

断层活动的重力效应*

张 超 赵国光

(国家地震局地震地质大队)

摘要

本文对介质变形造成的重力变化作了定量分析,通过质点位移法(拉格朗日法)导出了介质位移场和由它产生的附加重力场之间的积分关系式。

应用已有的弹性和粘弹性半空间任意倾角断层位错的位移表达式,本文通过三维空间数值积分,计算了弹性介质和广义开尔文介质中断层不同的运动方式所产生的地表附加重力场,以及介质流变性导致的重力随时间的变化趋势。

参考唐山地震前沧东断裂的活动和震时断层错动,计算了震前震后相应的重力变化,其结果与实测重力资料有一定程度的符合。

一、引言

近年来,对构造变形所产生的重力效应的研究,已成为地球物理学界广泛注意的一个课题。关于局部区域形变与重力变化的一般关系,已有一些学者作了分析和讨论^[4-9]。作为对具体模型的计算,惠特科姆(J. H. Whitcomb, 1976)曾用一个嵌入地面的均匀变形圆柱体模拟构造变形以定性讨论重力变化的量级。最近,沃希(J. B. Walsh, 1979)又提出应用“互易定理”计算重力的方法,并计算了半无限体中均匀膨胀源和一个无限长逆冲断层的重力效应。然而,这种模拟与实际情况仍有较大的出入。为了改进对构造变形引起的重力变化的定量研究,本文导出了变形位移场和它产生的附加重力场之间的积分关系式,并应用已有的弹性和粘弹性半空间中任意倾角断层位错的位移表达式^[1,2],通过数值积分,计算了断层活动引起的地表附加重力场。尽管数值积分计算重力变化的方法曾被认为很复杂,然而只要采用适当的方法,这一途径还是可行的。

二、形变位移场与附加重力场的积分关系式

分析介质变形与重力的关系可以通过两种途径,一是考虑组成变形体的各个质量单元与重力参考点间相对位置变化的影响,即拉格朗日法。也可以认为,重力变化是空间坐标确定的固定单元中包含介质的密度改变的结果,即为欧拉法。两者的结果是一致的,但是作为建立位移场和附加重力场的关系,特别是当重力参考点依附于变形体表面时,采用拉格朗日法是比较简便的。

* 1979年12月3日收到。1980年9月29日收到修改稿。

众所周知,充满于闭域 V 的连续介质的引力势为:

$$U = -G \int_V \frac{\rho dV}{R} \quad (1)$$

式中 G 为万有引力常数, R 是参考点与质点的距离。

由于采用拉格朗日法,变形单元质量守恒,则 $d(dm) = d(\rho dV) = 0$, 则变形体导致的引力势增量(见文献 [4], [5])为:

$$dU = G \int_V \frac{\rho dR}{R^2} dV \quad (2)$$

上式在 $R \gg dR$ 时成立,在更一般的情况下,介质变形产生的引力势增量应表示为:

$$\Delta U = -G \int_V \left[\frac{\rho dV}{R + \Delta R} - \frac{\rho dV}{R} \right] = G \int_V \frac{1}{1 + \Delta R/R} \cdot \frac{\Delta R}{R^2} \rho dV \quad (3)$$

式中 ΔR 为变形后质元与参考点距离的增量,当 $\Delta R/R \rightarrow 0$ 时,(3)式就变为(2)式的形式。

取空间直角坐标如图 1 所示,密度为 $\rho(x, y, z)$ 的介质充满于闭域 V 中,参考点 Q 的

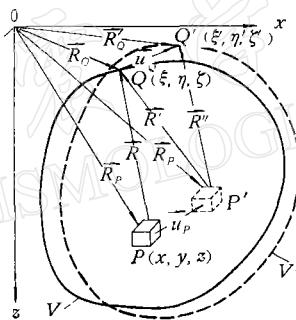


图 1

坐标为 (ξ, η, ζ) ,若介质的位移矢量为 $\mathbf{u}(x, y, z)$,位于 $P(x, y, z)$ 点的质元在变形后移至 P' 点,则变形前后该质元与 Q 点的距离分别为:

$$R = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2} \quad (4)$$

$$R' = \sqrt{[\xi - x - u_x(x, y, z)]^2 + [\eta - y - u_y(x, y, z)]^2 + [\zeta - z - u_z(x, y, z)]^2} \quad (5)$$

式中 u_x, u_y, u_z 分别为 \mathbf{u} 在 x, y, z 轴方向上的位移分量。

变形前后质元对定点 Q 的引力势分别为:

$$u = -\frac{Gdm}{R} = -G \frac{\rho dV}{R} \quad (6)$$

$$u' = -\frac{Gdm}{R'} = -G \frac{\rho dV}{R'} \quad (7)$$

则变形前后质元在定点 Q 产生的加速度分别为:

$$\mathbf{a} = -\left(\frac{\partial u}{\partial \xi} \mathbf{i} + \frac{\partial u}{\partial \eta} \mathbf{j} + \frac{\partial u}{\partial \zeta} \mathbf{k} \right) = \frac{G\rho dV}{R^3} [(x - \xi)\mathbf{i} + (y - \eta)\mathbf{j} + (z - \zeta)\mathbf{k}] \quad (8)$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\alpha}' = & -\left(\frac{\partial u'}{\partial \xi} \boldsymbol{i} + \frac{\partial u'}{\partial \eta} \boldsymbol{j} + \frac{\partial u'}{\partial \zeta} \boldsymbol{k}\right) = \frac{G\rho dV}{R'^3} [(x+u_x-\xi)\boldsymbol{i} + (y+u_y-\eta)\boldsymbol{j} \\ & + (z+u_z-\zeta)\boldsymbol{k}]\end{aligned}\quad (9)$$

单元位移造成的加速度增量为:

$$\begin{aligned}\Delta \boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\alpha}' - \boldsymbol{\alpha} = & \left[\left(\frac{x+u_x-\xi}{R'^3} - \frac{x-\xi}{R^3} \right) \boldsymbol{i} + \left(\frac{y+u_y-\eta}{R'^3} - \frac{y-\eta}{R^3} \right) \boldsymbol{j} \right. \\ & \left. + \left(\frac{z+u_z-\zeta}{R'^3} - \frac{z-\zeta}{R^3} \right) \boldsymbol{k} \right] G\rho dV\end{aligned}\quad (10)$$

这里讨论其垂直分量即重力加速度的增量, 容易得出, 变形体 V 造成 Q 点的重力加速度增量为:

$$\Delta G = \int_V \left(\frac{z+u_z-\zeta}{R'^3} - \frac{z-\zeta}{R^3} \right) G\rho dV \quad (11)$$

展开 (11) 式, 空间任一定点 (ξ, η, ζ) 的重力变化为:

$$\begin{aligned}\Delta G(\xi, \eta, \zeta) = & G \iiint_V \left\langle \frac{z+u_z(x, y, z)-\zeta}{\{(x+u_x(x, y, z)-\xi)^2 + (y+u_y(x, y, z)-\eta)^2 + (z+u_z(x, y, z)-\zeta)^2\}^{3/2}} \right. \\ & \left. - \frac{z-\zeta}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2]^{3/2}} \right\rangle \rho(x, y, z) dx dy dz\end{aligned}\quad (12)$$

以上给出的是固定参考点的结果。实际上, 重力观测点往往依附于地面, 因此, 只要所讨论的形变模型在地表的位移量不能忽略, 就需要计算附于变形体表面上动参考点的结果。

仍如图 1 所示, 若参考点 $Q(\xi, \eta, \zeta)$ 依附于变形体表面, 在变形过程中, P 点质元移至 p' 点的同时, Q 点随着介质表面的变形移至 Q' 点, 若 Q' 点的坐标为 (ξ', η', ζ') , 则 Q' 与 P' 间的距离 R'' 为:

$$R'' = \sqrt{[\xi' - x - u_x(x, y, z)]^2 + [\eta' - y - u_y(x, y, z)]^2 + [\zeta' - z - u_z(x, y, z)]^2} \quad (13)$$

变形后质元对 Q' 点的引力势和加速度分别为:

$$u'' = -G \frac{\rho dV}{R''} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\alpha}'' = & -\left(\frac{\partial u''}{\partial \xi'} \boldsymbol{i} + \frac{\partial u''}{\partial \eta'} \boldsymbol{j} + \frac{\partial u''}{\partial \zeta'} \boldsymbol{k}\right) \\ = & \frac{G\rho dV}{R''^3} [(x+u_x-\xi')\boldsymbol{i} + (y+u_y-\eta')\boldsymbol{j} + (z+u_z-\zeta')\boldsymbol{k}]\end{aligned}\quad (15)$$

综合(8)式和(15)式, 可导出单元位移造成动点 Q 的引力加速度增量为:

$$\begin{aligned}\Delta \boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\alpha}'' - \boldsymbol{\alpha} = & \left[\left(\frac{x+u_x-\xi'}{R''^3} - \frac{x-\xi}{R^3} \right) \boldsymbol{i} \right. \\ & \left. + \left(\frac{y+u_y-\eta'}{R''^3} - \frac{y-\eta}{R^3} \right) \boldsymbol{j} + \left(\frac{z+u_z-\zeta'}{R''^3} - \frac{z-\zeta}{R^3} \right) \boldsymbol{k} \right] G\rho dV\end{aligned}\quad (16)$$

则变形体对动点 Q 的重力效应为:

$$\Delta G_v = G \int_V \left(\frac{z+u_z-\zeta'}{R''^3} - \frac{z-\zeta}{R^3} \right) \rho dV \quad (17)$$

Q 点附于变形体表面, 则 Q' 点的坐标应满足:

$$\left. \begin{array}{l} \xi' = \xi + u_x(\xi, \eta, \zeta) \\ \eta' = \eta + u_y(\xi, \eta, \zeta) \\ \zeta' = \zeta + u_z(\xi, \eta, \zeta) \end{array} \right\} \quad (18)$$

将(18)式代入(17)式, 即可得出变形体表面重力变化的分布。若变形体表面的一部分取为地面 ($\zeta = 0$ 平面), 则 v 以内介质变形产生的地面二维附加重力场的展开式为:

$$\Delta G_v(\xi, \eta) = G \iiint_V \left\langle \frac{[z + u_z(x, y, z) - u_z(\xi, \eta, 0)] / \{[x + u_x(x, y, z) - \xi - u_x(\xi, \eta, 0)]^2 + [y + u_y(x, y, z) - \eta - u_y(\xi, \eta, 0)]^2 + [z + u_z(x, y, z) - u_z(\xi, \eta, 0)]^2\}^{3/2}}{[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2]^{3/2}} \right\rangle \rho(x, y, z) dx dy dz \quad (19)$$

以上结果是指定体积 v 所包含介质的变形导致的重力变化。然而, 若分析某些具体的构造变形在地表的重力效应, 还需要对(19)式的应用作一讨论。一般来说, 要根据所讨论的形变位移场的特征选取适当的积分域 V , 以便于分别求得 V 以内和 V 以外介质的重力效应, 进而计算综合的结果。众所周知, 许多模拟局部构造变形的力学模式, 其位移解仅能适用于和地球相比很小且位于地壳及其邻近的范围以内, 超出这一范围, 其位移量均可忽略不计。因而我们往往可以在地下找到一个曲面 S , 一方面使 S 面和 S 以外的质点保持不动(即不受所讨论的构造变形的影响), 另一方面使 S 和地平面所包围的区域 V 远小于地球整体。这样, 地面动点的重力变化就可以分为两部分计算, 一部分是 V 以内介质变形的影响, 可以通过(19)式积分得出, 记为 ΔG_v 。另一部分是 V 以外地球体的影响, 其效应接近于地表动点高程变化导致的自由空气校正, 记为 ΔG_F , 则可得出地面 ($\zeta = 0$ 平面)上的综合重力效应 ΔG 为:

$$\Delta G(\xi, \eta) = \Delta G_v(\xi, \eta) + \Delta G_F(\xi, \eta) \quad (20)$$

三、断层位错模型的附加重力场

1. 位移场的解析表达式

应用上述方法, 本文对弹性和粘弹性半空间中断层运动产生的地表附加重力场作了计算, 由于涉及到介质的粘弹性, 被积函数中的位移分量采用了赵国光等最近导出的粘弹性位错模型的位移表达式^[2].

断层模型如图 2 所示, 在直角坐标系 (x_1, x_2, x_3) 中, 均匀各向同性介质充满于 $x_3 > 0$ 的半空间, 断层参数由图 2 给出, 由错距 $\Delta U(t)$ 在粘弹性半空间产生的准静态位移表达式可以缩写为如下的不定积分形式:

$$\begin{aligned} u_i(t) = & \frac{\Delta U(t)}{4\pi} \{ [G_1(t)N_1^i(x_1, x_2, x_3, \zeta, \zeta_1, \theta) + G_2(t)N_2^i(x_1, x_2, x_3, \zeta, \zeta_1, \theta) \\ & + N_3^i(x_1, x_2, x_3, \zeta, \zeta_1, \theta)] \cos \phi + [G_1(t)M_1^i(x_1, x_2, x_3, \zeta, \zeta_1, \theta) \\ & + G_2(t)M_2^i(x_1, x_2, x_3, \zeta, \zeta_1, \theta) \\ & + M_3^i(x_1, x_2, x_3, \zeta, \zeta_1, \theta)] \sin \phi \} |_{\zeta=d}^{\zeta=D} |_{\zeta_1=-L}^{\zeta_1=L} \end{aligned} \quad (21)$$

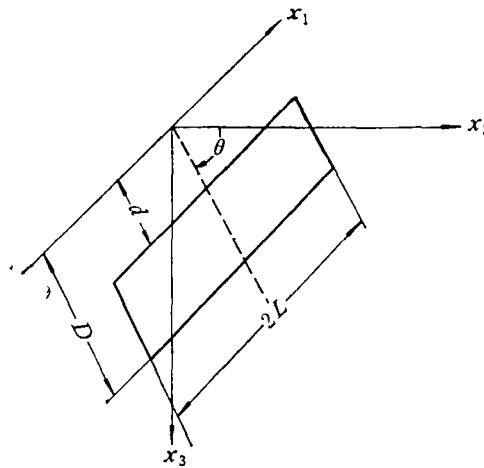


图 2

式中 $u_i(t)$ 为 t 时刻空间一点 (x_1, x_2, x_3) 在 $x_i(i = 1, 2, 3)$ 方向上的位移分量, ϕ 为滑动角, N_i^j 和 $M_i^j(i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3)$ 的展开式见文献 [2], $G_1(t)$ 和 $G_2(t)$ 决定于介质性质和滑动时间函数 $\Delta U(t)$.

如文献 [2] 中所述, 若介质在偏应力作用下呈广义开尔文体性质而在静水压力下呈弹性, 且当 $\Delta U(t)$ 取如下几种可能的形式时:

对于震前断层的加速蠕动:

$$\Delta U(t) = A(e^{t/t_s} - 1) = A \left\langle \exp \{[t_s \cdot H(t - t_s) + t \cdot H(t_s - t)] \cdot H(t)/t_1\} - 1 \right\rangle \quad (22)$$

对于震时断层的突然错动:

$$\Delta U(t) = U_{co} \cdot H(t) \quad (23)$$

以上两种情况的 $G_1(t)$ 和 $G_2(t)$ 分别为:

$$\begin{aligned} G_1(t) &= [12\mu_i\mu_k + 9K(\mu_i + \mu_k - \alpha\eta_k)\exp(-\alpha t)]/[4\alpha(3K + 4\mu_i)\eta_k] \\ G_2(t) &= [6\mu_i\mu_k + 18K(\mu_i + \mu_k - \beta\eta_k)\exp(-\beta t)]/[\beta(3K + \mu_i)\eta_k] \end{aligned} \quad (24)$$

若断层以速度 V 作长时间连续匀速滑动:

$$\Delta U(t) = Vt \quad (25)$$

则 $G_1(t)$ 和 $G_2(t)$ 的形式为:

$$\begin{aligned} G_1(t) &= \left[12\mu_i\mu_k + \frac{9K}{\alpha t} (\mu_i + \mu_k - \alpha\eta_k)(1 - e^{-\alpha t}) \right] / [4\alpha(3K + 4\mu_i)\eta_k] \\ G_2(t) &= \left[6\mu_i\mu_k + \frac{18K}{\beta t} (\mu_i + \mu_k - \beta\eta_k)(1 - e^{-\beta t}) \right] / [\beta(3K + \mu_i)\eta_k] \end{aligned} \quad (26)$$

在(22)至(26)式中, t_s 为断层开始蠕动至发震的时间, A 、 t_1 为待定常数, U_{co} 为震时错距, K 为体弹性模量, μ_i 为瞬时剪模量, μ_k 和 η_k 分别为开尔文弹簧常数和粘滞系数, H 为单位阶函数, α 和 β 为介质性质所确定的参数:

$$\begin{aligned} \alpha &= [3K(\mu_i + \mu_k) + 4\mu_i\mu_k]/[(3K + 4\mu_i)\eta_k] \\ \beta &= [3K(\mu_i + \mu_k) + \mu_i\mu_k]/[(3K + \mu_i)\eta_k] \end{aligned} \quad (27)$$

当介质为广义开尔文体, $\Delta U(t)$ 由(23)式确定且 $t = 0$ 时, (21)式即变为陈运泰等(1975)导出的弹性位错模型的位移表达式^[1].

把图1和图2的坐标参数取得一致, 则(19)式中的 x, y, z 和 u_x, u_y, u_z 相当于(21)式中的 x_1, x_2, x_3 和 $u_1(t), u_2(t), u_3(t)$. 把(21)式结果代入(19)式和(20)式, 即得出断层活动产生的附加重力场.

2. 积分域的选取和积分单元的划分

对上述模型重力效应的计算仅能采用数值积分法, 为了选取合理的积分域和划分积分单元, 必须对断层位错产生的三维空间的位移场作分析和讨论.

令(23)和(24)式中的 $t = 0$, 取 $K = 5 \times 10^{11} \text{c} \cdot \text{g} \cdot \text{s}$, $\mu_i = 3 \times 10^{11} \text{c} \cdot \text{g} \cdot \text{s}$, 则(21)式为 $\lambda = \mu$ 的弹性介质位错模型的位移解, 取断层参数为:

$$\left. \begin{array}{l} 2L = 100 \text{ 公里} \quad \theta = 75^\circ \\ d = 1 \text{ 公里} \quad D = 35 \text{ 公里} \end{array} \right\} \quad (28)$$

对如上断层走滑和倾滑在地表和几个典型纵截面的三个位移分量进行了计算, 这里选取一个典型纵截面为例, 结果如图3所示.

位移的三维分布表明, 无论断层走滑或是倾滑, 当场的边界接近于 $|x_1| = |x_2| = x_3 = 400$ 公里时, 边界附近位移量普遍衰减至2毫米即错距的 $\frac{1}{500}$ 以下. 从另一角度分析, 在此范围以外, 位错模型以半无限平面为边界的假设已和实际情况有较大的差异, 而以往许多震前震后的实测资料也表明, 与断层错动有关的地面变形也很少超出这一范围, 则可以认为, 取这种线度的积分域是足够大的, 但它相对于地球仍然相当小, 因而是合理的.

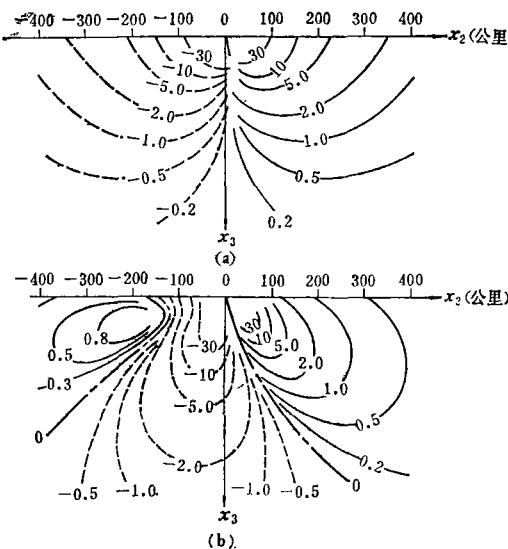


图 3

(a) $\psi = 0, U_{c0} = 1$ 米(反扭走滑) $x_1 = 0$ 纵截面上的 U_1 分布
 (b) $\psi = \pi/2, U_{c0} = 1$ 米(下盘上升的倾滑) $x_1 = 0$ 纵截面上的 U_3 分布. 图中位移单位为毫米

位移场的另一特点是,无论断层走滑或倾滑,其位移都在断层附近取得相对高值,而位移分量随位置变化的改变也相应明显,这就需要适当加密断层附近的积分单元,而对远区单元的划分可以适当地放宽。这里采取了图 4 所示的单元划分方案,即以断层长度 $2L$ 为标准,把单元取为 4 种尺寸的正方体,其体积分别为:

$$\Delta V_i = \left(\frac{L}{2^{4-i}} \right)^3 \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (29)$$

单元总数为 12716。单元质量为 $\Delta m_i = \rho \Delta V_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 。

为了提高积分精度,计算中取每个单元几何中心位移作为单元整体位移,地面参考点一般取为单元间的结点,按照(19)和(20)式求得图 4 所示区域内的重力效应 ΔG_s 、地面高程变化的自由空气校正 ΔG_F 和综合重力效应 ΔG 。

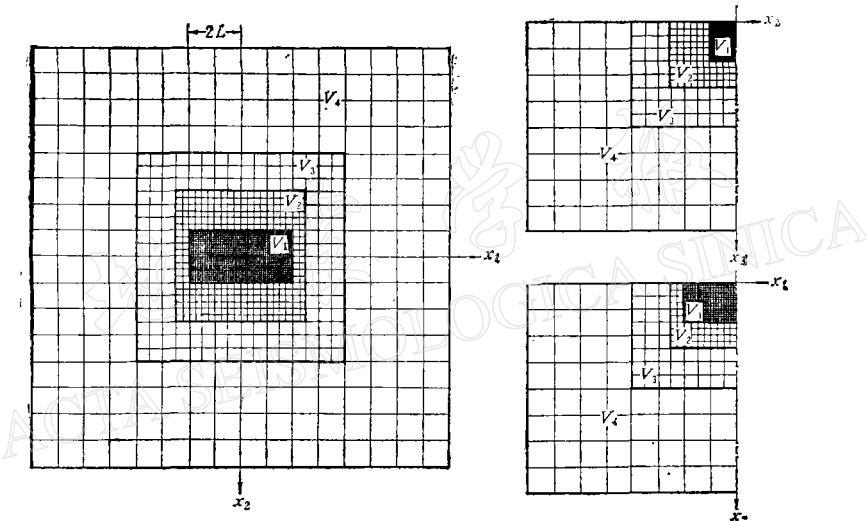


图 4

对上述积分域和积分单元的选取,作者还通过实例计算作了考察。选取了不同的积分域比较了所得的重力结果。它表明,在距原点 200 公里以内的范围,积分域边界的改变对计算结果的影响相应地明显,而当积分域边界与原点距离接近 400 公里时,它的改变对计算结果的影响是很微小的。另外,对图 4 所示区域采取了另外一种单元划分法,即分为 6410 单元,两种划分法所得的积分结果是很相近的。这说明,本文选用的积分域和积分单元是可取的。

四、数值结果

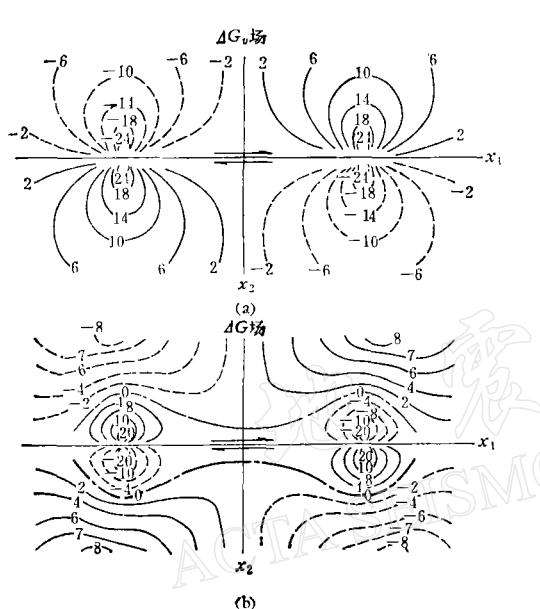
由于位错模型本身建立于均匀各向同性介质的假设,因而积分域内介质的密度也应作为常量处理,对于地表至 400 公里深度的介质,这里取其平均深度的密度 $\rho = 3300$ 千克/米³,万有引力常数 $G = 6.670 \times 10^{-8}$ 达因·厘米²/克²,可以化为 $G = 6.670 \times 10^{-11}$ 牛顿·米²/千克²。

1. 弹性介质中位错模型的附加重力场

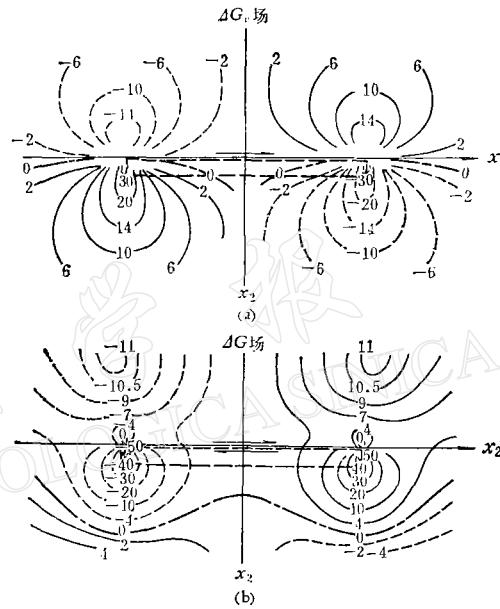
令(23)和(24)式中的 $\tau=0$, (24)和(27)式中的 $K=5\times10^{11}\text{c}\cdot\text{g}\cdot\text{s}$, $\mu_i=3\times10^{11}\text{c}\cdot\text{g}\cdot\text{s}$, 则为 $\lambda=\mu$ 的弹性介质的位错模型.

取 $\phi=0$, $U_{co}=-2$ 米, $\theta=89.9^\circ$, 则为近直立断层顺扭走滑的情况, 为了明确起见, 把变形前地面参考点的位置坐标 (ξ, η) 仍用 (x_1, x_2) 表示, 其附加重力场如图5所示.

取 $\theta=75^\circ$, 其它参数同上, 则为倾斜断层顺扭走滑的附加重力场, 结果如图6所示.



(a)



(b)

图5 近直立走滑断层的附加重力场

(断层参数 $2L=100$ 公里, $d=1$ 公里, $D=35$ 公里, (a)— ΔG_0 场, (b)—综合效应 ΔG 场. 图中数值单位为微伽).

如图所示, 断层走滑的附加重力分布关于 x_2 轴为负的对称关系, 其相对的重力高值区在过断层端点与断层垂直的截线附近. 作者计算了不同参数的走滑断层在这个截线上的附加重力分布, 结果表明, 随着断层深度下界的增加, 它对地表重力的影响范围越广.

对断层倾滑的情况也作了计算, 结果表明, 综合重力效应主要受自由空气校正 ΔG_F 的影响. 因此, 附加重力场图象很相似于弹性倾滑位错模型在地面的垂直位移 U_3 等值线.

2. 介质滞弹性和断层加速运动的重力效应

若断层运动由(23)式所确定, 则积分结果就是断层突然错动后保持静止, 由于介质滞弹性效应导致的重力场随时间的变化. 这里仍取(28)式的断层参数, 令 $\theta=75^\circ$, $\phi=0$, $U_{co}=1$ 米(倾斜断层反扭走滑), $K=5\times10^{11}\text{c}\cdot\text{g}\cdot\text{s}$, $\mu_i=3\times10^{11}\text{c}\cdot\text{g}\cdot\text{s}$, $\eta_k/\mu_k=2$ 天, 则当 $\tau=0$ 时以及 $\tau=40$ 天、 μ_k/μ_i 分别为5, 1, $1/6$ 时的附加重力分布如图7(a)所示.

图6 倾斜走滑断层的附加重力场

(断层参数和图中数值单位的说明同图5)

若断层运动由(22)式确定, 则为断层在发震时刻 t_s 前加速蠕动的情况, 取 $t_s = 300$ 天, 即断层在震前 300 天开始蠕动, $A = 0.05$ 米, $\phi = 0$ (反扭走滑), $t_1 = 100$ 天, $\mu_k/\mu_i = 5$, K 和 $\mu_i, \eta_k/\mu_k$ 取值如前, 则断层蠕动过程中不同时间的附加重力分布如图 7(b) 所示。

3. 与实际断层活动相应的重力变化

形变资料的分析表明, 唐山地震前的 1968 至 1975 年间, 震区西南侧的沧东断裂北段可能发生过较大幅度的顺扭蠕动^[3], 若把运动近似作为匀速的, 则断层运动方式应取(25)式的形式, 相应的 $G_1(t)$ 和 $G_2(t)$ 由(26)式确定, 根据沧东断裂的特征及其运动状态, 取断层参数为 $2L = 130$ 公里, $d = 1$ 公里, $D = 22$ 公里, $\theta = 75^\circ$, $V = -4.8 \times 10^{-4}$ 厘米/天, 取广义开尔文介质的参数 $K = 5 \times 10^{11} \text{c.g.s}$, $\mu_i = 3 \times 10^{11} \text{c.g.s}$, $\mu_k/\mu_i = 5$, $\eta_k/\mu_k = 2$ 天, 则 1975 年相对于 1968 年的重力变化如图 8 所示。

唐山震前 1975—1971 年的重力实测资料表明, 唐山附近 (即沧东断裂东北端附近) 均为重力值的正异常区, 其中心异常幅度最大, 为 80 微伽, 伴随着远离这个中心, 异常幅度逐渐衰减^[1], 这和图 8 的理论结果相似。

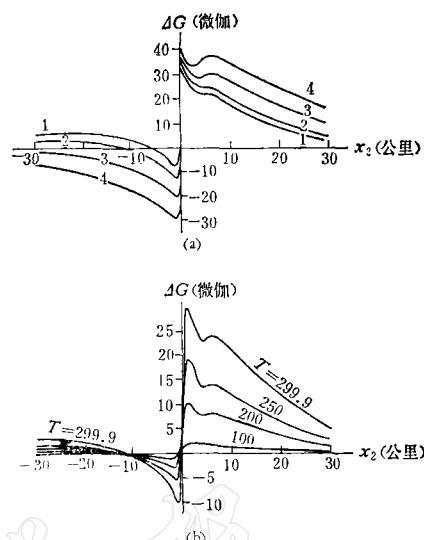


图 7 $x_1 = -50$ 公里, $x_3 = 0$ 截线上的附加重力分布

(a)——曲线 1 为 $t = 0$ 的情况, 曲线 2、3、4 为 $\mu_k/\mu_i = 5, 1, 1/6$ 的情况; (b)——断层加速蠕动时不同时间的附加重力分布

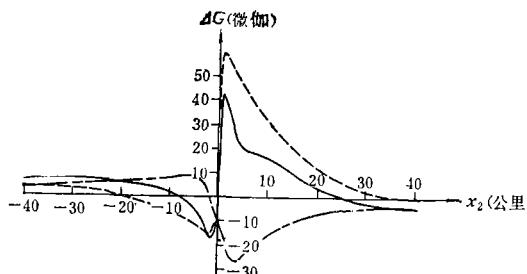


图 8 沧东断裂东北端断层垂线上的附加重力分布
(实线为 ΔG , 虚线为 ΔG_F , 点划线为 ΔG_v)

参照唐山地震发震断层的参数, 计算了重力值在震后的变化。

取断层参数为 $2L = 84$ 公里, $\theta = 76^\circ$, $d = 1$ 公里, $D = 35$ 公里。按唐山地震的地震矩为 -1.8×10^{27} 达因·厘米, 介质剪切模量 $\mu = 3 \times 10^{11}$ 达因/厘米², 则震时错距可由如下关系导出:

$$s(\text{断层面积}) \times \Delta U(\text{错距}) \times \mu = M(\text{地震矩}) \quad (30)$$

1) 据河北省地震局资料。

得出 $\Delta U = -2.1$ 米, 仍按计算沧东断裂时所取的 K , μ_i , μ_k , η_k 值计算, 并取 $t_1 = 100$ 天, 则断层东北端与断层垂直截线上的重力变化如图 9 所示。图中断层左侧重力正异常区的重力值在震后有较明显的下降, 这和唐山地震后的一些重力实测资料相比¹⁾, 在趋势上是相似的。

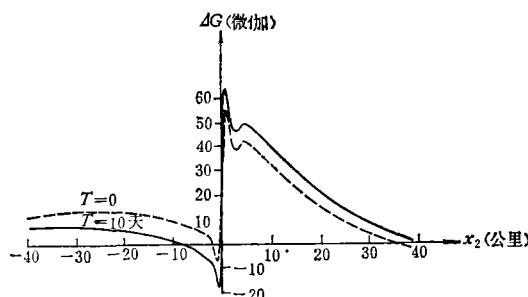


图 9

五、结语

本文的计算结果表明, 断层位错产生的构造变形, 其重力效应是可以分辨的。它和模型所给出的地面高程变化产生的自由空气校正处于同一数量级。尽管它可能不是导致地面实测重力异常的唯一原因, 如某些作者提出的, 地下物质流动往往会造成地面上较大范围的重力变化, 然而对形变与重力之间的关系作定量分析, 对于把重力测量和形变测量相结合以对断层运动和地震活动作综合的研究, 可能是有益的。

参 考 文 献

- [1] 陈运泰等, 根据地面形变的观测研究 1966 年邢台地震的震源过程, 地球物理学报, 18, 3, 1975.
- [2] 赵国光, 张超, 伴随着前兆蠕动和震后断层滑动的准静态形变, 地震学报, 3, 3, 1981.
- [3] 赵国光, 黄佩玉, 唐山地震前的断层运动与应力积累, 参加 26 届国际地质大会论文集, 构造地质和地质力学, 地质出版社, 1980.
- [4] Chen Yen-tai, Gu Hau-ding and Lu Zao-xun, Variation of gravity before and after Haicheng earthquake, 1975 and Tangshan earthquake, 1976, *Phys. Earth. Plane. Interiors*, 18, 330—338, 1979.
- [5] W. I. Reilly, and T. M. Hunt, Comment on ‘An analysis of local changes in gravity due to deformation’, *Pure Appl. Geophys.*, 114, 6, 1976.
- [6] J. B. Walsh, An analysis of local changes in gravity due to deformation, *Pure Appl. geophys.*, 113, 1, 1975.
- [7] J. B. Walsh, Reply, *Pure. Appl. Geophys.*, 114, 6, 1976.
- [8] J. B. Walsh and J. R. Rice, Local changes in gravity resulting from deformation. *J. Geophys. Res.*, 84, B1, 1979.
- [9] J. H. Whitcomb, New vertical geodesy, *J. Geophys. Res.*, 81, 26, 1976.

1) 据河北省地震局资料。

CHANGE IN GRAVITY CAUSED BY FAULT MOVEMENTS

ZHANG CHAO ZHAO GUO-GUANG

(Seismo-Geological Expedition, State Seismological Bureau)

Abstract

In this paper, the change in gravity caused by local deformation of the crustal medium is quantitatively investigated. By the method of point mass displacement (i.e. the Lagrange Method) the integral relation between the displacement field of crustal medium and the additional gravity field involved has been derived.

By using known analytic expressions of the displacement due to a slip of a fault of any dipping angle in an elastic or visco-elastic half-space, we have calculated by three-dimensional numerical integration, the additional gravity field on the ground surface, resulting from various types of fault movements in an elastic or generalized Kelvin medium, as well as the tendency of gravity change with time given rise by the rheological behavior of the medium.

Referring to the movement of the Cang-Tong Fault before the Tangshan Earthquake of 1976 and the fault dislocation during that earthquake, the associate gravity change before and after the earthquake has been computed and the results agree to a certain extent with the observed.