

钻孔对初始应力场扰动影响的初步研究

孙礼健^{1,2}, 朱元清², 尹纪尧²

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 上海市地震局, 上海 200062)

摘要:地应力测量是获得初始地应力最直接最有效的方法,但在地应力测量打钻的过程中初始地应力会遭到扰动,岩体在打钻后出现卸载现象,初始地应力重新分布,使得测量值与实际初始地应力值有差别。本文应用有限元方法对钻孔地应力测量过程进行模拟,重点研究岩体的性质、边界应力、断裂在钻孔过程中对初始地应力变化的影响,并总结影响初始地应力变化的敏感因素。

关键词:初始地应力; 钻孔; 有限元; 岩石性质; 断裂

中图分类号: P553 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2009)02-0131-05

Primary Analysis on the Disturbances of Drilling to Initial Geostress Field

SUN Li-jian^{1,2}, ZHU Yuan-qing², YIN Ji-yao²

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;

2. Earthquake Administration of Shanghai, Shanghai 200062, China)

Abstract: Geostress measurement is a direct and effective way to get initial geostress. But initial geostress is disturbed in drilling, it exists the phenomenon of stress relief and stress redistributing after drilling, that makes the measuring value different from the actual value of the initial geostress. In this paper, the process of geostress measurement in borehole is simulated by using finite element method, the effects of rock property, stress border and fractures on geostress changes are studied, and the sensitive factors to initial geostress changes are summarized.

Key words: Initial geostress; Drilling; Finite element; Rock property; Fractures

0 引言

初始地应力在矿产资源开发、水利水电工程、油气井眼稳定性分析、地热能开发、核废料处理、以及地震预报、地壳强度评价、地球动力学研究等众多领域具有极其重要的作用,并且岩体初始地应力的大小和方向是影响地表及地下结构稳定性的重要因素之一^[1-4]。由于在漫长的地质历史时期中,地壳构造运动的复杂性和不可逆性,以及岩体本身特性的随机性和不确定性,使人们很难用一种确定的数学、物理模型来描述地层中原岩应力的分布规律,一般只有通过现场应力测量工作在一定程度上加以解决^[5-7]。自从 1932 年美国劳伦斯首次成功进行了原岩应力测量之后^[8],地应力测量理论、方法和技术经过近 70 余年的发展,已经取得了丰硕的研究成

果。近年来,地应力测量与研究越来越受到科学界和工程界的重视。目前国内外比较常用的地应力测量方法有水压致裂法、压磁应力解除法、空芯包体三轴应力解除法等^[9]。

近 20 年来随着计算机技术和数值分析方法的进步,人们开始通过有效的数值模拟方法进行地应力场的反演分析,以获得适用范围较大的地应力场。在近期提出的初始地应力场定量计算方法中,大多是以某些位置的初始地应力实测值为依据的。但在地应力测量打钻的过程中,初始地应力已经遭到破坏,岩体在打钻后出现卸载现象,使岩体应力重新分布,不能恢复到打钻前的应力状态^[10-11]。本文应用有限元方法对钻孔应力测量过程进行模拟,重点研

收稿日期:2008-06-27

基金项目:上海市综合深井地震观测系统建设项目;地震科学联合基金(C08036);上海市地震局地震科技发展基金(0905)

作者简介:孙礼健(1983—),男(汉族),安徽巢湖人,硕士研究生,现从事初始地应力场数值模拟方面研究。

究岩体的性质、边界应力、断裂在钻孔过程中对初始地应力场扰动的影响,并总结影响初始地应力变化的敏感因素。

1 研究模型的建立

1.1 基本假设

在建立模型时假设:①平面应变状态;②岩体采用 Drucker-Prager 材料模型,这种模型遵循 Drucker-Prager 屈服和破裂准则;③钻头采用刚体,且以匀速向下打钻;④边界应力为区域应力,作用方向垂直于边界。

1.2 参数定义与取值

为了便于分析,定义打钻前后地应力变化 $M = \sigma'' - \sigma'$;打钻前后的应力变化率 $K = \frac{\sigma' - \sigma''}{\sigma'}$ 。其中, σ' 为打钻前最大水平主应力; σ'' 为打钻变化后的最大水平主应力。其它参数有岩体密度 ρ ,泊松比 ν ,弹性模量 E ,屈服强度 σ_s ,上覆岩体重力载荷 σ_1 ,水平载荷 σ_2 , $L = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ 。

1.3 建立模型

采用二维模型,因岩体和钻头都为轴对称体,整个模型可以简化为二维轴对称问题。如图 1 所示,岩体模型上侧施加覆盖岩体的重力载荷,右侧施加垂直于边界的水平载荷,左侧施加对称约束,底部被约束。钻头施加垂直向下的匀速。钻头与岩体采用侵入接触。单位采用 cm-g-us 建模。

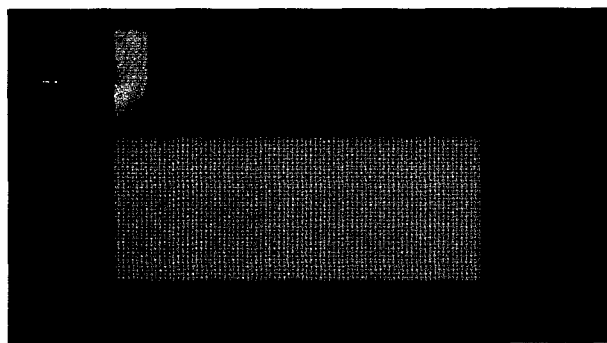


图 1 有限元模型

Fig. 1 The finite element model.

2 模拟方案及结果分析

采用 ANSYS/LS-DYNA 进行隐式-显式序列求解。隐式-显式序列求解是指使用隐式求解器得到模型的初始应力,在显式动力分析之前将它们加到结构上,然后进行显式动力分析^[12-14]。具体步骤如下:

(1) 建立模型,进行网格划分,模型使用拉格朗日网格。

(2) 岩体模型上侧施加覆盖岩体的重力载荷,右侧施加垂直于边界的水平载荷,左侧施加对称约束,底部被约束,钻头被全约束。

(3) 进行隐式求解,得到岩体的初始地应力。

(4) 将隐式单元转换为与之对应的具有适当属性的显式单元,移走进行隐式分析时所加的附加约束。

(5) 将隐式分析的结果写到动力松弛文件中,使用动力松弛文件初始化用于显式分析模型的几何形状。

(6) 岩体模型上侧定义为自由边界,右侧定义为无反射边界,左侧施加对称约束,底部被约束,钻头施加垂直向下的匀速。

(7) 进行显式求解,使用 LS-PREPOST 做后处理。

图 2 为数值模拟得到的孔壁处打钻前后初始地应力变化曲线,可见岩体在打钻后初始地应力遭到破坏,且不能恢复到打钻前的应力状态。

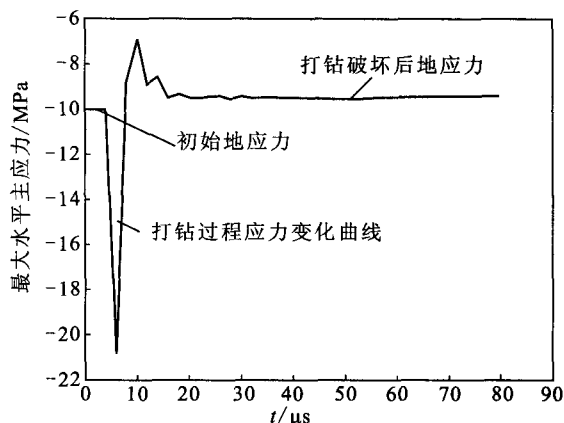


图 2 打钻前后初始地应力变化曲线

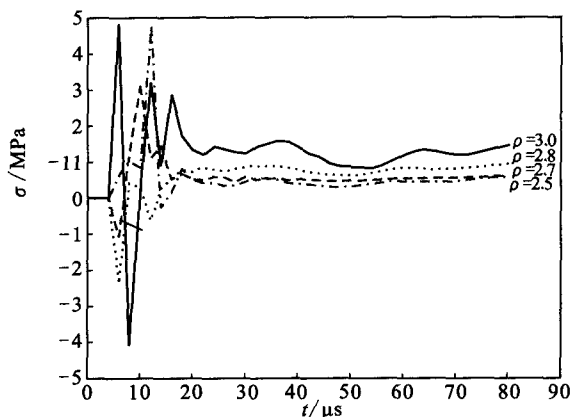
Fig. 2 Curve of initial geostress changes before and after drilling.

为研究影响初始地应力变化的因素,本文分别改变参数进行分析,包括密度、泊松比、弹性模量、屈服强度、边界应力、模型中是否有断裂。

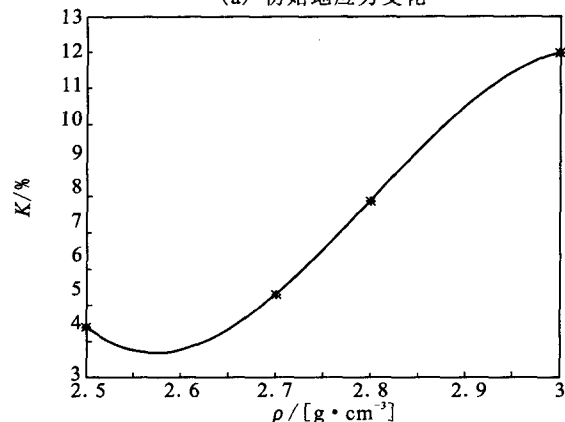
2.1 岩体密度对初始地应力变化的影响

为了便于分析,假定 $\sigma_1 = 8$ MPa, $\sigma_2 = 12$ MPa, $\nu = 0.3$, $E = 40$ GPa, $\sigma_s = 130$ MPa, ρ 从 2.5 g/cm³ 增大到 3.0 g/cm³,模拟结果如图 3(a)所示。为了更好的描述打钻前后地应力的变化,将地应力减去初始地应力,只显示地应力变化曲线。由模拟结果表明,随密度增加,打钻前后初始地应力变化值 M 增

大。图3(b)给出了打钻前后地应力变化率 K 随岩体密度的变化关系。随密度增大, 初始地应力变化率 K 小幅度增大, 所以密度不是影响初始地应力变化的敏感因素。改变 σ_1 、 σ_2 、 ν 、 E 、 σ_s 初始假定值进行分析, 结论相同。



(a) 初始地应力变化



(b) 初始地应力变化率 K

图3 打钻前后初始地应力及其变化率 K 随岩体密度的变化关系

Fig. 3 Relationship between the densities of rock and initial geostress change/ratio of initial geostress change K before and after drilling.

2.2 岩体泊松比对初始地应力变化的影响

假定 $\sigma_1=8$ MPa, $\sigma_2=12$ MPa, $\rho=2.5$ g/cm³, $E=40$ GPa, $\sigma_s=130$ MPa, 分析 ν 从 0.2 增大到 0.4 时打钻前后初始地应力变化情况。

模拟结果表明, 随着 ν 值增大, 打钻前后初始地应力变化值 M 增大, 但变化幅度很小, 初始地应力变化率 K 随 ν 增大也只是小幅度增加。改变 σ_1 、 σ_2 、 ρ 、 E 、 σ_s 初始假定值进行分析, 结论相同。

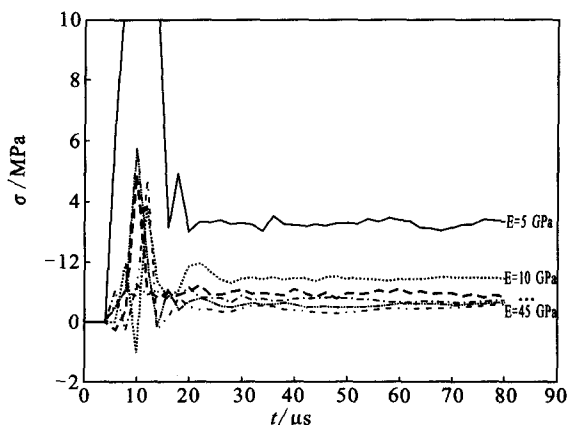
综上所述, 泊松比变化对初始地应力变化的影响很小, 泊松比也不是影响初始地应力变化的敏感因素。

2.3 岩体弹性模量对初始地应力变化的影响

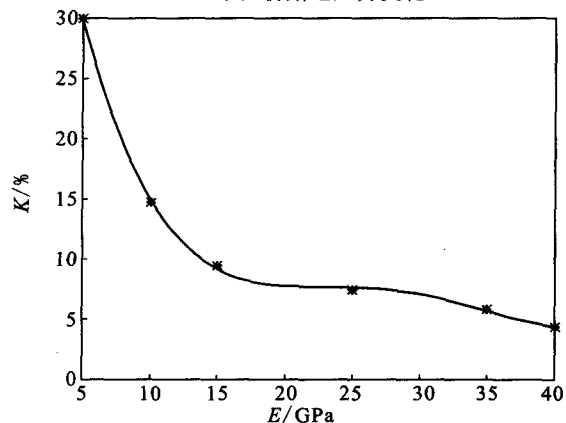
假定 $\sigma_1=8$ MPa, $\sigma_2=12$ MPa, $\rho=2.5$ g/cm³, $\nu=0.3$, $\sigma_s=130$ MPa, 分析 E 从 5 GPa 增大到 45 GPa 时打钻前后初始地应力变化情况。

模拟结果如图4(a)所示, 随着 E 值增大, 打钻前后初始地应力变化值 M 减小, 图4(b)给出了打钻前后地应力变化率 K 随岩体弹性模量的变化关系, 随着 E 值增大, 地应力变化率 K 在减小, 且变化范围较大。当 E 值较小时, K 变化幅度较大, 当 E 较大时, K 变化幅度较小。

改变 σ_1 、 σ_2 、 ρ 、 ν 、 σ_s 初始假定值进行分析, 结论相同, 即岩体弹性模量是影响初始地应力变化的敏感因素。



(a) 初始地应力变化



(b) 初始地应力变化率 K

图4 打钻前后初始地应力及其变化率 K 与岩体弹性模量的关系

Fig. 4 Relationship between the elastic modulus of rock and initial geostress change/ratio of initial geostress change before and after drilling.

2.4 岩体屈服强度对初始地应力变化的影响

假定 $\sigma_1=8$ MPa, $\sigma_2=12$ MPa, $\rho=2.5$ g/cm³, $\nu=0.3$, $E=40$ GPa, 分析 σ_s 从 110 MPa 增大到 150 MPa 时打钻前后初始地应力变化情况。

模拟结果如图 5(a)所示,随着 σ_s 值增大,打钻前后初始地应力变化值 M 减小。图 5(b)给出了打钻前后地应力变化率 K 随岩体屈服强度的变化关系,随着 σ_s 值增大,地应力变化率 K 在减小,且变化范围较大。 K 随 σ_s 的变化近似呈线性关系。

改变 σ_1 、 σ_2 、 ρ 、 ν 、 E 初始假定值进行分析,结论相同,即岩体屈服强度是影响初始地应力变化的敏感因素。

岩体的含水状态影响岩石的屈服强度,岩体的屈服强度随静水压力的增大近似呈线性减小,减小的幅度与岩石的损伤程度成正比^[15-16]。因此岩体的不同含水状态对地应力测量的结果有明显的影

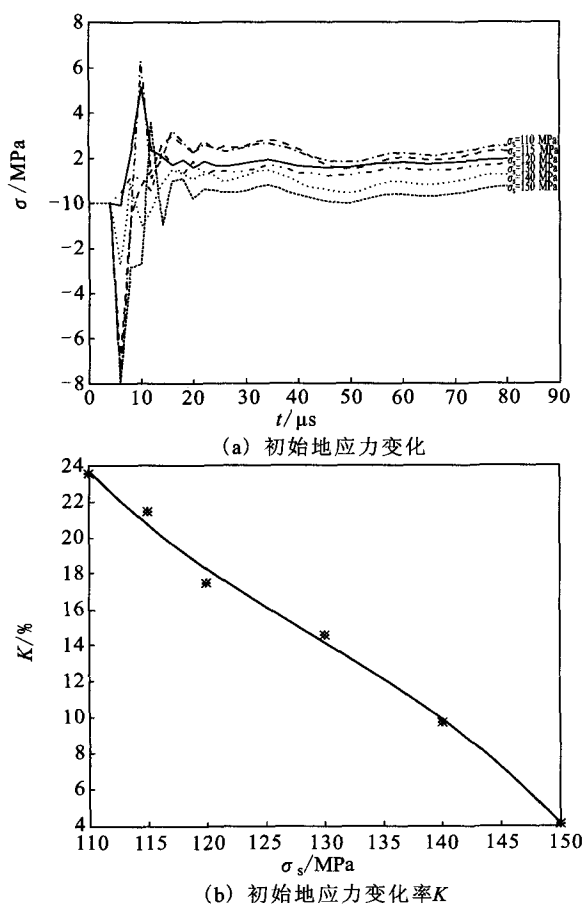


图 5 打钻前后初始地应力变化及变化率 K 随岩体屈服强度的变化关系

Fig. 5 Relationship between the yield strengths of rock and initial geostress change/ratio of initial geostress change(K) before and after drilling.

2.5 边界应力对初始地应力变化的影响

边界应力的影响可分两种情况:一是保持 σ_2 、 σ_1 比值 L 不变,同比例改变 σ_2 、 σ_1 值;另一种情况是保持 σ_1 不变,改变 L 值。假定 $\rho=2.5 \text{ g/cm}^3$, $\nu=0.3$,

$E=40 \text{ GPa}$, $\sigma_s=130 \text{ MPa}$ 。

(1) 保持 σ_2 、 σ_1 比值 L 不变

以 $L=1.5$ 为例进行分析的结果表明, σ_2 与 σ_1 以相同比例增大,打钻前后地应力变化值 M 增大,但初始地应力变化率 K 在减小。改变 ρ 、 ν 、 E 、 σ_s 初始假定值进行分析,结论相同。

(2) 保持 σ_1 不变,改变 L 值

假定 $\sigma_1=8 \text{ MPa}$ 不变,分析 L 从 1.5 增大到 3.0 时打钻前后初始地应力变化情况。模拟得到的结论和 L 保持不变时相似。改变 ρ 、 ν 、 E 、 σ_s 初始假定值进行分析,结论相同。

综上可知,边界应力对初始地应力变化的影响很大,是影响初始地应力变化的敏感因素。

2.6 断裂对初始地应力变化的影响

在模型中加入断裂,采用弱介质模型描述断裂,把断裂处理成断裂带,即相对于岩体来说,断裂介质可用一种强度较小、可塑性较强的岩石代替^[17]。

假定 $\sigma_1=8 \text{ MPa}$, $\sigma_2=12 \text{ MPa}$, $\nu=0.3$, $E=40 \text{ GPa}$, $\sigma_s=130 \text{ MPa}$, $\rho=2.5 \text{ g/cm}^3$, 模拟结果如图 6 所示。断裂对打钻后初始地应力的变化影响明显,且打钻后初始地应力变化幅度较无断裂时大。可见断裂是影响初始地应力变化的敏感因素。

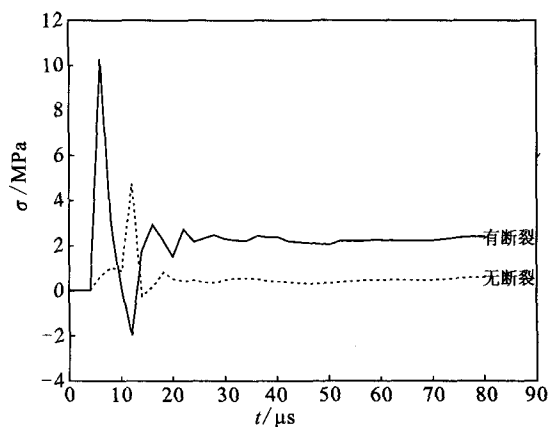


图 6 初始地应力变化与断裂的关系

Fig. 6 Relationship between initial geostress changes and fractures.

改变断裂的泊松比、弹性模量、断裂的走向、断裂的几何形态等参数,专门研究断裂对打钻前后初始地应力变化的影响,笔者将另文分析。

3 结论

(1) 模拟结果表明,岩体经打钻之后,孔壁周围的岩石出现卸载现象,使岩体应力重新分布,且不能恢复到打钻前的应力状态。

(2) 岩石性质、边界应力、断裂对打钻前后初始地应力变化有不同程度的影响; 岩体密度、泊松比对初始地应力的变化影响很小, 不是影响初始地应力变化的敏感因素; 岩体弹性模量、屈服强度、边界应力、断裂是影响地应力变化的敏感因素。

(3) 岩体的含水状态影响岩石的弹性模量和屈服强度, 从而影响打钻前后初始地应力的变化。

(4) 该研究可为钻孔地应力测量研究提供参考价值, 可以在此基础上建立三维模型, 深入研究影响初始地应力变化的各种因素。

[参考文献]

- [1] 许忠怀. 地应力研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 1990, (5): 24-34.
- [2] 沈海超, 程远方, 王京印, 等. 断层对地应力场影响的有限元研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(2): 34-37.
- [3] 李方全, 刘光勋. 我国现今地应力状态及有关问题[J]. 地震学报, 1986, 8(2): 156-171.
- [4] 陈瑶, 张富芳. 中国南北地震带北段近期地应力场动态演化特征与地震活动之关系[J]. 西北地震学报, 2003, 25(2): 166-174.
- [5] 姚宝魁. 地应力研究及其进展[A]// 岩体工程地质力学问题(八)[G]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [6] 王连捷. 中国地应力测量的进展[A]// 地质力学文集(九)[G]. 北京: 地震出版社, 1989.
- [7] 谭成轩, 孙叶, 王连捷. 地应力测量值得注意的若干问题[J]. 地质力学学报, 2003, 9(3): 275-281.
- [8] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 吴满路, 张春山, 廖椿庭, 等. 青藏高原腹地现今地应力测量与应力状态研究[J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 327-332.
- [10] 张政辉, 蔡美峰. 岩石的卸载力学特性及其对地应力测量的影响[J]. 矿冶, 2001, 10(3): 6-11.
- [11] 安欧. 当代钻孔地应力测量的主要问题[J]. 西北地震学报, 1989, 11(2): 43-51.
- [12] 何涛, 杨竞, 金鑫, 等. 非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [13] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [14] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [15] 常春, 周德培, 郭增军. 水对岩石屈服强度的影响[J]. 岩土力学与工程学报, 1998, 17(4): 407-411.
- [16] 张政辉, 蔡美峰. 地下水对地应力测量的影响[J]. 金属矿山, 2001, (11): 42-44.
- [17] 陈波, 田崇鲁. 储层构造裂缝数值模拟技术的应用实例[J]. 石油学报, 1998, 19(4): 50-54.