

根据地面形变的观测研究 1966 年邢台地震的震源过程

陈运泰 林邦慧 林中洋 李志勇

(中国科学院地球物理研究所)

摘 要

本文以完整的形式给出拉梅常数不相等情形的半无限弹性介质中任意倾角的矩形滑动断层引起的地震位移场解析表示式,以一些数值结果说明介质的泊松比、断层面的倾角、上界和下界对地面的地震位移场的影响。在比较 1966 年邢台地震的地形变资料和计算得到的各种走向、倾向、倾角、断层面长度、宽度、震源深度和错距的单个的矩形滑动断层引起的地面位移之后指出,简单的滑动断层错动模式不能同时很好地解释观测到的邢台地震的水平 and 垂直形变。为了解释观测结果,提出了一个复合的断层模式。这个复合断层模式由六个简单的矩形滑动断层构成。运用网格尝试法,得到了基本上符合观测到的水平和垂直位移场的震源参数。结果是:第一、二、三部分,出露到地面,倾角 45° , 宽度 15 公里;第四、五、六部分,倾角 82° , 宽度 30 公里。其它参数是:断层面走向 $N35^\circ E$, 倾向 $N125^\circ E$, 断层总长度 50 公里,断层各部分的平均走向滑动错距依次为 -78 、 -134 、 -17 、 2 、 -3 和 1 厘米(负号表示右旋走向滑动,正号表示左旋走向滑动),平均倾向滑动错距依次为 2 、 50 、 88 、 24 、 -5 和 -23 厘米(负号表示逆断层,正号表示正断层),地震矩依次为 3.2 、 5.9 、 3.7 、 2.0 、 0.5 、 1.9×10^{18} 达因·厘米,应力降依次为 22 、 42 、 33 、 5 、 1 、 4 巴,应变降依次为 3.3 、 6.4 、 5.0 、 0.8 、 0.2 、 0.6×10^{-3} ,释放的总能量的下限为 6.1×10^{12} 尔格。对比所得结果和 6 级以上的地震震中分布,表明邢台地震的两个较大的前震及主震和复合断层上部的错动关系较大,而大的余震则和复合断层下面那部分的端部的错动相联系。邢台地震区近半个世纪以来的水准测量资料表明,这个地区下降速率的上限约为 5 毫米/年。如果认为通过这次地震,积累在主要断层上的应变已基本释放完毕,那么,由这次地震的倾向滑动错距的大小可以估计这个地震断层上的地震复发周期的下限大约是 176 年。

一、引 言

大地震通常都伴随有地表面的断裂以及地面的大幅度水平和垂直运动,这种由地震引起的地面形变和地震震源的性质有密切的关系,因此,可以用它来研究震源的性质。如果在独立地运用体波、面波和地面形变等资料研究震源的基础上,对震源进行综合研究,无疑会使我们对震源过程的认识更为充分。

本文就是利用地面形变的观测资料研究 1966 年 3 月 22 日河北省邢台宁晋地震的一个结果。这次地震是群发型的,包括表 1 所示 5 个大于、等于 6 级的地震。主震群前后的地面形变资料表明^[1],邢台地震以后震中地区出现大范围、大幅度的水平形变和垂直形变

表 1

编号	日 期	发展时刻 (北京时间)	纬 度	经 度	地 区	震 级	震源深度 (公里)
1	1966.3. 8.	05-29-14	37°21'N	114°55'E	河北隆尧	6.8	10
2	1966.3.22.	16-11-36	37°30'N	115°05'E	河北宁晋	6.7	9
3	1966.3.22.	16-19-46	37°32'N	115°03'E	河北宁晋	7.2	9
4	1966.3.26.	23-19-04	37°41'N	115°16'E	河北束鹿	6.2	15
5	1966.3.29.	14-11-59	37°21'N	115°02'E	河北巨鹿	6.0	25

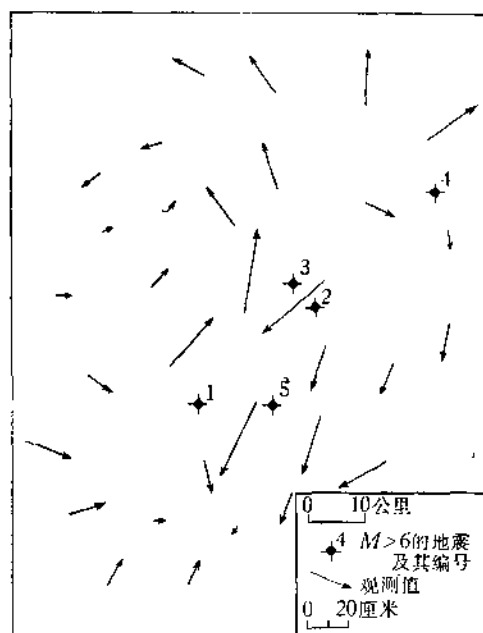


图 1 邢台地震前后(1959、1960年至1966年)震中地区地面水平形变的向量图

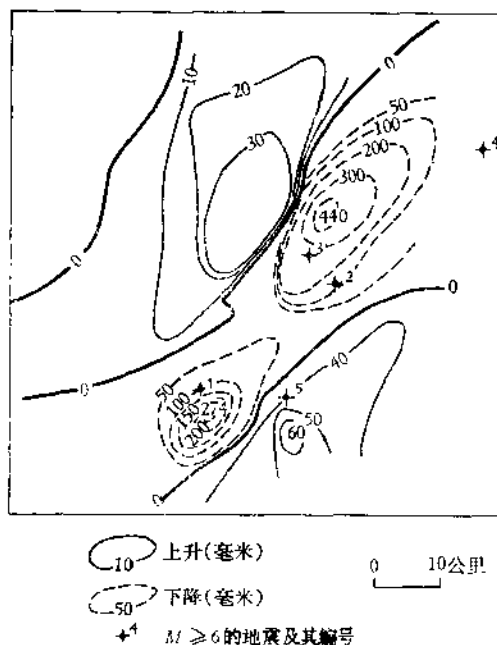


图 2 邢台地震前后(1965年至1966年)震中地区地面垂直形变的等值线图

(见图 1、2). 分析表明, 专门埋设的水泥标石点的稳固性是可靠的, 因此, 这两幅图所表示的主要是地面本身的形变, 而不是标石点相对于地面的移动. 从这些观测结果中可以看到邢台地震极震区断裂带两盘块体的明显的相对运动. 断裂带的走向大约是 $N40^{\circ}E$, 两盘的水平错动呈右旋性质, 地面的水平位移在许多地点有 30 厘米左右, 最大达 40 多厘米. 同时, 还出现大范围的下降, 下降带的走向和断裂带的走向一致, 长约 60 公里, 宽约 20 公里, 下降幅度一般约为水平位移的一半, 最大达 44 厘米; 下降带的外围是上升带, 上升幅度远不及下降幅度, 一般仅约为下降幅度的十分之一. 这些观测事实强烈表明这次地震是由断层错动引起的. 可以设想其震源为地球介质中的一个位移不连续的面——位错面. 根据这个设想, 可以运用弹性位错理论^[2-6]分析地震断层错动引起的静力学和动力学变化过程.

弹性静力学位错理论已被成功地用以分析断层错动引起的地面位移场、应变场、倾斜场和应力场的变化^[7-16], 借以探讨震源的性质. 以往的工作中, 为了分析的方便, 通常采

取简单的断层模式,即断层面和地面垂直的矩形的走向、倾向或一般的滑动断层. 这种模式虽能反映断层面和地面近于垂直的实际地震断层的许多主要图象,但对于大多数断层面和地面斜交的实际地震断层,它是不充分的,不能反映实际地震断层引起的位移场、应变场、倾斜场和应力场的若干重要图象,如位移场、应变场、倾斜场和应力场的不对称性等. 鉴于数学分析的繁琐,计算具有任意倾角的走向或倾向滑动断层引起的位移场通常运用丸山卓男 (Maruyama)^[4] 的双重积分公式,这时,需要计算元位错面的贡献,然后,借助于二维数值积分求得位错面引起的位移场,如卡尼泽兹和托克索兹 (Canitez and Toksöz)^[15]、安藤雅孝 (Ando)^[16] 等的作法就是这样. 近来,曼新哈和斯迈里 (Mansinha and Smylie)^[17] 给出了拉梅常数相等的、半无限介质中任意倾角的、矩形的、走向和倾向滑动断层的、地震位移场的精确的解析表示式. 虽然精确的解析表示式颇为冗长,但只包括代数函数和初等的超越函数,易于数值计算. 我们在这里将顺便给出拉梅常数不相等的半无限介质中任意倾角的矩形的走向和倾向滑动断层的地震位移场的精确的解析表示式. 这些表示式,当拉梅常数相等时退化为曼新哈和斯迈里^[17]的结果;当拉梅常数相等、倾角等于 $\pi/2$ 并且观测点在地面时,退化为普雷斯 (Press)^[10] 的结果. 因此,下面将给出的地震位移场的精确的解析表示式可以看作是普雷斯以及曼新哈和斯迈里的结果的一个推广.

二、地震断层在地面引起的位移场

把地震断层视为介质中的一个位移向量不连续的面(位错面). 按照弹性位错理论,在均匀、各向同性和完全弹性的半无限介质中,任意形状的位错面 Σ 在介质中的某一点 Q (坐标 $x_m, m = 1, 2, 3$) 引起的位移是^[4,10]:

$$\mathbf{u}(Q) = u_m(Q) \mathbf{e}_m, \quad (1)$$

$$u_m(Q) = \iint_{\Sigma} \Delta U_k(P) W_{ki}^m(P, Q) n_i(P) d\Sigma, \quad (2)$$

这里,采用哑指标下的求和约定. $\mathbf{e}_m (m = 1, 2, 3)$ 表示 x_m 方向的单位向量. $W_{ki}^m(P, Q)$ 是弹性半无限介质中由 (ki) 定义的、作用于某一点 P (坐标 $\zeta_m, m = 1, 2, 3$) 的力系在 Q 点引起的沿 x_m 方向的位移(差一个量纲因子). $\Delta U_k(P) (k = 1, 2, 3)$ 是在 P 点的位错向量 $\Delta \mathbf{U}$ 的三个分量, $n_l(P) (l = 1, 2, 3)$ 是在 P 点的面积元 $d\Sigma$ 的法向 $\mathbf{n}$ 的方向余弦. $W_{ki}^m(P, Q)$ 由下式表示:

$$W_{ki}^m(P, Q) = \lambda \delta_{ki} \frac{\partial u_m^*}{\partial \zeta_i} + \mu \left(\frac{\partial u_m^*}{\partial \zeta_i} + \frac{\partial u_m^*}{\partial \zeta_k} \right). \quad (3)$$

式中, λ, μ 是拉梅常数, u_m^* 是弹性半无限介质中作用于 P 点的 x_k 方向的单位集中力在 Q 点引起的沿 x_m 方向的位移. u_m^* 的具体表示式见参考资料[10], [18].

设断层面是一个矩形位错面,长为 $2L$, 宽为 ΔD . 将直角坐标系 (x_1, x_2, x_3) 的原点取在地面上,取和断层走向一致的方向为 x_1 方向, x_3 垂直于地面,向下为正(图3). 以 θ 代表断层面和地面的夹角(倾角),那

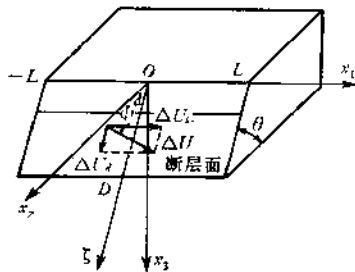


图3 任意倾角的矩形断层错动模式

么断层面的法线方向 $\mathbf{n}$ 的方向余弦是

$$\mathbf{n} = \{0, \sin \theta, -\cos \theta\}. \quad (4)$$

对于走向滑动断层, 若以 ΔU_s 表示走向滑动的错距, 那么位错向量

$$\Delta \mathbf{U} = \{\Delta U_s, 0, 0\}, \quad (5)$$

所以

$$u_m(Q) = \Delta U_s \iint_{\Sigma} (W_{12}^m \sin \theta - W_{31}^m \cos \theta) d\Sigma. \quad (6)$$

以 ξ 代表断层面宽度方向的坐标, 那么 $d\Sigma = d\xi_1 d\xi_2$, 从而

$$u_m(Q) = \mu \Delta U_s \int_{-L}^L \left[\left(\frac{\partial u_m^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_m^2}{\partial \xi_1} \right) \sin \theta - \left(\frac{\partial u_m^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_m^3}{\partial \xi_1} \right) \cos \theta \right] d\xi_1 d\xi_2. \quad (7)$$

对于倾向滑动断层, 若以 ΔU_d 表示倾向滑动的错距, 那么

$$\Delta \mathbf{U} = \{0, \Delta U_d \cos \theta, \Delta U_d \sin \theta\}, \quad (8)$$

所以

$$u_m(Q) = \Delta U_d \iint_{\Sigma} \left[\frac{1}{2} (W_{22}^m - W_{33}^m) \sin 2\theta - W_{23}^m \cos 2\theta \right] d\Sigma, \quad (9)$$

或者

$$u_m(Q) = \mu \Delta U_d \int_{-L}^L \left[\left(\frac{\partial u_m^2}{\partial \xi_2} - \frac{\partial u_m^3}{\partial \xi_1} \right) \sin 2\theta - \left(\frac{\partial u_m^2}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_m^3}{\partial \xi_2} \right) \cos 2\theta \right] d\xi_1 d\xi_2. \quad (10)$$

对于一般的滑动断层, 若以 ΔU 表示其总错距, 以 ϕ 代表错动方向和断层面走向的夹角, 顺时针为正, 那么位错向量

$$\Delta \mathbf{U} = \{\Delta U \cos \phi, \Delta U \sin \phi \cos \theta, \Delta U \sin \phi \sin \theta\}, \quad (11)$$

它所引起的位移是走向滑动断层和倾向滑动断层所引起的位移的叠加, 其走向滑动错距 ΔU_s 和倾向滑动错距 ΔU_d 分别为:

$$\begin{cases} \Delta U_s = \Delta U \cos \phi, \\ \Delta U_d = \Delta U \sin \phi. \end{cases} \quad (12)$$

由参考资料 [10] 或 [18] 所给出的 u_m^k 的具体表示式, 可将 (7) 和 (9) 式中对 ξ_1 和 ξ_2 的积分依次积出. 为此, 引进以下几个量: $r_2, q_2, r_3, q_3, h, k, R, Q$,

$$\begin{cases} r_2 = x_2 \sin \theta - x_3 \cos \theta, \\ r_3 = x_2 \cos \theta + x_3 \sin \theta, \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} q_2 = x_2 \sin \theta + x_3 \cos \theta, \\ q_3 = -x_2 \cos \theta + x_3 \sin \theta, \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} R^2 &= (x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2 \\ &= (x_1 - \xi_1)^2 + r_2^2 + (r_3 - \xi_3)^2, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} Q^2 &= (x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 + \xi_3)^2 \\ &= (x_1 - \xi_1)^2 + q_2^2 + (q_3 + \xi_3)^2 \\ &= (x_1 - \xi_1)^2 + h^2 = k^2 + (q_3 + \xi_3)^2, \end{aligned} \quad (16)$$

这些量的意义如图 4 所示.

略去繁琐的计算细节, 下面给出以不定积分表示

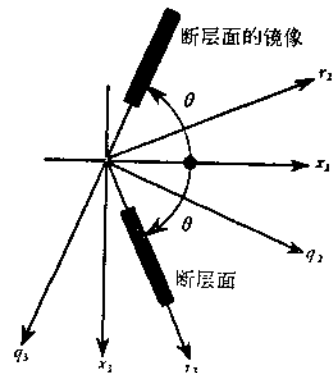


图 4 断层面和它的镜像

的结果, 结果是:

对于走向滑动断层,

$$\begin{aligned}
 8\pi \frac{u_1}{\Delta U_s} = & (x_1 - \zeta_1) \left[\frac{4\delta}{1+\delta} \frac{r_2}{R(R+r_3-\zeta)} - \frac{1}{1+\delta} \frac{4q_2 - 4(1-\delta)x_3 \cos \theta}{Q(Q+q_3+\zeta)} \right. \\
 & - 2 \frac{1-\delta}{\delta} \frac{\tan \theta}{Q+x_3+\zeta_3} + \frac{8\delta}{1+\delta} \frac{q_2 x_3 \sin \theta}{Q^3} \\
 & \left. - \frac{8\delta}{1+\delta} q_2 q_3 x_3 \sin \theta \frac{(2Q+q_3+\zeta)}{Q^3(Q+q_3+\zeta)^2} \right] \\
 & - 4 \frac{1-\delta}{\delta} \tan^2 \theta \tan^{-1} \left[\frac{(k-q_2 \cos \theta)(Q-k) + (q_3+\zeta)k \sin \theta}{(x_1-\zeta_1)(q_3+\zeta) \cos \theta} \right] \\
 & + 2 \tan^{-1} \frac{(x_1-\zeta_1)(r_3-\zeta)}{r_2 R} - 2 \tan^{-1} \frac{(x_1-\zeta_1)(q_3+\zeta)}{q_2 Q}, \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 8\pi \frac{u_2}{\Delta U_s} = & \sin \theta \left[2 \frac{1-\delta}{\delta} \tan \theta \sec \theta \ln(Q+x_3+\zeta_3) - 2 \frac{1-\delta}{1+\delta} \ln(R+r_3-\zeta) \right. \\
 & \left. - \left(2 \frac{1-\delta}{1+\delta} + 2 \frac{1-\delta}{\delta} \tan^2 \theta \right) \ln(Q+q_3+\zeta) \right] \\
 & + \frac{4\delta}{1+\delta} \frac{r_2^2 \sin \theta}{R(R+r_3-\zeta)} + \frac{4\delta}{1+\delta} \frac{r_2 \cos \theta}{R} \\
 & - \frac{4\delta}{1+\delta} \sin \theta \frac{\left[2x_3(q_2 \cos \theta - q_3 \sin \theta) + q_2 \left(q_2 + \frac{1-\delta}{\delta} x_2 \sin \theta \right) \right]}{Q(Q+q_3+\zeta)} \\
 & - 2 \frac{1-\delta}{\delta} \tan \theta \frac{(x_2-\zeta_2)}{Q+x_3+\zeta_3} \\
 & + \frac{4}{1+\delta} \frac{[\delta q_2 \cos \theta - (1-\delta)q_3 \sin \theta - (3\delta-1)x_3 \sin^2 \theta]}{Q} \\
 & + \frac{8\delta}{1+\delta} q_2 x_3 \sin \theta \frac{[(x_2-\zeta_2) + q_3 \cos \theta]}{Q^3} \\
 & - \frac{8\delta}{1+\delta} q_2^2 q_3 x_3 \sin^2 \theta \frac{2Q+q_3+\zeta}{Q^3(Q+q_3+\zeta)^2}, \quad (18)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 8\pi \frac{u_3}{\Delta U_s} = & \cos \theta \left[2 \frac{1-\delta}{1+\delta} \ln(R+r_3-\zeta) + 2 \frac{1-\delta}{1+\delta} \left(1 + \frac{1+\delta}{\delta} \tan^2 \theta \right) \ln(Q+q_3+\zeta) \right. \\
 & \left. - 2 \frac{1-\delta}{\delta} \tan \theta \sec \theta \ln(Q+x_3+\zeta_3) \right] + \frac{4\delta}{1+\delta} \frac{r_2 \sin \theta}{R} \\
 & + \frac{4}{1+\delta} \sin \theta \frac{[(2-3\delta)q_2 + (3\delta-1)x_2 \sin \theta]}{Q} - \frac{4\delta}{1+\delta} \frac{r_2^2 \cos \theta}{R(R+r_3-\zeta)} \\
 & + \frac{4}{1+\delta} \frac{[(4\delta-1) \sin^2 \theta - \delta] q_2 x_3 - (1-\delta) q_2 q_3 \sin \theta - \delta x_2 x_3 \sin \theta - \delta q_3 x_2 \sin^2 \theta}{Q(Q+q_3+\zeta)} \\
 & + \frac{8\delta}{1+\delta} q_2 x_3 \sin \theta \frac{[(x_3+\zeta_3) - q_3 \sin \theta]}{Q^3} \\
 & - \frac{8\delta}{1+\delta} q_2^2 q_3 x_3 \cos \theta \sin \theta \frac{(2Q+q_3+\zeta)}{Q^3(Q+q_3+\zeta)^2}. \quad (19)
 \end{aligned}$$

对于倾向滑动断层,

$$\begin{aligned}
 8\pi \frac{u_1}{\Delta U_d} = & (x_2 - \zeta_2) \sin \theta \left[\frac{4\delta}{1+\delta} \frac{1}{R} + \frac{4}{1+\delta} \frac{1}{Q} - \frac{8\delta}{1+\delta} \frac{\zeta_3 x_3}{Q^3} - 2 \frac{1-\delta}{\delta} \frac{1}{Q+x_3+\zeta_3} \right] \\
 & - \cos \theta \left[2 \frac{1-\delta}{\delta} \ln(Q+x_3+\zeta_3) \right. \\
 & + \frac{4\delta}{1+\delta} \frac{(x_3-\zeta_3)}{R} + \frac{4}{1+\delta} \frac{(x_3-\zeta_3)}{Q} + \frac{8\delta}{1+\delta} \frac{\zeta_3 x_3 (x_3+\zeta_3)}{Q^3} \left. \right] \\
 & + 2 \frac{1-\delta}{\delta} \frac{1}{\cos \theta} [\ln(Q+x_3+\zeta_3) - \sin \theta \ln(Q+q_3+\zeta)] \\
 & + 4x_3 \left[\frac{\cos \theta}{Q} - \frac{q_2 \sin \theta}{Q(Q+q_3+\zeta)} \right], \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 8\pi \frac{u_2}{\Delta U_d} = & \sin \theta \left\{ -2 \frac{1-\delta}{1+\delta} \ln(R+x_1-\zeta_1) + 2 \frac{1-\delta}{1+\delta} \ln(Q+x_1-\zeta_1) \right. \\
 & + \frac{8\delta}{1+\delta} \frac{\zeta_3 x_3}{Q(Q+x_1-\zeta_1)} + 2 \frac{1-\delta}{\delta} \frac{(x_1-\zeta_1)}{Q+x_3+\zeta_3} \\
 & + (x_2-\zeta_2) \left[\frac{4\delta}{1+\delta} \frac{1}{R(R+x_1-\zeta_1)} + \frac{4}{1+\delta} \frac{1}{Q(Q+x_1-\zeta_1)} \right. \\
 & \left. \left. - \frac{8\delta}{1+\delta} \zeta_3 x_3 \frac{[(2Q+x_1-\zeta_1)]}{Q^3(Q+x_1-\zeta_1)^2} \right] \right\} \\
 & - \cos \theta \left\{ (x_2-\zeta_2) \left[\frac{4\delta}{1+\delta} \frac{(x_3-\zeta_3)}{R(R+x_1-\zeta_1)} + \frac{4}{1+\delta} \frac{(x_3-\zeta_3)}{Q(Q+x_1-\zeta_1)} \right. \right. \\
 & + \frac{8\delta}{1+\delta} \zeta_3 x_3 (x_3+\zeta_3) \frac{(2Q+x_1-\zeta_1)}{Q^3(Q+x_1-\zeta_1)^2} \left. \right] \\
 & + 4 \frac{1-\delta}{\delta} \tan^{-1} \frac{(x_1-\zeta_1)(x_2-\zeta_2)}{(h+x_3+\zeta_3)(Q+h)} \\
 & - 2 \tan^{-1} \frac{(x_1-\zeta_1)(r_3-\zeta)}{r_2 R} + \frac{2}{\delta} \tan^{-1} \frac{(x_1-\zeta_1)(q_3+\zeta)}{q_2 Q} \left. \right\} \\
 & + 4 \left[\frac{1-\delta}{\delta} \frac{1}{\cos \theta} \tan^{-1} \frac{(h-q_2 \cos \theta)(Q-h) + (q_3+\zeta)h \sin \theta}{(x_1-\zeta_1)(q_3+\zeta) \cos \theta} \right] \\
 & + 4x_3 \left[\frac{(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)(q_3+\zeta) + 2q_2 \cos \theta \sin \theta}{Q(Q+x_1-\zeta_1)} + \frac{(x_1-\zeta_1) \sin^2 \theta}{Q(Q+q_3+\zeta)} \right], \quad (21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 8\pi \frac{u_3}{\Delta U_d} = & \sin \theta \left\{ (x_2-\zeta_2) \left[\frac{4\delta}{1+\delta} \frac{(x_3-\zeta_3)}{R(R+x_1-\zeta_1)} + \frac{4}{1+\delta} \frac{(x_3-\zeta_3)}{Q(Q+x_1-\zeta_1)} \right. \right. \\
 & - \frac{8\delta}{1+\delta} \zeta_3 x_3 (x_3+\zeta_3) \frac{(2Q+x_1-\zeta_1)}{Q^3(Q+x_1-\zeta_1)^2} \left. \right] \\
 & - 4 \frac{1-\delta}{\delta} \tan^{-1} \frac{(x_1-\zeta_1)(x_2-\zeta_2)}{(h+x_3+\zeta_3)(Q+h)} \\
 & + 2 \tan^{-1} \frac{(x_1-\zeta_1)(r_3-\zeta)}{r_2 R} - \frac{2}{\delta} \tan^{-1} \frac{(x_1-\zeta_1)(q_3+\zeta)}{q_2 Q} \left. \right\} \\
 & + \cos \theta \left\{ 2 \frac{1-\delta}{1+\delta} \ln(R+x_1-\zeta_1) - 2 \frac{1-\delta}{1+\delta} \ln(Q+x_1-\zeta_1) \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{4\delta}{1+\delta} \frac{(x_3 - \zeta_3)^2}{R(R + x_1 - \zeta_1)} - \frac{4}{1+\delta} \frac{[(x_3 + \zeta_3)^2 - 2\delta\zeta_3x_3]}{Q(Q + x_1 - \zeta_1)} \\
& - \frac{8\delta}{1+\delta} \zeta_3x_3(x_3 + \zeta_3)^2 \frac{(2Q + x_1 - \zeta_1)}{Q^3(Q + x_1 - \zeta_1)^2} \Big\} \\
& + 4x_3 \left\{ \cos\theta \sin\theta \left[\frac{2(q_3 + \zeta)}{Q(Q + x_1 - \zeta_1)} + \frac{(x_1 - \zeta_1)}{Q(Q + q_3 + \zeta)} \right] \right. \\
& \left. - q_2 \frac{(\sin^2\theta - \cos^2\theta)}{Q(Q + x_1 - \zeta_1)} \right\}. \quad (22)
\end{aligned}$$

其中,常数 δ 和拉梅常数以及泊松比 σ 有如下的关系:

$$\delta = \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 3\mu} = \frac{1}{3 - 4\sigma}. \quad (23)$$

(17)–(22) 式的右边诸项,均要代入二重积分的上、下限,即:

$$[f(\zeta_1, \zeta)] = f(L, D) - f(L, d) - f(-L, D) + f(-L, d). \quad (24)$$

当拉梅常数 $\lambda = \mu$ 即 $\delta = 1/2$ 时, (17)–(22) 式退化为曼新哈和斯迈里的结果^[27]; 当 $\lambda = \mu$ 且 $\theta = \pi/2$ 时,若观测点在地面上(即 $x_3 = 0$),则它们退化为普雷斯的结果^[20].

三、断层参数对地震位移场的影响

现在根据 (17)–(22) 式的数值结果分析断层面的倾角、上界和下界对地震位移场的影响. 实际地球介质可视为泊松体,即 $\lambda = \mu$ 的介质. 计算表明,泊松比的变化对断层附近的位移场的影响不大. 图 5 以断层面出露地面 ($d = 0$) 而 $D/L = 1$ 、倾角等于 60° 的情形为例,表示当泊松比分别为 0.23 和 0.30 二种情形下当 $x_1 = x_3 = 0$ 时位移随 x_2 的变化. 由该图可见,泊松比对断层附近的位移场的影响是不大的. 考虑到这些情况,在以下的数值计算中,均按泊松体情形计算.

对于走向滑动断层,在不同的倾角的情况下,水平位移 u_1 沿 x_2 轴的变化可由图 6 和图 7 看出. 图 6 表示断层出露地面 ($d = 0$) 的情形,图 7 以 $d/L = 0.1$ 为例,表示断层面上界离开地面有一定距离的情形. 这些曲线清楚地表明: 在 x_2 轴上,水平位移 u_1 的不对称性取决于 θ . 由于这个原因,沿 x_2 轴方向的测线上的水平位移 u_1 的不对称性可以用来判断断层面的倾向和确定其倾角. 当 $D/L = 1$ 时,对于断层出露地面的情形,断层面两边的位移之比 u_1^+/u_1^- 和倾角 θ 的关系如图 8 所示. u_1^+/u_1^- 随 θ 的变化比较显著,在这个例子中,大约 θ 增加 5° , u_1^+/u_1^- 减小 0.1–0.2.

图 9 表示断层面上界对地震位移场的影响. 当 $d/L = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 时,断层面上界主要影响距离断层很近 ($x_2/L < 0.2-0.5$) 的位移场;对离开断层较远的位移场虽有影响,但不显著. 而断层面下界对位移场的影响则与上界的影响不同,它的影响范围较广,但不甚显著(见图 10). 在距离断层较远的地点, x_2 轴上的水平位移 u_1 的变化情况是断层面倾角 θ 、下界 D 以及上界 d 的情况的反映. 对于 θ 和 d 固定的情形, u_1 随 x_2 的变化除了受 D 的不甚显著的影响外,还与断层的长度 $2L$ 有关. 因此,若是要从观测资料确定震源的参数,必须先设法确定断层长度,这样才有可能根据 u_1 随 x_2 的变化情况大致

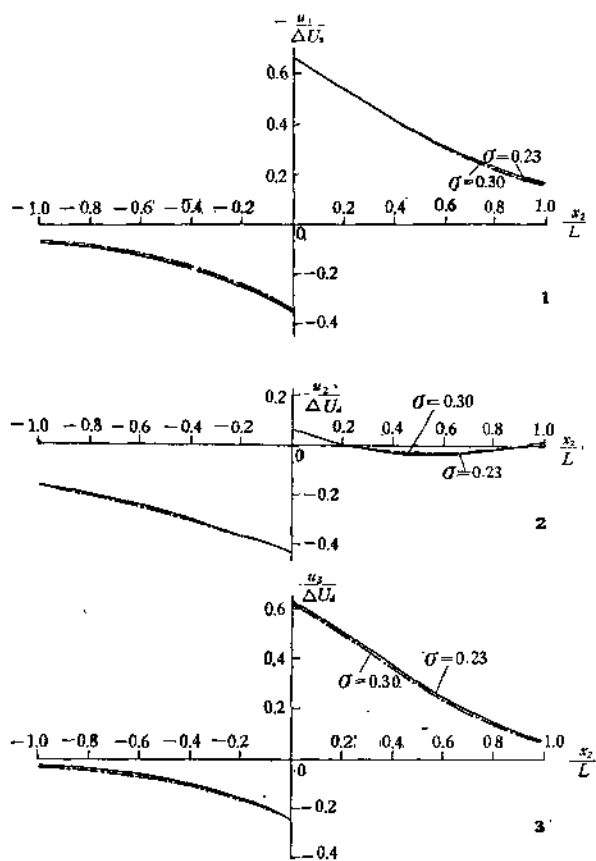
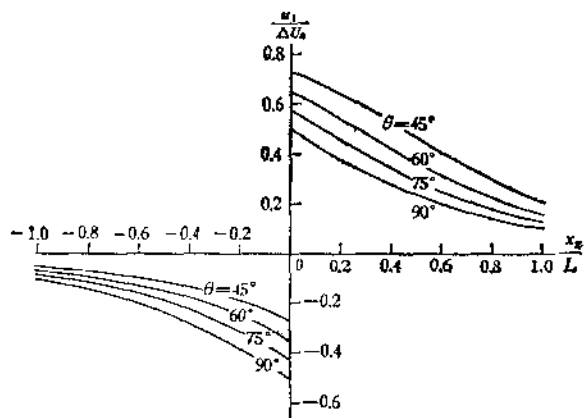


图 5 泊松比对地震位移场的影响

 $d = 0, D/L = 1, \theta = 60^\circ.$
图 6 在不同倾角的情况下, 当 $x_1 = x_3 = 0$ 时, u_1 随 x_2 的变化
 $d = 0, D/L = 1.$

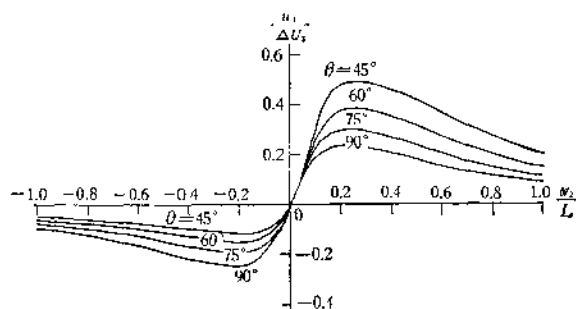


图7 在不同倾角的情况下,当 $x_1 = x_3 = 0$ 时, u_1 随 x_2 的变化
 $d/L = 0.1, D/L = 1.$

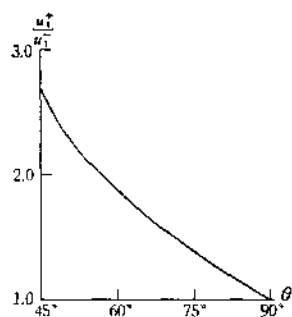


图8 断层面两侧位移之比
 u_1^+ / u_1^- 和倾角 θ 的关系
 $d = 0, D/L = 1.$

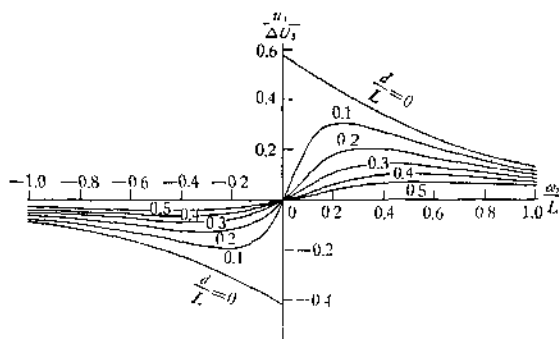


图9 断层面上界对地震位移场的影响
 $\theta = 75^\circ, D/L = 1.$

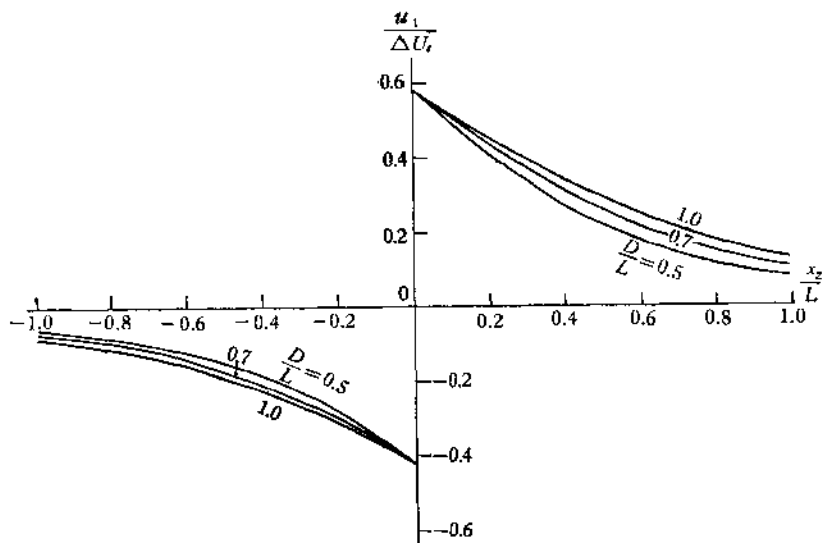


图10 断层面下界对地震位移场的影响
 $\theta = 75^\circ, d = 0.$

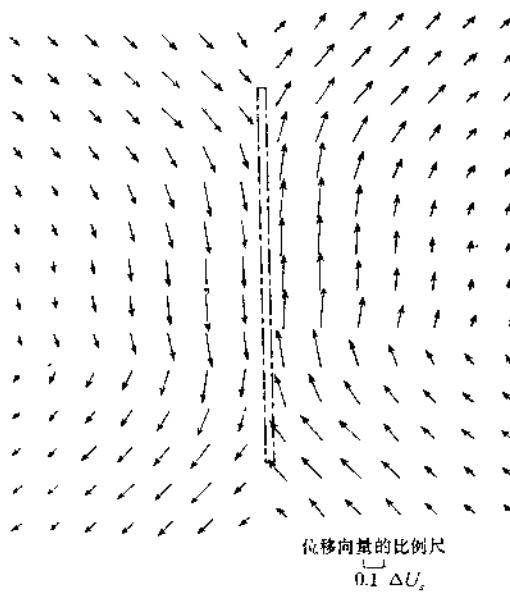


图 11-1 走向滑动断层的水平位移场
 $\theta = 85^\circ$, $d/L = 0.1$, $D/L = 0.7$.

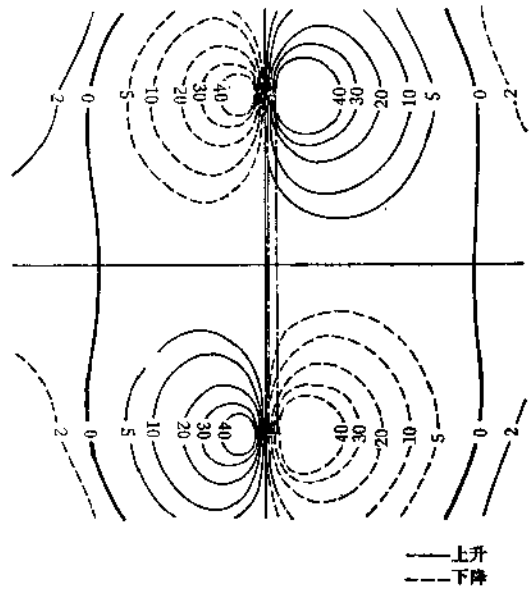


图 11-2 走向滑动断层的垂直位移场
 (单位: $10^{-3} \Delta U_s$). $\theta = 85^\circ$, $d/L = 0.1$,
 $D/L = 0.7$.

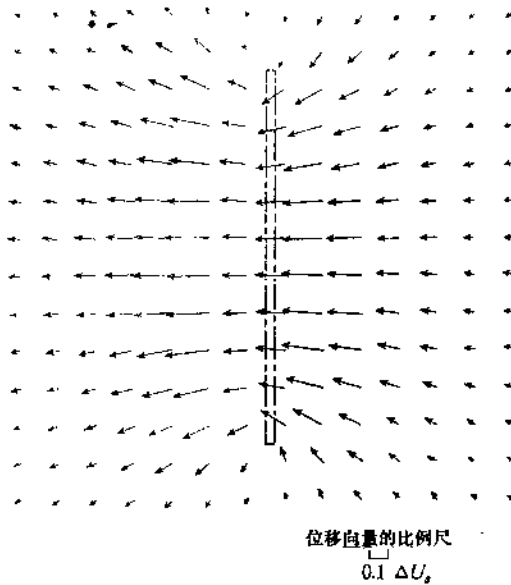


图 12-1 倾向滑动断层的水平位移场
 $\theta = 85^\circ$, $d/L = 0.1$, $D/L = 0.7$.

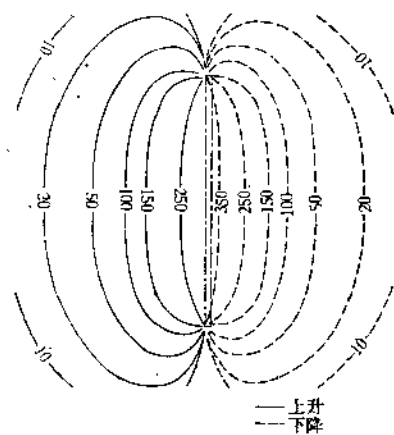


图 12-2 倾向滑动断层的垂直位移场
 (单位: $10^{-3} \Delta U_d$). $\theta = 85^\circ$,
 $d/L = 0.1$, $D/L = 0.7$.

地估计 D 。否则,许多不同 L 、 D 的组合都可大致适合观测资料,结果将很不确定。根据水平位移场、垂直位移场的形态,是有可能判断断层的类型和估计其长度的。

图 11 表示走向滑动断层的水平位移场和垂直位移场的一般图象。由图可见:(1)走向滑动断层的垂直位移场幅度不大,仅约为水平位移的十分之一;(2)断层面和地面的交线(“断层线”)的两个端点,正是水平位移向量变化最急速的地点,也是垂直位移幅度最大

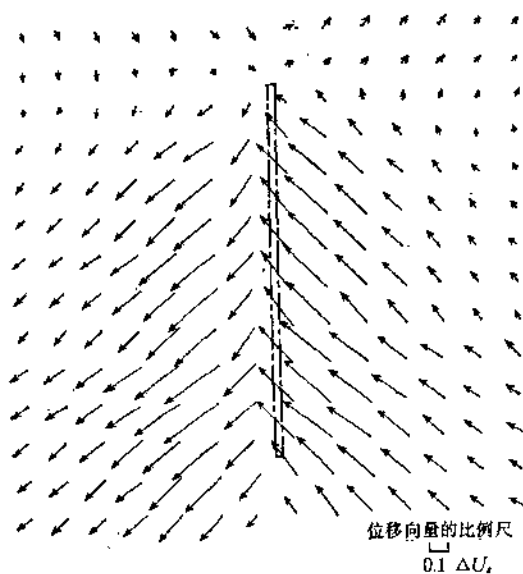


图 13-1 左旋-正断层的水平位移场
 $\theta = 85^\circ$, $d/L = 0.1$, $D/L = 0.7$, $\phi = 45^\circ$.

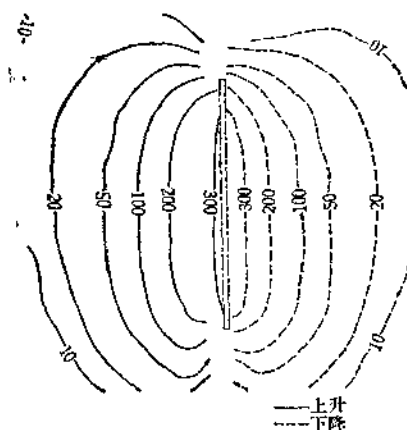


图 13-2 左旋-正断层的垂直位移场 u_z
(单位: $10^{-3} \Delta U_d$). $\theta = 85^\circ$,
 $d/L = 0.1$, $D/L = 0.7$, $\phi = 45^\circ$.

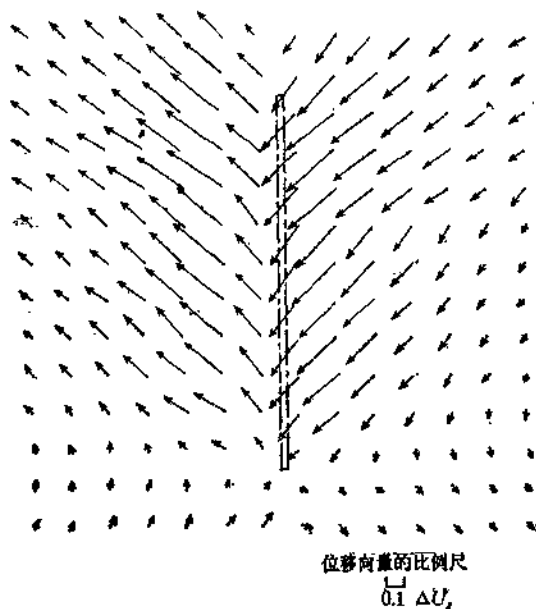


图 14-1 右旋-正断层的水平位移场
 $\theta = 85^\circ$, $d/L = 0.1$, $D/L = 0.7$, $\phi = 135^\circ$.

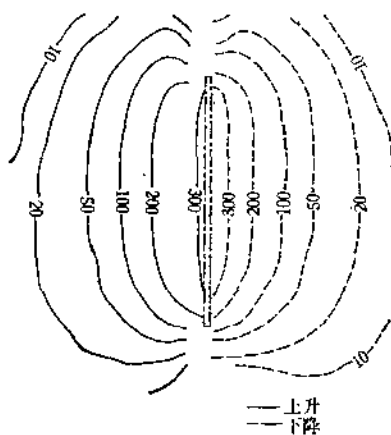


图 14-2 右旋-正断层的垂直位移场 u_z
(单位: $10^{-3} \Delta U_d$). $\theta = 85^\circ$,
 $d/L = 0.1$, $D/L = 0.7$,
 $\phi = 135^\circ$.

的地点(即垂直位移场的显著上升或下降的等值线位于“断层线”的端点附近).图 12 是倾向滑动断层的位移场的一般图象.和走向滑动断层情形不同:(1)倾向滑动断层的水平位移场的幅度和垂直位移场的幅度大约相当;(2)“断层线”的两个端点,虽然也是水平位移场的位移向量变化最急速的地点,但垂直位移场的显著上升或下降的等值线则是围绕着“断层线”.一般的滑动断层的位移场界于上述两种极端情况之间.图 13 以 $\phi = 45^\circ$ (即 $\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U/\sqrt{2}$) 为例,表示这种一般情况的位移场,它表示的是 ΔU_1 、 ΔU_2 均大于零的情形,即左旋-正断层的情形.对于这种情形,水平位移场相对于 x_2 轴不对称,在水平位移幅度增大的一侧,垂直位移场的等值线朝着某一条等值线收拢,这条等值线距离断层大约等于断层的半长度 L ;在水平位移幅度减小的一侧,则出现相反的情况:垂直位移的等值线稀疏.右旋-逆断层的情形与图 13 所示的结果恰好反号.右旋-正断层的情形见图 14.与图 13 所示相仿,只不过其水平位移幅度增大的一侧是左旋-正断层情形的水平位移幅度减小的一侧.至于左旋-逆断层,则与右旋-正断层情形反号.

四、邢台地震的断层错动模式

根据上面所得结果,我们来分析邢台地震的地面形变观测资料.试观察图 1 所示的邢台地震水平位移场,对照理论计算结果(图 11 至图 14),可以判断这个地震的断层具有右旋走向滑动性质,断层面接近于垂直,断层面的走向约束在 $N30^\circ E$ 至 $N50^\circ E$ 之间.既然垂直位移场显著上升或下降的等值线总是围绕着断层的端点(走向滑动断层)或“断层线”(倾向滑动断层),所以取下降幅度最大的两点之中点附近的一点为坐标原点.经过微小的调整,这个点取在图 16 和图 17 所示的 O 点.以 $N35^\circ E$ 的方向为 x_1 轴方向,以 $N125^\circ E$ 的方向为 x_2 轴方向,以铅垂方向为 x_3 轴方向,以显著下降地带(这里取为下降 200 毫米以下的地带)的长度(约 50 公里)作为断层长度的估计值,即取 $L = 25$ 公里.

尽管邢台地震的水平位移场显示出这个地震的断层具有断层面接近于垂直的右旋走向滑动的性质,但其垂直位移场既不具备纯粹右旋走向滑动断层的特性(见图 11-2),也不具备一般的滑动断层的特性(见图 13-2).具体地说,邢台地震垂直位移场虽然仿佛具有走向滑动断层的垂直位移场所特有的四象限分布的形态,但分析之后便可发现:(1)观测到的垂直位移场的四象限分布和走向滑动断层的垂直位移场四象限分布在形态上相差甚远(对比图 2 和图 11-2);(2)若所观测到的垂直位移场是断层面接近于垂直的走向滑动断层所产生的,那么显著上升和显著下降的幅度应大体相等,并且其数量级应约为最大水平位移的十分之一(图 10-2).但事实并非如此.尽管显著上升的幅度约为最大水平位移的十分之一,而显著下降的幅度却远远大于这个数值,和最大水平位移是同一数量级.这些观测事实表明,邢台地震的垂直位移场并不象是一个走向滑动断层的垂直位移场.

不仅如此,断层面接近于垂直的一般的滑动断层的垂直位移场在特点上也和它不同(见图 13-2).根据一般的滑动断层的垂直位移场的特点和观测到的邢台地震垂直位移场的特点,可知唯有倾角较小($\theta = 45^\circ$)和宽度较窄的、出露到地面的正断层其垂直位移场具有实际观测到的两个特点,即:显著下降地带狭窄(20 公里左右);下降幅度远大于上升幅度(大一个数量级).

一方面,水平位移场表明,邢台地震的震源应当是断层面接近于垂直的右旋走向滑动断层;另一方面,垂直位移场则表明,这个地震的震源应当是倾角较小和宽度较窄的正断层。这一表面上的矛盾意味着:邢台地震的震源具有更为复杂的特性,决非简单的断层模式所能解释,必须代之以更为复杂的断层模式。

为解决上述矛盾,更好地解释观测到的邢台地震位移场,这里提出一个复合断层模式。

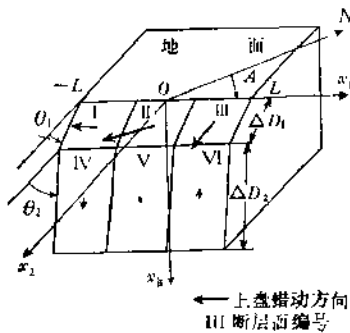


图 15 邢台地震的复合断层
错动模式

这个模式由六部分(六个简单的矩形断层)组成(图 15),其中,出露到地面的三部分是倾角较小、宽度较窄的断层,而它们下面的另外三部分则是倾角较大、宽度较大的断层。为简化起见,令每个简单断层的走向及其断层长度均相等,并令出露到地面的三部分简单断层的倾角及宽度均相等,它们下面的另外三部分简单断层的倾角及宽度也均相等。这样,待定的复合断层模式的震源参数便减少为 18 个,包括:断层面的走向 A , 断层的半长度 L , 上面三部分简单断层的倾角 θ_1 及宽度 ΔD_1 , 下面三部分简单断层的倾角 θ_2 及宽度 ΔD_2 , 还有每个简单断层的走向滑动及倾向滑动错距,它们总共有 $3 \times 2 \times 2$

$= 12$ 个。对于给定的一组参数 $(A, L, \theta_1, \theta_2, \Delta D_1, \Delta D_2)$, 上述复合断层产生的位移场是 12 个未知的走向滑动或倾向滑动错距的线性函数, 因此, 可以用最小二乘法由观测资料确定它们。为确定断层面走向等六个参数, 我们在六维参数空间 $(A, L, \theta_1, \theta_2, \Delta D_1, \Delta D_2)$ 中用网格尝试法求出使残差平方和极小的解答。残差均方根的极小值为 8.2 厘米, 相应的结果是: 断层面走向为 $N35^\circ E$, 断层总长度为 50 公里, θ_1 为 45° , θ_2 为 82° , ΔD_1 为 15 公里, ΔD_2 为 30 公里(参见图 15)。每个简单断层的走向滑动和倾向滑动错距的数值见表 2。

表 2 1966 年 3 月邢台地震群的地震断层各部分的参数

断层编号*	ΔU_r (厘米)	ΔU_d (厘米)	ΔU (厘米)	S (公里 ²)	M_0 (10^{25} 达因·厘米)	$\Delta \sigma$ (巴)	$\Delta \varepsilon$ (10^{-5})	E (10^{21} 尔格)
I	-78	2	78	250	3.2	22	3.3	0.21
II	-134	50	143	250	5.9	42	6.4	1.79
III	-17	88	90	250	3.7	33	5.0	3.54
IV	2	24	24	500	2.0	5	0.8	0.26
V	-3	-5	6	500	0.5	1	0.2	0.01
VI	1	-23	23	500	1.9	4	0.6	0.24

* 断层编号情况参见图 15。

图 16 是根据上面确定的断层参数计算出的水平位移向量的理论值, 图中的六个矩形是复合断层的六个部分在地面上的投影。计算结果表明, 理论值与观测值符合尚好, 这意味着所采取的复合断层模式能够说明地面上观测到的水平位移场。

图 17 是按上面确定的断层参数计算出的垂直位移场的理论等值线图。与图 2 对比, 可以看到理论计算结果和实际观测结果都具有以下特征: (1) 有两个下降幅度最大的中

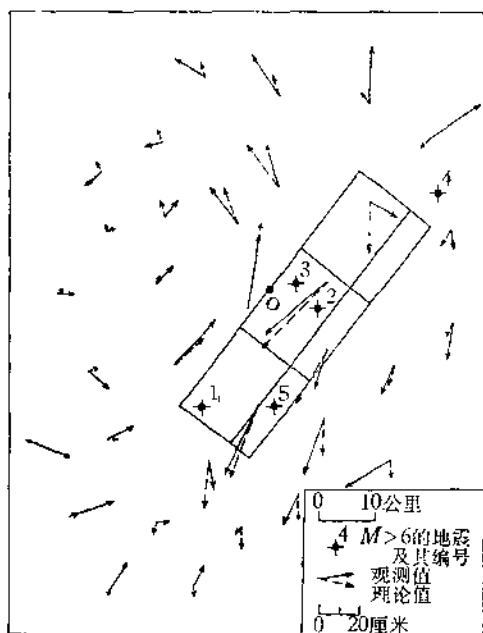


图 16 邢台地震前后地面水平形变的观测值和按图 15 所示的复合断层模式计算的理论值比较

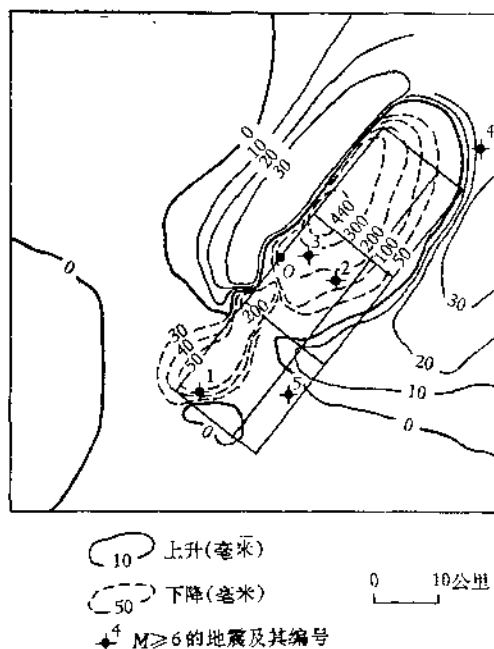


图 17 按图 15 所示的复合断层模式计算的邢台地震前后地面垂直形变的理论等值线图

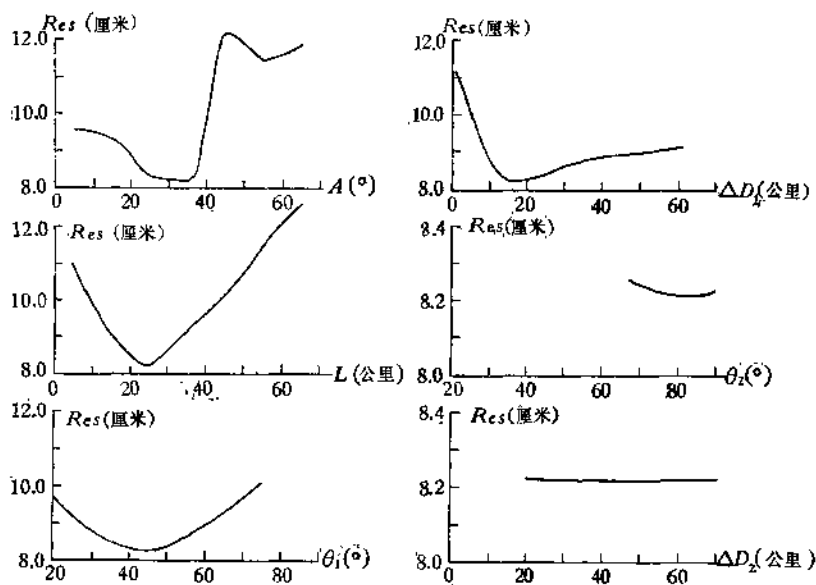


图 18 残差的均方根随诸参数的变化情况

心; (2)长约 60 公里、宽约 20 公里的下降带; (3)垂直位移的等值线在形态上大体一样。这说明所采取的复合断层模式可以较好地解释地面上观测到的垂直位移场。

图 18 给出了残差均方根 Res 随 A 、 L 、 θ_1 、 θ_2 、 ΔD_1 和 ΔD_2 诸参数的变化情况。它表明, 残差的均方根随断层面的走向 A 、断层长度 $2L$ 、复合断层上部的倾角 θ_1 和宽度 ΔD_1 的变化较大, 而随复合断层下部的倾角 θ_2 和宽度 ΔD_2 变化甚微。换句话说, 地面形变场的观测资料可以用来有效地测定断层面走向、长度、近地面的那部分断层的倾角和宽度, 而不适宜用来测定距地面较深的那部分断层的倾角和宽度。因此, 这里确定出的诸震源参数中, 走向、长度、复合断层上部的倾角及宽度是有一定代表意义的, 而复合断层下部的倾角和宽度则只是一个极粗略的估计。

尽管由理论模式计算出的水平位移场和垂直位移场总的说来与观测结果符合尚好, 但并不完全一致。主要表现为: (1)理论计算的垂直位移场虽然也有两个显著下降中心, 并且其幅度与观测到的两个显著下降中心的幅度极为接近, 但南边的那个下降中心的位置, 计算结果和观测到的彼此距离较远。(2)理论计算结果和图 1 所示的观测到的水平位移场尽管大体符合, 但在坐标原点东北边和西南边, 理论值与观测值差异较大。东北边的观测点有明显的朝北东方向的位移, 西南边的观测点也有明显的朝北东方向的位移, 位移幅度远远超过测量误差。这两点不一致的地方是值得注意的, 它表明, 这里提出的复合断层模式虽然基本上能够反映邢台地震的地震断层的情况, 但仍有一定的缺点, 有待进一步改进, 以求使理论结果更符合观测事实。

五、邢台地震的地震矩、应力降、应变降以及它所释放的能量

在上面所得结果的基础上, 可以对邢台地震的地震矩、应力降、应变降以及它所释放的能量等震源参数作一估计。

地震矩由下式定义:

$$M_0 = \mu \Delta U S, \quad (25)$$

式中, μ 是刚性系数, 取 $\mu = 3.3 \times 10^{11}$ 达因/厘米²; ΔU 是平均错距, S 是断层面总面积。断层各部分的地震矩见表 2。

对于宽度为 $2a$ 的倾向滑动断层, 应力降 $\Delta\sigma$ 为^[19]:

$$\Delta\sigma = \mu \frac{(\lambda + \mu)}{(\lambda + 2\mu)} \frac{U_m}{a}, \quad (26)$$

而对于走向滑动断层, 应力降为^[20]:

$$\Delta\sigma = \frac{\mu U_m}{2a}. \quad (27)$$

以上两式中, U_m 表示断层面的最大错距。对于倾向滑动断层, U_m 和平均错距 ΔU_d 有如下关系^[21]:

$$U_m = \frac{4}{\pi} \Delta U_d; \quad (28)$$

而对于走向滑动断层, 由参考资料 [20] 可以求得 U_m 和 ΔU_d 也有和 (28) 式同样的关系。

这样, 根据以上几个公式, 可以计算出复合断层各部分的应力降 $\Delta\sigma$, 表 2 列出了计算结果, 它们是走向和倾向方向应力降的向量和。

由应力降和应变降 $\Delta\varepsilon$ 的关系

$$\Delta\sigma = 2\mu\Delta\varepsilon \quad (29)$$

可以算出应变降, 结果见表 2。

长度为 $2L$ 的滑动断层在地震时释放的能量由参考资料 [19]、[20]、[22] 可以求得:

$$E = \frac{8}{\pi} \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu} \mu L \Delta U_d^2 f(\gamma), \quad (\text{倾向滑动}) \quad (30)$$

$$E = \frac{4}{\pi} \mu L \Delta U_d^2 f(\gamma), \quad (\text{走向滑动}) \quad (31)$$

其中,

$$f(\gamma) = \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma}, \quad (32)$$

$1 - \gamma$ 为分数应力降。若这次地震是百分之百应力降, 那么 $\gamma = 0$, 这样可以求得各部分释放的能量, 结果见表 2。一般情况下, $0 < \gamma < 1$, 所以表 2 所列的数值只能作为邢台地震时断层各部分所释放能量的下限的一个估计。它们的总和就是这次地震所释放的总能量的下限, 估计为 6.1×10^{22} 尔格。

六、对邢台地震震源过程的几点认识

(一) 破裂扩展方式

1966 年 3 月 8 日河北隆尧地震(表 1 所列的第一个地震), 其震源位置是在上面求出的地震断层南端, 而 1966 年 3 月 22 日河北宁晋 6.7 级和 7.2 级地震(表 1 的第二个和第三个地震), 其震源位置在断层的中部(图 16), 这是值得注意的。3 月 8 日隆尧地震发生后, 立即进行了重复水准测量, 其垂直形变见图 19。按照前面叙述过的方法, 确定了这次地震的震源参数, 结果是: 断层面走向为 $N35^\circ E$, 断层长度为 17 公里, θ_1 为 45° , θ_2 为 82° , ΔD_1 为 15 公里, ΔD_2 为 30 公里。其它参数的数值如表 3 所示。值得注意的是, 在

表 3 1966 年 3 月 8 日河北隆尧地震的断层参数

断层编号	ΔU_x (厘米)	ΔU_y (厘米)	ΔU (厘米)	S (公里 ²)	M_0 (10^{25} 达因·厘米)	$\Delta\sigma$ (巴)	$\Delta\varepsilon$ (10^{-5})	E (10^{22} 尔格)
I	50	13	52	250	2.1	15	4.5	0.16
IV	-2	18	18	500	1.5	3	1.0	0.15

第 I 部分的简单断层上, 3 月 8 日的走向滑动方向和整个复合断层的滑动方向相反, 而倾向滑动错距大于在第 I 部分简单断层上的总错距, 显示出第 I 部分断层的错动方向在 3 月 8 日地震时是左旋-正断层性质, 而在 3 月 22 日地震时则是右旋-逆断层性质。图 20 是由上述震源参数计算得到的 3 月 8 日隆尧地震的垂直形变的理论等值线图。对比图 19 和图 20, 可见理论计算和观测结果符合尚好。根据以上结果, 考虑到由地震记录确定的

震源位置代表了初始破裂的地点,那么,可以推测,3月8日隆尧地震是从地震断层的南端发动,主要向东北方向扩展,其破裂方式可近似地当作单侧破裂方式.类似地,1966年3月22日河北宁晋的6.7级和7.2级地震的破裂方式也是单侧破裂方式,它们是在3月8日隆尧地震引起的应力场调整的基础上,接着3月8日的破裂过程,以更大的规模继续向东北方向破裂.上述推测如果确切,那么单侧破裂扩展方式(更确切点说,可能是两侧不对称的双侧破裂方式)将对所辐射的地震波产生调制效应,而这可以通过对地震图的分析加以证实,并确定与此有关的震源参数.

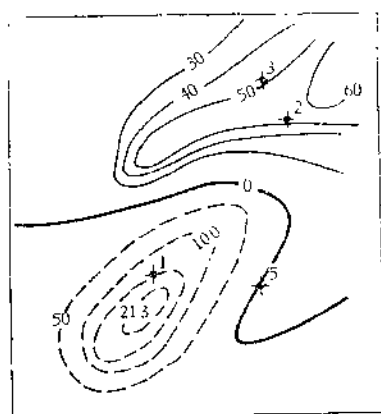


图 19 1966 年 3 月 8 日河北隆尧地震的垂直形变图

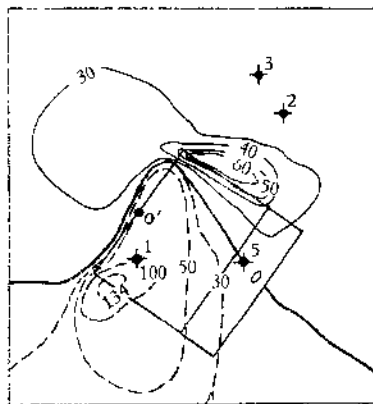


图 20 1966 年 3 月 8 日河北隆尧地震的垂直形变的理论等值线图

(二) 邢台地震群的时-空分布特点

邢台地震群的两个最大的前震和主震均发生在上面确定的断层上,而两个最大的余震则发生在其端部和附近,并具有比前震和主震略深的震源深度.这种空间分布的特点也许并非偶然.我们推测,这两个最大的余震可能是和上面确定的地震断层下面那部分的端部的错动相联系的.在两次前震和主震发生之后,震源区的应力场起了很大变化,促使或触发了端部的地震断层错动,发生余震.

上述邢台地震群的时-空分布特点究竟有无代表意义,需要在对其它地震进行广泛研究并对邢台地震进一步作研究之后才有可能看出.

(三) 形变速率和地震危险性的估计

邢台地震区从1920年起就开始进行水准测量,到1966年3月8日地震前,共进行过四次测量.测量结果表明这个地区在近半个世纪以来有一个长趋势的下降运动,下降速率约为5毫米/年.以这个数据作为这个地区地壳块体相对运动速度的垂直分量的估计值.设想这个地震群的发生是因为在胶结较牢的部位逐渐积累起来的应变的突然释放.以每年5毫米的相对运动速率积累起88厘米的倾向滑动错距,约需176年.考虑到每年5毫米的相对运动速率是这次大地震之前近半个世纪的平均速率,它可能比长期的平均