

文章编号: 1000-7598 (2012) 06-1719-05

# 谷竹高速公路原状片岩抗剪强度的水敏性研究

刘 建, 李建朋

(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:** 为了解鄂西北地区水敏性片岩在水作用下的抗剪强度特性, 对取自谷竹高速公路现场的原状片岩试样开展了沿其层理面的室内天然状态直剪试验和饱水状态直剪试验, 试验结果表明: 水对片岩的抗剪强度和破坏特征影响显著; 饱水后片岩与天然状态相比凝聚力降低了 36.7%, 内摩擦角降低了 4.6%, 残余凝聚力降低了 66.7%, 残余内摩擦角降低了 11.3%; 与天然状态的脆性破坏不同, 饱水后片岩破坏时具有明显的延性特征。基于试验结果, 探讨了水对片岩抗剪强度参数的弱化机制, 利用极限平衡方法计算了谷竹高速公路沿线某边坡的安全系数, 进而对该边坡在暴雨或连续降雨工况下的稳定性做出了评价。

**关 键 词:** 水敏性片岩; 抗剪强度; 安全系数

**中图分类号:** TU 459+.2

**文献标识码:** A

## Study of shear strength water sensitivity of intact schist from Guzhu expressway

LIU Jian, LI Jian-peng

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Shear tests along bedding plane on Guzhu expressway schist under natural state and water-saturated state have been carried out in order to analyze the shear strength characteristics of the water-sensitive schist located in northwest of Hubei province under the two states. The results show that: compared with the native state, the cohesion force of the schist under saturation state decreased by 36.7%; the internal frictional angle decreased by 4.6%; the residual cohesion force decreased by 66.7%; the residual internal frictional angle decreased by 11.3%; it is different from the brittle fracture under natural state that the schist shows obvious characteristic of ductility at failure under saturation state. Based on the experimental results, the water weakening mechanism of shear strength parameters of schist has been discussed; a safety factor of a slope located in Guzhu expressway has been computed with limit equilibrium method; and then the evaluation of the slope stability under storm or continuous rainfall conditions has been made.

**Key words:** water-sensitive schist; shear strength; safety factor

## 1 引 言

鄂西北地处我国地势第 2 阶梯向第 3 阶梯过渡带, 区内广泛分布有中元古界武当山群片岩。目前在建或已建成的谷竹、十白、十房、十漫高速公路以及福银高速公路十天联络线湖北段等工程均经过该地区。因工程建设需要, 高速公路沿线形成了为数众多的片岩质边坡。片岩水敏性强, 长期浸水后强度显著降低<sup>[1]</sup>。片岩这一特性给相关工程建设带来了安全隐患, 大大影响了其工程进度<sup>[2-3]</sup>。因此, 研究水对片岩的工程力学特性的影响十分必要。已

有学者进行了相关研究。于德海等<sup>[1]</sup>对绿泥石片岩开展了干燥和饱水状态下的三轴压缩试验, 结果表明, 绿泥石片岩属于水敏型岩石, 水对其强度和变形特征的影响是显著的。伍法权<sup>[4]</sup>从理论上分析了地下水压力在薄片状云母石英片岩斜坡倾角变形中的作用, 并在理论公式中考虑了这一因素。洪勇等<sup>[5]</sup>基于对 4 个典型结晶片岩滑坡活动和降雨的长期观测以及对其相互关系的研究, 揭示了集中降雨对结晶片岩滑坡活动的影响, 并确定了相应的降雨特征和类型。然而, 目前对水敏性片岩在降雨与地下水作用下抗剪强度特性与变形破坏的研究较少。

收稿日期: 2011-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 40672192)。

第一作者简介: 刘建, 男, 1966 年生, 博士, 研究员、博士生导师, 主要从事岩石力学与工程的理论与应用方面的研究工作。E-mail: jliu@whrsm.ac.cn

本文通过对取自谷竹高速公路现场的原状片岩试样开展沿其层理面的天然和饱水状态室内直剪试验,对比分析两种状态下片岩的抗剪强度和变形破坏特征。基于试验结果,探讨水对片岩抗剪强度参数的弱化机制,利用极限平衡方法计算谷竹高速公路沿线某边坡的安全系数,进而评价该边坡在暴雨或连续降雨工况下的稳定性。

## 2 水敏性片岩抗剪强度特性试验研究

### 2.1 武当山片岩的地质矿物特征及工程危害

鄂西北地区在气候上属北亚热带季风气候区,多雾多雨,平均年降雨量在 800 mm 以上,在地理上属汉江流域,区内孔隙潜水、基岩裂隙水较发育。该地区广泛出露的中元古界武当山群片岩具鳞片变晶结构,片状构造,主要矿物构成为云母、石英、长石,颜色随风化程度加深由青灰色变为灰褐色。受两郟大断裂控制,武当山群片岩节理裂隙较发育,使得雨水或地下水较易入渗、聚集和留存。在水的作用下,片岩的强度特别是抗剪强度显著弱化,易引发边坡崩塌、滑坡等地质灾害。鄂西北地区因降雨引发的片岩质边坡失稳时有发生。2003 年 6 月的一场降雨引发了鄂西北陨漫公路沿线多处边坡失稳<sup>[2]</sup>。2007 年 8 月下旬在十堰市大川镇某变电站工程的三通一平过程中遭遇长时间持续降雨,引发山体开裂,出现山体滑坡征兆,严重影响了工程进度<sup>[3]</sup>。因此,本次试验重点关注水作用下片岩沿其片理面的抗剪强度特征。

### 2.2 试件制备

首先把取自谷竹高速公路沿线的原状片岩岩样加工成 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件,为使试件受力均匀并满足 RMT 试验机对试件的尺寸要求,在立方体试件外部浇注了混凝土保护套,并在试样中部预留了宽为 5 mm 左右的缝隙。试样制作过程和试验前部分试样如图 1、2 所示。



图 1 混凝土保护套浇注

Fig.1 The pouring of concrete protecting cover



图 2 试验前的部分试样

Fig.2 Some samples before the test

饱水直剪试验前,将立方体试件在大气压和室温条件下浸泡 30 d。通过称量吸水后试样增加的质量得知其浸水 30 d 后含水率平均增加了 0.62%。之后再浇注混凝土保护套。为保证饱水效果,混凝土外套浇注好后,浸入水中养护至规定龄期(28 d),试验之前才将试样从水中取出。

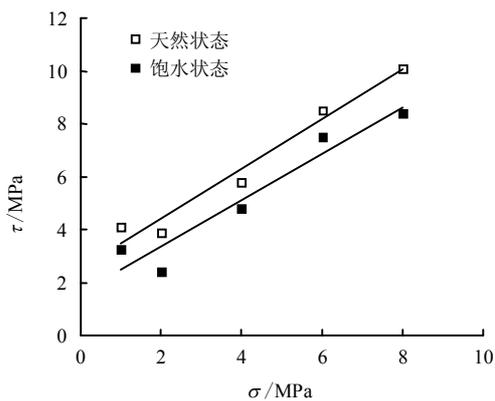
### 2.3 试验仪器与方法

试验在 RMT-150C 岩石力学试验机上进行,分天然状态和饱水状态两组完成。每组做 5 个试样,垂直荷载分别取为 80、60、40、20、10 kN。安装试件时,保证了法向荷载和剪切荷载通过预定剪切面的几何中心。按规范<sup>[6]</sup>要求,试验采用力控制方式。法向荷载以 1 kN/s 的速率一次性施加完毕,待轴向位移稳定后施加剪切荷载。剪切荷载按照预估最大剪切荷载分 8~12 级施加,每级加载后待剪切位移稳定后再施加下一级,加载速率为 0.1 kN/s。试样破坏时,记下最大水平荷载,即可获得试样的抗剪强度。继续施加水平荷载,并使之产生较大的水平位移,即可获得残余抗剪强度,又称抗摩擦强度。

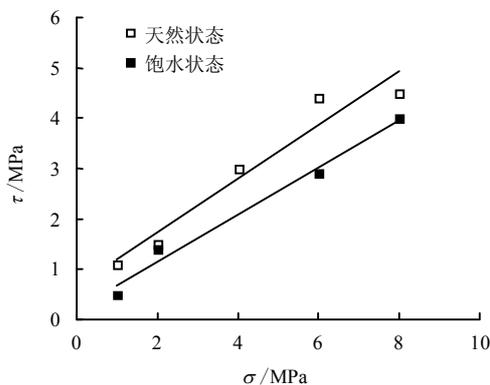
## 3 试验结果与分析

### 3.1 抗剪强度特征

将法向荷载和剪切荷载除以剪切面面积,得到法向应力和剪切应力。根据剪应力与剪切位移关系曲线确定各法向应力下峰值剪应力和残余剪应力数据,进而绘制了  $\tau-\sigma$  散点图。对散点进行线性回归得到图 3 中所示的直线。根据回归直线即可获得天然和饱水状态片岩抗剪强度和残余抗剪强度参数如表 1 所示。显然,相对于天然状态,片岩饱水后,黏聚力降低了 36.7%,内摩擦角降低了 4.6%。饱水后,残余黏聚力降低了 66.7%,残余内摩擦角降低了 11.3%。因此,水对片岩抗剪强度特别是残余抗剪强度具显著的弱化效应。



(a) 峰值剪应力-法向应力



(b) 残余剪应力-法向应力

图 3 特征剪应力与法向应力 ( $\tau$ - $\sigma$ ) 关系

Fig.3 Relationships between shear stress and normal stress

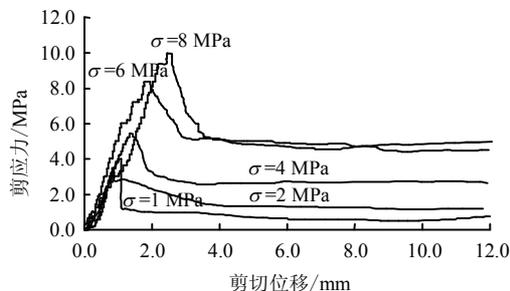
表 1 水敏性片岩抗剪强度参数  
Table 1 Shear strength parameters of water-sensitive schist

状态	凝聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	残余凝聚力 $c/\text{MPa}$	残余内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
天然	2.535	43.2	0.646	28.2
饱水	1.604	41.3	0.215	25.0

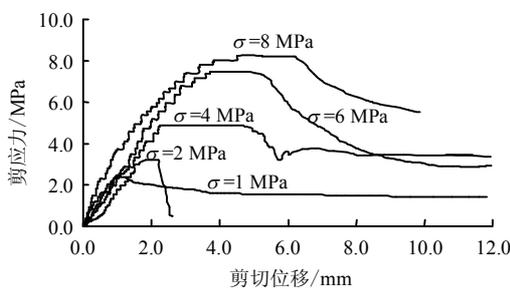
### 3.2 剪应力-剪切位移曲线特征

剪切荷载逐级加载，在上一级荷载产生的剪切位移稳定后才施加下一级荷载，因此，剪应力-剪切位移曲线在剪应力峰值前呈台阶状上升。片岩饱水后与天然状态相比，剪应力-剪切位移曲线表现出了不同特征。由图 4 可以看出：饱水后的片岩峰值前剪应力-剪切位移曲线的平均斜率变小，表明其剪切刚度变小；饱水后片岩试样失去承载力时的剪切位移大于天然状态，剪切应力-剪切位移曲线由峰值向峰后的过渡与天然状态相比也较为缓和；在同样的正应力作用下，饱水片岩试样的抗剪切荷载能力降低；天然状态下的片岩在应力达到峰值后剪应力-剪切位移曲线表现为突然跌落，具脆性破坏特征；饱水后片岩在剪应力-剪切位移曲线达到峰值后，剪

应力并未马上降低，而是维持峰值应力不变，但剪切位移和速率不断增长直至试样破坏，从而形成屈服平台，故片岩试样饱水后由脆性破坏转变为延性破坏。



(a) 天然试样



(b) 饱水试样

图 4 片岩试样不同轴压下剪应力-剪切位移关系曲线  
Fig.4 Shear stress-shear displacement curves of schist samples under different normal stresses

### 3.3 水敏性片岩抗剪强度的水作用机制分析

饱水片岩在剪应力达到峰值时，沿片理面的塑性剪切变形量增加，破坏呈现延性特征（见图 4 (b)）。故相对于天然状态，饱水后的片岩在较小的剪切荷载作用下，剪切变形即不断增长，微观裂隙很快发展成宏观裂缝导致试样失去承载力，故而饱水试验后所得片岩内摩擦角和凝聚力变小。微观上，片岩饱水后，含水率增大，水分子沿颗粒间的接触面侵入，减弱了片岩颗粒间的联系，片岩的片理化效应更加显著，从而造成了饱水片岩力学性能的降低。

另外，含水率的提高，使得片岩颗粒间结合水膜效应显著，颗粒间由摩擦接触变为水膜接触。图 5 给出了典型片岩试样在天然和饱和状态下直剪破坏后的对比图。天然状态的片岩破坏面可见白色摩擦擦痕，而饱水片岩试样破坏面则无摩擦擦痕。这表明，水在片理面上产生润滑作用，使片理面上的摩阻力减小和作用在片理面上的剪应力效应增强，进而使得片岩沿片理面的剪切运动更易发生。水对岩体产生的润滑作用反映在力学上，就是使岩体的

内摩擦角减小<sup>[7]</sup>。因此，水的润滑作用也造成了片岩饱水后内摩擦角的降低。

试验所用岩样的矿物组成中未见强亲水性矿物，因此，其饱水后抗剪强度的降低主要原因是水造成的延性破坏特征和水的润滑作用。



图 5 典型天然（左）与饱水（右）片岩试样破坏面  
Fig.5 Typical failure surface of natural (left) and saturated water (right) schist specimens

### 4 工程应用

#### 4.1 工程地质概况

谷城至竹溪高速公路 ZK39+290~ZK39+400 边坡段位于孔溪沟村附近，左侧开挖边坡最高为 35.9 m，该坡段典型断面如图 6 所示。本路段在地貌上属侵蚀剥蚀低山区，线路在斜坡地带通过。路段岩石片理产状为 290°∠54°。该边坡岩体节理裂隙发育，节理裂隙发育，产状为 170°∠80°，节理面粗糙，延伸大于 20 m，张开 5~10 cm，密度为 1-2 条/m；浅表分布有残坡积层，基岩出露为元古界武当群片岩，岩体风化强烈，浅部岩体破碎。

#### 4.2 参数取值

由于岩体中结构面的影响和岩体结构尺寸效应的影响，岩块室内试验值一般不直接作为岩体设计采用值，大多需要对试验值进行折减。本文采用 Georgi 法计算该边坡岩体的粘聚力值。

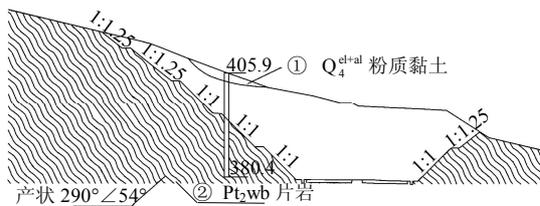


图 6 谷竹高速公路某边坡典型断面  
Fig.6 Typical cross section of one slope along Guzhu expressway

Georgi 对片麻岩、大理岩、辉长岩、角闪岩、二长班岩、安山岩、玄武岩、流纹岩等 15 种坚硬的

火山岩和变质岩的岩石强度和岩体强度进行了研究后，得出下述经验公式：

$$c_m = [0.114e^{-0.48(i-2)} + 0.02]c_k \quad (1)$$

式中：*i* 为岩体节理裂隙的密度(条/m)；*c<sub>k</sub>* 为岩石的凝聚力(MPa)，*c<sub>m</sub>* 为弱化后的岩体凝聚力(MPa)。

根据岩体节理密度统计值，Georgi 方法中 *i* 可取为 1~2，为安全起见，本次计算选用上限值，即取 *i*=2。进而可根据经验公式 (1) 求得岩体的凝聚力。由于该坡段岩体风化强烈，岩体内摩擦角采用残余摩擦角。表 2 给出了片岩岩体抗剪强度参数取值。

#### 4.3 计算方法与结果分析

暴雨对斜坡稳定性的影响目前主要采用暴雨滑坡的稳定安全系数进行评价<sup>[8]</sup>。本文通过考虑边坡岩体抗剪强度的折减来反映降雨作用的影响程度，因此，分别将片岩岩体的天然和饱水抗剪强度作为天然工况和暴雨工况的强度参数代入极限平衡计算公式，求得了该边坡在天然工况和暴雨工况下的安全系数，列于表 2。

由计算结果可知，考虑水的影响后，边坡的安全系数与天然工况相比降低了 40.9%，但安全系数仍大于 1，表明在暴雨或长期降雨作用下该片岩质边坡是稳定的。

表 2 边坡岩体强度参数与安全系数  
Table 2 Rock mass strength parameters and safety factors of the slope

工况	凝聚力 <i>c</i> /MPa	内摩擦角/(°)	安全系数
天然	0.340	28.2	3.35
暴雨	0.215	25.0	1.98

### 5 结 论

(1) 片岩试样饱水后，其剪应力-剪切位移曲线特征与天然状态不同：饱水片岩剪切刚度变小，达到承载力极限时的剪切位移明显大于天然状态，剪应力-剪切位移曲线在剪应力峰值处出现屈服平台，破坏时与天然状态下脆性破坏特征亦有不同，其破坏呈延性特征。

(2) 水对片岩抗剪强度特别是残余抗剪强度具显著的弱化效应。片岩饱水软化后，凝聚力降低了 36.7%，内摩擦角降低了 4.6%，残余凝聚力降低了 66.7%，残余内摩擦角降低了 11.3%。

(3) 水敏性片岩抗剪强度的水作用机制分析表明，破坏的延性特征和片理面上润滑作用是导致武当山群片岩长期浸水后抗剪强度弱化的主要原因。

(4) 将试验成果应用于谷竹高速公路某边坡降雨工况下稳定性计算分析, 结果表明, 考虑水的影响后, 该边坡的安全系数与天然工况相比, 降低了40.9%, 但安全系数仍大于1, 表明在暴雨或长期降雨作用下该边坡是稳定的。

### 参考文献

- [1] 于德海, 彭建兵. 三轴压缩下水影响绿泥石片岩力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 205—211.  
YU De-hai, PENG Jian-bing. Experimental study of mechanical properties of chlorite schist with water under triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(1): 205—211.
- [2] 柴波, 余宏明, 殷坤龙. 鄂西北山区降雨型边坡失稳模式和评价方法[J]. 工程地质学报, 2008, 16(3): 332—337.  
CHAI Bo, YU Hong-ming, YIN Kun-long. Failure modes and evaluation methods of rainstorm induced landslides in northwestern Hubei province[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2008, 16(3): 332—337.
- [3] 黄河, 尚义敏, 彭斌, 等. 鄂西北片岩质边坡变形破坏机制和对策[J]. 土工基础, 2010, 24(2): 49—52.  
HUANG He, SHANG Yi-min, PENG Bin, et al. Deformation and failure mechanism and treatment of rock slopes in northwest hubei[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2010, 24(2): 49—52.
- [4] 伍法权. 云母石英片岩斜坡弯曲倾倒变形的理论分析[J]. 工程地质学报, 1997, 5(4): 306—311.  
WU Fa-quan. Theoretical analysis of bending and topping deformation in slopes of mica-quartz schist[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1997, 5(4): 306—311.
- [5] 洪勇, 商志红. 日本结晶片岩滑坡的活动特点及与降雨的关系[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 99—103.  
HONG Yong, SHANG Zhi-hong. Characteristics of the activities of crystalline schist landslide of Japan and the relation with rainfall[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2010, 37(2): 99—103.
- [6] 中华人民共和国建设部. GB/T50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [7] 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [8] 周创兵, 李典庆. 暴雨诱发滑坡致灾机理与减灾方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(5): 477—487.  
ZHOU Chuang-bing, LI Dian-qing. Advances in rainfall-induced landslides mechanism and risk mitigation[J]. **Advance in Earth Science**, 2009, 24(5): 477—487.
- [13] AHNTINIAC P, BONELLI S. Modeling saturation settlements in rockfill dams[C]//Proceedings of the International Symposium on New Trends and Guidelines on Dam Safety. Barcelona: Taylor& Francis, 1998, 2(6): 17—19.
- [14] NOBARI E S, DUNCAN J M. Movements in dams due to reservoir filling[C]//Proceedings of Performance of Earth and Earth Supported Structures. California: University of California, 1972: 797—816.
- [15] 王海俊, 殷宗泽. 堆石料长期变形的室内试验研究[J]. 水利学报, 2007, 38(8): 914—919.  
WANG Hai-jun, YIN Zong-ze. Experimental study on deformation of rockfill material due to long term cyclic wetting-drying [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007, 38(8): 914—919.
- [16] 魏松, 朱俊高. 粗粒料湿化变形三轴试验中几个问题[J]. 水利水运工程学报, 2006, 1: 19—23.  
WEI Song, ZHU Jun-gao. Discussion on some problems in triaxial wetting test of coarse-grained materials [J]. **Hydro-Science and Engineering**, 2006, 1: 19—23.
- [17] 李广信. 堆石料的湿化试验和数学模型[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(5): 58—64.
- [18] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [19] 昆明市气象局. 昆明小哨国际机场场址航空气象条件分析研究报告[R]. 昆明: [s. n.], 2009.
- [20] COOP M R, SORENSEN K K, BODAS F T. Particle breakage during shearing of a carbonate sand [J]. **Geotechnique**, 2004, 54(3): 157—163.
- [21] 梁军, 刘汉龙. 面板坝堆石料的蠕变试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 24(2): 1—6.  
LIANG Jun, LIU Han-long. Creep test for rockfill of CFRD[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 24(2): 1—6.
- [22] 昆明新机场建设指挥部. 全场地基处理与土石方工程施工图设计说明及施工技术要求[R]. 昆明: [s. n.], 2008.

### 上接第 1718 页