

循环加卸载对岩体残余强度影响的试验研究

王瑞红¹, 李建林¹, 蒋昱州², 陈星¹

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 地下工程中, 处于深部高地应力区的地下巷道、洞室、矿柱等的力学特性都与岩石破坏后的力学特性有密切联系, 研究岩体残余强度及峰后力学特性对工程设计有着非常重要的意义。通过对处于残余强度状态岩体的循环加卸载试验, 研究不同围压下(30, 20, 10, 5 和 1 MPa)、不同卸荷量(90%, 70%, 30%)造成的岩体残余强度变化规律, 其中卸荷量为卸除荷载与相应围压下岩体残余强度的百分比。试验结果表明: 不同围压、卸荷量条件下, 岩体残余强度与循环次数的变化规律均可用指数函数很好地拟合, 受初始条件影响不大; 围压较低时(≤ 20 MPa), 同一围压下, 卸荷量为 70% 时岩体残余强度的降低程度最大, 其次是卸荷量为 90% 时; 卸荷量为 30% 时, 对残余强度造成的影响最小; 当卸荷量相同时, 围压越低, 循环加卸载造成岩体残余强度降低程度越大, 围压为 1 MPa 时, 残余强度最大可降低 73%; 围压较高时(> 20 MPa), 由于围压的约束和压密作用, 循环加卸载不会造成岩体残余强度的降低。

关键词: 岩石力学; 残余强度; 循环加卸载; 卸荷量

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2010)10-2103-07

EXPERIMENTAL RESEARCH ON INFLUENCE OF CYCLIC LOADING AND UNLOADING ON ROCK MASS RESIDUAL STRENGTH

WANG Ruihong¹, LI Jianlin¹, JIANG Yuzhou², CHEN Xing¹

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: The mechanical properties of underground tunnel, cavern and pillar in deep high stress area are closely linked to the mechanical properties of rock after failure. Research on residual strength and post-peak mechanical properties of rock mass has very important significance for engineering design. Through cyclic loading and unloading experiments of failure rock mass, variation law of residual strength under different confining pressures(30, 20, 10, 5 and 1 MPa) and different unloading degrees (90%, 70%, 30%) has been studied. The results show that the relationship between residual strength and cycle number can be fitted with the exponential function, no matter how the initial conditions are. When the confining pressure is relatively lower(≤ 20 MPa), at the same confining pressure, the reduction degree of residual strength is the maximum at unloading degree of 70%, followed by unloading degree of 90%. On the other hand, the reduction degree of residual strength is the minimum at unloading degree of 30%. With the same amount of unloading degree, the lower the confining pressure is, the greater the reduction degree of residual strength is; under confining pressure of 1 MPa, the residual strength even may reduce by 73%. As confining pressure is large(> 20 MPa), because of binding and compressive effect of the confining pressure, cyclic loading and unloading will not result in lower residual strength of rock samples.

Key words: rock mechanics; residual strength; cyclic loading and unloading; unloading degree

收稿日期: 2010-05-13; **修回日期:** 2010-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50909052, 50779029); “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAB29B03); 三峡大学校青年基金项目(KJ2009A005)

作者简介: 王瑞红(1981-), 女, 博士, 2003年毕业于武汉水利电力大学土木工程专业, 现任讲师, 主要从事边坡岩体开挖卸荷力学特性方面的研究工作。E-mail: wrh@ctgu.edu.cn

1 引言

地下工程中,处于深部高地应力区的地下巷道、洞室、矿柱等的力学特性都与岩石破坏后的力学特性有密切联系,研究岩体残余强度及峰后力学性质对工程设计有着非常重要的意义^[1, 2]。从20世纪70年代开始,人们开始认识到岩体破坏后研究的重要性并开展了许多有意义的工作^[3~9]。其中关于岩体破坏后脆性跌落段的描述已有许多研究,多数学者认为脆塑性理论更符合实际^[10~13],但对于岩体残余强度阶段的力学性质研究却较为少见。金济山等^[14]研究了大理岩在不同围压下(10~200 MPa)循环加卸载对残余强度及弹性模量的影响规律,认为在较低围压下,岩样的残余强度与循环加载次数有关,而在高围压下无关,但未考虑低围压状态及循环加卸载时卸荷量大小对岩体残余强度的影响。

地下岩体工程尤其是在高地应力区地下洞室开挖工程中,开挖将导致原岩应力重新分布,环向应力增加,径向应力减小,即其开挖后的力学状态表现为环向加载而径向卸荷,径向应力的卸荷将导致一定范围内产生岩石松动破坏圈,该范围内的岩体实际上多是处于较低围压状态下,已达到残余强度状态的含节理岩体或破碎岩体。已有研究表明,低围压下残余强度表现出对围压变化具有极强的敏感性,较低的围压就可大幅提高岩体的残余强度。在施工过程及建筑物运行过程中,岩体又受到开挖卸荷、爆破及一些其他循环荷载的影响。因此,研究不同围压下,处于残余强度状态岩体的承载力及在加卸载应力路径下的力学响应具有很重要的工程意义。

本文拟通过试验研究循环加卸载对已经破坏处于残余强度阶段岩体的影响,着重分析岩体在不同围压及卸荷程度下残余强度的变化规律。

2 试件制备及试验方案

2.1 试件制备

试验所用岩块为四川红砂岩,质地均匀细密,无风化现象,无可见节理,总体连续性、完整性很好,为新鲜岩体,水平层理明显,钻样方向均垂直

于节理。岩样按50 mm×100 mm(直径×高度)圆柱体进行制备。

2.2 试验方案

试验采用以下5个方案:①按静水压力条件逐步施加(速率0.05 MPa/s) $\sigma_1 = \sigma_3$ 至预定值;②稳定 σ_3 , 逐步增高 σ_1 (采用位移控制,加载速率0.002 mm/s)至岩样破坏;③继续以轴向位移控制施加轴向应力直至应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)不随轴向应变的增加而降低;④采用应力控制,以一定速率将轴力卸荷至残余强度的10%, 30%, 70%;⑤增大 σ_1 (采用位移控制,加载速率0.002 mm/s)至应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)不随轴向应变的增加而增加时卸荷,周而复始,循环加卸载至试验结束。

试验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)。



图1 RMT-150C型岩石力学试验系统及控制系统
Fig.1 Rock mechanics testing system RMT-150C and control system

3 试验结果分析

图2为典型岩样不同围压、不同卸荷量时岩样峰后循环加卸载应力-应变曲线。循环加卸载均在岩样已达到残余强度的基础上进行。从图2中可以看出,不同围压下(30, 20, 10, 5, 1 MPa),不同的卸荷量(90%, 70%, 30%)造成岩样的残余强度变化规律不同,随着循环次数的增加,残余强度或逐渐增大,或逐渐减小,或基本保持不变,但无论如何变化,最终都趋于一个定值,具体分析如下:

(1) 围压为10 MPa

图3(a)为围压10 MPa时不同卸荷量条件下 $\Delta\sigma_r$ 和加卸载循环次数关系。其中 $\Delta\sigma_r$ 为每次循环后岩样残余强度相对于初始值的变化百分比。从图3中可以看出:

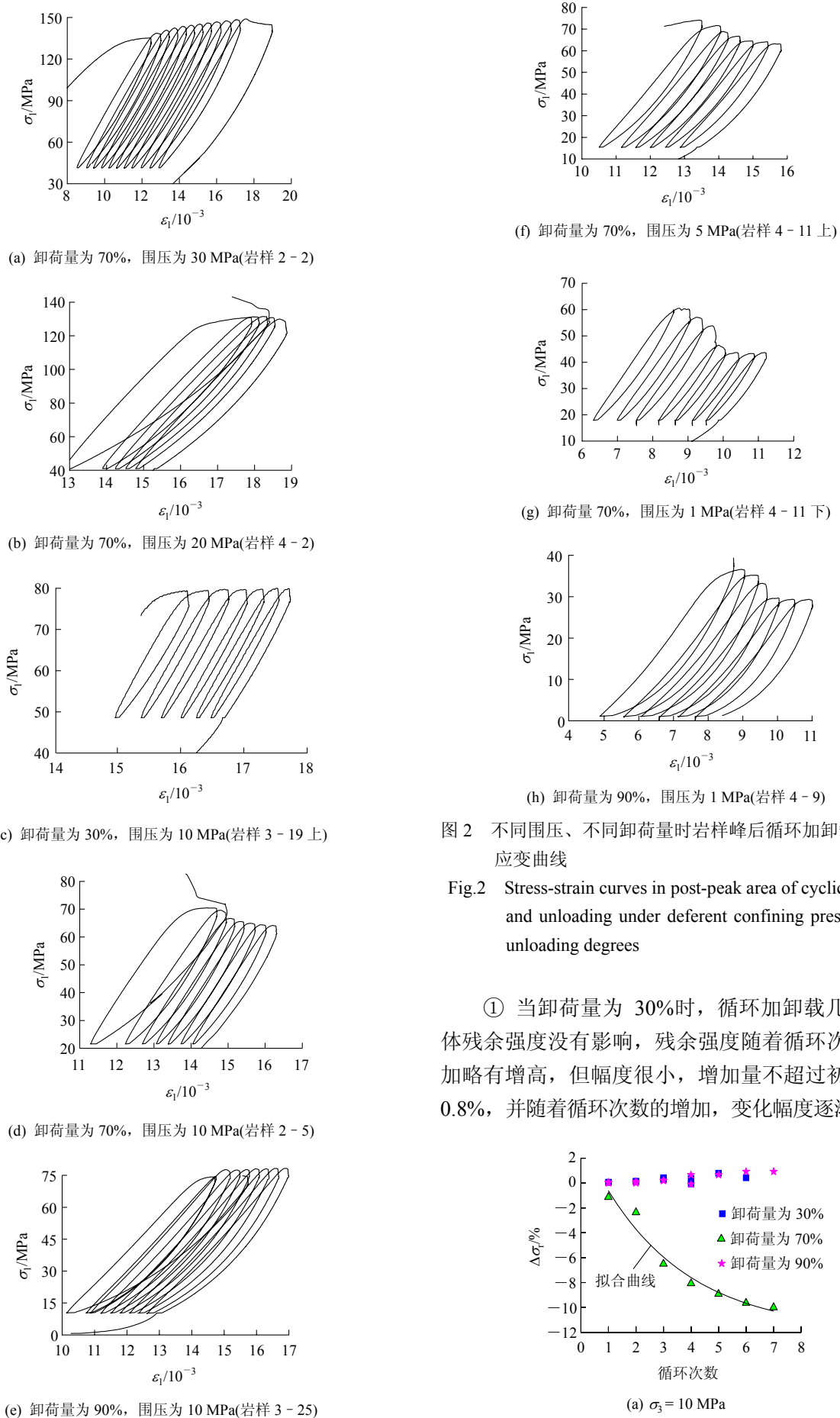
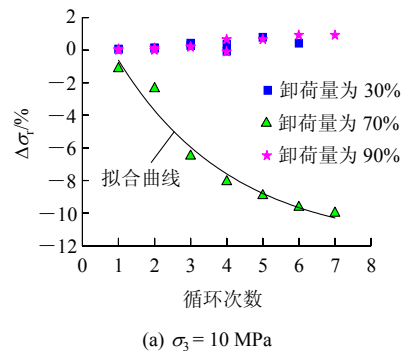


图 2 不同围压、不同卸荷量时岩样峰后循环加卸载应力 - 应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves in post-peak area of cyclic loading and unloading under deferent confining pressures and unloading degrees

① 当卸荷量为 30%时, 循环加卸载几乎对岩体残余强度没有影响, 残余强度随着循环次数的增加略有增高, 但幅度很小, 增加量不超过初始值的 0.8%, 并随着循环次数的增加, 变化幅度逐渐减小。



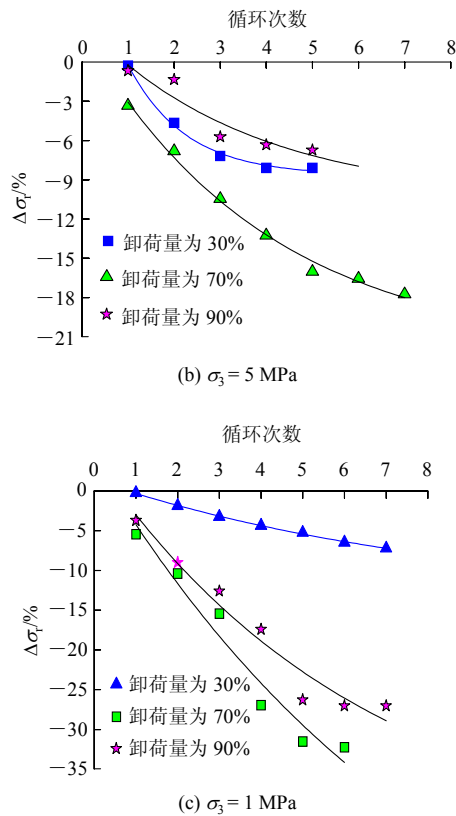


图3 不同围压下 $\Delta\sigma_r$ 和加卸载循环次数关系
Fig.3 Relationships between $\Delta\sigma_r$ and cyclic loading and unloading number under different confining pressures

② 当卸荷量为 70%时, 循环加卸载对岩体残余强度影响较大, 残余强度随着循环加卸载次数的增多而逐渐降低, 并逐渐趋于稳定。从以后的分析中也可以看出, 尽管岩样的初始应力条件和卸荷量不同, 但残余强度变化规律均可用以下函数拟合, 只是不同的条件下拟合函数中的参数值不同:

$$y = AF_0 e^{-\frac{x}{t}} + y_0 \quad (1)$$

式中: x 为循环次数; y 为残余强度变化百分比; F_0 为循环加卸载时初始围压; AF_0 为曲线衰减或增加幅度; t 为曲线衰减或增加系数; y_0 为当循环次数无限大时, 残余强度变化量极限值。

当卸荷量为 70%时, 残余强度衰减拟合函数为

$$y = 10 \times 1.5629 e^{-\frac{x}{3.1620}} - 12.0089 \quad (R = 0.9644) \quad (2)$$

此时残余强度最大可降低 12%。

③ 当卸荷量为 90%时, 轴向荷载卸荷量较大, 卸荷作用使得岩样中原有节理张开、扩展或者生成新的节理, 但由于围压较高, 卸荷后, 岩体中节理在围压作用下被压密, 再次加载时岩体仍有较高的

承载力, 残余强度变化幅度很小, 变化量不超过初始值的 1%。

(2) 围压为 5 MPa

图 3(b)为围压 5 MPa 时 $\Delta\sigma_r$ 和加卸载循环次数关系。从图 3(b)中可以看出, 围压较低时, 残余强度受循环加卸载影响较大, 无论卸荷量较大或者较小, 均随着循环次数的增多而降低, 并逐渐趋于稳定值, 其变化量随循环次数的变化关系仍可用式(1)拟合。

① 当卸荷量为 30%时, 残余强度随着循环次数的增加逐渐降低, 其衰减拟合函数为

$$y = 5 \times 2.7177 e^{-\frac{x}{3.5676}} - 10.4920 \quad (R = 0.8952) \quad (3)$$

此时残余强度最大可降低 10%。

② 当卸荷量为 70%时, 循环加卸载对岩体残余强度影响较大, 残余强度随着循环加卸载次数的增多而逐渐降低并趋于稳定, 其衰减拟合函数为

$$y = 5 \times 4.9423 e^{-\frac{x}{3.9972}} - 22.2939 \quad (R = 0.9936) \quad (4)$$

此时残余强度最大可降低 22%。

③ 当卸荷量为 90%时, 由于卸荷量较大造成岩样损伤, 质量下降, 再次加载时岩体残余强度有一定程度的降低。其衰减拟合函数为

$$y = 5 \times 3.7583 e^{-\frac{x}{1.2508}} - 8.6671 \quad (R = 0.9956) \quad (5)$$

此时残余强度最大可降低 9%。

(3) 围压为 1 MPa

图 3(c)为围压 1 MPa 时 $\Delta\sigma_r$ 和加卸载循环次数关系。从图 3(c)中可以看出, 低围压下, 残余强度受循环加卸载影响很大, 无论卸荷量较大或者较小, 均随着循环次数的增多而降低, 其变化量随循环次数的变化关系仍可用式(1)拟合。

① 当卸荷量为 30%时, 残余强度随着循环次数的增加逐渐降低, 其衰减拟合函数为

$$y = 1 \times 15.4238 e^{-\frac{x}{8.5450}} - 14.0205 \quad (R = 0.9985) \quad (6)$$

此时残余强度最大可降低 14%。

② 当卸荷量为 70%时, 循环加卸载对岩体残余强度有很大影响, 由于围压较低, 卸荷作用对岩体损伤程度较大, 残余强度随着循环加卸载次数的

增多而大幅降低, 其衰减拟合函数为

$$y = 1 \times 77.300 7 e^{-\frac{x}{8.784 6}} - 73.217 5$$

$$(R = 0.993 6) \quad (7)$$

此时残余强度最大可降低 73%。

③ 当卸荷量为 90%时, 由于围压较低, 对于岩样中节理裂纹的扩展不能起到有效的约束作用, 卸荷作用使得岩样中原有节理张开扩展并生成新的节理, 岩体质量急剧下降, 再次加载时岩体残余强度有较大幅度的降低。其衰减拟合函数为

$$y = 1 \times 50.272 1 e^{-\frac{x}{6.537 9}} - 46.143 3$$

$$(R = 0.995 6) \quad (8)$$

此时残余强度最大可降低 46%。

(4) 围压为 20 和 30 MPa

通过以上分析可以看出, 同一围压下, 卸荷量为 30%时, 由于卸荷程度较低, 循环加卸载并未造成岩体质量大幅降低, 岩体残余强度受影响最小; 卸荷量为 70%时, 岩样卸荷程度较高, 卸荷作用使得岩样中原有节理张开、扩展、贯通, 再次加载时岩体残余强度有所降低, 且围压越低, 降低幅度越大; 而卸荷量为 90%时, 虽然卸荷过程对岩样造成的损伤最大, 但由于轴向荷载卸除后, 围压对岩样的压密作用, 再次加载时岩样仍有较好的承载能力, 因此卸荷量为 90%时, 残余强度的衰减程度较卸荷量为 30%时强, 比卸荷量为 70%时弱。

残余强度的衰减程度随着围压的增大而逐渐减弱, 这主要是由于岩体破坏后的破裂面并非理想的平直光滑面, 而是粗糙不平且具有起伏的非光滑面。根据 J. D. Byerlee^[15]岩石摩擦定律的结论: 低压岩石之间的摩擦因数与其表面的粗糙程度有关, 而高压岩石之间的摩擦因数与其表面的粗糙程度几乎没有关系。岩样的残余强度实质上是破裂面之间的摩擦性质的反映。当岩样破坏后处于低围压状态时, 破裂面上的正应力较低, 破裂岩块可以沿破裂面上下错动, 降低了破裂面之间的粗糙度, 摩擦力减小, 残余强度随着循环加载次数的增加而逐渐降低; 当围压逐渐增大时, 破裂面上的正应力较高, 对破裂岩体的约束也逐渐增强, 循环加载虽然使破裂面上的粗糙度降低了, 但未减小摩擦因数, 岩体受到荷载作用后, 不宜沿破裂面产生错动, 残余强度随循环次数的增加降低幅度逐渐减小甚至略有增加, 说明峰值后岩体残余强度对围压变化是非常敏感的。

在工程实际中, 围岩开挖卸荷损伤后, 较小的支护阻力即可使其残余强度有较大的提高。

为进一步研究高围压下循环加卸载对岩体残余强度的影响, 分别在围压 20 和 30 MPa 时对 2 个岩样进行峰后残余强度加卸载试验, 由于卸荷量为 70%时岩样强度损失最大, 因此高围压下仅考虑了卸荷量 70%一种情况。

围压 20, 30 MPa 时 $\Delta\sigma_r$ 和加卸载循环次数关系如图 4 所示。图中显示, 围压为 20 MPa 时, 由于围压较高, 卸荷过程中产生的裂纹节理受到约束不能进一步扩展和展开, 岩样的残余强度几乎不受循环加卸载的影响, 经过 6 次加卸载循环后, 岩样强度的变化量不到 1%; 而围压为 30 MPa 时, 由于围压较高, 轴向荷载卸荷时, 岩体在围压作用下被进一步压密, 再次加载时承载能力不但没有降低, 反而随着循环次数的增加而逐渐增大, 最终趋向于一个稳定值, 这和前面所有试验中分析所得围压对岩体强度的影响规律结果是一致的, 围压越高, 节理对岩体的影响程度就越低。高围压下岩体残余强度随围压增长规律的拟合公式为

$$y = 30 \times (-0.434 4) e^{-\frac{x}{5.363 7}} + 11.917 6$$

$$(R = 0.993 2) \quad (9)$$

即围压为 30 MPa, 卸荷量为 70%时, 残余强度最大可增加 12%。

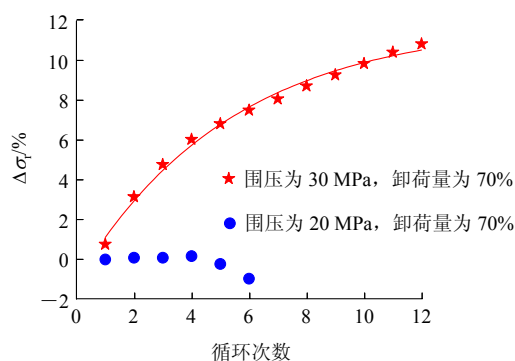


图 4 围压 20 和 30 MPa 时 $\Delta\sigma_r$ 和加卸载循环次数关系
Fig.4 Relationships between $\Delta\sigma_r$ and cyclic loading and unloading number when $\sigma_3 = 20$ and 30 MPa

不同围压、不同卸荷程度下, 岩样残余强度随循环次数的增加最大变化百分比见表 1。

从以上分析可以看出, 拟合函数式(1)可以较好的反应残余强度与加卸载循环次数之间的相互关系, 式(1)中所含参数意义明确, 既考虑了围压和卸

表1 不同围压、卸荷程度下残余强度变化百分比

Table 1 Change percentages of residual strength under different confining pressures and unloading degrees

卸荷量/%	$\sigma_3 = 1 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 10 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 30 \text{ MPa}$
30	-14%	-10%	1%	-	-
70	-73%	-22%	-12%	-1%	12%
90	-46%	-9%	1%	-	-

注：正值表示百分比随循环次数的增加残余强度逐渐增大，负值则表示残余强度逐渐降低。

荷量的影响，也很好的反映了残余强度随着循环次数的增多而逐渐趋于一个稳定值的规律。在同一围压下，系数 A 越大，说明残余强度衰减的区间越大，强度随着循环次数的增加损失也越多，同一围压下，卸荷量为 70% 时岩样残余强度的降低值最大，其次为卸荷量为 90%，30% 时，对岩样残余强度造成的影响最小； t 值越大，说明对应的卸荷量下岩样循环加卸载时残余强度的变化速率越快； y_0 (绝对值) 越大，说明岩样经过无数次加卸载残余强度趋于稳定时的变化量越大。当卸荷量相同时，围压越低，残余强度降低程度越大。

4 结 论

本文通过岩体峰后循环加卸载试验，研究了不同围压及卸荷程度对岩体残余强度的影响。主要结论如下：

(1) 不同围压、不同卸荷量造成岩样的残余强度变化规律不同，但残余强度变化规律均可用式(1)拟合，不同的条件下拟合函数中的参数值不同。

(2) 围压为 10 MPa，当卸荷量为 30% 时，循环加卸载几乎对岩体残余强度没有影响，变化量不超过初始值的 0.8%；当卸荷量为 70% 时，循环加卸载对岩体残余强度影响较大，残余强度随着循环加卸载次数的增多而逐渐降低，最大可降低 12%；当卸荷量为 90% 时，由于卸荷后岩体中节理在围压作用下被压密，再次加载时残余强度变化幅度很小，变化量不超过初始值的 1%。

(3) 围压为 5 MPa，当卸荷量为 30% 时，残余强度随着循环次数的增加逐渐降低，最大可降低 10%；当卸荷量为 70% 时，循环加卸载对岩体残余强度影响较大，最大可降低 22%；当卸荷量为 90% 时，由于卸荷后围压压密作用，残余强度最大可降低 9%。

(4) 围压为 1 MPa，当卸荷量为 30% 时，残余强度随着循环次数的增加逐渐降低，最大可降低 14%；当卸荷量为 70% 和 90% 时，残余强度最大可降低 73% 和 46%。

(5) 同一围压下，卸荷量为 70% 时岩样残余强度的降低值最大，其次为卸荷量为 90%，卸荷量为 30% 时，对岩样残余强度造成的影响最小；当卸荷量相同时，围压越低，残余强度降低程度越大。

参考文献(References):

- [1] 靖洪文. 峰后岩石剪胀性能试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 93 - 96, 102.(JING Hongwen. Experimental study on dilatancy nature of the rock post-peak behavior[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 93 - 96, 102.(in Chinese))
- [2] 郭富利, 张顶立, 苏洁, 等. 围压和地下水对软岩残余强度及峰后体积变化影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 2 644 - 2 650.(GUO Fuli, ZHANG Dingli, SU Jie, et al. Experimental study of influences of confining pressures and ground water on residual strength and post-peak volumetric change of soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 2 644 - 2 650.(in Chinese))
- [3] 鄢建华, 黄宝德, 汤雷. 岩石类材料峰后本构关系研究进展[J]. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(4): 59 - 62.(YAN Jianhua, HUANG Baode, TANG Lei. The current study and development trend in researching on the constitutive relation of rock in the post-peak area[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2003, 14(4): 59 - 62.(in Chinese))
- [4] 钟时猷, 徐纪成. 破裂岩石力学性态的模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 1986, (6): 14 - 20.(ZHONG Shiyou, XU Jicheng. A modelling investigation of the mechanical behaviour of rocks with fractures[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 1986, (6): 14 - 20.(in Chinese))
- [5] 徐松林, 吴文, 王广印, 等. 大理岩等围压三轴压缩全过程研究 I: 三轴压缩全过程和峰前、峰后卸围压全过程实验[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 763 - 767.(XU Songlin, WU Wen, WANG Guangyin, et al. Study on complete procedures of marble under triaxial compression I: testing study on complete procedure of triaxial compression and the processes of unloading confining at the pre-peak and post-peak[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 763 - 767.(in Chinese))
- [6] 汪新红, 王明洋. 岩爆与峰后岩石力学特性[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 913 - 919.(WANG Xinhong, WANG Mingyang. Relation between rock-burst and rock post-peak behavior[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 913 - 919.(in Chinese))
- [7] 张黎明, 王在泉. 考虑岩体峰后非线性软化的衬砌压力隧洞应力解[J]. 岩土力学, 2008, 29(增1): 283 - 287.(ZHANG Liming, WANG Zaiquan. Stress solution of pressure on tunnel liner considering

- nonlinear softening of rock mass post-peak[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(Supp.1): 283 - 287.(in Chinese))
- [8] 张帆, 盛谦, 朱泽奇, 等. 三峡花岗岩峰后力学特性及应变软化模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增 1): 2 651 - 2 655. (ZHANG Fan, SHENG Qian, ZHU Zeqi, et al. Study on post-peak mechanical behaviour and strain-softening model of Three Gorges granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Supp.1): 2 651 - 2 655.(in Chinese))
- [9] 陆银龙, 王连国, 杨峰, 等. 软弱岩石峰后应变软化力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(3): 640 - 648.(LU Yinlong, WANG Lianguo, YANG Feng, et al. Post-peak strain softening mechanical properties of weak rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(3): 640 - 648.(in Chinese))
- [10] POUYA A, GHOREYCHI M. Determination of rock mass strength properties by homogenization[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2001, 25(13): 1 285 - 1 303.
- [11] STEINER W. Swelling rock in tunnels: rock characterization, effect of horizontal stresses and construction procedures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(4): 361 - 380.
- [12] 吴刚, 张磊. 单轴压缩下岩石破坏后区的扰动状态概念分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(10): 1 628 - 1 634.(WU Gang, ZHANG Lei. Analysis of post-failure behaviors of rock in uniaxial compression using disturbed state concept theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(10): 1 628 - 1 634.(in Chinese))
- [13] 郑宏, 葛修润, 李焯芬. 脆塑性岩体的分析原理及其应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(1): 8 - 21.(ZHENG Hong, GE Xiurun, LEE C F. Analysis principle for rock mass with brittle plasticity and its applications[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(1): 8 - 21.(in Chinese))
- [14] 金济山, 石泽全, 方华, 等. 在三轴压缩下大理岩循环加载试验的初步研究[J]. *地球物理学报*, 1991, 34(4): 488 - 494.(JIN Jishan, SHI Zequan, FANG Hua, et al. A preliminary study on cyclic loading experiments of marble under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1991, 34(4): 488 - 494.(in Chinese))
- [15] BYERLEE J D. Friction of rock[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1978, 116(4 - 5): 615 - 626.

葛修润院士发明的地应力测试新方法在锦屏工地测试获得成功

由我国科学家提出的钻孔局部壁面应力全解除法(Borehole Wall Stress Relief Method, BWSRM)地应力测量新方法已在我国重大工程中得到应用, 与此新方法相配套的水平孔地应力测井机器人也已研制成功。

这项成果是由中国工程院院士、上海交通大学和中国科学院武汉岩土力学研究所葛修润教授领导的由数个研究单位和企业科研人员组成的科研团队历时十余年的艰苦奋斗所取得的。其间, 该课题曾得到国家自然科学基金“雅砻江联合研究基金”重点项目、国家自然科学基金面上项目、中国科学院基础局创新基金和上海交通大学 985 一期等经费资助。

由葛修润院士带领的团队于 2010 年 8 月 7 日~12 日在位于四川省西昌市境内的雅砻江锦屏二级水电站建设工地上, 利用研制的地应力测井机器人在埋深达 2 430m 处的地下巷道(科研试验洞)内首次进行了地应力实测, 并获得成功。BWSRM 法地应力测量基本原理曾在 2006 年 6 月 19~21 日在挪威特隆赫姆召开的岩石应力国际研讨会(International Symposium on In-situ Rock Stress, 19~21 June 2006, Trondheim, Norway)上发表, 并刊登在该会议文集第 185 - 192 页。

水平孔地应力测井机器人外观呈圆柱形, 外径约 148mm, 长约 720mm, 主体质量约 21kg。机器人推送入水平孔预定深度后, 能在计算机控制下完成设备锚固定位、局部壁面打磨、清洗和烘干、向工作面喷涂胶和自动黏贴应变片(花)、对工作面实施环形切割进行局部壁面应力解除、钻具自动回收等动作和任务。各项数据均由计算机自动采集, 以供后续分析和处理。整个地应力测试过程完全由计算机实时监测和控制。

锦屏二级水电站主要是利用雅砻江 150 km 锦屏大河湾的天然落差, 截弯取直开挖隧洞引水发电, 计划安装 8 台机组, 每台为 600MW, 总装机容量 4 800MW。引水隧洞最深处的埋深与实测地应力处的埋深很接近, 因此, 意义重大。这次试验的成功也弥补了该高程段地应力实测资料的空白。实测地段也是我国物理学界探索暗物质、暗能量方面拟建深部地下实验室的理想地点。