

综合应用钻孔应变固体潮和应变地震波 资料求解地震参数和地层的力学参数

骆鸣津¹, 池顺良²

(1. 河南省地震局, 河南 郑州 450000; 2. 鹤壁市地震局, 河南 鹤壁 458000)

摘要: 介绍了在井下耦合介质弹性参数等不能直接测定时, 应用钻孔应变固体潮和应变地震波资料求解地震参数和地层的力学参数的方法. 用平衡方程的解来近似代替波动方程解, 不但使应用钻孔应变仪测到的地震波监测地震成为可能, 而且比直接应用波动方程求解的方法大大简化.

关键词: 应变固体潮; 应变地震波; 耦合介质

中图分类号: P315.72⁺7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2001)04-0359-06

0 引言

YRY型钻孔应变仪的观测探头安置在地下钻孔中, 该仪器不仅能记录应变固体潮, 而且能记录应变地震波. 由于钻孔孔壁不是自由面, 仪器探头与孔壁之间有一层耦合介质, 地震波应力要通过这层介质才能传递到探头. 它的弹性参数对钻孔应变影响甚大, 但是又不能直接测定, 而且每一口井都有其特殊性, 各种耦合形式(如非中心耦合, 非均匀耦合)及岩孔裂缝等都会对传递到探头的应力产生影响. 在这种情况下用波动方程的方法求解钻孔应变地震波是不可能的. 本文介绍了应用平衡方程及综合应用钻孔应变固体潮和应变地震波资料求解地震参数和地层的等效力学参数的方法.

1 用平衡方程中应力作用下的圆孔形变解近似代替波动方程解

由钻孔应变仪测到的地震波求解地震波参数, 首先想到的自然是应用圆柱坐标的波动方程. 将直接入射到钻孔面(自由面)上的平面波计算成探头方向的径向位移, 再计算孔面反射和转换的散射波在同一方向的位移. 取其和, 再计算应变探头二端(在孔面上)的径向位移差, 除以探头长度, 所得结果即为钻孔应变. 由于应变探头仅安装在井下几十米深处, 地面反射和转换的地震波入射到钻孔孔面上产生的钻孔应变亦应予考虑. 当耦合介质的耦合情况和弹性系数知道时应用波动方程求解是可能的, 其计算非常繁浩. 但现实正好相反, 故无可能.

用平衡方程的解来近似代替波动方程求解过程中, 需要考虑以下条件:

(1) 在距钻孔一定距离处, 地震波传播过程中产生的地层应力不会因打了钻孔而改变, 因此在钻孔周围采用的施加地层应力的计算点距钻孔不能太近, 经估算当钻孔半径在 0.1 m 时,

地层应力计算点距钻孔大于 10 m 就够了。

(2) 采用的地层应力计算点不能距钻孔太远, 否则所计算出的钻孔应变与传播到孔面上真实的钻孔应变因存在时差而失真. 经估算应力计算点距钻孔小于 100 m 是可以满足的。

至于采用的地层应力计算点距钻孔应有多远(用 x_1 表示, 见图 1)在后面还要具体估算。

(3) 由于某一时刻在相对于钻孔中心呈轴对称的 2 个点上地震波产生的地层应力并不相等, 为此, 计算时取 2 个对称点上地层应力的平均值作为施加于钻孔的地层应力。

在水平主应力 σ_1 和 σ_2 作用下, 钻孔应变 $e'_r(\theta)$ 为^[2,4]:

$$e'_r(\theta, a) = \frac{u_r(\theta, a)}{a} = \frac{R}{2a}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{S}{2a}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta$$

(1)

式中: a 为钻孔半径; $u_r(\theta, a)$ 为 θ 方向孔面上的径向位移; R 为面应力系数; S 为差应力系数. 以地震波入射的水平方向为 x 轴方向, 其方位角为 φ , y 轴与 x 轴垂直, z 轴向下为正, 钻孔应变探头安装的观测方向为 A (图 1). 当地震波沿 x 方向入射时产生的地震波应力不是主应力时, 式(1)中的主应力 σ_1 、 σ_2 用 σ_{xx} 、 σ_{yy} 和 σ_{xy} 代替, 钻孔应变公式(式中 $A - \varphi = \theta$)为:

$$e'_r(A) = \frac{R}{2a}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + \frac{S}{2a}\left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})\cos 2(A - \varphi) - 2\sigma_{xy}\sin 2(A - \varphi)\right]$$

(2)

式(2)中的水平应力 σ_{xx} 、 σ_{yy} 和 σ_{xy} 用潮汐应力代替时, 可得到钻孔应变固体潮; 用地震波传播过程中产生的地层应力代替时, 可得到钻孔应变地震波。

2 用平衡方求解钻孔应变地震波

2.1 P 波入射产生的钻孔应变

考虑地面为自由面时产生反射 P 波和转换 S 波, 设 P 波的反射系数为 K_{pP} , S 波的转换系数为 K_{pS} , 则 P 波时在 (x, y, z) 点上产生的位移为^[3]:

$$u_x^P = A_1[-i\hat{\xi}(e^{-i\eta z} + K_{pP}e^{i\eta z}) + i\beta K_{pS}e^{i\beta z}]e^{i\xi x}e^{-i\omega t}$$
$$u_y^P = 0$$

(3)

$$u_z^P = A_1[i\zeta(e^{-i\eta z} - K_{pP}e^{i\eta z}) - i\beta K_{pS}e^{i\beta z}]e^{i\xi x}e^{-i\omega t}$$

(4)

$$\hat{\xi} = \frac{\omega}{v_P}\sin i_P \quad \eta = \frac{\omega}{v_P}\cos i_P$$
$$\zeta = \frac{\omega}{v_S}\sin i_S \quad \beta = \frac{\omega}{v_S}\cos i_S$$

(4)

式中: A_1 为放射 P 波的振幅; $i = \sqrt{-1}$; i_P 为 P 波入射的入射角; i_S 为 P 波入射时转换 S 波的反射角; ω 为圆频率; v_P 和 v_S 分别为 P 波和 S 波的传播速度. 令 x_0 为震源至钻孔中心的水平距离, x_1 为地震波应力计算点至钻孔中心的水平距离, 由式(3)的位移可导出 $((x_0 - x_1), y, z)$ 点和 $((x_0 + x_1), y, z)$ 点上的地层应力. 取二点上地层应力的平均值:

$$\bar{\sigma}_{xx} = A_1\left\{\frac{\omega^2}{v_P^2}\left(\lambda + 2\mu\sin^2 i_P\right)\left(e^{-i\eta z} + K_{pP}e^{i\eta z}\right) - 2\mu\beta K_{pS}e^{i\beta z}\right\}\cos \xi x_1 e^{i\xi x_0}e^{-i\omega t}$$
$$\bar{\sigma}_{yy} = A_1\left\{\frac{\omega^2}{v_P^2}\lambda\left(e^{-i\eta z} + K_{pP}e^{i\eta z}\right)\right\}\cos \xi x_1 e^{i\xi x_0}e^{-i\omega t}$$
$$\bar{\sigma}_{xy} = 0$$

(5)

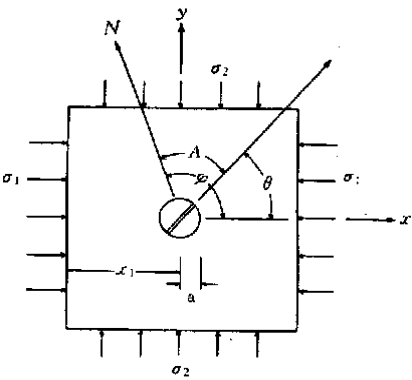


图 1 求解钻孔应变的坐标系示意图
Fig. 1 Sketch of coordinate system for borehole strain.

将式(5)代入式(2), 得到 P 波入射产生的钻孔应变:

$$e_{rr}^P(A) = \frac{R}{2a} A_1 \left\{ \frac{\omega^2}{v_P^2} \left[\lambda + \mu \sin^2 i_P \right] \left(e^{-i\tau} + K_{pP} e^{i\tau} \right) - \mu \xi K_{pS} e^{i\beta} \right\} \cos \xi_{x1} e^{i\xi_{x0}} e^{-i\omega t} + \frac{S}{2a} A_1 \mu \cos 2(A - \varphi) \left\{ \xi^2 e^{-i\tau} + \xi^2 K_{pP} e^{i\tau} - \xi K_{pS} e^{i\beta} \right\} \cos \xi_{x1} e^{i\xi_{x0}} e^{-i\omega t} \quad (6)$$

2.2 S 波入射时产生的钻孔应变

根据 SV 波和 SH 波入射与地面反射转换产生的位移^[3], 计算出(($x_0 - x_1$), y, z)和(($x_0 + x_1$), y, z)点上的地震波产生的地层应力平均值, 代入式(2)中, 得到 SV 波和 SH 波入射时产生的钻孔应变, 分别为:

$$e_{rr}^{SV}(A) = B_1 \left\{ \frac{R}{2a} \left[\mu \beta \xi \left(e^{-i\beta} - K_{sS} e^{i\beta} \right) + \frac{\omega^2}{v_P^2} \left(\lambda + \mu \sin^2 i_P \right) K_{sP} e^{i\tau} \right] + \frac{S}{2a} \cos 2(A - \varphi) \left[\mu \beta \xi \left(e^{-i\beta} - K_{sS} e^{i\beta} \right) + \mu \xi^2 K_{sP} e^{i\tau} \right] \right\} \cos \xi_{x1} e^{i\xi_{x0}} e^{-i\omega t} \quad (7)$$

$$e_{rr}^{SH}(A) = C_1 \left\{ -\frac{S}{2a} \frac{\omega^2}{v_S^2} \mu \tan i_S \sin 2(A - \varphi) \left(e^{-i\beta} + e^{i\beta} \right) \right\} \cos \xi_{x1} e^{i\xi_{x0}} e^{-i\omega t} \quad (8)$$

式中: B_1 为入射 SV 波的振幅; C_1 为入射 SH 波的振幅; K_{sS} 和 K_{sP} 分别为 S 波入射时地面的入射系数和转换系数. 取式(7)和式(8)之和, 得到 S 波入射时产生的钻孔应变:

$$e_{rr}^S(A) = B_1 \frac{R}{a} \left[\mu \beta \xi \left(e^{-i\beta} - K_{sS} e^{i\beta} \right) + \frac{\omega^2}{v_P^2} \left(\lambda + \mu \sin^2 i_P \right) K_{sP} e^{i\tau} \right] \cos \xi_{x1} e^{i\xi_{x0}} e^{-i\omega t} + B_1 \frac{S}{a} \mu \cos 2(A - \varphi) \left[\beta \xi \left(e^{-i\beta} - K_{sS} e^{i\beta} \right) + \xi^2 K_{sP} e^{i\tau} \right] \cos \xi_{x1} e^{i\xi_{x0}} e^{-i\omega t} + C_1 \frac{S}{a} \mu \sin 2(A - \varphi) \left[\frac{\omega^2}{v_S^2} \tan i_S \left(e^{-i\beta} + e^{i\beta} \right) \right] \cos \xi_{x1} e^{i\xi_{x0}} e^{-i\omega t} \quad (9)$$

2.3 瑞利面波入射产生的钻孔应变

按照上述方法, 由瑞利面波位移^[3]推导出瑞利面波入射产生的钻孔应变.

$$e_{rr}^R(A) = A_R \left\{ \frac{R}{a} \left[i \left[\mu \tau^2 + \lambda \frac{\omega^2}{v_P^2} \right] \right] + \frac{S}{a} \cos 2(A - \varphi) i \mu \tau^2 \right\} e^{-\alpha} \cos \tau x_1 e^{i\tau x_0} e^{-i\omega t} + B_R \left\{ i \mu \alpha \left[\frac{R}{a} + \frac{S}{a} \cos 2(A - \varphi) \right] \right\} e^{-\alpha} \cos \tau x_1 e^{i\tau x_0} e^{-i\omega t} \quad (10)$$

式中: A_R 和 B_R 分别为入射瑞利面波中纵波部分和横波部分的振幅; v_R 为瑞利面波传播速度; R 为面应力系数; S 为差应力系数.

$$\tau^2 = \left(\frac{\omega}{v_R} \right)^2, \quad \alpha^2 = \tau^2 - \left(\frac{\omega}{v_P} \right)^2, \quad \beta^2 = \tau^2 - \left(\frac{\omega}{v_S} \right)^2 \quad (11)$$

3 用摆式地震仪的位移记录求解 R 和 S 值

要从式(6), (9)和(10)的钻孔应变观测值 $e_{rr}^P(A)$ 、 $e_{rr}^S(A)$ 和 $e_{rr}^R(A)$ 中求出每一个地震的参数 A_1 、 B_1 、 C_1 、 A_R 、 B_R 和 φ 时, 还需先要求解出每个台站的 R 和 S 值. 为此可在钻孔应变台站上安装摆式地震仪, 用它来求 R 和 S .

摆式地震仪一般都呈南北、东西和垂直方向放置, 以测定位移 u_N 、 u_E 和 u_z , 它们与地震波传递的 x 方向位移 u_x 和与之相垂直的 u_y 之间的关系为:

$$\begin{aligned} u_N &= u_x \cos \varphi - u_y \sin \varphi \\ u_E &= u_x \sin \varphi + u_y \cos \varphi \end{aligned} \quad (12)$$

3.1 P波摆式地震仪的位移

对P波而言,将式(3)代入式(12),令 $z=0$,即为摆式地震仪P波位移 u_N^P 、 u_E^P 和 u_z^P 表达式.由测得的位移 u_N^P 、 u_E^P 和 u_z^P 可计算出 i_P 、 i_S 、 φ 、 K_{pP} 、 K_{pS} 、 ξ 、 η 、 ζ 和 β .当P波的振幅最大时,应有

$$e^{i\xi x_0}e^{-i\omega t}=\cos(\xi x_0-\omega t)=\pm 1$$

用P波3个方向的位移 u_N^P 、 u_E^P 和 u_z^P 的最大振幅解出该次地震的震幅 A_1 及入射方位角 φ .

3.2 S波摆式地震仪的位移($z=0$ 时)

$$\begin{aligned} u_N^S &= \left\{ B_1 \cos \varphi [-i\beta(e^{-i\beta z} - K_{Ss}e^{i\beta z}) - i\xi K_{Sp}e^{i\eta z}] + C_1 \sin \varphi \frac{2i\omega}{v_S \cos i_S} [e^{-i\beta z} + e^{i\beta z}] \right\} e^{i\xi x} e^{-i\omega t} \\ u_E^S &= \left\{ B_1 \sin \varphi [-i\beta(e^{-i\beta z} - K_{Ss}e^{i\beta z}) - i\xi K_{Sp}e^{i\eta z}] - C_1 \cos \varphi \frac{2i\omega}{v_S \cos i_S} [e^{-i\beta z} + e^{i\beta z}] \right\} e^{i\xi x} e^{-i\omega t} \\ u_z^S &= B_1 [-i\zeta(e^{-i\beta z} + K_{Ss}e^{i\beta z}) - i\eta K_{Sp}e^{i\eta z}] e^{i\xi x} e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (13)$$

将测得的S波3个方向的最大位移 u_N^S 、 u_E^S 和 u_z^S 代入式(13)中,可解出该次地震的 B_1 、 C_1 和 φ .

3.3 瑞利面波摆式地震仪的位移($z=0$ 时)

$$\begin{aligned} u_N^R &= (A_R \tau e^{-\varphi} + B_R \hat{e}^{-\hat{\varphi}}) \cos \varphi e^{i\tau x} e^{-i\omega t} \\ u_E^R &= (A_R \tau e^{-\varphi} + B_R \hat{e}^{-\hat{\varphi}}) \sin \varphi e^{i\tau x} e^{-i\omega t} \\ u_z^R &= (A_R i \alpha e^{-\varphi} + B_R i \tau e^{-\hat{\varphi}}) e^{i\tau x} e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (14)$$

将测得的瑞利波3个方向的最大位移代入式(14)中,可解得 A_R 、 B_R 和 φ .
将解出的该次地震的 A_1 、 B_1 、 C_1 、 A_R 、 B_R 和 φ 值代入钻孔应变式(6)、(9)和(10)中(式中的弹性参数用钻孔岩蕊弹性参数代替),用同一地震观测出的钻孔应变的最大振幅 $e_r^P(A)$ 、 $e_r^S(A)$ 和 $e_r^R(A)$ 求解出 $R \cos \xi x_1$ 、 $S \cos \xi x_1$ 、 $R \cos \tau x_1$ 和 $S \cos \tau x_1$ 中有 R 、 S 和 x_1 ,取通过多次地震求解的平均值,再代回式(6)、(9)和(10)中,就可用它求定每一次地震的各种波的振幅和入射方向.

当探头附近的耦合介质为各向异性时(围岩仍假定为各向同性), R 和 S 是应变仪观测方向 A 的函数.为了简便,用椭圆模型的近似式来表示:

$$\begin{aligned} R(A) &= R_0 + R_1 \cos 2(A - A_0) \\ S(A) &= S_0 + S_1 \cos 2(A - A_0) \end{aligned} \quad (15)$$

任一应变观测方向 A_i 的 $R(A_i)$ 和 $S(A_i)$ 值,可由该方位的钻孔应变最大振幅 $e_{rr}^P(A_i)$ 、 $e_{rr}^S(A_i)$ 和 $e_{rr}^R(A_i)$ 求出.若钻孔中安装了2个方向 A_3 和 A_2 的应变探头时, R_0 和 S_0 分别为 $R(A_3)$ 、 $R(A_2)$ 和 $S(A_3)$ 、 $S(A_2)$ 的平均值. R_1 、 S_1 和 A_0 由式(15)解出.经多次地震校核后,取其平均值作为该台站应力系数的各向异性参数.再将式(15)代入式(6)、(9)和(10),就得到耦合介质为各向异性时,由钻孔应变地震波计算地震波参数的公式.

池顺良^[6]早在1980年就已导出计算钻孔应变与应力的关系式,并用北京香山地震台的YRY型应变仪观测的应变地震波记录,计算出地震震级.所得结果与用该台的摆式地震仪的位移记录计算出的地震震级符合得很好^[1].

4 用钻孔应变固体潮资料求R和S值

采用 x 轴向北, y 轴向东, z 轴向上的直角坐标系,以太阳和月球对地球观测点的起潮力

为地层应力,并推导出此地层应力产生的地层应变.用 A 表示应变探头观测的方位角,则钻孔应变为:

$$e'_{rr}(A,t)=\frac{R}{2a}\frac{E}{1-\nu}[e_{\varphi\varphi}+e_{\lambda\lambda}]+\frac{S}{2a}\frac{E}{1+\nu}[(e^{\varphi\varphi}-e_{\lambda\lambda})\cos 2A-e_{\varphi\lambda}\sin 2A] \tag{16}$$

式中: $e^{\varphi\varphi}$, $e_{\lambda\lambda}$ 和 $e_{\varphi\lambda}$ 分别为北南、东西和剪切方向地层的应变.式(16)也可用观测方向的地层线应变和与之相垂直的地层线应变组成的面应变和差应变来表示^[5]:

$$\begin{aligned} e'_{rr}(A,t) &= \frac{R}{2a}\frac{E}{1-\nu}[e_r(A,t)+e_r((A+90^\circ),t)]+ \\ &\frac{S}{2a}\frac{E}{1+\nu}[e_r(A,t)-e_r((A+90^\circ),t)] \end{aligned} \tag{17}$$

式中: E 和 ν 为地层的弹性系数,用岩蕊的弹性参数来代表.考虑到观测值相对于理论值的时间滞后(Δt)以及仪器和耦合的漂移,则钻孔应变为:

$$\begin{aligned} e'_{rr}(A,t) &= \frac{R(A)}{2a}\frac{E}{1-\nu}(h_2-3l_2)[Y(A,t)+Y((A+90^\circ),t)]+ \\ &\frac{S(A)}{2a}\frac{E}{1+\nu}l_2[Y(A,t)-Y((A+90^\circ),t)]+ \\ &\frac{R(A)}{2a}\frac{E}{1-\nu}(h_2-3l_2)\Delta t\frac{\partial}{\partial t}[Y(A,t)+Y((A+90^\circ),t)]+ \\ &\frac{S(A)}{2a}\frac{E}{1+\nu}l_2\Delta t\frac{\partial}{\partial t}[Y(A,t)-Y((A+90^\circ),t)]+ \\ &d+b(t-t_0)+c(t-t_0)^2 \end{aligned} \tag{18}$$

地层线应变为组合勒夫数和由起潮力位计算出的线应变 2 个因子的乘积.式(18)中 h_2 和 l_2 为勒夫数; $[Y(A,t)+Y((A+90^\circ),t)]$ 和 $[Y(A,t)-Y((A+90^\circ),t)]$ 分别为由起潮力位计算出的面应变和差应变; $R(A)$ 和 $S(A)$ 为 A 方向的面应力系数和差应力系数; d 、 b 、 c 为漂移函数的系数; t_0 为所用资料的中心时刻.

$R(A)$ 和 $S(A)$ 是仪器钢筒、耦合介质和围岩同轴介质层的半径和各层的弹性参数的函数.由于耦合介质的内外半径和弹性参数不能测定,各井各方向都有差异,因此不能用文献[5]给出的模型来计算.利用安置于 A 方向的应变探头测得的一组(如 48 小时)钻孔应变固体潮资料 $e'_{rr}(A,t)$,由式(18)平差解出 A 方向的 $R(A)$ 和 $S(A)$.如果不同方向的应变探头的 $R(A)$ 和 $S(A)$ 不一致时,可用式(15)拟合.无须知道各介质层的具体参数即可求解 $R(A)$ 和 $S(A)$,这是本方法的优点.由式(18)平差解出 d 、 b 、 c 、 Δt 、 $\frac{R(A)}{2a}\frac{E}{1-\nu}(h_2-3l_2)$ 和 $\frac{S(A)}{2a}\frac{E}{1+\nu}l_2$ 之值,令

$$\begin{aligned} L_R(A) &= \frac{R(A)}{2a}\frac{E}{1-\nu}(h_2-3l_2)=\frac{R(A)}{2a}\frac{2\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+2\mu}(h_2-3l_2) \\ L_S(A) &= \frac{S(A)}{2a}\frac{E}{1+\nu}l_2=\frac{S(A)}{2a}2\mu l_2 \end{aligned} \tag{19}$$

式中勒夫数 h_2 和 l_2 采用地球潮汐模型值.这是因为勒夫数受全球大结构的控制,局部因素(如地形起伏、介质差异)影响不大.将解出的 R 和 S 值与上节求出的 $R\cos \xi_{x_1}$ 、 $S\cos \xi_{x_1}$ 、 $R\cos \tau_{x_1}$ 和 $S\cos \tau_{x_1}$ 比较,可估算出 x_1 的等效值.其实 x_1 大大小于 P 波和瑞利波的波长,故 $\cos \xi_{x_1} \approx 1$, $\cos \tau_{x_1} \approx 1$.

5 围岩弹性系数的求解及地震震级的计算

在上述讨论中围岩的弹性系数用钻孔岩蕊的弹性系数来代替. 如果没有测定, 用钻孔应变波资料由式(6)、(9)和(10)来求解时, 则含有 R 、 S 、 λ 和 μ 4 个未知数. 在用钻孔应变固体潮求解时, 可得到 $L_R(A)$ 和 $L_S(A)$, 由式(19)可知亦含有 R 、 S 、 λ 和 μ 4 个未知数. 综合二类资料, 可由 $e_r^P(A)$ 、 $e_r^S(A)$ 、 $e_r^R(A)$ 、 $L_R(A)$ 和 $L_S(A)$ 平差求出这 4 个未知数. 如果有足够多方位角的钻孔应变探头资料时, 可求出 R_0 、 R_1 、 S_0 、 S_1 、 A_0 、 λ 和 μ 之值.

钻孔应变仪记录的各类地震波的到时与摆式位移地震仪一样. 因此震中距等参数的计算方法相同. 当求解出 R 和 S 后, 用式(9)和式(10), 根据观测出的某次地震的最大振幅 $e_r^S(A)$ 和 $e_r^R(A)$ 可求出 B_1 、 C_1 、 A_R 和 B_R , 则由式(13)和式(14)($z=0$)即可得到 u_N^S 、 u_E^S 和 u_N^R 、 u_E^R . 由此可得近震震级和面波震级的计算公式:

$$M_L = \log A_{\mu}^S + R(\Delta) + S, \quad A_{\mu}^S = \sqrt{(u_N^S)^2 + (u_E^S)^2}$$

(20)

$$M_S = \log \left[\frac{A_{\mu}^R}{T} \right]_{\max} + \sigma(\Delta) + C, \quad A_{\mu}^R = \sqrt{(u_N^R)^2 + (u_E^R)^2}$$

(21)

[参考文献]

[1] 池顺良. 一种浅孔安装的 YRY-2 型钻孔应变仪在中国华北地区 8 个台站试验观测结果[J]. 地震学报, 1993, 15(2): 222.

[2] 王龙甫. 弹性理论[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 119.

[3] 付承义, 陈运泰, 祁贵仲. 地球物理学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 295, 323, 325, 326, 332.

[4] 王仁, 丁仲一, 殷有泉. 固体力学基础[J]. 北京: 地质出版社, 1979. 188.

[5] 骆鸣津, 顾梦林. 用引潮力进行苦孔应变——应力的原地标定[J]. 地壳形变与地震, 1989, 9(4): 57.

[6] 池顺良. 用钻孔应变计地震记录计算地震震级[J]. 鹤壁科技, 1980, (2): 27.

DETERMINATION OF SEISMIC PARAMETERS AND MECHANICAL PARAMETERS

OF STRATUM USING DATA OF BOREHOLE STRAIN TIDE

AND STRAIN SEISMIC WAVE

LUO Ming-jin¹, CHI Shun-liang²

(1. *Seismological Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450000, China;*

2. *Seismological Bureau of Hebi City, Hebi 458000, China*)

Abstract: Methods determining seismic parameters and mechanical parameters of stratum using data of borehole strain tide and strain seismic wave when elastic parameters of coupling medium in borehole can not be directly determined are introduced. That the substitution of equilibrium equation for wave equation will not only enable the use of borehole strain seismic wave to monitor earthquake, but also greatly simplify the determination methods as compared with direct use of wave equation.

Key words: Strain tide; Strain seismic wave; Coupling medium