

# 三轴压缩下水影响绿泥石片岩力学性质试验研究

于德海<sup>1, 2</sup>, 彭建兵<sup>2</sup>

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为了解西安黑河水利工程坝肩绿泥石片岩的力学特性, 利用 RMT-150C 岩石力学多功能试验机, 分别对干燥和饱水状态的绿泥石片岩进行三轴压缩试验。基于试验结果, 比较试样在不同围压作用下的力学性质, 详细讨论水对试样强度和变形特性的影响规律, 重点研究峰值强度、残余强度、软化系数、峰残差、峰残强降率、弹性模量及变形模量等强度变形指标的围压效应, 最后分析三轴压缩状态下岩石的破坏类型及机制。结果表明, 绿泥石片岩属于水敏型岩石, 水对各个强度和变形特性的影响是显著的, 并随着围压呈一定规律的变化。

**关键词:** 岩石力学; 绿泥石片岩; 三轴压缩; 饱水; 力学性质

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2009)01-0205-07

## EXPERIMENTAL STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF CHLORITE SCHIST WITH WATER UNDER TRIAXIAL COMPRESSION

YU Dehai<sup>1, 2</sup>, PENG Jianbing<sup>2</sup>

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China;

2. Faculty of Geology Engineering and Geodesics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** In order to understand the mechanical properties of chlorite schist in Heihe Hydraulic Project, triaxial compression experiment is carried out to investigate dry and saturated chlorite schist specimens by rock mechanics test equipment RMT-150C. Based on the experimental results, the mechanical properties of dry and saturated specimens of chlorides chist are compared under different confining pressures; and the law of water effect on strength and deformation characteristics of the rock is discussed. Confining pressure effects on strength and deformation parameters, including peak strength, residual strength, softening coefficient, peak-residual strength error, peak-residual strength drop rate, elastic modulus and deformation modulus, are mainly studied. In addition, the failure type and mechanism of rock under triaxial compression are analyzed. The results show that the chlorite schist is a type of water-sensitive rock; and the effects of water on strengths and deformation characteristics of rock are obvious and vary with different confining pressures.

**Key words:** rock mechanics; chlorite schist; triaxial compression; saturation; mechanical properties

## 1 引言

岩石的力学性质是理论计算和设计工作的基

础, 也是研究岩石力学与工程的重要内容之一。近年来, 随着试验设备和技术手段的提高, 岩石力学的试验水平有了较大发展, 尤其是三轴力学试验发展很快, 已取得了许多成果<sup>[1~10]</sup>。然而, 目前有关

收稿日期: 2008-06-25; 修回日期: 2008-09-26

作者简介: 于德海(1977-), 男, 博士, 1999年毕业于昆明理工大学采矿工程专业, 现任讲师, 主要从事工程地质和岩土工程方面的教学与研究。E-mail: ydhdhy1977@163.com

岩石力学性质的试验研究,在三大岩类中,沉积岩的最多,岩浆岩的次之,变质岩的最少,并且主要集中在像大理岩这种坚硬的变质岩上,而对于像片岩这种较软弱的变质岩,由于取样及加工试样的困难,故研究程度相对薄弱。另外,由于这类岩石成因复杂,矿物成分多样,亲水性强,水稳定性差,在雨季极易产生一系列工程地质问题,因而研究水对该类岩石力学性质的影响,具有十分重要的意义。

黑河水利工程是建国以来西安市兴建的规模最大、投资最多且关系长远的一项基础设施建设重点工程。水库建成后,向西安市年供水量可达  $3.05 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,年发电量为  $5\,696.13 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,灌溉农田 37 万亩<sup>[11~14]</sup>。由于其意义重大,故水库的安全问题,尤其是坝肩高陡边坡的稳定条件广泛受到人们的关注。然而自 2005 年夏季以来,由于雨量较往年增多,导致右坝肩坡体发生明显的变形破坏现象,其中绿泥石片岩是坝肩岩体出露的主要地层,其力学特性直接影响着水库的长期稳定与安全。因此,本文通过三轴压缩试验,探讨三向应力状态下绿泥石片岩的力学性质,重点研究水对岩石强度和变形特性的影响规律,并分析其破坏类型,这对于探明边坡破坏成因及机制有着重要的工程价值。

## 2 试验装置及试样制备

### 2.1 试验设备及方法

三轴压缩试验是在中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RMT-150C 型岩石力学刚性伺服试验机上进行(见图 1)。试验采用位移控制,加载速率为  $0.002 \text{ mm/s}$ ,采用 5 mm 的位移传感器,测试试样的轴向位移;采用 1 000 kN 的力传感器,测试试样



图 1 三轴压缩试验设备

Fig.1 Equipment of triaxial compression test

的轴向荷载。仪器可施加最大轴力为 1 000 kN,最大围压为 50 MPa,加荷方式为均布荷载。围压  $\sigma_3$  利用气压通过液压油施加,轴压  $\sigma_1$  是在气压的基础上通过活塞机械施加。

(1) 试验程序:首先用乳胶套将试样包裹好,以防止试验过程中液压油侵入试样内,从而影响岩石力学特性参数的测定;其次在两端加上与试样直径匹配的钢性垫块,以减小端面摩擦对试验结果的影响,同时调整好位移传感器;然后将试样放进三轴压力室内,对试样施加至预定的围压,此时试样处于静水压力状态;最后对试样施加轴向应力使之失去承载能力而破坏。

(2) 方案选择:由于取样点黑河水库属于低地应力区,故试验围压采用 4 个级别,分别为 1, 2, 3 和 4 MPa。同时,为了反映水对岩石力学特性的影响,试样选用干燥和饱水 2 种物理状态。一部分试样制成之后,在干燥条件下放置一周以上,作为干燥试样;而另一部分试样采用真空抽气法饱和(见图 2),作为饱水试样。



图 2 真空抽气法

Fig.2 Vacuum pumping method

### 2.2 试样特征及制备

绿泥石片岩是从黑河水库右岸坝肩的勘探平硐中取得。岩石呈黑绿~灰绿色,弱~微风化,中~薄层状,质地细腻,片理不明显,有时偶见细小相间的石英脉,平行于片理面分布,总体连续性、完整性相对较好。现场采集的岩块采用水钻法钻孔取芯来制备试样。试样两端面用锯石切割机切平整,然后在磨石上进行研磨,制样要求严格按照国际岩石力学学会(ISRM)试验规程来加工,如图 3 所示。



图 3 典型的岩石试样

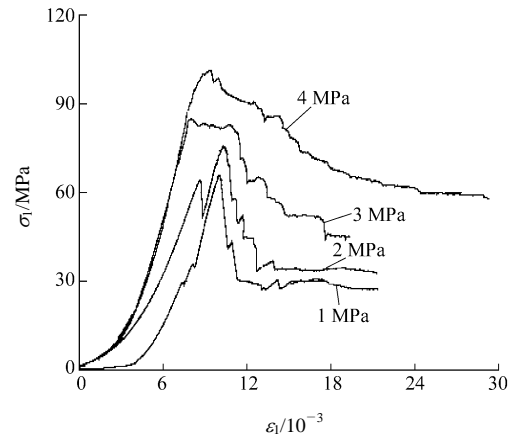
Fig.3 Typical rock specimen

### 3 试验结果及分析

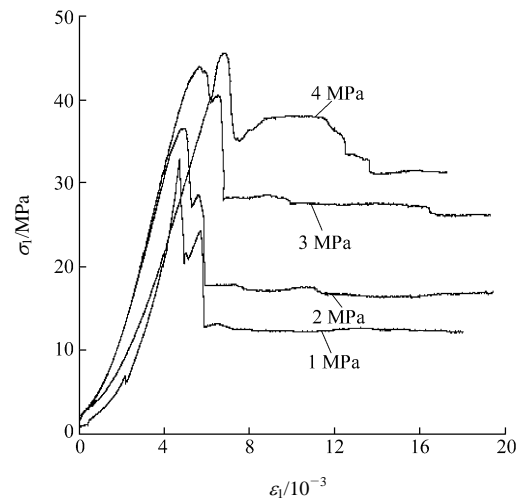
#### 3.1 强度特性分析

干燥和饱水状态的试样在不同围压下的全应力 - 应变曲线如图 4 所示, 可以看出, 当围压增大到 3 MPa 时, 在曲线的峰值点处开始出现屈服平台, 岩石的变形呈现塑性流动趋势, 随着变形的继续增加, 应力缓慢降低, 出现应变软化阶段, 但已不像单轴压缩时那样, 到达峰值点后, 应力急剧下降至残余值, 并且峰残差明显减小, 表现出一定的延性。另外, 不论是干燥还是饱水试样, 曲线斜率随着围压的增加而明显变陡, 岩石的屈服应力、峰值强度都有一定程度的增高, 表明岩石的刚度和强度均随围压的增大而增大, 具有一定的压硬性。同时, 随着围压的增加, 岩石的残余强度也相应提高, 说明在围压作用下, 岩石中的孔隙裂纹再次被压密闭合, 裂纹面上的法向应力增加, 而使岩石的残余强度加大。

Coulomb 准则可以用来解释岩石强度特性, 该准则在采用峰值强度  $\sigma_s$  和围压  $\sigma_3$  表示时可写成  $\sigma_s = M + N\sigma_3$  ( $M, N$  均为强度准则参数), 简记为  $Q(M, N)$ , 表征一个给定试样能够承载的峰值强度  $\sigma_s$  与围压  $\sigma_3$  成线性关系。图 5, 6 分别给出了峰值强度  $\sigma_s$  和残余强度  $\sigma_r$  与围压  $\sigma_3$  的关系, 可以看出, 利用线性关系  $Q(M, N)$  来表征峰值强度  $\sigma_s$  和残余强度  $\sigma_r$  与围压  $\sigma_3$  的关系是合适的。由图 5 可知, 干燥试样的峰值强度对围压的敏感度要大于饱水试样的。当围压从 1 MPa 上升到 4 MPa 时, 干燥试样的峰值强度增加了 47.7%, 而饱水试样的峰值强度增加了 36.4%, 说明在低围压下, 干燥试样强



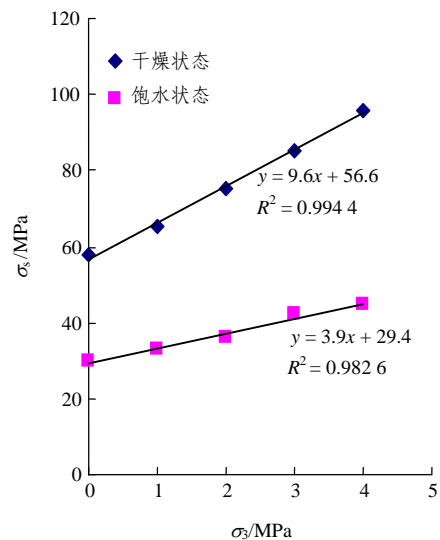
(a) 干燥试样

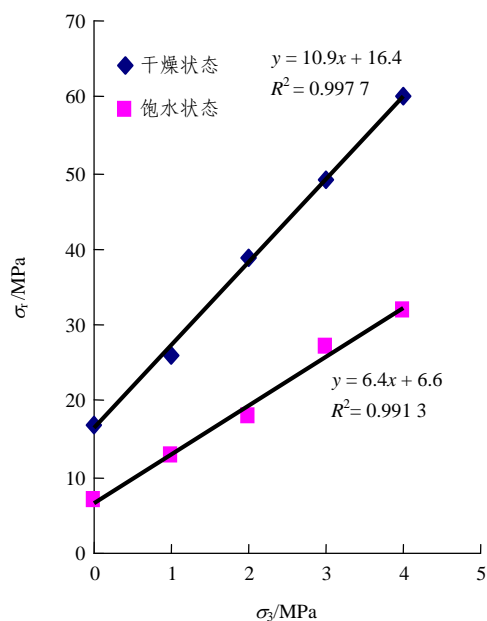


(b) 饱水试样

图 4 不同围压下试样的全应力 - 应变曲线

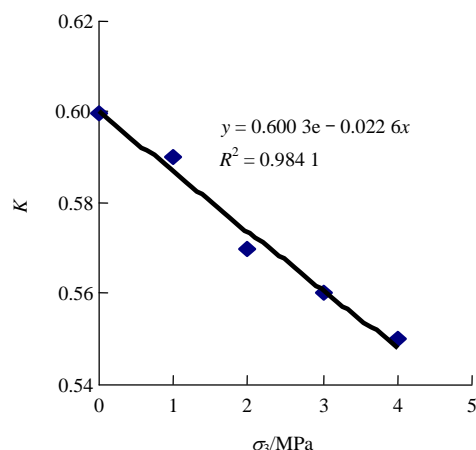
Fig.4 Complete stress-strain curves of specimens under different confining pressures

图 5 峰值强度  $\sigma_s$  与围压  $\sigma_3$  关系Fig.5 Relation between peak strength  $\sigma_s$  and confining pressure  $\sigma_3$

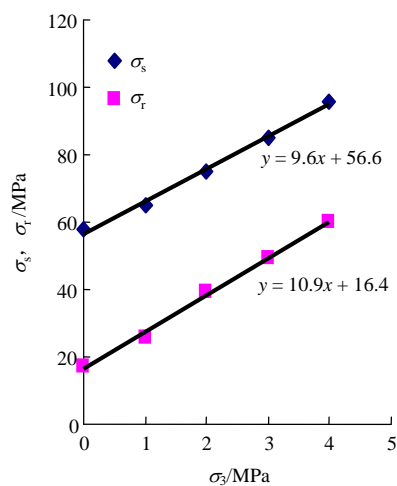
图6 残余强度 $\sigma_r$ 与围压 $\sigma_3$ 关系Fig.6 Relation between residual strength  $\sigma_r$  and confining pressure  $\sigma_3$ 

度的围压效应要比饱水试样的显著,也从另一角度说明了饱水试样受围压作用的影响较小,更容易破坏。此外,从图5,6中还可以看出水对岩石抗压强度的影响是显著的,不论是峰值强度还是残余强度,饱水试样比干燥试样都有明显的降低。

软化系数是衡量水对岩石抗压强度影响程度的重要参数,通常表示为单轴压缩下,水饱和状态试样强度与干燥状态试样强度之比,至于在三轴状态下,它与围压的关系至今尚未见相关研究,因此,这是一个值得探讨的问题。图7给出了低围压下软化系数的变化规律。从图7可以看出,软化系数 $K$ 与围压 $\sigma_3$ 大致呈负指数的变化关系,即随着围压的增加软化系数 $K$ 有渐近减少的趋势;也就是说,随着围压的增大,虽然饱水试样的绝对强度在增加,但是它与干燥试样强度的相对比值却在减少,究其原因,主要是由于干燥试样强度对围压的敏感度要大于饱水试样强度对围压的敏感度,干燥试样强度随围压增长快,而饱水试样强度随围压增长相对较慢,从而造成两者之间的比值随之减小,也就是软化系数随之减小。需要说明的是,岩石的软化系数同岩性、矿物成分、岩石的含水量及试验条件等诸多因素有关,而此次试验仅是在低围压(小于5 MPa)的范围内进行,且试验数据有限,在更高围压下,由于涉及到岩石的脆-延转化特性,其变化规律更加复杂,尚有待进一步开展研究。

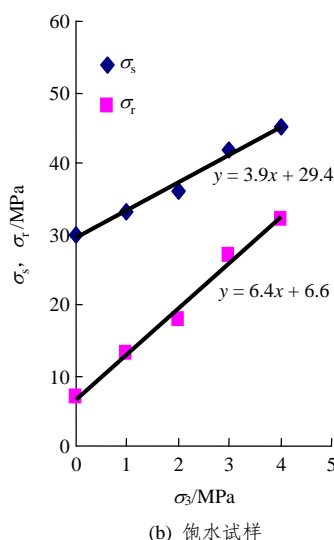
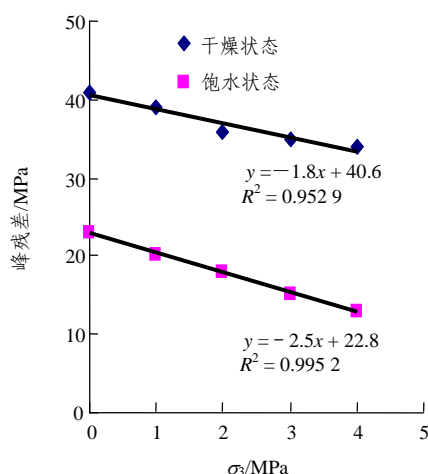
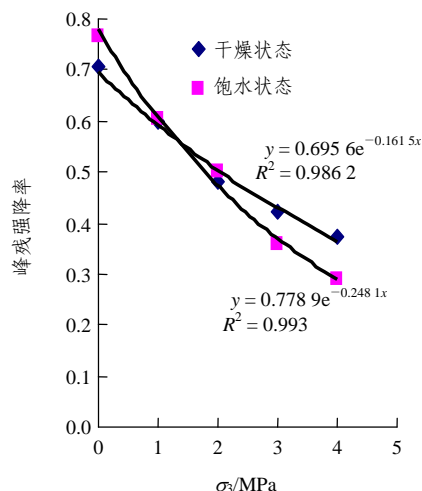
图7 低围压下软化系数 $K$ 的变化规律Fig.7 Variable rules of softening coefficient  $K$  under low confining pressure

岩石的峰残差与峰残强降率是斜坡发生剧动的重要条件<sup>[15]</sup>。然而,很少有人探讨岩石峰残差与峰残强降率的变化规律。为此,本次试验给出了干燥试样与饱水试样峰值强度与残余强度的对比关系,如图8(a)和(b)所示,以及峰残差、峰残强降率与围压的关系(见图9,10)。从图8(a),(b)可以看出,图中2条直线会形成一个交点,此点的峰值强度和残余强度在理论上对应相等,这个交点实质上就是岩石的脆-延转化点,对应的围压即为转化围压。低于此围压的应力-应变关系出现应变软化现象,高于此围压的应力-应变关系出现硬化现象。这样,可理论推导出干燥试样的转化围压为30.92 MPa,饱水试样的转化围压为9.12 MPa。当然,这一结论由于受试样的矿物成分、含水量及试验数据等因素的影响会有所差异,其正确性尚待进一步的试验验证。



(a) 干燥试样



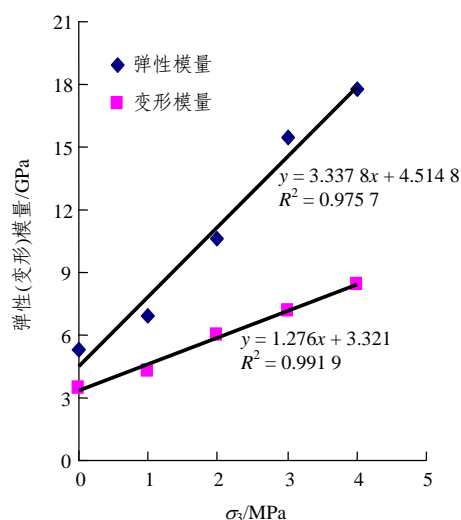
图 8 试样峰值强度 $\sigma_s$ 与残余强度 $\sigma_r$ 的对比关系Fig.8 Relation between peak strength  $\sigma_s$  and residual strength  $\sigma_r$ 图 9 峰残差与围压 $\sigma_3$ 关系Fig.9 Relation between peak-residual strength error and confining pressure  $\sigma_3$ 图 10 峰残强降率与围压 $\sigma_3$ 关系Fig.10 Relation between peak-residual strength drop rate and confining pressure  $\sigma_3$ 

从图 9 可以看出, 峰残差随着围压的升高, 有线性降低的趋势, 即残余强度随围压增加的幅度比峰值强度的要大, 也就是说, 残余强度对围压的敏感度要高于峰值强度的, 这从图 8 中也可以反映出来。另外还可看出, 在同一围压下, 干燥试样的峰残差比饱水试样的要大, 说明干燥试样的脆性较强。由图 10 可知, 峰残强降率与围压大致有着负指数的变化关系, 即随着围压的增加有渐近减少的趋势, 说明围压越大, 岩石发生剧动的可能性越小; 而在同一围压下, 当小于 1.5 MPa 时, 饱水试样的峰残强降率大于干燥试样的, 说明饱水试样更易剧动; 大于 1.5 MPa 时, 饱水试样的峰残强降率小于干燥试样的, 说明随着围压的升高, 饱水试样剧动的可能性变小, 更易于蠕动。

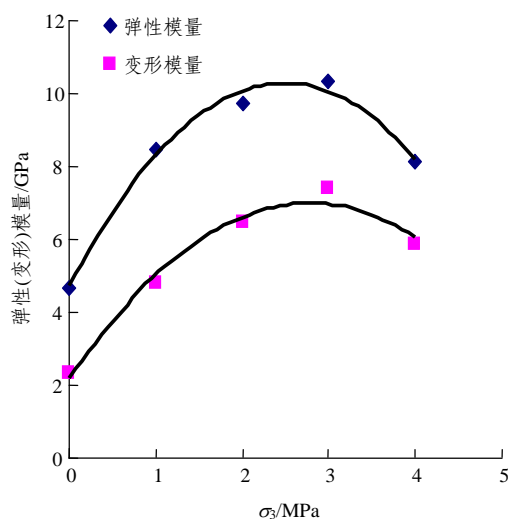
### 3.2 变形特性分析

由于试样内部各处的材料强度处处不等, 当加载开始时, 强度低的材料在岩石屈服过程中, 首先达到其承载极限而屈服弱化, 产生塑性变形; 而强度高的材料由于未达到其承载极限而处于卸载状态, 这样随着轴向承载能力的降低, 试样进一步发生的塑性变形将集中在那些已经承担了大部分变形的低强度材料上, 从而造成变形的局部化, 很快发生应变软化。当围压升高时, 由于岩石的承载能力增大, 要使试样破坏就必须持续增大轴向应力, 这样试样内强度较低的材料首先达到承载极限而屈服弱化, 产生塑性变形; 随后试样内部强度较高的材料也会达到其承载极限而屈服破坏。于是试样内材料的屈服弱化变形将趋于均匀化, 峰值强度附近就会出现屈服平台。

试验结果表明, 由于岩石不是理想的均质连续弹性体, 其应力应变关系即使在屈服极限前也不是直线, 而是曲线, 其切线斜率和割线斜率都不是常量, 也就是说岩石的弹性(变形)模量是随应力的变化而变化。岩石的弹性(变形)模量与围压之间的关系如图 11 所示。由图 11(a)可知, 干燥试样的弹性(变形)模量与围压呈较好的线性递增关系, 相关系数分别为 0.991 9 和 0.975 7; 而饱水试样的弹性(变形)模量则不随围压而线性升高, 在 4 MPa 处反而有所降低, 出现了奇异点, 如图 11(b)所示。造成这一现象的原因可能是由饱水试样含水量的差异引起的, 使得饱水状态下的变形指标具有一定的离散性。另外, 由图 11(a)可知, 随着围压的增大, 岩石弹性



(a) 干燥试样



(b) 饱水试样

图 11 试样弹性(变形)模量与围压  $\sigma_3$  关系Fig.11 Relation between elastic and deformation moduli and confining pressure  $\sigma_3$ 

模量和变形模量的差异逐渐变大,即弹性模量对围压的敏感度要大于变形模量的敏感度。

### 3.3 破坏形式及机制

试样在三轴压缩下的破坏形式如图 12, 13 所示。由试验可知,不同围压下试样的破坏均是剪切破裂,在较低围压下,试样基本上为宏观单一断面的剪切破坏,通过对岩石试样宏观断口的观察,低围压时破裂面较粗糙,并在破裂面附近出现许多细小的碎裂块;随着围压的增大,试样也会出现彼此近于平行的双断面剪切破坏,而且其破裂面也愈来愈平整,剪切破裂面上附有强烈摩擦作用产生的白色粉末。



图 12 单一剪切破坏及断口形式

Fig.12 Shear failure of single break and fracture shape



图 13 平行双剪破坏及断口形式

Fig.13 Shear failure of parallel double-break and fracture shape

试验结果表明,三轴压缩岩石试样的破坏形态常是以狭窄剪切带形式存在的局部化变形破坏。由于岩石材料的非均质性,试样中同一承载断面的材料强度不等。因此,一方面试样在达到峰值应力之前,随着轴向应力的增加,强度较低的材料首先发生屈服弱化,其承载能力降低,但并没有完全失去其承载力,从而使得应力转移,造成未屈服的材料实际应力增大,弹性应变增加,应力-应变曲线逐步偏离直线状态。另一方面,当试样中最弱断面达到承载极限后,轴向应力将下降。与金属材料的塑性屈服不同的是,由于轴向应力的降低,试样中除最弱断面在轴向压缩变形作用下屈服面积逐步增加、材料继续弱化外,其余断面则由于没有达到承载极限而卸载,使得这部分的弹性变形释放,转化为最弱断面的塑性变形,造成试样的屈服破坏只发生在最弱断面及附近的局部化区域。这实质上就是岩石应变软化过程中的变形局部化现象。

## 4 结 论

(1) 水对绿泥石片岩强度的影响是显著的。不论是峰值强度还是残余强度,饱水试样比干燥试样

都有明显的降低;并且在低围压下,干燥试样强度的围压效应要比饱水试样的显著。同时发现,在低围压下,软化系数  $K$  与围压  $\sigma_3$  大致有着负指数的变化关系。

(2) 峰残差随着围压的升高,有线性降低的趋势;并且在同一围压下,干燥试样的峰残差比饱水试样的要大。同时,峰残差降率与围压有着负指数的变化关系。

(3) 干燥试样的弹性(变形)模量与围压呈较好的线性递增关系,饱水试样的弹性(变形)模量则不随围压线性升高,出现了奇异点。并且随着围压的增大,岩石弹性模量和变形模量的差异逐渐变大。

(4) 不同围压下试样的破坏均是剪切破裂,在较低围压下,试样基本上为宏观单一断面的剪切破坏,破裂面较粗糙;随着围压的增大,试样出现彼此近于平行的双断面剪切破坏,破裂面愈来愈平整。

## 参考文献(References):

- [1] GOMEZ J T, SHUKLA A, SHARMA A. Static and dynamic behavior of concrete and granite in tension with damage[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2001, 36(1): 37 - 49.
- [2] SFER D, CAROL I, GETTU R, et al. Study of the behavior of concrete under triaxial compression[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2002, 128(2): 156 - 163.
- [3] 孟召平, 彭苏平, 张慎河. 不同成岩作用程度砂岩物理力学性质三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 140 - 143.(MENG Zhaoping, PENG Suping, ZHANG Shenhe. Triaxial test on physical and mechanical properties of sandstone for different diagenesis degrees[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 140 - 143.(in Chinese))
- [4] 卢允德, 葛修润, 蒋 宇, 等. 大理岩常规三轴压缩全过程试验和本构关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 489 - 2 493.(LU Yunde, GE Xiurun, JIANG Yu, et al. Study on conventional triaxial compression test of complete process for marble and its constitutive equation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 489 - 2 493.(in Chinese))
- [5] 陈景涛, 冯夏庭. 高地应力下岩石的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1 537 - 1 543.(CHEN Jingtao, FENG Xiating. True triaxial experimental study on rock with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1 537 - 1 543.(in Chinese))
- [6] 杨永杰, 宋 扬, 陈绍杰, 等. 煤岩强度离散性及三轴压缩试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1 833 - 1 840.(YANG Yongjie, SONG Yang, CHEN Shaojie, et al. Experimental study on strength discreteness and triaxial compression of coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1 833 - 1 840.(in Chinese))
- [7] 王贵荣, 任建喜. 基于三轴压缩试验的红砂岩本构模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(6): 48 - 51.(WANG Guirong, REN Jianxi. Constitutive model of red sandstone based on triaxial compression test[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science), 2006, 26(6): 48 - 51.(in Chinese))
- [8] 徐 斌, 孔宪京, 邹德高, 等. 饱和砂砾料液化后应力与变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 103 - 106.(XU Bin, KONG Xianjing, ZOU Degao, et al. Laboratory study on behaviour of static properties of saturated sand-gravel after liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 103 - 106.(in Chinese))
- [9] 尤明庆, 苏承东, 缙 勇. 大理岩孔道试样的强度及变形特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2 420 - 2 429.(YOU Mingqing, SU Chengdong, GOU Yong. Experimental study on strength and deformation properties of hollow cylindrical specimens of marbles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2 420 - 2 429.(in Chinese))
- [10] 万志军, 赵阳升, 董付科, 等. 高温及三轴应力下花岗岩体力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 72 - 77.(WAN Zhijun, ZHAO Yangsheng, DONG Fuke, et al. Experimental study on mechanical characteristics of granite under high temperatures and triaxial stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 72 - 77.(in Chinese))
- [11] 樊秀峰, 钱 会, 简文彬, 等. 西安市黑河水库左坝肩渗漏三维数值模拟及坝肩坡体稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2002, 10(3): 248 - 253.(FAN Xiufeng, QIAN Hui, JIAN Wenbin, et al. Three-dimensional numerical simulation of leakage and stability analysis of left dam abutment of Heihe Reservoir[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(3): 248 - 253.(in Chinese))
- [12] 毛新虎. 黑河水库右坝肩滑坡变形模式与演化研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2005, 28(4): 443 - 446.(MAO Xinhui. Study on dynamics and deformation pattern of landslide in right dam shoulder of Heihe Reservoir[J]. Journal of Shanxi University(Natural Science), 2005, 28(4): 443 - 446.(in Chinese))
- [13] 马润勇, 彭建兵, 毛彦龙. 西安金盆水库放水塔附近滑坡特征及成因分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(4): 438 - 442.(MA Runyong, PENG Jianbing, MAO Yanlong. Features and causes of a landslide near discharge water tower of Jinpen Reservoir in Xi'an[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(4): 438 - 442.(in Chinese))
- [14] 陈朋成, 周孝德, 冯民权, 等. 金盆水库溃坝洪灾损失预测研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1): 99 - 101.(CHEN Pengcheng, ZHOU Xiaode, FENG Minquan, et al. Study of the prediction of dam-break flood damage in Jinpen Reservoir[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(1): 99 - 101.(in Chinese))
- [15] 程谦恭, 胡厚田, 胡广韬, 等. 高速岩质滑坡临床弹冲与峰残强降复合启程加速动力学机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 173 - 176.(CHENG Qiangong, HU Houtian, HU Guangtao, et al. A study of complex accelerated dynamic mechanism of highspeed landslide by elastic rocky impulse and peak-residual strength drop[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 173 - 176.(in Chinese))