

抽水蓄能电站蚀变岩原位直剪试验研究

崔波伟

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2024年11月24日; 录用日期: 2024年12月19日; 发布日期: 2024年12月26日

摘要

工程区蚀变岩的存在将直接影响到抽水蓄能电站的设计, 考虑到强蚀变岩自身强度特征难以取到原状试样, 故文章以某抽水蓄能电站为工程背景, 通过原位大型直接剪切试验探究不同蚀变程度的岩土体在天然和饱和两种状态下抗剪强度的变化。研究结果表明, 弱蚀变、天然状态下试样的抗剪性能要明显强于强蚀变、饱和状态下的抗剪性能; 达到峰值剪切强度后曲线下降速率普遍较慢, 试样表现出一定的塑性特征; 蚀变程度的加深要明显强于试样饱和和对抗剪强度劣化的影响。

关键词

蚀变岩体, 原位直剪试验, 饱和工况, 抗剪强度

In-Situ Direct Shear Test Study on Altered Rock in Pumped Storage Hydropower Station

Bowei Cui

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Nov. 24th, 2024; accepted: Dec. 19th, 2024; published: Dec. 26th, 2024

Abstract

The existence of altered rocks in the project area will directly affect the design of the pumped storage hydropower station. Considering that strongly altered rock is difficult to obtain in its original state, this paper takes a pumped storage hydropower station as the engineering background and explores the changes in the shear strength of rock and soil bodies with different degrees of alteration in natural and saturated states through in-situ large-scale direct shear tests. The research results

show that the shear performance of samples in weakly altered and natural states is significantly stronger than that in strongly altered and saturated states; the rate of decline of the curve after the peak shear strength is generally slow, and the samples show certain plastic characteristics; the deepening of the alteration degree is significantly stronger than the effect of saturation sample on the decline of shear strength.

Keywords

Altered Rock, In-Situ Direct Shear Test, Saturation State, Shear Strength

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

抽水蓄能电站是目前电力系统中最成熟、最经济、最安全、最高效的储能方式，是适应新型电力系统建设和助力完成双碳目标的有效途径。蚀变岩[1]是指原岩的化学成分、矿物成分甚至结构构造因蚀变作用而发生改变形成的新一类岩石，蚀变成因主要为三种，即风化、构造动力和热液交代。经过漫长的地质作用，岩土体的蚀变类型和蚀变程度千差万别，对岩土体的力学强度和工程性能造成严重的影响。国内外许多学者都对其进行了专项研究[2]-[6]，例如任明浩[7]等对湖南平江抽水蓄能电站福寿山库区花岗岩平硐中不同硐段的蚀变岩体测定点荷载强度、回弹值和纵波波速，随着硐深增加，岩石的力学性质随风化程度降低整体呈现增强趋势，但在结构面两侧热液蚀变带中明显降低。

强蚀变岩自身灵敏度高、结构性较强，难以取到无干扰或干扰程度小的原状试样，工程勘察多以经验推导、工程类比和室内试验为主，原位直剪试验是获取现场岩土体力学强度性质最为有效准确的一种方法。蔡长发等[8]对一工程削坡形成的高度 20~45 m 的堆填土高边坡进行综合治理，现场原位直剪试验能够更好地模拟原型试验，获得的力学参数更为相对可靠，具有更好的参考价值；白金朋等[9]对水电站堆积体采用现场直剪试验，发现堆积体碎石土抗剪强度参数明显受到含石量的影响，当含石量在 30%~70%时，内摩擦角随含石量线性递增的特征而改变，内聚力与含石量没有明显的线性关系。但是，影响抗剪强度的因素还有很多，例如岩石的风化程度、试件的尺寸效应、密实度等，不同地区的蚀变岩表现出不同的物理力学性质，因此本文以某抽水蓄能电站为工程背景，通过原位大型直接剪切试验探究不同蚀变程度的岩土体在天然和饱和状态下抗剪强度参数的变化，为水电站工程设计和稳定性评价提供支撑。

2. 岩体特征

工程区位于甘肃平川区东南部，属侵蚀~构造中低山区，地势总体为西高东低。工程区东部下库及下游有黄土覆盖，山体坡度 23°~45°，谷底狭窄，海拔高程一般为 2270~2810 m。工程区出露地层主要有奥陶系变质不等粒长石石英杂砂岩、加里东中期浅灰色中细粒花岗闪长岩和第四系堆积物。

前期勘察表明工程区岩体存在不同程度的岩体蚀变现象，蚀变差异比较明显，主要表现在沿构造面的发育，构造面充填的方解石已部分蚀变呈泥状，岩体蚀变后强度较低、性状较差，且差异明显。在空间分布上，蚀变体中心位于下库下坝址附近，见图 1，主要蚀变体及影响带平面上呈条带状，条带宽度 50~200 m，其余方向蚀变体呈树枝状沿裂隙等结构面不规则扩散。

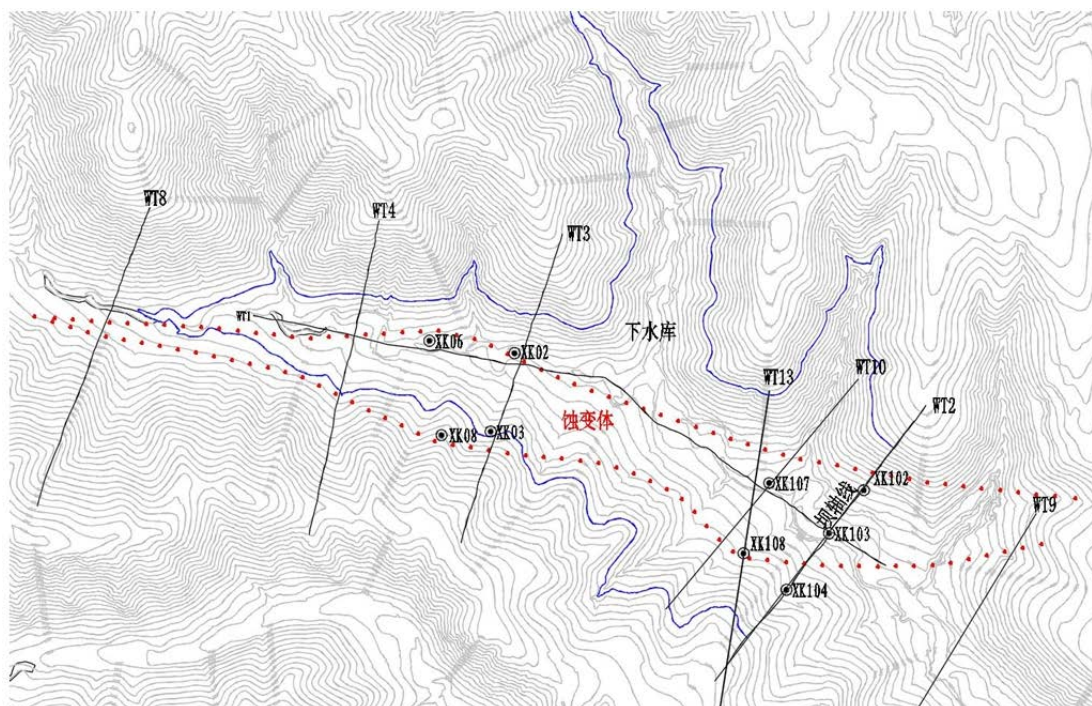


Figure 1. Distribution of altered rock in the lower reservoir

图 1. 下库蚀变体分布

3. 试验设备与方法

现场不同蚀变岩体的原位直接剪切试验采用 XZJ-500 型现场剪切测试系统。该设备用于测定最大粒径为 100 mm 粗颗粒土的抗剪强度性能, 采用分级加载, 可以完整记录剪切过程中的剪力和位移, 其主要参数为: 刚性试验框架, 长 3.5 m, 高度 1.5 m; 圆柱试样尺寸(直径、高度): $\Phi 500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$; 竖直最大出力: 500 kN (正应力 0~2.5 MPa), 稳压误差: $\leq 1\% \text{ FS}$; 水平最大出力: 1000 kN (剪应力 0~5.0 MPa), 稳压误差: $\leq 1\% \text{ FS}$; 垂直油缸最大行程: 150 mm, 竖向电子位移计量程 150 mm, 精度 0.01 mm; 水平油缸最大行程: 150 mm, 水平电子位移计量程 150 mm, 精度 0.01 mm。

现场大型直剪试验主要针对弱蚀变岩体和强蚀变岩体。弱蚀变岩体的原位直剪试验场地位于下水库库岸右侧缓坡, 经挖掘机开挖形成 $15 \times 9 \text{ m}$ 的试验平台, 完成天然状态和饱和状态下 2 组试验(8 个试样)。强蚀变岩体的原位直剪试验场地位于下游靠近坝址处, 同样采用挖掘机开挖出试验平台, 完成天然状态和饱和状态下 2 组试验(8 个试样)。试样为圆柱形, 高 30 cm, 直径 50 cm, 共计 16 个, 试样经人工制作而成, 在槽垒上进行试样开挖, 初修完成试样轮廓后, 将剪切盒套在初样上, 保证剪切盒的平整度, 注意竖直荷载垂直施加在试样上下表面, 水平荷载着力点位于试样高度中心位置, 剪切面平行于水平荷载方向, 然后在试样与剪切盒的空隙内回填粗细颗粒料, 并轻轻击实, 保证试样与剪切盒四周紧密接触。

试验中的正应力分别为 100、200、300 和 400 kPa。试验过程中先施加竖向荷载至沉降稳定, 然后采用应变控制方式缓慢施加水平荷载, 直至试样发生剪切破坏, 应力的反力通过堆口袋配重提供。试验终止条件为: 剪应力出现显著降低且维持恒定值, 或剪应力未出现明显降低但剪切位移达到 100 mm。实验全程采用自动化数据采集仪记录剪切位移、剪应力、法向位移、法向应力等, 并及时调整法向应力使其稳定在设定值。

4. 试验结果分析

4.1. 试件剪切破坏形态

原位直接剪切试验结束后，移除试验设备，翻转剪切盒对剪切面进行观察和拍照记录，见图 2~5。剪切面整体形态较平整，部分剪切面因个别孤石强度较高并未剪切破坏而会凸起绕行。部分强蚀变岩土样因节理裂隙发育破碎完全，整体性差，土样占比高，翻转过程中试样垮塌，并未观察记录到实际的剪切破坏面。饱和试样剪切面呈湿润状态，颜色比天然试样深，呈深红色，泥化现象明显，更易观察到剪切面移动时形成的擦痕。



Figure 2. 200 kPa weak alteration natural shear surface

图 2. 200 kPa 弱蚀变天然剪切面



Figure 3. 300 kPa weak alteration saturated shear surface

图 3. 300 kPa 弱蚀变饱和剪切面



Figure 4. 300 kPa strong alteration natural shear surface

图 4. 300 kPa 强蚀变天然剪切面



Figure 5. 300 kPa strong alteration saturated shear surface

图 5. 300 kPa 强蚀变饱和剪切面

4.2. 切应力 - 切向位移曲线特征

原位大型直剪试验可以得到不同蚀变岩在天然和饱和两种状态下的剪应力 - 剪切位移关系曲线, 如图 6~9, 进而分析不同蚀变岩在受到剪力时的变形破坏和抗剪强度特征。不同于典型的岩石或土样剪切应力应变关系曲线, 试验曲线剪应力随剪切位移的变化规律较为复杂, 这是由于原位试验破碎岩土体的级配范围分布广, 无法定量控制, 当遇到坚硬孤石时, 曲线斜率突然增大, 当试样含石量较高, 曲线特征更加接近于典型岩石的剪切应力应变曲线。但是, 达到峰值剪切强度后曲线下降速率普遍较慢, 试样表现出一定的塑性特征。

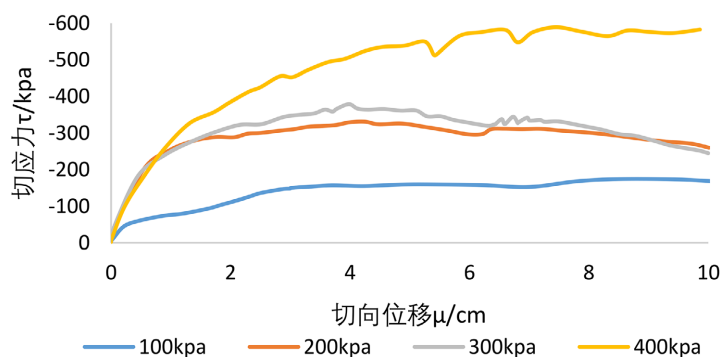


Figure 6. Natural weak alteration

图 6. 天然弱蚀变

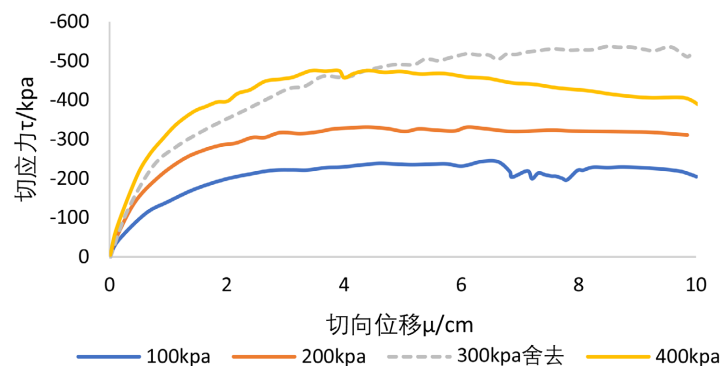


Figure 7. Saturated weak alteration

图 7. 饱和弱蚀变

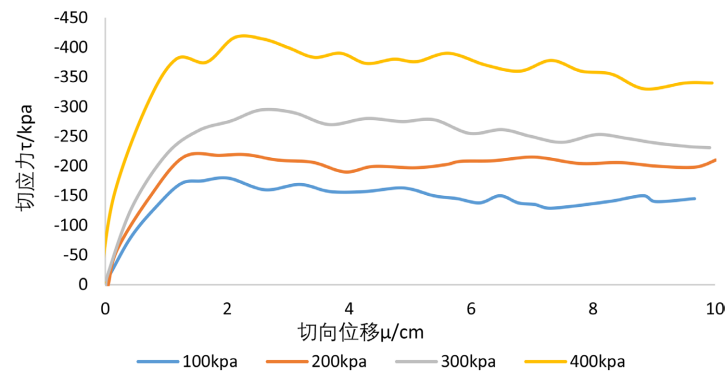


Figure 8. Natural strong alteration
图 8. 强蚀变天然

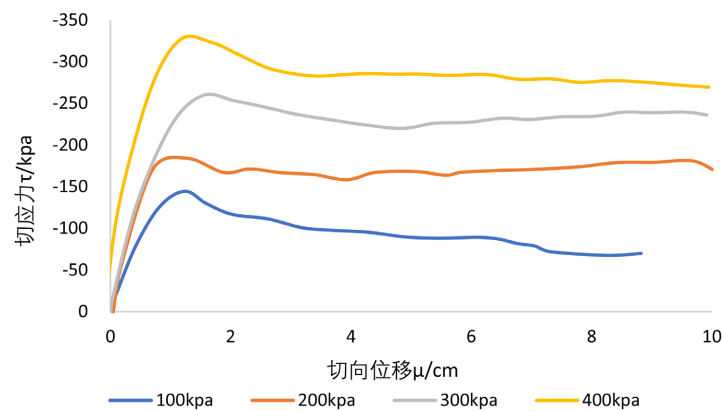


Figure 9. Saturated strong alteration
图 9. 强蚀变饱和

为进一步细化分析试样在不同状态下的峰值剪切强度关系规律，从表 1 和图 10 中可以看出本次试验结果与朱隆奇[10]对花岗岩残积土峰值强度的试验结果具有一致性，即不论岩体蚀变风化程度，随着法向应力的增大，土颗粒之间的接触都是趋向于更为紧密，颗粒之间的摩擦力显著增强，峰值剪切强度和对应的应变也随之增大，试样普遍在剪切位移 1~4 cm 时破坏达到峰值剪切强度。因蚀变程度的加深，岩土体矿物成分、颗粒组成发生变化，岩土体节理裂隙发育更加强烈，完整性降低，强蚀变岩的峰值剪切强度要小于弱蚀变岩的峰值剪切强度。同样地，因水分对剪切面颗粒起到溶解润滑作用，颗粒更易发生相对滑动，饱和状态下的蚀变岩峰值剪切强度要小于天然含水量状态下的蚀变岩峰值剪切强度。

Table 1. Peak shear strength in different test conditions
表 1. 不同试验状态的峰值剪切强度

试验组别	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa
弱蚀变天然	183.84	330.94	379.02	589.15
弱蚀变饱和	243.30	331.27	535.51 舍去	475.33
强蚀变天然	179.60	219.14	294.50	416.55
强蚀变饱和	144.60	184.14	259.50	326.55

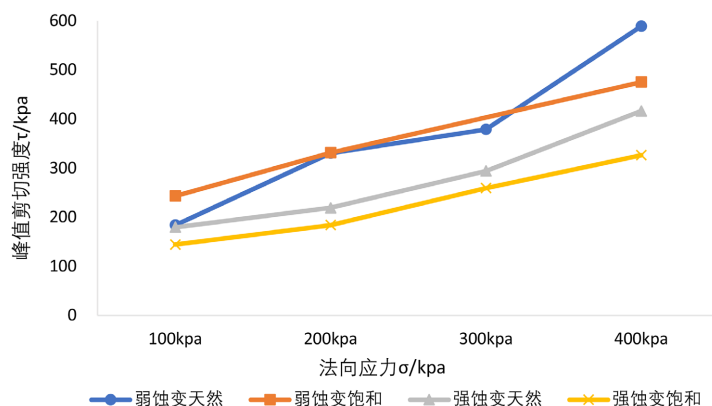


Figure 10. Peak shear strength curves in different test conditions

图 10. 不同试验状态峰值剪切强度曲线

4.3. 抗剪强度参数

根据莫尔-库仑破坏准则，不同试验的峰值剪切强度与法向应力的关系曲线如图 11，进而可以计算得到不同试验状态下的抗剪强度指标 c 值和 φ 值，如表 2。结果分析表明，蚀变程度加深，饱和状态下，试样抗剪强度指标都随之降低，反映出岩土体整体强度明显降低。与弱蚀变天然试样相比，弱蚀变饱和试样粘聚力 c 值降低 11.69 kPa 约 9.7%，内摩擦角 φ 值降低 1.9° 约 4.1%；与强蚀变天然试样相比，强蚀变饱和试样粘聚力 c 值降低 7.50 kPa 约 9.3%，内摩擦角 φ 值降低 6.4° 约 16.7%。与弱蚀变天然试样相比，强蚀变天然试样粘聚力 c 值降低 39.66 kPa 约 32.9%，内摩擦角 φ 值降低 8.0° 约 17.3%；与弱蚀变饱和试样相比，强蚀变饱和试样粘聚力 c 值降低 34.91 kPa 约 32.2%，内摩擦角 φ 值降低 12.5° 约 28.2%。对抗剪强度指标劣化的影响，蚀变程度的加深要明显强于试样饱和对其的影响。

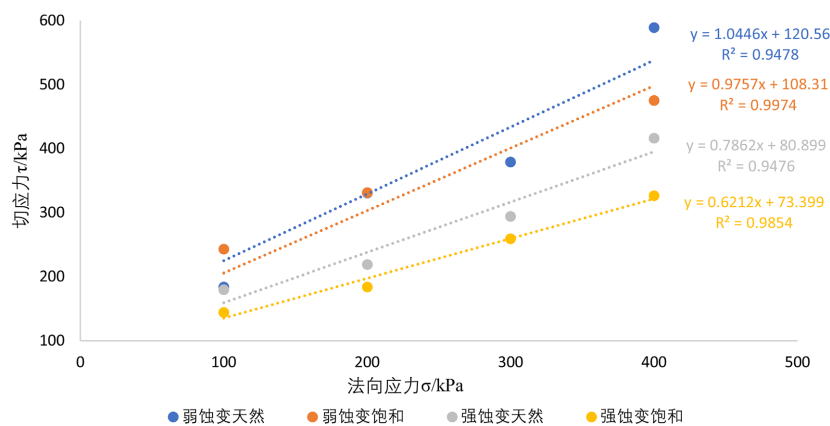


Figure 11. Direct shear fitting curves in different test conditions

图 11. 不同试验状态直剪拟合曲线

Table 2. Calculation results of shear strength index

表 2. 抗剪强度指标计算结果

试验组别	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	相关度 R^2
弱蚀变天然	120.56	46.2	0.9478
弱蚀变饱和	108.31	44.3	0.9974

续表

强蚀变天然	80.90	38.2	0.9476
强蚀变饱和	73.40	31.8	0.9854

5. 结论

本文通过原位大型直接剪切试验探究不同蚀变程度的岩土体在天然和饱和两种状态下抗剪强度的变化。结果分析表明：

- 1) 不同于典型的岩石或土样剪切应力应变关系曲线，试验曲线剪应力随剪切位移的变化规律复杂，达到峰值剪切强度后曲线下降速率普遍较慢，试样表现出一定的塑性特征。
- 2) 随着法向应力的增大，岩土体峰值剪切强度和对应的应变也随之增大，试样普遍在剪切位移 1~4 cm 时破坏并达到峰值剪切强度。蚀变程度加深，饱和状态下，试样抗剪强度指标都随之降低，反映出岩土体整体强度明显降低。对抗剪强度指标劣化的影响，蚀变程度的加深要明显强于试样饱和对其的影响。
- 3) 试验下一步可考虑对试样土石比作定量分析，细分剪切强度曲线与试样土石混合体的关系，可以更好地为工程实践服务。

参考文献

[1] 杨根兰. 蚀变岩特性及其工程响应研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2007.

[2] 张婧, 吴彤, 闫晓石, 等. 花岗岩蚀变程度对隧洞稳定性影响研究[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版): 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20240325.1752.004.html>, 2024-11-19.

[3] 李金秋, 张永双, 任三绍, 等. 金沙江上游白格滑坡黏土化蚀变岩的灾变力学行为研究[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(3): 72-82.

[4] 石尚. 某输水隧洞蚀变岩物理力学性质与洞室稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.

[5] 张永双, 李金秋, 任三绍, 等. 川藏交通廊道黏土化蚀变岩发育特征及其对大型滑坡的促滑作用[J]. 地球科学, 2022, 47(6): 1945-1956.

[6] Wang, A., Li, X., Huang, Z., Huang, X., Wang, Z., Wu, Q., et al. (2015) Laboratory Study on Engineering Geological Characteristics and Formation Mechanism of Altered Rocks of Henan Tianchi Pumped Storage Power Station, China. *Environmental Earth Sciences*, 74, 5063-5075. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4520-6>

[7] 任明浩, 邓雅丽, 袁广祥, 等. 湖南福寿山蚀变花岗岩的工程地质特征及其蚀变程度评价[J/OL]. 工程地质学报: 1-15. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2023-0383>, 2024-11-19.

[8] 蔡长发, 何辉祥, 李爱华, 等. 某堆填土欠稳定高边坡抗剪强度参数取值研究[J]. 城市地质, 2024, 19(2): 209-217.

[9] 白金朋, 唐明武, 董延安, 等. 苏洼龙水电站坝前堆积体抗剪强度特性原位大型直剪试验研究[J]. 四川水力发电, 2022, 41(2): 46-50.

[10] 朱隆奇. 干湿循环作用对皖南花岗岩残积土剪切力学特性影响的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.