

田韬,冯志生,王维,等.基于四层钻孔模型的体应变潮汐因子差异性原因分析[J].地震工程学报,2021,43(1):50-55.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.050
TIAN Tao, FENG Zhisheng, WANG Wei, et al. Reasons for the Difference among Volume Strain Tidal Factors Based on a Four-layer Drilling Model[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(1): 50-55. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.050

基于四层钻孔模型的体应变潮汐因子 差异性原因分析

田 韬, 冯志生, 王 维, 叶碧文
(江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘要: 在钻孔应变观测的实际标定分析中,一般是通过钻孔应变观测资料采用固体潮调和分析的方法直接获得钻孔面应变耦合系数,该方法未能充分反映观测的钻孔应变与地层应变之间的内在联系。本文基于“地层—等效弹性层—水泥环—钢筒”四层耦合介质钻孔模型,利用 TJ-2C 型体应变仪器的测量钢筒内外径和弹性参数、钻孔半径以及水泥环弹性参数,给出不同地层中钻孔耦合系数与钻孔等效弹性层弹性模量之间的变化关系。对我国现有运行的 40 多套 TJ-2C 型钻孔体应变观测资料的分析表明,潮汐因子分布范围在 0.01 至 1.86 之间,基岩为花岗岩类的潮汐因子均值为 0.83,基岩为灰岩或砂岩类的潮汐因子均值为 0.57,即硬地层中的潮汐因子高于软地层。基于对该四层模型探讨发现,等效弹性层的等效弹性模量大小反映了钻孔的耦合状态,对于同类型基岩地层,探头与地层耦合不佳将导致其等效弹性层弹性模量下降,进而导致钻孔潮汐因子下降。本文以砂岩弹性模量 0.5 GPa 作为判定钻孔耦合状态的下限,即认为等效弹性模量低于 0.5 GPa 时钻孔处于脱耦状态,统计结果表明我国现有钻孔体应变观测中有约 30% 的钻孔处于脱耦状态,这一研究结果对预报人员应用这些钻孔资料开展地震分析预报工作有重要指导意义。

关键词: 钻孔模型; 耦合系数; 体应变; 潮汐因子; 弹性模量

中图分类号: P315.75

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)01-0050-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.050

Reasons for the Difference among Volume Strain Tidal Factors Based on a Four-layer Drilling Model

TIAN Tao, FENG Zhisheng, WANG Wei, YE Biwen
(Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

Abstract: In actual calibration analysis of drilling strain observation, the strain coupling coefficient of the drilling surface is directly obtained from drilling strain observation data through harmonic analysis of tide. However, the method is difficult to use to fully reflect the internal link between the observed drilling strain and stratigraphic strain. This study measures the inner and outer diameter and the elastic parameters of the steel tube as well as the drilling radius and the elas-

收稿日期: 2018-04-27

基金项目: 江苏省地震局局长基金(17410); 中国地震局台网中心震情跟踪项目(2018020401)

第一作者简介: 田 韬(1978—),男,硕士,工程师,主要从事固体潮与地壳形变观测研究。E-mail: tiantao78@163.com。

通信作者: 冯志生(1961—),男,硕士,研究员,主要从事地震电磁关系和地震前兆观测台网研究。E-mail: fengzs2001@sohu.com。

tic parameters of the cement sheath paper by using the TJ-2C strain gauge and a four-layer coupling medium drilling model of "stratum-equivalent elastic layer-cement sheath-steel tube." The relations between the drilling coupling coefficient in different strata and the elastic modulus of the drilling equivalent elastic layer are obtained. The analysis results of the volumetric strain from 40 TJ-2C strain gauges show that the tidal factors are distributed from 0.01 to 1.86. The tidal factor mean value of the granitoid bedrock is 0.83, and that of limestone or sandstone bedrock is 0.57. Hence, the tidal factor in the hard formation is higher than that in the soft formation. Based on the four-layer model, the equivalent elastic modulus of the equivalent elastic layer reflects the coupling state of the borehole. For the same type of bedrock formation, the poor coupling between the probe and the formation will lead to the decrease in the elastic modulus of the equivalent elastic layer, leading to a decrease in the tidal factor. The borehole is assumed to be in the decoupling state when the equivalent elastic modulus is less than 0.5 GPa. The statistics show that about 30% of boreholes in China are in decoupling state. The study results are important in conducting seismic analysis and forecasting work by using drilling data.

Keywords: drilling model; coupling coefficient; volumetric strain; tidal factor; elastic modulus

0 引言

钻孔体应变一般安装于地下 60~100 m 深度的钻孔内,利用膨胀水泥将仪器探头的测量钢筒固定在钻孔内,测量平面应变状态下钻孔的面应变^[1-2]。钻孔体应变观测数据能否反映地层应力真实变化信息主要取决于探头与孔壁的耦合程度。前人多是基于三层介质耦合的钻孔受力模型,分析介质参数变化对钻孔耦合系数的影响^[3-4];也有学者利用附加了垂直方向变形的三层钻孔模型,分析钻孔的垂向变形对面应变耦合系数的影响^[5-7]。由于测量钢筒的长度与孔径的比大于 5,观测中体应变测量钢筒轴向变形对体应变的影响可以忽略不计,采用钻孔为平面应变状态更符合观测实际^[2]。利用实际观测的 M₂ 波潮汐应变波幅度与理论固体潮潮汐波幅度的比值即潮汐因子评价钻孔应变耦合状态^[4,8-9],分析结果发现不同钻孔应变的潮汐因子存在明显差异,对该现象的普遍认识是钻孔耦合可能存在裂隙、偏心等因素的影响^[10-12]。以前对钻孔进行应力-应变分析多是基于“钢筒—水泥层—地层”三层钻孔模型,在应力传递过程中地层被假想为半无限空间均匀各向同性介质,三层模型的局限性在于忽略了地层厚度远大于钻孔的半径,且钻孔孔壁与水泥层为两种不同力学性质的介质耦合,其中钻孔孔壁岩石弹性模量实测值远小于围岩弹性模量理论值^[13],因此,三层钻孔模型中没考虑钻孔孔壁弹性模量与围岩的力学性质差异对理论计算结果的影响,该模型不能完全反映观测结果蕴含的真实物理

意义。为此,田韬等^[14]在三层钻孔模型的基础上提出了“钢筒—水泥环—等效弹性层—地层”四层介质钻孔耦合模型,模型中等效弹性层反映了钻孔围岩卸载效应及水泥层与孔壁或钢筒的耦合状态。本文利用该模型初步分析了我国现有钻孔体应变潮汐因子差异性的可能原因,对今后如何评价钻孔应变观测状态有一定借鉴意义。

1 四层钻孔体应变模型的潮汐因子计算

由于使用“地层—水泥环—钢筒”各向同性均匀介质三层钻孔模型对钻孔应变观测结果进行分析不能充分反映复杂环境下钻孔的实际耦合状态,为此,在三层钻孔模型中的围岩与水泥环之间增加一个等效弹性层,即“地层—等效弹性层—水泥环—钢筒”各向同性均匀介质四层钻孔模型(图1),其中等效

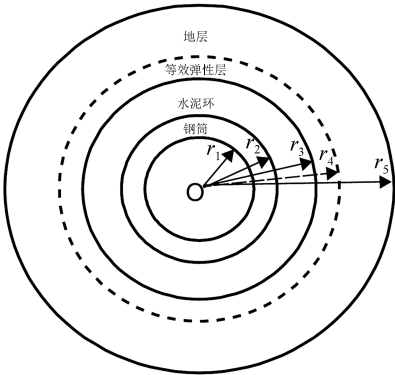


图 1 四层介质钻孔模型结构示意图
Fig.1 Structure of the four-layer medium drilling model

弹性层反映钻孔围岩卸载效应及水泥层与孔壁或钢筒的耦合程度。

$$\begin{cases} \sigma_{r_i} = \frac{A_i}{r^2} + C_i \\ u_{r_i} = \frac{1+\nu_i}{E_i} \left[(1-2\nu_i)C_i r - \frac{A_i}{r} \right] \end{cases} \quad (r_i \leq r \leq r_{i+1}, i=1 \sim 4) \quad (1)$$

式中: r_i 为各层半径大小; E_i 、 ν_i 为第 i 层介质的弹性参数。若钻孔耦合良好, 在径向 r_2 、 r_3 、 r_4 各接触面上, 分别满足径向位移连续和径向应力连续, 同时存在边界条件 $r=\infty$ 时, $\sigma_r=\sigma_0$; $r=r_1$ 时, $\sigma_r=0$ 。由以上 8 个边界条件, 可得线性方程组如下:

$$\begin{cases} \sigma_{r_1} = 0, (r=r_1) \\ \sigma_{r_5} = \sigma_0, (r=\infty) \\ \sigma_{r_1} = \sigma_{r_2}, u_{r_1} = u_{r_2} (r=r_2) \\ \sigma_{r_2} = \sigma_{r_3}, u_{r_2} = u_{r_3} (r=r_3) \\ \sigma_{r_3} = \sigma_{r_4}, u_{r_3} = u_{r_4} (r=r_4) \end{cases} \quad (2)$$

由已知边界条件, 方程组中 8 个未知参数 A_i 、 C_i 存在唯一解, 依据式(1) 可给出在均匀分布压力 σ_0 作用下, 钻孔面应变 $\sum$ 的表达式为:

$$\sum = \frac{2u_{r_1}}{r_1} = M\sigma_0 \quad (3)$$

式中: M 是与钻孔模型参数有关的常数。

在均匀分布压力 σ_0 作用下, 假设无孔地层满足平面应力状态, 地层中任一点的面应变 $\sum'$ 表达式为:

$$\sum' = \frac{2u_{r_1}}{r_1} = \frac{2(1-\nu_m)\sigma_0}{E_m} \quad (4)$$

式中: E_m 、 ν_m 分别为地层的弹性模量和泊松比。

假设 R 为钻孔面应变 $\sum$ 与地层面应变 $\sum'$ 的比值:

$$R = \frac{\sum}{\sum'} = \frac{M\sigma_0}{\frac{2(1-\nu_m)\sigma_0}{E_m}} = \frac{E_m}{2(1-\nu_m)} M \quad (5)$$

定义 R 为钻孔面应变耦合系数, 可以看出, R 是各环半径和各层介质弹性参数的函数, 且与均匀分布的外力 σ_0 大小无关。

用理论应变固体潮对钻孔应变观测进行标定是目前被学者一致采用的方法^[4,8]。固体地球表面的固体潮面应变理论值可以依据径向非均匀固体地球模型精确计算, 假设在 2 阶引潮力作用下, 利用固体地球模型可计算地表的半日波 M_2 波固体潮的面应变理论值 $\sum_2$ ^[16]:

在均匀分布压力 σ_0 作用下, 该厚壁筒组合在平面应变状态下的物理方程^[15]:

$$(r_i \leq r \leq r_{i+1}, i=1 \sim 4) \quad (1)$$

$$\sum_2 = (h_2 - 3l_2) \frac{2P_2}{\rho g} \quad (6)$$

式中: h_2 和 l_2 为 2 阶勒夫数; ρ 为地球半径; g 为重力; P_2 为月对地的 2 阶引潮力位。以地表面应变的固体潮理论值 $\sum_2$ 取代地层面应变的真实值 $\sum'$ 及钻孔的面应变 $\sum$ 测量, 耦合系数 R 可对钻孔的固体潮观测结果进行 M_2 波调和与分析获得, 因此, 这里耦合系数 R 也表示为钻孔的 M_2 波面应变潮汐因子。

2 等效弹性层对潮汐因子理论值的影响

在日常分析中常用钻孔应变观测的潮汐因子对数据质量进行评价, 因此, 依据钻孔模型计算的理论潮汐因子 R , 可作为对钻孔应变观测结果进行分析的参考依据。为计算“地层—等效弹性层—水泥环—钢筒”四层钻孔模型中的等效弹性层弹性模量变化对潮汐因子理论值的影响, 依据钻孔体应变仪器设计和安装相关资料^[2], 模型的参数为: 钢筒内径 $r_1=40.5$ mm, 钢筒外径(水泥层内径) $r_2=44$ mm, 卸载层内径(水泥层外径、井孔半径) $r_3=65$ mm, 卸载层外径(地层内径) $r_4=80$ mm, 地层外径 $r_5=3\,000$ mm; 钢筒弹性模量 $E_s=210$ GPa, 钢筒泊松比 $\nu_s=0.30$, 专用水泥弹性模量 $E_c=30$ GPa, 水泥、地层和等效弹性层的泊松比均为 0.25 ($\nu_e=\nu_c=\nu_m=0.25$), 地层弹性模量 E_m 在 25~50 GPa 之间。等效弹性层的弹性模量 E_e 在 0~ E_m 范围内变化, E_e 太小意味着钻孔等效弹性层处于疏松状态, 或者水泥与孔壁或钢筒之间脱耦, 或者水泥本身凝集不佳或孔壁裂隙太多以致于变的松散; $E_e=E_m$ 时意味着没有等效弹性层, 四层模型简化为三层。

图 2 为潮汐因子随钻孔弹性层等效模量 E_e 的变化。可以看出, 地层弹性模量 E_m 对潮汐因子的影响比较显著, 地层弹性模量 E_m 越大, 对应的潮汐因子也越大; 当地层弹性模量 E_m 在 15~75 GPa 之间, 对应的潮汐因子理论值在 1.0~2.5 之间; 当地层弹性模量 E_m 小于 15 GPa 时, 对应的潮汐因子理论值小于 1。当地层弹性模量不变时, 等效弹性层的弹性模量越小对潮汐因子的影响越大, 潮汐因子

先随 E_e 快速增加然后逐渐变缓,随等效弹性层的弹性模量逐步增大潮汐因子出现趋于转平迹象,当

等效弹性层的弹性模量等于地层的弹性模量,四层退化三层模型,即图 2 中每条曲线右端。

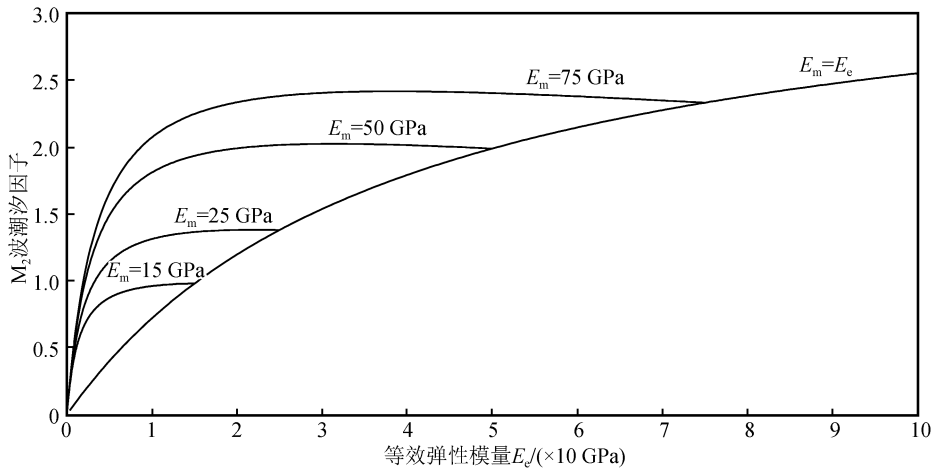


图 2 潮汐因子随等效弹性模量 E_e 的变化($E_e=30$ GPa)

Fig.2 Variation of tidal factor with the equivalent elastic modulus E_e ($E_e=30$ GPa)

3 现有钻孔体应变钻孔等效弹性层等效弹性模量的估算

本文共收集了中国大陆正在运行观测的 24 套花岗岩类和 23 套灰岩或砂岩类基岩的钻孔 TJ-2C 型体应变观测资料(表 1、表 2)。TJ-2C 型体应变仪

器探头总长度 1.3 m,探头感应筒筒长 0.5 m,内径(半径)0.040 5 m 外径(半径)0.044 m,采样率 1 次/min,分辨率 1×10^{-9} ,动态范围 $\pm 1\times 10^4$,钻孔直径 0.130 m,钻孔深度 60~100 m,中间使用专用水泥加石英砂填充耦合^[2]。

M_2 波潮汐因子可利用软件 MAPSIS^[17] 对观测

表 1 花岗岩类钻孔的面应变潮汐因子观测值

Table 1 Observed values of the plane strain tide factor of granite

序号	台站	起止年月	潮汐因子	等效弹性模量/GPa	岩性
1	泉州	2005-01-01—2014-04-30	1.83	10.4	花岗岩
2	易县	2001-01-01—2014-04-30	1.69	7.5	花岗闪长岩
3	宁陕	2007-01-01—2014-04-30	1.60	6.1	花岗岩
4	永安	2005-01-01—2014-04-30	1.54	5.5	花岗岩
5	青岛	2006-01-01—2014-04-30	1.47	4.8	花岗岩
6	泰安	2009-01-01—2014-04-30	1.43	4.5	花岗岩
7	锦州	2012-01-01—2014-04-30	1.22	3.1	花岗岩
8	漳州	2004-01-01—2014-04-30	1.09	2.5	花岗岩
9	铁门关	2013-01-01—2014-04-30	1.03	2.3	花岗片麻岩
10	代县	2007-01-01—2014-04-30	0.99	2.1	花岗片麻岩
11	连云港	2007-01-01—2014-04-30	0.95	2.0	花钢片麻岩
12	通河	2007-01-01—2014-04-30	0.91	1.8	花岗岩
13	相公庄	2012-01-01—2014-04-30	0.77	1.4	花岗岩
14	东阳	2007-01-01—2014-04-30	0.70	1.2	花岗岩
15	南昌	2007-01-01—2014-04-30	0.61	1.0	花岗片麻岩
16	温泉	2013-01-01—2014-04-30	0.58	1.0	花岗岩
17	西安	2007-01-01—2014-04-30	0.52	0.8	花岗岩
18	乌海	2010-01-01—2014-04-30	0.32	0.5	花岗岩
19	福州	2012-01-01—2014-04-30	0.18	0.2	花岗岩
20	烟台	2010-01-01—2014-04-30	0.17	0.2	花岗片麻岩
21	寺滩	2013-01-01—2014-04-30	0.14	0.2	花岗岩
22	湖州	2007-01-01—2014-04-30	0.11	0.2	花岗岩
23	牡丹江	2007-01-01—2014-04-30	0.08	0.1	花岗岩
24	乌加河	2007-01-01—2014-04-30	0.01	0.1	花岗岩

表 2 灰岩或砂岩类钻孔的面应变潮汐因子观测值

Table 2 Observed values of the plane strain tide factor in the drilling of limestone or sandstone					
序号	台站	起止年月	潮汐因子	等效弹性模量/GPa	岩性
1	太原	2007-01-01—2014-04-30	1.39	22.2	灰岩
2	徐州	2007-01-01—2014-04-30	1.30	9.3	灰岩
3	莱钢	2005-01-01—2014-04-30	1.27	7.8	灰岩
4	金州	2007-01-01—2014-04-30	1.23	6.8	灰岩
5	长清	2001-01-01—2014-04-30	1.01	3.4	灰岩
6	临汾	2007-01-01—2014-04-30	0.79	1.9	灰岩
7	黄山	2009-01-01—2014-04-30	0.73	1.7	砂岩
8	马陵山	2011-01-01—2014-04-30	0.61	1.2	砂岩
9	乌什	2013-01-01—2014-04-30	0.54	1.0	砂岩
10	昌平	2008-01-01—2014-04-30	0.53	0.9	灰岩
11	莱阳	2011-01-01—2014-04-30	0.51	0.9	砂砾岩
12	英鸽	2013-01-01—2014-04-30	0.48	0.8	灰岩
13	乾陵	2007-01-01—2014-04-30	0.47	0.7	灰岩
14	马场	2013-01-01—2014-04-30	0.43	0.6	砂岩
15	涉县	2007-01-01—2014-04-30	0.37	0.6	灰岩
16	海子峡	2013-01-01—2014-04-30	0.35	0.5	砂砾岩
17	丽江	2007-01-01—2014-04-30	0.30	0.5	灰岩
18	下达河	2007-01-01—2014-04-30	0.27	0.4	灰岩
19	拉萨	2007-01-01—2014-04-30	0.24	0.4	砾岩
20	合肥	2009-01-01—2014-04-30	0.18	0.2	砂岩
21	甘孜	2007-01-01—2014-04-30	0.11	0.1	砂岩
22	郑州	2007-01-01—2014-04-30	0.02	0.1	灰岩
23	楚雄	2007-01-01—2014-04-30	0.01	0.1	粉砂岩

资料的整点值时间序列进行调和与分析获得,表 1 和表 2 给出了这些钻孔的 M_2 波潮汐因子观测结果。由表 1 可见,钻孔地层岩性为花岗岩类的潮汐因子值最大的为 1.86、最小的为 0.01,其均值约为 0.83,方差为 0.33,潮汐因子大于 1 的台站有 9 个,占总数的 37.5%,潮汐因子小于 0.50 的台站有 7 个,占总数的 29%。由表 2 可见钻孔地层岩性为灰岩或砂岩类的潮汐因子值最大的为 1.39、最小的为 0.01,其均值约为 0.57,方差为 0.17,潮汐因子大于 1 的台站有 5 个,占总数的 21.7%,潮汐因子小于 0.50 的台站有 12 个占总数的 52.2%。对比表 1 和表 2 的潮汐因子最大值和均值,发现我国现有钻孔体应变潮汐因子基本反应钻孔地层岩性,即岩性较硬的花岗岩类弹性模量大,潮汐因子也大,岩性较软的灰岩或砂岩类弹性模量小,潮汐因子小。

由表 1 和表 2 可以发现,我国现有钻孔体应变的潮汐因子差异性很大,即使地层岩性一样也是如此,显然不能用地层岩性弹性模量的差异性来解释,为此我们取花岗岩类弹性模量 $E_m=50$ GPa,灰岩或砂岩类弹性模量 $E_m=25$ GPa,分别给出其理论潮汐因子随等效弹性层弹性模量的变化,及据此给出各钻孔体应变的等效弹性模量(表 1、表 2、图 3)。

图 3 为两类地层中钻孔体应变潮汐因子随等效弹性层弹性模量变化,其中曲线上四角为岩性较硬的花岗岩类钻孔观测到的 M_2 波潮汐因子,圆圈为岩性较软的灰岩或砂岩类钻孔观测的 M_2 波潮汐因子在曲线上的投影。

岩石的弹性模量随外界环境的不同其大小也不相同,一些主要岩石的杨氏模量^[18]:花岗岩为 26~69 GPa、片麻岩为 20~59 GPa、砂岩为 5~80 GPa、灰岩为 10~79 GPa。由表 1 和表 2 及图 3 可以发现,无论基岩为岩性较硬的花岗岩类,还是岩性较软的灰岩或砂岩类,其等效弹性层的弹性模量都小于 10 GPa,即所有钻孔均存在其等效弹性层的弹性模量远小于地层弹性模量的现象。

等效弹性模量的大小反映了钻孔的耦合状态,我们以砂岩弹性模量最小值 5 GPa 小一个数量级 0.5 GPa 作为判定钻孔耦合状态的下限,即等效弹性模量低于 0.5 GPa 时认为钻孔脱耦,则由表 1 和表 2 可以发现,花岗岩类钻孔共有 7 个台站的等效弹性模量低于 0.5 GPa,占 29%;灰岩或砂岩类钻孔共有 7 个台站的等效弹性模量低于 0.5 GPa,占 30%。很显然,若以等效弹性模量低于 0.5 GPa 为标准确定该钻孔为脱耦,则以上这些钻孔数据是无

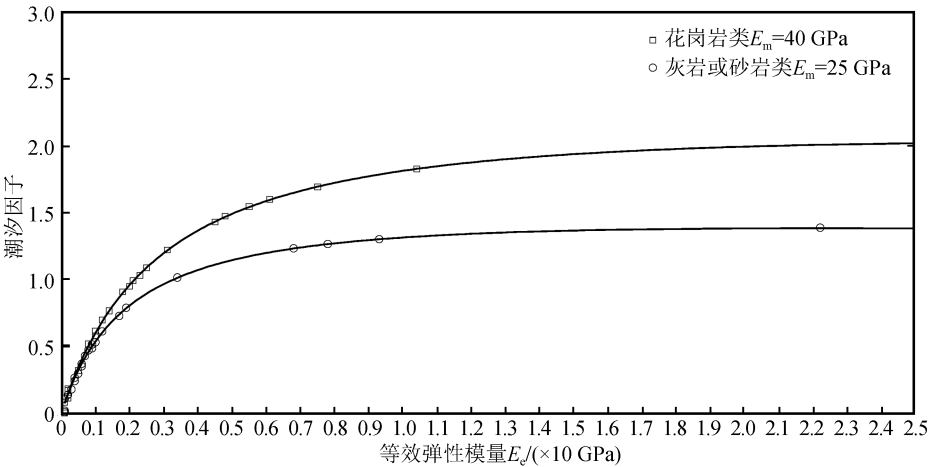


图 3 两类地层中潮汐因子随等效弹性模量 E_e 的变化($E_c=30$ GPa)

Fig.3 Variation of tidal factor with the equivalent elastic modulus E_e in two kinds of strata ($E_c=30$ GPa)

法用于地震监测预报。

4 讨论与结论

本文基于“地层—等效弹性层—水泥环—钢筒”四层介质耦合钻孔模型,初步分析了我国现有地层岩性为花岗岩类和灰岩或砂岩类钻孔体应变潮汐因子与等效弹性层弹性模量的关系,发现:

(1) 无论是基岩岩性为岩性较硬的花岗岩类,还是岩性较软的灰岩或砂岩类,其等效弹性层的弹性模量都小于 10 GPa,即均存在钻孔等效弹性层的弹性模量远小于地层弹性模量的现象,因此,钻孔潮汐因子低的原因可能是等效弹性层弹性模量较低所致;

(2) 等效弹性模量的大小反映了钻孔的耦合状态,若以砂岩弹性模量最小值 5 GPa 小一个数量级即 0.5 GPa 作为判定钻孔耦合状态的下限,即认为等效弹性模量低于 0.5 GPa 时认为钻孔脱耦,则统计表明我国现有钻孔体应变有约 30% 的钻孔体应处于脱耦状态,这一研究结果对预报人员应用这些钻孔资料开展地震分析预报工作有重要指导意义。

参考文献(References)

[1] 张雁滨,蒋骏.潮汐线应变观测的地表平面应变状态[J].地壳形变与地震,1997,(1):70-75.
ZHANG Yanbin,JIANG Jun.Plane Strain of Tidal Line Strain Observation[J].Crustal Deformation and Earthquake,1997,(1):70-75.

[2] 苏恺之,李海亮,张钧,等.钻孔地应变观测新进展[M].北京:地震出版社.2003.
SU Kaizhi,LI Haliang,ZHANG Jun,et al.New Progress of Borehole in Situ Strain Observation[M].Beijing:Seismological

Press,2003.

[3] GLADWIN M T,HART R.Design Parameters for Borehole Strain Instrumentation [J]. Pure and Applied Geophysics Pageoph,1985,123(1):59-80.

[4] 骆鸣津,顾梦林,李安印,等.用引潮力进行钻孔的应变-应力的原地标定[J].地壳形变与地震,1989,9(4):51-62.
LUO Mingjin,GU Menglin,LI Anlin,et al.Borehole Strain-stress Calibration in the Same Place by Use of Tidal Generation Force[J]. Crustal Deformation and Earthquake,1989,9(4):51-62.

[5] 陈沉俊,杨修信.双衬套钻孔应变测量的计算[J].华北地震科学,1990,(4):80-89.
CHEN Yuanjun,YANG Xiuxin.Calculations of Strain Observation in the Borehole with Two Cases[J].North China Earthquake Sciences,1990,(4):80-89.

[6] ROELOFFS E.Tidal Calibration of Plate Boundary Observatory Borehole Strainmeters;Roles of Vertical and Shear Coupling [J].Journal of Geophysical Research,2010,115(B6):B06405.

[7] 张凌空,牛安福,吴利军.地壳应变场观测中体应变与面应变转换系数的计算[J].地震学报,2012,34(4):476-486.
ZHANG Lingkong,NIU Anfu,WU Lijun.Conversion Factors from Volume to Area Strain in Crustal Strain Observation[J]. Acta Seismologica Sinica,2012,34(4):476-486.

[8] 邱泽华,石耀霖,欧阳祖熙.四分量钻孔应变观测的实地绝对标定[J].地震,2005,25(3):27-34.
QIU Zehua,SHI Yaolin,OUYANG Zuxi.Absolute Calibration of 4-component Borehole Strainmeters[J].Earthquake,2005,25(3):27-34.

[9] HART R H G,GLADWIN M T,GWYOTHER R L,et al.Tidal Calibration of Borehole Strain Meters;Removing the Effects of Small-Scale Inhomogeneity [J]. Journal of Geophysical Research;Solid Earth,1996,101(B11):25553-25571.

[10] 易志刚,邱泽华,宋莱.钻孔体应变观测资料的实地校正[J].地震,2007,27(3):117-123.
YI Zhigang,QIU Zehua,SONG Mo.On the Spot Correction of Observational Data of Borehole Bulk Strain[J].Earthquake,2007,27(3):117-123.

- GUO Zhaojie, ZHANG Zhicheng, ZHANG Chen, et al. Lateral Growth of the Altyn Tagh Strike-slip Fault at the North Margin of the Qinghai-Tibet Plateau: Late Cenozoic Strike-slip Faults and the Crustal Stability in the Beishan Area, Gansu, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(10): 1678-1686.
- [29] 云龙, 杨晓平, 宋方敏, 等. 青藏高原北缘三危山断裂晚第四纪以来的左旋走滑活动[J]. 地震地质, 2016, 38(2): 434-446.
- YUN Long, YANG Xiaoping, SONG Fangmin, et al. Late Quaternary Sinistral Strike-slip Activities of Sanwei Shan Fault in the North of Tibetan Plateau[J]. Seismology and Geology, 2016, 38(2): 434-446.
- [30] 郑文俊. 河西走廊及其邻区活动构造图像及构造变形模式[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2009.
- ZHENG Wenjun. The Active Tectonic Geometrical Image and the Significance for Tectonic Deformation of the Hexi Corridor and Its Adjacent Regions[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2009.
- *****
- (上接第 55 页)
- [11] 程惠红, 张怀, 朱伯靖, 等. 地应力测量中钻孔偏心分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 21(6): 164-169.
- CHENG Huihong, ZHANG Huai, ZHU Bojing, et al. Analysis of Drilling Hole Deviation in Crustal Stress Measurement[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 21(6): 164-169.
- [12] 李进武, 邱泽华. 钻孔应变仪观测的面应变潮汐因子初步分析[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2013-2018.
- LI Jinwu, QIU Zehua. Analysis on Strain Tidal Factor Observed Borehole Strainmeters[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2013-2018.
- [13] 艾凯, 刘元坤, 景峰. 软弱岩体钻孔变形测试研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 242-244.
- AI Kai, LIU Yuankun, JING Feng. Research on Testing Borehole Deformation in Weak Rock Masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Sup): 242-244.
- [14] 田韬, 杨军, 郝永亮, 等. 原地应力对钻孔应变耦合系数的影响分析[J]. 地震研究, 2014, 37(3): 419-424.
- TIAN Tao, YANG Jun, HAO Yongliang, et al. Impact Analysis of Situ Stress on Borehole Strain Coupling Coefficients[J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(3): 419-424.
- [15] 徐芝纶. 弹性力学(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- XU Zhilun. Elasticity[M]. Beijing: Seismological Press, 2006.
- [16] 吴庆鹏. 重力学与固体潮[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- WU Qingpeng. Gravity and Earth Tidal[M]. Beijing: Seismological Press, 1997.
- [17] 蒋骏, 李胜乐, 张雁滨, 等. 地震前兆信息处理与软件系统[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- JIANG Jun, LI Shengle, ZHANG Yanbin, et al. Seismic Precursor Information Processing[M]. Beijing: Seismological Press, 2000.
- [18] 陈颙, 黄廷芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- CHEN Yong, HUANG Tingfang, LIU Enru. Rock Physics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.