

刘春平、石云、万飞, 2011, 不排水条件下裂隙流体压力对引潮高的振幅比和位相差的响应, 中国地震, 27(3), 300~308。

不排水条件下裂隙流体压力对引潮高的 振幅比和位相差的响应

刘春平 石云 万飞

防灾科技学院, 河北三河燕郊开发区 065201

摘要 本文基于裂隙潮汐应力分析, 提出了不排水条件下, 单裂隙和多裂隙流体压力-引潮高的振幅比和位相差响应模型。基于响应模型的分析计算, 绘制了单裂隙流体压力振幅比和位相差与裂隙产状的关系曲线, 分析了岩体弹性参数(λ 、 μ)和 Skempton 系数(B)对裂隙流体压力振幅比和位相差的影响。结果表明, M2 和 O1 波裂隙流体压力-引潮高的振幅比随裂隙倾角(DIP)增加而增加, 位相差都在 $\pm 165^\circ \sim \pm 180^\circ$ (DIP $< 15^\circ$) 和 $0^\circ \sim \pm 10^\circ$ (DIP $> 15^\circ$) 之间, 且两波位相差符号相反; 流体压力振幅比线性地响应岩体弹性常数(λ 、 μ)和 Skempton 系数(B)的变化, 但位相差几乎不受裂隙和岩体弹性参数的影响。

关键词: 裂隙 流体压力 潮汐 振幅比 位相差

[文章编号] 1001-4683(2011)03-0300-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 前言

裂隙含水带是众多城市和工矿地下供水的水源地, 大部分地震流体监测井用于监测裂隙含水带(段), 裂隙含水带特征分析对评价和保护裂隙地下水资源、分析裂隙地下水异常变化具有重要意义。引潮力作为已知力作用于含水层(带), 是应力-渗流耦合的天然试验场(Neuzil, 2003)。利用水位对引潮力的响应来量化含水带特征, 早期如研究水位对固体潮的响应依赖于含水层弹性储水系数(Bredehoeft, 1967), 近年关于水位(孔压)对潮汐应力的响应分析(Doan et al., 2006)、滨海越流含水层地下水对潮汐波动响应(Jiao et al., 1999)和非承压含水层水位对潮汐和气压荷载响应(Rojstaczer et al., 1990)等, 都是应用多孔介质应力-渗流耦合模型进行研究。应用引潮分析理论研究各向异性裂隙含水带特征的文章很少。Hanson 等(1982)和 Burbey(2010)等应用潮汐分析理论量化裂隙特征, 仍然是基于多孔介质模型。由于裂隙不连续和各向异性, 裂隙应变导致的流体压力分布与多孔介质迥然不同。Bower(1983)提出了单裂隙潮汐有效应力计算公式, 但没有明确提出裂隙潮汐应力的振幅和位相公式, 不便于分析裂隙特征对振幅和位相的影响。本文在 Bower(1983)研究的基础上, 提出了单裂隙和多裂隙流体压力响应引潮高的振幅比和位相差模型, 通过该模型计算振

[收稿日期] 2011-06-01

[项目类别] 地震行业科研专项(200808055, 200808079)、河北省教育厅科学研究计划项目(22009104)和防灾减灾青年科技基金(2010001)联合资助

[作者简介] 刘春平, 男, 生于 1962 年, 教授, 主要从事地下水动力学和地震水文学研究, E-mail: lcp@cipd.edu.cn

幅比和位相差与裂隙产状(倾角、走向)的关系,进而分析岩体和裂隙弹性参数对振幅比和位相差的影响。

1 单裂隙潮汐流体压力振幅和位相响应模型

如果不考虑地形地貌和海洋潮汐对岩体形变的影响,Bower(1983)通过单裂隙潮汐应力应变分析,得到给定产状裂隙的有效法向应力

$$\sigma' = \varphi_0(c \cos \beta + d \sin \beta) \quad (1)$$

这里, φ_0 是引潮高, β 是与小时角有关的变量(Bower,1983)。(1)式中系数 c 和 d 分别为

$$\begin{aligned} c &= [\lambda a(A^2 + E^2) + 2\mu(a_{11}A^2 + a_{22}E^2)] - [\lambda a(A'^2 + E'^2) + 2\mu(a_{11}A'^2 + a_{22}E'^2)]K_f/K \\ d &= \mu a_{12}AE - (\mu a_{12}A'E')K_f/K \end{aligned} \quad (2)$$

其中, λ, μ 是距裂隙一定距离的岩体弹性常数; a_{ij} 是潮汐势作用下的应变分量系数(Bower,1983), $a = a_{11} + a_{22} + a_{33}$,为轴向应变分量系数 $a_{ii}(i=1,2,3)$ 之和; K_f 和 K 分别为流体不可压缩模量和岩石体积模量;裂隙法向方向余弦为

$$\begin{aligned} A &= \sin(\text{DIP}) \cos(\text{AZ}) \\ E &= \sin(\text{DIP}) \sin(\text{AZ}) \end{aligned} \quad (3)$$

裂隙平面的方向余弦为

$$\begin{aligned} A' &= \sin(\text{DIP}) \cos(\text{AZ}) \\ E' &= \cos(\text{DIP}) \sin(\text{AZ}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中,DIP和AZ是裂隙的倾角和走向。

根据Bower提出的裂隙潮汐有效应力公式(1),引入裂隙Skempton系数 B ,表示流体承担的应力占总应力的比值,值域为 $[0,1]$ 。当 $B=0$ 时,裂隙骨架承担了全部应力;当 $B=1$ 时,裂隙流体承担了全部应力。潮汐应力作用下的裂隙流体压力为

$$h = B\sigma' = B\varphi_0 \sqrt{c^2 + d^2} \cos(\beta - \varphi) \quad (5)$$

令 $h_0 = B\varphi_0 \sqrt{c^2 + d^2}$;

$$m = h_0/\varphi_0 = B \sqrt{c^2 + d^2} \quad (6)$$

分别为裂隙流体压力振幅和流体压力-引潮高的振幅比; $\alpha-\varphi$ 为裂隙流体压力位相; $-\varphi$ 为裂隙流体压力-引潮高的位相差,当 $-\varphi$ 为正和负值时,则分别表示超前和滞后引潮高。将(3)和(4)式代入(2)式可知, $\text{tg}(-\varphi) = -d/c$ 与裂隙倾角(DIP)无关,当走向AZ确定后, d/c 是常数,记为 ξ ,或 $d = \xi c$ 。然而, $-\varphi$ 并不是常数,因为 $\cos(-\varphi)$ 和 $\sin(-\varphi)$ 的符号决定 $-\varphi$ 的象限。如 c 和 $-d$ 同为正或同为负, $-\varphi$ 在第1或第3象限; c 为正, $-d$ 为负, $-\varphi$ 在第4象限; c 为负, $-d$ 为正, $-\varphi$ 在第2象限。因此,位相差 $-\varphi$ 的表达式为

$$-\varphi = \begin{cases} \text{arctg}(-d/c) & 1 \text{ 和 } 4 \text{ 象限} \\ \pi + \text{arctg}(-d/c) & 2 \text{ 象限} \\ \text{arctg}(-d/c) - \pi & 3 \text{ 象限} \end{cases} \quad (7)$$

(6)和(7)式表明,裂隙流体压力振幅(或振幅比)与岩体弹性常数(λ, μ)、裂隙产状(DIP、AZ)和裂隙Skempton系数(B)有关;裂隙位相差与岩体弹性常数(λ, μ)、裂隙走向AZ有关,而与裂隙倾角(DIP)和裂隙Skempton系数(B)无关。

上述单裂隙和多裂隙潮汐流体压力振幅和位相计算公式都要求满足不排水条件,即含水带与井和隔水带之间不发生水流交换,或水流交换时间很短,近似满足不排水条件。

2 多裂隙潮汐流体压力的振幅和位相响应

设有 n 条裂隙,距裂隙一定距离岩体的弹性常数仍为 λ 和 μ ,且第 i 条裂隙的走向和倾角为 AZ_i 和 DIP_i ,Skempton 系数为 B_i ,由(3)和(4)式计算第 i 条裂隙法向和平面的方向余弦为 A_i 、 E_i 和 A'_i 、 E'_i ,则第 i 条裂隙潮汐流体压力可由(5)式计算为

$$h_i = B_i \varphi_0 (c_i \cos \beta + d_i \sin \beta) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

这里, c_i 和 d_i 由(2)式计算。

假设裂隙间连通性好,在潮汐应力产生的流体压差驱动下,裂隙间发生水流交换,使流体压力在裂隙间瞬时达到平衡,则多裂隙流体压力近似为各裂隙流体压力的质量加权平均值,即

$$H = \sum_{i=1}^n (\rho v_i) h_i = \varphi_0 (C \cos \alpha + D \sin \alpha) \quad (8)$$

其中, ρ 为流体密度,

$$C = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n (v_i B_i c_i) \quad (9)$$

$$D = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n (v_i B_i d_i)$$

v_i 为第 i 条裂隙体积与裂隙总体积之比,值域(0,1)。相对于(6)、(7)式,可写出多裂隙流体压力-引潮高的振幅比和位相差分别为

$$M = \sqrt{C^2 + D^2} \quad (10)$$

$$-\Phi = \begin{cases} \arctg(-D/C) & 1 \text{ 和 } 4 \text{ 象限} \\ \pi + \arctg(-D/C) & 2 \text{ 象限} \\ \arctg(-D/C) - \pi & 3 \text{ 象限} \end{cases} \quad (11)$$

3 裂隙产状和弹性参数对潮汐流体压力振幅和位相的影响

3.1 振幅比和位相差与裂隙产状的关系

为简单起见,假设 $B=1$,讨论 m 和 φ 与裂隙产状(DIP、AZ)的关系。设岩体弹性参数 $\lambda = 1.2 \times 10^8 \text{ cm}$, $\mu = 1.5 \times 10^8 \text{ cm}$,则 $K = \lambda + 2\mu/3 = 2.2 \times 10^8 \text{ cm}$ (为与引潮高单位一致,参数单位都化成 cm,水柱高), $\theta = 40^\circ$ (北纬)。由(6)式计算裂隙产状(DIP, AZ)与裂隙流体压力振幅比的关系如图1。

图1表明:①潮汐力作用下,裂隙流体压力-引潮高的振幅比随裂隙倾角增加而增加,倾角 90° 时的振幅比最大;②随裂隙走向由 $0^\circ/180^\circ$ 、 $15^\circ/165^\circ$ 、 \dots 变化到 90° 时, M2 波裂隙流体压力-引潮高的振幅比越来越小(图1(a)),而 O1 波裂隙流体压力-引潮高的振幅比增加(图1(b)),即两波振幅比随走向变化呈现相反变化趋势。

图1还给出了井的潮汐效应与裂隙产状的关系。当裂隙倾角较小,如图1中 DIP 在 13°

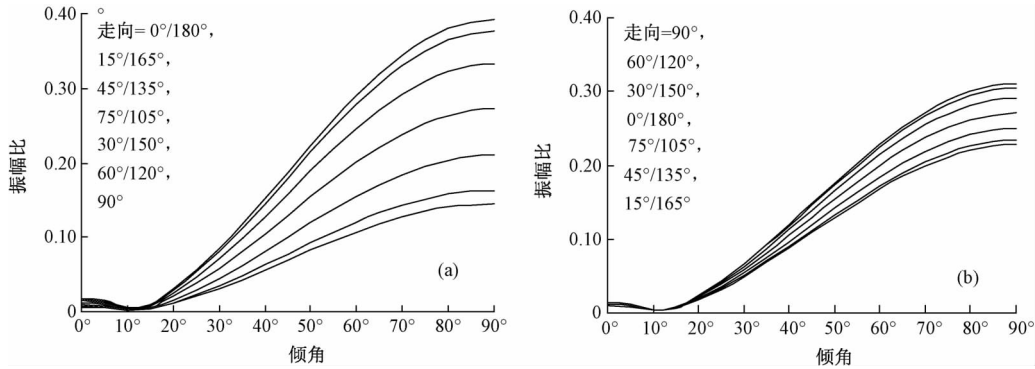


图 1(a) M2 波作用下裂隙流体压力-引潮高的振幅比与裂隙产状的关系

图 1(b) O1 波作用下裂隙流体压力-引潮高的振幅比与裂隙产状的关系

附近,振幅比为零,无潮汐效应; $DIP < 25^\circ$,振幅比 < 0.05 (图 1(a)),振幅小于 1.25cm,裂隙潮汐效应很弱。 DIP 越大,振幅或振幅比越大,裂隙潮汐效应越强。因此,裂隙产状是影响裂隙潮汐效应的最主要因素。可根据裂隙产状和裂隙导水性确定裂隙的潮汐振幅和位相,进而解释为什么有的井有潮汐效应,而有的井没有,并以此选择含水段进行水位监测。

在(2)式中, c 和 d 表达式分别含 A 、 E 和 A' 、 E' 两项,它们分别是由裂隙法向应力和平面应力作用产生的,其中,第 1 项为正,第 2 项为负。当裂隙倾角 $DIP = 0$ 时,法向应力为零($A = E = 0$),第 1 项为零,但平面应力最大,第 2 项(绝对值)最大(图 1);随 DIP 为 $0 \sim 13^\circ$, c 和 d 的绝对值减少,振幅比减少,在 $DIP = 13^\circ$ 附近,两项正负相抵,振幅趋于零;随 DIP 继续增加,第 1 项增加,第 2 项减小,故 c 和 d 增加,振幅比持续增加。

由(7)式计算裂隙产状(DIP , AZ)与裂隙流体压力位相差关系如图 2 所示。图 2(a) 显示,在 M2 波作用下, AZ 在 $15^\circ \sim 90^\circ$ 时,随 DIP 增加,位相差从 $165^\circ \sim 180^\circ$ 的高位下降,在 $DIP = 15^\circ$ 左右时,急降至 $-10^\circ \sim 0^\circ$; AZ 在 $105^\circ \sim 180^\circ$ 范围,随 DIP 增加,位相差从 $-165^\circ \sim -180^\circ$ 低位上升,在 $DIP = 15^\circ$ 左右,急升至 $0^\circ \sim 10^\circ$ 。图 2(b) 显示, O1 波作用下,走向在 $15^\circ \sim 90^\circ$ 范围,随 DIP 增加,位相差从 $-170^\circ \sim -180^\circ$ 低位,在 $DIP = 15^\circ$ 左右,急升至 $0^\circ \sim 7^\circ$; AZ 在 $105^\circ \sim 180^\circ$ 范围, DIP 增加,位相差从 $170^\circ \sim 180^\circ$ 高位,在 $DIP = 15^\circ$ 左右,急降至 $-7^\circ \sim 0^\circ$ 。图 2 还表明,一定裂隙产状情况下, M2 和 O1 波裂隙流体压力位相差的符号相反。

上述表明位相差与 DIP 无关。在图 2 中,位相差在 $DIP = 15^\circ$ 左右发生突变,并不是 $-d/c$ 发生变化,而是位相差(角度)的象限发生变化,分别从 2、3 象限变化到 4、1 象限。 $\xi = d/c$ 随 AZ 变化,就本例而言, $|\xi|$ 的上限分别是 10° (对 M2 波)和 7° (对 O1 波)的正切值,即 $|\xi| < 0.18$ 和 $|\xi| < 0.12$ 。

3.2 振幅比和位相差与岩体和裂隙弹性参数关系

在振幅比和位相差公式(6)、(7)和(10)、(11)式中,涉及的介质弹性参数可分为 3 类。一是距裂隙一定距离的岩体的弹性常数 λ 、 μ 和 $K(\lambda = \mu/3)$,潮汐力通过岩体作用到裂隙壁上。二是裂隙 Skempton 系数(B),它与完全排水裂隙不可压缩性模量 $C2b$ (Bower, 1983) 成负相关,这里, C 是裂隙壁不可压缩模量系数; $2b$ 是裂隙开度。三是流体不可压缩模量 K_f ,一般情况

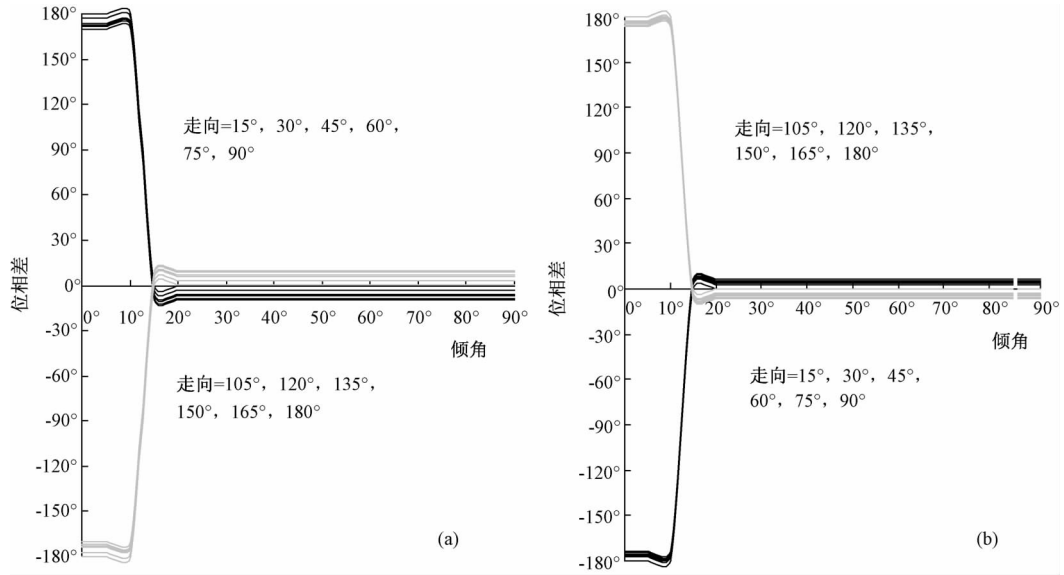


图 2(a) M2 波作用下裂隙流体压力-引潮高的位相差与裂隙产状(倾角和走向)的关系图

图 2(b) O1 波作用下裂隙流体压力-引潮高的位相差与裂隙产状(倾角和走向)的关系图

下, K_f 可假定为不随应力变化的常数。这 3 类介质弹性参数的一般关系为 $K \gg K_f < C2b$ 。

3. 2. 1 岩体弹性常数(λ, μ)对振幅比和位相差的影响

在地震断裂带或附近,距裂隙一定距离的岩体也可能发生非弹性形变,其弹性参数 λ, μ 的变化是岩体损伤系数(γ)的函数,一般在岩石流变模型中都假设弹性参数随损伤系数(γ)变化关系为 $\lambda = \lambda_0 - \gamma\lambda_1, \mu = \mu_0 - \gamma\mu_1$ (Agnon et al, 1995; Hamiel et al, 2004)。损伤系数(γ)值域为 $[0, 1]$, 用来描述岩石从理想弹性($\gamma = 0$)到完全破坏($\gamma = 1$)的过程。仍以单裂隙为例,假设 $B = 1$, 纬度 $\theta = 45^\circ$, 裂隙倾角 $DIP = 40^\circ$, 走向 $AZ = 65^\circ$, 流体压缩模量 $K_f = 1 \times 10^7 \text{ cm}$, $\lambda_0 = 9 \times 10^7 \text{ cm}$, $\mu_0 = 1.2 \times 10^8 \text{ cm}$, $\lambda_1 = 5.0 \times 10^7 \text{ cm}$, $\mu_1 = 8.0 \times 10^7 \text{ cm}$ 。当损伤系数 $\gamma = 0, 0.05, \dots, 0.99$ 时, λ, μ 和 K 值的变化范围分别是 $4.1 \times 10^7 \sim 9 \times 10^7 \text{ cm}$, $4.1 \times 10^7 \sim 1.2 \times 10^8 \text{ cm}$ 和 $6.8 \times 10^7 \sim 1.7 \times 10^8 \text{ cm}$ 。由(6)、(7)式计算裂隙流体压力与引潮高的振幅比和位相差随损伤系数(γ)变化如图 3。图 3 表示,在 M2 和 O1 波作用下,随损伤系数(γ)增加, M2 和 O1 波的流体压力与引潮高的振幅比(m)几乎是线性地减少,而位相差(φ)几乎不发生变化。因此,在应力作用下,特别是 γ 变化较小情况下,可以推定 m 随 γ 的

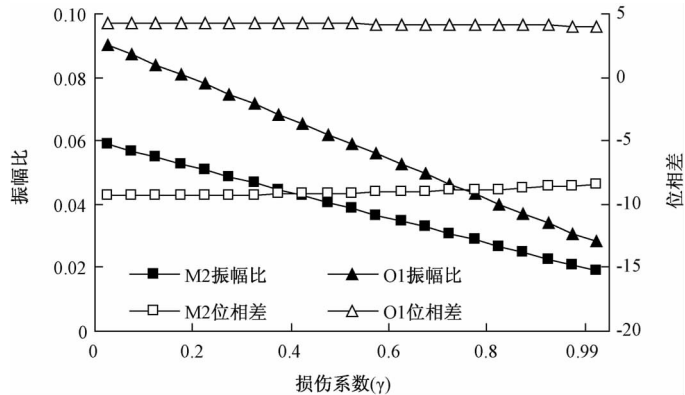


图 3 M2 和 O1 波裂隙流体压力的振幅比和位相差随损伤系数变化

变化范围分别是 $4.1 \times 10^7 \sim 9 \times 10^7 \text{ cm}$, $4.1 \times 10^7 \sim 1.2 \times 10^8 \text{ cm}$ 和 $6.8 \times 10^7 \sim 1.7 \times 10^8 \text{ cm}$ 。由(6)、(7)式计算裂隙流体压力与引潮高的振幅比和位相差随损伤系数(γ)变化如图 3。图 3 表示,在 M2 和 O1 波作用下,随损伤系数(γ)增加, M2 和 O1 波的流体压力与引潮高的振幅比(m)几乎是线性地减少,而位相差(φ)几乎不发生变化。因此,在应力作用下,特别是 γ 变化较小情况下,可以推定 m 随 γ 的

增加呈线性减少,而 φ 不变。

3.2.2 裂隙 Skempton 系数变化对振幅比和位相差的影响

由于裂隙壁的不可压缩模量 ($C2b$) 一般远小于岩体的体积模量 (K), 故应力作用下, 裂隙最先、也最容易发生损伤 (或非线性弹性形变), 导致裂隙 Skempton 系数 (B) 变化。

对单裂隙, 振幅比 (m) 与 B 有关, 且随 B 增加 (或减少), 振幅比线性地增加 (或减少), 但 B 的变化不影响单裂隙流体压力的位相差。

对多裂隙, 振幅比和位相差公式 ((10) 和 (11)) 都显示与裂隙 Skempton 系数 ($B_i, i = 1, 2, \dots, n$) 有关, 需要分析 B_i 变化对振幅比和位相差的影响程度。

假设多裂隙含水带中, 第 j 条裂隙 Skempton 系数 B_j 的变化率 $\varepsilon = \Delta B_j / B_j$, 利用 (10) 式求 M 对 B_j 的导数, 得到 B_j 变化率 ($\varepsilon_j = \Delta B_j / B_j$) 导致振幅比的变化量为

$$\Delta M_j = \varepsilon_j (CC_j + DD_j) \quad (12)$$

多裂隙流体的振幅比变化为 $\Delta M = \sum \varepsilon_j (CC_j + DD_j)$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。一个特例是各条裂隙 B_j 的变化率 ε_j 相同, 且都等于 ε 时, 裂隙流体振幅比变化为 $\Delta M = \varepsilon M^2$ 达到最大。

B_j 变化率 (ε_j) 导致位相差的变化量由 (12) 式得到

$$\Delta \Phi_j = \frac{\varepsilon_j (D_j C - C_j D)}{M^2} \quad (13)$$

同样, 当各条裂隙 B_j 的变化率 ε_j 相同, 且都等于 ε 时, 由 (13) 式得到, 位相差变化量 $\Delta \Phi = 0$ 。

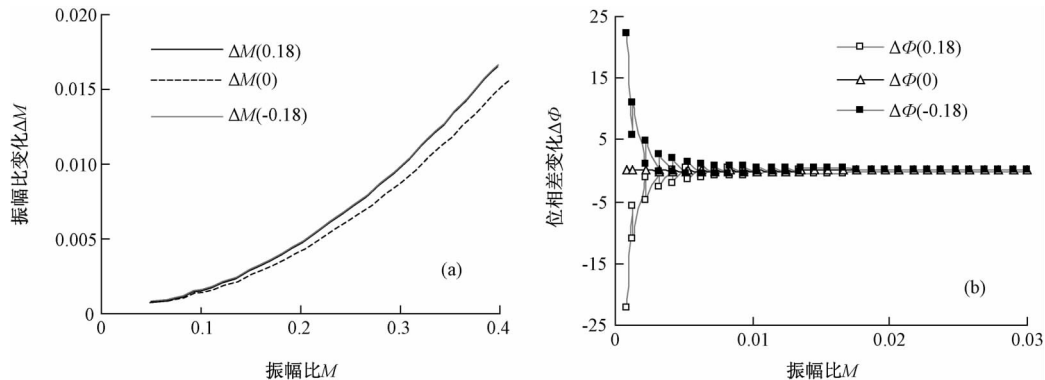


图 4(a) $C_{i \neq j}, D_{i \neq j}$ 较小, $\varepsilon_j = 0.1$ 的情况下, 振幅比变化 ΔM 与振幅比 M 的关系

图 4(b) $C_{i \neq j}, D_{i \neq j}$ 较小, $\varepsilon_j = 0.1$ 的情况下, 位相差变化 $\Delta \Phi$ 与振幅比 M 的关系

为进一步揭示 B_j 变化率 (ε_j) 对振幅比和位相差的影响, 假设岩体弹性常数 (λ, μ)、流体不可压缩系数 (K_f) 和地理纬度等与 3.1 节算例一致。为讨论方便, 将 (9) ~ (11) 式中 C 和 D 的表达式写成 $C = C_{i \neq j} + C_j, D = D_{i \neq j} + D_j$, 其中, C_j, D_j 是第 j 条裂隙对 C 和 D 的贡献; $C_{i \neq j}, D_{i \neq j}$ 是除第 j 条裂隙的所有其他裂隙对 C, D 的贡献。从式 (12)、(13) 可知, 在 $C_{i \neq j}, D_{i \neq j}$ 较小情况下, C_j 较小, $D_j (= \xi C_j)$ 更小, 则 M 小, ΔM 更小, 但因 M 小, $\Delta \Phi$ 变化较大; C_j 较大, $D_j = \xi C_j$ 较大, 则第 j 条裂隙是含水带主裂隙, $C \approx C_j, D_j \approx D, \Delta M \approx \varepsilon M^2$ 达到最大, 故 M 和 ΔM 都很大, 但因 M 较大, $\Delta \Phi$ 将趋于零。在 $C_{i \neq j}, D_{i \neq j}$ 较大情况下, 随 C_j, D_j 增加, M 增加, 但因第 j 条裂隙非主裂隙, ΔM 变化率并不大, 也因为 M 较大, $\Delta \Phi$ 将趋于零。

因此,假设一组 $C_{i \neq j} = -3.19 \times 10^{-3}$ 、 $D_{i \neq j} = -1.48 \times 10^{-7}$ 的较小值和一组 $C_{i \neq j} = -3.19 \times 10^{-1}$ 、 $D_{i \neq j} = 1.48 \times 10^{-2}$ 的较大值,考察 ΔM 和 $\Delta \Phi$ 对第 j 条裂隙 B_j 变化率(ε_j) 的响应。

首先考察 $C_{i \neq j} = -3.19 \times 10^{-3}$ 、 $D_{i \neq j} = -1.48 \times 10^{-7}$ 的较小值情况。图 4(a) 是 $\varepsilon_j = 0.1$ 时,第 j 条裂隙走向 $AZ = 60^\circ, 0^\circ$ 和 120° 三种情况(ξ 值分别为最大(0.18), 0 和最小(-0.18))下振幅比变化值(ΔM)与振幅比(M)的关系。图中 $\xi = 0.18$ 和 -0.18 两条曲线完全重合, $\xi = 0$ 曲线稍偏离前两条曲线,但基本趋于一致,表明第 j 条裂隙的走向对 ΔM 的影响很小,可忽略不计。随 M 增加, ΔM 也增加,在 $M = 0.04$ 时, $\Delta M \approx \varepsilon_j M^2 = 0.016$ 。对于 M2 波,大约相当于振幅变化 0.4cm,这是一个比较大的变化值。图 4(b) 是位相差变化($\Delta \Phi$)与振幅比(M)的关系。该图表明, $\xi_j = 0$, $\Delta \Phi$ 基本上趋于零,这是因为在(13)式中 $D_j = 0$, $C_{i \neq j}$ 趋于零。 $\xi_j = 0.18$ 和 -0.18 两条位相差变化曲线基本上以 $\Delta \Phi = 0$ 呈对称分布,在 M 较小时, $\Delta \Phi$ 较大,如 $M = 0 \sim 6 \times 10^{-3}$,最大 $\Delta \Phi$ 达到 $\pm 23^\circ$,但随 M 增加, $\Delta \Phi$ 迅速减小,当 $M > 6 \times 10^{-3}$, $\Delta \Phi$ 已趋于 0° 。由于 $M = 6 \times 10^{-3}$,相对于 M2 波的流体压力振幅 $H_0 < 0.15$ cm,可认为裂隙没有潮汐效应。

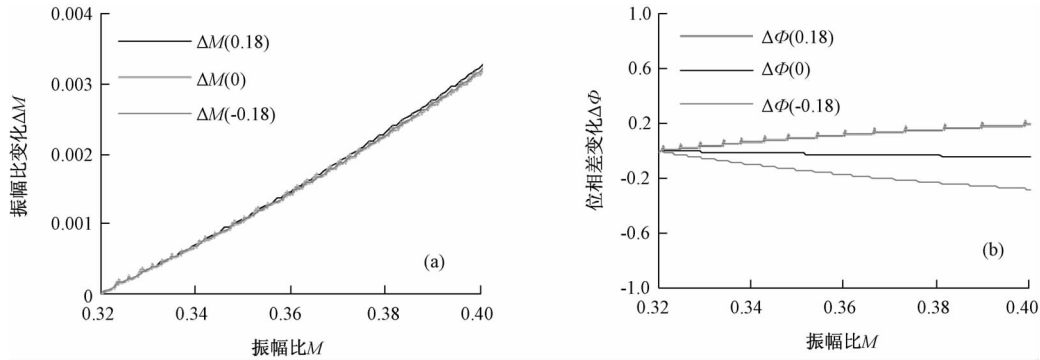


图 5(a) $C_{i \neq j}$ 、 $D_{i \neq j}$ 较大, $\varepsilon_j = 0.1$ 的情况下, 振幅比变化 ΔM 与振幅比 M 的关系

图 5(b) $C_{i \neq j}$ 、 $D_{i \neq j}$ 较大, $\varepsilon_j = 0.1$ 的情况下, 位相差变化 $\Delta \Phi$ 与振幅比 M 的关系

$C_{i \neq j} = 3.19 \times 10^{-1}$ 、 $D_{i \neq j} = 1.48 \times 10^{-2}$ 的值较大情况下的振幅比和位相差变化如图 5 所示。图 5(a) 表明, ΔM 随 M 增加线性增加,但增加斜率小,在 $M = 0.4$ 时, $\Delta M < 3 \times 10^{-3}$,对于 M2 波,相当于变化了 0.075cm,可以忽略不计。图 5(b) 中,位相差变化也都在 0.3° 以内,可忽略不计。

因此,具有一定潮汐效应的裂隙含水带,裂隙 B 值变化对位相差影响可忽略不计,只有在 $C_{i \neq j}$ 和 $D_{i \neq j}$ 较小,即第 j 条裂隙为主裂隙情况下,主裂隙的 B 值变化可能对振幅比产生影响。

4 结语

根据以上研究可得如下结论:①裂隙产状是判定井水位潮汐效应好坏的主要因素之一,在本文给定条件下,当单裂隙或含水带主裂隙倾角在 13° 附近,潮汐流体压力振幅趋于零,潮汐效应很弱;②裂隙产状一般不随应力变化,距裂隙一定距离的岩体弹性参数 λ 、 μ 和 K ,

一般在静应力作用下也不会发生变化,即使变化,也只对潮汐流体压力的振幅产生影响,对位相差的影响可忽略不计;③由于裂隙面上应力集中,裂隙不可压缩模量 $C2b$ 又远小于岩体体积模量(K),故在应力作用下,裂隙 Skempton 系数(B)最先、也最容易产生变化。 B 值变化对含水带位相差影响不大,只有在主裂隙 B 值发生变化时,对含水带流体压力的振幅产生影响。因此,不排水条件下,裂隙流体压力的位相基本保持不变,潮汐井水位位相变化主要与裂隙之间、裂隙含水带与隔水带和井之间的水流交换有关,结合影响水流交换的主要参数如径向导水系数(Hsieh et al,1987;刘春平等,2011b)和不排水条件下含水带与隔水带流体压力的振幅比(刘春平等,2011a)等,可进一步探讨含水带在应力作用下的形变过程。

参考文献

- 刘春平、唐彦东、廖欣等,2011a,线弹性含水层井水位、孔压对引潮位响应的研究及其应用,地震地质,33(),133~140。
- 刘春平、唐彦东、廖欣,2011b,垂向和径向排水的潮汐水位振幅和位相变化研究,地震,31(1),68~76。
- Agnon A, Lyakhovsky V,1995, Damage distribution and localization during dyke intrusion, in The physics and chemistry of dykes, pp. 65~78, eds Baer, G. and Heimann A., Balkema, Rotterdam.
- Bredehoeft J D,1967, Response of well-aquifer systems to earth tides, Journal of Geophysical Research,72(12),3075~3087.
- Bower D R,1983, Bedrock fracture parameters from the interpretation of well tide, Journal of Geophysical Research,88(B6),5025~5035.
- Burbey T J,2010, Fracture characterization using earth tide analysis. Journal of Hydrology,380(2010),237~246.
- Doan M L, Brodsky E E, Prioul R et al,2006, Tidal Analysis of Borehole Pressure: A Tutorial. University of California, Santa Cruz.
- Hanson J M, Owen L B,1982, Fracture orientation analysis by the solid earth tidal strain method, In: 57th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME. American Institute of Mechanical Engineers, New Orleans, LA.
- Hamiel Y, Lyakhovsky V, Agnon A,2004, Coupled evolution of damage and porosity in poroelastic media: theory and applications to deformation of porous rocks, Geophysics J Int, 156,701~713.
- Hsieh P A, Bredehoeft J D, Farr J M,1987, Determination of aquifer transmissivity from earth tide analysis, Water Resources Research,23(10),1824~1832.
- Jiao J J, Tang Z,1999. An analytical solution of groundwater response to tidal fluctuation in a leaky confined aquifer, Water Resources Research,35(3),747~751.
- Neuzil C E,2003, Hydromechanical coupling in geologic processes, Hydrogeology Journal,11,41~83.
- Rojstaczer S, Riley F S,1990, Response of the Water Level in a Well to Earth Tides and Atmospheric Loading Under Unconfined Conditions, Water Resources Research,26(8),1803~1817.

The response of amplitude ratio and phase shift of fracture fluid pressure to tide generating height in undrained condition

Liu Chunping Shi Yun Wan Fei

Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065200, Hebei, China

Abstract Based on the tidal stress on the fracture, the amplitude ratio and phase shift models of fracture fluid pressure (FFP) response to tide generating height (TGH) are presented in undrained single fracture and multiple fractures. The response model is applied to calculate the fluid pressure amplitude ratio and phase shift with fracture occurrence, and to investigate the response of FFP amplitude ratio and phase shift to the changes of the rock elastic parameters (λ , μ) and fracture Skempton coefficient (B). The results show that the FFP-TGH's amplitude ratio of M2 and O1 waves increases with the fracture angle (DIP), with the phase shift at $\pm 165^\circ \sim \pm 180^\circ$ in $\text{DIP} < 15^\circ$ and $\pm 10^\circ \sim 0^\circ$ in $\text{DIP} > 15^\circ$ and opposite symbols for M2 and O1 waves. The FFP amplitude ratio responses linearly to the changes of rock elastic constants (λ , μ) and fracture Skempton coefficient (B), but phase shifts are almost free from the impact of media elastic parameter changes.

Key words: Fracture Fluid pressure Tide Amplitude ratio Phase shift