

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*

葛修润^{1,2} 侯明勋²

(¹上海交通大学岩土力学与工程研究所 上海 200030)

(²中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室 武汉 430071)

摘要 简要回顾了基于钻孔进行地应力测量的几种方法,并指出了这些方法自身存在的局限性。提出了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。该方法的明显优点是,不需要套钻,而且在确定地应力的主值及其方向时也不需要作任何假定。从理论上讲,该方法将不受测量深度的限制,对于深钻孔是普遍适用的,这将为大陆科学钻探计划中深部岩体地应力测量提供一种新途径。

关键词 地壳应力,深孔应力测量,应力解除法,钻孔局部壁面应力全解除法

分类号 TD 311

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)23-3923-05

NEW APPROACH TO MEASURE GOESTRESS——LOCAL BOREHOLE-WALL COMPLETE STRESS RELIEF METHOD

Ge Xiurun^{1,2}, Hou Mingxun²

(¹Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030 China)

(²Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

Abstract Several methods of borehole stress measurement are briefly reviewed. A new goestress measurement method, called local borehole-wall complete stress relief method(LBWCSR), is proposed in this paper. This method has marked advantages of no need of overcoring and no other assumption when calculating the crust stress tensor. Theoretically, the application of this method is free from the limitation of borehole depth and versatile for any deep boreholes. So it offers an innovative approach to stress measurement at great depths.

Key words crustal stress, deep borehole stress measurement, stress relief, local borehole-wall complete stress relief method

1 前言

岩体中初应力的测量不仅在矿山、石油开采、水利工程和地下工程的建设中起着非常重要的作用,而且对地球物理的研究也有重大的理论与实际

意义。自从 1932 年美国劳伦斯(R. S. Lieurance)在胡佛水坝下面的一个隧道中首次成功进行了原岩应力测量之后^[1],国内外学者在过去的七十余年里对地应力测量做了大量卓有成效的开创性工作,并且部分测量方法和设备已在工程实践中得到了广泛的应用^[1-4]。

2003 年 5 月 30 日收到初稿,2003 年 7 月 24 日收到修改稿,2004 年 5 月 4 日收到改定稿。

* 上海交通大学 985 资助课题。

作者 葛修润 简介:男,1934 年生,现任中国工程院院士、教授、博士生导师,主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail:xiurunge@public.wh.hb.cn.

总的说来,基于钻孔进行地应力测量的方法不外乎以下几种类型^[1,2]:套孔应力解除法,水力压裂法,凯塞效应法,孔壁轴向切槽法。套孔应力解除法可以测定二维及三维地应力的主值及方向,但由于需要进行套钻,当钻孔较深时容易产生断芯问题,因此,该方法在深孔,尤其是在大陆科学深钻孔钻探计划中将无法得到应用。水力压裂法是目前深部应力测量中应用较广的一种方法,通过对传统水力压裂法进行改进,该方法已在德国大陆科学深钻计划(KTB)中用于6 000 m以上深孔的地壳应力测量和评价^[5]。但水力压裂法的理论基础是地应力张量的一个主方向必须与钻孔轴向一致,从而影响了测量结果的可靠性。凯塞效应法是基于岩石材料的声发射效应来测定岩体地应力的一种方法,实际上测的是岩体在历史上所受的最大应力值,在测定现今地应力方面显得无能为力,因而只能作为钻孔应力测量的一种辅助手段。而孔壁轴向切槽法只能测得垂直于钻孔轴线平面内的二维应力状态,并且只能用于孔深不超过30 m的干钻孔中^[2]。

为此,笔者提出了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,该方法不仅可以解决套孔应力解除法在较深钻孔中应用时出现的断芯问题,而且也克服了水力压裂法必须假定地应力张量的一个主方向与钻孔轴向一致的前提条件,并且从理论上讲,本文提出的岩体应力测定方法将不受测量深度的限制。它将为地应力测量,尤其是深部地应力测量提供新的方法和途径,完全可以适应大陆科学钻探计划中深部岩体地应力测量的需要。

2 钻孔局部壁面应力全解除法测定岩体应力的基本原理

2.1 理论基础

为了阐明钻孔局部壁面应力全解除法测定岩体应力的基本原理,必须先对孔壁壁面上的应力-应变关系进行分析。针对目前在单孔中测量全应力存在的问题,本文仍然采用已有的线弹性岩石力学理论来简化地应力计算的力学模型,而且笔者认为这种简化是合适的^[6-10]。

2.1.1 钻孔孔壁附近的应力分布

将岩体视为有初始应力作用的均质各向同性线

弹性体,假想在无限大岩体中有一竖直钻孔,记 $\sigma_x^\infty, \sigma_y^\infty, \sigma_z^\infty, \tau_{xy}^\infty, \tau_{yz}^\infty, \tau_{zx}^\infty$ 为钻孔直角坐标系 $ox'y'z'$ 下作用在距离钻孔无限远处岩体的正应力及剪应力,取远离孔口与孔底影响区之外的一小段钻孔^[3],建立如图1所示的力学模型。假定沿钻孔轴线方向的应变为常数,根据弹性力学理论,可以得到钻孔孔壁周围的应力分布^[3]为

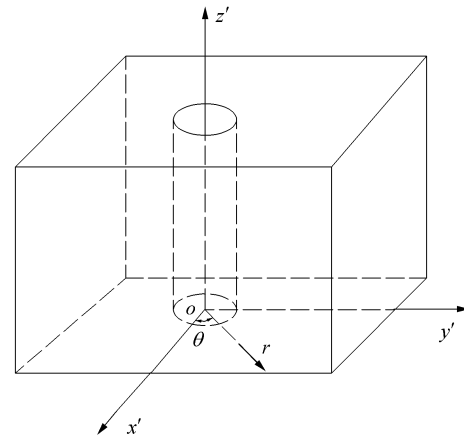


图1 钻孔围岩受力模型

Fig.1 Mechanical model of rocks surrounding a borehole

$$\sigma_r = \frac{\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty}{2} \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} - 4\frac{a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta + \tau_{xy}^\infty \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} - 4\frac{a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty}{2} \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \tau_{xy}^\infty \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (2)$$

$$\sigma_{z'} = -2\nu(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta - 4\nu\tau_{xy}^\infty \frac{a^2}{r^2} \sin 2\theta + \sigma_z^\infty \quad (3)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty}{2} \left(1 - 3\frac{a^4}{r^4} + 2\frac{a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta + \tau_{xy}^\infty \left(1 - 3\frac{a^4}{r^4} + 2\frac{a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \quad (4)$$

$$\tau_{\theta z'} = (-\tau_{zx}^\infty \sin \theta + \tau_{yz}^\infty \cos \theta) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (5)$$

$$\tau_{z'r} = (\tau_{zx}^\infty \cos \theta + \tau_{yz}^\infty \sin \theta) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (6)$$

式中： $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_{z'}, \tau_{r\theta}, \tau_{\theta z'}, \tau_{z'r}$ 为与钻孔直角坐标系 $ox'y'z'$ 相对应的柱坐标系 $or\theta z'$ 中孔壁附近任一点的应力分量； a 为钻孔半径； r 为径向坐标； θ 为矢径 \bar{r} 与 x' 轴的夹角； E 与 ν 分别为岩石材料的弹性模量与泊松比。

2.1.2 应力-应变关系

根据弹性力学理论，钻孔坐标系下的应力-应变关系如下：

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_{z'})] \quad (7)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_{z'})] \quad (8)$$

$$\varepsilon_{z'} = \frac{1}{E} [\sigma_{z'} - \nu(\sigma_\theta + \sigma_r)] \quad (9)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{r\theta} \quad (10)$$

$$\gamma_{\theta z'} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{\theta z'} \quad (11)$$

$$\gamma_{z'r} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{z'r} \quad (12)$$

2.1.3 孔壁壁面局部应力解除引起的孔壁应变

令 $r = a$ (即孔壁表面处)，则式(1)~(6)分别变为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r = \tau_{r\theta} = \tau_{z'r} = 0 \\ \sigma_\theta = \sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty - 2(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty) \cos 2\theta - 4\tau_{xy}^\infty \sin 2\theta \\ \sigma_{z'} = -2\nu(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty) \cos 2\theta - 4\nu\tau_{xy}^\infty \sin 2\theta + \sigma_z^\infty \\ \tau_{\theta z'} = 2(\tau_{yz}^\infty \cos \theta - \tau_{zx}^\infty \sin \theta) \end{aligned} \right\} (13)$$

如果沿钻孔径向对孔壁壁上某点实施取芯钻进，进行环形切割实现局部应力解除，即对岩体内这一小区域进行卸载，根据室内岩石试件加卸载曲线，这一卸载过程可以近似看作线弹性过程。这样，把式(13)分别代入式(8)，(9)及(11)，就可以得到孔壁上某点应力解除后发生的应变为

$$\varepsilon_\theta = \frac{-1}{E} [(\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty) - 2(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty) \cos 2\theta - 4\tau_{xy}^\infty \sin 2\theta + 2\nu^2(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty) \cos 2\theta + 4\nu^2\tau_{xy}^\infty \sin 2\theta - \nu\sigma_z^\infty] \quad (14)$$

$$\varepsilon_{z'} = \frac{-1}{E} [\sigma_z^\infty - \nu(\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty)] \quad (15)$$

$$\gamma_{\theta z'} = \frac{-4(1+\nu)}{E} (\tau_{yz}^\infty \cos \theta - \tau_{zx}^\infty \sin \theta) \quad (16)$$

在式(14)~(16)中，应变分量前面的负号表示在应力解除后测得的应变与岩体中的实际应变相反。如图 2 所示，孔壁上与环向夹角为 φ 的方向上的

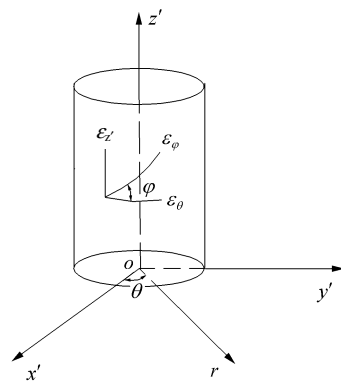


图 2 钻孔孔壁上任意一点的应变表示
Fig.2 Diagram of strain at arbitrary point on borehole-wall

正应变可以表示为

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_\theta l^2 + \varepsilon_{z'} m^2 + \gamma_{\theta z'} lm = \varepsilon_\theta \cos^2 \varphi + \varepsilon_{z'} \sin^2 \varphi + \gamma_{\theta z'} \cos \varphi \sin \varphi \quad (17)$$

式中： l 与 m 分别为测值 ε_φ 方向与环向和轴向的方向余弦。将式(14)~(16)代入式(17)，得

$$E\varepsilon_\varphi = f_1\sigma_x^\infty + f_2\sigma_y^\infty + f_3\sigma_z^\infty + f_4\tau_{xy}^\infty + f_5\tau_{yz}^\infty + f_6\tau_{zx}^\infty \quad (18)$$

其中，

$$f_1 = -[1 - 2(1 - \nu^2)\cos 2\theta]\cos^2 \varphi + \nu \sin^2 \varphi$$

$$f_2 = -[1 + 2(1 - \nu^2)\cos 2\theta]\cos^2 \varphi + \nu \sin^2 \varphi$$

$$f_3 = \nu \cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi$$

$$f_4 = 4(1 - \nu^2)\sin 2\theta \cos^2 \varphi$$

$$f_5 = -4(1 + \nu)\cos \theta \cos \varphi \sin \varphi$$

$$f_6 = 4(1 + \nu)\sin \theta \cos \varphi \sin \varphi$$

2.2 岩体应力测量的基本原理

由以上分析可知，只要在钻孔的某一局部孔段上，在孔壁不同位置(对应不同 θ 角)处对孔壁局部壁面实施取芯钻进，进行环形切割实现局部应力解除，通过应变花测得不同方向(对应不同 φ 值)上至少 6 个点的 ε_φ 值，这样就可以得到一组方程：

$$E\varepsilon_{\varphi_i} = f_{ij}\sigma_j \quad (j = 1, \dots, 6; i = 1, \dots, n) \quad (19)$$

式中： $\sigma_1 = \sigma_x^\infty, \sigma_2 = \sigma_y^\infty, \sigma_3 = \sigma_z^\infty, \sigma_4 = \tau_{xy}^\infty, \sigma_5 = \tau_{yz}^\infty, \sigma_6 = \tau_{zx}^\infty, n$ 为对应不同的 θ 与 φ 值的总测值个数， f_{ij} 为对应不同的 θ 与 φ 值时应力 σ_j 的系数， ε_{φ_i} 为对应不同的 θ 与 φ 值所测得的应变值。可

将式(19)写成如下的矩阵形式：

$$[F]\{\sigma'\} = \{S\} \quad (20)$$

式中： $[F] = [f_{ij}]$ ， $\{\sigma'\} = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \sigma_4 \ \sigma_5 \ \sigma_6]^T$ ， $\{S\} = [E\varepsilon_{\varphi_1} \ E\varepsilon_{\varphi_2} \ \dots \ E\varepsilon_{\varphi_n}]^T$ 。当 $n > 6$ 时，由最小二乘法可以得到

$$[F]^T[F]\{\sigma'\} = [F]^T\{S\} \quad (21)$$

这样，根据式(21)即可计算得到钻孔坐标系 $ox'y'z'$ 中的应力 $\{\sigma'\}$ 。

2.3 钻孔坐标系与大地坐标系之间的变换关系

以上分析都是在钻孔坐标系中进行的，为便于实际应用，需要把由钻孔坐标系表示的应力分量转换到大地坐标系里来表示。取如图 3 所示的大地坐标系 $oxyz$ ， z 轴垂直地面向上， x 轴指向东， y 轴指向北；钻孔坐标系为 $ox'y'z'$ ， z' 与钻孔轴线方向一致， x' 轴位于 xoy 平面内， y' 轴指向通过右手螺旋法则得到。

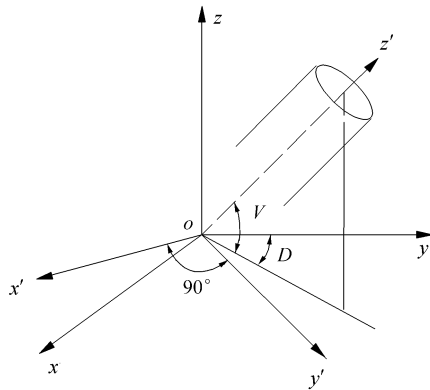


图 3 大地坐标系与钻孔坐标系的相对关系

Fig.3 Relative relationship between geodetic coordinate system and borehole coordinate system

设钻孔方位角为 D ，倾角为 V ，设 l_i, m_i, n_i ($i=1, 2, 3$) 分别为钻孔坐标系 x' 轴、 y' 轴与 z' 轴在大地坐标系 $oxyz$ 中的方向余弦，则有

$$l_1 = \cos D$$

$$m_1 = -\sin D$$

$$n_1 = 0$$

$$l_2 = \sin V \sin D$$

$$m_2 = \sin V \cos D$$

$$n_2 = -\cos V$$

$$l_3 = \cos V \sin D$$

$$m_3 = \cos V \cos D$$

$$n_3 = \sin V$$

若记

$$[\sigma^\infty] = \begin{bmatrix} \sigma_x^\infty & \tau_{xy}^\infty & \tau_{xz}^\infty \\ \tau_{yx}^\infty & \sigma_y^\infty & \tau_{yz}^\infty \\ \tau_{zx}^\infty & \tau_{zy}^\infty & \sigma_z^\infty \end{bmatrix}$$

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix}$$

那么钻孔坐标系 $ox'y'z'$ 中的应力张量 $[\sigma^\infty]$ 与大地坐标系 $oxyz$ 中的应力张量 $[\sigma]$ 有如下关系式：

$$[\sigma^\infty] = [L][\sigma][L]^T \quad (22)$$

将式(22)改写为

$$[\sigma] = [L]^T[\sigma^\infty][L] \quad (23)$$

这样即可得到大地坐标系中的应力分量 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ，从而完成对测点初始地应力的计算。

综上所述，只要在钻孔的某一局部孔段上，对孔壁不同位置处的壁面实施取芯钻进，进行环形切割实现局部应力解除，记录下应力解除前后孔壁壁面不同方向上的应变变化量，根据应力-应变关系，采用最小二乘法原理，通过钻孔坐标系与大地坐标系之间的变换关系，就可以推导出测点的应力张量，进而求得主应力及其量值。具体来说，如图 4 所示，在钻孔孔壁上间隔 120° 角等间距布置 3 组直角应变花，应变花轴向间距应尽量小，但须保证粘贴应变

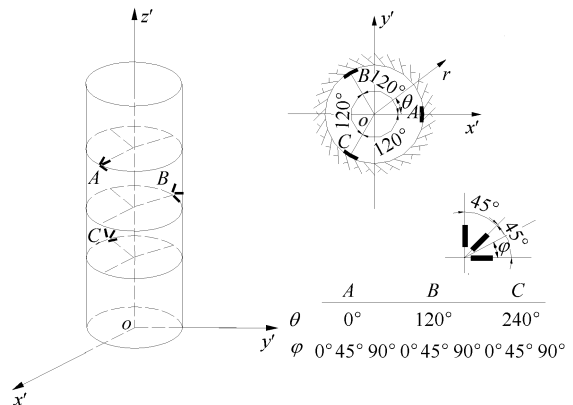


图 4 钻孔局部壁面应力全解除法应变花布置方式

Fig.4 Orientation of strain rosette around borehole and arrangement of strain gages

花部位的局部壁面在侧壁取芯钻进过程中彼此不受干扰,这样做不仅可以避免因局部扰动而影响应变测量精度,而且还确保了所解除的局部壁面岩性和所包含的地应力场信息具有同一性,从而才可以将测量到的几个局部壁面的应变组合起来加以分析,得到测点的地应力状态。正因为通过这种局部壁面应力解除法可以在同一钻孔内的局部孔段获得测点地应力张量(即 6 个应力分量)的全部信息,所以将本文提出的方法称之为钻孔局部壁面应力全解除法。基于此,笔者目前正在设计开发一套新的地应力测量系统,该套设备的成功研制将为深部地应力测量提供更加有效的方法和手段。

3 数值模拟和实验研究

采用有限元模型对本文提出的钻孔局部壁面应力全解除法进行了数值模拟研究,对应力解除过程中,所要解除卸载的岩芯直径与解除深度之间的关系等问题进行了深入的研究和分析,得到了二者之间的定量变化关系。对应变花在钻孔侧壁上的布置方案和自动粘贴技术、应力解除环形槽切割技术等问题也进行了系统的研究,初步的室内实验研究已证实了这种方法的可行性。相关技术细节将有另文专门论述。

4 结 语

本文基于线弹性岩石力学理论提出了一种在深孔中测定岩体地应力的新方法——钻孔局部壁面应力全解除法。该方法理论基础可靠,不仅可以解决套孔应力解除法在应用中出现的断芯问题,而且还

克服了水力压裂法必须假定地应力张量的一个主方向与钻孔轴向一致的前提条件。从理论上讲,本文提出的测定岩体地应力的方法将不受测量深度的限制,它将为地应力测量,尤其是深部地应力测量提供新的方法和途径,可以适应地球科学发展之需,满足大陆科学钻探计划中深部岩体地应力测量的需要。

参 考 文 献

- 1 蔡美峰, 乔 兰, 李华斌. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995
- 2 Amadei B, Stephansson O. Rock Stress and Its Measurement[M]. London: Chapman & Hall, 1997
- 3 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭等. 地应力测量及其在工程中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1991
- 4 刘允芳. 岩体地应力与工程建设[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000
- 5 Brudy M, Zoback M D, Fuchs K, et al. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: implications for crustal strength[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B8): 18 453 ~ 18 475
- 6 谢富仁, 陈群策. 地壳应力观测与研究[J]. 国际地震动态, 1999, (2): 1 ~ 7
- 7 苏恺之. 地应力测量方法[M]. 北京: 地震出版社, 1985
- 8 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 129 ~ 179
- 9 徐芝纶. 弹性力学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990
- 10 蔡美峰. 地应力测量原理和方法的评述[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(3): 275 ~ 283