

汶川地震断裂带科学钻一号孔 ASR 法地应力测量

孙东生¹ 林为人² 王连捷¹ 崔军文³ 王 薇¹ 黄 尧⁴

(1.国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室;中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;2.Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Nankoku, 783-8502, Japan;3.大陆构造和动力学国家重点实验室,中国地质科学院地质研究所,北京,100037;
4.江苏省地矿局第六地质大队六队,江苏 东海 222341)

摘要:大地震后发震断裂附近的应力状态是认识和理解地震机理的重要参数。5.12 汶川地震后,我国开展了基于地震机理研究的汶川地震断裂带科学钻探项目(Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project,简称 WFSD),为研究震后龙门山断裂带附近深部应力状态提供了条件。本文主要介绍适合深部应力测量的非弹性应变恢复法(Anelastic strain recovery method,简称 ASR 法)的测试设备和流程,并利用 ASR 法对 WFSD-1 号钻孔岩心进行了原地应力测量,取得了该钻孔 424~1173 m 深度范围内 7 个岩心样品的非弹性应变恢复实测数据,并根据成像测井对岩心进行了定向,确定了原地应力方向,估算了原地应力的的大小。WFSD-1 钻孔最大主应力的方位为 NW69°~NW35°,主应力的的大小随深度的增加而增大。

关键词:汶川地震断裂带科学钻探;地应力;非弹性恢复法;测量仪器及流程

中图分类号:P634 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)03-0840-06

地应力作为诱发地震的直接驱动力之一,是以地震机理研究为目的科学钻探计划的主要研究对象^[1-5]。5.12 汶川大地震后,为认识和理解汶川大地震的孕育机理、动力学过程、地表破裂及地震周期等特征,中国开展了基于地震机理研究的汶川地震断裂带科学钻探项目(Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project,简称 WFSD)^[6]。本文主要介绍适合深部应力测量的非弹性应变恢复法(Anelastic strain recovery method,简称 ASR 法)的测试设备和流程^[7-8],并利用 ASR 法对 WFSD-1 号钻孔岩心进行了原地应力测量,取得了该钻孔 424~1173 m 深度范围内 7 个岩心样品的非弹性应变恢复实测数据,并根据成像测井对岩心进行了定向,最后计算了原地应力方向,估算了原地应力的的大小。

1 ASR 测量方法

存在于地壳岩体内的应力可通过多种直接或间接的方法测量^[9-11]。ASR 法是近年来发展起来的基于定向岩心的深孔地应力测量方法,与其他岩心法地应力测量相比,ASR 法为半原位的地应力测试方法(虽不在钻孔中直接测量,岩心取出后保持原位状态即开始测量),具有较完善的理论基础,并在油气田地应力测量及以地震、构造活动等科学研究为目的的钻孔中得到了广泛应用^[12-18]。

岩石是一种黏弹性体,具有流变性^[19]。岩心被钻取后,即脱离应力场的作用,岩心除了立即发生弹性应变恢复以外,还随时间发生非弹性(滞弹性)应变恢复。岩石的非弹性应变恢复量与卸载之前所处的

收稿日期:2013-02-20;改回日期:2013-05-02

基金项目:国家科技支撑——汶川地震断裂带科学钻探井中探测项目(2008wfsd-03),日本学术振兴会(JSPS)基金(基盘 B 海外-22403008)共同资助。

作者简介:孙东生,男,1980 年生,助理研究员,从事地应力测量、岩石力学实验及数值分析等研究;E-mail:donghengsun@189.cn。

应力状态有关,因而可以由岩心的非弹性恢复量反推岩心原来所处环境的地应力状态。岩石卸荷后的非弹性应变与原地应力之间的关系如式(1)^[17]:

$$\varepsilon_o(t) = \frac{1}{3} \left[\begin{aligned} &(3l^2 - 1)\sigma_x + (3m^2 - 1)\sigma_y + (3n^2 - 1)\sigma_z \\ &+ 6lm\tau_{xy} + 6mn\tau_{yz} + 6nl\tau_{zx} \end{aligned} \right] \quad (1)$$

$$\times J_{as}(t) + (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha_T \Delta T(t)$$

其中 l, m, n 为应变轴的方向余弦, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为应力张量分量, σ_m 为平均正应力, P_0 为孔隙压力, α_T 为线性热膨胀系数, $\Delta T(t)$ 为测量期间温度变化, $J_{as}(t)$ 和 $J_{av}(t)$ 分别为剪切和体积变形模式的非弹性应变恢复柔量。由非弹性恢复观测量计算三维主应力的值,可通过式(2)进行^[17]:

$$\sigma_i = e_i(t) / J_{as}(t) + \{e_m(t) - \sigma_T \Delta T(t)\} / J_{av}(t) + P_0$$

$$i=1, 2, 3 \quad (2)$$

其中 $e_i(t)$ 为非弹性偏应变, $e_m(t)$ 为平均正应变。

2 ASR 法测量仪器

如上所述,ASR 法是根据测量岩心卸荷后的非弹性应变,进而反演岩心所处的原地应力状态。从地下深处钻取的岩心,其弹性应变在钻取瞬间恢复,进而非弹性应变开始恢复。因此进行 ASR 法地应力测量的一个重要条件是要在钻井现场建立测量实验室,岩心从钻孔提取后需尽快开始测量,这样才能尽可能多地获取岩心卸荷后的非弹性恢复应变。

图 1 为现场进行岩心 ASR 法地应力测量所需的测试设备,主要包括用于采集应变数据应变仪和外接扫描箱(a 和 b)、天平(c)、UPS 电源(d)、恒温

水浴循环控制器(e)、水箱和变压器(f 和 g)。

一般来说岩心卸荷后非弹性应变恢复量比弹性应变恢复量要小得多,所以 ASR 法对测量精度要求较高。此外,非弹性应变恢复要持续 7~10 d,所以测量设备仪器的长期稳定性也非常重要。在测量过程中,应变仪和扫描箱组成的应变记录仪,要求可同时进行多个样品的非弹性应变恢复测量(一般要同时测 3 个样品,或更多),以满足正常连续测量工作。不间断电源(UPS)的主要作用是保证现场实验室电源不稳定的情况下,仍可不间断地进行测量。由于岩心的非弹性恢复应变受环境温度和含水状态的影响,因此由恒温水浴循环控制器和水箱组成的恒温控制系统,可保证密封的岩心样品处于恒温状态(温度变化范围在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内),这样可消除温度的影响(水浴槽的温度不需与钻孔中的温度一致,只需保持样品在测量过程中不变^[7,17])。由于现场实验条件的限制,在测量过程中易出现停电等事故,为保证测试结果的可靠性,测量中采用均质各向同性的样品作为标准样品,以监测温度波动的影响。

3 ASR 法地应力测量过程

一般 ASR 测试的起始深度为 300~500 m,每隔 50~100 m 采取 1 个样品进行测试,但由于施工和样品破碎等原因,WFSD-1 钻孔共获得了 7 个有效样品的测量数据。ASR 法地应力测量现场操作的具体流程如下:

(1)样品的选取及黏贴应变片

样品长度在 10~20 cm、均质且各向同性(肉眼



图 1 ASR 法地应力测试设备
Fig.1 Test equipment of ASR method



图2 粘贴应变片后的岩心
Fig.2 Rock core with strain gauges

观察)又具有足够硬度的岩心进行 ASR 测试,为保证岩心卸荷后尽快开始测量应尽量选择靠近同一回次底部的岩心作为测试样品。取得样品后对岩心进行清洗、擦干、照相及初步描述后,确定样品的 ASR 基线,施画应变片的黏贴标线,应变片在标线上的黏贴位置上下可以移动(应变片的具体黏贴位置尽量避开裂纹、脉体等),但应变片的中心点必须位于标线上,贴应变片时保证应变片与岩心表面完全接触,应变片与岩心之间避免气泡。图2为黏贴应变片的岩心样品。

(2)样品的密封

黏贴好应变片的样品首先需要对应变片的导线进行固定,然后将贴好应变片的样品装入塑料袋内,并密封塑料袋口,然后把包好的样品放置于铝箔袋内,再将铝箔袋口密封,防止水进入样品和防止样品含水量发生变化。对密封好的样品进行称重后放于恒温水箱内,将应变片的导线连接到应变仪或扫描

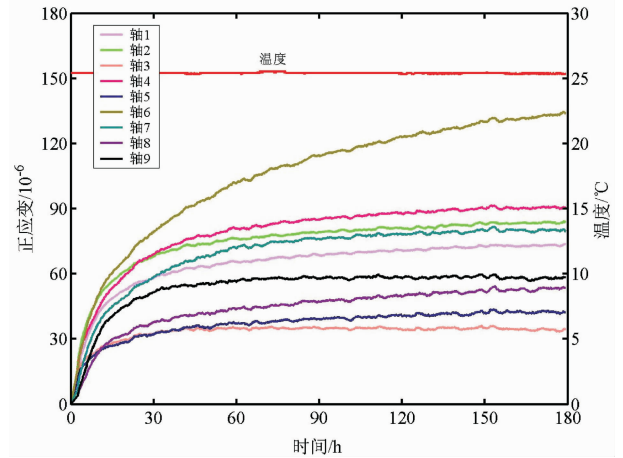


图3 非弹性应变恢复曲线图
Fig.3 Anelastic strain recovery curves

箱,连接好后即开始数据采集工作。一般每个样品连续记录1至2周时间,测试结束后,将样品从恒温水箱中取出并再次称重,根据测试前后的重量检查样品的密封情况,如测试后的重量明显大于测试前的重量,则表明密封失败,有水进入样品,实验数据可能无效。同时检查测试后样品表面应变片是否完好,有无脱落等。

4 ASR 法原地应力测量结果

根据样品的非弹性恢复应变数据、岩心定向数据,非弹性应变恢复柔量比值为2的假设($Jas(t)/Jav(t)=2$),可计算原地应力的大小和方向^[7,8]。岩心定向是通过岩心扫描图像及成像测井井壁图像进行对比,确定岩心上 ASR 基线的方向。图3为现场实测得到典型岩心卸荷后的非弹性应变恢复曲线(深度

表1 WFSD-1孔 ASR 法原地应力测试结果
Table 1 Magnitude and azimuths of in-situ stress by ASR method at WFSD-1

样品编号	样品深度/m	岩性	σ_1			σ_2			σ_3		
			大小/MPa	方位/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	大小/MPa	方位/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	大小/MPa	方位/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$
No.2	424	震旦系变质火山碎屑岩	10.8	321	-57	10.4	316	33	6	48	2
No.4	526	震旦系变质火山岩	16.7	316	4	13.8	46	7	13.2	191	83
No.5	569	三叠系长石砂岩	21.5	325	7	17.2	60	34	12.8	224	55
No.7	682	三叠系炭质粉砂岩	20.5	291	50	15.1	136	37	6.9	36	13
No.8	760	三叠系上统砂岩	25.2	314	33	21.5	217	11	18.5	110	55
No.14	1109	三叠系长石石英砂岩	38.3	298	38	23.3	132	51	21.8	34	7
No.15	1173	三叠系长石砂岩	45.7	296	26	29.4	188	33	26	56	46

注: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为最大、中间和最小主应力。

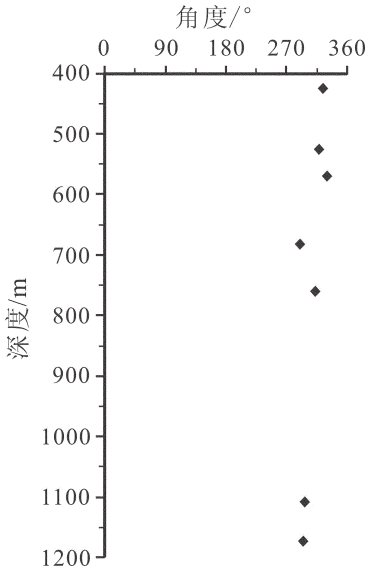


图 4 WFSD-1 主应力方向随深度变化

Fig.4 Azimuths of principal stress change with depth of WFSD-1

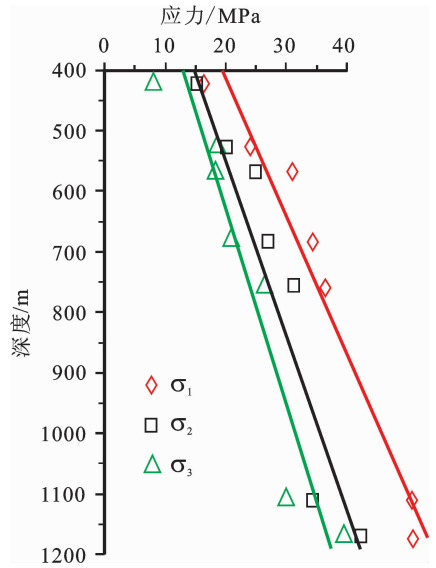


图 5 WFSD-1 主应力大小随深度变化

Fig.5 Magnitude of principal stress changes with depth of WFSD-1

760 m),从曲线可以看出,测量期间温度控制很好,变化范围在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,9个应变轴(图3)均发生了非弹性应变恢复,且应变数据变化平稳无明显波动。测量初期(72小时内)应变数据增加较快,72小时后应变增加变缓并趋于稳定。

利用现场实测岩心卸荷后的非弹性恢复应变,计算得到 WFSD-1 号钻孔 424-1173 m 深度范围内 7 个测点的原地应力方向,估算了原地应力大小(表 1)。从表中可以看出,最大主应力方向集中在 NW35~NW69°之间(图 4)。主应力的大小随着深度变化曲线(图 5, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为最大、中间和最小主应力)显示主应力大小随深度基本呈线性增加。

5 结论及认识

(1) 应用 ASR 法获取了 WFSD-1 钻孔 424~1173 m 深度范围内原地应力方向和大小。WFSD-1 钻孔最大主应力方向集中在 NW35~NW69°,最大主应力方向与龙门山断裂带呈大角度相交,可使该断裂带产生逆冲兼走滑运动,与汶川 5.12 地震断裂带运动基本一致。且随着深度的增加,地应力大小随深度近于线性增加。

(2) 测量结果表明,ASR 法地应力测量可获取深部较可靠的原地应力状态,预期 ASR 原地应力测量方法将在科学钻探、油气田开发及深部矿山开采等领域有广泛的应用前景。

参考文献(References):

- [1] Bohnhoff M, Baisch S, Harjes H P. Fault mechanisms of induced seismicity at the superdeep German Continental Deep Drilling Program (KTDB) borehole and their relation to fault structure and stress field [J]. *J Geophys. Res.*, 2004, 109, B02309, doi:10.1029/2003JB002528.
- [2] Hickman S, Zoback M. Stress orientations and magnitudes in the SAFOD pilot hole [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31, L15S12, doi: 10.1029/2004GL020043.
- [3] Wu H Y, Ma K F, Zoback M, et al. Stress orientations of Taiwan Chelungpu -Fault Drilling Project (TCDFP) hole -A as observed from geophysical logs [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, 34, L01303, doi:10.1029/2006GL028050.
- [4] Yamashita F, Fukuyama E, Omura K. Estimation of fault strength: reconstruction of stress before the 1995 Kobe earthquake [J]. *Science*, 2004, 306:261-263.
- [5] Lin W, et al. Present-day principal horizontal stress orientations in the Kumano forearc basin of the southwest Japan subduction zone determined from IODP NanTroSEIZE drilling Site C0009 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, 37, L13303, doi:10.1029/2010GL043158.
- [6] Li H, Wang H, Xu Z, et al. Characteristics of the fault-related rocks, fault zones and the principal slip zone in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1) [J]. *Tectonophysics*, 2012, http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.021.
- [7] 林为人. 基于岩心非弹性应变恢复量测定的深孔三维地应力测试

- 方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12):2387-2394.
- Lin Weiren. A core-based method to determined 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 (in English with Chinese abstract).
- [8] 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 (in Chinese with English abstract).
- [9] Zang A, Stephansson O. Stress field of the earth's crust. Springer, London. 2010, 115-193.
- [10] 王连捷, 李朋武, 崔军文, 等. 中国大陆科学钻探主孔声发射法现今地应力状态的确定[J]. 中国地质, 2005, 32(2):259-264.
- Wang Lianjie, Li Pengwu, Cui Junwen, et al. Determination of the present crustal stress state by using acoustic emission in the main borehole of the Chinese Continental Scientific Drilling[J]. Geology in China, 2005, 32(2):259-264 (in Chinese with English abstract).
- [11] 孙东生, 王连捷, 赵卫华, 等. 地应力测量在煤与瓦斯突出灾害研究中的应用[J]. 中国地质, 2010, 37(1):223-228
- Sun Dongsheng, Wang Lianjie, Zhao Weihua, et al. The application of in-situ stress measurement to the study of coal and gas outburst in coal mines[J]. Geology in China, 2010, 37(1):223-228 (in Chinese with English abstract).
- [12] Voight B. Determination of the virgin state of stress in the vicinity of a borehole from measurements of a partial anelastic strain tensor in drill cores [J]. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, 1968, 6: 201-215.
- [13] Engelder T. The time-dependent strain relaxation of Algeria granite[J]. Int. J. Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1984, 21(2): 63-73.
- [14] Warpinski NR, Teufel LW. In-situ stresses in low permeability, nonmarine rocks[J]. J. Pet. Tech., 1989, 41:405-414.
- [15] Perreau PJ, Heugas O, Santarelli F J. Tests of ASR, DSCA, and core discing analyses to evaluate in-situ stresses. SPE paper 17960, SPE Middle East Oil Technical Conference and Exhibition Manama, Bahrain, 1989, 325-336
- [16] Lin W. et al., Current Stress State and Principal Stress Rotations in the Vicinity of the Chelungpu Fault Induced by the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake [J]. Geophys. Res. Lett., 2007, 34, L16307, doi: 10.1029/2007GL030515.
- [17] Lin W, 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.
- [18] Byrne T B, W Lin A. Tsutsumi, et al. Anelastic strain recovery reveals extension across SW Japan subduction zone [J]. Geophys. Res. Lett., 2009, 36, L23310, doi:10.1029/2009GL040749.
- [19] J C 耶格, N G W 库克(著). 中国科学院工程力学研究所(译). 岩石力学基础[M]. 北京:地震出版社, 1981:382-397.
- Jaeger J C, Cook N G W. Fundamentals of rock mechanics[M]. Institute of Engineering Mechanics, Chinese Academy of Sciences (Translated). Beijing: Seismological Press, 1981:382-397 (in Chinese with English abstract).

In-situ stress measurement by the anelastic strain recovery method in WFSD-1

SUN Dong-sheng¹, LIN Wei-ren²,
WANG Lian-jie¹, CUI Jun-wen³, WANG Wei¹, HUANG Yao⁴

(1. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources; Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Nankoku, 783-8502, Japan; 3. State key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. No. 6 Geological Party, Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources, Donghai 222341, Jiangsu, China)

Abstract: The in-situ stress state of seismogenic fault after a strong earthquake is one of the important parameters for understanding the mechanism of the earthquake. The Wenchuan earthquake Fault Scientific Drilling project (WFSD) is a rapid response to the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, which provided the test rock core for recognizing the stress state of the depth of Longmenshan fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau. This paper focuses on the measuring instruments and processes of the anelastic strain recovery method (ASR) for the deep in-situ stress measurement. The anelastic recovery strains of seven different deep cores are in the range of 424–1173m in WFSD-1. The direction and magnitude of principal stress were determined and estimated, respectively. The dominant azimuths of maximum principal stress are between NW69° and NW35°, and the magnitude of principal stress increases with the increasing depth.

Key words: Wenchuan Fault Scientific Drilling (WFSD); in situ stress; anelastic strain recovery method (ASR); measuring instruments and processes

About the first author: SUN Dong-sheng, male, born in 1980, assistant researcher, engages in the study of in-situ stress measurement, rock mechanics test and numerical analysis; E-mail: dongshengsun@189.cn.