

# 高围压高水压条件下岩石卸荷强度特性试验研究

李志敬<sup>1,2</sup>, 朱珍德<sup>1,2</sup>, 施毅<sup>1,2</sup>, 倪晓慧<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:**为了探讨高围压、高水压对岩石卸荷强度特性的影响,取锦屏二级水电站引水隧洞岩石(大理岩、砂岩及板岩)分别进行高围压、无水压峰前卸荷,高围压、无水压峰后卸荷及高围压、高水压峰前卸荷 3 种工况下的三轴压缩对比试验。试验结果表明,高围压、无水压工况下,岩石达到峰值强度后,与峰前卸荷相比,已经有很多的细小裂纹,其损伤程度远远大于峰值前岩石的损伤程度。高围压、无水压峰后卸荷时的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  与峰前卸荷的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  相比,有很大程度的降低。而高水压力的存在相当于降低了初始围压,也就是降低了岩石裂隙面及破坏面上的有效正应力,加速了岩石的破裂,从而降低了岩石的强度,因此高围压、高水压峰前卸荷的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  与高围压、无水压峰前卸荷相比,有很大程度的降低,且黏聚力  $c$  比内摩擦角  $\varphi$  更加敏感。

**关键词:** 锦屏水电站 卸荷 高围压 高水压 黏聚力

**中图分类号:** TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)02-0162-04

众所周知,各种大型工程的地基基础工程岩体一般符合加载岩体力学条件,而岩质边坡开挖工程及地下工程开挖面径向岩体则表现为卸荷岩体力学条件。由工程卸荷引发的灾难性事故很多,如基坑开挖后底部的隆起,洞室开挖引起围岩的底鼓、冒顶、掉块、坍塌,由开挖或爆破导致的岩体滑坡、崩塌,岩爆及岩芯饼化等。所谓“岩体卸荷破坏”是指岩体由于卸除一向或二向荷载而引起的其承载能力丧失的现象和过程。近年来,国内外学者已逐渐重视这方面的研究<sup>[1-5]</sup>。但在很多情况下,卸荷岩体同时受很大的高水压力作用,有不少岩体的变形与岩体内地下水渗透压力有关。如 1984 年,唐山范各庄矿由于井下开采,形成卸荷带,造成井下岩体应力场的重新分布,从而引发了来自煤系地层之下含水层的矿井突水。可以说,大多数岩质边坡的破坏均是由于高水压力的作用而引起的,因而研究高围压、高水压条件下岩石的卸荷试验具有现实意义和实用价值。

李天斌等<sup>[6]</sup>对玄武岩在卸荷状态下的变形和破坏特性进行了研究,认为在卸荷状态下,随着破坏时围压的增大,试样的破坏形式逐渐由张性破坏过渡到张剪性破坏,且张剪破裂角也随之增大。赵明阶等<sup>[7]</sup>提出了岩石在三轴加卸荷过程中的一种本构模型,一组石膏模型的三轴试验结果表明,试验数据与理论计算结果基本吻合。张黎明等<sup>[8]</sup>对岩样进行了常规三轴加载后保持轴向变形不变的卸围压试验,得到了峰前、峰后卸围压全过程曲线。吴刚<sup>[9]</sup>在岩体加、卸荷试验研究的基础上,从应力-应变关系、强度特性、声发射及破坏特征等方面,对岩体在加、卸荷条件下的破坏特性进行对比分析。但目前很多工程岩体的失稳破坏都是在很高的地应力及高水压的情况下发生的,而这方面的文献还相对较少。

本文针对锦屏二级水电站引水隧洞围岩所处的实际应力环境,分别进行了高围压(20 MPa, 30 MPa, 60 MPa)、无水压峰前,高围压(20 MPa, 30 MPa, 60 MPa)、无水压峰后及高围压、高水压(10 MPa)峰前 3 种工况下的卸荷试验,着重分析高围压、高水压对岩石强度特性的影响,以期复杂环境状态下洞室失稳加固机理提供理论基础。

## 1 高围压、无水压条件下岩石的卸荷试验

### 1.1 试验原理及方法

高围压、无水压条件下的卸荷试验在 MTS815·04 电液伺服控制刚性试验机上进行。高围压、高水压条

件下的卸荷试验采用有渗透装置的岩石力学电液伺服系统(美国 MTS 公司生产的 815•02 型). 试验采用不同速率同时降低轴压与围压的方法,且轴压降低速率慢于围压,以保证在卸荷过程中岩样发生破坏.

1.2 试样制作及卸荷试验方案

1.2.1 试样制作

试验采用  $d \times h$  为 50 mm×100 mm 的标准圆柱形试件,采用隧洞开挖时的岩块加工而成. 试件的加工精度严格按《水利水电工程岩石试验规程》<sup>[10]</sup> 进行控制.

1.2.2 卸荷试验方案

分别对大理岩、板岩、砂岩进行初始围压为 20 MPa,30 MPa,60 MPa 的高围压、无水压峰前,高围压、无水压峰后及高围压、高水压(10 MPa)峰前卸荷试验.

高围压、无水压峰前卸荷试验过程为 峰前加载到屈服阶段之前(此时轴向应力小于三轴抗压强度,但远大于岩样的单轴抗压强度,以保证岩样在卸围压过程中发生破坏,具体数值由三轴压缩试验确定),降低轴压与围压,直到试件破坏. 峰后卸荷的试验过程为 加载到屈服阶段之后,降低轴压与围压直到试件破坏.

高围压、高水压峰前卸荷试验过程与高围压、无水压峰前卸荷试验过程相似,只是在试样轴向两端面施加均匀分布的水压力至预定值 10 MPa. 试验的加载过程见图 1.

2 试验结果分析

2.1 高围压、无水压条件下的卸荷试验结果分析

2.1.1 峰前卸荷试验分析

莫尔-库伦破坏准则<sup>[11]</sup>采用的主应力可以表示为

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}\sigma_3 + \frac{2c\cos\varphi}{1 - \sin\varphi}$$

令

$$K = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad Q = \frac{2c\cos\varphi}{1 - \sin\varphi}$$

则式(1)可以简写为

$$\sigma_1 = K\sigma_3 + Q$$

由式(2),黏聚力  $c$  可以表示为

$$c = \frac{Q(1 - \sin\varphi)}{2\cos\varphi}$$

内摩擦角可以表示为

$$\varphi = 2\text{arccot} \sqrt{K} - \frac{\pi}{2}$$

根据不同初始围压下破坏时的  $\sigma_1$  及  $\sigma_3$ ,由式(3)可以得到  $K$  与  $Q$  之间的线性回归关系曲线,进而由式(4)和(5)可以得到  $K$ ,  $Q$  与黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  的关系. 计算出的卸荷破坏时的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  如表 1 所示.

2.1.2 峰后卸荷试验分析

根据不同初始围压破坏时的  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  及式(3)~(5),计算出卸荷破坏时的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  如表 1 所示,峰后无水压情况下大理岩、砂岩及板岩的卸荷应力-应变曲线如图 2 所示. 由表 1 可知,岩石在高围压、无水压峰后卸荷时其黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  与高围压、无水压峰前卸荷的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  相比,有很大程度的降低,

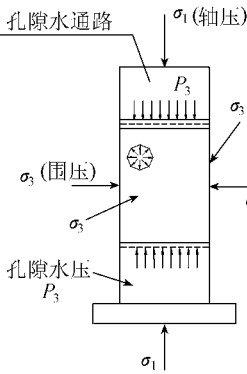


图 1 高水压下三轴试验加载示意图

Fig. 1 Triaxial tests on loading under high hydraulic pressure

表 1 岩石高围压无水压峰前卸荷与峰后卸荷力学参数对比

| 岩样  | $c$ /MPa |         | $\varphi$ (°) |         |
|-----|----------|---------|---------------|---------|
|     | 无水压峰前卸荷  | 无水压峰后卸荷 | 无水压峰前卸荷       | 无水压峰后卸荷 |
| 大理岩 | 13.6     | 0.93    | 45.9          | 26.4    |
| 砂岩  | 11.4     | 1.80    | 42.6          | 9.6     |
| 板岩  | 11.4     | 2.10    | 37.9          | 13.3    |

大理岩、砂岩及板岩的黏聚力  $c$  分别降低了 93.2%, 84.2% 和 81.6%, 内摩擦角  $\varphi$  分别降低了 42.5%, 77.5% 和 64.9%。其主要原因在于达到峰值强度后, 岩石已经有很多的细小裂纹, 其损伤程度远远大于峰值前岩石的损伤程度。因此峰后卸荷对黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  的影响很大, 黏聚力  $c$  相对于内摩擦角  $\varphi$  更加敏感。

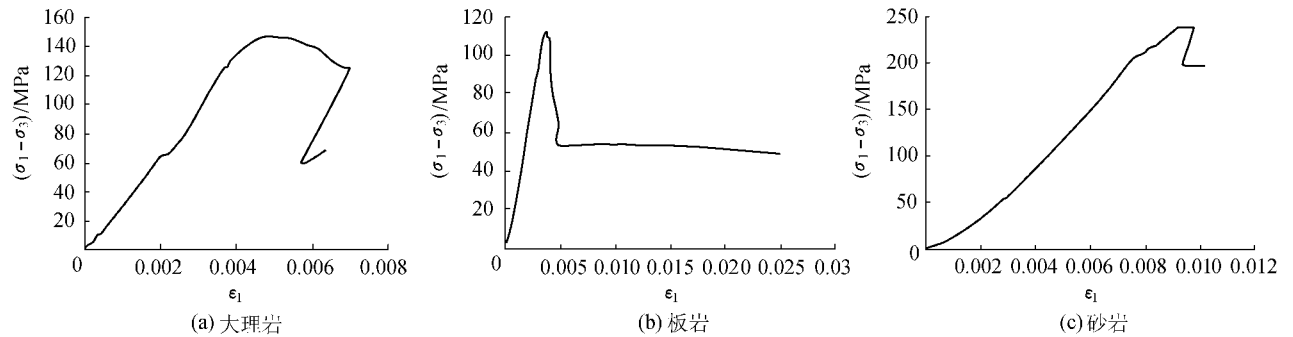


图 2 大理岩、板岩及砂岩围压 20 MPa 峰后无水卸荷应力-应变曲线  
Fig. 2 Stress-strain curves of marble, sandstone and slate of rock post-peak unloading under confining pressure of 20 MPa and no hydraulic pressure

### 2.2 高围压、高水压条件下的卸荷试验结果分析

根据不同初始围压破坏时的  $\sigma_1, \sigma_3$  及式 (3) ~ (5) 确定卸荷破坏时的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 。高水压峰前卸荷与无水压峰前卸荷的力学参数对比见表 2, 试验过程的全应力-应变过程曲线见图 3。由表 2 和图 3 可知, 岩石在高水压峰前卸荷时的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  与无水压峰前卸荷时的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  相比, 有很大程度的降低, 如大理岩、砂岩及板岩的黏聚力  $c$  分别降低了 31.6%, 36.8% 和 30.7%, 内摩擦角  $\varphi$  分别降低了 7.8%, 3.8% 和 6.9%, 可见水压力的存在对黏聚力  $c$  影响更大, 而内摩擦角  $\varphi$  对水压力没那么敏感。其主要原因在于, 高水压的存在相当于降低了初始围压, 也就是降低了岩石裂隙面及破坏面上的有效正应力, 加速了岩石的破裂, 增加了岩石的脆性, 从而降低了岩石的强度。高水压条件下, 卸荷岩石表现为更脆性的破坏, 其破坏方式比无水压时更剧烈, 其强度较无水压时有显著的降低。

表 2 岩石高水压与无水压峰前卸荷力学参数对比  
Table 2 Comparison of mechanical parameters of rock pre-peak unloading between high hydraulic pressure and no hydraulic pressure

| 岩样  | $c/\text{MPa}$ |         | $\varphi/(\circ)$ |         |
|-----|----------------|---------|-------------------|---------|
|     | 高水压峰前卸荷        | 无水压峰前卸荷 | 高水压峰前卸荷           | 无水压峰前卸荷 |
| 大理岩 | 9.3            | 13.6    | 42.3              | 45.9    |
| 砂岩  | 7.2            | 11.4    | 41.0              | 42.6    |
| 板岩  | 7.9            | 11.4    | 35.3              | 37.9    |

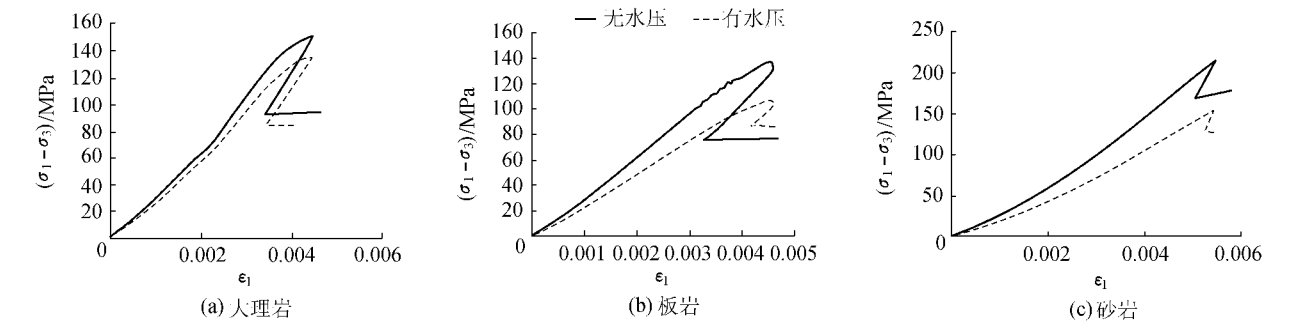


图 3 大理岩、板岩及砂岩高水压与无水压峰前卸荷应力-应变曲线对比  
Fig. 3 Comparison of stress-strain curves of marble, sandstone and slate of rock pre-peak unloading between high hydraulic pressure and no hydraulic pressure

## 3 结 论

a. 高围压、无水压峰后卸荷的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  与高围压、无水压峰前卸荷的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  相比有很大程度的降低。大理岩、砂岩及板岩的黏聚力  $c$  分别降低了 93.2%, 84.2% 和 81.6%, 内摩擦角  $\varphi$

分别降低了 42.5% ,77.5% 和 64.9% .

b. 高围压、高水压峰前卸荷时的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  与高围压、无水压峰前卸荷时的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  相比,大理岩、砂岩及板岩的黏聚力  $c$  分别降低了 31.6% ,36.8% 和 30.7% ,内摩擦角  $\varphi$  分别降低了 7.8% ,3.8% 和 6.9% .

c. 无论何种工况,黏聚力  $c$  比内摩擦角  $\varphi$  都要敏感.

参考文献：

[1] JAEGER J C. Brittle fracture of rocks[C]//Proceedings of the Eighth Symposium on Rock Mechanics. Baltimore :PortCity Press,1967 3-57.

[2] CROUCH S L. A note on post-failure stress-strain path dependence in Norite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1972,9(2) :197-204.

[3] 吴刚,孙钧.卸荷应力状态下裂隙岩体的变形和强度特性[J].岩石力学与工程学报,1998,17(6) :615-621.

[4] 周维垣,杨若琼,剡公瑞.岩体边坡非连续非线性卸荷及流变分析[J].岩石力学与工程学报,1997,16(3) :210-216.

[5] 哈秋舫.岩石边坡工程与卸荷非线性岩石(体)力学[J].岩石力学与工程学报,1997,16(4) :386-391.

[6] 李天斌,王兰生.卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J].岩石力学与工程学报,1993,12(4) :321-327.

[7] 赵明阶,许锡宾,徐蓉.岩石在三轴加卸荷过程中的一种本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5) :626-631.

[8] 张黎明,王在泉,王建新.岩石卸荷破坏的试验研究[J].四川大学学报 工程科学版,2006,38(3) :34-37.

[9] 吴刚.岩体在加卸荷条件下破坏效应的对比分析[J].岩土力学,1997,18(2) :13-16.

[10] SL264—2001,工程岩石试验规程[S].

[11] 徐志英.岩石力学[M].3版.北京 中国水利水电出版社,2006.

Unloading strength properties of rocks under high confining pressure and hydraulic pressure

LI Zhi-jing<sup>1, 2</sup>, ZHU Zhen-de<sup>1, 2</sup>, SHI Yi<sup>1, 2</sup>, NI Xiao-hui<sup>1, 2</sup>

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** :In order to study the effect of high confining pressure and hydraulic pressure on the unloading strength properties of rocks, triaxial compression tests of rock specimens (marble, sandstone and slate) sampled from the rocks surrounding the diversion tunnel of Jinping Hydropower Station (Grade II) were performed under three different states that is, the pre-peak unloading under high confining pressure and no hydraulic pressure, the post-peak unloading under high confining pressure and no hydraulic pressure, and the pre-peak under high confining pressure and hydraulic pressure. The test results indicate that under the state of high confining pressure and no hydraulic pressure, after the rocks reach the peak strength, many cracks appear, and their damage degree is larger than that of rocks pre-peak unloading. The cohesion and the internal friction angle of rocks post-peak unloading under high confining pressure and no hydraulic pressure are much lower than those of rocks pre-peak unloading. In addition, the occurrence of high hydraulic pressure is equivalent to the decrease of the initial confining pressure, namely, the decrease of effective normal stress of the fracture surface and failure plane of rocks, resulting in the cracking acceleration of rocks and the decrease of rock strength. The cohesion, internal friction angle of rocks pre-peak unloading under high confining pressure and hydraulic pressure are also much lower than those of rocks pre-peak unloading under high confining pressure and no hydraulic pressure. Furthermore, the cohesion is more sensitive than the internal friction angle.

**Key words** :Jinping Hydropower Station ; unloading ; high confining pressure ; high hydraulic pressure ; cohesion