

利用岩芯变形测定原始地应力

陈 渠^{1,2,3}, 许 江², 周德培¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 3. 崇城大学 工学部, 日本 熊本 860-0082)

摘 要: 探讨了利用测量岩芯的直径变形来测定地应力的一种新方法——岩芯变形法, 通过预备实验和实际测定确认了岩芯变形法的适用性. 预备实验的测定结果表明, 平面内的主应力方向和主应力差之值均与所施加的载荷相一致, 水压致裂采取到的岩芯的测定结果也表明两种方法的结果相吻合. 探讨了岩石的微观裂隙、超声波速度与岩芯变形之间的关系. 岩芯变形法不需要对岩芯进行整形, 并且在非破坏状态下测定, 对各种岩石均适用, 为原始地应力测定提供了一种新的方法和途径.

关键词: 岩芯变形法; 原始地应力测定; 微观裂隙

中图分类号: TU459.4 **文献标识码:** A

The method of in-situ stress measurement by boring core deformation

CHEN Qu^{1,2,3}, XU Jiang², ZHOU De-pei¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Key Lab. for Exploitation of Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Faculty of Engineering, Sojo University, Kumamoto 860-0082, Japan)

Abstract: Probed into a new method to measure in-situ stress——core deformation method, which depends on measuring the variation of core diameter. Assured its serviceability through the preparatory experiment and the actual measurement. The results show that the principal stress value and the principal stress direction in plane correspond with the loading. Moreover, investigated the relation among the P wave velocity, the micro-crack in rock with the variation of core diameter. The core deformation method supplies the in-situ stress measurement with a new method, Because it doesn't need to arrange the core and it can apply to a variety of stones under un-failure.

Key words: core deformation method; in-situ stress measurement; micro-crack

在矿山、交通、能源及水利水电等各类工程的建设中, 岩体原始地应力的测量起着非常重要的作用, 既是工程地质勘测的基础资料, 也是科学优化工程设计不可缺少的依据.

原始地应力的测定方法主要分为2类: ①在钻孔内实施的现场测试法, 如应力解除法、水压致裂法等^[1,2]. ②利用岩芯在实验室测试的岩芯法, 如AE(acoustic emission, 声发射)法、ASR(anelastic strain recover, 非弹性应变回复)法等^[3,4]. 与现场测试法相比, 岩芯法测试更加方便, 且测试费用也较低, 能取得岩芯, 不受测量深度的限制, 因此岩芯法得到广泛的研究与应用. 但对于各种岩芯法, 无论在理论研究上还是在测试方法方面都还存在不足, 加之原始地应力测定自身的复杂性, 很难认为哪种方法就具有决定的意义. 另一方面, 随着今后对深部原始地应力测量需求的增加, 作为与现场测试法并存的测量

方法,同时也为了抑制水压致裂法和应力解除法的高成本测量,岩芯法的应用将会更加广泛。

本文就一种新的岩芯测量法——岩芯变形法^[5]——的适用性进行了较为全面的探讨。该方法通过测量岩芯的扁平度来确定钻孔平面内的原始地应力的主应力方向和主应力差的大小,不需要对岩芯整形即可进行测量,测量后其试件可用于其它岩芯法试验用。为原始地应力测定提供了一种新的方法和途径。

1 岩芯变形法的基本假设和原理

钻取岩芯后,岩芯在原位置受到的地应力被解除,假设:

① 钻取的岩芯是直径为 d_0 的真圆;② 岩芯在应力解除后将产生弹性变形,其变形量与所解除的应力成正比。基于上述假设,建立如图1所示的平面应变条件下应力解除时岩芯的变形模式。在与钻孔轴直交的平面内,主应力 σ_1 和 σ_2 (压缩为正, $\sigma_1 > \sigma_2$) 解除后,主应变 ε_1 和 ε_2 可表示为

$$\varepsilon_1 = (\sigma_1 - \nu\sigma_2)/E = (d_1 - d_0)/d_0, \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = (\sigma_2 - \nu\sigma_1)/E = (d_2 - d_0)/d_0, \quad (2)$$

式中, E , ν 分别为岩石的弹性系数和泊松比; d_1 , d_2 分别为两个主应力方向上岩芯产生弹性变形后的直径。

取式(1), (2) 两边的差可得 $\sigma_1 - \sigma_2 = (d_1 - d_2)E/d_0(1 + \nu)$, 由于应力解除后岩芯的变形量非常小, 可以取 $d_0 = d_2$, 即

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (d_1 - d_2)E/d_2(1 + \nu). \quad (3)$$

由此即可通过测量岩芯的扁平度, 获取岩芯的最大、最小直径, 从而求得钻孔平面内的主应力差 $\sigma_1 - \sigma_2$, 而最大、最小直径方向即是平面内的最大、最小主应力方向。

本方法从原理上讲可以认为是将岩芯自身作为一种传感器的应力解除法, 从这个意义上讲, 也可以认为与葛修润院士最近提出的钻孔局部壁面应力全解除法具有同样的机理^[6]。岩芯变形法不需对岩芯整形, 对岩芯直径也无制约, 比较短的岩芯也可进行测量, 同时由于测量时对岩芯完全无损伤, 因此可与其它岩芯测量法并行使用来评价地应力。

2 试验方法及预备试验结果

2.1 直径的测量方法

岩芯的直径测量精度是本方法的关键所在, 因此要求测定器具有很高的精度和分辨率, 同时要尽可能减少由于人为因素带来的测定误差。这里采用日本 Keyence 公司的 LS-3060 激光测定器来测量, 其最大测量直径为 60 mm, 测量精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以下, 分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$ 。测量装置如图2所示, 发光部射出的平行激光线, 照射到被测物体, 受光部检知由被测物体遮挡的部分从而测量岩芯外径。测量时, 将岩芯置于一个可以沿圆周方向自由旋转的平台上, 使岩芯按所要求的角度转动从而测量其直径。

为了确认测定器的适用性, 用1根公称直径为 $\phi 30 \text{ mm}$ 的不锈钢棒进行了检测。分8个断面, 每断面间隔 45° 测量, 平均直径为 29.9794 mm , 标准偏差为 0.0007 mm , 是极为接近于真圆的, 同时也确认了能有效地检测到 $1 \mu\text{m}$ 量级, 测量方法是可行的。

2.2 岩芯钻取方法

为了确认应力解除后岩芯的变形是否符合上节中的分析, 采用白砂岩和黄砂岩2种岩样进行了预备实验, 这2种岩样的物性值见表1, 其尺寸均为每边约 10 cm 的立方体。实验室岩芯的钻取方法为, 在与钻

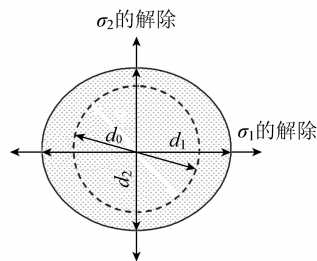


图1 应力解除后岩芯的变形

Fig. 1 Core deformation with stress relief

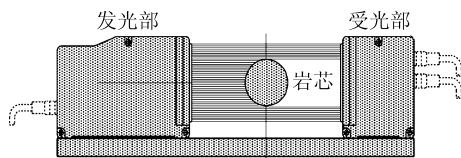


图2 激光测定器测定岩芯直径

Fig. 2 Schematic diagram of laser measurement

表 1 2 种预备试验试件的物性值和测定结果

Table 1 Material properties and measuring results of two preliminary samples

参 数	白砂岩	黄砂岩
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.43	2.24
单轴压缩强度/MPa	39	29
弹性模量/MPa	4 400	7 100
泊松比	0.07	0.10
最大直径 d_1/mm	50.027	49.919
最小直径 d_2/mm	49.979	49.858
d_1 的方位/ $^\circ$	5	12
主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)/\text{MPa}$	3.9	7.9
载荷应力/MPa	4.9	4.7

求出平面内主应力差的值。表中各试件的载荷应力是用荷重除以载荷面积的值。

由图 3 和表 1 的试验结果可知, 2 种岩样岩芯最大直径的方向均与所施加的载荷方向基本一致, 即与图 1 中的最大主应力解除方向一致, 而最小直径的方向(图 3 中实线凹下部分)大致与所施加的载荷方向成 90° 。另外, 细粒的白砂岩试件其各断面直径的不均匀性较小, 但粗粒的黄砂岩试件的各断面直径的不均匀性较大。由式 (3) 计算的结果可知, 白砂岩比实际加载应力略小, 而黄砂岩则呈略大的值。

3 现场钻取岩芯的测定结果

用预备试验确认了本方法的有效性后, 用同样的测量方法对在地下深部钻取到的 2 种花岗岩岩芯进行了测定。这 2 种岩芯均是数年前在现场进行水压致裂试验时采取到的, 其岩质非常坚硬, 岩芯的圆周面非常光滑, 完全看不到钻孔的切削迹。

测量岩芯直径时, 测定间隔为沿轴线方向每 5 cm 取 1 个断面, 且在每个断面上沿圆周方向每间隔 10° 实施测定, 其结果如图 4 所示。2 种试件的主应力差计算时均取弹性模量 $E =$

孔轴平行的任意平面内, 用油压千斤顶对立方体试件施加 50 kN 的单轴荷重, 该方向即为平面内最大主应力方向, 另一方向为自由状态, 在保持该单轴荷重作用下进行钻取岩芯。钻取岩芯所使用的金刚石岩芯钻的内、外径分别为 50 和 60 mm。

2.3 预备试验的测量结果

对这 2 种岩样的岩芯, 沿其轴向方向每隔 2 cm 取 1 个断面, 共 4 个断面, 且对每个断面沿圆周方向每间隔 15° 进行测量。取载荷方向为基准线, 即 $0 \sim 180^\circ$ 的方向为载荷方向。测量结果沿圆周方向的展开如图 3 所示。由近似曲线可求得各试件岩芯的最大直径 d_1 和最小直径 d_2 及最大直径与基准线(载荷的方向)的夹角(表 1)。根据所测量的结果, 由式 (3) 即可

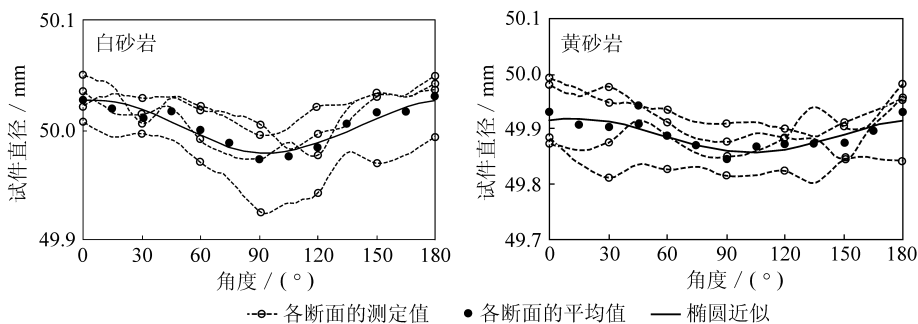


图 3 2 种预备试件的岩芯直径测定结果及椭圆近似

Fig. 3 Measurement results and approximate ellipse for two preliminary samples

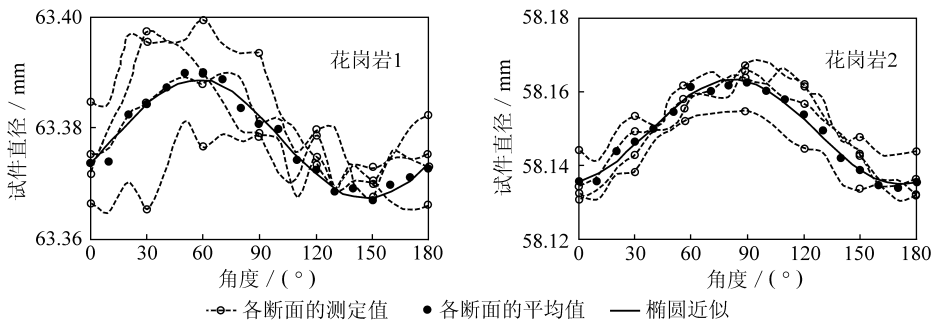


图 4 2 种花岗岩的岩芯直径测定结果及椭圆近似

Fig. 4 Measurement results and approximate ellipse for two granites

50 GPa, 泊松比 $\nu = 0.25$. 求得的概略值列于表 2, 表 2 也给出了同一地点采用水压裂法得到的测定结果. 由图 4 和表 2 可知, 与预备试验的测定结果相比, 尽管现场钻取的 2 种岩芯的直径变化非常小, 但同时其测定结果的不均匀性也很小, 其椭圆特征是非常明显的. 2 种岩芯的最大直径的方位与同深度水压致裂法测得的最大主应力方向基本一致. 但是由岩芯变形法测得 2 种岩芯的主应力差的结果都比水压裂法所测到的值要大.

表 2 2 种花岗岩岩芯直径的测定结果
Table 2 Measurement results of two granites

岩芯类型	采取深度 /m	岩芯变形法				水压致裂法	
		最大直径 d_1 /mm	最小直径 d_2 /mm	d_1 的方位 / (°)	主应力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) /MPa	最大主应 力方位	主应力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) /MPa
花岗岩 1	834	58.163 3	58.135 0	N82W	19.5	N72 - 86W	6.2
花岗岩 2	575	63.388 8	63.367 8	N57W	14.1	N52 - 55W	7.4

4 讨 论

4.1 岩芯变形与微观裂隙及 P 波速度的关系

岩石变形上所表现出的各向异性与岩石中潜在的微观裂隙的方向性及微观裂隙的密度有关^[7]. 这里采用测量岩芯的超声波速度的方法探讨了岩芯变形与超声波速度 (P 波) 和岩石微观裂隙方向性的关系. 对现场钻取的 2 种花岗岩岩芯的 P 波速度进行了测定, 测定方法如图 5 所示, 在岩芯的圆周方向粘贴 2 个共振频率为 100 kHz 的 AE 探头, 用脉冲法测定.

2 种花岗岩岩芯的 P 波速度测定结果及其椭圆近似曲线如图 6 所示. 可以看出, 两岩芯均呈较明显的椭圆倾向, 即有很明显的 P 波速度各向异性. 同时将图 4 中的岩芯

变形测定的椭圆近似曲线与 P 波测定的椭圆近似曲线一起绘于图 7 中发现, 其曲线的凸凹性正好相反, 即 P 波速度的最小方向与岩芯直径变形的最大方向一致. 因此可给出如图 8 所示的模型, 微观裂隙的主方向 (或叫长轴) 与

P 波速度的最大值相平行, 岩芯的变形受到微观裂隙方向性的支配, 即有: 微观裂隙长轴的排列方向 = P 波速度的最大方向 = 岩芯直径的最小方向 = 最小主应力方向.

4.2 主应力差的测量误差

由表 1, 2 可知, 岩芯变形法求得的主应力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) 与其载荷应力或与其它方法测到的相应应力值存在有一定差异, 其主要原因可认为是钻取岩芯时伴随应力解除而产生的弹性变形外, 还存在非弹性变

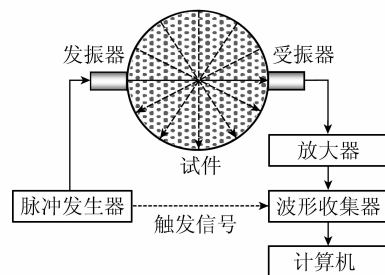


图 5 圆周方向 P 波速度测定

Fig. 5 Schematic diagram of measuring P wave velocity in circumference direction

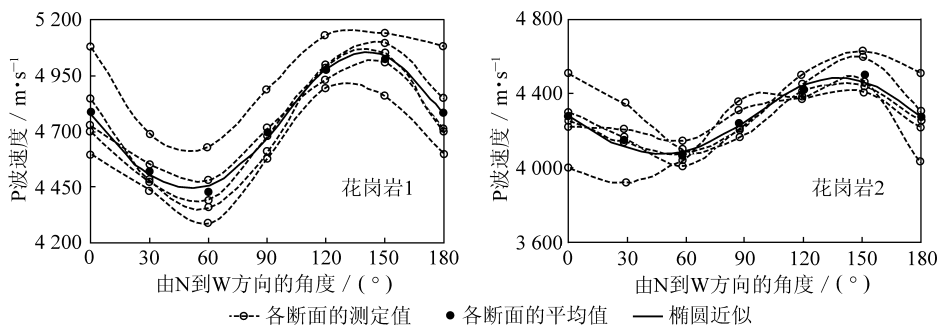


图 6 2 种花岗岩的圆周 P 波测定结果

Fig. 6 Measurement results of P wave velocity in circumference direction for two granites

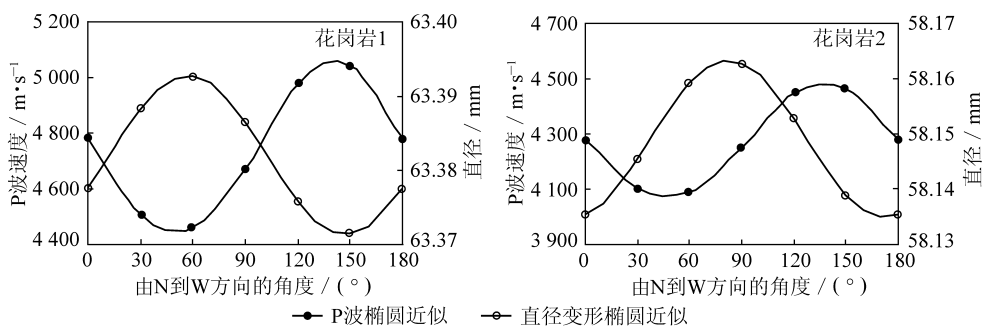


图 7 2 种花岗岩的圆周 P 波测定结果与直径变形的椭圆近似

Fig. 7 Approximate ellipse curves of core deformation and P wave velocity of circumference direction for two granites

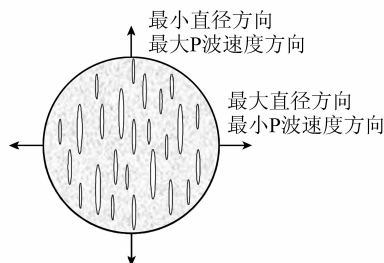


图 8 微观裂隙与岩芯变形及圆周 P 波速度的关系

Fig. 8 Relation about micro-crack, core deformation and P wave velocity of circumference direction

形量所致。

因为钻取岩芯时, 岩芯不是从现场的地应力状态瞬间解除, 而是当岩芯钻头顶端通过时一旦受到很大的应力集中后被解除, 在此过程中岩芯受到某种程度的损伤产生非弹性变形。

由于第 1 节中对模型的假设是应力解除后产生弹性变形, 其弹性变形量与解除应力成正比, 即式 (3) 的计算中只考虑了岩芯的弹性变形量, 而未考虑岩芯的非弹性变形量, 从而使结果产生一定的误差。

5 结 语

利用测定岩芯的扁平度评价原始地应力的岩芯变形法是可行的, 测量方法简单, 并可与其它岩芯测定法同步使用。在评价平面内主应力方向上, 预备实验结果和现场钻取岩芯的测量结果均验证了本方法的有效性。主应力方向与岩石的裂隙方向有密切关系。但评价平面内主应力差时, 与水压裂法结果有较大的差异。因此, 还应在考虑岩芯非弹性变形成分及钻取岩芯时应力集中产生的岩芯损伤基础上进行深入研究。

参考文献:

- [1] Sugawara K, Obara Y. Measurement of in-situ rock stress by hemispherical-ended borehole technique [J]. Int. J. Mining Science and Technology, 1986, 3, 287 ~ 300.
- [2] Fairhurst C. Measurement of in-situ rock stresses with particular reference to hydraulic fracturing [J]. Rock Mech. Eng. Geol., 1964, 2, 129 ~ 147.
- [3] 金川忠, 林正夫, 仲佐博裕. 岩石における地圧成分のAcoustic Emissionによる推定の試み [A]. 土木学会論文集 [C]. 日本土木学会, 1977, 258: 63 ~ 75.
- [4] Teufel L W. Prediction of hydraulic fracture azimuth from anelastic strain recovery measurements of oriented core [A]. Proc. of 23rd US Symp. On Rock Mech. [C]. Berkeley: 1982. 238 ~ 245.
- [5] Enever J R, Yassir N, Addis M A, et al. A note on the status of deep hole stress measurement/estimation research in CSIRO [R]. Proceeding of International Workshops on Rock Stress Measurement at Great Depth, 1995. 40 ~ 45.
- [6] 葛修润, 侯明勋. 一种测定深部岩体地应力的新方法——钻孔局部壁面应力全解除法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (23): 3 923 ~ 3 927.
- [7] 工藤洋三, 橋本堅一, 佐野修. 瀬戸内地方の採石場における花崗岩質岩石の異方性 [A]. 土木学会論文集 [C]. 日本土木学会, 1987, 382: 45 ~ 53.