

孔径变形法测试地应力弹性模量参数选取分析

赵云川, 李琦, 陈江, 李伟

(中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南昆明 650033)

摘要: 随着大型水电工程和地下空间工程建设的发展, 势必会加大研究岩体的应力测量技术及应力对工程岩体、工程建设的影响。以黄登水电站坝区岩体地应力测量为背景, 通过岩芯围压试验、室内岩块压缩变形试验等方法测试弹性模量, 其测试成果在各种试验中有很大的不同, 因此采用岩石损伤力学、高围压下岩体特性等理论对该现象进行分析; 同时, 根据卸荷岩体特性对地应力测试中应力解除过程进行分析, 确定扩容对地应力测试的影响。研究表明, 随着围压的增加, 岩体弹性模量可能出现正增长关系, 主要原因是岩体裂隙的压紧导致结构的致密; 岩体在卸荷的情况下会出现一定程度的扩容; 同时, 机械振动势必也加大扩容对于变形的影响。考虑上述因素, 提出黄登水电站地应力测试中弹性模量的选取原则, 该方法可为类似工程提供一定的参考价值。

关键词: 岩石力学; 卸载岩体; 扩容现象; 裂隙岩体

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)10 - 2143 - 05

ANALYSIS OF ELASTIC MODULUS PARAMETER SELECTION OF APERTURE DEFORMATION METHOD IN IN-SITU STRESS MEASUREMENT

ZHAO Yunchuan, LI Qi, CHEN Jiang, LI Wei

(HydroChina Kunming Engineering Corporation, Kunming, Yunnan 650033, China)

Abstract: With the development of large-scale hydropower projects and the underground space constructions, the rock stress measurement and the influence of stress on engineering rock masses and constructions attract more and more attentions. Based on in-situ stress measurement of Huangdeng dam, the elastic moduli are obtained from the core confining pressure test, the interior compression modulus test and bearing plate test; and the elastic moduli are different. Therefore, the phenomena of difference are analyzed according to rock damage mechanics and rock mass properties under high confining pressures. Besides, stress relief process of measurement is analyzed based on unloading rock mass properties; and the effect of expansion on stress measurement is determined. The results show that with the increase in confining pressure, the elastic modulus of rock mass may grow positively mainly due to the compression of rock fractures; unloading rock mass may appear the phenomenon of serious expansion with the mechanical vibration. Considering the above analyses, a selecting principle of elastic modulus in aperture deformation method in in-situ stress measurement is proposed; and it would offer a reference to other similar projects.

Key words: rock mechanics; unloading rock mass; expansion phenomena; fractured rock

1 引言

随着西部大开发和国家基础建设的需要, 许多

大型岩体工程, 如大型水电站、地下洞室(深部岩体工程), 大型边坡工程为岩体地应力测试研究提供了良好的契机。1932年在美国亚利桑那州西北部的胡佛水坝下面的一个隧道中成功地测定了岩石中的

收稿日期: 2010 - 05 - 13; **修回日期:** 2010 - 06 - 07

作者简介: 赵云川(1981 -), 男, 2005年毕业于中国地质大学地质工程专业, 现为工程师, 主要从事大型水电站岩石力学试验方面的研究工作。
E-mail: chengcheng0608@tom.com

绝对应力,从此开始了地应力测量^[1]。我国地应力测量研究工作是在著名科学家李四光的倡导下从20世纪60年代开始的。现今对于地应力测试应用于工程领域的方法主要有:孔底法、孔径法、水压致裂法等;所以开展地应力测试技术的试验研究具有重要的理论研究价值和工程实际意义。

在完整基岩中进行地应力测试,现今最好的试验方法是孔径法,在国内大中型水电站(包括小湾水电站、糯扎渡水电站、黄登水电站等)中广泛使用,有关孔径法测试地应力弹性模量参数的选取分析及原因的研究,国内外已有一定的探索^[2],也取得了一定的研究成果。但相对比较零散,针对具体工程有针对性的研究成果较少,且未从多方面分析弹性模量参数的选取原则。本文以黄登水电站地应力测试研究为背景,根据现场、室内试验研究成果,结合围压下岩体特性^[3~8]、卸荷岩体特性^[9~14]、裂隙损伤岩体特性^[3, 4, 15]等理论,分析并确定了黄登水电站孔径法测试地应力弹性模量参数选取的原则,为地应力测试研究和工程建设设计施工提供比较可靠的参考价值。

2 工程背景和变形试验

2.1 工程概况

黄登水电站坝址位于云南省兰坪县营盘镇境内,是澜沧江古水(含库区)~苗尾规划河段梯级的第六级水电站,以发电为主。本工程为堤坝式水电枢纽工程,电站装机容量1900 MW,正常蓄水位1619 m,死水位1586 m,总库容 $14.18 \times 10^8 \text{ m}^3$,属I等大(1)型。枢纽主要由碾压混凝土重力坝、坝身泄洪建筑物、左岸地下引水发电系统等建筑物组成。混凝土重力坝最低建基面高程1420 m,坝顶高程1624 m,最大坝高204 m,坝顶长457 m。黄登水电站坝址区预备可行性和可行性研究阶段开展地应力测量共14组,对于弹性模量的测试主要包括:刚性承压板试验、岩芯围压试验和岩块单轴压缩弹性模量测试。

2.2 刚性承压板试验

试验在变质火山角砾岩、变质火山细砾岩和变质凝灰岩上开展。刚性承压板采用 $\phi 50 \text{ cm}$ 、 $\phi 52 \text{ cm}$ 两种承压板试验,刚性承压板法变形试验均采用逐级一次循环法,分5级进行。试验正应力范围为3~10 MPa,视不同岩体具体确定;在II类岩体上

累计进行试验14组,弹性模量范围为17~50 GPa,均值为31.36 GPa。

2.3 岩芯围压试验

在现场采集地应力测试段芯样,并开展围压试验,试验围压最大为12 MPa;采用快速3循环法围压试验进行20余组弹性模量测试,实测弹性模量均值约为60 GPa。

2.4 岩块单轴压缩变形试验

黄登水电站可行性研究阶段第三、四期现场岩石力学试验进行地应力测试段岩块单轴压缩弹性模量测试19组,主要采用 $\phi 5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 芯样,对称贴应变片,在材料试验机上进行试验,试验严格控制加载速度。试验弹性模量范围为21.3~47.9 GPa,均值为31.32 GPa。

3 弹性模量不同的原因

由上述3种试验方案对岩石弹性模量的测试结果可以明显的发现,较完整、完整岩石的弹性模量在理论上应该是一个常量,而刚性承压板试验与岩块单轴压缩变形试验成果基本一致,围压试验成果基本为上述2种试验成果的2倍。

3.1 围压下岩体特性对弹性模量的影响

岩石弹性模量在应用时被认为是一个不变量,即单轴与三轴压缩下具有相同的杨氏模量,仅与其材质和裂隙发育情况有关。但迄今为止,研究岩石的弹性模量与围压的关系主要成果为:部分岩石弹性模量不变,部分岩石随围压增大;在尤明庆^[5]研究中有记载花岗岩试验三轴压缩全程曲线,在围压高达153 MPa的范围内,弹性模量仍随围压增大。由图1中岩样弹性模量与围压的关系^[5]可知,岩石在围压12 MPa时弹性模量基本是岩石零围压下弹性模量的1.8倍,这一点和本次试验成果的2倍关

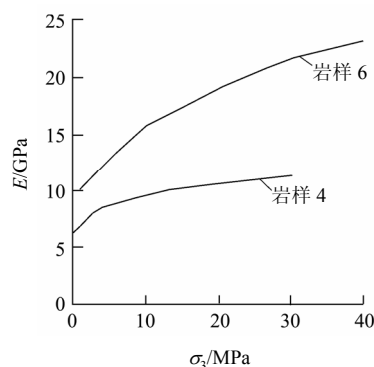


图1 岩样弹性模量与围压的关系^[5]

Fig.1 Relationships between elastic modulus and confining pressure of specimens^[5]

系理论相吻合。

3.2 裂隙损伤岩体特性对弹性模量的影响

目前学术界普遍认为：造成围压影响弹性模量增大的原因是岩石体内微观的损伤——裂隙在围压下的压密闭合和摩擦滑动：

(1) 围压对裂隙的压密闭合作用

在围压增加导致裂纹闭合的过程中，接触面的凹凸不平使得裂纹不规则地闭合。在低围压作用下裂纹逐渐闭合，但其几何形状的变化不大；当围压超过一定值以后，微裂纹形状变化比较明显，逐渐变得扁平、直至闭合。由于围压的作用导致裂纹密度的减小，而裂纹密度的变化对弹性模量的影响可以用细观损伤理论的 Taylor 公式及其曲线^[15]表示，其曲线表示公式为

$$\frac{\bar{E}}{E} = \left[1 + \frac{16(1-\nu^2)(10-3\nu)}{45} f \right]^{-1} \quad (1)$$

式中： E 为基本材料的弹性模量； \bar{E} 为含裂纹的基本材料的有效弹性模量； ν 为基本材料的泊松比； f 为微裂纹密度， $f = M\bar{\lambda}^3/V$ 为裂纹密度（ λ 为随机分布的币状微裂纹面半径， M 为裂纹数目， V 为基本体积）。裂纹密度与有效弹性模量的关系^[15]见图 2。

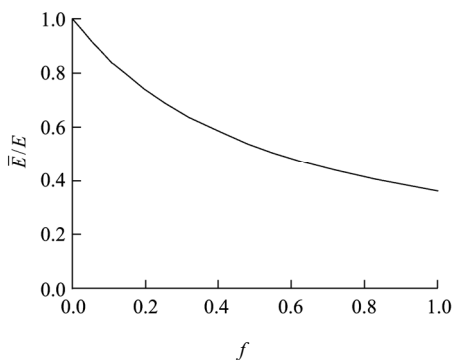


图 2 裂纹密度与 \bar{E}/E 的关系^[15]

Fig.2 Relationship between crack density and \bar{E}/E ^[15]

(2) 裂纹的不断闭合与裂纹面间的摩擦滑动作用

对于倾斜与承受围压的裂纹，围压的作用同样促使裂纹不断闭合；考虑围压的各向不等性，可能会出现裂纹的摩擦滑动。裂纹承载能力与围压成正比。轴向压缩过程中，裂隙之间可能发生有摩擦的滑动，也可能不发生滑动；但随着压缩变形的继续，轴向应力增加，承载能力更大的裂隙也会相继发生滑动。如果某一裂隙的剪切承载能力大于岩石材料

的黏聚力，那么该裂隙就不会显著影响岩石的变形。围压较大时发生滑移的裂隙较少，因而岩样产生的轴向变形也就较小，围压的增加，提高了裂纹的承载能力，其滑移受到摩擦力的抑制也减小，从而提高了岩石的弹性模量。当围压较高时，岩样内的裂纹闭合过程完成，弹性模量不再表现出增加。

黄登水电站主要岩性为变质火山角砾岩、变质火山细砾岩和变质凝灰岩；岩石本体中受到风化和胶结的影响可以判断微观裂纹势必大量存在；结合声波对岩体完整性的测试结果，可以初步判定较完整、完整的上述 3 类岩石的裂纹密度范围为 0.3~0.6，那么通过图 2 可以查出 \bar{E}/E 的值介于 0.45~0.55，若假设围压 12 MPa 下岩石裂纹基本闭合，裂纹密度为 0.5，查得 \bar{E}/E 大概为 0.80；由此可得：岩芯围压试验测试成果与单轴压缩弹性模量测试成果呈系数为 1.50~1.80 的比例关系；这一点与节 2 中的 3 种试验成果也基本吻合。

4 卸荷岩体特性对弹性模量的影响

通过上述分析，岩石的弹性模量测试成果的不同主要是基于测试原理的不同。岩石应力测量相关规程^[16]均要求采用岩芯围压测试来确定孔径法地应力测试所采用的弹性模量参数，即通常情况下在围压器下进行 3 个回次的加卸荷试验；在围压试验过程中，因岩石(岩块)处于弹性阶段，加荷、卸荷曲线基本重合，因此试验参数通常根据几个回次加、卸荷的变形统一计算分析所得。但在通常情况下，因取样岩石与原位岩石在环境上的不同，用该弹性模量进行应力计算时，计算成果和与实际情况出入较大；根据大量的试验及数值模拟成果分析得出：测试成果与实际(理论)计算成果的比值范围为 2~3。

笔者对设备因素进行了试验研究、理论分析和数值模拟分析，结合刘允芳和刘元坤^[2]的研究得出：设备对试验成果的影响较小，基本控制在 3% 以内。通过大量理论分析，卸荷岩体表现出来的“扩容”是上述情况最好的解释。

根据大量研究和相关论文研究可知：实际上岩体在长期的应力作用下，其加载部分变形已经完成，卸载应力途径中，无论试样破坏时的围压与加载途径试样破坏时的围压相同还是不同，试件侧向应变都明显增大，表现出明显的扩容。图 3 为一个典型加、卸载变形曲线^[2]。在岩体应力-应变曲线中，

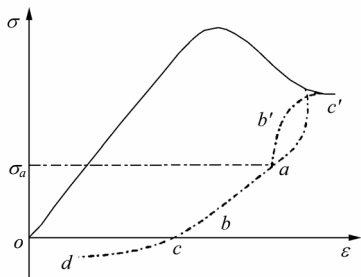


图3 典型加、卸载变形曲线^[2]

Fig.3 Typical loading-unloading deformation curve^[2]

若岩体目前应力状态处于点 *a*，当岩体卸荷时，将追踪卸荷曲线 *abc* 至拉应力区。当岩体加载时，将追踪曲线 *ab'c'*。表明岩体在卸荷和加载过程中的弹性模量不同，试验和数值分析成果表明：当岩体卸荷比较充分时，岩体的变形模量为加载时的 1/3~1/2；一旦进入拉应力区，其变形模量为加载时的百分之几。

岩石在卸荷状态的扩容，主要包括峰前卸围压（见图 4）和峰后卸围压的 2 种情况。而通常情况下，即地应力测试中未出现饼状岩芯（或典型的高应力卸荷破坏）的情况下，均属于峰前卸围压。

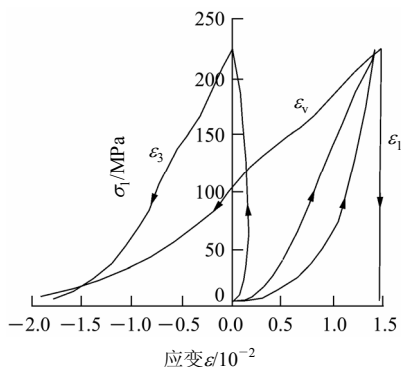


图4 典型试验峰前卸围压应力-应变全程曲线^[5]

Fig.4 Typical full stress-strain curves under unloading conditions before peak pressure^[5]

由图 4 可知：岩石在围压试验情况下卸荷，表现为轴向变形很小（微小），体积变形表现为明显的扩容（主要为侧向变形），变形大小为原来的 2~3 倍。因此卸载弹性模量（扩容弹性模量）通常为加载弹性模量的 1/3~1/2，但在具体工程中须进行三轴围压加、卸荷试验以确定加、卸荷模量的具体比值。

5 地应力测试弹性模量参数选取

黄登水电站可行性研究阶段开展了大量的地应力测试，主要包括 2 组河谷深孔地应力测量、5 组

岸坡空间应力场测量和 6 组岸坡平面应力场测量；测试中弹性模量的选取主要考虑了岩心围压试验成果、室内岩石压缩测试弹性模量、刚性承压板测试弹性模量、岩体（岩石声波测试）、试验芯样描述等因素；分析了岩石在测试弹性模量中的区别，建议根据声波测试确定岩石的裂隙密度，结合式(1)和图 2 对弹性模量进行分析；同时考虑到岩石、岩体力学性能的复杂、工程建设需要及多种试验成果综合分析提高成果的可靠性等各种因素，建议根据现场、室内试验测试得到的弹性模量及测试段岩芯宏观裂隙描述综合分析确定地应力弹性模量参数。

根据上述原因建立该水电站地应力测试弹性模量参数选取公式：

$$E = \eta \frac{\alpha(\overline{E}_1 + \overline{E}_2) + E_3}{3k} \quad (2)$$

式中： η 为试验芯样描述参数选定值（根据试验段岩芯的横向裂隙、纵向裂隙情况，取经验值得 0.8~1.0）； α 为围压调整系数（根据岩石围压试验确定，在黄登水电站建议取值区间为 1.8~2.2）； k 为扩容调整系数，建议取值 2.0~3.0； \overline{E}_1 为岩石段岩体相近岩体刚性承压板测试弹性模量均值（GPa）； \overline{E}_2 为室内岩石压缩测试弹性模量均值（GPa）； E_3 为测试段芯样围压测试弹性模量（GPa）。在试验条件有限的情况下，建议调整式(2)对弹性模量参数进行选取。

通过式(2)对黄登水电站可行性研究阶段的地应力弹性模量的选取，其选取值主要介于 20~50 GPa 之间，测试的岸坡平面应力、岸坡空间应力及河谷深孔地应力和理论分析及数值模拟基本一致。

若只考虑岩芯围岩试验测试弹性模量，在参数选取中须进行岩石卸荷变形试验，确定扩容调整系数 k ，按照下式计算地应力弹性模量参数：

$$E = \eta \frac{E_3}{k} \quad (3)$$

6 结 论

本文通过黄登水电站可行性研究阶段地应力测试中出现的问题，采用岩石损伤力学、高围压下岩体特性及卸荷岩体特性等理论进行了深入地分析研究，得出以下几点结论：

(1) 由于岩体内部裂隙压密闭合、和摩擦滑移作用，部分岩石（岩体）弹性模量与围压的大小呈正相关关系。在孔径法地应力测试弹性模量参数的测

试及选取中, 应充分考虑其重要性。

(2) 岩体(岩石)在卸荷状态下, 可出现明显的“扩容”。孔径法地应力测试过程是岩体卸载过程, 并伴随着机械振动, 势必会加大岩石(岩体)的“扩容”, 同时岩体中宏观的裂隙对应力测量的变形影响也较大; 因此, 在地应力测试中应按照一定比例调整弹性模量或变形。

(3) 在试验条件允许的情况下, 建议采用多种试验方案测试弹性模量, 再结合声波测试、芯样描述及相关理论分析, 综合判定弹性模量参数的选取, 提高测试成果的可靠性、准确性。

(4) 本文仅根据黄登水电站开展的地应力测试及相关试验, 结合相关理论及文献对地应力测试中的弹性模量及孔径法测试地应力的应力解除过程进行了深入的探讨, 并给出了黄登水电站坝址区应力测量弹性模量参数选取公式(式(2)); 但式(2)未经岩石围压试验、岩石损伤理论进行修订, 所以仅供参考和借鉴。

参考文献(References):

- [1] 国家地震局地质大队情报室. 地应力研究文集[M]. 北京: 地震出版社, 1984.(Geological Team of the State Seismological Bureau, Intelligence Unit. Research collection of stress[M]. Beijing: Earthquake Press, 1984.(in Chinese))
- [2] 刘允芳, 刘元坤. 围压试验在空心包体式应变计地应力测量中的作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3 932 - 3 937.(LIU Yunfang, LIU Yuankun. Function of confining pressure test on hollow inclusion triaxial strain gauge for geostress measurement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3 932 - 3 937.(in Chinese))
- [3] HARRISON J P, HUDSON J A. 工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.(HARRISON J P, HUDSON J A. Engineering rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2009.(in Chinese))
- [4] 赖 勇. 围压对杨氏模量的影响分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 246 - 249, 278.(LAI Yong. Effect analysis of confining pressure on Young's modulus[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Nature Science), 2009, 28(2): 246 - 249, 278.(in Chinese))
- [5] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 53 - 60.(YOU Mingqing. Effect of confining pressure on the Young's modulus of rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 53 - 60.(in Chinese))
- [6] HOLE E, BROWN E T. 岩石地下工程[M]. 连志升, 田良灿, 王维德等译. 北京: 冶金工业出版社, 1986.(HOLE E, BROWN E T. Underground excavation in rock[M]. Translated by LIAN Zhisheng, TIAN Liangcan, WANG Weide, et al. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1986.(in Chinese))
- [7] 张永兴. 岩石力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.(ZHANG Yongxing. Rock mechanics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.(in Chinese))
- [8] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [9] 张政辉, 蔡美峰. 岩石的卸荷力学特性及其对地应力测量的影响[J]. 矿冶, 2001, 10(3): 6 - 10.(ZHANG Zhenghui, CAI Meifeng. Mechanics properties of a rock in stress relief and their influences on in-situ stress measurement[J]. Mining and Metallurgy, 2001, 10(3): 6 - 10.(in Chinese))
- [10] 张黎明, 王在泉, 王建新, 等. 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.(ZHANG Liming, WANG Zaiquan, WANG Jianxin, et al. Experimental study on the rock behavior under unloading condition[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2006, 38(3): 34 - 37.(in Chinese))
- [11] 王明洋, 范鹏贤, 李文培. 岩石的劈裂和卸荷破坏机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 234 - 241.(WANG Mingyang, FAN Pengxian, LI Wenpei. Mechanism of splitting and unloading failure of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 234 - 241.(in Chinese))
- [12] 李宏哲, 夏才初, 徐崇帮, 等. 基于多级破坏方法确定岩石卸荷强度参数的试验方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 1): 2 681 - 2 686.(LI Hongzhe, XIA Caichu, XU Chongbang, et al. Experimental study of rock unloading strength parameters based on multiple failure method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 2 681 - 2 686.(in Chinese))
- [13] 哈秋龄. 加载岩体力学与卸荷岩体力学[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 114.(HA Qiuling. Loading and unloading rock masses mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 144.(in Chinese))
- [14] 谢红强, 何江达, 徐 进. 岩石卸荷变形特性及力学参数试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 336 - 338.(XIE Hongqiang, HE Jiangda, XU Jin. Deformation characteristics of rock under loading and unloading conditions and experimental study of mechanical parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 336 - 338.(in Chinese))
- [15] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.(YU Shouwen, FENG Xiqiao. Damage mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264 - 2001 水利水电工程岩石试验规程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL264 - 2001 Specification for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2001.(in Chinese))