

文章编号: 1006-6616 (2017) 04-0526-05

岩石非弹性应变恢复 (ASR) 地应力测试方法中柔度研究进展评述

马秀敏^{1,2,3}, 彭华^{1,2}, 白金朋⁴, 李振^{1,2}, 姜景捷^{1,2}

- (1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;
2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
3. 北京科技大学土木与资源学院, 北京 100083;
4. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

摘要: 本文通过分析国内外非弹性应变恢复 (ASR) 法地应力测量研究现状, 并对 ASR 法中重要的柔度参数作了系统整理, 认为该测量方法在理论上逐渐趋于成熟, 在技术应用上有广阔的前景, 但该地应力测量原理中, 针对温度、应力环境 (作用应力) 对 ASR 岩石柔度影响的研究相对较少, 还存在一些缺陷, 为此提出了该地应力测试方法有待改进或补充的建议, 为完善 ASR 法地应力测量原理指明了研究方向, 对今后 ASR 地应力测量技术的完善和发展具有重要的意义。

关键词: 岩石剪切变形柔度; 岩石体积变形柔度; 非弹性应变恢复; 地应力测量; ASR 柔度比
中图分类号: P554 **文献标识码:** A

0 引言

地应力是重大工程施工设计和地壳稳定性评价的重要参数之一, 已在隧道工程、引水工程、矿山工程、油气开采工程等工程领域中广泛应用^[1-3]。随着国民经济高速发展和国家重大需求, 国内科研院所相继开展了深部岩石力学基础理论和安全高效采矿技术研究。因此, 发展深部地应力测量技术, 获取深部、超深部地应力赋存状态, 为深部重大工程安全生产提供技术支撑, 成为未来地应力研究的重要方向。

近年来, 非弹性应变恢复 (ASR) 已成为深孔地应力测量技术方法之一, 并成功应用在地热能源开采、石油/天然气生产、深部科学钻孔地应力研究等领域。如: 德国 KTB 大陆科学钻探、日本地热田及海洋科学钻、台湾车笼埔断层深井钻探、中国汶川地震科学钻探等科学钻探项目均采

用 ASR 技术开展地应力研究工作^[4-17]。因此, ASR 法地应力测量在技术上逐渐趋于成熟, 但在理论计算过程中, 还存在一些问题需要作进一步讨论。

1 ASR 法地应力测试技术

上世纪六十年代, Voight 学者提出利用岩芯非弹性恢复数据确定三个主应力及其方位的方法。进入八十年代, 为了估算平面地应力状态, ASR 法得到发展, 但这种方法有两个假设: 第一是铅直应力作为主应力之一; 第二是岩石 ASR 柔度与作用应力无关^[18]。随后, 作为二维测量方法开展地应力测量工作, 并与水压致裂方位进行比对, 探讨 ASR 测试原理的合理性及其可靠性^[19-20]。

然而, 铅直应力并不总是一个主应力, 并且有证据显示 ASR 柔度依赖于平均正应力^[21]。因此, 在一般应力状态下任意方向非弹性应变恢复

收稿日期: 2017-01-20

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (YYWF201615); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160149)

作者简介: 马秀敏 (1978-), 男, 高级工程师, 主要从事地应力测量与监测、地壳稳定性调查评价等研究工作。E-mail: maxiumin2@163.com

通讯作者: 彭华 (1964-), 男, 研究员, 主要从事地应力、地壳稳定性评价、岩石力学等科研工作。E-mail: 13911661856@163.com

方程基础上, Matsuki 和 Matsuki Takeuchi 将 ASR 法发展成为三维地应力测量方法, 并利用拉普拉斯变换解中的相似原理^[19]和非弹性应变恢复柔度, 列出任意方向非弹性应变 $\varepsilon_a(t)$ 恢复方程如下^[22-23]:

$$\varepsilon_a(t) = \frac{1}{3} [(3l^2 - 1)\sigma_x + (3m^2 - 1)\sigma_y + (3n^2 - 1)\sigma_z + 6lm\tau_{xy} + 6mn\tau_{yz} + 6nl\tau_{zx}] (1) \times J_{as}(t) + (\sigma_m - P_0)J_{av}(t) + \alpha_T\Delta T(t)$$

公式 (1) 中: l, m, n 为任意方向上的方向余弦; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为应力张量的 6 个分量; $J_{as}(t), J_{av}(t)$ 为岩石在剪切和体积变形模式下的柔度; σ_m 为平均主应力; P_0 为孔隙压力; α_T 为线性热膨胀系数; $\Delta T(t)$ 为温度的变化量。

随后, Mastuki K 给出三维主应力大小计算公式^[9,24]:

$$\sigma_i = \frac{e_i(t)}{J_{as}(t)} + \frac{\{e_m(t) - \alpha_T\Delta T(t)\}}{J_{av}(t)} + P_0 \quad (2)$$

公式 (2) 中: $i = 1, 2, 3$; $e_i(t)$ 为主应变偏量; $e_m(t)$ 为平均正应变。由 ASR 法计算公式 (2) 可知, 岩石柔度是 ASR 法中一个重要参数。

周祖辉引入岩心弹性滞后应变恢复法, 并推导出岩心取出后随即测量其各个方向应变随时间恢复变化过程来计算水平主应力及主方向的一般计算公式, 提出了体积蠕变变形恢复量不容忽视^[25]。

高禄在前人研究工作的基础上, 开展了单轴应力条件下砂岩、花岗岩和大理岩样品非弹性应变恢复柔度实验研究, 构建了四元岩石流变开尔文模型 (Kelvin), 通过理论计算与实验测量确定上述三种岩石的非弹性应变恢复柔^[26]。

虽然 ASR 法研究取得了一定的进展, 但岩石柔度与应力环境、温度等参数的关系研究甚少, 还有诸多问题没弄清楚, 需要加强此方面的研究。

2 ASR 法中岩石柔度

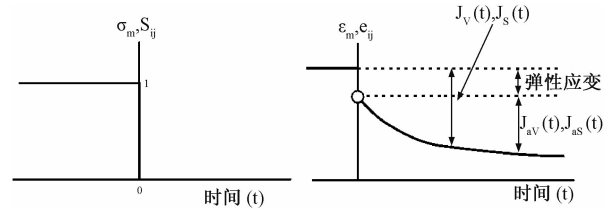
非弹性应变恢复计算公式 (1) 中涉及两个重要的参数, 即在剪切变形模式和体积变形模式下的非弹性应变恢复柔度, 分别用 $J_{as}(t)$ 和 $J_{av}(t)$ 表示, Matsuki and Lu Gao 等专家学者对其进行过一定的研究工作^[27-28]。

2.1 ASR 柔度定义

岩石是一种黏弹性体, 具有流变性。当岩石

施加单位载荷时, 岩石立即产生弹性变形, 然后产生蠕变。当单位载荷去掉时, 岩石变形立即发生弹性恢复, 而后, 随着时间的增加, 非弹性应变慢慢恢复 (见图 1)^[10,27]。

岩石的非弹性应变恢复柔度 (Anelastic Strain Recovery Compliances) 是 ASR 法地应力测量中将实测应变换算成原地应力大小的重要参数, 是岩石本身固有的依赖于时间效应的岩石力学参数之一, 即单位应力引起的随时间变化的非弹性恢复应变, 需要通过实验确定^[24]。



- σ_m —平均正应力; S_{ij} —应力偏量; ε_m —平均正应变; e_{ij} —应变偏量;
- $J_v(t)$ —平均正应变 (包括弹性应变) 恢复的时间函数;
- $J_s(t)$ —平均应变偏量 (包括弹性应变) 恢复的时间函数;
- $J_{av}(t)$ —一岩石在剪切变形模式下的柔度;
- $J_{as}(t)$ —一岩石在体积变形模式下的柔度

图 1 ASR 柔度的定义

Fig. 1 Definition of ASR compliance

当施加在各向同性黏弹性材料单位应力瞬间 ($t=0$) 解除时, 应变恢复随时间变化的应变曲线 (函数) 称为 ASR 柔度。ASR 柔度可分为两部分, 即剪切变形模式和体积变形模式, 分别用 $J_{as}(t)$ 和 $J_{av}(t)$ 表示。

2.2 非弹性应变恢复柔度 (Jas 和 Jav) 与应力环境 (作用应力) 关系研究

Mastuki K 指出流变常数依赖于作用应力, 已为岩石蠕变试验所证实。为了弄清非弹性应变恢复柔度随作用应力的变化情况, Mastuki K 对 Ogino 凝灰岩进行了单轴、三轴和静水压力下力学试验。试验结果表明: 剪切变形模式下非弹性应变恢复柔度 (J_{as}) 随围压的增加而增大; 体积变形模式下非弹性应变恢复柔度 (J_{av}) 随围压增加而减小, 故 J_{av} 随静水压力 P 的增加而减小。因此, 两种模式的 ASR 柔度 (J_{as} 和 J_{av}) 均与作用应力有关^[23]。但其关系如何? 还需进一步开展研究工作。

因此, 为了提高 ASR 法测试结果的可靠性, 必须对岩石的非弹性应变恢复柔度随作用应力的变化情况进行研究。但未能说明其对测试结果的

影响程度。Koji Matsuki 研究了 50% 单轴抗压强度单轴压缩条件下体积与剪切模式长期 ASR 柔度比率 $\gamma_f (J_{a2vt}/J_{a2st})$ ，建立了相应方程。

实验结果表明：平均正应力对 γ_f 比值的影响很明显，为了准确计算地应力，必须考虑平均正应力。但还需要增加各种岩石实验来建立一个更为可靠的方程。Lu Gao 通过单轴实验获得花岗岩、大理岩和砂岩 ASR 柔度比 γ_f 分别在 1.93 ~ 2.05、1.85 ~ 1.98 和 2.98 ~ 3.76 之间变化，证实了在 ASR 测试过程中，利用实验室 ASR 柔度比为 2 的估值是不正确的^[25,28]。

为此，应开展多种岩石进行单轴压缩条件 γ_f 比值实验，完善 γ_f 计算方程。

2.4 ASR 柔度与温度的关系

在实际 ASR 柔度测试工作中，温度是恒定的，此时测得的应变与温度无关。但不同温度水平上 ε^∞ （无限长时间下的滞弹性正应变）的 ASR 柔度参量是否不同，尚未见报导。在 ASR 法实际测量过程中，岩样常常来自深部，且温度水平不同，关于温度的影响程度如何，还需要进一步开展此项研究工作。

2.5 ASR 柔度与岩性的研究

Koji Matsuki, Lu Gao 通过单轴压缩试验 (50% 单轴抗压强度 (UCS))，开展了四单元模型下体积与剪切模式的 ASR 柔度研究，结果表明：凝灰岩、大理岩、砂岩和花岗岩均在两种模式下的 ASR 柔度增率会随时间迅速减小，并趋于常数，且 ASR 柔度随时间的增率与大小很大程度上依赖于岩石类型^[25-28]。但由于岩性种类较少、加载方式单一，不符合实际情况，在地质工程领域不具有代表性。

为了确定不同加载方式、多种岩性的 ASR 柔度 ($J_{as}(t)$ 、 $J_{av}(t)$) 及其对地应力测试结果影响，需要对岩石非弹性恢复柔度开展岩性影响方面的研究工作。

3 存在的问题

(1) 尽管两种模式的 ASR 柔度 (J_{as} 和 J_{av}) 均与作用应力有关，已被同行认可，但其对 ASR 柔度计算的影响程度不清楚。

(2) 虽然 ASR 柔度比率 $\gamma_f (J_{a2vt}/J_{a2st})$ 已初步建立了计算方程，但不具有代表性。

(3) 在实际 ASR 柔度测试工作中，温度影响常常被忽略，但在实际 ASR 测量过程中，岩样常常来自深部，温度较高，关于温度的影响如何，所读文献还未就此开展研究工作。

(4) 现有长期 ASR 柔度实验仅限于单轴实验，未对静水压力或三轴实验进行研究，不符合实际情况，且岩石类型少，在地质工程领域不具有代表性。

4 结论与展望

4.1 结论

针对上述问题，可在以下几个方面开展 ASR 岩石柔度实验研究：

(1) 除了在单轴压缩实验条件下，还可在静水压力、三轴压缩等实验条件下开展 ASR 岩石柔度实验研究，以期模拟真实工程应力环境。

(2) 开展不同岩石类型、不同加载方式的 ASR 岩石柔度实验研究。

(3) 开展不同应力环境、不同温度条件下的 ASR 岩石柔度实验研究。

(4) 综合研究分析不同工况下 ASR 岩石柔度，建立具有代表性的 ASR 柔度比率 $\gamma_f (J_{a2vt}/J_{a2st})$ ，初步建立计算方程。

通过对以上几个方面岩石 ASR 柔度实验研究，可完善 ASR 地应力测量技术原理，填补材料力学中弹性后效研究理论空白。

4.2 展望

本文系统总结了国内外岩石非弹性应变恢复柔度研究进展，介绍了典型的相关研究成果，并针对研究尚存的问题和不足，建议通过开展 ASR 岩石柔度试验研究工作，建立非弹性应变恢复柔度确定方法，对完善 ASR 法地应力测量技术，具有重要的意义。

由于该项目研究国内外研究相对较少，获取相关文献、论著有限，另外，由于获取信息渠道受限必然存在疏漏之处，因此，本研究在短期内未必能够全面概括研究进展，若还有相关文献没有引用，敬请谅解。

致谢 在此感谢中国地质科学院地质力学研究所 **王连捷** 研究员对本文的拟定给予指导和深入探讨。

参考文献/References

- [1] 王连捷, 孙宝珊, 王薇, 等. 地应力对油气运移的驱动作用 [J]. 地质力学学报, 2011, 17 (2): 132 ~ 143.
WANG Lianjie, SUN Baoshan, WANG Wei, et al. Driving effect of the crustal stress on petroleum migration [J]. Journal of Geomechanics, 2011, 17 (2): 132 ~ 143.
- [2] 马秀敏, 彭华, 李金锁. 新疆西部地应力测量在隧道工程中的应用 [J]. 地质力学学报, 2005, 11 (4): 386 ~ 393.
MA Xiumin, PENG Hua, LI Jinsuo. Application of hydraulic fracturing in-situ stress measurements in tunnelling in western Xinjiang [J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11 (4): 386 ~ 393.
- [3] 彭华, 崔巍, 马秀敏, 等. 南水北调西线第一期工程调水区水压致裂地应力测量及其工程意义 [J]. 地质力学学报, 2006, 12 (2): 182 ~ 190.
PENG Hua, CUI Wei, MA Xiumin, et al. Hydrofracturing in-situ stress measurements of the water diversion area in the first stage of the south-north water diversion project (Western Line) [J]. Journal of Geomechanics, 2006, 12 (2): 182 ~ 190.
- [4] Wolter K E, Berckhemer H. Time dependent strain recovery of cores from the KTB-deep drill hole [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1989, 22 (4): 273 ~ 287.
- [5] Wolter K E, Berckhemer H. Estimation of in situ stresses by evaluation of time-dependent strain recovery of KTB drill cores [J]. Tectonophysics, 1990, 178 (2/4): 255 ~ 257.
- [6] Sayers C M. Orientation of microcracks formed in rocks during strain relaxation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1990, 27 (5): 437 ~ 439.
- [7] Zang A, Berckhemer H. Classification of crystalline drill cores from the KTB deep well based on strain, velocity and fracture measurements [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30 (4): 331 ~ 342.
- [8] Zang A, Lienert M, Zinke J, et al. Residual strain, wave speed and crack analysis of crystalline cores from the KTB-VB well [J]. Tectonophysics, 1996, 263 (1/4): 219 ~ 234.
- [9] Lin W R, Kwasniewski M, Imamura T, et al. Determination of three-dimensional in situ stresses from anelastic strain recovery measurement of cores at great depth [J]. Tectonophysics, 2006, 426 (1/2): 221 ~ 238.
- [10] 王连捷, 孙东生, 林为人, 等. 地应力测量的非弹性应变恢复法及应用实例 [J]. 地球物理学报, 2012, 55 (5): 1674 ~ 1681.
WANG Lianjie, SUN Dongsheng, LIN Weiren, et al. Anelastic strain recovery method to determine in-situ stress and application example [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55 (5): 1674 ~ 1681.
- [11] Yamamoto Y, Lin W R, Oda H, et al. Stress states at the subduction input site, Nankai Subduction Zone, using anelastic strain recovery (ASR) data in the basement basalt and overlying sediments [J]. Tectonophysics, 2013, 600: 91 ~ 98.
- [12] 孙东生, LIN Weiren, 崔军文, 等. 非弹性应变恢复法三维地应力测量——汶川地震科学钻孔中的应用 [J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44 (3): 510 ~ 518.
SUN Dongsheng, LIN Weiren, CUI Junwen, et al. Three-dimensional *in situ* stress determination by anelastic strain recovery and its application at the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Hole-1 (WFSD-1) [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57 (6): 1212 ~ 1220.
- [13] 孙东生, 林为人, 王连捷, 等. 汶川地震断裂带科学钻一号孔 ASR 法地应力测量 [J]. 中国地质, 2013, 40 (3): 840 ~ 845.
SUN Dongsheng, LIN Weiren, WANG Lianjie, et al. In-situ stress measurement by the anelastic strain recovery method in WFSD-1 [J]. Geology in China, 2013, 40 (3): 840 ~ 845.
- [14] 崔军文, 李宗凡, 王连捷, 等. 汶川地震断裂带科学钻探 1 号井 (WFSD-1) 非弹性应变恢复法 (ASR 法) 三维地应力测试与“5.12”汶川地震的形成机制 [J]. 岩石学报, 2013, 29 (6): 2033 ~ 2047.
CUI Junwen, LI Zongfan, WANG Lianjie, et al. Determination of three-dimensional in situ stresses from anelastic strain recovery (ASR) of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1) and formation mechanism of the “5.12” Wenchuan earthquake [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29 (6): 2033 ~ 2047.
- [15] Nagano Y, Lin W R, Yamamoto K. In-situ stress analysis using the anelastic strain recovery (ASR) method at the first offshore gas production test site in the eastern Nankai Trough, Japan [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 66: 418 ~ 424.
- [16] Cui J W, Lin W R, Wang L J, et al. Determination of three-dimensional in situ stresses by anelastic strain recovery in Wenchuan earthquake fault scientific drilling project hole-1 (WFSD-1) [J]. Tectonophysics, 2014, 619 ~ 620: 123 ~ 132.
- [17] Lin W R. A core-based method to determine three-dimensional in-situ stress in deep drilling wells: anelastic strain recovery technique [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (12): 2387 ~ 2394.
- [18] Teufel L W. Prediction of hydraulic fracture azimuth from anelastic strain recovery measurements of oriented core [A]. Proceedings of the 23rd U. S. Symposium on Rock Mechanics [C]. Berkeley: American Rock Mechanics Association, 1982, 25 ~ 27, 238 ~ 245.
- [19] Teufel L W, Warpinski N R. Determination of in situ stress from an elastic strain recovery measurements of oriented core: comparison to hydraulic fracture stress measurements in the Rollins Sandstone, Piceance Basin, Colorado [A]. Proceedings of the 25th U. S. Symposium on Rock Mechanics [C]. Evanston, Illinois: American Rock Mechanics Association, 1984, 176 ~ 185.
- [20] Teufel L W. Acoustic emissions during anelastic strain recovery of cores from deep boreholes [A]. Proceedings of the 30th U.

- S. Symposium on Rock Mechanics [C]. Morgantown, West Virginia: American Rock Mechanics Association, 1989, : 269 ~ 276.
- [21] Matsuki K. Three-dimensional in-situ stress measurement with anelastic strain recovery of a rock core [A]. Proceedings of the 7th ISRM Congress [C]. Aachen, Germany: International Society for Rock Mechanics, 1991, 557 ~ 560.
- [22] Flügge W, Kelkar V S. The problem of an elastic circular cylinder [J]. International Journal of Solids and Structures, 1968, 4 (4): 397 ~ 420.
- [23] Matsuki K. 用岩芯的滞弹性应变恢复测量三维地应力 [J]. 徐平, 译. 人民长江, 1992, 23 (9): 51 ~ 55.
Matsuki K. In-situ stress measurement by the anelastic strain recovery method [J]. XU Ping, Trans. Yangtze River, 1992, 23 (9): 51 ~ 55.
- [24] Matsuki K, Takeuchi K. Three-dimensional in situ stress determination by anelastic strain recovery of a rock core [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30 (7): 1019 ~ 1022.
- [25] 周祖辉. 用岩芯滞弹性应变恢复法测非线性流变地层的原地应力 [J]. 石油钻采工艺, 1990, 12 (1): 1 ~ 6, 90.
ZHOU Zuhui. In situ stress measurement of nonlinear rheological formation by anelastic strain recovery method [J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 1990, 12 (1): 1 ~ 6, 90.
- [26] 高禄, 田甲, 刘晓龙. 岩石非弹性应变恢复柔量实验研究 [EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线, [2014-07-21]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201407-247>.
GAO Lu, TIAN Jia, LIU Xiaolong. Experimental study of rock anelastic strain recovery compliances [EB/OL]. : Sciencepaper Online, Beijing, [2014-07-21]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201407~247>.
- [27] Matsuki K. Anelastic strain recovery compliance of rocks and its application to in situ stress measurement [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45 (6): 952 ~ 965.
- [28] Gao L, Lin W R, Sun D S, et al. Experimental anelastic strain recovery compliance of three typical rocks [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47 (6): 1987 ~ 1995.

REVIEW ON THE RESEARCH PROGRESS OF THE COMPLIANCE OF ROCKS IN IN-SITU STRESS MEASUREMENT METHODS OF ANELASTIC STRAIN RECOVERY (ASR)

MA Xiumin^{1,2,3}, PENG Hua^{1,2}, BAI Jinpeng⁴, LI Zhen^{1,2}, JIANG Jingjie^{1,2}

(1. Key Lab of Neotectonic Movement and Geohazards, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

3. College of civil and resource engineering, University of Science & Technology, Beijing 100083, China;

4. Beijing engineering corporation limited, Power Construction Corporation of China Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: In this article, through the analysis of the research progress on in-situ stress measurement of Anelastic Strain Recovery (ASR) method at domestic and abroad and the systemic review of the compliance parameters of ASR method, it is believed that ASR method is mature in theory and has broad prospect in application. In the measurement principle, however, few studies on the influence of temperature and stress environment (stress) on the ASR compliance of rocks have been done. To this end, the suggestions on the improvement or supplement of ASR method are proposed, which point out the direction of the improvement of the measurement principles and has great importance to the development of the ASR in-situ stress method.

Key words: rock deformation compliance in shear mode; rock deformation compliance in volumetric mode; Anelastic Strain Recovery; In-situ stress measurement; ratio of ASR compliance