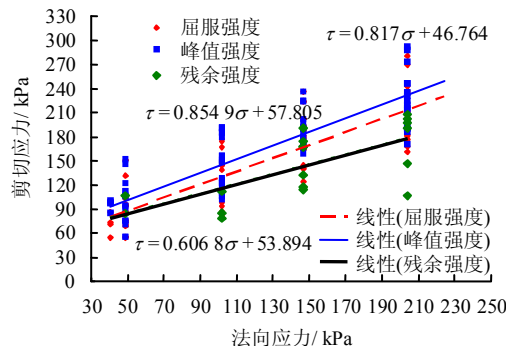


图 7 天然试样抗剪强度选取结果
Fig.7 Selected results of shear strength in natural samples

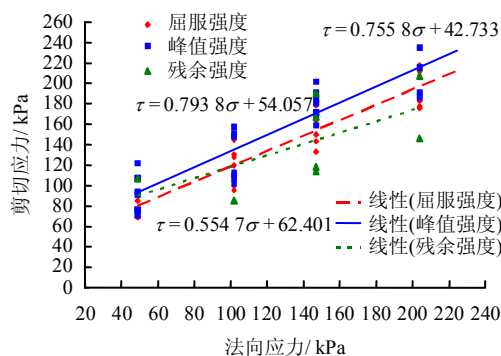


图 8 饱水试样抗剪强度选取结果
Fig.8 Selected results of shear strength in saturated samples

从表 5 可以得出, 饱水条件下强风化花岗岩的抗剪强度参数明显低于天然状态试样。分别定义抗剪强度参数中的凝聚力 c 和内摩擦角 φ 的损伤系数为 D_c 和 D_φ 。其中, $D_c = (C_{\text{天然}} - C_{\text{饱水}}) / C_{\text{天然}}$; $D_\varphi =$

$(\varphi_{\text{天然}} - \varphi_{\text{饱水}}) / \varphi_{\text{天然}}$ 。计算出强风化花岗岩抗剪强度参数损伤系数如表 5 所示。对比分析可知, 水对强风化花岗岩的凝聚力影响效应比内摩擦角的要大, 对凝聚力的弱化作用更加明显。

表 5 剪切条件下强风化花岗岩抗剪强度参数计算结果

Table 5 Calculated parameters of shear strengths of highly weathered granite under shear condition

试验条件	屈服强度及损伤系数				峰值强度及损伤系数				残余强度及损伤系数			
	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	D_c	D_φ	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	D_c	D_φ	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	D_c	D_φ
天然	47	39			58	41			64	31		
饱水	43	37	0.085	0.051	54	38	0.069	0.073	54	29	0.156	0.065

3.6 物理力学参数综合评价

综合室内外试验成果再结合地区经验提出了强风化花岗岩物理力学参数, 参与统计的指标数量均满足技术标准要求的数量, 见表 6、7。

表 6 强风化花岗岩力学指标

Table 6 Indices of mechanical property of highly weathered granites

厂址	粒度	压缩系数 $a_{1-2} / \text{MPa}^{-1}$	压缩模量 E_s (MPa)	天然快剪	
				凝聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
沙环	中粒	0.27	6.86	29.45	36.30
腰古	中粒	0.31	5.53	11.56	29.61
	细粒	0.24	6.70		

表 7 强风化花岗岩边坡稳定性评价建议参数

Table 7 Recommended parameters of highly weathered granites in evaluation of slope stability

厂址	岩性	重度 $\gamma / (\text{kN/m}^3)$	饱和重度 $\gamma / (\text{kN/m}^3)$	凝聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
沙环	中细粒花岗岩	20	21	50	35
腰古	中粒斑状花岗岩			46	38
腰古嘴	天然花岗岩	19	20.1	47	39
	饱和花岗岩			40	34

从物理力学指标可以看出, 强风化花岗岩天然含水率变化较大, $w = 13\% \sim 21\%$; 天然重度变化较小, $\gamma = 18.50 \sim 19.60 \text{ kN/m}^3$; 天然孔隙比变化较大, $e = 0.580 \sim 0.770$; 压缩系数 $a_{1-2} = 0.24 \sim 0.31 \text{ MPa}^{-1}$ 、压缩模量 $E_s = 5.5 \sim 6.9 \text{ MPa}$; 凝聚力 $c = 11.6 \sim 29.5 \text{ kPa}$ 、内摩擦角 $\varphi = 29.6^\circ \sim 36.3^\circ$, 普遍认为, E_s 、 c 、 φ 均偏低, 相对而言, c 更为偏低; 压缩波速度 $V_p = 1\ 370 \sim 2\ 130 \text{ m/s}$ 、剪切波速度 $V_s = 480 \sim 700 \text{ m/s}$; 声波测井压缩波速度 $V_p = 2\ 180 \sim 2\ 230 \text{ m/s}$; 建议作为边坡稳定性分析与评价的设计参数 $c = 40 \sim 50 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 34^\circ \sim 39^\circ$ 。

4 结 论

(1) 花岗岩受强烈的物理风化和化学风化作用, 基岩中的不稳定元素 Ca、Na、Mg、K 等均被淋溶、流失, 富集了 3 价的 Al 和 Fe, 形成了富铝型和富铁型的厚层风化壳, 强风化花岗岩层内则发育着微风化的花岗岩孤石, 岩层不均匀性特点突出。

(2) 强风化花岗岩岩体天然含水率和孔隙比变化大, 天然重度变化小, 压缩性中等。

(3) 粒度成分对岩石物理性质的影响最大。相同粒度的岩样其物性指标很接近。同时, 粒度越大, 物性指标越弱。粒度越小, 表明岩样越致密, 其物性指标越强。

(4) 强风化花岗岩岩体声波测井所测得的压缩波波速要略高于单孔检层法所得的结果, 波速的大小与岩体风化程度、粒度成分等密切相关。

(5) 水对强风化花岗岩抗剪强度参数中的凝聚力影响效应比内摩擦角的要大, 对凝聚力的弱化作用更加明显。在岩体力学参数分析中应考虑水对强风化花岗岩力学特性的影响。

参 考 文 献

[1] 陈洪江, 崔冠英. 花岗岩残积土物理力学指标的概率统计分布[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(5): 95-97. CHEN Hong-jiang, CUI Guan-ying. Probability statistic analysis of physical mechanical parameters of granite eluvial soil[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 29(5): 95-97.

[2] 陈洪江, 崔冠英. 花岗岩残积土物理力学指标的概型分布检验[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(5): 92-94. CHEN Hong-jiang, CUI Guan-ying. Probability type testing of the distribution on the granite eluvial soil mechanical parameters[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 29(5): 92-94.

- LI Di, WANG Chang-ming. Calculation on elastic moduli of stratified layers under deformation test with rigid bearing plate[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2003, 20(2): 24—29.
- [4] 周火明, 盛谦, 陈殊伟, 等. 层状复合岩体变形试验尺寸效应的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 289—292.
ZHOU Huo-ming, SHENG Qian, CHEN Shu-wei, et al. Numerical simulation on size-effect in deformation test of layer composite rockmass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 289—292.
- [5] 徐平, 丁秀丽, 全海, 等. 溪洛渡水电站坝址区岩体蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 220—226.
XU Ping, DING Xiu-li, QUAN Hai, et al. Testing study on creep behavior of rock mass at Xiluodu Dam site[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24 (Supp.): 220—226.
- [6] 贺如平, 张强勇, 王建洪, 等. 大岗山水电站坝区辉绿岩脉压缩蠕变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2495—2503.
HE Ru-ping, ZHANG Qiang-yong, WANG Jian-hong, et al. Study on compressive creep test on diabasic dike at dam site of Dagangshan hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(12): 2495—2503.
- [7] 张强勇, 张建国, 杨文东, 等. 软弱岩体蠕变模型辨识与参数反演[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 66—72.
ZHANG Qiang-yong, ZHANG Jian-guo, YANG Wen-dong, et al. Identification of creep model and parameters inversion for soft rock mass[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2008, 39(1): 66—72.
- [8] 杨文东, 张强勇, 张建国, 等. 刚性承压板下深部岩体压缩蠕变参数反演[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 762—768.
YANG Wen-dong, ZHANG Qiang-yong, ZHANG Jian-guo, et al. Inversion of compression creep parameters of deep rock under rigid bearing plate[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 762—768.
- [9] 熊诗湖, 周火明, 钟作武, 等. 岩体载荷蠕变试验方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2121—2127.
XIONG Shi-hu, ZHOU Huo-ming, ZHONG Zuo-wu, et al. Study of methodology of plate-loading creep test of rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(10): 2121—2127.
- [10] 黄书岭. 高应力下脆性岩石的力学模型与工程应用研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.
- [11] TIMOSHENKO S, GOODIER J N. Theory of Elasticity[M]. 徐芝纶译. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [12] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [13] JAEGER J C, COOK N G W. 岩石力学基础[M]. 中国科学院工程力学研究所译. 北京: 科学出版社, 1981.
- [14] 杨挺青, 罗文波, 徐平, 等. 黏弹性理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [15] 王芝银, 李云鹏, 杨志法, 等. 石窟薄层顶板破坏的早期潜在原因分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1531—1536.
WANG Zhi-yin, LI Yun-peng, YANG Zhi-fa, et al. Analysis of initial latent causes for grotto roof damage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1531—1536.

上接第页 366 页

- [3] 尚彦军, 岳中琦, 赵建军, 等. 全风化花岗岩抗剪强度试验结果对比及影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2004, 12(2): 199—207.
SHANG Yan-jun, YUE Zhong-qi, ZHAO Jian-jun, et al. Comparison of shearing strengths of the completely decomposed granite and analysis of contributing factors[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2004, 12(2): 199—207.
- [4] 张虎男. 华南沿海新构造运动与地质环境[M]. 地震出版社, 1990.
- [5] 中华人民共和国建设部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [6] 中华人民共和国建设部. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [7] 童志怡, 鲁祖德. 腰古核电厂厂区内边坡强风化花岗岩体原位直剪试验报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.