

# 溪头水库坝基全风化花岗岩物理力学特性研究

姚纪华<sup>1</sup>, 宋文杰<sup>1</sup>, 邓仁贵<sup>1</sup>, 梁龙<sup>2</sup>, 彭杰帅<sup>1</sup>

(1. 湖南省水利水电科学研究院, 湖南长沙 410007; 2. 汝城县水利局, 湖南郴州 424100)

**摘要:** 溪头水库左坝段浆砌石重力坝坝基为全风化花岗岩,其物理力学性能较差,可能无法满足工程需要。结合坝基岩体现场原位测试和室内土工试验成果,并基于坝体抗滑稳定计算简化模型,研究坝基全风化花岗岩的物理力学特性及变化规律,并计算坝体抗滑稳定性,探讨其作为浆砌石重力坝坝基的可行性。结果表明:左坝段全风化花岗岩由地表至地下为一个岩性连续渐变地质体,越接近地表岩体风化程度越严重,物理力学性能越差,天然状态全风化花岗岩地基承载力与其风化程度呈反比。饱和状态下全风化花岗岩地基承载力显著低于天然状态,其折减幅度为55.4%~70.4%;饱和状态下全风化花岗岩抗剪强度远低于天然状态,其中内黏聚力折减幅度为53.9%~75.4%,内摩擦角折减幅度为83.1%~89.3%。天然状态下全风化花岗岩坝基抗滑稳定安全系数偏低,为提高工程安全性,应对其进行加固处理;而饱和状态下坝基抗滑稳定安全系数极低,坝体必将失稳滑动,其不可作为大坝坝基,应彻底清除。

**关键词:** 全风化花岗岩;地基承载力;抗剪强度;天然状态;饱和状态;抗滑稳定性

中图分类号:TV62

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)06-0208-08

## Physical and mechanical properties of completely weathered granite in dam foundation of Xitou Reservoir

YAO Jihua<sup>1</sup>, SONG Wenjie<sup>1</sup>, DENG Rengui<sup>1</sup>, LIANG Long<sup>2</sup>, PENG Jieshuai<sup>1</sup>

(1. Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Changsha 410007, China;

2. Water Conservancy Bureau of Rucheng County, Chenzhou 424100, China)

**Abstract:** The left dam section of Xitou Reservoir was built on the foundation of completely weathered granite, its poor physical and mechanical performance may not meet the needs of the project. Combined with the results of in-situ test and indoor geotechnical test of dam foundation rock mass, the physical and mechanical properties and variation law of the completely weathered granite were studied based on the simplified calculation model of anti-sliding stability of the dam body, and the anti-sliding stability of the dam body was calculated to ascertain the application feasibility of completely weathered granite to the dam foundation of masonry gravity dam. The results show that the completely weathered granite in the left dam section is a continuous and gradual geological body from the surface to the underground, the weathering becomes worse and its physical and mechanical properties deteriorates even more from the underground to the surface. The bearing capacity of completely weathered granite foundation in natural state is inversely proportional to its weathering degree, and is significantly lower than that in saturated state, its reduction range is 55.4% - 70.4%. The shear strength of completely weathered granite in saturated state is much lower than that in natural state. The reduction range of internal cohesion is 53.9% - 75.4%, and that of internal friction angle is 83.1% - 89.3%. The safety factor of anti-sliding stability of completely weathered granite dam foundation is relatively low in natural state, in order to improve the safety of the project, reinforcement treatment should be carried out. The safety factor of anti-sliding stability is extremely low in saturated state, which will lead to dam instability. In this case, completely weathered granite is not fit for

收稿日期:2019-11-23; 修回日期:2020-07-01

基金项目:湖南省重大水利科技项目(XSKJ2018179-33、湘水科计[2017]230-30);湖南省一般水利科技项目(XSKJ2018179-44、XSKJ2018179-46、湘水科计[2017]230-44)

作者简介:姚纪华(1986-),男,湖南郴州人,硕士,工程师,主要从事水工环地质应用与研究工。

the role of dam foundation and should be completely removed.

**Key words:** completely weathered granite; foundation bearing capacity; shear strength; natural state; saturated state; anti-sliding stability

## 1 研究背景

浆砌石重力坝应修建在弱~微风化岩体上,但受地形地貌、地质构造、工程特性和工程造价等多方面因素制约,导致坝体需坐落在全风化花岗岩上。相较弱~微风化花岗岩,全风化花岗岩具有地基承载力低、抗剪强度小和遇水物理力学性能折减等特性。考虑到水库大坝复杂性和失事后的严重性,研究全风化花岗岩物理力学特性及变化规律、探讨其能否作为浆砌石重力坝坝基的意义重大。全风化花岗岩风化深度、程度和分布位置与工程微地形<sup>[1]</sup>、地质构造等密切相关,其矿物成分、粒径、颗粒组成、孔隙比和含水量等不同对其物理力学性能、变形特性等的影响较大。为此,学者们对全风化花岗岩物理特性<sup>[2-3]</sup>、微观特征<sup>[4]</sup>、持水特性<sup>[5]</sup>、孔隙度<sup>[6]</sup>、含水量等进行了大量研究,其中含水量差异性对全风化花岗岩物理力学特性影响的相关研究最多,包括富水<sup>[7-8]</sup>、饱和<sup>[9]</sup>及不同含水率<sup>[10-11]</sup>等多个方面。结果表明,含水率越大则土体抗剪强度指标越小,弹性模量随含水率的增大呈现先增大后减小的趋势,在最佳含水率附近达到最大值,在饱和状态下最小。

关于全风化花岗岩的物理力学性能、变形特性、稳定性、流变特性和本构模型,国内外许多学者进行了许多诸多探索。赵建军等<sup>[12]</sup>研究了全风化花岗岩三轴抗剪强度指标凝聚力、内摩擦角与微结构及成分的关系,指出微结构的特点决定了其强度特点;Hossain等<sup>[13]</sup>研究了全风化花岗岩非饱和状态下的抗剪强度与膨胀特性;Zhao等<sup>[14]</sup>研究了全风化花岗岩在装卸过程中力学性能变化规律;梁栋<sup>[15]</sup>及刘正楠等<sup>[16]</sup>对全风化花岗岩的变形特性进行了试验研究;胡厚田等<sup>[17]</sup>在详细调查的基础上,从稳定性的角度划分了我国南方全风化花岗岩类边坡的结构类型、滑动特性及参数选择;张素敏等<sup>[18]</sup>、赵旭峰等<sup>[19]</sup>对全风化花岗岩流变特性进行试验研究,表明其基本符合 Burgus 黏弹性模型;刘攀<sup>[20]</sup>、庞小朝<sup>[21]</sup>通过建立本构模型研究了全风化花岗岩力学性能;Liu等<sup>[22]</sup>对不同粒径全风化花岗岩的质量转移、流动特性进行了探讨。此外,学者们还对全风化花岗岩注浆加固体<sup>[23-25]</sup>、改良土<sup>[26-28]</sup>等的力学、变形特性做了大量深入研究。

但这些研究大多基于室内土工试验、模型试验等条件下获得的,揭露了全风化花岗岩力学、变形特性基本规律,但其与工程实地具有一定差异性,且全风化花岗岩坝基与其他类型地基相比,其受力状态、变形要求具有特殊性,因此,研究全风化花岗岩坝基力学特性及变化规律是十分必要的。

目前,针对水库全风化花岗岩坝基特性的研究较少,且主要集中在工程地质特性<sup>[29]</sup>、防渗技术<sup>[30]</sup>和灌浆工艺<sup>[31]</sup>等方面,对其力学特性的探究极少。

本文结合溪头水库工程实例,通过坝基岩体现场原位试验和室内土工试验,研究分析坝基全风化花岗岩物理力学特性及变化规律,并基于坝体抗滑稳定计算简化模型,计算坝体抗滑稳定性,探讨该工程左坝段全风化花岗岩作为浆砌石重力坝坝基的可行性。拟为类似工程提供理论和试验依据。

## 2 试验与计算方法

### 2.1 重型动力触探试验

利用重型动力触探试验测定每贯入 10 cm 记录相应锤击数  $N_{63.5}'$ , 计算出修正击数  $N_{63.5}$ 。

地基承载力特征值的计算可采用公式(1):

$$f_k = 35.96N_{63.5} + 23.8 \quad (1)$$

式中:  $f_k$  为地基承载力特征值, kPa;  $N_{63.5}$  为修正击数。

### 2.2 浅层平板载荷试验

利用浅层平板载荷试验测定地基岩体在一定压力下的变形发展变化规律。每级加载后,待沉降达到稳定,记录相应的压力和变形。

地基承载力特征值确定方法为:①取比例荷载和极限荷载的一半中的较小值;②无比例荷载和极限荷载时,承压板面积为 0.25 ~ 0.50 m<sup>2</sup>,可取  $s/b = 0.01 \sim 0.015$  所对应的荷载( $s$  为地基沉降量,  $b$  为方形承压板边长)。

### 2.3 室内三轴剪切试验

采用室内三轴剪切试验测定天然状态和饱和状态下全风化花岗岩的抗剪强度。现场获取原状 I 级岩样,用石蜡密封,并严格控制运输过程中对岩样的扰动。

### 2.4 抗滑稳定计算理论

大坝沿坝基面抗滑稳定按抗剪强度计算公式进行计算,计算公式为:

$$K = \frac{f(\sum_{i=1}^n W_i - \sum_{j=1}^n U_j) + cA}{\sum_{k=1}^n P_k} \quad (2)$$

式中： $K$ 为按抗剪强度计算的抗滑稳定安全系数； $f$ 为滑裂面上的抗剪摩擦系数； $c$ 为滑裂面上的抗剪断凝聚力， $\text{kPa/m}$ ； $U_j$ 为坝基扬压力， $\text{kN/m}$ ； $A$ 为滑裂面面积， $\text{m}^2$ ； $W_i$ 为计算截面以上全部荷载对滑裂面的法向分力， $\text{kN/m}$ ； $P_k$ 为计算截面以上全部荷载对滑裂面的切向分力， $\text{kN/m}$ 。

### 3 溪头水库工程试验

#### 3.1 工程概况

溪头水库大坝为浆砌石重力坝，坝高44.5 m，设计正常蓄水位796.00 m，为小(1)型水库。坝址区位于喷出花岗岩体边缘与震旦系变质砂岩相接部位，左坝肩花岗岩与震旦系呈不整合接触，接触面岩体严重挤压，地质营力作用强烈，导致不整合面右侧花岗岩岩体破碎，多年地质作用使接触面右侧花岗岩风化强烈且深度深，经地质钻孔揭露，接触面紧邻的右侧全风化花岗岩最大深度约为50~60 m。左坝段坝基地质横剖面图见图1，左坝段坝基全风化花岗岩现场照片见图2。

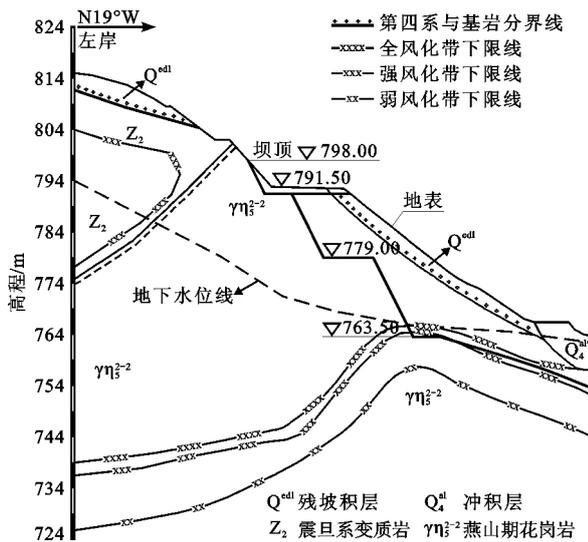


图1 溪头水库工程左坝段坝基地质横剖面图(单位:m)



(a)左坝段坝基全风化花岗岩 (b)左坝段坝基全风化花岗岩喷锚支护

图2 溪头水库工程左坝段坝基全风化花岗岩现场照片

由图1、2可看出，不整合接触面出露高程约为801 m，高于坝顶高程798.0 m，且倾向库外左岸山体(图1)；左坝段坝基皆为全风化花岗岩，呈黄褐色，母岩结构可清晰辨认，呈不具黏性的砂土状，结构致密稳定，孔隙比小，抗渗性好(图2)。其他坝段为强~弱风化。

设计选取了完建、正常、设计和校核4种工况，分别对大坝左坝段坝基所受应力进行计算，坝基所受最大应力为481.31~499.02 kPa，所受最小应力为191.86~366.15 kPa。

#### 3.2 试验方案

在建基面791.5和779.0 m两级平台均匀布设重型动力触探和浅层平板载荷试验点，且每个点皆避开一些较大结构面，触探点和载荷试验点在平台下0.5 m进行。由于全风化花岗岩取样困难，在每个载荷试验坑四周坑壁中细致削掉表层已扰动的岩体，用事先在固定盘上垫了黏土的切土器仔细削切出原状岩样，测定坝基全风化花岗岩天然状态下承载力和抗剪强度指标。

重型动力触探试验：两级平台全覆盖布设触探点，平均分别布设了3条和5条测线，测线间距分别为1.3和1.6 m，每条测线均匀布设4个测点，分别共计12、20个触探点。

浅层平板载荷试验：两级平台触探试验测线间折线型布设载荷试验点，分别均匀布设4和6个。

室内三轴剪切试验：于每个载荷试验点同一位置取两个全风化花岗岩原状岩样进行不排水固结剪切试验，共计20个。

791.5和779.0 m平台原位试验点和原状岩样取样点布设如图3所示。

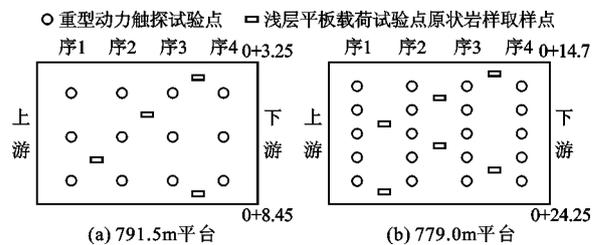


图3 791.5和779.0 m平台原位试验点和取样点分布图(单位:m)

## 4 试验结果与分析

### 4.1 承载力试验结果

4.1.1 天然状态下重型动力触探试验 根据天然状态下坝基全风化花岗岩现场重型动力触探试验击

数值,获得修正值(试验杆长 3 m),并依据公式(1)计算出 791.5 和 779.0 m 平台坝基全风化花岗岩地基承载力,结果见表 1 和图 4,779.0 m 平台从内侧(左侧)至外侧(右侧)全风化花岗岩承载力变化趋势如图 5 所示(重型动力触探试验)。

表 1 天然状态下重型动力触探试验结果统计表

平台高程/m	平面桩号/m	实测击数	修正后击数	地基承载力/kPa
791.5	0+4.55	17	16.32	610.67
		16	15.39	577.22
		15	14.48	544.50
	0+5.85	15	14.48	544.50
		15	14.48	544.50
		15	14.48	544.50
		14	13.59	512.50
		15	14.48	544.50
		14	13.59	512.50
	0+7.15	14	13.59	512.50
		14	13.59	512.50
		14	13.59	512.50
14		13.59	512.50	
779.0	0+16.3	16	15.39	577.22
		17	16.32	610.67
		16	15.39	577.22
	0+17.9	16	15.39	577.22
		15	14.48	544.50
		15	14.48	544.50
	0+19.5	14	13.59	512.50
		15	14.48	544.50
		14	13.59	512.50
		14	13.59	512.50
		9	8.78	339.53
		10	9.75	374.41
0+21.1	10	9.75	374.41	
	9	8.78	339.53	
	8	7.82	305.01	
0+22.7	7	6.85	270.13	
	8	7.82	305.01	
		8	7.82	305.01

4.1.2 天然状态下浅层平板载荷试验 天然状态下坝基全风化花岗岩现场浅层平板载荷试验因反力不足,所有测点的极限破坏荷载均未获得,根据每个测点测

定的数据,绘制各测点的  $p-s$  曲线。对有明显比例界限的点,取比例界限的 80% 作为该测点地基承载力;对比比例界限不明显的测点,取沉降量  $s$  为承压板边长  $b$  的 1.5% (即 1.9 mm) 时对应的荷载为地基承载力,试验结果统计见表 2,779.0 m 平台从内侧至外侧全风化花岗岩承载力变化趋势见图 6(浅层平板载荷试验)。

表 2 天然状态下浅层平板载荷试验成果统计表

平台高程/m	平面桩号/m	比例界限/kPa	$s=1.9$ mm 对应的荷载/kPa	地基承载力/kPa
791.5	0+3.90	663		530
	0+5.20		548	548
	0+6.50		512	512
	0+7.80	634		507
	0+15.5		532	532
779.0	0+17.1	641		513
	0+18.7		504	504
	0+20.3		404	404
	0+21.9		302	302
	0+23.5		278	278

4.1.3 饱和状态下重型动力触探试验 791.5 和 779.0 m 平台开挖到位后,即出现一次 3~4 d 的持续降雨,坝基平台上出现明显变形,通过探坑发现平台表层厚度约为 1.0~1.5 m 的岩体已为饱和状态。为复核坝基承载力,再次对两平台全风化花岗岩分别进行 4、6 次重型动力触探试验(考虑到原试验点岩体已扰动,本次采用浅层平板载荷试验的试验点),其试验结果统计见表 3,779.0 m 平台从内侧至外侧全风化花岗岩承载力变化趋势见图 7。

表 3 饱和状态下重型动力触探试验结果统计表

平台高程/m	平面桩号/m	实测击数	修正后击数	地基承载力/kPa
791.5	0+3.90	4	3.94	165.48
	0+5.20	4	3.94	165.48
	0+6.50	3	2.96	130.24
	0+7.80	3	2.96	130.24
	0+15.5	4	3.94	165.48
779.0	0+17.1	4	3.94	165.48
	0+18.7	3	2.96	130.24
	0+20.3	3	2.96	130.24
	0+21.9	4	3.94	165.48
	0+23.5	3	2.96	130.24

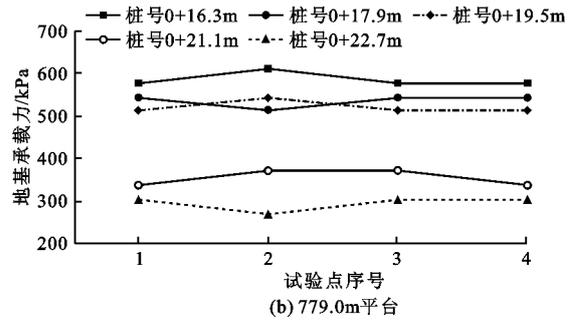
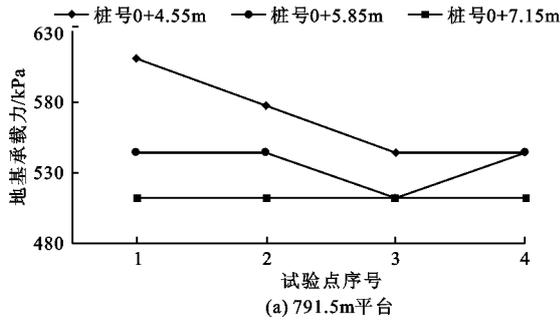


图4 坝基天然状态下全风化花岗岩地基 791.5 和 779.0 m 平台承载力试验结果(重型动力触探试验)

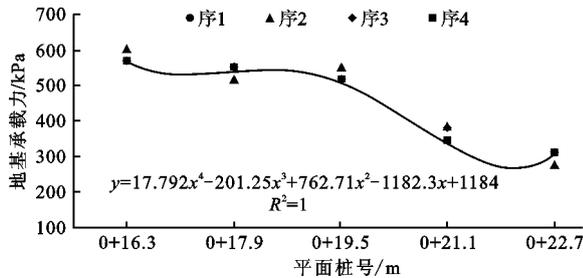


图5 779.0 m 平台坝基天然状态下全风化花岗岩地基由内侧向外侧承载力变化趋势(重型动力触探试验)

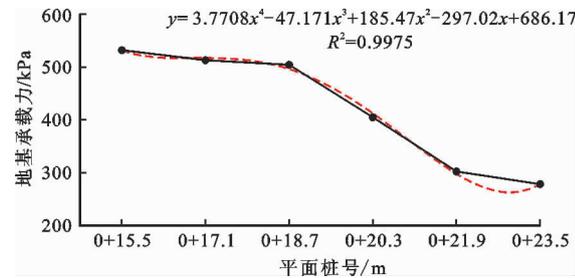


图6 779.0 m 平台坝基天然状态下全风化花岗岩地基由内侧向外侧承载力变化趋势(浅层平板载荷试验)

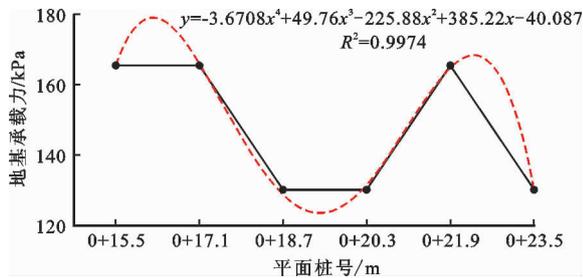


图7 779.0 m 平台坝基饱和状态下全风化花岗岩地基由内侧向外侧承载力变化趋势(重型动力触探试验)

表4 天然原状岩样抗剪强度成果统计表

平台	平面桩号	岩样编号	黏聚力 $c'$ / kPa	内摩擦角 $\varphi' / (^\circ)$
791.5 m	0+3.90	1#	26.3	38.6
	0+5.20	2#	24.5	42.2
	0+6.50	3#	34.5	33.8
	0+7.80	4#	24.6	29.9
	0+15.5	5#	30.1	43.2
	0+17.1	6#	23.7	39.1
779.0 m	0+18.7	7#	27.2	45.0
	0+20.3	8#	25.4	32.5
	0+21.9	9#	16.1	28.3
	0+23.5	10#	17.8	27.2

4.2.2 饱和状态下三轴剪切试验 对其余的原状试样分别放入三轴剪切仪中进行固定,并加水使其达到饱和状态,再对饱和状态下的原状全风化花岗岩岩样进行室内三轴剪切试验,其成果统计见表5和图8。

表5 饱和原状岩样抗剪强度成果统计表

平台	平面桩号	岩样编号	黏聚力 $c'$ / kPa	内摩擦角 $\varphi' / (^\circ)$
791.5	0+3.90	1#	14.2	5.6
	0+5.20	2#	10.1	4.5
	0+6.50	3#	8.5	4.0
	0+7.80	4#	9.2	3.6
	0+15.5	5#	13.3	6.2
	0+17.1	6#	11.6	6.9
779.0	0+18.7	7#	8.2	8.1
	0+20.3	8#	11.7	5.5
	0+21.9	9#	7.5	4.7
	0+23.5	10#	9.8	3.2

4.2 抗剪强度试验结果

4.2.1 天然状态下三轴剪切试验 于791.5和779.0 m 平台每个浅层平板载荷试验点取两个原状岩样(取样时间和位置相近),共计20个,分为两组,每组10个试样,其中1组进行天然状态下三轴剪切试验,其成果统计见表4和图8。

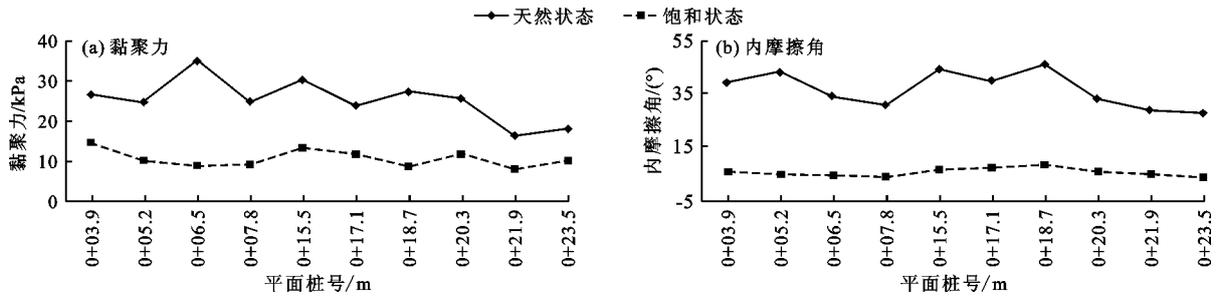


图 8 天然与饱和状态下全风化花岗岩抗剪强度对比

### 4.3 试验结果分析与讨论

由表 1~5 及图 4~8 的试验结果,做如下讨论:

(1) 由表 1,2 和图 4,5,6 可知,791.5 m 平台以及 779.0 m 平台左侧(内侧)天然状态全风化花岗岩地基承载力特征值皆大于 500 kPa,基本满足设计要求;但 779.0 m 平台右侧(外侧)地基承载力皆小于 500 kPa。

(2) 由表 1,2 和图 4,5,6 可知,791.5 及 779.0 m 平台右侧坝基全风化花岗岩地基承载力由平台左侧(内侧)向右侧(外侧)呈显著减小趋势,即其由地表至地下为一个岩性连续渐进变化地质体,越接近地表则岩体风化程度越大,其物理力学性能越差;且 779.0 m 平台地基承载力从左向右变化规律符合一元四次方程。其原因应为平台内侧全风化花岗岩埋深明显大于外侧,导致其风化程度明显低于外侧;且据岩体室内土工试验分析,平台内侧岩样的干密度和密实度等明显大于外侧,而孔隙比和渗透系数明显小于外侧。即天然状态下全风化花岗岩地基承载力与其风化程度呈反比。

(3) 由表 2,3 和图 4~7 可知,饱和状态下全风化花岗岩地基承载力显著小于天然状态,其折减幅度为 55.4%~70.4%;天然状态下全风化花岗岩地基承载力会因其风化程度不同差异巨大,最大差值可达 2 倍以上,而饱和状态下不同风化程度的全风化花岗岩地基承载力变化幅度较小,且其地基承载力不超过 170 kPa。

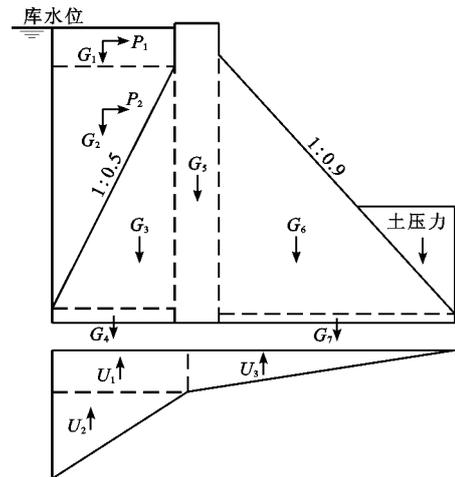
(4) 由表 4,5 和图 8 可知,天然状态下全风化花岗岩抗剪强度由平台内侧向外侧呈明显减小趋势,即岩样风化程度越高其抗剪强度越低;饱和状态下全风化花岗岩抗剪强度远低于天然状态,其中黏聚力折减幅度为 53.9%~75.4%,内摩擦角折减幅度为 83.1%~89.3%。且不同风化程度的天然岩样的抗剪强度波动幅度显著大于饱和状态。

## 5 坝体稳定性分析计算

### 5.1 计算模型

水库左坝肩坝基为全风化花岗岩,为验算其抗

滑稳定性,以 791.5 和 779.0 m 平台位置典型坝体纵剖面为计算对象,由于坝体受力情况较为复杂,对坝前水压力、坝底扬压力和坝体进行合理简化处理后建立了左坝段坝体抗滑稳定性计算模型,如图 9 所示。



$G_1, G_2$  为作用于坝前水自重,  $P_1, P_2$  为作用于坝前水平推力,  $U_1 \sim U_3$  为扬压力,  $G_3 \sim G_7$  为坝体自重

图 9 左坝段坝体抗滑稳定计算模型

### 5.2 计算结果及讨论

左坝段坝体可能会沿着下面 3 个滑动面产生滑动失稳:坝基垫层与坝基全风化花岗岩接触面、坝体与坝基垫层接触面和坝基全风化花岗岩深层滑动面,由于后两者滑动面地基承载力和抗剪强度显著强于前者,其抗滑稳定性安全系数更高。因此,左坝段坝体最危险滑动面为坝基垫层与坝基全风化花岗岩接触面。

经过分析,左坝肩仅平面桩号 0+000~0+42.25 m 的坝基为全风化花岗岩,791.5 m 平台桩号 0+8.45 m 和 779.0 m 平台桩号 0+42.25 m 位置坝体自重相对平台其他位置最大,其坝基全风化花岗岩风化程度最深,地基承载力和抗剪强度相对最低,为最危险断面。

因此,采用该两断面为左坝段坝体抗滑稳定性计算对象,其中 779.0 m 平台桩号 0+42.25 m 位置

坝体断面校核、设计和正常水位工况下坝体自重(包括垫层)、水压力、扬压力和水平推力如表6所示。且计算时,根据天然、饱和状态下全风化花岗岩样抗剪强度参数,分别取两平台抗剪强度的最小值,根据公式(2)计算两平台典型断面在校核、设计、正常3种工况下坝基的抗滑稳定系数 $K$ ,其计算结果见表7。

表6 779.0 m 平台桩号0+42.25 m 断面  
不同水位各种作用力统计表 kN/m

荷载	校核水位	设计水位	正常水位
自重 $G_3 \sim G_7$	277564.65	277564.65	277564.65
土压力	16911.68	16911.68	16911.68
水重 $G_1$	26187.98	25644.15	24108.00
水重 $G_2$	12378.86	12079.37	11233.48
水平推力 $P_1$	58325.19	57014.44	53397.75
水平推力 $P_2$	28428.09	27656.62	25542.93
扬压力 $U_1$	66123.49	65376.29	63268.80
扬压力 $U_2$	70043.33	69091.81	66408.00
扬压力 $U_3$	64056.98	63321.83	61248.34

表7 791.5 和 779.0 m 平台坝基天然、饱和状态下  
不同水位抗滑稳定系数  $K$  计算成果统计表

状态 工况	平台高程/ m	校核 水位	设计 水位	正常 蓄水位
天然状态	791.5	1.59	1.76	2.08
	779.0	1.11	1.19	1.43
饱和状态	791.5	0.71	0.77	0.89
	779.0	0.56	0.59	0.65

由表7可知:(1)坝基全风化花岗岩处于天然状态时,791.5 和 779.0 m 平台最危险断面在校核水位、设计水位、正常水位工况下的抗滑稳定系数分别为1.59、1.76、2.08 和 1.11、1.19、1.43,791.5 m 平台抗滑稳定性较好,虽然 779.0 m 平台在各水位下处于基本稳定状态,但抗滑稳定安全系数偏小,为提高工程的安全性,应对其进行加固处理。(2)坝基全风化花岗岩处于饱和状态时,两平台最危险断面在校核、设计、正常水位的抗滑稳定系数分别为0.71、0.77、0.89 和 0.56、0.59、0.65,安全系数远小于1.0,表明大坝必将发生滑动失稳,饱和全风化花岗岩岩体不可作为大坝坝基。

## 6 结 论

(1)左坝段全风化花岗岩由地表至地下为一个

岩性连续渐变地质体,越接近地表岩体风化程度越深,物理力学性能越差。

(2)饱和状态下全风化花岗岩地基承载力显著低于天然状态,其折减幅度为55.4%~70.4%;且地基承载力与岩体风化程度呈反比,天然状态衰减幅度大,饱和状态则变化较小。

(3)饱和状态下全风化花岗岩抗剪强度远低于天然状态,其中黏聚力折减幅度为53.9%~75.4%,内摩擦角折减幅度为83.1%~89.3%;且天然岩样抗剪强度随风化程度变化波动幅度大,饱和岩样波动幅度小。

(4)天然状态下左坝肩全风化花岗岩坝基坝段的坝体最危险滑动面抗滑稳定安全系数偏低,为提高工程安全性,应进行加固处理;而饱和状态下则极低,必将产生滑动失稳,不可作为大坝坝基,应彻底清除。

(5)依据研究计算成果,工程修建时对左坝肩791.5 和 779.0 m 平台坝基全风化花岗岩进行全面灌浆加固处理,并于坝基埋设了应力、变形和扬压力等监测设施。工程于2017年1月开始蓄水运行,至今坝基各项监测数据均正常,且变化极小。可见,全风化花岗岩经过适当加固后可作为浆砌石重力坝坝基。

(6)本文受试验条件和试验数据所限,只试探性探索了全风化花岗岩地基承载力随风化程度的变化趋势,未能实现风化程度量化,揭露出其与地基承载力、抗剪强度之间的相关性。研究地基承载力、抗剪强度与埋深深度之间的关系可能是一种思路。

## 参考文献:

- [1] 马平. 花岗岩风化程度与微地形的关系及其风化深度的统计分析[J]. 工程勘察, 2019, 47(8): 15-18+48.
- [2] 陈爱云. 黑云母花岗岩全风化层工程地质特性研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(6): 22-25+43.
- [3] 潘天有. 花岗岩风化物的工程特性探讨[J]. 人民长江, 2008, 39(20): 37-39.
- [4] 冯涛, 吴光, 张夏临. 武广高速铁路风化花岗岩微观变化特征研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(2): 201-204.
- [5] 卢有谦, 韦昌富, 蔡国庆, 等. 风化花岗岩土的持水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S2): 96-100.
- [6] 张丽萍, 陈儒章, 郭燕虹, 等. 风化花岗岩坡地土壤剖面大孔隙特性的空间分布[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 620-632.
- [7] 任文峰, 高璇, 王星华, 等. 富水全风化花岗岩隧道变形规律与力学特性[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13

- (2):34-41.
- [8] 齐延海,李术才,李召峰,等.全风化花岗岩富水地层注浆治理研究与应用[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(3):694-703.
- [9] 王景芝,李安洪,肖红兵,等.饱和全风化花岗岩地基土压缩特性的研究[J].铁道建筑,2009(6):73-76.
- [10] 李凯,王志兵,韦昌富,等.饱和度对风化花岗岩边坡土体抗剪特性的影响[J].岩土力学,2016,37(S1):267-273.
- [11] 刘泽,李友云.不同含水率下的原状全风化花岗岩强度与变形试验研究[J].湖南交通科技,2018,44(1):27-32.
- [12] 赵建军,王思敬,尚彦军,等.全风化花岗岩抗剪强度影响因素分析[J].岩土力学,2005,26(4):624-628.
- [13] HOSSAIN M A, YIN Jianhua. Behavior of a compacted completely decomposed granite soil from suction controlled direct shear tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010,136(1):189-198.
- [14] ZHAO Yanru, YANG Haiqing, HUANG Liping, et al. Mechanical behavior of intact completely decomposed granite soils along multi-stage loading-unloading path[J]. Engineering Geology, 2019,260:105242.
- [15] 梁栋.全风化花岗岩地基沉降变形特性试验研究[D].成都:西南交通大学,2010.
- [16] 刘正楠,杨博,林才奎,等.最大承载力状态下全风化花岗岩路基变形特性与控制方法[J].土木建筑与环境工程,2016,38(1):109-115.
- [17] 胡厚田,王安福,刘涌江,等.花岗岩类土质高边坡稳定性研究[J].岩土工程学报,2009,31(6):824-828.
- [18] 张素敏,朱永全,高炎,等.全风化花岗岩流变特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(4):904-911.
- [19] 赵旭峰,孙钧.海底隧道风化花岗岩流变试验研究[J].岩土力学,2010,31(2):403-406.
- [20] 刘攀.全风化花岗岩试验及本构模型研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [21] 庞小朝.深圳原状全风化花岗岩的试验和本构模型研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2011.
- [22] LIU Jinqun, CHEN Weizhong, NIE Wen, et al. Experimental research on the mass transfer and flow properties of water inrush in completely weathered granite under different particle size distributions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019,52(7):2141-2153.
- [23] 王凯,李术才,杨磊,等.全风化花岗岩加固特性注浆模拟试验[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(11):1199-1209.
- [24] 袁敬强,陈卫忠,黄世武,等.全风化花岗岩注浆加固特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S1):2876-2882.
- [25] 刘金泉,陈卫忠,袁敬强.全风化花岗岩注浆加固体抗冲刷特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(9):1767-1775.
- [26] 冉隆飞,刘洋.花岗岩全风化层及其改良土的试验研究[J].铁道工程学报,2014(1):42-48.
- [27] 周援衡,王永和,卿启湘,等.全风化花岗岩改良土高速铁路路基填料的适宜性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(3):625-634.
- [28] 周援衡,王永和,卿启湘,等.全风化花岗岩改良土路基的长期稳定性试验研究[J].岩土力学,2011,32(S1):596-602.
- [29] 沈维,蒋正伟,常兴旺,等.西南某水电站坝址区风化花岗岩工程地质性质分析[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(1):109-113.
- [30] 王旭斌,郑洪,林飞,等.全风化花岗岩防渗关键技术研究与应用[J].水利规划与设计,2019(4):149-153.
- [31] 肖建国,陈明华,庞晓鑫.船闸围堰全风化花岗岩地层帷幕灌浆工艺分析[J].港工技术,2019,56(S1):118-124.